



TRABAJO FINAL INTEGRADOR

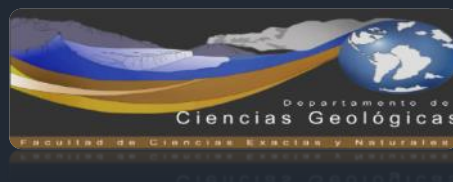
Título: Propuesta para la prospección de
acuíferos mediante Tomografía de Resistividad
Eléctrica en la mina de Fe-Ni “Loma de
Níquel”, Miranda-Venezuela.

Autor

Ing.Geof. Benjamín Alfonso Mujica Ramírez

Director: Dr. Carlos Jorge Chernicoff

2022



Universidad de Buenos Aires - Facultad de Ciencias Exactas y
Naturales. Departamento de Ciencias Geológicas.

Carrera de Especialización en Geología Minera

Trabajo Final Integrador

Propuesta para la prospección de acuíferos mediante Tomografía
de Resistividad Eléctrica en la mina de Fe-Ni “Loma de Níquel”,
Miranda-Venezuela.

*Proposition for the prospecting of aquifers using Electrical Resistivity
Tomography in the Fe-Ni mine “Loma de Níquel”, Miranda-Venezuela*

Autor: Ing.Geof. Benjamín Alfonso Mujica Ramírez

Director: Dr. Carlos Jorge Chernicoff

TFI. Res: XXXXXXXX

Año 2022



RESUMEN

La mina Loma de Níquel está emplazada en la Faja de Loma de Hierro, ubicada en la Serranía del Interior de la Cordillera de la Costa venezolana, entre los Estados Aragua y Miranda. Esta mina fue explotada por la compañía Anglo American desde el año 1997 bajo la denominación de compañía Minera Loma de Níquel (MLDN), hasta que, en el año 2012, en el marco de un movimiento anti-minero encabezado por la comunidad de Tiara ubicada próxima a la mina, le fue rescindida la concesión por parte del Estado venezolano, cesando operaciones un año más tarde.

Desde el año 2017, el Estado venezolano ha mostrado interés en reactivar la explotación de ferroníquel en la mina. Sin embargo, previo a la reactivación de operaciones, aún son necesarios varios estudios, en especial la prospección de posibles acuíferos en la zona de explotación.

El presente Trabajo Final Integrador tuvo como objetivo principal generar una propuesta de estudio de campo utilizando el método de tomografía de resistividad eléctrica, para la prospección de acuíferos fracturados, tras un análisis del contexto geológico-estructural de la región. Con este fin, partiendo del análisis hidrogeológico de imágenes multiespectrales Landsat y Sentinel, así como de RADAR del proyecto PALSAR, se generaron un total de 16 perfiles en distintas zonas del área de explotación, así como se plantearon métodos de prospección complementarios.

Además, en el marco de la Licencia Social y el Desarrollo Sustentable, se hizo un análisis del conflicto minero comunidad de Tiara-Loma de Níquel, con base a las acciones llevadas a cabo entre los tres agentes del conflicto: Anglo American, el estado venezolano y las comunidades aledañas a la mina; con el fin de generar propuestas para mitigar los distintos impactos sufridos, no solo durante el periodo de operación de la mina entre los años 1997 y 2012, sino también tras su cierre.

Con este propósito, se estudió el Reporte Social de MLDN del año 2012, donde Anglo American reportó los objetivos, proyectos y resultados de su Plan de Compromiso con la Comunidad 2008-2011, así como también se realizó un análisis del marco legal que regula la minería en Venezuela y un análisis de los procesos operativos de la mina. Finalmente, se generaron propuestas referentes a la mitigación de los impactos ambientales y socioeconómicos sufridos por la comunidad, con miras a la posible reapertura de operaciones en la mina y lo que esto podría significar en un contexto social y económico, culminando con una serie de conclusiones y recomendaciones derivadas de los resultados obtenidos.

Palabras clave: acuífero, tomografía de resistividad eléctrica, imágenes multiespectrales, imágenes de radar, licencia social, desarrollo sustentable.



ABSTRACT

The mine “Loma de Níquel” is nestled in the “Loma de Hierro” belt, located in the “Serranía del Interior” of the Venezuelan “Coordillera de la Costa” mountain chain, in between the Aragua and Miranda states. This mine was exploited by the mining company Anglo American since 1997, under the denomination of “Minera Loma de Níquel” (MLDN); until, in 2012, in the context of an anti-mining movement headed by the community of Tiara, located close to the mine, their concession was rescinded by the Venezuelan State, ceasing operations one year later.

Since 2017, the Venezuelan State has shown interest in reactivating the extraction of iron-nickel in the mine. However, before the resumption of operations, many studies are still necessary; in particular, the prospection of possible aquifers located in the mineral extraction zone of the mine.

This “Trabajo Final Integrador” had as its main objective to generate a field study proposition using electrical resistivity tomography for the prospection of fractured aquifers, after an analysis of the geological and structural context of the region. With this goal, starting with the hydrogeological analysis of Landsat and Sentinel multispectral images, as well as RADAR images from the PALSAR project; a total of 16 profiles were generated in different locations on the extraction area of the mine, and complementary prospection methods were also proposed.

Also, in the context of Social License and Sustainable Development, an analysis was made of the Tiara-Loma de Níquel conflict, based on the actions carried out between the three agents of the conflict: Anglo American, the Venezuelan State and the communities neighboring the mine; with the purpose of generating propositions for the mitigation of the different impacts suffered, not only during the operational period of the mine between 1997 and 2012, but also after its closure.

With this goal in mind, a study was made of the “Reporte Social de MLDN” of 2012, where Anglo American commented on the objectives, projects, and results of their “Plan de Compromiso con la Comunidad 2008-2011”, as well as an analysis of the legal framework that regulates mining operations in Venezuela, and an analysis of the operational processes of the mine. Finally, propositions were generated referring to the mitigation of the environmental and socioeconomic impacts suffered by the community, with a view towards the restart of operations in the mine and what this could mean in a social and economic context; culminating with a series of conclusions and recommendations based on the obtained results.

Keywords: aquifer, electrical resistivity tomography, multispectral images, radar images, social license, sustainable development.

**UBA**Universidad de Buenos Aires
*Argentina virtus robur et studium**Especialización en Geología Minera*
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios y a la Virgen María ya que no solo de pan vivimos y sin su guía y cuidado no sería el profesional, ni el ser humano, que soy.

Agradezco a mis padres, Benjamín Alfredo Mujica Rodríguez (Q.E.P.D.) y Ana María Ramírez de Mujica, ya que, gracias a su apoyo, cariño, fe y ejemplo, me han impulsado y guiado a lo largo de esta especialización y de mi vida entera.

Agradezco a la prestigiosa Universidad de Buenos Aires por la oportunidad de formar parte de esta institución en calidad de estudiante y a los directivos y profesores del Departamento de Ciencias Geológicas de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, por la atención y el conocimiento invaluable que me han aportado como profesional.

Agradezco especialmente a mi tutor el Dr. Carlos Jorge Chernicoff por su guía y consejo a lo largo de este trabajo y a la Prof^a. Liliana Castro por la ayuda constante que me ha brindado desde el momento que le expresé mi deseo de cursar esta especialización.

Finalmente, agradezco a mis compañeros que también han hecho de este tiempo una experiencia placentera y por los conocimientos y experiencias que hemos compartido.

A todos, ¡Muchas Gracias!



Índice de Contenido

INTRODUCCIÓN.....	13
OBJETIVOS	15
MATERIALES Y MÉTODOS	16
3.1 Fase 1: Búsqueda y compilación de la información bibliográfica	16
3.2 Fase 2: Compilación del material referente a campañas prospección geofísica realizadas en el área de Loma de Níquel	16
3.3 Fase 3: Análisis e Interpretación de la información recopilada	17
3.4 Fase 4: Elaboración de los objetivos planteados y producción del manuscrito del Trabajo Final Integrador.	17
MARCO GEOLÓGICO	18
4.1 Área de Estudio.....	18
4.1.1 Ubicación de la Faja de Loma de Hierro y la mina Loma de Níquel.....	18
4.1.2 Subdivisión operativa de la Mina Loma de Níquel.....	19
4.1.3 Topografía y Vegetación.....	20
4.1.4 Clima	21
4.1.5 Hidrografía.....	21
4.2 Geología Regional	22
4.2.1 Sistema Montañoso del Caribe y la Cordillera de la Costa	22
4.2.2 Modelos de la formación y evolución del Caribe	23
4.2.3 El Caribe y la formación de la Cordillera de la Costa	25
4.2.4 El Modelo Pacífico para la Cordillera de la Costa	28
4.3 Geología Local.....	33
4.3.1 Faja de Loma de Hierro.....	33
4.3.2 El yacimiento de Loma de Hierro	35
MARCO TEÓRICO	37
5.1 Prospección Geofísica	37
5.2 Métodos Eléctricos.....	37
5.2.1 Métodos de resistividades	38
5.3 Percepción Remota	45
5.3.1 Principios Físicos de la Percepción Remota.....	45



5.3.2 Sensores Remotos	48
5.3.3 Diseño de Órbita	54
5.4 Sistemas de Información Geográfica	55
5.4.1 Raster	56
5.4.2 Vector	56
5.4.3 Dirección de Flujo	56
5.4.4 Cuenca	56
5.4.5 Zona de captación	56
5.4.6 Red de Canales	56
5.5 Cuenca Hidrográfica	57
5.6 Hidrogeología	57
5.6.1 Acuífugo	57
5.6.2 Acuicludo	58
5.6.3 Acuífero	58
5.7 Estructuras relevantes para la zona de estudio	59
5.7.1 Fracturas	59
5.8 Laterita	61
5.8.1 Laterita Niquelífera	62
5.8.2 Formación de los depósitos de laterita niquelífera	63
5.8.3 Geoquímica de los depósitos de laterita niquelífera	64
5.8.4 Petrología de los depósitos de laterita niquelífera	65
5.8.5 Clasificación de los depósitos de laterita niquelífera	67
5.9 Minería a Cielo Abierto	68
5.9.1 Minería por el método de terrazas	69
5.9.2 Diseño de la explotación mineral en la mina Loma de Níquel	70
5.10 Procesamiento mineral en la mina Loma de Níquel	71
5.10.1 Preparación Mecánica	71
5.10.2 Calcinación	72
5.10.3 Reducción y Fusión	73
5.10.4 Refinación	73
5.10.5 Granulación	73



5.11 Ambiente y Medio Ambiente.....	74
5.12 Desarrollo sustentable	75
5.13 Gestión ambiental.....	75
5.13.1 <i>Herramientas de gestión ambiental.....</i>	76
5.14 Efecto Ambiental e Impacto Ambiental.....	76
5.14.1 <i>Tipos de impactos ambientales</i>	77
5.15 Licencia Social	79
5.15.1 <i>Componentes de la Licencia Social para Operar</i>	79
5.15.2 <i>Retos principales para obtener la Licencia Social para Operar</i>	80
MARCO JURÍDICO.....	82
6.1 Marco Jurídico de la actividad minera en Venezuela	82
6.1.1 <i>Ley de Minas</i>	82
6.1.2 <i>Ley de Diversidad Biológica.....</i>	83
6.1.3 <i>Ley sobre Sustancias, Materiales y Desechos Peligrosos</i>	84
6.1.4 <i>Ley Orgánica del Ambiente</i>	85
6.1.5 <i>Ley de Aguas.</i>	89
6.1.6 <i>Ley Penal del Ambiente.....</i>	91
6.1.7 <i>Normas para Regular la Afectación de los Recursos Naturales Renovables Asociadas a la Exploración y Extracción de Minerales.</i>	92
METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA GENERACIÓN DE PRODUCTOS	95
7.1 Compilación de imágenes de prospección remota.....	95
7.1.1 <i>Plataforma Landsat 8.....</i>	95
7.1.2 <i>Plataforma Sentinel 2</i>	97
7.1.3 <i>Plataforma ALOS-PALSAR</i>	98
7.2 Análisis de imágenes satelitales.....	100
7.2.1 <i>Combinación de bandas.....</i>	101
7.2.2 <i>Clasificación de imágenes</i>	103
7.3 Análisis de modelos de elevación digital	111
7.3.1 <i>Identificación de redes de drenaje y cuencas hidrográficas</i>	111
7.3.2 <i>Identificación de lineamientos y sus intersecciones.....</i>	112
7.4 Generación de mapas.....	121
7.4.1 <i>Mapa hidrogeológico.....</i>	121



7.4.2 Mapa hidrográfico	121
7.4.3 Mapa de lineamientos e intersecciones.....	122
7.4.4 Mapa de clasificación de terrenos	122
7.5 Planteamiento de perfiles de Tomografía de Resistividad Eléctrica	122
7.5.1 Análisis de la zona de estudio	122
7.5.2 Selección de la modalidad TRE.....	123
7.6 Análisis del conflicto Tiara-Loma de Níquel	124
RESULTADOS	125
8.1 Condiciones de la Mina Loma de Níquel.....	125
8.2 Trasfondo Legal.....	125
8.3 Análisis previo al planteamiento de campo	125
8.3.1 Distribución de terrenos en la mina	126
8.3.2 Análisis geomorfológico y topográfico	128
8.4 Planteamiento de perfiles de Tomografía de Resistividad Eléctrica	129
8.5 Métodos de prospección complementarios	133
8.6 Análisis del conflicto Tiara-Loma de Níquel	135
8.6.1 Etapas históricas del conflicto.....	135
8.6.2 Detalles del conflicto.....	138
8.6.3 Impactos negativos sufridos	139
8.6.4 Referencias legales.....	140
8.6.5 Análisis de los impactos y su gestión por MLDN.....	141
8.7 Propuestas en el marco de la Licencia Social y el Desarrollo Sustentable.....	145
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	150
BIBLIOGRAFÍA.....	152
ANEXO 1: TABLA DE ABREVIATURAS	157
ANEXO 2: PASOS SEGUIDOS POR EL PLUGIN SACP EN EL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	157



Índice de Figuras

Fig 1. Ubicación geográfica del yacimiento de Loma de Hierro donde se encuentra la mina Loma de Níquel. Tomado de Birbe (2009).	18
Fig 2. Mapa geográfico de la zona de estudio.....	19
Fig 3. Imagen satelital de la mina Loma de Níquel.....	19
Fig 4. Ubicación de los sectores de explotación del yacimiento. Tomado de Birbe (2009).....	20
Fig 5. Mapa de cuencas hidrográficas y redes de drenaje de la región.	22
Fig 6. Sistema Montañoso del Caribe. Modificado de Ostos et al. (2005).	22
Fig 7. Napas Tectónicas de la Serranía del Interior Región Central. Tomado de Birbe (2009).	23
Fig 8. Interpretación de Freeland & Dietz (1972) de la ruptura del supercontinente previo, para formar el espacio ocupado por el Caribe. Tomado de Urbani (2018 a).....	24
Fig 9. Interpretación del origen del Caribe de SYKES et al. (1982). Tomado de Urbani (2018 a).	25
Fig 10. Mapa tectónico del Caribe según Mattson (1984). Tomado de Urbani (2018 a).....	25
Fig 11. Modelo de evolución de la Cordillera de la Costa en el marco de la Tectónica de Placas en el Cretácico medio, según Talukdar & Loueiro (1982). Tomado de Urbani (2018 a).	26
Fig 12. Modelo de evolución de la Cordillera de la Costa y en especial de la faja de Villa de Cura con el “modelo de dos arcos” de NAVARRO (1983). A la izquierda de la línea roja, se reproduce el modelo de Talukdar & Loueiro (1982), mientras que a la derecha se representa la nueva interpretación con un segundo arco. Tomado de Urbani (2018 a).....	27
Fig 13. El Caribe en el Maastrichtiense. Modificado de Urbani (2018 a).....	30
Fig 14. Evolución del Caribe en el Eoceno Medio. Modificado de Urbani (2018 a).	30
Fig 15. Sección del emplazamiento de la napa de Villa de Cura (Serranía del Interior). Modificado de Urbani (2018 a).....	31
Fig 16. Evolución del Caribe en el Oligoceno temprano. Nota: NOAM- Norteamérica, SOAM- Suramérica. Modificado de Urbani (2018 a).	31
Fig 17. Mapa de fallas cuaternarias más relevantes de Venezuela. Tomado de Urbani (2018 a). ...	32
Fig 18. Sección generalizada de la Cordillera de la Costa en el meridiano de Caracas, con la ubicación del emplazamiento de la Faja de Loma de Hierro. Tomado de Urbani (2018 a).....	32
Fig 19. Mapa geológico de la zona de estudio.	33
Fig 20. Corte vertical mostrando los niveles del yacimiento Loma de Hierro. Tomado de Birbe (2009).	36



Fig 21. Meteorización en la mina Loma de Níquel. Tomado de Ochoa et al. (2011).	36
Fig 22. Rangos de resistividad típicos para algunos minerales comunes, tipos de roca y materiales superficiales. Tomado de Dentith et al. (2014).	39
Fig 23. Ejemplo de un perfil de resistividad TRE en una dolomía. La línea amarilla representa la superficie de contacto de la dolomía. Modificado de Cheng et al. (2019).	40
Fig 24. Esquema de la toma de datos en campo con la modalidad dipolo-dipolo. Modificado de Octova et al. (2016).	41
Fig 25. Procedimiento para la inversión en 2D de resistividad. Modificado de Kirsch (2009).	43
Fig 26. Resistividades computadas de las respuestas de modelos de conductividad 2D simples partiendo de un arreglo dipolo-dipolo. Modificado de Dentith (2014).	44
Fig 27. Planteamiento de campo de dos perfiles TRE con un tercer perfil de anclaje.	45
Fig 28. Curvas de respuestas espectral de algunas superficies. Modificado de Singhal et al. (2010).	46
Fig 29. Distribución espectral de la energía irradiada por cuerpos negros de varias temperaturas. Modificado de Lillesand et al. (2015).	47
Fig 30. a Radiación solar retro dispersada (ideal) y radiación de cuerpo negro de la tierra, b ventanas atmosféricas, c espectro EM y nomenclatura. Modificado de Singhal et al. (2010).	48
Fig 31. Forma general de datos de imágenes multiespectrales. Modificado de Lillesand et al. (2015).	49
Fig 32. Dependencia de la resolución azimutal (R_a) del ancho del haz (β) y el rango de inclinación (SR) de la antena. Modificado de Lillesand et al. (2015).	52
Fig 33. (izquierda) Concepto de un arreglo de antenas reales formando una apertura sintética. (derecha) Variación con la distancia de la resolución espacial de apertura real (a) respecto a la apertura sintética (b) de sistemas de imágenes por RADAR. Modificado de Lillesand et al. (2015). ..	54
Fig 34. Capas de información de un sistema de información geográfica. Modificado de USGS (2022).	55
Fig 35. (Izquierda) diagrama de esfuerzos de distintas fracturas. (Derecha) Formación de cuatro grupos de fracturas en el caso de un estrato. Modificado de Singhal et al. (2010).	61
Fig 36. Distribución de lateritas a nivel mundial. Modificado de Persons et al. (1970).	61
Fig 37. Laterita. (A) Zona limonítica constituida principalmente por goethita y hematita. (B) Zona saprolítica dominada por serpentina, serpentina rica en Ni y "garnieritas". Modificado de Proenza (2015).	62



Fig 38. Perfil de una laterita niquelífera con la composición mineralógica de las capas sucesivas. Modificado de Paquet et al. (1997).....	65
Fig 39. Depósito de laterita tipo silicato hidratado. Tomado de Proenza (2015).	67
Fig 40. Depósito de laterita tipo óxido. Tomado de Proenza (2015).	68
Fig 41. Depósito de laterita tipo arcilla. Tomado de Proenza (2015).....	68
Fig 42. Explotación por bancos descendentes. Tomado de Avendaño (2014).	69
Fig 43. Sectores de explotación de la mina Loma de Níquel. Tomado de Birbe (2009).....	70
Fig 44. Diseño de los bancos de la mina Loma de Níquel en la laterita del sector 1 (derecha) y el saprolito del sector 3 (izquierda) y sus factores de seguridad. Modificado de Ochoa et al. (2011).	70
Fig 45. Diagrama de producción de ferroníquel. Tomado de Herrera (2014).	74
Fig 46. Diferencia entre un efecto y un impacto ambiental. Tomado de Garmendia et al. (2005). .	77
Fig 47. Obteniendo la Licencia Social. Modificado de http://sociallicense.com/definition.html	80
Fig 48. Imagen Landsat 8 LC08_L2SP_004053_20200411_20200822_02_T1 de la región de estudio.	96
Fig 49. Imágenes Sentinel 2B S2B_MSIL2A_20200125T145719_N0213_R039_T19PFM_20200125T171539 (derecha) y S2B_MSIL2A_20200125T145719_N0213_R039_T19PGM_20200125T171539 (izquierda).	98
Fig 50. DEM ALOS PARSAL AP_27264_FBS_F0180_RT1 y AP_27264_FBS_F0190_RT1 con límites estatales de la región de estudio.....	100
Fig 51. Combinaciones de banda Agricultura, Infrarrojo y Natural para las imágenes Landsat 8 (columna izquierda) y Sentinel 2B (columna derecha). Nota: Proyección UTM en la zona 19N. ...	102
Fig 52. Patrón espectral de absorción de diferentes minerales de Fe y las bandas de la plataforma Landsat. Modificado de Ciampanili et al. (2013).....	103
Fig 53. Cambio de resolución radiométrica de la banda 2 (Azul) de la imagen Sentinel 2B tras la recodificación. Imagen original (izquierda) y recodificada (derecha).....	105
Fig 54. Raster de entropía (izquierda) y de la primera derivada de la media de la correlación (derecha) generados a partir de la banda 2 de la imagen Sentinel 2B recodificada.	106
Fig 55. Representación gráfica de la relación espacial de los primeros dos componentes principales. Modificado de Jensen (2015).....	107
Fig 56. Ejemplo de las bandas Sentinel 2B utilizadas para su PCA: banda 2 (superior izq), banda 3 (superior der), banda 4 (medio izq), MOC1 (medio derecha) y entropía. Nota: Proyección UTM zona 19N.	109



Fig 57. Primer componente principal (PC1) de la imagen Landsat 8 (izquierda) y Sentinel 2B (derecha).	109
Fig 58. Clasificación de un pixel desconocido en una de tres clases basado en la proximidad de sus BV al centroide de cada clase. Modificado de Lillesand et al. (2015).	110
Fig 59. Subcuencas asociadas a la mina Loma de Níquel.	112
Fig 60. Ejemplo de los rasters utilizados para el PCA de la imagen Sentinel 2B. Nota: en amarillo se muestra los límites de las subcuencas hidrográficas asociadas a la mina y los polígonos representan los centros poblados en las proximidades de la mina (color rojo).	114
Fig 61. Componentes principales generados a para el análisis de lineamientos.	115
Fig 62. Lineamientos extraídos de los cuatro componentes principales.	116
Fig 63. Mapa de lineamientos extraídos de los componentes principales (morado) y fallas cuaternarias (negro).	116
Fig 64. Mapa de intersecciones.	117
Fig 65. Raster de curvatura.	118
Fig 66. Mapa de intersecciones (izquierda) e intersecciones filtradas por curvatura (derecha). ...	118
Fig 67. Mapa de intersecciones filtradas por curvatura y pendiente.	119
Fig 68. Gráfico de las distintas funciones Kernel.	120
Fig 69. Mapa de probabilidad de intersección.	121
Fig 70. Imagen Google Earth de la mina Loma de Níquel y Tiara.	123
Fig 71. Perfil de elevación del planteamiento del perfil TRE N° 7.	123
Fig 72. Clasificación de las imágenes satelitales Landsat 8 (izquierda) y Sentinel 2B (derecha). ...	126
Fig 73. Imágenes clasificadas Landsat 8 (izquierda) y Sentinel 2B (derecha) en la zona de la mina Loma de Níquel.	127
Fig 74. Combinación de bandas limonita-hematita para la imagen Sentinel 2B. Nota: Proyección UTM zona 19N.	127
Fig 75. Mapa de densidad de intersecciones en la región de la mina Loma de Níquel.	128
Fig 76. Mapa de intersecciones con clasificación de terrenos para la temporada de sequía.	129
Fig 77. Perfiles planteados para la toma de datos TRE.	130
Fig 78. Modelo de la toma de datos para una TRE utilizando la modalidad dipolo-dipolo. Modificado de Cozzolino et al. (2022).	131
Fig 79. Medidas de resistividad aparente en un perfil TRE. Modificado de Hemeda (2013).	132



Fig 80. Set de fracturas paralelas (a) y el diagrama de resistividad azimutal resultante (b). Tomado de Singhal et al. (2010).....	134
Fig 81. Compromisos de MLdN en el desarrollo sostenible. Tomado de Reporte Social MLdN (2012).	145
Fig 82. Estaciones de monitoreo ambiental de MLdN. Tomado de Reporte Social MLdN (2012)..	148

Índice de Tablas

Tabla 1. Longitudes de onda de las bandas Landsat 8 y Sentinel 2.	50
Tabla 2. Combinaciones de banda Landsat 8 y Sentinel 2.	51
Tabla 3. Frecuencia de las bandas de radar.	52
Tabla 4. Datos de la imagen multiespectral Landsat 8 utilizada.	96
Tabla 5. Datos de las imágenes multiespectrales Sentinel 2B utilizadas.	97
Tabla 6. Especificaciones del sistema PALSAR del satélite ALOS.	99
Tabla 7. Datos de las imágenes DEM ALOS-PALSAR utilizadas.	99
Tabla 8. Rangos de reclasificación de la Banda Azul Sentinel 2B.	105
Tabla 9. Cantidad de intersecciones en cada etapa de filtrado.	119
Tabla 10. Cálculo de parámetros para os perfiles TRE con la modalidad dipolo-dipolo.....	130
Tabla 11. Detalles del conflicto Tiara-Loma de Níquel.....	138
Tabla 12. Resumen de inversión social en el marco del plan de Compromiso con la Comunidad 2008-2011 (miles de Bs.F). Modificado de Reporte Social MLdN (2012).	144



INTRODUCCIÓN

Desde el siglo XII a.C., con el inicio de la Edad de Hierro, este elemento y sus distintas aleaciones se han convertido en parte indispensable del desarrollo humano hasta nuestros días. Desde sus humildes comienzos en el Oriente, la India y Europa, la explotación de hierro pronto alcanzó una escala mundial, abarcando distintas culturas y propiciando la invención de nuevos métodos para su explotación, procesamiento y empleo (Waldbaum, 1978).

El hierro se encuentra en la naturaleza principalmente en dos formas minerales oxidadas, la hematita (Fe_2O_3) y la magnetita (Fe_3O_4) (King, 2021). En el ámbito mundial cada año se explotan 2.500.000 toneladas de mineral de hierro, siendo los mayores países productores: Australia (930.000 t), Brasil (480.000 t), China (350.000 t), India (205.000 t) y Rusia (99.000 t) representando un 83% de la producción mundial para el año 2019 (USGS, 2020); mientras que en Suramérica, los principales países productores del mineral son: Brasil (480.000 t), Perú (15.000 t), Chile (14.000 t), Venezuela (2.474 t, año 2018) y Colombia (715 t, año 2017), representando un 20 % del total mundial, siendo Brasil responsable del 93% de la producción del subcontinente (USGS, 2020); (USGS, 2018).

Los principales depósitos para la extracción de mineral de hierro son de tipo sedimentario, entre los cuales se destacan las denominadas “Formaciones de Hierro Bandeado”, por sus siglas en inglés BIF; con altas leyes y tonelajes, contienen las mayores reservas del mineral a escala mundial (Geoscience Australia, 2021). Son depósitos de edad precámbrica presentes en todos los continentes, entre los cuales se destacan Hammersley en Australia Occidental, Carajás en Brasil y Kumba en Sudáfrica (Britannica, 2021).

Además de los BIF, existe otro tipo importante de depósitos de hierro sedimentario representados por las Lateritas, consideradas como depósitos de hierro residual originados a partir de la meteorización de un protolito ígneo máfico o ultramáfico rico en Fe, Ni y Al, que abarcan una gran extensión superficial y que predominan en las zonas tropicales del planeta como Australia, Brasil, África Occidental y el norte de América del Sur (Britannica, 2021). En Venezuela este tipo de depósitos están representados principalmente en el Arco Minero del Orinoco (AMO), un área de 111.874 km² que representa un 12,2% del territorio del país (Franquiz, 2021). Dentro del Arco minero del Orinoco se ubica el Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro, que comprende las mayores reservas de hierro de Venezuela y una de las regiones más ricas en hierro en el mundo. En esta zona



se ubican los principales depósitos de hierro de Venezuela, entre ellos: Cerro Bolívar, San Isidro, Altamira, Rondón, El Pao, entre otros (Ferenčić, 1969).

Además de los grandes yacimientos lateríticos del sur del Orinoco, existe un yacimiento muy importante emplazado en la Cordillera de la Costa venezolana, conocido como “Loma de Hierro” o “Loma de Níquel”, ubicado entre los estados Aragua (municipio Santos Michelena) y Miranda (municipio Guaicaipuro). Descubierta en 1941, con unas reservas probadas de 14.150 Kt con un tenor de 1,59 % de Ni (Castillo A. , 2017), fue explotado entre los años 2001 y 2012 por la empresa “Minera Loma de Níquel”, que pertenecía al *Grupo Anglo American PLC*, con una inversión de 600.000.000 \$USD (Mellado & Rodríguez, 2021), ubicándose la extracción del mineral en el Municipio Guaicaipuro del estado Miranda. La Minera Loma de Níquel era la única productora de níquel a nivel nacional, así como la primera explotación de hierro en ofiolitas de Venezuela, con una producción de 17.500 t anuales de aleación de ferroníquel de bajo carbón (Birbe, 2009).

Sin embargo, en el año 2012, tras la cancelación de las concesiones que poseía *Anglo American* en el país, la explotación del yacimiento Loma de Níquel cesó actividades (CIAR Global, 2019).

No fue hasta el año 2017 cuando el estado venezolano mostró interés por reactivar la extracción de ferroníquel en el yacimiento, esta vez bajo la Corporación Venezolana de Minería (MdPPpDME, 2017). Asimismo, empresas como *Glencore* y la estatal rusa *Techzvetmet*, han mostrado interés en invertir en la explotación niquelífera del país (Parra, 2019), y más recientemente, la empresa holandesa *Fondel Metals* puso en marcha una planta recuperadora de níquel para el tratamiento de los escoriales de la mina (MdPPpDME, 2019).

Para la reactivación de la explotación minera, son necesarios una serie de estudios de carácter estructural y ambiental, entre ellos la identificación de acuíferos presentes en el subsuelo de la mina. En este contexto, cabe mencionar que, desde el inicio de la explotación mineral en Loma de Níquel, la parroquia de Tiara, una comunidad rural ubicada a pocos kilómetros al oeste de la mina en el municipio Santos Michelena del estado Aragua y con una población de 3.173 habitantes para el año 2015, ha presentado numerosas quejas respecto al impacto negativo que habría sufrido por las actividades realizadas en la mina, en especial a la calidad del agua. Tratándose de una comunidad predominantemente agrícola, dichas quejas merecen una atenta consideración, habida cuenta de que existen hasta este momento algunos indicios de que la actividad de la mina realmente habría perjudicado tanto su medio de sustento como la salud de sus habitantes (Mellado & Rodríguez, 2021).



Así mismo, debe mencionarse que debido al fracturamiento de la roca basal del yacimiento de Loma de Níquel (Birbe, 2009), resulta complejo determinar la intercomunicación de los acuíferos de este tipo presentes en el área. Por lo tanto, la determinación precisa de dicha intercomunicación resulta de fundamental importancia, debido a la importancia del recurso hídrico como sustento de la comunidad de la parroquia de Tiara.

Con base a lo expresado anteriormente, en este Trabajo Final Integrador se presenta una propuesta para la prospección de acuíferos ubicados en el área correspondiente a la mina Loma de Níquel, utilizando el método de Tomografía Eléctrica, con la finalidad de identificar y eventualmente mitigar los posibles impactos ambientales producto de la reactivación de la actividad minera en el área, como parte del objetivo del desarrollo minero sustentable de Venezuela.

OBJETIVOS

El principal objetivo de este Trabajo Final Integrador (TFI) es presentar una propuesta factible para la prospección e identificación de acuíferos presentes en el área correspondiente a la mina Loma de Níquel, empleando Tomografías Eléctricas, así como otras técnicas de prospección geofísica de carácter eléctrico y/o electromagnético.

En este contexto también se evaluará el contexto geológico en el que ocurre el yacimiento Loma de Níquel, con el propósito de contar con la más actualizada información sobre dicho contexto, así como también sobre la edad y origen del yacimiento.

Asimismo, se evaluarán los aspectos legales que regulan la minería en Venezuela, así como los protocolos para la extracción, procesamiento y almacenamiento del material explotado en Loma de Níquel, con la finalidad de plantear procedimientos y alternativas que permitan prevenir la contaminación de los acuíferos presentes en el área.

Finalmente, en el marco del concepto de Licencia Social, se analizará el conflicto existente entre la comunidad de la parroquia de Tiara, ubicada próxima a la mina, y la minera Loma de Níquel, producto del impacto ambiental que habría sufrido dicha comunidad, con el propósito de generar una serie de propuestas que puedan contribuir a una mejor relación entre las partes cuando se reanuden las actividades de la mina.



MATERIALES Y MÉTODOS

El presente Trabajo Final Integrador (TFI) se realiza sobre la base de una bibliografía que consiste en trabajos de investigación, textos, mapas, artículos e informes referentes a los distintos temas que abarca este trabajo, tanto con relación a la mina de Loma de Níquel y las comunidades aledañas, como a su contexto geológico. Estos materiales han sido obtenidos de diversas fuentes como el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), la Universidad Central de Venezuela (UCV), la Universidad Simón Bolívar (USB), el Ministerio del Poder Popular para Desarrollo Minero Ecológico (MPPpDME), el Instituto Nacional de Geología y Minería (INGEOMIN) y el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH).

Además del material bibliográfico antes citado, se han empleado datos de percepción remota del área de estudio, obtenidas del Servicio Geológico de los Estados Unidos, la instalación satelital de Alaska (ASF) de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) de los Estados Unidos, así como del programa de observación terrestre de la Unión Europea (Copernicus).

La metodología empleada en la realización de este proyecto se describe brevemente a continuación:

3.1 Fase 1: Búsqueda y compilación de la información bibliográfica

En esta etapa se realizó una búsqueda de bibliografía detallada respecto a los diferentes temas que abarca este proyecto, siendo estos: Geología, yacimentología, mineralogía, prospección geofísica, marco legal, salud, aspectos sociales, conservación ambiental, minería sustentable, entre otros.

3.2 Fase 2: Compilación del material referente a campañas prospección geofísica realizadas en el área de Loma de Níquel

En esta etapa se realizó una compilación de estudios de prospección efectuados en el área minera de Loma de Níquel, que hayan utilizado distintos métodos (p.e. eléctricos, electromagnéticos, entre otros), así como de estudios similares en otras áreas mineras análogas del mundo, que sirvieran también como guía para este proyecto.



3.3 Fase 3: Análisis e Interpretación de la información recopilada

En esta etapa se analizó detalladamente toda la información recopilada y se generaron los productos planteados en los objetivos del trabajo.

3.4 Fase 4: Elaboración de los objetivos planteados y producción del manuscrito del

Trabajo Final Integrador.

Finalmente, esta etapa abarcó la producción del manuscrito del Trabajo Final Integrador propiamente dicho.

MARCO GEOLÓGICO

4.1 Área de Estudio

4.1.1 Ubicación de la Faja de Loma de Hierro y la mina Loma de Níquel

La Faja de Loma de Hierro (ver Fig 1), donde está ubicada la Mina Loma de Níquel (MLDN), es hasta ahora el único depósito níquelífero de Venezuela (Rodríguez, 2012). Se encuentra localizada en la región centro-norte del país, entre los estados Aragua, en el municipio Las Tejerías y Miranda, en el municipio Guaicaipuro, donde se ubica el área en explotación actual de la mina. Esta faja forma parte del flanco norte de la Serranía del Interior de la Cordillera de la Costa y tiene una dimensión de 21 Km de largo en dirección O-E, desde el oeste de Tiara, en el estado Aragua, hasta las proximidades de Tácata en el estado Miranda; y hasta 5 Km de ancho (Birbe, 2009).

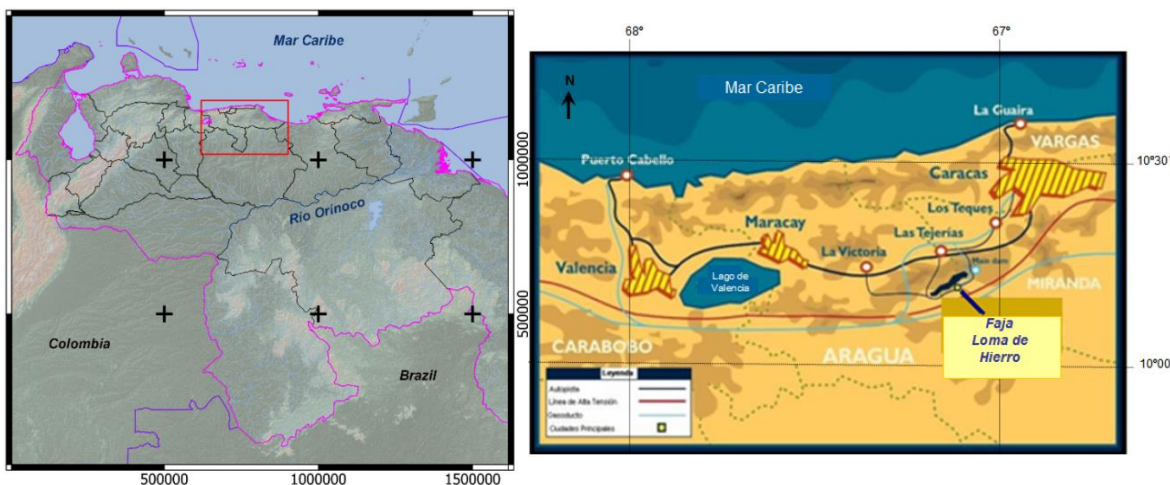


Fig 1. Ubicación geográfica del yacimiento de Loma de Hierro donde se encuentra la mina Loma de Níquel. Tomado de Birbe (2009).

Geográficamente, la mina Loma de Níquel (LdN) está situada a una latitud de 10° 10' N y una longitud de 67° 07' 03'' E y una elevación de 1000 a 1340 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). El principal acceso a la Mina Loma de Níquel es a través de la “Nueva vía a Tiara”, la cual inicia en el kilómetro 54 de la Autopista Regional del Centro y consiste en un tramo de 23 Km hasta llegar a las instalaciones de la mina (Birbe, 2009) (ver Fig 2). La comunidad más cercana a las instalaciones de la mina se trata de la Parroquia de Tiara, ubicada a 5 Km del yacimiento. Los poblados más cercanos y de mayor tamaño son Las Tejerías (a 25 km de distancia) y La Victoria (Reyes, 2011).

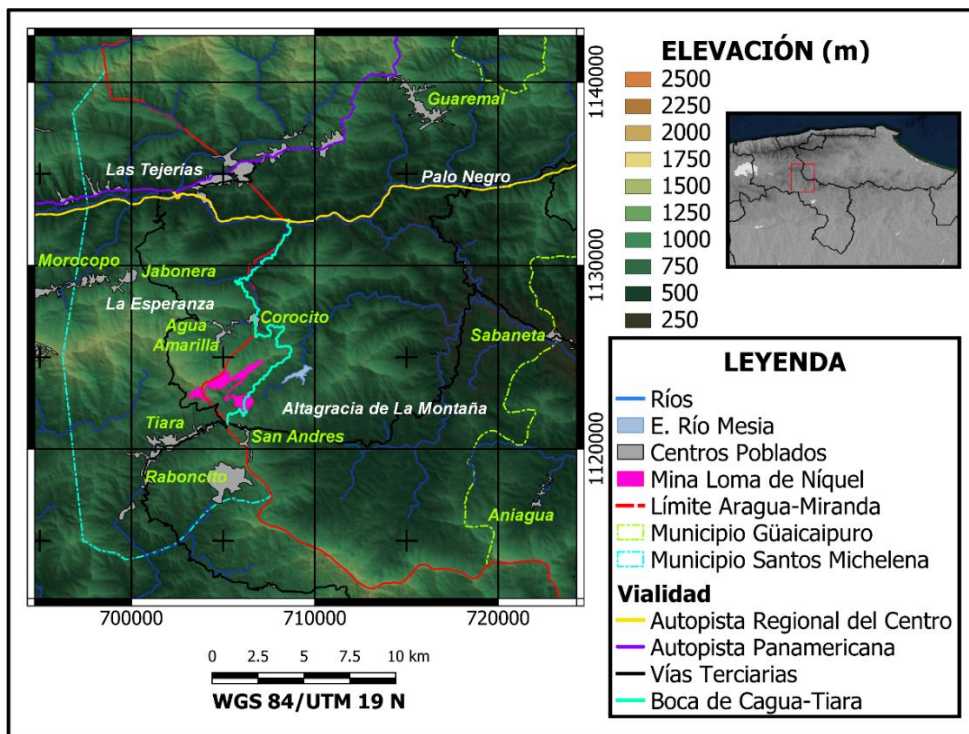


Fig 2. Mapa geográfico de la zona de estudio.

4.1.2 Subdivisión operativa de la Mina Loma de Níquel

La mina (Fig 3) presenta unas dimensiones de 4 km por 1 km de anchura máxima y se encuentra dividida en tres sectores en dirección E-O. Estos sectores presentan frentes de extracción mineral a manera de terrazas con alturas de 5 metros, identificadas según su elevación correspondiente (Birbe, 2009). A continuación, se describen los sectores de la Mina Loma de Níquel (ver Fig 4):

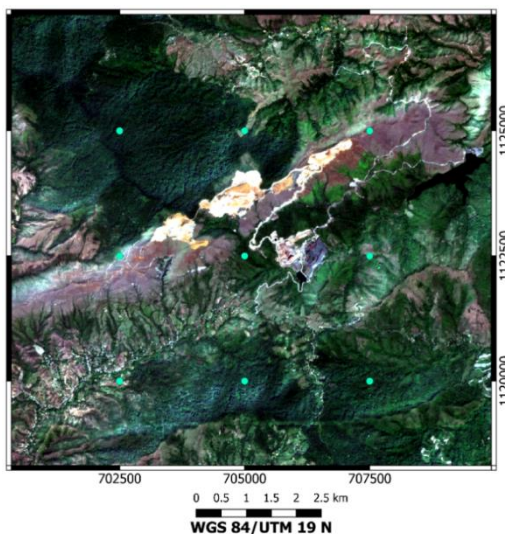


Fig 3. Imagen satelital de la mina Loma de Níquel.

- ✓ **Sector 1:** Es el sector el más occidental, localizado entre las coordenadas locales 4425-5500 E y posee un área aproximada de 1 km². Presenta los frentes de extracción con mayores cotas (niveles del 1260 al 1345). Este sector posee los mayores tenores de níquel de la mina; los tenores de hierro y sílice son también elevados (Birbe, 2009).
- ✓ **Sector 2:** Este sector está ubicado en la parte central de la mina, entre las coordenadas locales 5500-6850 E y posee un área aproximada de 1,25 km². Presenta los frentes de extracción con cotas intermedias (niveles del 1185 al 1330). Este sector posee tenores de níquel y hierro muy variables, mientras que el contenido de sílice es frecuentemente bajo (Birbe, 2009).
- ✓ **Sector 3:** Es el sector más oriental de la mina, localizado entre las coordenadas locales 6850-8500 E y con un área aproximada de 1,75 km². Presenta los frentes de extracción con las cotas más bajas de toda la mina (niveles del 1105 al 1250). En este sector los tenores de níquel son moderados, mientras que los del hierro y sílice son frecuentemente altos (Birbe, 2009).

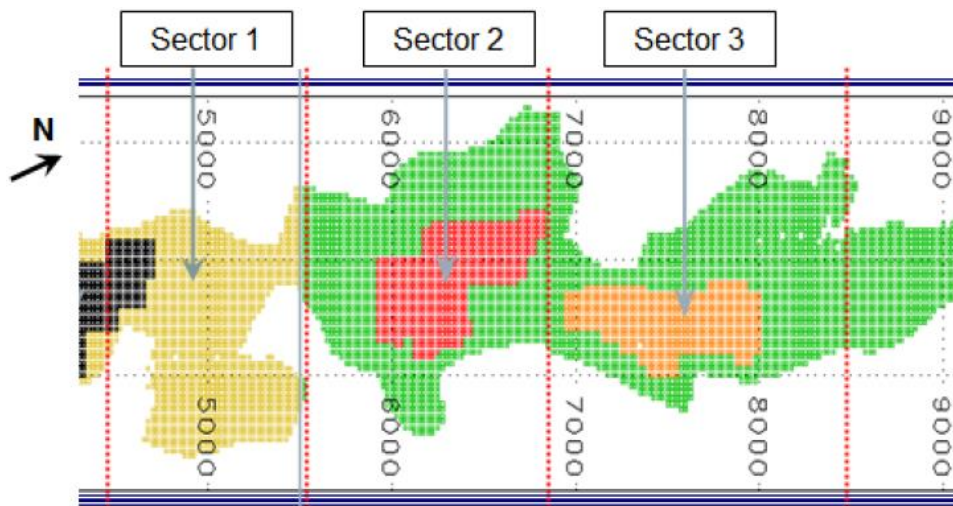


Fig 4. Ubicación de los sectores de explotación del yacimiento. Tomado de Birbe (2009).

4.1.3 Topografía y Vegetación

En esta región el relieve se presenta en franjas de dirección N65°E, con elevaciones que van de 1100 a 1300 m.s.n.m., con una disminución de estas cotas en dirección este. Las crestas del relieve son agudas, mientras que las laderas presentan pendientes moderadas a abruptas (30% y 50% de inclinación), encontrándose recubiertas por una espesa capa laterítica. Esta capa se encuentra



cubierta su vez, por dos tipos de vegetación predominantes en esta región: una vegetación de sabana abierta (entre 700 y 1100 m.s.n.m.) y bosques tropicales húmedos y nublados localizados en los picos y valles entre las montañas (1100 y 1300 m.s.n.m.) (ver Fig 3) (Birbe 2009; Reyes, 2011).

4.1.4 *Clima*

El área de la Mina Loma de Níquel posee un clima tropical húmedo, con una temperatura media anual de 26°C, una media máxima de 31,9°C y una media mínima de 21°C. Al tratarse de un clima tropical, las condiciones meteorológicas a lo largo del año alternan entre periodos de lluvia y sequía contrastantes. A partir de los datos de estaciones meteorológicas ubicadas en las cercanías de Loma de Hierro previo a la apertura de la mina, se obtuvo que la tasa de precipitación anual promedio del área es de 1800 mm, mientras que la tasa de evaporación media anual y la humedad media anual son de 2300 mm y 75% respectivamente (Reyes, 2011).

4.1.5 *Hidrografía*

La Faja de Loma de Hierro establece una barrera entre los dos cursos de agua más importantes de la región; el río Tuy, ubicado al noreste de la mina, y el río Guare, ubicado al sureste. Ambos ríos fluyen en dirección este, siendo el río Guare un tributario del río Tuy.

El río Tuy posee un recorrido de 247,56 km aproximadamente, siendo uno de los principales ríos de la región central del país. Se subdivide en cinco subcuencas o Unidades de Ordenamiento, siendo estas: Alto Tuy, Tuy Medio, Tuy Bajo, Río Guaire y Guarenas-Río Grande, con una superficie total de 650.357,03 Ha. La región que abarca la mina Loma de Níquel en el municipio Guaicaipuro del estado Miranda, corresponde a la subcuenca de Alto Tuy, que tiene una superficie de 98.739,09 Ha.

El río Guare tiene a su vez como afluentes las quebradas: Colorado, Agua Caliente, La Palma, San José, Danta, Los Bucares, Agua Fría, Pedernales, Las Oficinas, Los Olores, Los Bagres y los ríos: Mesia y Emilia. Estos cursos de agua en su conjunto forman la Subcuenca del río Guare (Díaz & Sotillo, 2006).

A continuación, se muestra un mapa hidrográfico de la región asociada a la mina (ver Fig 5):



4.2.1 Sistema Montañoso del Caribe y la Cordillera de la Costa

Fig 6. Sistema Montañoso del Caribe. Modificado de Ostos et al. (2005).

La región centro-norte y oriental de Venezuela está dominada por el relieve asociado a la “Cordillera del Caribe”, una cadena montañosa de unos 350 km de longitud y 80 km de ancho, que se extiende en dirección este-oeste y que ocupa un área aproximada de 53.000 km². El tramo central, también llamado Cordillera de la Costa (CdLC), abarca los estados Yaracuy, Carabobo, Aragua, Guárico, Miranda, La Guaira (Vargas) y el Distrito Capital, mientras que el tramo oriental, también llamado Cordillera Oriental, abarca los estados Anzoátegui, Monagas y Sucre. Este orógeno limita al norte y este con el Mar Caribe, al sur con la depresión Central Llanera y al oeste con la depresión de Yaracuy.

La Cordillera de la Costa se subdivide a su vez en dos serranías con orientación este-oeste: La Serranía del Litoral en su mitad septentrional y la Serranía del Interior en su mitad meridional. Ambos relieves se encuentran separados por una serie de valles controlados principalmente por el sistema de fallas de La Victoria. Estas serranías se subdividen en varias fajas o napas tectónicas (*nappes*), formadas en espacios y tiempos distintos y se encuentran a su vez separadas por fallas de carácter regional (Urbani *et al.*, 2004).

La Serranía del Litoral comprende, de norte a sur las napas tectónicas: Costera, Ávila y Caracas; mientras que la Serranía del Interior comprende, igualmente de norte a sur, las napas tectónicas: Caucagua-El Tinaco, Loma de Hierro y Villa de Cura (ver Fig 7). Cada una de estas napas tectónicas comprende las diferentes unidades ígneo-metamórficas que conforman la Cordillera de la Costa (Urbani, y otros, 2004).

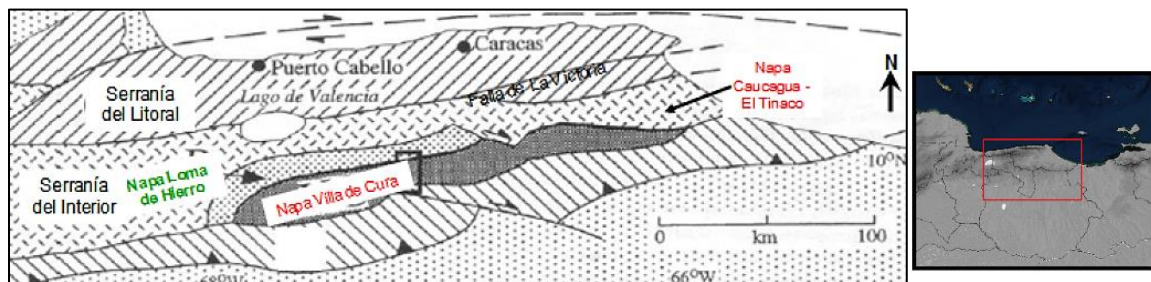


Fig 7. Napas Tectónicas de la Serranía del Interior Región Central. Tomado de Birbe (2009).

4.2.2 Modelos de la formación y evolución del Caribe

Desde el siglo pasado, a medida que se ha profundizado el conocimiento de los terrenos que conforman el Caribe, aunado al desarrollo de la Tectónica de Placas, han surgido diferentes modelos respecto al origen de esta región del mundo. Estos modelos se dividen en dos escuelas: la autóctona y la alóctona. La escuela autóctona, que propone la formación de la placa Caribe en el mismo sitio

actual y en la cual está el trabajo de [Freeland y Dietz \(1972\)](#), presenta un modelo basado en la ruptura de Pangea, la cual separa primeramente a América del Norte de América del Sur y posteriormente a África de América del Sur, generando así el espacio que ocupa el Caribe (ver Fig 8). Sin embargo, los modelos localistas han perdido aceptación en favor de la escuela alóctona o la “Escuela del Pacífico”, que proponen un origen lejano aunado a una traslación que finalmente llevó al Caribe a su posición actual, dando a su vez origen a la Cordillera del Caribe (Urbani, 2018 a).

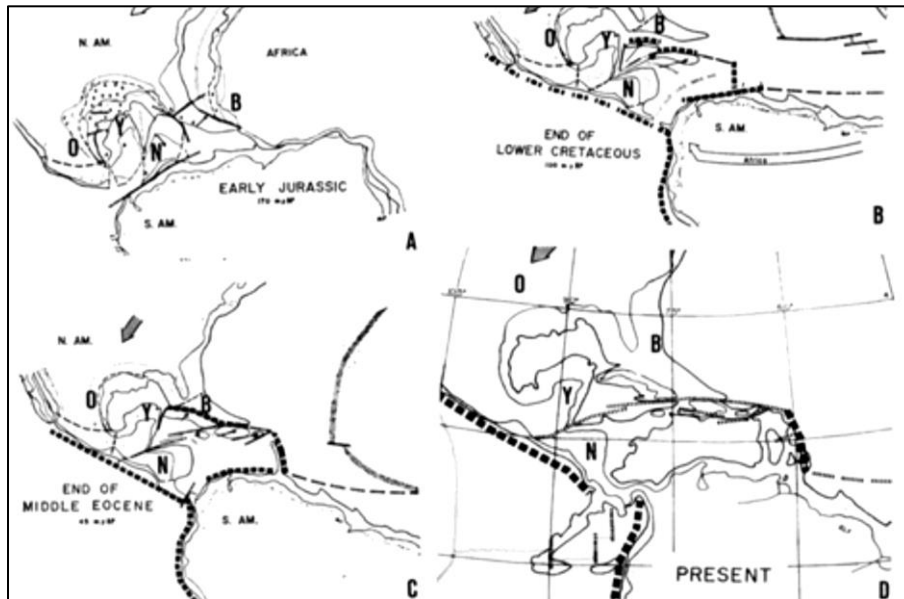


Fig 8. Interpretación de [Freeland & Dietz \(1972\)](#) de la ruptura del supercontinente previo, para formar el espacio ocupado por el Caribe. Tomado de [Urbani \(2018 a\)](#).

En la “Escuela del Pacífico”, se destacan una serie de trabajos, fundamentalmente aquél realizado por [Malfait y Dinkelman \(1972\)](#), quienes presentaron una reconstrucción completa que se inicia en el Cretácico Tardío y localiza inicialmente al Caribe en el Pacífico oriental, con un movimiento hacia el este, generando una zona de subducción y el arco de las Antillas Menores. Las ideas de este modelo fueron retomadas y refinadas por otros autores como [Skyes *et al.* \(1982\)](#) (ver Fig 9), [Pindell y Dewey \(1982\)](#), [Pindell \(1985\)](#), así como aquéllos que proponen un origen intermedio como [Talukdar y Loureiro \(1982\)](#) y [Navarro \(1983\)](#). Además, vale la pena destacar el desarrollo del mapa tectónico del Caribe, generado por [Case y Holcombe \(1975\)](#) y refinado por el geólogo Peter H. [Mattson](#) en 1984 (ver Fig 10) (Urbani, 2018 a).



Fig 9. Interpretación del origen del Caribe de SYKES et al. (1982). Tomado de Urbani (2018 a).




Fig 10. Mapa tectónico del Caribe según Mattson (1984). Tomado de Urbani (2018 a).

4.2.3 El Caribe y la formación de la Cordillera de la Costa

Con respecto a la formación de la Cordillera de la Costa y su asociación al origen del Caribe, han surgido distintos modelos que proponen tanto un origen autóctono, como un origen alóctono para la emersión, asociada a los modelos del origen del Caribe. Con respecto al origen alóctono de la Cordillera de la Costa, el geólogo Alirio Bellizzia, sobre la base del trabajo de Maresch (1971), expone en 1972 una serie de ideas que apoyan este modelo, entre las cuales destacan que: la Cordillera está rodeada al sur por una unidad *flysch*; en las fajas de Cauagua-El Tinaco, Loma de Hierro-Paracotos y Villa de Cura hay un arreglo heterogéneo de unidades que ponen en contacto rocas ígneas de diferentes orígenes y de grados de metamorfismo; la existencia de rocas en la zona costera con

minerales asociados a metamorfismo de alta presión, en contacto con rocas de la facies de anfibolita epidótica y demás facies de baja presión (Urbani, 2018 a).

Es en 1982 que Talukdar y Loureiro formulan el primer modelo para el origen de la Cordillera de la Costa que involucra la  tónica de Placas. Habiendo estudiado la yuxtaposición de rocas metamórficas de orígenes distintos en el terreno de Carayaca, ubicado en el estado La Guaira (para ese entonces llamado estado Vargas), explicaron este hecho mediante el “modelo de un arco” (ver Fig 11). Este propone que la Cordillera de la Costa se formó producto de la interacción del borde norte del continente suramericano, con un arco de islas; tanto con sus rocas volcánicas, como con aquéllas circundantes del complejo de subducción y las cuencas de ante y retro arco (Urbani, 2018 a).

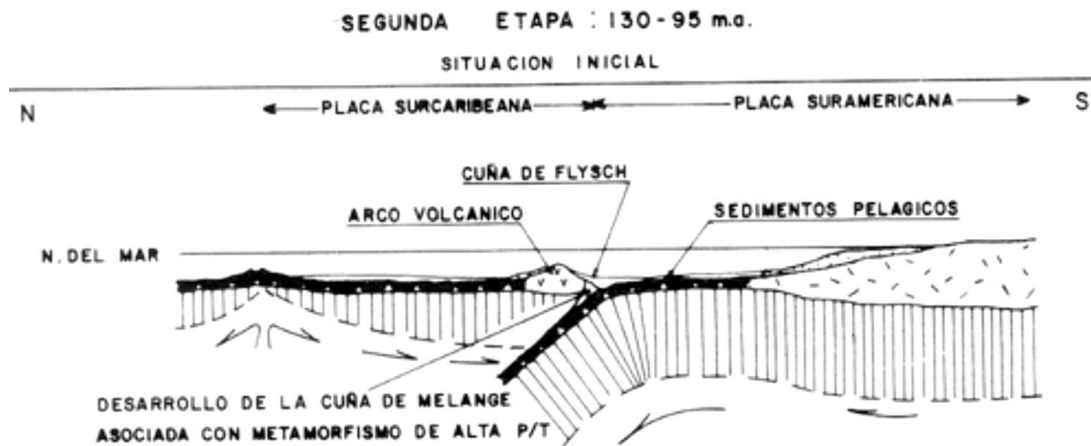



Fig 11. Modelo de evolución de la Cordillera de la Costa en el marco de la Tectónica de Placas en el Cretácico medio, según Talukdar & Loureiro (1982). Tomado de Urbani (2018 a).

Al año siguiente, Enrique Navarro (1983), fundamentado en el modelo de Talukdar y Loureiro (1982) y en los trabajos de geología  petrología y geoquímica en la región de Villa de Cura, propone un segundo modelo, esta vez empleando dos arcos de islas (“modelo de dos arcos”) (ver Fig 12), uno al norte, según la hipótesis de Talukdar y Loureiro (1982) y otro al sur, asociado a la formación de una cuenca oceánica producto de la separación del escudo de Guayana al sur y una microplaca hipotética al norte, que nombró “Sebastopol”. Tras el cierre de esta microcuenca oceánica, se emplazan de manera autóctona las rocas volcánicas: como fragmentos de arco (Villa de Cura) y como fragmentos de corteza oceánica (Ofiolita de Loma de Hierro) (Urbani, 2018 a).

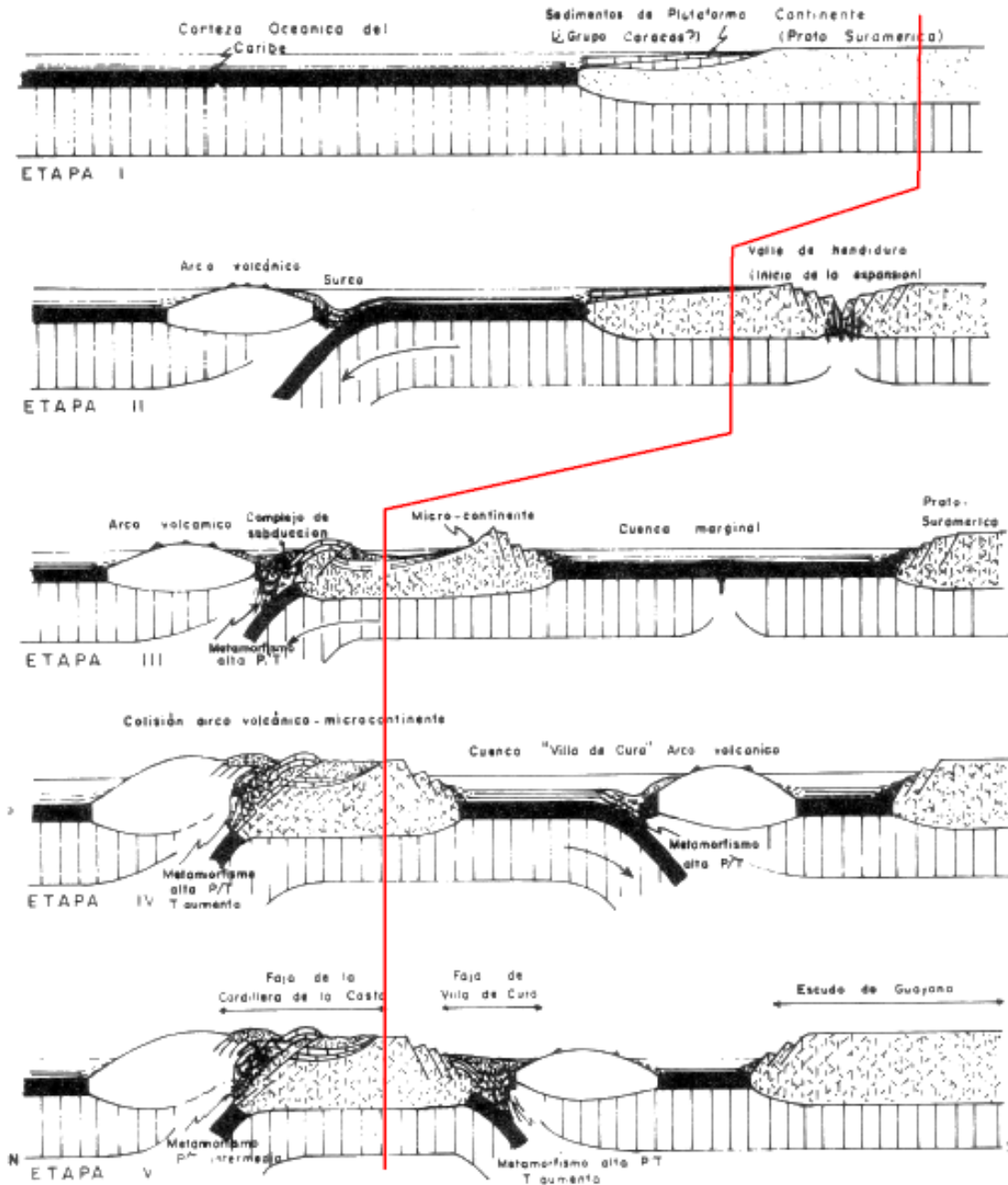


Fig 12. Modelo de evolución de la Cordillera de la Costa y en especial de la faja de Villa de Cura con el "modelo de dos arcos" de NAVARRO (1983). A la izquierda de la línea roja, se reproduce el modelo de Talukdar & Loureiro (1982), mientras que a la derecha se representa la nueva interpretación con un segundo arco. Tomado de Urbani (2018 a).

Finalmente, en el año 1990, Marino Ostos en su tesis doctoral, presenta un nuevo modelo, integrando los estudios paleomagnéticos realizados por Skerlec y Hargraves (1980) en rocas volcánicas de Villa de Cura y corroborados ampliamente en otras localidades, como se a los cuales



interpretaron que el bloque de Villa de Cura tuvo una rotación de 90° en sentido horario previo a su emplazamiento final. El nuevo modelo de Ostos concuerda con el carácter alóctono de la “Escuela del Pacífico”, algo que los anteriores modelos de Navarro y Talukdar no habían conseguido (Urbani, 2018 a). Desde entonces, el modelo de la “Escuela del Pacífico” para el origen de la Cordillera de la Costa ha tomado y desarrollado por otros autores buscando reconstruir la historia geológica del orógeno (Urbani, 2018 a).

4.2.4 El Modelo Pacífico para la Cordillera de la Costa

A continuación, se presenta de manera cronológica el modelo de la “Escuela del Pacífico” para el origen de la Cordillera de la Costa, propuesto inicialmente por Ostos (1982) y expandido gracias a los trabajos de [Stephan *et al.* \(1980\)](#), [Beck \(1986\)](#), [Stiles \(2000\)](#), [Audemard *et al.* \(2000\)](#), [Pindell *et al.* \(2005\)](#), [Unger *et al.* \(2005\)](#), [Avé Lallemant y Sisson \(2005\)](#), [Schmitz *et al.* \(2007\)](#), Urbani *et al.* (2007), entre otros autores citados por Urbani *et al.*, 2007.

- ✓ **Eones Arqueano al Proterozoico (4600-635 Ma):** Durante este periodo ocurre la amalgamación de terrenos que dio origen al Escudo de Guayana (Urbani, 2018 a). El Augengneis de Peña de la Mora, la unidad con las rocas más antiguas conocidas en la Cordillera de la Costa (1.600 Ma), podría corresponder a un fragmento altamente metamorfozado y deformado de este escudo, asociado al batolito del Granito de Parguaza en el distrito Cedeño del estado Bolívar y parte del estado Amazonas (Urbani, 2018 a).

Finalizando el Neoproterozoico, toma lugar la orogénesis del Grenvilliano (formación de Rodinia), representada por rocas con edades entre 900 y 1200 Ma (Urbani, 2018 a).

- ✓ **Era Paleozoica (635-252 Ma):** Continúan los eventos magmáticos en el transcurso de las orogénesis Panafricana-Brasiliana en el Neoproterozoico tardío-Cámbrico (600-500 Ma), Tacónica entre el Cámbrico y el Devónico (540-420 Ma) y Apalachiana entre el Carbonífero y el Pérmico (340-280 Ma). Rocas correspondientes a estos eventos afloran en los Andes, El Baúl y en Todasana en el estado La Guaira (Urbani, 2018 a).
Durante este periodo, también se desarrollaron cuencas donde se depositaron los protolitos sedimentarios de unidades tales como la Filita de Tucutunemo de la Faja de Cauagua-El Tinaco.



- ✓ **Era Mesozoica (252-66 Ma):** Se inicia la ruptura de Pangea durante el Jurásico (201-145 Ma), separándose Norteamérica de Suramérica y generándose una nueva corteza oceánica ("Proto-Caribe") (Urbani, 2018 a).

Se inician procesos sedimentarios de margen pasivo en el borde norte de Suramérica. Este proceso da origen a los protolitos de unidades como el esquisto grafitoso de Las Mercedes, en el estado Miranda.

Del Jurásico Tardío al Cretácico Temprano (163-100 Ma) se genera el Gran Arco del Caribe (GAC) en el Pacífico. La placa Sudamericana y el Atlántico avanzan hacia el oeste, consumiéndose la corteza oceánica del Proto-Caribe y su zona de expansión central.

Entre el Valanginiense y el Aptiense del Cretácico inferior (140-120 Ma), se genera la "Gran Provincia Ígnea del Caribe", una meseta oceánica incipiente.

Desde el Albiense tardío hasta el Campaniense (~100-72 Ma), las cuatro unidades que componen la Faja de Vila de Cura, formadas en un ambiente de antearco, quedan involucradas en el proceso de subducción del Proto Caribe bajo la placa Suramericana, causando en ellas un metamorfismo de alta presión, pero baja temperatura.

Ya en el Maastrichtiense (72,1-66 Ma) se detiene la separación entre Norteamérica y Suramérica, mientras que el Gran Arco del Caribe continua su avance desde el Pacífico con rumbo noreste, entrando en el ámbito caribeño. Continúa al norte de Venezuela el ambiente de margen pasivo, depositándose formaciones de gran importancia como La Luna y Querecual en un ambiente marino poco oxigenado (ver Fig 13).

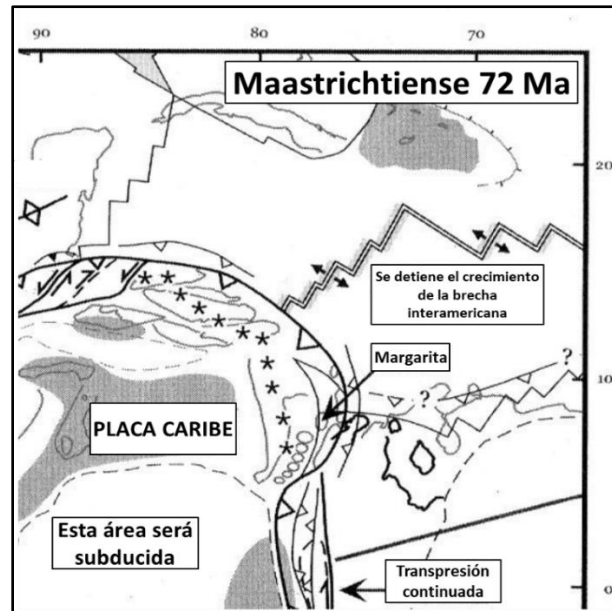


Fig 13. El Caribe en el Maastrichtiense. Modificado de Urbani (2018 a).

- ✓ **Era Cenozoica (66 Ma-Actualidad):** Durante el Paleoceno al Eoceno (66-40 Ma), la placa Caribe comienza a moverse hacia el este debido al obstáculo que representaba el gran banco de las Bahamas y Cuba, lo cual inició una interacción de carácter oblicuo entre esta placa y el norte de Venezuela. Se forman cuencas donde se depositan unidades turbidíticas de manera diacrónica y cuya fuente de sedimentos provino tanto del continente Suramericano, como del arco de islas (Urbani, 2018 a) (ver Fig 14).

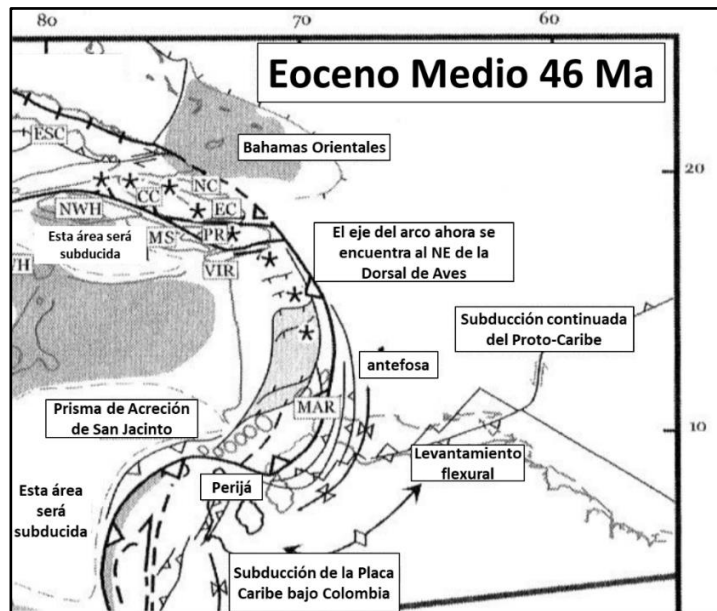


Fig 14. Evolución del Caribe en el Eoceno Medio. Modificado de Urbani (2018 a).

La interacción entre la placa Caribe y la placa Suramericana es más marcada en el Eoceno. Hacia el occidente de Venezuela se emplazan las napas de Lara, mientras que hacia el este se va consumiendo la corteza oceánica del Proto-Caribe producto de la subducción tanto hacia el norte (bajo la placa Caribe) como hacia el sur (bajo la placa Suramericana), acercando el arco de islas al continente (ver Fig 15).

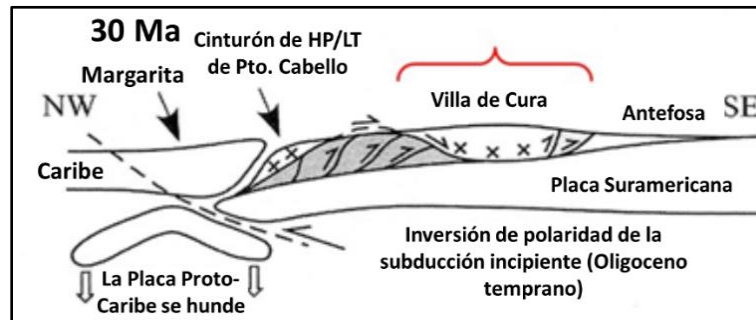


Fig 15. Sección del emplazamiento de la napa de Villa de Cura (Serranía del Interior). Modificado de Urbani (2018 a).

Mayormente se considera que durante este período se emplazaron como cabalgamientos los terrenos alóctonos ígneo-metamórficos de las fajas de Villa de Cura, Loma de Hierro (una obducción de corteza oceánica) y Caucagua-El Tinaco, sobre las unidades sedimentarias del margen pasivo (*flysch*) (ver Fig 16).

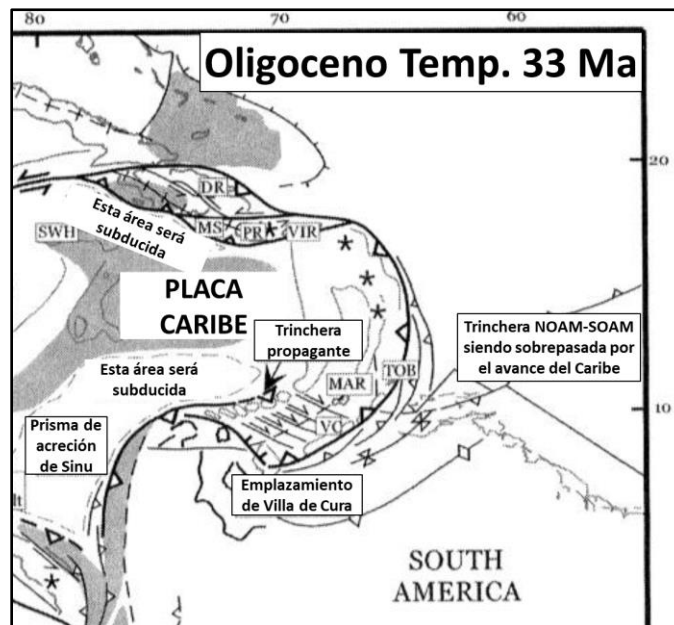


Fig 16. Evolución del Caribe en el Oligoceno temprano. Nota: NOAM- Norteamérica, SOAM-Suramérica. Modificado de Urbani (2018 a).

Del Mioceno al Holoceno (23 Ma hasta la actualidad) la interacción oblicua entre la placa Caribe y el norte de Venezuela continua, generando un efecto compresivo con dirección NO-SE. Estos esfuerzos generan fallas dextrales de alto ángulo y gran extensión, como las fallas de: Oca-Ancón, San Sebastián, Macuto, El Pilar y La Victoria (Urbani, 2018 a) (ver Fig 17).

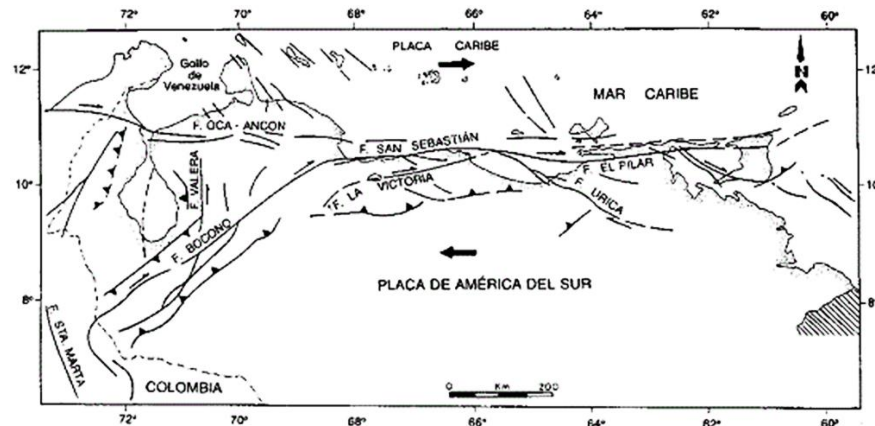


Fig 17. Mapa de fallas cuaternarias más relevantes de Venezuela. Tomado de Urbani (2018 a).

Durante el Mioceno al Holoceno, producto de las fallas dextrales subverticales, son exhumadas las rocas que forman las fajas Costera, Ávila y Caracas (Urbani, 2018 a). Ocurre la exhumación del macizo del Ávila, en la zona de relevo transpresivo entre las fallas de San Sebastián y Macuto al norte y la falla del Ávila al sur, entre el Plioceno y el Holoceno (5 Ma). Este macizo alcanza su máxima elevación en el bloque Naiguatá (2,8 Km s.n.m.), el relieve de mayor elevación en la Cordillera de la Costa.

A continuación, se muestra una sección con la distribución de las fajas que conforman la Cordillera de la Costa (ver Fig 18). Nótese las fajas que conforman la Serranía del Interior:

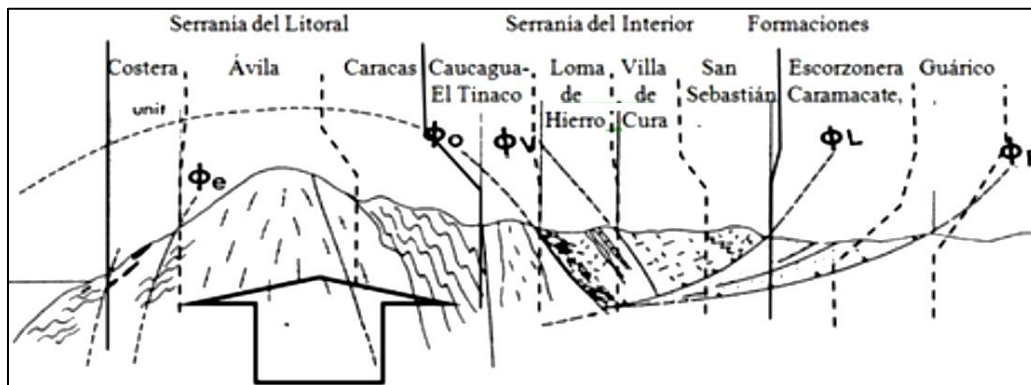


Fig 18. Sección generalizada de la Cordillera de la Costa en el meridiano de Caracas, con la ubicación del emplazamiento de la Faja de Loma de Hierro. Tomado de Urbani (2018 a).

En la imagen anterior, ϕ_F representa el frente de napa de flysch piemontino, ϕ_L el cabalgamiento de las unidades alóctonas ígneo-metamórficas, ϕ_V la superficie de cabalgamiento de los terrenos de Villa de Cura y Loma de Hierro, ϕ_O la superficie de cabalgamiento de Cauagagua-El Tinaco y Loma de Hierro (ofiolita), ϕ_e la superficie de cabalgamiento de los terrenos de Carayaca y Tacagua, contra el Terreno Ávila.

4.3 Geología Local

4.3.1 Faja de Loma de Hierro

La faja de Loma de Hierro es una de las tres fajas que conforman la Serranía del Interior de la Cordillera de la Costa. Fue emplazada en su posición actual en el Eoceno como un cabalgamiento, limitando al sur con la faja de Villa de Cura y al norte con la faja de Cauagagua-El Tinaco. Está formada por los terrenos de Paracotos, formado en el Cretácico Tardío y Loma de Hierro, formado del Cretácico Temprano al Paleoceno (Urbani, 2018 a) (ver Fig 19).

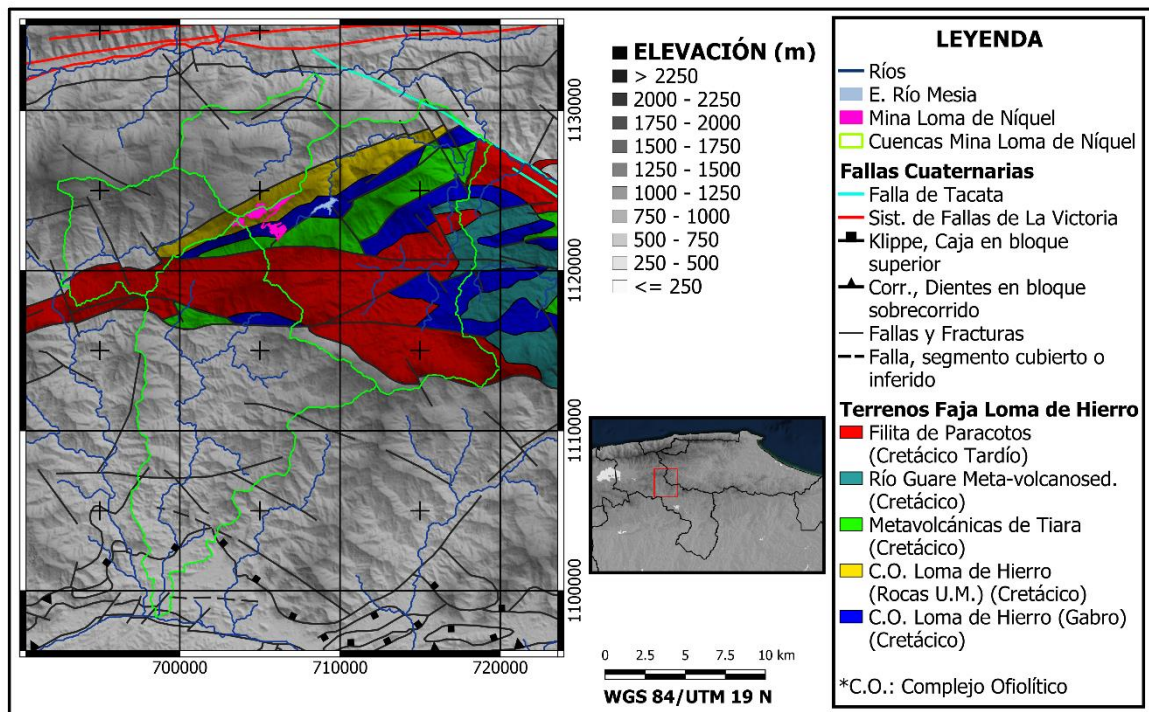


Fig 19. Mapa geológico de la zona de estudio.

- ❖ **Terreno de Paracotos (Cretácico ?):** Según Urbani (2018), el terreno de Paracotos está constituido por la Filita de Paracotos, una unidad depositada en un ambiente de tipo



turbidítico y que comprende lutita, limolita, arenisca, conglomerado y caliza. Al ser afectadas por un metamorfismo de bajo grado, muestran una esquistosidad incipiente. Los niveles de mármol contienen abundantes foraminíferos que apuntan a una edad del Cretácico Tardío (Maastrichtiense). Su localidad tipo se encuentra ubicada a 10 km al oeste de El Pao de Zárate, en Cataurito (Urbani, 2018 a).

- ❖ **Terreno de Loma de Hierro (*Cretácico* ?)**: También denominado como el “Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro”, esta unidad en forma de faja se extiende por unos 21 Km desde el oeste de Tiara (a unos 4 km de la localidad) en el estado Aragua, hasta las cercanías de Tacatoca en el estado Miranda (Birbe, 2009). Según Urbani (2018), se trata del mayor bloque de litósfera oceánica en la Cordillera de la Costa y tiene como localidad tipo la sierra de Loma de Hierro, con un espesor mínimo de 800 m (Birbe, 2009).

Urbani (2005) establece que el Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro comprende varias subunidades cartográficas: La Peridotita de Loma de Níquel, el Gabro de Mesia y el basalto de Tiara (Birbe, 2009).

Según Graterol (1972) esta unidad está constituida por una asociación de rocas ultramáficas y gabroides, comagmáticas, con muy alto grado de metamorfismo y afinidad MORB según Girard *et al.*, (1982). Según Birbe (2009), las rocas ultramáficas de esta unidad consisten en peridotitas de tipo alpino que ocurren formando de *sills*, siendo principalmente tipo hazburguitas macizas de grano grueso y con color negro verdoso a verde claro, constituidas por olivino y ortopiroxeno con un grado variable de serpentinización. Este último autor describe las rocas gabroides como conformadas por trocolitas, gabros oliviníferos y gabros asociados a basaltos, cuya mineralogía consiste en clinopiroxeno y plagioclasa cálcica con alto grado de alteración, pudiendo presentar bandas irregulares de textura pegmatítica; hacia el margen norte se presentan como diques intrusivos, en tanto que hacia el margen sur pueden presentar textura de cumulatos, aunque con cierta foliación.

Según Beck (1985, 1986), la unidad presenta un contacto de fallas y estratigráfico hacia el norte, bajo volcánicas de Tiara y un contacto estratigráfico y discordante bajo la Formación Paracotos. Además, al sur, la unidad presenta un contacto de fallas y estratigráfico



discordante sobre la Formación Tucutunemo, mientras que Urbani (2005) agrega un contacto de falla sobre el Esquisto de Tinapú (Birbe, 2009).

4.3.2 El yacimiento de Loma de Hierro

Según Bellizia, (1967) y Lavié, (1967), entre otros autores, en el yacimiento de Loma de Hierro se reconocen tres niveles fundamentales de meteorización (ver Fig 20 y Fig 21): Nivel 1, laterita ferruginosa; Nivel 2, laterita níquelífera y Nivel 3, roca basal. Estos niveles se exponen a continuación.

- ✓ **Nivel 1, Laterita ferruginosa:** Corresponde a la cobertura de la zona de mena ferruginosa. Tiene carácter arcilloso, poroso, con un color ocre rojizo a rojo oscuro; con un peso específico relativamente elevado y bajo grado de humedad (15%-20%) (Birbe, 2009). Tiene un alto contenido de oxihidróxidos de hierro (40% y 45%): limonita-goethita y hematita hacia las zonas superficiales (sombrero de hierro); y un bajo contenido de níquel (0,4%-0,8%). Existe además una zona de transición entre la laterita ferruginosa y la laterita níquelífera, que presenta una mayor humedad (30%-55%), menor peso específico, un menor contenido de oxihidróxidos de hierro (35%-40%) y un mayor contenido de níquel (0,8%-1%), enriquecida en oxihidróxidos de hierro y cobalto (Birbe, 2009).
- ✓ **Nivel 2, Laterita níquelífera (saprolita):** Se trata de un manto arenoso, poroso, de color pardo amarillento, con bajo peso específico y un bajo grado de humedad (20%-30%). Posee un contenido de oxihidróxidos de hierro intermedio (25%-35%) y cuenta con sistemas de grietas y fracturas que le otorgan una alta permeabilidad, permitiendo que la mena níquelífera (garnierita) se concentre en forma de laminaciones y vetas, con un tenor elevado (1%-2%) (Birbe, 2009). Por debajo de esta laterita, se encuentra una zona de transición a la roca basal conformada por abundantes nódulos de roca “no digerida” (*boulders*). Se caracteriza por presentar menores porcentajes de oxihidróxidos de hierro (20%-25%) y de níquel (0,5%-0,8%), así como un menor grado de humedad (10%-15%) (Birbe, 2009).
- ✓ **Nivel 3, Roca Basal:** Se encuentra por debajo de la laterita que contiene la mena níquelífera y posee un peso específico elevado, baja porosidad y muy bajo grado de humedad (por debajo del 10%). Se trata de una masa de roca ultramáfica fracturada, de color verdoso a

negro, con un bajo contenido de oxihidróxidos de hierro (por debajo del 20%) y porcentajes muy bajos de níquel (0,25%-0,5%) (Birbe, 2009).

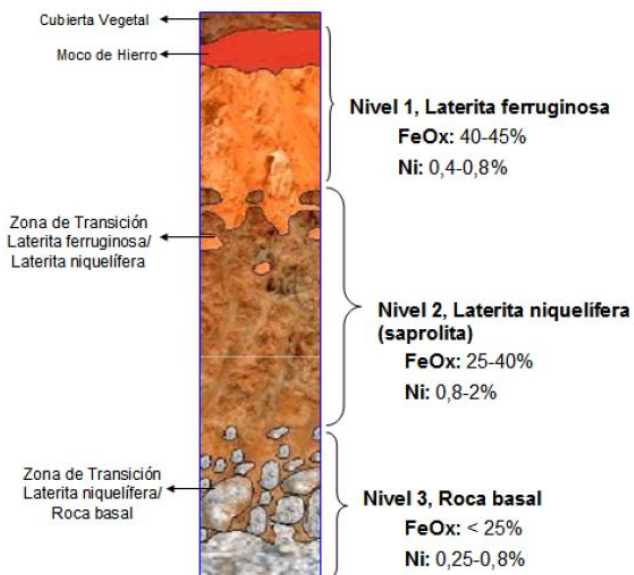


Fig 20. Corte vertical mostrando los niveles del yacimiento Loma de Hierro. Tomado de Birbe (2009).



Fig 21. Meteorización en la mina Loma de Níquel. Tomado de Ochoa et al. (2011).



MARCO TEÓRICO

5.1 Prospección Geofísica

La prospección geofísica comprende un conjunto de técnicas físicas y matemáticas, empleadas para estudiar el subsuelo terrestre de manera cuantitativa. Ésta se basa en el principio del estudio de contrastes producto de la presencia de anomalías, entendiéndose como respuestas que difieren del comportamiento normal de una propiedad medida en el subsuelo y que podría señalar la presencia de un cuerpo de interés (SGM, 2021).

Los métodos empleados pueden dividirse de tres maneras principales:

- ✓ *Respecto a la fuente empleada en la adquisición de los datos:* Pueden ser de tipo activa, donde se emplea una fuente de energía para excitar una respuesta del subsuelo, o de tipo pasiva, donde se mide la respuesta natural del subsuelo.
- ✓ *Respecto a la ubicación de los equipos de medición:* Pueden dividirse en métodos terrestres y métodos aerotransportados (Dentith & Mudge, 2014).
- ✓ *Respecto a la propiedad física medida:* Los métodos de prospección geofísica se clasifican generalmente en seis grupos diferentes. Métodos Eléctricos, Métodos Electromagnéticos, Métodos Magnéticos, Métodos Sísmicos, Métodos Radiométricos y Métodos Gravimétricos (Dentith & Mudge, 2014).

5.2 Métodos Eléctricos

Los métodos eléctricos (ME) consisten en el análisis del comportamiento de las rocas en relación con una corriente eléctrica de origen natural o artificial, a medida que esta viaja por el subsuelo, sin que intervenga un campo magnético (Astier, 1975)

El flujo de la corriente eléctrica por un medio puede explicarse mediante la Ley de Ohm, la cual establece que:

“La caída de potencial entre dos puntos por los cuales circula una corriente eléctrica es proporcional a la intensidad de la corriente, así como a la resistencia que ofrece el medio por el cual circula” (ver ecuación (1))

$$\Delta V = I \cdot R \quad (1)$$

Donde ΔV es la diferencia de potencial, I la intensidad de la corriente eléctrica y R la resistencia del medio por el cual circula dicha corriente (Auge, 2008).



La resistencia de un medio está regida por la naturaleza y geometría de este. Si asimilamos la geometría a un cilindro de longitud l y sección A , la resistencia queda definida de la siguiente manera (ver ecuación ~~$R = \left(\frac{\rho \cdot l}{A}\right)$~~ (2)

$$R = \left(\frac{\rho \cdot l}{A}\right) \quad (2)$$

Donde ρ es la resistividad del conductor medida en ohm por metro ($\Omega \cdot m$).

De esta manera, sustituyendo la ecuación 2 en la ecuación 1, la diferencia de potencial queda definida como (ver ecuación (3):

$$\Delta V = I \left(\frac{\rho \cdot l}{A}\right) \quad (3)$$

La ecuación 3 describe entonces el principio que rige a los métodos eléctricos, donde se inyecta una corriente (o se emplea una corriente de origen natural) de una intensidad I , a través de un medio rocoso de resistividad ρ y sección A , midiendo la diferencia de potencial entre la fuente y el receptor ΔV , ubicados a una distancia l entre sí.

A su vez, los métodos eléctricos se subdividen en dos categorías. Aquéllos que emplean una corriente natural como fuente, entre los cuales tenemos el método de polarización espontánea (PE) y corrientes telúricas; y aquellos que emplean una corriente artificial, entre los cuales tenemos los métodos de: resistividades, caída de potencial, polarización inducida (PI) y equipotenciales (Mastrorosa, 2018).

5.2.1 Métodos de resistividades

En la prospección mediante los métodos de resistividades, las propiedades eléctricas del subsuelo son determinadas a partir de la medición directa o indirecta de la resistividad, lo que permite a su vez conocer la litología del subsuelo, así como los fluidos que puedan estar contenidos en él (Dentith & Mudge, 2014).

La resistencia es una propiedad eléctrica que expresa la oposición de un cuerpo al flujo de corriente a través de él. La unidad de medida de resistencia es el ohmio (Ω). Si definimos al cuerpo conductor como un cilindro longitud l y sección A , la resistividad del cilindro queda definida por la ecuación $R = \left(\frac{\rho \cdot l}{A}\right)$ (2 vista anteriormente:

$$R = \left(\frac{\rho \cdot l}{A} \right) \quad (4)$$

Donde ρ es la resistividad del conductor medida en ohm por metro ($\Omega \cdot m$), la cual está asociada a su naturaleza, que, en el caso de la prospección geoelectrica, es la resistividad de las rocas y sedimentos, así como de los fluidos que estos puedan contener en su interior (Auge, 2008).

A continuación, se presenta un gráfico con los valores de resistividades de ciertos tipos de rocas y fluidos (ver Fig 22).

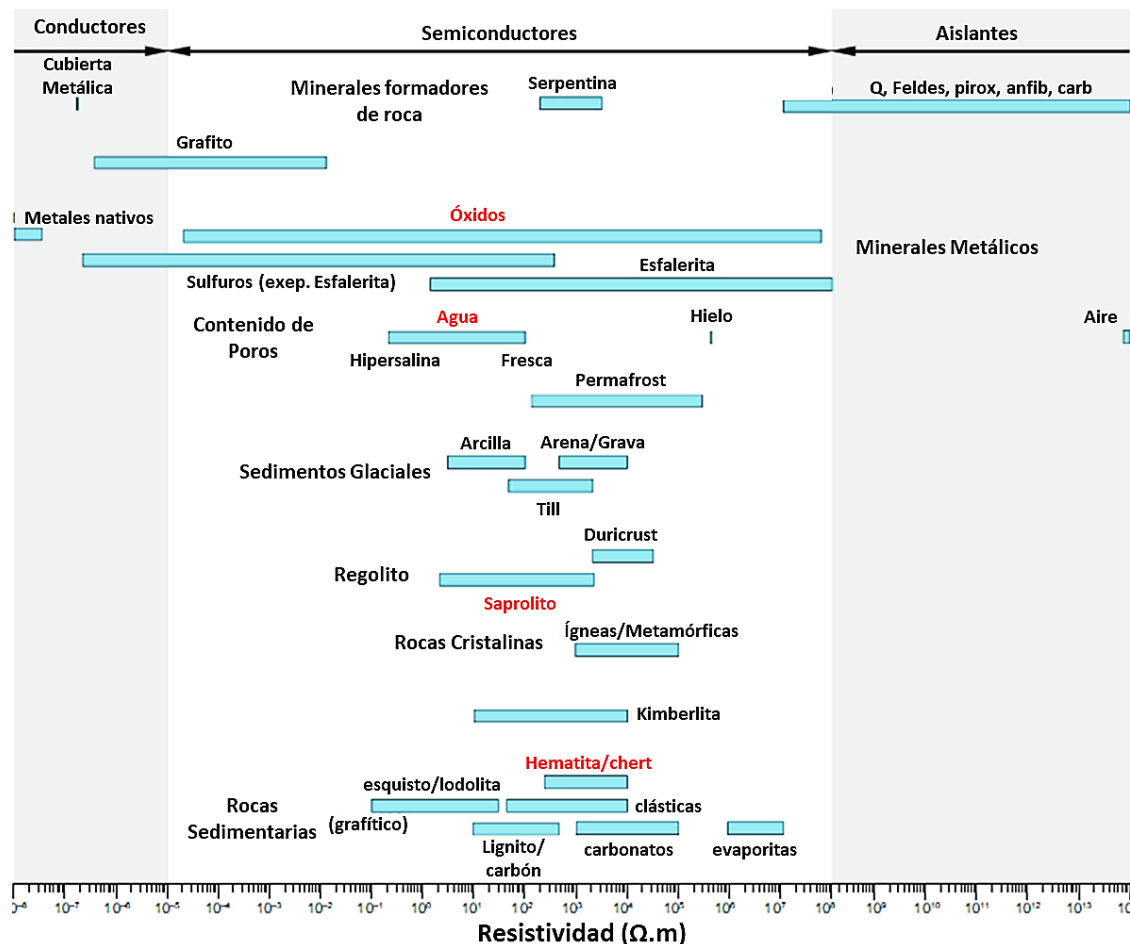


Fig 22. Rangos de resistividad típicos para algunos minerales comunes, tipos de roca y materiales superficiales. Tomado de Dentith et al. (2014).

Debido a que el subsuelo no es un conductor homogéneo e isotrópico, no es posible medir la resistividad real del subsuelo ρ , sino una Resistividad Aparente ρ_A , resultado de la contribución de las diferentes resistividades de las litologías que lo conforman (Kirsch, 2009). Es el objetivo del procesamiento computacional de los datos de resistividad aparente ρ_A medidos a partir de los

diferentes métodos de resistividades, el obtener las resistividades reales ρ de las litologías y fluidos que conforman el subsuelo (Kirsch, 2009).

El método de resistividades comprende dos modalidades de acuerdo con el propósito de la prospección: Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y Tomografías de Resistividad Eléctrica (Mastrorosa, 2018).

❖ Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

La tomografía de resistividad eléctrica, también llamada tomografía eléctrica (TE), combina los procesos de sondeo eléctrico y calicata en un mismo procedimiento, con la finalidad de generar un perfil de resistividad en dos dimensiones (2D), para investigar estructuras geológicas complejas que tengan variaciones laterales de resistividad (ver Fig 23). De esta manera, el perfil permite observar variaciones de la resistividad tanto en profundidad (dimensión vertical), como en distancia medida en superficie (dimensión horizontal) (Kirsch, 2009).

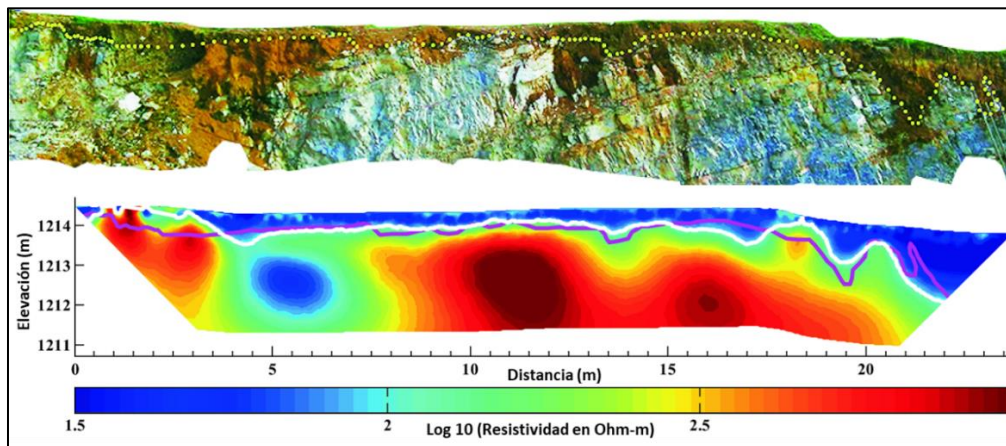


Fig 23. Ejemplo de un perfil de resistividad TRE en una dolomía. La línea amarilla representa la superficie de contacto de la dolomía. Modificado de [Cheng et al. \(2019\)](#).

Similar a los demás métodos de resistividad, la tomografía eléctrica emplea electrodos de corriente, electrodos de potencial y una fuente de energía eléctrica. Existen dos métodos distintos para la toma de datos en una tomografía eléctrica. El primero es el denominado, “Método de electrodos pasivos” en el cual se emplean una serie de electrodos o canales (generalmente 32), los cuales están conectados al medidor de resistividad mediante un cable multinúcleo. Se denominan electrodos pasivos ya que no poseen otra función que mantener el contacto galvánico entre el medidor y el suelo (Loke *et al.*, 2011).

Un circuito de intercambio interno controlado por una microcomputadora ubicada en el medidor de resistividad selecciona automáticamente los 4 electrodos (dos de corriente y dos de potencial), necesarios para tomar la medida según el arreglo seleccionado (dipolo-dipolo, Werner o Schlumberger). Generalmente, los medidores de resistividad con circuito de intercambio (*switching*) integrado tienen capacidad para dos o tres cables multinúcleos; sin embargo, empleando una unidad de intercambio externa a la unidad de resistividad principal, la capacidad electródica se puede expandir (Loke *et al.*, 2011).

El segundo método, denominado “Método de Electrodo Activos” o “Inteligentes”, emplea, en cambio, cables con menor cantidad de núcleos, conectados a electrodos que tienen ya integrado el *switch* usado para activar el electrodo, ya sea para inyectar corriente o medir la diferencia de potencial. Este método tiene la ventaja de disminuir el error en la adquisición de datos asociado a la interferencia (*cross-talk*) entre los núcleos de un cable multinúcleo. Además, resulta más sencillo incrementar el número de electrodos (hasta 256 o más) y usar espaciamientos básicos inter-electrodo de 20 m, 50 m y hasta 200 m (Kirsch, 2009).

A continuación, se muestra un esquema de la toma de datos en una tomografía eléctrica (ver Fig 24).

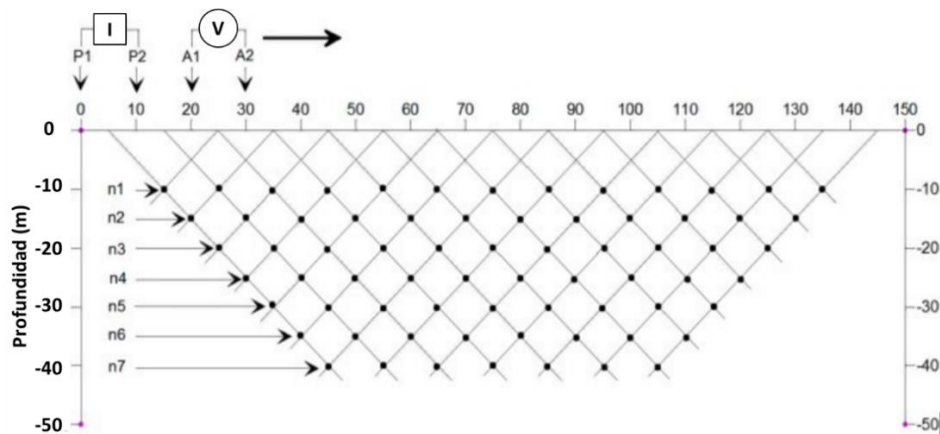


Fig 24. Esquema de la toma de datos en campo con la modalidad dipolo-dipolo. Modificado de [Octova et al. \(2016\)](#).

Los arreglos de electrodos más comúnmente empleados para una tomografía eléctrica son el dipolo-dipolo, Werner y Schlumberger. Entre estos tres, estudios teóricos, confirmados por experiencias en campo ([Roy y Amparo 1971](#), [Edwards 1977](#), [Barker 1989](#)), sugieren que el arreglo dipolo-dipolo es el que permite la mejor resolución de cuerpos en profundidad; sin embargo, en áreas con ruido eléctrico considerable, es mejor emplear configuraciones como la Werner o la



Schlumberger, que aumentan la fuerza de la señal; siendo Werner el arreglo con mejor resolución horizontal (Kirsch, 2009). Con respecto a la profundidad aparente de la medición, esta se calcula como $1/4$ o $1/6$ de la distancia entre los dos electrodos activos más externos en el arreglo (Kirsch, 2009).

Cada uno de los puntos en profundidad representa un dato de resistividad aparente asociado a una profundidad aparente, a partir de los cuales se genera una pseudosección de resistividad aparente medida (ver Fig 25.A). Con base a estas mediciones, se genera una segunda pseudosección de resistividad aparente, calculada a partir de los datos de resistividad aparente medidos, que se ajuste a la pseudosección original (ver Fig 25.B) (Kirsch, 2009).

Existen dos métodos para realizar la inversión de los datos de resistividad aparente y obtener la resistividad real: El método de inversión por bloques (*Block inversion method*) y el método de inversión restringido por suavidad (*Smoothness-constrained inversion method*). En el primero de estos métodos es el más utilizado, en el cual el modelo utilizado para la inversión consiste en un número de celdas rectangulares, donde el tamaño de cada celda se calcula automáticamente como una función del espaciamiento entre electrodos, o según condiciones establecidas por el usuario (ver Fig 25.C). El tamaño de las celdas suele incrementarse a media que aumenta la profundidad y hacia los bordes de la sección, esto último a causa de la baja sensibilidad en estas zonas (Kirsch, 2009). El método de optimización aplicado busca reducir la diferencia entre los valores de resistividades aparentes medidos y calculados, ajustando las resistividades del modelo de celdas, obteniendo así una sección de resistividad real (ver Fig 25.D). Este método de inversión es el más útil para delimitar la geometría de cuerpos con resistividades muy diferenciadas entre sí, aunque posee la desventaja de la necesidad de generar un modelo previo a partir del cual el programa procederá a iterar hasta ajustar al modelo calculado en el campo (Kirsch, 2009).

**UBA**

Universidad de Buenos Aires

Argentina virtus robur et studium

Especialización en Geología Minera

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

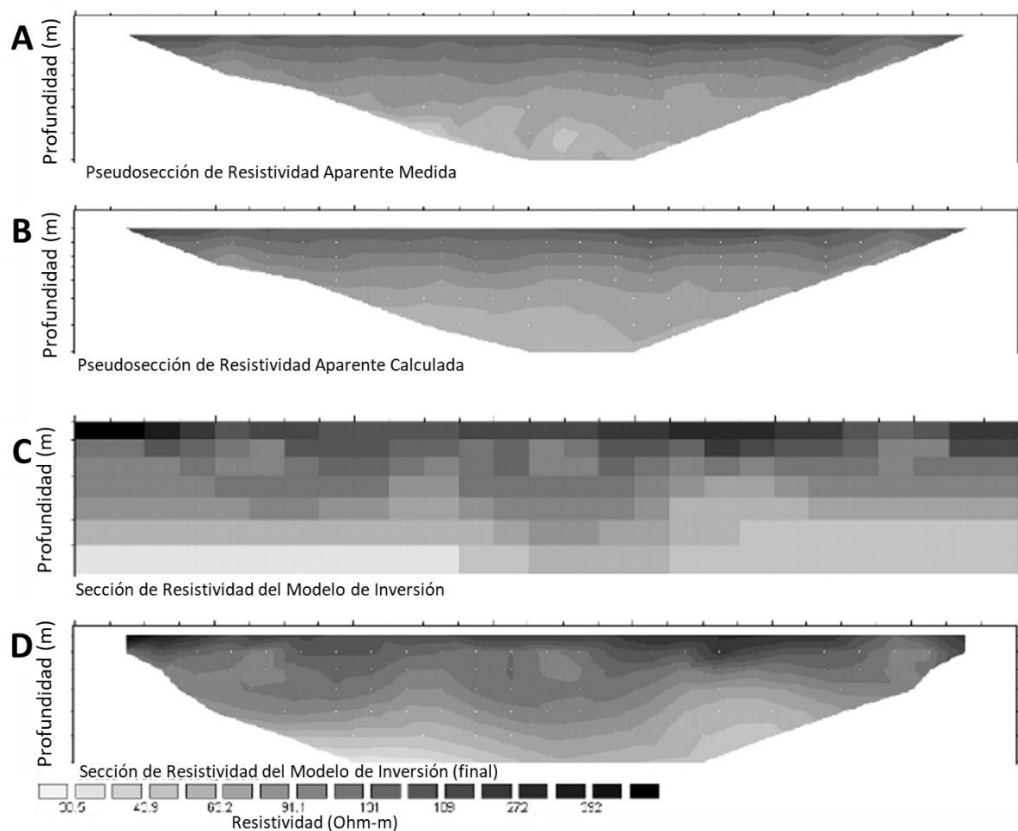


Fig 25. Procedimiento para la inversión en 2D de resistividad. Modificado de Kirsch (2009).

Sin embargo, al momento de procesar e interpretar los datos de resistividad, surge el problema de la “ambigüedad”, debido a que diferentes configuraciones de cuerpos y resistividades bajo la superficie pueden producir respuestas similares (ver Fig 26).

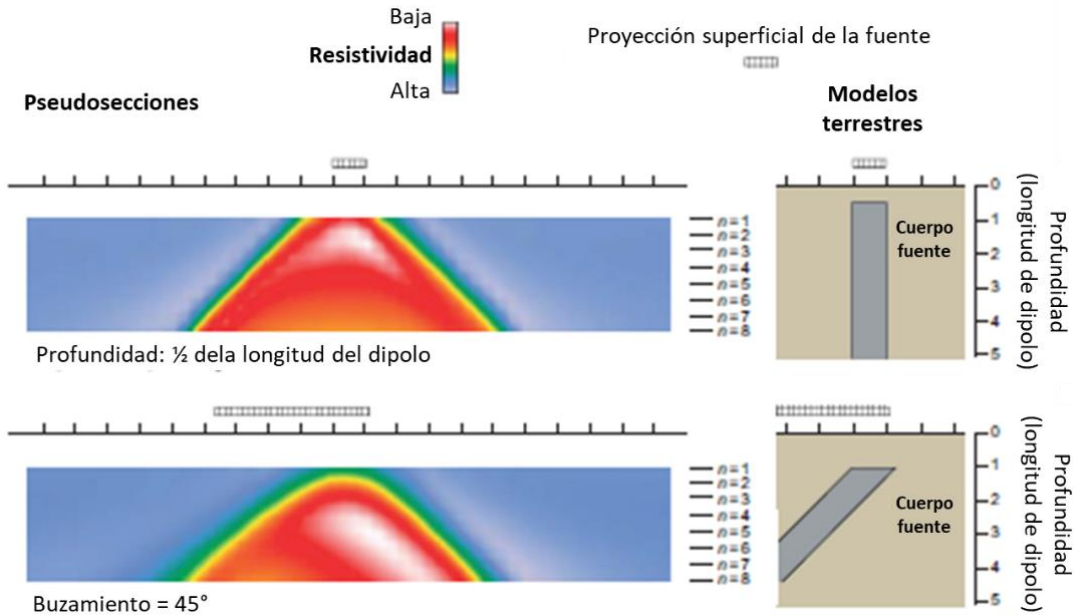


Fig 26. Resistividades computadas de las respuestas de modelos de conductividad 2D simples partiendo de un arreglo dipolo-dipolo. Modificado de Dentith (2014).

Además, la ubicación de los electrodos con respecto a las zonas anómalas tiene un efecto considerable en la medida de resistividad aparente, particularmente en las zonas más someras observadas en una pseudosección (Dentith & Mudge, 2014). También es necesario tomar en cuenta el efecto de distorsión que tiene el relieve sobre la localización en profundidad de las medidas de resistividad aparente. Por lo antes expuesto, es importante enfatizar que una pseudosección no es una imagen real del subsuelo, sino una abstracción matemática que requiere de correcciones y modelamiento para obtener una sección lo más aproximada a la disposición real del subsuelo (Dentith & Mudge, 2014).

Por último, en el procesamiento de los datos de resistividad aparente y su inversión para obtener la sección de resistividad real, se considera que no hay variación de resistividad perpendicular al rumbo del perfil (Kirsch, 2009). Para corregir este sesgo en el análisis y si las condiciones del área de estudio y el presupuesto lo permiten, se suelen realizar varios perfiles de tomografía paralelos (o subparalelos) entre sí, ubicados a intervalos regulares; así como perfiles perpendiculares a estos últimos, que se utilizan para corregir y “anclar” los perfiles entre sí al momento de modelar los datos (ver Fig 27).

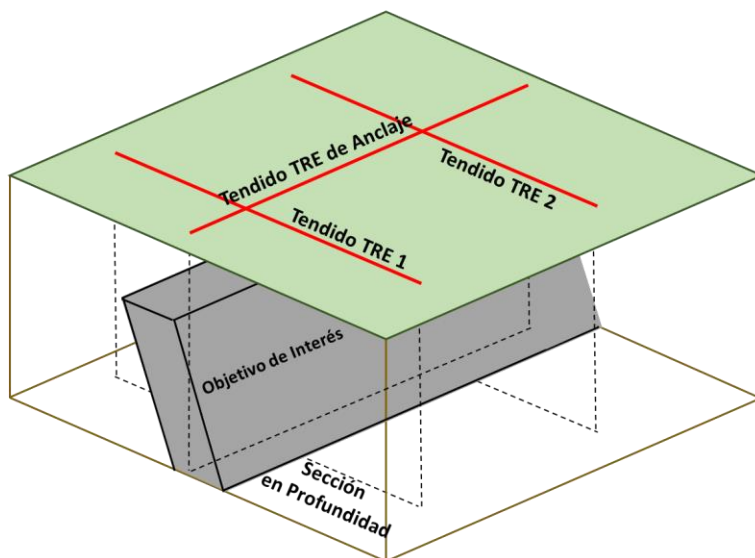


Fig 27. Planteamiento de campo de dos perfiles TRE con un tercer perfil de anclaje.

5.3 Percepción Remota

La percepción remota, también llamada sensoramiento remoto, comprende el estudio de datos satelitales y fotografías aéreas. Este método de prospección involucra la medición de la radiación electromagnética (por sus siglas en inglés EMR), en un rango de longitud de onda que va de $0,4 \mu\text{m}$ a 1 m , por medio de sensores ubicados en plataformas aéreas o espaciales (satélites), con la finalidad de caracterizar e inferir propiedades del terreno (Singhal & Gupta, 2010).

La interpretación geológica derivada del análisis de imágenes remotas ha sido ampliamente utilizada con el propósito de identificar lineamientos o zonas de fractura a lo largo de las cuales podría existir flujo de aguas subterráneas; así como la investigación de accidentes geográficos aptos para la prospección de aguas subterráneas.

5.3.1 Principios Físicos de la Percepción Remota

El principio básico que involucra la percepción remota es que cada objeto, dependiendo de sus características físicas, refleja, emite y absorbe intensidades variantes de radiación en diferentes rangos de longitud de onda del espectro electromagnético (EM). Las diferentes intensidades de luz emitida, absorbida o reflejada por los objetos en las diferentes longitudes de onda del espectro EM se pueden expresar como curvas denominadas curvas de respuestas espectrales (ver Fig 28). A partir de la respuesta espectral de distintos objetos en diferentes rangos de longitud de onda del EM, es posible determinar tipos de terrenos (ej. agua, suelo seco, suelo saturado, vegetación densa, etc.) y con ello mapear su distribución dentro de la imagen (Singhal & Gupta, 2010).

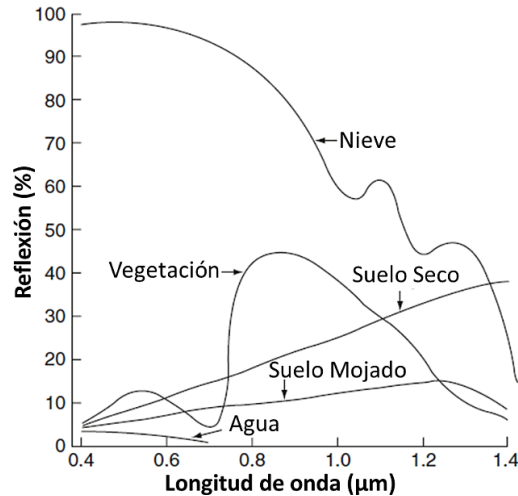


Fig 28. Curvas de respuestas espectral de algunas superficies. Modificado de Singhal et al. (2010).

La percepción remota puede realizarse utilizando la radiación EM proveniente del Sol o de la Tierra (método pasivo), así como de una fuente artificial (método activo). Partiendo de la ley de desplazamiento de Wien (ver ecuación (5)), la radiación solar reflejada domina el rango ultravioleta, visible e infrarrojo cercano del espectro EM, razón por la cual esta parte del espectro se denomina la “Región de Reflexión Solar”. Por otro lado, la radiación emitida por la Tierra domina entre las longitudes de onda que van de 3 μm a 20 μm , siendo esta región espectral denominada como “Infrarrojo Termal” (*Thermal IR*) (ver Fig 29). Además, la iluminación artificial utilizando radar es empleada frecuentemente en la región de microondas.

$$\lambda_m = \frac{A}{T} \quad (5)$$

Donde λ_m es la longitud de onda del pico de la curva de radiación del cuerpo [μm], T es la temperatura del cuerpo en grados Kelvin y A es una constante con un valor de 2898 $\mu\text{m K}$.

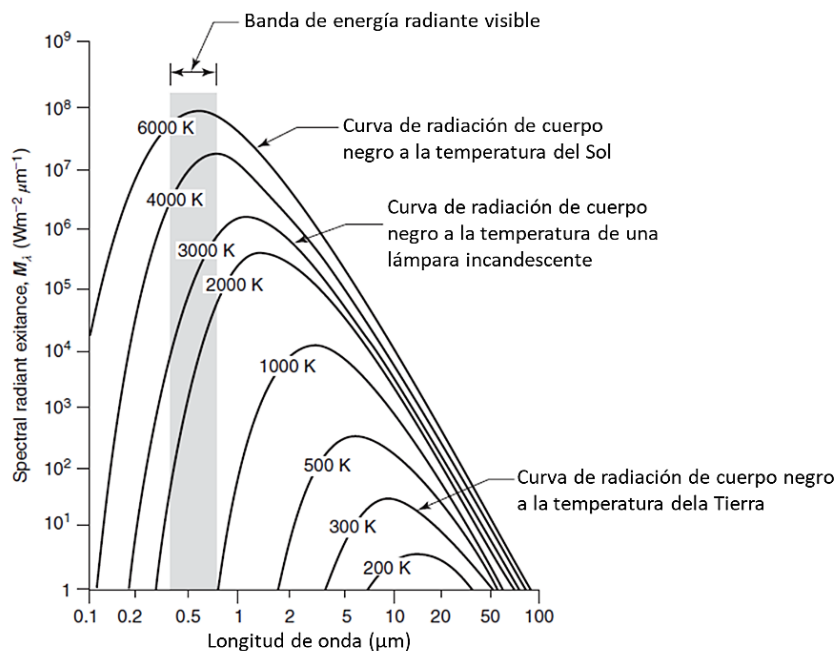


Fig 29. Distribución espectral de la energía irradiada por cuerpos negros de varias temperaturas.
 Modificado de Lillesand et al. (2015).

❖ Interacciones con la Atmósfera

Al pasar a través de la atmósfera terrestre, la radiación EM interactúa con los componentes de ésta, siendo dispersada, absorbida y transmitida de manera selectiva. La dispersión de Rayleigh (*Rayleigh Scattering*) es el tipo más importante de dispersión, la cual conlleva a disminuciones en la calidad de imagen en la región ultravioleta-azul del espectro EM. Esta ocurre cuando la radiación interactúa con moléculas atmosféricas y otras partículas que son más pequeñas en diámetro que la longitud de onda de la radiación con la que interactúan. El efecto de la dispersión de Rayleigh es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda, por lo cual hay una mayor tendencia de dispersión de longitudes de onda cortas, contrario a longitudes de onda largas (Lillesand et al., 2015).

Contrario a la dispersión, la absorción selectiva de la radiación EM a causa de gases atmosféricos como el vapor de agua, dióxido de carbono y ozono, constituye una pérdida de energía efectiva. Las regiones del espectro EM donde ocurre el menor grado de absorción atmosférica se denominan ventanas atmosféricas y comprenden los rangos de longitud de onda donde se captan los datos de percepción remota. Las ventanas atmosféricas más importantes se encuentran en las regiones visible (VIS), infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo de onda corta (SWIR), infrarrojo termal (TIR) y microondas del espectro EM (ver Fig 30) (Singhal & Gupta, 2010).

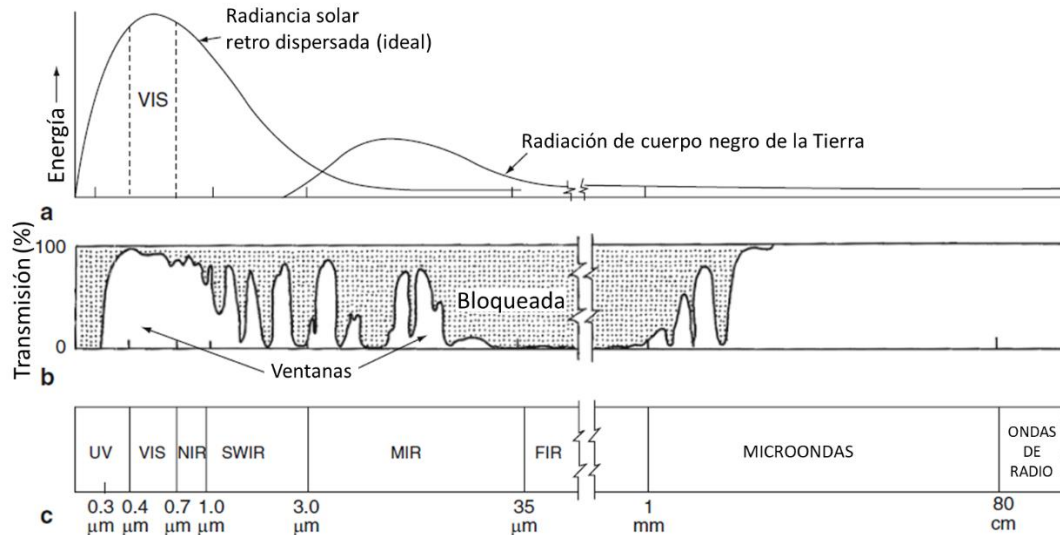


Fig 30. **a** Radiación solar retro dispersada (ideal) y radiación de cuerpo negro de la tierra, **b** ventanas atmosféricas, **c** espectro EM y nomenclatura. Modificado de Singhal et al. (2010).

5.3.2 Sensores Remotos

Un sensor es un dispositivo empleado para medir la intensidad de radiación en una determinada región del espectro EM, reflejada o emitida por la superficie terrestre u otros objetos. Con respecto a la fuente de radiación EM, los sensores se pueden clasificar en dos tipos: Activos, que son aquellos sensores que emiten su propia radiación hacia el objetivo, midiendo la radiación reflejada por este (RADAR, LiDAR) y Pasivos, que son aquellos sensores que detectan la radiación natural emitida o reflejada por el objetivo (sensores infrarrojos, sensores visibles, cámaras, etc.) (Gege, 2013).

En general, los sensores remotos se dividen en cuatro clases: sistemas fotográficos, sistemas de escaneo en línea, cámaras digitales y sistemas de imagen por radar. De estos, los más importantes en la prospección de aguas subterráneas son los sistemas de escaneo en línea y los sistemas de imagen por radar (Singhal & Gupta, 2010).

❖ Sistemas de escaneo en línea

Los sistemas de escaneo en línea multiespectrales han sido los dispositivos más importantes para la percepción remota desde plataformas satelitales. Un escáner es un dispositivo no fotográfico que genera datos digitales sobre la intensidad de la radiancia del suelo asociada a un rango o banda del espectro EM (VIS, IR, SWIR, etc.). La escena capturada se considera conformada por un gran número de celdas más pequeñas (pixeles). La radiación de cada celda, denominada *brightness value* (BV), es recolectada e integrada por el sistema de escaneo, obteniendo un número digital (DN por sus siglas

en inglés) asociado a cada píxel. En el caso de imágenes multiespectrales, cada píxel incluye múltiples DN, uno para cada banda espectral. Este proceso, por el cual se convierte la señal analógica en un valor digital se denomina escaneo (Singhal & Gupta, 2010) (ver Fig 31).

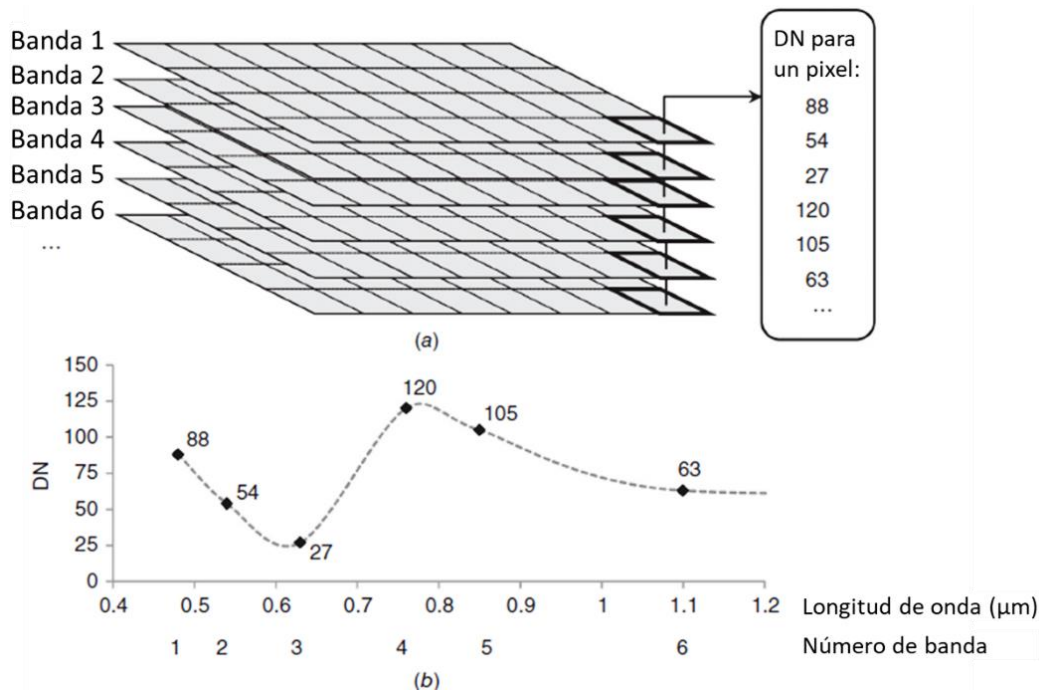


Fig 31. Forma general de datos de imágenes multiespectrales. Modificado de Lillesand et al. (2015).

La resolución del sensor es un parámetro importante y viene dada en términos de resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal.

- ✓ La resolución espacial se refiere a la resolución máxima de la imagen asociada al tamaño del píxel con respecto al área superficial de la imagen; así como a la precisión de la ubicación de cada píxel de la imagen con su coordenada correspondiente en la superficie terrestre.
- ✓ La resolución espectral se refiere al rango de longitud de onda en que opera el canal espectral del sensor.
- ✓ La resolución radiométrica se refiere al número total de niveles de cuantización usados en el sensor para la conversión de la señal analógica al valor digital DN (de 8 a 32 bits).
- ✓ La resolución temporal se refiere al tiempo que tarda el satélite en tomar una nueva imagen de la misma área en la superficie terrestre.

Como se mencionó previamente, a partir de la radiancia de la superficie terrestre recolectada y procesada por los sensores se pueden generar distintas imágenes para cada una de las bandas en



las cuales opera cada sensor, siendo las más comunes: Azul, Verde y Rojo del espectro visible; Infrarrojo cercano; Infrarrojo de onda corta; Infrarrojo termal; Pancromática; Cirrus y Aerosol Costero (Jensen, ~~Remote Sensing of the Enviroment. An Earth Resource Perspective~~, 2014). En la Tabla 1 a continuación, se muestra la longitud de onda de estas bandas que capturan los sensores de las plataformas Landsat 8 y Sentinel 2.

Tabla 1. Longitudes de onda de las bandas Landsat 8 y Sentinel 2.

Bandas L8		Centro de Onda (μm)	Long. De Onda (inf - sup)	Resolución (m)	Bandas S2		Centro de Onda (μm)	Long. De Onda (inf - sup)	Resolución (m)
1	Aero. Cos.	0,443	0,435 - 0,451	30	1	Aero. Cos.	0,443	0,421 - 0,457	60
2	Azul	0,482	0,452 - 0,512	30	2	Azul	0,494	0,439 - 0,535	10
3	Verde	0,561	0,533 - 0,590	30	3	Verde	0,560	0,537 - 0,582	10
4	Rojo	0,655	0,636 - 0,673	30	4	Rojo	0,665	0,646 - 0,685	10
					5	VNIR	0,704	0,694 - 0,714	20
					6	VNIR	0,740	0,731 - 0,749	20
					7	VNIR	0,781	0,768 - 0,796	20
					8	NIR	0,834	0,767 - 0,908	10
5	NIR	0,865	0,851 - 0,879	30	8a	NIR	0,864	0,848 - 0,881	20
					9	Vap. Agua	0,944	0,931 - 0,958	60
9	Cirrus	1,373	1,363 - 1,384	30	10	Cirrus	1,375	1,338 - 1,414	60
6	SWIR	1,609	1,567 - 1,651	30	11	SWIR	1,612	1,539 - 1,681	20
7	SWIR	2,201	2,107 - 2,294	30	12	SWIR	2,194	2,072 - 2312	20
8	Pan	0,590	0,503 - 0,676	15					
10	TIRS	10,895	10,60 - 11,19	100 => 30					
11	TIRS	12,005	11,50 - 12,51	100 => 30					

Estas imágenes, posterior a su preprocesamiento donde se les aplican las correcciones asociadas a distorsiones ocasionadas por la atmósfera terrestre (Corrección Atmosférica), así como a otros factores asociados a ruido electromagnético y distorsiones geométricas; son interpretadas con base a ocho criterios principales: localización, tono, tamaño, forma, textura, patrones, sombras, altura y profundidad.

Además de los criterios previamente mencionados, existe el criterio del Color. Es posible combinar bandas individuales, por lo general tres bandas a la vez, asignadas a los colores azul, verde y rojo, para generar imágenes compuestas (también llamadas imágenes de color falso) con la finalidad de combinar las propiedades de cada banda, permitiendo desplegar una mayor cantidad de información respecto a la escena observada, que no es posible apreciar en las imágenes blanco/negro individuales, empleando para ello el patrón espectral del rasgo o rasgos de interés (Jensen, 2014). En la Tabla 2 continuación, se listan una serie de combinaciones de bandas y la información que éstas aportan.



Tabla 2. Combinaciones de banda Landsat 8 y Sentinel 2.

Combinaciones de Bandas	Bandas L8	Bandas S2
Natural	4 3 2	4 3 2
Infrarojo (Vegetación)	5 4 3	8 4 3
Agricultura	6 5 2	11 8 2
Penetración Atmosférica	7 6 5	12 11 8a
Vegetación Saludable	5 6 2	8 11 2
Tierra/Agua	5 6 4	8 11 4

❖ Sistemas de imagen por radar

Además de detectar la radiación solar reflejada por la Tierra, los instrumentos de percepción remota son utilizados para recolectar datos tridimensionales de la superficie, donde cada observación tiene una coordenada Z que representa elevación y coordenadas X e Y que representan la posición en superficie donde fue tomada la medida. Cuando este tipo de datos se toman sobre áreas amplias de la superficie terrestre, los datos de elevación pueden representar la topografía del terreno y pueden ser empleados para generar modelos de elevación digital (*DEM*) (Lillesand *et al.*, 2015).

Los sensores que recolectan estos datos funcionan en el rango de las microondas, que abarcan longitudes de onda de 1 mm a 1 m del espectro EM. Las ventajas de las microondas es que son capaces de penetrar la atmósfera en casi todas las circunstancias, además de no presentar una relación directa con sus contrapartes en el rango visible o el rango termal del espectro EM.

Los sistemas de radar aerotransportados o satelitales se les denomina colectivamente como sistemas de imagen por radar. El Radar (*Radio Detection And Ranging*) es un sensor activo que emite ondas de radio (microondas) desde una antena, a una determinada frecuencia, con el fin de detectar la fracción de la energía emitida que es reflejada por los objetos en superficie hacia el sensor ([ver imagen](#)).

Como se muestra en la ecuación (6), el ancho del haz emitido por la antena (*bandwidth*), del cual depende la resolución azimutal (ver ecuación (7)), es directamente proporcional a la longitud de onda e inversamente proporcional a la longitud de la antena. Las modalidades aerotransportadas están limitadas generalmente por el tamaño de la antena que pueden emplear, lo que implica la elección de una mayor frecuencia (menor longitud de onda). Antenas de mayor tamaño permiten que el haz de ondas de radio esté mejor enfocado hacia el objetivo; sin embargo, existen

limitaciones físicas para el tamaño de la antena. Por ello, una mayor frecuencia también permite un mejor enfoque para cualquier tamaño de antena (Parker, 2017).

$$\beta = \frac{\lambda}{AL} \quad (6)$$

Donde β es el ancho del haz, λ es la longitud de onda y AL es la longitud de la antena.

$$R_a = \overline{SR} * \beta \quad (7)$$

Donde R_a es la resolución azimutal y \overline{SR} es el rango de inclinación (la distancia de la antena al objetivo en el suelo) (ver Fig 32).

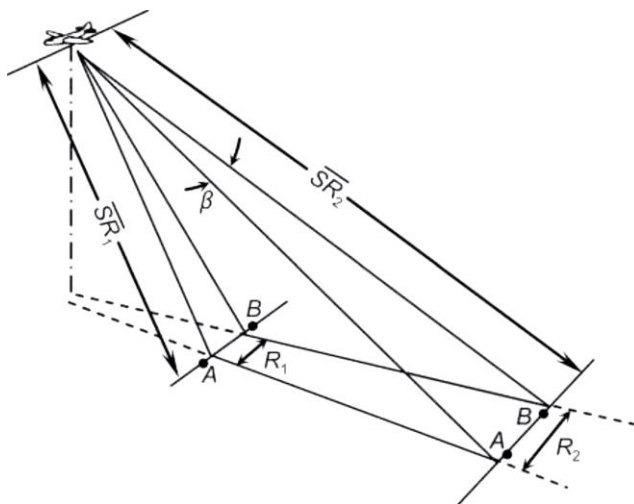


Fig 32. Dependencia de la resolución azimutal (R_a) del ancho del haz (β) y el rango de inclinación (\overline{SR}) de la antena. Modificado de Lillesand et al. (2015).

A continuación, se presenta una tabla con las bandas de frecuencia empleadas por los sistemas de imágenes por radar (ver Tabla 3).

Tabla 3. Frecuencia de las bandas de radar.

Banda de Radar	Frecuencia (GHz)	Long. de Onda (cm)
Milimétrica	40 - 100	0,75 - 0,30
Ka	26,5 - 40	1,1 - 0,75
Ka	18 - 26,5	1,7 - 1,1
Ku	12,5 - 18	2,4 - 1,7
X	8 - 12,5	3,75 - 2,4
C	4 - 8	7,5 - 3,75
S	2 - 4	15 - 7,5
L	1 - 2	30 - 15
UHF	0,3 - 1	100 - 30



Como se mencionó anteriormente, otro elemento crítico de los sistemas de imagen por radar es el diseño de la antena. La antena es capaz de enfocar la energía emitida y recibida en una dirección dada. El diseño de la antena influye en la energía que la antena es capaz de transmitir en el área deseada, cuánta energía puede recibir de esa misma dirección y cuánto de la energía no deseada de otras direcciones es atenuada (Parker, 2017).

Dependiendo de la modalidad para la toma de datos, se desprenden varias categorías, siendo las más importantes:

- ✓ Radar de apertura real (RAR).
- ✓ Radar laser (LiDAR).
- ✓ Radar de apertura sintética (SAR).
- ✓ Radar de apertura sintética inversa (ISAR).

Entre estas categorías, los métodos más utilizados son el RAR y el SAR. Existen dos maneras principales de controlar el ancho del haz emitido por la antena: (1) controlando el tamaño físico de la antena o (2) sintetizando una antena “virtual” que funciona como si fuese una antena de mayor tamaño. Los sistemas donde el ancho del haz es controlado por el largo de la antena, se denominan sistemas de fuerza bruta o sistemas de apertura real (RAR). Los sistemas que emplean este método tienen la ventaja que otorga la simplicidad de su diseño al momento de procesar los datos; sin embargo, debido a los problemas de resolución, su operación está restringida a rangos relativamente cortos, poca elevación y mayores frecuencias (Lillesand *et al.*, 2015).

Las limitaciones de los sistemas RAR se pueden superar con los radares de apertura sintética (SAR). Estos sistemas emplean una antena física pequeña, pero, mediante procesos modificados para la recolección y procesamiento de datos, sintetizan el efecto de una antena de mayor tamaño. El resultado de este método de operación es un ancho de haz efectivo bastante estrecho, inclusive a grandes distancias del objetivo.

Estos sistemas emplean el movimiento de la antena que es transportada para transformar la antena individual en un grupo de antenas sintéticas enlazadas mediante métodos matemáticos, incrementando el largo efectivo de la antena. Mediante este proceso, antenas virtuales de varios kilómetros pueden ser sintetizadas a partir de las mediciones de una antena individual a lo largo de la ruta de vuelo (ver Fig 33).

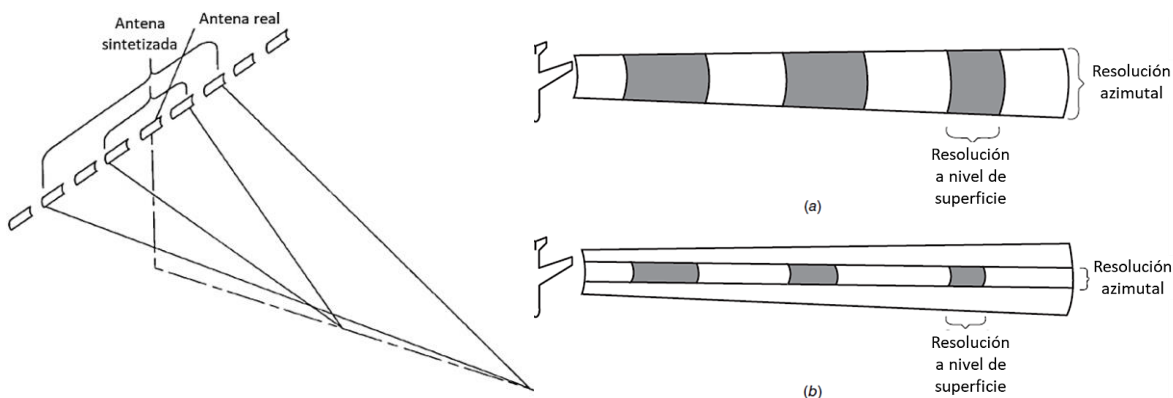


Fig 33. (izquierda) Concepto de un arreglo de antenas reales formando una apertura sintética. (derecha) Variación con la distancia de la resolución espacial de apertura real (a) respecto a la apertura sintética (b) de sistemas de imágenes por RADAR. Modificado de Lillesand et al. (2015).

De esta manera, se obtiene una resolución azimuthal constante independiente de la distancia del objetivo, lo que representa una gran ventaja sobre los sistemas RAR. Este método es el empleado en los sistemas de radar satelitales, ya que permite cubrir grandes áreas de la superficie terrestre con una resolución constante.

Como se mencionó previamente, a partir de los datos de elevación obtenidos mediante sensores de radar, es posible generar un modelo de elevación digital, el cual es un arreglo de datos de elevación a intervalos regulares de distancia (malla), referenciados horizontalmente ya sea a una proyección acorde a la Universal Transversal de Mercator (UTM) o a un sistema de coordenadas geográficas (USGS, 2021).

A partir de un DEM es posible realizar múltiples análisis con base a la topografía del área de estudio, entre los cuales se incluyen: drenaje superficial, cuencas hidrográficas, lineamientos, pendientes, curvatura, entre otros. Estos análisis se realizan mediante softwares computacionales denominados Sistemas de Información Geográfica, cuya definición se encuentra más adelante. Además, la información obtenida a partir de los sensores de radar sirve para complementar los análisis realizados a partir de los datos recolectados por los sistemas de escaneo en línea, obteniendo así un entendimiento más completo del área estudiada.

5.3.3 Diseño de Órbita

Para la mayoría de los satélites de observación terrestre, la órbita es aproximadamente circular, a altitudes mayores de 500 km sobre la superficie. Por otro lado, la inclinación de la órbita hace referencia al ángulo que ésta forma con el ecuador. Una órbita polar, que cruza los polos terrestres,

tiene una inclinación de 90° con respecto al ecuador, mientras que una órbita ecuatorial, es aquella cuya inclinación es 0° (Lillesand et al., 2015).

Se pueden diferenciar dos tipos de órbitas, la geoestacionaria y la heilosíncrona o sincrónica al sol. La órbita geoestacionaria es una órbita ecuatorial (a 36.000 km de altura aproximadamente), que produce un periodo orbital de 24 horas. En cambio, una órbita heilosíncrona es el resultado de un periodo de órbita y una inclinación tal que el satélite mantiene el paso del Sol en su avance occidental a medida que rota la Tierra. De esta manera, el satélite siempre cruza el ecuador a la misma hora local. Este es el tipo de órbita que tienen los satélites empleados en percepción remota.

5.4 Sistemas de Información Geográfica

Los sistemas de información geográfica (SIG o GIS por sus siglas en inglés), son un marco de referencia para compilar, administrar y analizar datos de referencia física y geográfica. Los datos en un GIS están anclados a una localización única (Sexton, 2021).

Un software SIG permite compilar una serie de datos y localizarlos en un ámbito geográfico. Estos datos son almacenados de manera independiente en diversas capas temáticas (ver Fig 34), facilitando el trabajo y análisis de estos datos, así como la producción de mapas y modelos (Martínez, 2007).

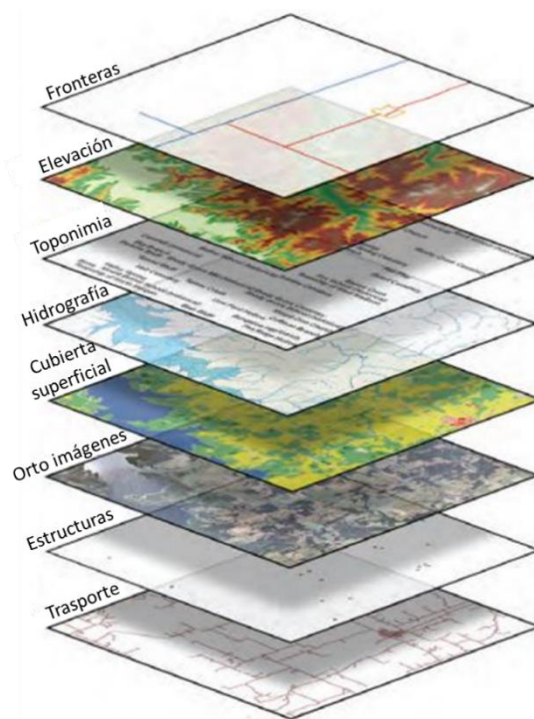


Fig 34. Capas de información de un sistema de información geográfica. Modificado de USGS (2022).



Los sistemas de información geográfica trabajan con dos tipos diferentes de modelos geográficos, el “Raster” y el “Vector” (Moran & Malma, 2013).

5.4.1 Raster

En un modelo “*raster*” se reconstruye una imagen como un modelo continuo de celdas. Este se utiliza para representar de manera digital fotografías aéreas, mapas e imágenes satelitales. Cada una de las celdas que compone a la imagen representa un píxel de la imagen original y cada celda contiene un valor o una serie de valores que representan un tipo de información (ESRI, 2021).

5.4.2 Vector

En un modelo vectorial, la información se trabaja como puntos, líneas o polígonos, codificados y almacenados como una colección de coordenadas X, Y. Este tipo de archivos se usa para representar caminos, ríos, locaciones, territorios, entre otros. Este modelo de representación de datos es sumamente útil para representar información discretizada (Moran & Malma, 2013).

5.4.3 Dirección de Flujo

La herramienta de Dirección de Flujo en un SIG permite conocer, basado en un modelo de elevación digital (DEM), el desplazamiento y la dirección de la escorrentía superficial de un terreno (ESRI, 2021).

5.4.4 Cuenca

La herramienta de Cuenca permite, a partir de un DEM y de un *raster* de Dirección de Flujo, determinar las cuencas hidrográficas en un terreno ([QGIS, 2021](#)).

5.4.5 Zona de captación

La herramienta de Zona de Captación permite determinar las redes de drenaje de un terreno, basado en un modelo DEM de este ([QGIS, 2021](#)).

5.4.6 Red de Canales

La herramienta de Red de Canales permite obtener las redes de drenaje, cuencas hidrográficas, dirección de flujo y conectividad de flujo a partir de una única herramienta, empleando un modelo de elevación digital del terreno ([QGIS, 2021](#)).



5.5 Cuenca Hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es una zona de la superficie terrestre drenada por un único sistema de drenaje natural, donde las aguas fluyen al mar o a un lago endorreico a través de una red de drenajes secundarios que convergen en un cauce principal único (Evert, 2010). Cuando el cauce principal desemboca en el mar o un lago con salida al mar, se dice que es una cuenca “abierta” o exorreica; mientras que, si el cauce principal desemboca en un cuerpo de agua aislado del mar, se dice que la cuenca es “cerrada” o endorreica (IMTA, 2021).

Cada cuenca puede dividirse a su vez en subcuencas, las cuales se definen como la superficie de terreno cuya escorrentía superficial fluye en su totalidad a través de una serie de corrientes, ríos y, eventualmente, lagos hacia un determinado punto de un curso de agua (generalmente un lago o una confluencia de ríos) (MITECO, 2021).

5.6 Hidrogeología

La hidrogeología, también llamada hidrología subterránea, es la rama de la hidrología que estudia las aguas subterráneas, su almacenamiento, circulación y distribución en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción humana (Llamas & Galofré, 1983). Es, además, una materia multidisciplinaria que involucra otras ramas de las Ciencias de la Tierra como la estratigrafía, la geología, la geotecnia, la geofísica, la hidroquímica, la mecánica de fluidos, entre otras disciplinas (Llamas & Galofré, 1983).

El origen de las aguas subterráneas es explicado mediante el ciclo hidrológico. El agua superficial proveniente de lluvias, ríos, lagos y otros cuerpos de agua superficiales, se infiltra en el subsuelo por medio de fallas, fracturas y litologías permeables, acumulándose en medios permeables y porosos. Si el medio se encuentra confinado entre capas impermeables, esto le permite retener un volumen de agua. En caso contrario, el agua subterránea fluye lentamente dentro del medio permeable, hasta llegar nuevamente a superficie (Mastrorosa, 2018).

De acuerdo con el potencial de almacenamiento y transmisión del agua subterránea de una formación geológica, se desprenden las clasificaciones a continuación.

5.6.1 Acuífugo

Se designa como un acuífugo a aquellas formaciones geológicas que no permiten el almacenamiento ni la transmisión, asociado a su baja permeabilidad y porosidad. Un acuífugo puede



ser el caso de rocas ígneas poco fracturadas o con baja conectividad entre las fracturas (Castillo *et al.*, 2020).

5.6.2 *Acuicludo*

Un acuicludo es un medio formado por estratos impermeables que impiden el movimiento del agua, pero cuya porosidad es favorable para almacenar agua. Sin embargo, al tener una transmisividad casi nula, la explotación del recurso hídrico no es económicamente rentable. Un ejemplo es aquéllos formados por arcillas y pizarras, que, gracias a una alta porosidad (45-55%), pueden almacenar agua, pero poseen una conductividad hidráulica de entre 10^{-7} a 10^{-9} cm/s (Castillo *et al.*, 2020).

5.6.3 *Acuífero*

Un acuífero es un estrato o formación geológica que, permitiendo la circulación de agua por sus poros o grietas, es capaz de acumular un volumen de agua cuya extracción es económicamente rentable, asociado a su conductividad hidráulica (Llamas & Galofré, 1983).

La estructura de un acuífero comprende:

- ✓ Una zona de saturación situada por encima de una capa impermeable, donde los poros del cuerpo rocoso están saturados de agua.
- ✓ El nivel freático, que corresponde al límite superior de la zona saturada que la separa de la zona vadosa. Este nivel varía según las condiciones climáticas: en épocas secas, cuando la tasa de recarga del acuífero decrece, el nivel freático desciende; mientras que, en épocas con mayor tasa de precipitación, el nivel freático asciende.
- ✓ Una zona de aireación o vadosa, que corresponde al espacio comprendido entre el nivel freático y la superficie, donde no todos los poros del cuerpo rocoso están llenos de agua.

Según la geometría y la disposición de la formación geológica, los acuíferos se clasifican en:

❖ Acuífero libre o no confinado

Es aquél en el que el límite superior o superficie freática se encuentra en contacto con la atmósfera a través de los espacios de la zona no saturada (Castillo *et al.*, 2020).



❖ **Acuífero confinado**

Es aquél cuya unidad geológica se encuentra limitada por estratos de baja permeabilidad, causa por la cual el agua dentro de la formación se encuentra confinada a una presión hidráulica mayor a la presión atmosférica (Castillo *et al.*, 2020).

Según la litología y tipo de porosidad, los acuíferos se clasifican en:

❖ **Acuíferos detríticos**

Son acuíferos de rocas o sedimentos detríticos, cuya permeabilidad está asociada a su porosidad intergranular (porosidad primaria). Si la roca se encuentra fracturada, la porosidad puede ser también de tipo secundaria, asociada a dichas fracturas. Los materiales que conforman este tipo de acuíferos comprenden aquéllos con tamaño de grano arena: arenas, arcosas, areniscas, gravas y conglomerados (Hispagua, 2021)

❖ **Acuíferos fisurados y/o kársticos**

Comprende a aquellos acuíferos en rocas carbonatadas (calizas, dolomías, etc.) u otro tipo de rocas que presenten diaclasas, fracturas y/o disolución (rocas ígneas, metamórficas, detríticas con un alto grado de consolidación, etc.). La permeabilidad está asociada a grietas y fisuras, tanto de origen mecánico, como de disolución. Ejemplos de rocas asociadas a este tipo de acuíferos son las calizas, dolomías, yesos, granitos, basaltos, esquistos, etc.

5.7 Estructuras relevantes para la zona de estudio

Estas estructuras son fracturas, foliaciones, planos de estratificación, fallas y otros contactos, etc.

5.7.1 Fracturas

Las fracturas son planos a lo largo de los cuales los esfuerzos (tectónicos, de contracción, de erosión, de meteorización, etc.), han causado una pérdida parcial de la cohesión en el cuerpo rocoso. Convencionalmente, una fractura se define como un plano de discontinuidad donde no se percibe ningún movimiento paralelo a su superficie (Singhal & Gupta, 2010).

Por otro lado, las zonas de fractura son zonas donde se presenta una gran densidad de fracturas con alto grado de interconexión entre sí, lo que contribuye a una mayor conductividad hidráulica. Estas zonas abarcan áreas con extensiones de varios kilómetros.



Las fracturas se pueden clasificar en dos grandes grupos: (a) sistemáticas, que son aquellas fracturas planares y con una distribución más regular y (b) no sistemáticas, que tienen una distribución irregular y están curvadas.

Además, las fracturas se pueden clasificar por su geometría y su origen (Singhal & Gupta, 2010).

❖ Clasificación Geométrica

Con base a la relación geométrica de la fractura con la foliación de la roca, éstas se pueden clasificar en:

- ✓ Fracturas de rumbo: Son aquellas fracturas cuyo rumbo es paralelo al rumbo de la estratificación/foliación de la roca.
- ✓ Fracturas de buzamiento: Son aquellas fracturas cuyo rumbo es paralelo al buzamiento de la estratificación/foliación de la roca.
- ✓ Fracturas oblicuas: Son aquellas fracturas cuyo rumbo es oblicuo al rumbo de la estratificación/foliación de la roca.
- ✓ Fracturas de estratificación: Son aquellas fracturas paralelas al plano de estratificación/foliación de la roca.

❖ Clasificación Genética

Con base a su origen, las fracturas pueden clasificarse en tres tipos.

- ✓ Fracturas de cizalla: Son aquellas fracturas que pueden no exhibir desplazamiento de cizalla y se generan en sets conjugados con un ángulo diedro $2i > 45^\circ$ (ver Fig 35).
- ✓ Fracturas de dilatación: Son fracturas de origen tensional, desarrolladas perpendicular al plano de estratificación (ver Fig 35).
- ✓ Fracturas Híbridas: Son fracturas cuyo origen exhibe características de cizalla y dilatación. Pueden ocurrir en sets conjugados con un ángulo diedro $2i < 45^\circ$. Son fracturas abiertas, parcialmente rellenas de venas de mineral y pueden presentar cierto grado de cizallamiento (ver Fig 35).

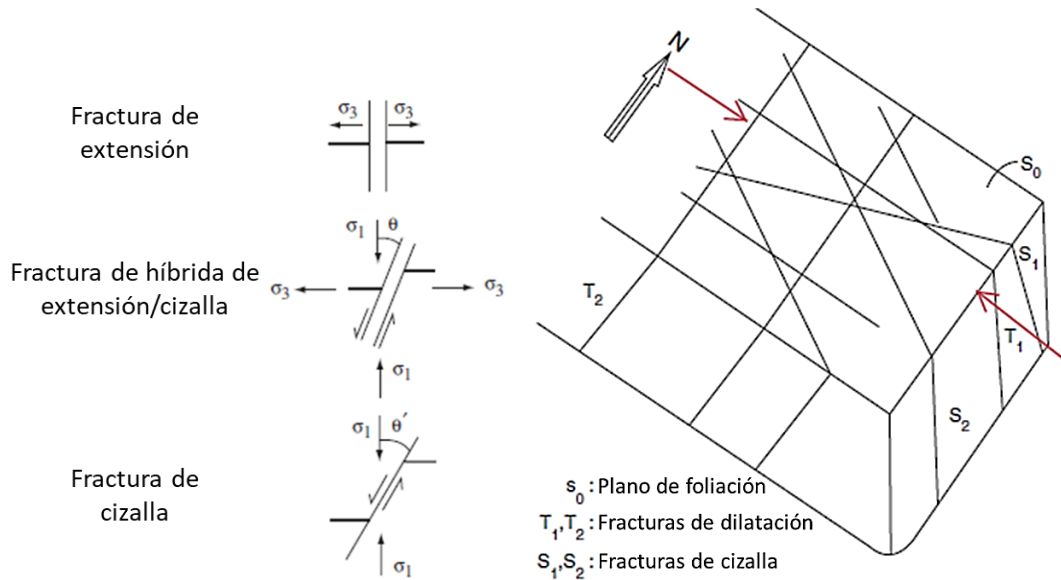


Fig 35. (Izquierda) diagrama de esfuerzos de distintas fracturas. (Derecha) Formación de cuatro grupos de fracturas en el caso de un estrato. Modificado de Singhal et al. (2010).

5.8 Laterita

Las lateritas son depósitos superficiales residuales, resultado de procesos de meteorización subaerea de larga duración sobre rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias, a causa de los ciclos con altas tasas de precipitación y subsecuente sequía que predominan en zonas tropicales a nivel mundial (ver Fig 36). Un periodo de lateritización extensa ocurrió entre el Terciario y el Cuaternario (35 a 1,5 Ma) (Schellmann, 2021).

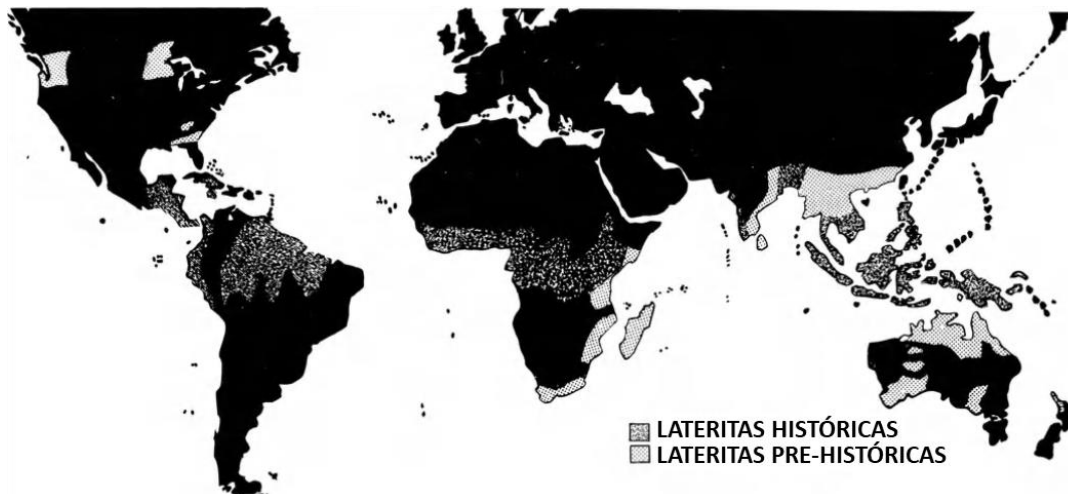


Fig 36. Distribución de lateritas a nivel mundial. Modificado de Persons et al. (1970).

Para que se desarrolle una laterita en un lugar determinado, es necesario que existan una serie de características, enumeradas a continuación según Merrill, 1987:

- ✓ Alta temperatura ambiente promedio, entre 25-40 °C y abundante materia orgánica para facilitar la percolación de agua y hacer de ésta un fluido química y físicamente activo.
- ✓ Alta tasa de precipitaciones, para tener abundante agua fresca como solvente para generar la lixiviación.
- ✓ Relieve con baja pendiente para minimizar la erosión superficial.
- ✓ Alta tasa de percolación del agua para evacuar los fluidos lixiviantes.
- ✓ Una roca madre adecuada que permita el flujo pervasivo y continuo de agua y promueva la lixiviación, así como una mineralogía rica en Fe, Al, Ni, Cr, Mn entre otros.

Los depósitos de lateritas más importantes comprenden: las Bauxitas, que son la fuente principal para la extracción de aluminio a nivel mundial y las lateritas niquelíferas, que representa el 44% de la producción mundial de Ni y el 73% de reservas continentales (Schellmann, 2021).

5.8.1 Laterita Niquelífera

Las lateritas niquelíferas (ver Fig 37) son materiales regolíticos ricos en Ni y cantidades menores de Co, Mn, EGP y REE, que se forman en zonas de bajo relieve a partir de la meteorización de rocas ígneas básicas o ultrabásicas, ricas en minerales ferromagnesianos como olivino o piroxeno (Gallardo, 2008).

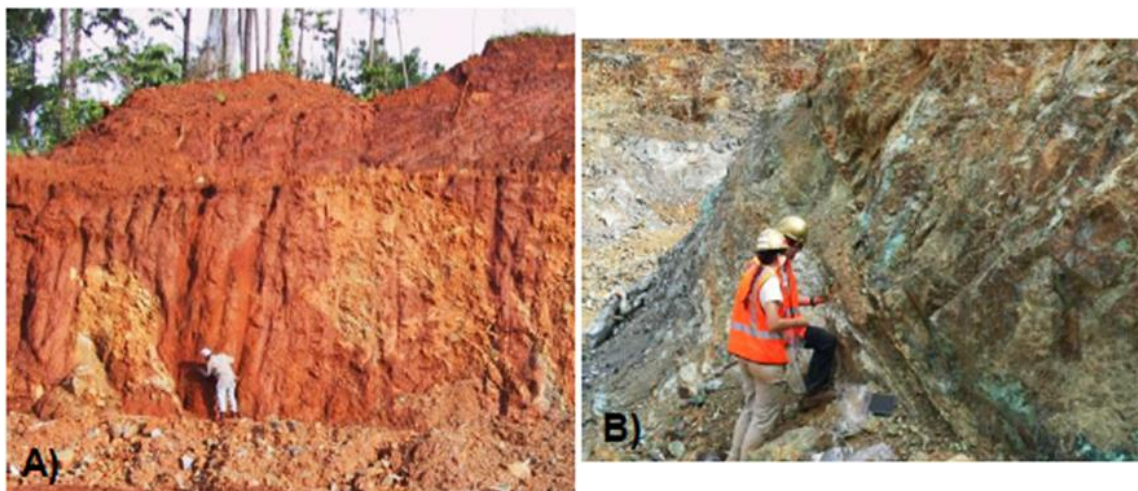


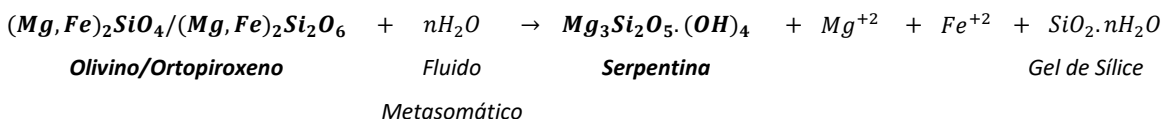
Fig 37. Laterita. (A) Zona limonítica constituida principalmente por goethita y hematita. (B) Zona saprolítica dominada por serpentina, serpentina rica en Ni y "garnieritas". Modificado de Proenza (2015).



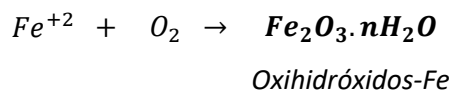
5.8.2 Formación de los depósitos de laterita níquelífera

La génesis de los depósitos lateríticos de níquel comprende tres etapas descritas por los autores [Bellizzia \(1967\)](#), [Lavié \(1967\)](#), [Ortiz \(2004\)](#) y [Grande \(2000\)](#):

1. Alteración gradual y progresiva de la roca, debido a la circulación de soluciones hidrotermales a través de la corteza oceánica fracturada, dando lugar a la hidratación de los minerales primarios (olivino y ortopiroxeno). Estos silicatos anhídridos son reemplazados por filosilicatos del grupo de la serpentina, siendo liberados en soluciones iónicas los componentes solubles que quedan en exceso, tales como la sílice, el magnesio y el hierro, lo que da origen al aumento de la concentración *in situ* de aquellos relativamente insolubles como el níquel, el manganeso y el cobalto. El contenido primario de níquel en la roca fresca se encuentra alrededor de 0,25 %, pudiendo alcanzar hasta un 0,40 % (Birbe, 2009).



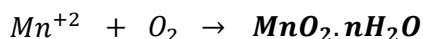
2. Exposición del cuerpo rocoso a la intemperie como consecuencia del emplazamiento tectónico, lo cual produce la lixiviación de los constituyentes solubles, por efecto de la percolación de agua meteórica. Las soluciones de hierro se oxidan inmediatamente y precipitan a niveles superficiales como oxihidróxidos de hierro (limonita-hematita), formándose una laterita ferruginosa (Sombrero de Hierro) (Birbe, 2009).



3. El aumento de la porosidad y permeabilidad en la masa de la roca permite la lixiviación de los constituyentes relativamente insolubles. Las soluciones de manganeso y cobalto se oxidan en esta etapa y precipitan como oxihidróxidos de manganeso con cantidades variables de óxidos de cobalto; mientras que las soluciones de níquel percolan a niveles inferiores y precipitan junto con las de sílice y magnesio, originándose una mezcla de silicatos hidratados de níquel-magnesio (garnierita), mineral que constituye la mena níquelífera. Las soluciones residuales de magnesio pueden precipitar a niveles más profundos como carbonato de magnesio (magnesita), producto de la reacción del agua ácida (enriquecida en CO₂) con dicho elemento. De la misma manera, es posible la formación de carbonato de



hierro (siderita), a partir de soluciones residuales de hierro ferroso (Fe^{+2}). El magnesio puede oxidarse a niveles profundos y precipitar como oxihidróxidos de magnesio (brucita-periclasa). Por su parte, el gel de sílice residual precipita como ópalo-calcedonia. El contenido de níquel en la roca alterada puede alcanzar hasta un 5%, lo cual representa hasta 20 veces su concentración inicial.

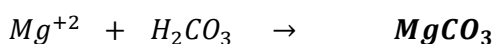


Pirolusita



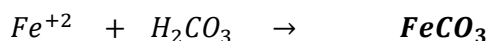
Gel de Sílice

Garnierita



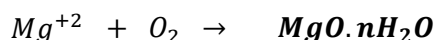
Agua Ácida

Magnesita

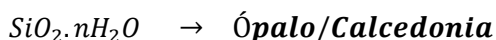


Agua Ácida

Siderita



Oxihidróxido-Mg



Gel de Sílice

5.8.3 Geoquímica de los depósitos de laterita niquelífera

Durante el proceso de meteorización, los minerales primarios que contienen Ni (olivino, serpentina o sulfuros) son rápidamente decimados en condiciones oxidantes. El comportamiento del Mg, Fe y Ni de estos minerales primarios es muy distinto: Al ser un ion divalente, el Mg es altamente soluble, siendo rápidamente removido de los perfiles de meteorización; como se mencionó previamente, el Fe pasa al ion férrico (Fe^{+3}), que es altamente insoluble para pH mayores 3,0; acumulándose en el perfil como goethita (FeOOH) o hematita (Fe_2O_3). Finalmente, el Ni se comporta de manera única producto de la naturaleza ultrabásica de las rocas madre que no favorecen la formación de minerales de arcilla en los perfiles de meteorización, ya que las rocas son pobres en Al, siendo el Ni un sustituto parcial de este elemento (Paquet & Clauer, 1997).

Debido a la alta estabilidad de coordinación octaédrica del ion Ni^{+2} , favorece la formación de filosilicatos niquelíferos trioctaédricos denominados garnieritas, silicatos hidratados de Mg y Ni. Otros silicatos de Ni como la clorita, vermiculita, talco, esmectitas y sepiolita aparecen en el perfil,

aunque son menos comunes (Paquet & Clauer, 1997). Estos silicatos están presentes principalmente en el horizonte saprolítico de los depósitos lateríticos (Proenza, 2015).

El Ni también puede acumularse como óxidos e hidróxidos en los perfiles de meteorización: En oxi-hidróxidos de Mn-Co, como la litioforita y las denominadas “asbolanas” (como revestimiento superficial del material saprolítico y/o limonítico), y otros elementos traza como los EGP y los REE (enriquecidos en el horizonte limonítico); o el oxi-hidróxido de Fe goethita, presente principalmente en el horizonte limonítico (Proenza, 2015). En estas fases, el Ni es sustituido en las estructuras de los óxidos e hidróxidos, aunque siempre está pobremente cristalizado. Como se mencionó previamente, la estabilidad de estas formas minerales secundarias está asociada a las propiedades fisicoquímicas de las soluciones (Eh, pH, composición química, concentración, etc.) (Paquet & Clauer, 1997).

5.8.4 Petrología de los depósitos de laterita niquelífera

Sobre la roca ultrabásica sin meteorizar, generalmente se desarrolla la siguiente secuencia de capas con distinto nivel de meteorización en zonas tropicales: una roca poco meteorizada (*saprock*), una roca parcialmente meteorizada que conserva una estructura litológica (saprolita gruesa), una roca totalmente meteorizada con su estructura colapsada (saprolita ferruginosa, limonita o laterita amarilla) y un suelo rojizo con concreciones ferruginosas (laterita roja o *ironcap*) (ver Fig 38). El espesor de estas capas varía con respecto diferentes factores: el clima, la estructura y la mineralogía de la roca madre y la topografía del terreno (Paquet & Clauer, 1997).

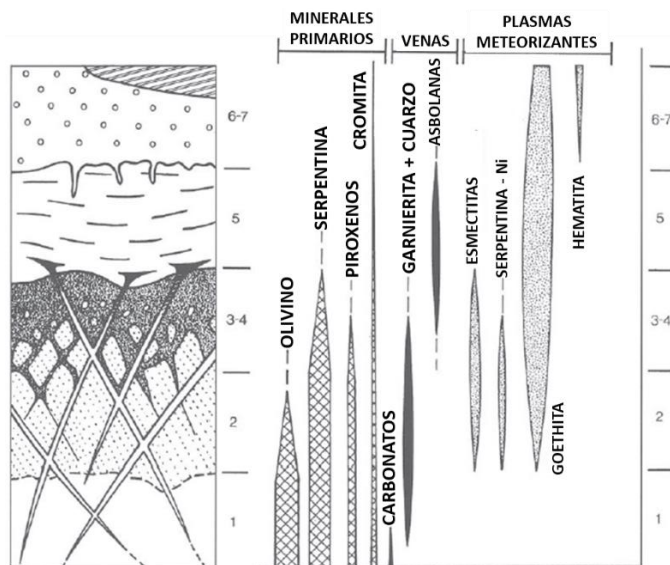


Fig 38. Perfil de una laterita niquelífera con la composición mineralógica de las capas sucesivas. Modificado de Paquet et al. (1997).



En la figura anterior, los números hacen referencia a: 1. roca fresca, 2. roca levemente meteorizada, 3-4. saprolita gruesa, 5. saprolita ferruginosa (laterita amarilla), 6. suelo rojo nodular (laterita roja), 7. Costra de Fe (a veces presente).

La capa de roca madre poco meteorizada (*saprock*) se distingue por la meteorización rápida del olivino, alterando los cristales del mineral en la roca. Las áreas meteorizadas muestran un material color marrón denominado “plasma de meteorización”. Este material amorfo criptocristalino, es ferruginoso y níquelífero (hasta un 25% de Fe_2O_3 y un 5% de NiO) y pasa posteriormente a formar goethita con cantidades menores de Ni. Además, la meteorización del olivino puede dar origen a esmectitas. En esta etapa la septa de serpentina que rodea al núcleo de olivino sigue intacta, permaneciendo aún después de la desaparición total de los cristales de olivino. Esta malla adquiere una tonalidad marrón-amarillenta, producto de la oxidación de los gránulos de magnetita asociados o del relleno de espacios vacíos por materiales níquelíferos y ferruginosos asociados al proceso de meteorización (Paquet & Clauer, 1997).

Después de la desaparición total del olivino, la meteorización progresiva de la serpentina empieza, formando la saprolita. Este proceso se inicia a partir de grietas en la roca fresca por donde percolan soluciones que transforman a la roca en un material arcilloso que rodea los bloques poco meteorizados, que disminuyen en tamaño hacia las zonas superiores de la capa. La meteorización de la septa de serpentina puede ocurrir de distintas maneras. Por disolución, que deja pequeños remanentes de goethita níquelífera con residuos organizados de tal manera que replican el orden de la malla de serpentina y, más comúnmente, se forma una serpentina níquelífera (4-8% de NiO) en el espacio creado producto de la hidrólisis de la serpentina primaria, que pasa a formar goethita. Cuando el plasma de meteorización del olivino es esmectítico, la serpentina es transformada a esmectita ferruginosa y níquelífera. En esta etapa desaparecen los piroxenos, así como la garnierita y el cuarzo en las grietas de la roca, siendo estas recubiertas por óxidos de Mn-Ni-Co (“asbolana negra”) (Paquet & Clauer, 1997).

En la capa limonítica (laterita amarilla), la meteorización de la serpentina da lugar a la goethita (1-2% de NiO), que resulta del reemplazo de la malla de serpentina, perdiendo totalmente la estructura de la roca primaria. En la matriz marrón-amarillenta, compuesta principalmente de Fe_2O_3 , espinelas cromíferas son progresivamente corroídas, aunque la clorita y el talco provenientes de la roca madre podrían persistir. Las grietas permanecen cubiertas de “asbolana” (Paquet & Clauer, 1997).

En la capa superficial de laterita roja con concreciones ferruginosas, la mayoría del Ni ha sido removido de la goethita niquelífera, la cobertura de “asbolanas” desaparece y nódulos de hematita se forman en la matriz ferruginosa. Con el tiempo, los nódulos se incrementan en tamaño y se cementan, formando una capa que puede tener hasta 1 metro de espesor (Paquet & Clauer, 1997).

5.8.5 Clasificación de los depósitos de laterita niquelífera

Los depósitos lateríticos niquelíferos se pueden clasificar en tres tipos distintos:

❖ Depósitos tipo silicato hidratado:

Son los depósitos con mayor ley de Ni, cuya mena está constituida por silicatos hidratados de Mg-Ni (serpentina niquelífera y “garnieritas”). En este tipo de depósitos, la mineralización se ubica por debajo del horizonte saprolítico (ver Fig 39). Este tipo de depósitos se forman cuando el levantamiento tectónico es continuo y el nivel freático se mantiene bajo en el perfil. Esto conlleva a la meteorización de las rocas ultramáficas durante largos periodos de tiempo, lo que da lugar al desarrollo de un importante horizonte saprolítico (Proenza, 2015).

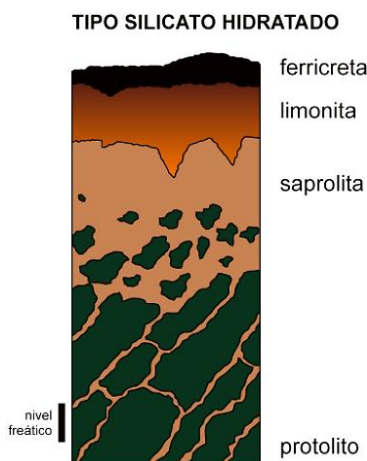


Fig 39. Depósito de laterita tipo silicato hidratado. Tomado de Proenza (2015).

❖ Depósitos tipo óxido:

Son depósitos donde el Ni se encuentra asociado a oxi-hidróxidos de Fe, principalmente goethita. La mena se encuentra en la parte superior del horizonte saprolítico (saprolita ferruginosa) y en la parte inferior del horizonte limonítico (limonita amarilla). Un esquema de este tipo de depósitos se puede observar en la Fig 40 a continuación (Proenza, 2015).

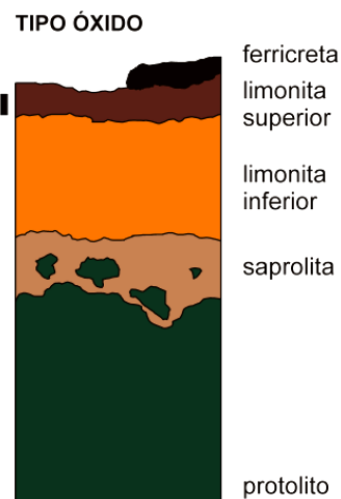


Fig 40. Depósito de laterita tipo óxido. Tomado de Proenza (2015).

❖ Depósitos tipo arcilla:

Este tipo de depósitos albergan alrededor del 10% de las reservas mundiales de Ni en lateritas. La mena se acumula en esmectitas (notronitas y saponitas), en la parte superior del horizonte saprolítico y en la parte inferior del horizonte limonítico (ver Fig 41). En estos depósitos la sílice ha sido lixiviada parcialmente del perfil de meteorización (Proenza, 2015).

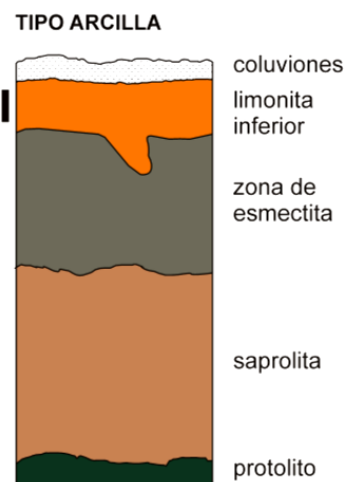


Fig 41. Depósito de laterita tipo arcilla. Tomado de Proenza (2015).

5.9 Minería a Cielo Abierto

Se denomina minería a cielo abierto (MCA) o minería de superficie, al proceso de explotación minera que se realiza en la superficie terrestre, sin emplear galerías subterráneas. Esta se basa en

la remoción de la cobertura estéril empleando maquinaria y explosivos para acceder al material rocoso que contiene el mineral de interés en concentraciones que hagan al proceso económicamente rentable (Bellotti, 2011).

Debido a las características estructurales de cada tipo de yacimiento, existen distintos métodos mineros y sistemas para la explotación de estos recursos. Algunos de los métodos más usados en la minería a cielo abierto son: Cortas, Destape o Descubiertas, Terrazas, Contornos, Canteras, Graveras, Minería Hidráulica, Lixiviación y Remoción de Cima (Herrera J.-H., 2006).

5.9.1 Minería por el método de terrazas

En términos generales este método se basa en la minería de banqueo con un avance unidireccional. Se aplica en yacimientos relativamente horizontales, de uno o varios niveles mineralizados y continuamente potentes. Generalmente, es un método que se aplica en dirección de la profundidad, lo que permite depositar el estéril nuevamente en el hueco creado, alcanzando además profundidades importantes, cuya limitación viene dada por el carácter económico del proyecto (Herrera J.-H., 2006). Sin embargo, este método de explotación es comúnmente aplicado para yacimientos en laderas de montañas, ya que permite un escalonamiento por banqueo descendente que contribuye a la reducción por problemas de estabilidad de talud.

La explotación por terrazas en ladera de montaña se debe realizar de forma descendente, conformando bancos con dimensiones establecidas según el diseño (ver Fig 42); el ancho de las terrazas debe ser suficiente para permitir el paso de los equipos de carga y transporte (Avendaño, 2014).

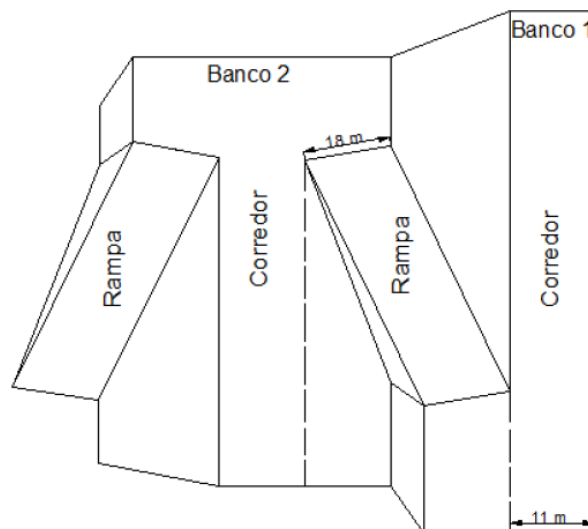


Fig 42. Explotación por bancos descendentes. Tomado de Avendaño (2014).

5.9.2 Diseño de la explotación mineral en la mina Loma de Níquel

La mina Loma de Níquel posee unas dimensiones de 4 km por 1 km de anchura máxima y se encuentra dividida en tres sectores en dirección E-O, que representan distintas áreas de operación (ver Fig 43) (Birbe, 2009).

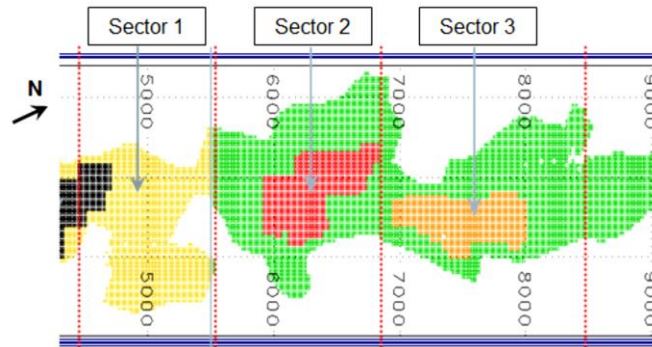


Fig 43. Sectores de explotación de la mina Loma de Níquel. Tomado de Birbe (2009).

En la mina se emplea el método de explotación por terrazas para la extracción de la saprolita rica en Ni. Los bancos y bermas son diseñados y excavados con 5 m de altura, las rampas de 16 m de ancho, un ángulo de trabajo de 65°, un ángulo de talud (o total) entre 30°- 40° y 10% de pendiente general. En la siguiente imagen se muestra un esquema del diseño de la mina (Castillo A. , 2017).

Con respecto a la influencia del ángulo de talud sobre el diseño y la economía de la minería a cielo abierto, la necesidad de aumentar el ángulo de talud para maximizar la extracción de material mineral está limitada por factores adicionales como las características de los equipos empleados, las vías de acarreo y la legislación pertinente. Sin embargo, se ha establecido que las dimensiones empleadas para los bancos son seguras, fundamentado en los factores de seguridad (razón de las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes) que presentan valores mayores a 1,732, tanto para las muestras en laterita como en saprolita (ver Fig 44). (Castillo A. , 2017).

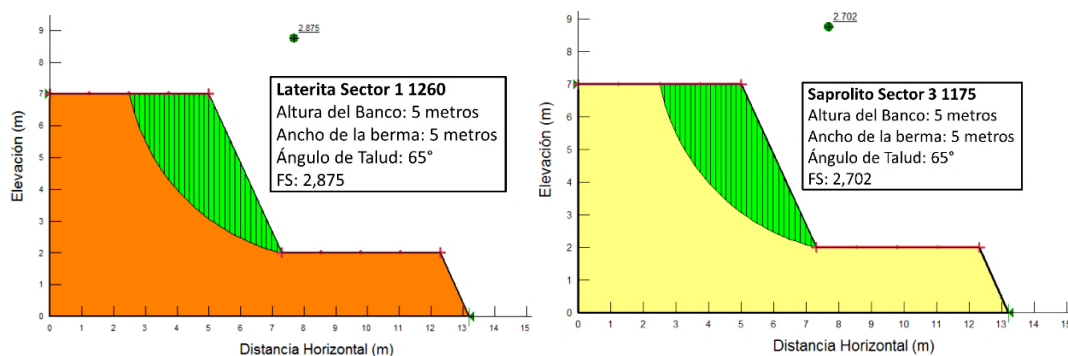


Fig 44. Diseño de los bancos de la mina Loma de Níquel en la laterita del sector 1 (derecha) y el saprolito del sector 3 (izquierda) y sus factores de seguridad. Modificado de Ochoa et al. (2011).





La altura de banco y ancho de berma de las escombreras son de 10 m. El ángulo de talud es de 35°, que se corresponde con el ángulo de fricción promedio, y el ángulo general de 23° (Castillo A. , 2017). Acorde con los análisis de estabilidad realizados, las escombreras existentes no deben sobrepasar los 15 m de altura, con bancos de 5 m de altura e inclinación de 30°, construidas en fases ascendentes superpuestas (Ochoa & Reyes, 2011).

La distancia de acarreo a la planta de procesamiento es de 4,5 km. Las operaciones unitarias emplean un sistema discontinuo, empleando equipos de excavación de cargador frontal, así como camiones roqueros para el transporte.

5.10 Procesamiento mineral en la mina Loma de Níquel

El mineral en la mina es extraído utilizando maquinaria sin emplear ningún tipo de explosivo y transportado a la planta en camiones de 55 t de capacidad. El programa de extracción, apilado y transporte de mineral fue diseñado con base a una tasa de producción de 1,3 millones de toneladas secas por año, durante un período de 30 años (Reyes, 2011).

El procesamiento del mineral de níquel se realiza en cuatro etapas:

5.10.1 Preparación Mecánica

Es la primera fase de preparación, que consiste en la reducción de tamaño del material rocoso. Los camiones descargan el material que pasará por tres etapas de trituración en circuito abierto. En la primera etapa de trituración, los camiones descargan el material sobre una criba fija con apertura de 450 mm. Las rocas con tamaño mayor a la apertura de la criba se desvían por gravedad hacia una trituradora de mandíbulas (SVEDALA), cuya apertura mínima está ajustada a 300 mm. Las rocas de menor tamaño a la apertura de la criba se almacenan en la tolva inferior de la criba y son descargadas a través de un alimentador de zapatas a la trituradora primaria de rodillos dentados, junto con el material proveniente de la tritura de mandíbulas, reduciendo todo el material a un tamaño promedio inferior a 300 mm (Herrera Y. , 2014).

El material proveniente de la trituración primaria, con una especificación de P75 (producto pasante 75%) < 300 mm, se transporta por cintas hasta una trituradora secundaria de rodillos dentados. El producto de la trituración secundaria, con una especificación P75 < 100 mm, es transportado por cintas hacia el apilador de mineral, que tiene una capacidad de 118.000 t de mineral húmedo (Herrera Y. , 2014). Estas pilas, con forma de V invertida, proporcionan una capacidad de almacenamiento de 42 días de operación y se forman empleando el método



combinado Windrow-Chevron, garantizando la homogenización de los tenores y tipos de mineral del material triturado que pasará a la planta de procesamiento (Reyes, 2011). Las pilas tienen una medida promedio de 44 m de ancho y 265 m de largo, una altura de 15,40 m, un ángulo de reposo de 35°, un volumen de 72.000 m³ y 5 pilas como base (Rodríguez, 2012). En esta etapa se realiza un muestreo de mineral donde se analiza la composición química del mineral y su granulometría (Herrera Y. , 2014).

La pila tendrá una composición de 1,62% a 1,78% de Ni, 13,8% a 21,4% de Fe y una relación SiO_2/MgO de 1,39% aproximadamente. En la temporada lluviosa el mineral puede tener hasta un 30% de humedad lo cual acarrearía problemas en los sistemas de procesamiento mineral aguas abajo, por lo cual, se requiere del secado de mineral hasta un rango de humedad entre 1% y 18%, teniendo en consideración la condición mínima para evitar la generación de polvo en los sistemas (Reyes, 2011).

Un recuperador de cangilones automático recoge de forma continua el material para llenar un silo de 25 t que sirve para controlar la alimentación del horno de secado. El horno consiste en un tambor rotativo de 4 m de diámetro y 27 m de largo, empleando como combustible gas natural y con una capacidad de 234 t/h. Una vez secado el mineral, éste pasa a la a trituración terciaria, donde el material rocoso es reducido a un tamaño inferior a 25 mm, empleando una trituradora de cono móvil giratorio (Reyes, 2011). En esta etapa hay otro punto de control donde se analiza la composición química, la humedad y la granulometría. Luego el mineral es almacenado en una pila cubierta de 12.000 t secas (Herrera Y. , 2014).

5.10.2 Calcinación

El mineral de la pila seca es transportado hacia los hornos de calcinación mediante cuatro dosificadores que alimentan dos cintas transportadoras (dos dosificadores por cinta). Más adelante, se encuentran dos dosificadores que descargan carbón mineral sobre las mismas cintas transportadoras cargadas de mineral (Herrera Y. , 2014).

El mineral de la pila seca pasa por un proceso de calcinación con el fin de eliminar la humedad restante, así como el agua absorbida químicamente, utilizando carbón mineral como agente reductor; además, este proceso reduce el mineral químicamente (pre-reducción). Para este proceso se emplean dos hornos rotativos, uno para cada línea, cada uno con una capacidad de 10 t/h y ajustados a una temperatura de 800 °C (Reyes, 2011). EL mineral fino recolectado en las estaciones de desempolvado de planta (electrofiltros), es enviado a la planta de peletización, donde se



aglomera con agua, sin aditivos químicos y una porción de mineral fino del área de secado, para su reciclaje a la alimentación de los calcinadores en forma de pellas (Herrera Y. , 2014).

5.10.3 Reducción y Fusión

El mineral pre-reducido y calcinado es introducido en dos hornos de arco eléctrico sumergidos de 17,5 metros de diámetro y 45 MVA, donde un arco eléctrico sobre la carga mineral genera el calor para su fusión a aproximadamente 1650 °C. En este proceso se crean dos fases: una de menor densidad denominada escoria, constituida principalmente por óxidos de S y Mg, la cual es granizada durante su colada por una corriente de agua, para su posterior transporte a un lugar de deshecho aislado y seguro; y una segunda fase más densa denominada fase metálica, con una proporción de Ni y Fe. Esta última fase es vertida en cucharas de 4 t de capacidad desde cada horno, cada 6 horas en promedio, para su posterior depuración o refinado de impurezas como el S, P, C y Si, de acuerdo con los requerimientos de los clientes. El consumo de energía específico para esta operación es de 560 kW/t y la recuperación de Ni desde el mineral a la fase metálica es de 90% (Reyes, 2011).

5.10.4 Refinación

Una vez concluida la fusión, el metal es colado sobre una cuchara precalentada, iniciándose la inyección de oxígeno y cal en forma controlada para la primera fase de remoción del contenido de P y C disueltos en el metal líquido. Posteriormente, la cuchara es integrada con un sistema de electrodo de 9 MVA y se calienta a una temperatura de 1600 °C, generando metal líquido, el cual será desoxidado con la adición de Al (Reyes, 2011). Se toman muestras especiales para el control de grados de impureza (Herrera Y. , 2014).

5.10.5 Granulación

La aleación de ferroníquel (Fe-Ni) es granulada en un tanque especial de agua, clasificada por tamaño y almacenada para su posterior expedición a los clientes. El ferroníquel listo para despacho se presenta en forma de gránulos, con un tamaño de 3 a 30 mm y cuya composición típica es 20 - 25% Ni; 0,03% Si máx.; 0,04% C máx.; 0,06% S máx.; 0,03% P máx. (Reyes, 2011).

A continuación, se muestra un diagrama general del proceso productivo, desde la extracción del mineral hasta el despacho del ferroníquel (ver Fig 45):

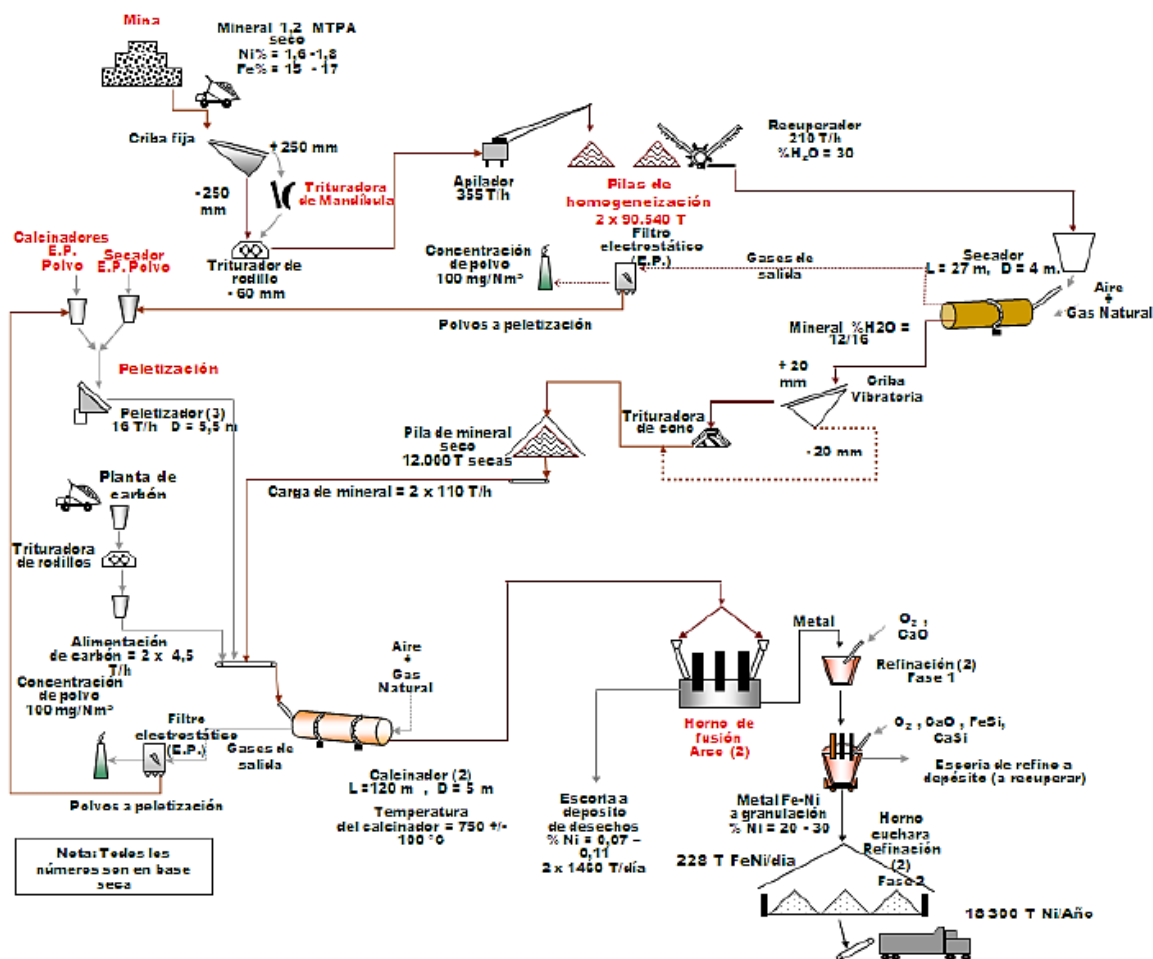


Fig 45. Diagrama de producción de ferroníquel. Tomado de Herrera (2014).

5.11 Ambiente y Medio Ambiente

El concepto de “ambiente” o “medio ambiente” es algo controvertido ya que su definición depende del contexto en el que se utiliza. De manera general, la palabra “medio” se podría definir como *el elemento en el que vive una persona, animal o cosa* y el “ambiente” como *el conjunto de factores bióticos y abióticos que actúan sobre los organismos y comunidades ecológicas, determinando su forma y desarrollo* (Garmendia et al., 2005).

Según el diccionario de la Real Academia Española de la Lengua, *medio ambiente es el conjunto de circunstancias físicas que rodean a los seres vivos*. Sin embargo, el concepto anterior carece del punto de vista antropocéntrico asociado a los estudios de impacto ambiental, por lo cual una definición más acertada en este contexto sería *el conjunto de circunstancias físicas, culturales,*



económicas, sociales, etc., que rodean a las personas, definiendo “circunstancias” como el conjunto de lo que está en torno a uno; el mundo en cuanto a mundo de alguien (Garmendia et al., 2005).

Por último, en Venezuela, La Ley Orgánica del Ambiente en su Título I “Definiciones Generales”, Capítulo I, Artículo 3, define Ambiente como:

“Conjunto o sistema de elementos de naturaleza física, química, biológica o socio cultural, en constante dinámica por la acción humana o natural, que rige y condiciona la existencia de los seres humanos y demás organismos vivos, que interactúan permanentemente en un espacio y tiempo determinado.”

Ley Orgánica del Ambiente. Art 3 de diciembre de 2006 (Venezuela).

5.12 Desarrollo sustentable

El desarrollo sustentable o desarrollo sostenible se define como el desarrollo que satisface las necesidades actuales de las personas, sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas (Massolo, 2015).

El desarrollo sostenible es un proceso integral que exige a los distintos actores de la sociedad compromisos y responsabilidades en la aplicación del modelo económico, político, ambiental y social, así como en los patrones de consumo que determinan la calidad de vida (Massolo, 2015).

El término “desarrollo sostenible” reúne dos líneas de pensamiento en torno a la gestión de las actividades humanas (Massolo, 2015):

- ✓ Las metas de desarrollo.
- ✓ El control de los impactos perjudiciales de las actividades humanas sobre el ambiente.

5.13 Gestión ambiental

La gestión ambiental es el conjunto de acciones y estrategias mediante las cuales se organizan las actividades antrópicas que influyen sobre el ambiente, con el fin de lograr una adecuada calidad de vida previniendo o mitigado los problemas ambientales (Massolo, 2015).

Para la gestión ambiental se deben considerar los siguientes factores (Massolo, 2015):

- ✓ El ser humano, la flora y la fauna.
- ✓ El suelo, el agua, el clima y el paisaje.
- ✓ Los bienes materiales y el patrimonio cultural.
- ✓ Las interacciones de los factores anteriores.



5.13.1 Herramientas de gestión ambiental

Existen diversas herramientas e instrumentos para la gestión ambiental. Estas se pueden clasificar en tres clases (Massolo, 2015):

- ✓ Preventivas.
- ✓ Correctivas.
- ✓ Conservación y mejoramiento.

La mayor efectividad en la aplicación de las herramientas de gestión ambiental se logra cuando dicha aplicación es *a priori*, tanto en términos ambientales, económicos y sociales, consiguiendo de esta manera una mayor eficiencia en el uso de materias primas y energía, así como una reducción en la generación de emisiones y el costo asociado a su tratamiento. Aunado a lo anterior, permiten evitar posibles conflictos socio ambientales que generan diversos problemas, entre ellos el deterioro de la imagen de la organización, así como los costos para su posible solución (Massolo, 2015).

A continuación, se mencionan algunas de las herramientas e instrumentos de la política y la gestión ambiental:

- ✓ Legislación Ambiental.
- ✓ Educación Ambiental.
- ✓ Ordenamiento Territorial.
- ✓ Estudios de Impacto Ambiental.
- ✓ Auditorías Ambientales.
- ✓ Análisis del Ciclo de Vida.
- ✓ Etiquetado ecológico.
- ✓ Ecodiseño o diseño ambiental.
- ✓ Aplicación de modelos de dispersión de contaminantes.
- ✓ Sistemas de diagnóstico e información ambiental.
- ✓ Sistemas de Gestión Ambiental.
- ✓ Certificaciones.

5.14 Efecto Ambiental e Impacto Ambiental

El impacto ambiental es la alteración de la calidad del medio ambiente producida por una actividad humana. Es necesario tener en cuenta que no todas las variaciones medibles de un factor ambiental, definido como *una característica medible y/o cuantificable del ambiente*, pueden ser

considerados “impactos ambientales”, ya que existen variaciones naturales como el clima, las estaciones, incendios, terremotos, entre otros, que tienen un impacto en el ambiente y que no está asociado a la actividad humana (Garmendia *et al.*, 2005).

La diferencia entre efecto e impacto ambientales radica en que un efecto ambiental describe *un cambio en el ambiente producido por una actividad humana* (cambio en los factores ambientales), *sin valorar el cambio como positivo o negativo*; mientras que para que este efecto ambiental se pueda considerar un impacto, es necesaria una valoración positiva o negativa de este cambio de calidad ambiental (ver Fig 46) (Garmendia *et al.*, 2005).

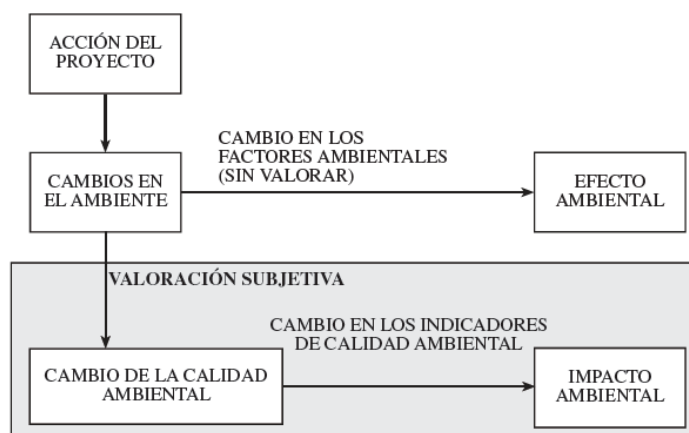


Fig 46. Diferencia entre un efecto y un impacto ambiental. Tomado de Garmendia *et al.* (2005).

5.14.1 Tipos de impactos ambientales

Los efectos que las actividades humanas pueden tener sobre el ambiente y su valoración desde el punto de vista de calidad ambiental pueden ser muy variados (Garmendia *et al.*, 2005).

Como se mencionó previamente, según su carácter, los impactos ambientales se pueden clasificar como *positivos* o *negativos* dependiendo del cambio ambiental y social que estos produzcan, aunque también dependerá del punto de vista y nivel en que se lo analice. Por ejemplo, un mismo impacto puede tener un efecto positivo para la actividad económica de una comunidad y negativo para el recurso hídrico de otra; por lo tanto, deben analizarse de manera separada (Garmendia *et al.*, 2005).

La clasificación anterior resulta sencilla cuando la relación causa-efecto es conocida, como es el caso cuando los impactos son de tipo *directo*, es decir, aquellos impactos que se producen por la alteración de un elemento ambiental afectado de forma directa por el proyecto. Sin embargo, cuando el impacto es de tipo *indirecto*, donde el impacto producto de la alteración de un elemento



ambiental es ocasionado indirectamente por las actividades llevadas a cabo en el proyecto, hacen a estos más difíciles de detectar pudiendo llegar a tener efectos muy graves (Garmendia *et al.*, 2005).

En un estudio de impacto ambiental, es necesario considerar al ambiente como un sistema de interacciones. Bajo este principio, según la interacción de acciones o efectos, los impactos ambientales también se pueden clasificar como *simples*, que son aquellos producidos por efectos ambientales que no interaccionan con otros y *acumulativos*, asociados a efectos ambientales que se producen varias veces a lo largo del tiempo o del espacio, siendo la valoración total del impacto la suma de cada uno de los impactos de cada efecto ambiental. Cuando la valoración de la suma de los impactos es mucho mayor a la valoración de los impactos por separado, se dice que existe un *efecto sinérgico* (Garmendia *et al.*, 2005).

Según el tiempo que tardan en manifestarse los efectos y/o los impactos ambientales, se pueden clasificar en a corto (menos de un año), a medio (de uno a cinco años) o a largo plazo (más de cinco años) (Garmendia *et al.*, 2005).

Los impactos ambientales también se pueden clasificar en función a la duración del efecto o del impacto. Se distinguen los *temporales*, que tienen una duración limitada y los *permanentes* (Garmendia *et al.*, 2005).

Se pueden clasificar también en función de la aparición del efecto o impacto ambiental, que puede ser de forma *continua* o de forma *discontinua*. Dentro de los efectos o impactos discontinuos, se pueden distinguir los *periódicos* de los *irregulares* (Garmendia *et al.*, 2005).

Además, los efectos ambientales son *reversibles* cuando, sin la intervención humana, la tendencia del ecosistema es volver a su estado natural, de los *irreversibles*, cuando, sin la intervención humana para la aplicación de medidas de recuperación, el ecosistema no es capaz de recuperar su estado inicial previo al proyecto. Dentro de los impactos irreversibles, se consideran entonces dos tipos de impacto: aquellos *recuperables*, donde, mediante la aplicación de medidas viables de restauración o mediante la sustitución de un elemento alterado por otro que cumpla su misma función, es posible recuperar o acercar al ecosistema a su estado inicial, siendo el efecto o impacto asociado a esta última opción clasificado como *mitigable*; de aquellos *irrecuperables*, donde la restauración del ecosistema no es posible por ningún método factible (Garmendia *et al.*, 2005).

Por último, dependiendo de la magnitud del impacto o el efecto producido, las clasificaciones vistas anteriormente, el valor que tiene el elemento ambiental afectado y su importancia, se pueden clasificar los impactos ambientales en *críticos*, *severos*, *moderados* y *compatibles* (Garmendia *et al.*, 2005).



El régimen jurídico del estado venezolano con respecto al estudio de impacto ambiental y social no contempla una clasificación oficial para los tipos de impacto y efectos ambientales; sin embargo, en el decreto N° 1.257 titulado “Normas sobre evaluación ambiental de actividades susceptibles a degradar el ambiente”, emitido por la entonces presidencia de la república el 13 de marzo de 1996, en su artículo 3 establece:

“[...]los procedimientos conforme a los cuales se realizará la evaluación ambiental de actividades susceptibles a degradar el ambiente.”

Decreto N° 1.257. Art 3 de marzo de 1996 (Venezuela).

5.15 Licencia Social

La licencia social se puede definir como el nivel de tolerancia, aceptación o aprobación de las actividades de una organización por parte de los participantes con el mayor interés en la actividad (Boutilier & Thomson, 2019).

En el contexto de un proyecto minero, la licencia social está fundamentada en las creencias, percepciones y opiniones de los residentes locales y otros participantes de la mina o del proyecto de exploración. Por lo tanto, la licencia social es otorgada por la “comunidad” o “red de participantes”; además de ser “intangible”, al menos que se lleven a cabo esfuerzos para medir estas creencias, percepciones y opiniones (Boutilier & Thomson, 2019).

Es necesario tener en cuenta que la licencia social es dinámica y no permanente, ya que las creencias, opiniones y percepciones pueden cambiar a medida que se adquiere nueva información. De esta manera, la licencia social debe ser ganada y luego mantenida (Boutilier & Thomson, 2019).

5.15.1 Componentes de la Licencia Social para Operar

Los componentes normativos de la Licencia Social para Operar (LSO) comprenden (Boutilier & Thomson, 2019):

- ✓ Las percepciones respecto a la legitimidad social y la credibilidad del proyecto por parte de la comunidad/participantes.
- ✓ La presencia o ausencia de confianza.

Estos elementos se adquieren de manera secuencial y son acumulativos en la construcción de la licencia social. El proyecto de parecer legítimo antes de que la credibilidad sea de valor y tanto la legitimidad como la credibilidad deben existir para que la confianza pueda desarrollarse (ver Fig 47) (Boutilier & Thomson, 2019).



Fig 47. Obteniendo la Licencia Social. Modificado de <http://sociallicense.com/definition.html>

En la práctica, la ausencia de legitimidad lleva al rechazo del proyecto, mientras que un alto nivel de credibilidad y la presencia de confianza es la base para la aprobación (Boutilier & Thomson, 2019).

A continuación, se definen los componentes normativos mencionados previamente:

- ❖ Legitimidad social: La legitimidad social está basada en normas establecidas, las normas de la comunidad, que pueden ser de carácter legal, social o cultural, así como formales o informales en su naturaleza.
- ❖ Credibilidad: La credibilidad principalmente se obtiene al proveer información clara y verdadera y al cumplir los compromisos establecidos con la comunidad. La credibilidad es a menudo establecida cuando las reglas, roles y responsabilidades de la compañía y la comunidad son negociadas, definidas y consolidadas.
- ❖ Confianza: La confianza o la disposición de ser vulnerable a las acciones de otros, es una relación de alta calidad que toma tiempo y esfuerzo para crear. Esta proviene de las experiencias compartidas.

5.15.2 Retos principales para obtener la Licencia Social para Operar

En general, existe una complejidad considerable cuando se trata de obtener y mantener la licencia social. Según las experiencias de Boutilier & Thomson (2019), los problemas en el proceso de obtener la licencia social son:

- ❖ La compañía entiende el proceso de obtener la licencia social como una serie de tareas o transacciones, mientras que la comunidad otorga la licencia con base a la calidad de la relación entre ambas partes; una diferencia cultural que arriesga al fracaso.



- ❖ La compañía confunde:
 - ✓ Aceptación con Aprobación.
 - ✓ Cooperación con Confianza.
 - ✓ Credibilidad Técnica con Credibilidad Social.
- ❖ La compañía:
 - ✓ Falla al entender a la comunidad local y las “reglas del juego” locales, lo cual no le permite establecer legitimidad social.
 - ✓ Retrasa el involucrar a la comunidad.
 - ✓ No invierte tiempo suficiente en el desarrollo de relaciones con la comunidad.
 - ✓ Menoscaba su propia credibilidad al no aportar información confiable, así como fallar en las promesas hechas a la comunidad.
 - ✓ Desestima el tiempo necesario para obtener la Licencia Social para Operar (LSO).
 - ✓ Sobreestima (o asume) la calidad de la relación con la comunidad.



MARCO JURÍDICO

6.1 Marco Jurídico de la actividad minera en Venezuela

A continuación, se presenta parte del marco jurídico que regula la actividad minera en Venezuela, de interés para este proyecto.

Con respecto a la actividad minera, la *Constitución de la República Bolivariana de Venezuela* (1999) establece:

Artículo 12. *“Los yacimientos mineros y de hidrocarburos, cualquiera que sea su naturaleza, existentes en el territorio nacional, bajo el lecho del mar territorial, en la zona económica exclusiva y en la plataforma continental, pertenecen a la República, son bienes del dominio público y, por tanto, inalienables e imprescriptibles. [...]”*

Artículo 129. *“Todas las actividades susceptibles de generar daños a los ecosistemas deben ser previamente acompañadas de estudios de impacto ambiental y sociocultural. [...]. Una ley especial regulará el uso, manejo, transporte y almacenamiento de las sustancias tóxicas y peligrosas.*

En los contratos que la República celebre con personas naturales o jurídicas, nacionales o extranjeras, o en los permisos que se otorguen, que afecten los recursos naturales, se considerará incluida aun cuando no estuviere expresa, la obligación de conservar el equilibrio ecológico, de permitir el acceso a la tecnología y la transferencia de la misma en condiciones mutuamente convenidas y de restablecer el ambiente a su estado natural si éste resultare alterado, en los términos que fije la ley.”

Artículo 164. *“Es de la competencia exclusiva de los Estados: [...] El régimen y aprovechamiento de minerales no metálicos, no reservados al Poder Nacional, [...], de conformidad con la ley [...]”*

Además de lo establecido en la constitución, existen las siguientes Leyes Orgánicas, Constitucionales y Especiales:

6.1.1 Ley de Minas

Decreto N° 295 de fecha 05/09/1999, publicado en la Gaceta Oficial Extraordinaria N° 5.382 del 28/09/1999.

Según su **Artículo 1**, la presente ley:

“[...] tiene por objeto regular lo referente a las minas y a los minerales existentes en el territorio nacional, cualquiera que sea su origen o presentación, incluida su exploración y explotación, así



como el beneficio, o almacenamiento, tenencia, circulación, transporte y comercialización, interna o externa, de las sustancias extraídas, salvo lo dispuesto en otras leyes.”

Según el **Artículo 2** de la presente ley *“Las minas o yacimientos minerales de cualquier clase existentes en el territorio nacional pertenecen a la República, [...]”* y, por ende, *“Los derechos mineros son temporales, se ejercen dentro de los límites geográficos determinados y conforme a los términos de esta Ley y demás disposiciones legales aplicables.”*, como se establece en el **Artículo 9**. Con este fin, *“El beneficiario de derechos mineros [...], podrá solicitar la constitución de servidumbres, la ocupación temporal y la expropiación de bienes.”*, como establece el **Artículo 11**.

En el ejercicio de las actividades mineras, según el **Artículo 14**:

“El beneficiario de derechos mineros tiene derecho al uso y aprovechamiento racional de las aguas del dominio público [...], sujeto al cumplimiento de las disposiciones ambientales que rigen la materia. [...]”

, teniendo en cuenta que *“Las actividades mineras deben efectuarse con acatamiento a la legislación ambiental y a las demás normativas que rigen la materia.”* (**Artículo 15**).

Los **Capítulos del Título III** de la presente ley, trata lo concerniente al Ejercicio de las Actividades Mineras. De este **Título** es importante destacar los siguientes **Artículos**:

Artículo 59. *“Antes de iniciar la explotación, el concesionario acreditará ante el Ministerio de Energía y Minas, mediante copia certificada, el cumplimiento de las fianzas ambientales que garanticen la reparación de los daños ambientales que puedan causarse con motivo de dicha explotación.”*

Finalmente, el **Título IX** de la presente ley establece las sanciones a las cuales estarán sujetos los infractores de esta. Las sanciones comprendidas en esta ley son de índole pecuniaria y pueden involucrar el decomiso de bienes muebles e inmuebles, la suspensión temporal de trabajos en la concesión. *“Las sanciones previstas en esta ley serán impuestas mediante resolución del Ministerio de Energía y Minas, conforme a las disposiciones establecidas en la Ley Orgánica de Procedimientos Administrativos.”* (**Artículo 115**)

6.1.2 Ley de Diversidad Biológica.

Publicado en la Gaceta Oficial Extraordinaria N° 5.468 Extraordinaria del 24/05/2000.

Según su **Artículo 1**, la presente ley:



“[...] tiene por objeto establecer los principios rectores para la conservación de la diversidad biológica.”

, estableciendo la diversidad biológica como *“[...] bienes jurídicos ambientales protegidos fundamentales para la vida. [...] Dichos recursos son inalienables, imprescriptibles, inembargables, sin perjuicio de los tratados internacionales válidamente celebrados por la República”*

Según la presente ley, el Estado, la comunidad y aquellos quienes desarrollan una actividad dentro del territorio nacional, son responsables de la conservación de la diversidad biológica, según lo establecido en los **Artículos 8, 9, 10 y 11**.

Los **Capítulos del Título IV** de la presente ley, trata lo referente a la Mitigación de Impactos Adversos. De este Título es importante destacar los siguientes **Artículos**:

Artículo 46. *“Las actividades, programas y proyectos capaces de causar daños a la diversidad biológico y sus componentes, sólo podrán ser autorizados por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales y demás autoridades competentes, previa la aprobación de un Estudio de Impacto Ambiental o Evaluaciones Ambientales, con la opinión favorable del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales.”*, de esta manera *“El Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales tiene el deber de verificar el cumplimiento de las recomendaciones y medidas propuestas, en materia de diversidad biológica, de todo proyecto que haya sido objeto de Estudio de Impacto Ambiental”*, según lo establecido en el **Artículo 49**.

Los **Capítulos del Título V** de la presente ley, trata lo concerniente a la Identificación y Valoración Económica de la Diversidad Biológica. De este Título es importante destacar los siguientes **Artículos**:

Con el fin de promover las actividades dirigidas a la protección y uso sustentable de la diversidad biológica, el Estado otorgará incentivos de carácter crediticio o tributario según lo establece el **Artículo 66**, para lo cual los aspirantes deberán cumplir las condiciones establecidas en el **Artículo 65**.

Finalmente, el **Título XI** de la presente ley, tratan lo referente a las sanciones a las cuales estarán sujetas quien realice actividades, programas o proyectos, susceptibles de causar daños a la diversidad biológica. Las sanciones comprendidas en esta ley son de carácter pecuniario y *“[...] se impondrán conforme con las previsiones contenidas en la Ley Penal del Ambiente, en cuanto le sean aplicables.”* (**Artículo 126**).

6.1.3 Ley sobre Sustancias, Materiales y Desechos Peligrosos

Publicado en la Gaceta Oficial Extraordinaria N° 5.554 del 13/11/2001



La presente ley, según su **Artículo 1**, tiene por objeto:

“[...] regular la generación, uso, recolección, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final de las sustancias, materiales y desechos peligrosos, así como cualquier otra operación que los involucre con el fin de proteger la salud y el ambiente.”

Además, *“La falta de certeza científica no podrá servir de fundamento para postergar la adopción de medidas preventivas y correctivas que fueren necesarias para impedir el daño a la salud y al ambiente.” (Artículo 4).*

En el **Artículo 13**, se establecen las obligaciones de *“Las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas responsables de la generación, uso y manejo de sustancias, materiales o desechos peligrosos [...]”*.

El **Artículo 14** establece que *“El Estado apoyará e incentivará las acciones de las personas naturales o jurídicas que conlleven a la recuperación de los materiales peligrosos recuperables y a la adecuada disposición final de los desechos peligrosos [...]”*.

También es importante destacar los **Artículos 15 y 16**, que designan tanto al Estado como a las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas que generen, utilicen o manejen sustancias, materiales o desechos peligrosos, la responsabilidad de informar *“[...] a las comunidades que pudiesen ser afectadas sobre la naturaleza y riesgos que implican dichas sustancias, materiales o desechos peligrosos.” (Artículo 16)*, mientras que el carácter y contenido de esta información quedan definidos en los **Artículos 17, 18 y 19**.

Finalmente, el **Título VII** de la presente ley se enfoca en las sanciones a las cuales estará sujeta toda persona natural o jurídica, pública o privada que use, maneje, genere sustancias, materiales o desechos por el incumplimiento de este marco legal. Estas sanciones son de índole pecuniaria y pueden comprender la inhabilitación en el ejercicio de sus funciones por parte de funcionarios públicos. *“Las sanciones previstas en este título, se impondrán conforme a las previsiones contenidas en la Ley Penal del Ambiente, en cuanto le sean aplicables.” (Artículo 85)*

6.1.4 Ley Orgánica del Ambiente

Decreto publicado en la Gaceta Oficial Extraordinaria N° 5.833 del 22/12/2006.

Esta ley, según su **Artículo 1**:

“[...] tiene por objeto establecer las disposiciones y los principios rectores para la gestión del ambiente, en el marco del desarrollo sustentable como derecho y deber fundamental del Estado y de la sociedad, [...]”



De igual forma, establece las normas que desarrollan las garantías y derechos constitucionales a un ambiente seguro, sano y ecológicamente equilibrado.”

La gestión del ambiente, definida en el **Artículo 2** como:

“[...] el proceso constituido por un conjunto de acciones o medidas orientadas a diagnosticar, inventariar, restablecer, restaurar, mejorar, preservar, proteger, controlar, vigilar y aprovechar los ecosistemas, la diversidad biológica y demás recursos naturales y elementos del ambiente, en garantía del desarrollo sustentable.”

y cuyos objetivos están expuestos en el **Artículo 10**, es de utilidad pública y de interés general (**Artículo 5**) y es responsabilidad del Estado *“garantizar la incorporación de la dimensión ambiental en sus políticas, planes, programas y proyectos”* como se expresa en el **Artículo 11** de la presente ley. Con este fin, según el **Artículo 14**, el poder Ejecutivo, a través de la Autoridad Nacional Ambiental, desarrollará la normativa ambiental, coordinando con los organismos competentes, siendo responsables de su aplicación los órganos del Poder Público Nacional, Estatal y Municipal, según sus competencias (**Artículos 15, 16 y 17**).

En el marco de la planificación ambiental, tratado en el **Título III** de la presente ley, definida en el **Artículo 22** *“[...] como un proceso que tiene por finalidad conciliar el desarrollo económico y social con la gestión del ambiente, en el marco del desarrollo sustentable.”* y cuyos lineamientos se definen en el **Artículo 23**, está circunscrita al Plan de Ordenación del Territorio, las evaluaciones ambientales, la gestión integral de todas las áreas del alto valor ecológico, los sistemas de información geográfica, los criterios e indicadores de sustentabilidad, así como al Plan Nacional del Ambiente (cuyas directrices se definen en el **Artículo 30**), según lo expresado en los **Artículos 26 y 29**.

En lo referente a la educación ambiental y ciudadana, tratado en el **Título IV** de la presente ley, las personas naturales o jurídicas, públicas y privadas responsables de *“la formulación y ejecución de proyectos que impliquen la utilización de los recursos naturales y de la diversidad biológica, deben generar procesos permanentes de educación ambiental [...]”* según lo expresa el **Artículo 36 y 37**, siendo que *“Todas las personas tienen el derecho y el deber de participar en los asuntos relativos a la gestión del ambiente.”* (**Artículo 39**). Por ello, el Ejecutivo nacional, así como la Autoridad Ambiental Nacional, son responsables de plantear los mecanismos de gestión ambiental y garantizar el derecho a la participación ciudadana en lo concerniente a la conservación del ambiente (**Artículos 40 y 44**).



En lo competente a los recursos naturales y diversidad biológica, tratado en el **Título V** de la presente ley, expresa en su **Artículo 47** que:

“La Autoridad Nacional Ambiental, ante la presunción o inminencia de impactos negativos al ambiente, deberá prohibir o, según el caso, restringir total o parcialmente actividades en ejecución que involucren los ecosistemas, recursos naturales o la diversidad biológica, sin que ello genere derechos de indemnización.”

, siendo que la Autoridad Ambiental, en coordinación con los órganos competentes, tomará las medidas necesarias en lo referente a la recuperación y conservación de la diversidad biológica y los ecosistemas (**Artículo 54 y 77**).

En lo referente a la gestión integral del agua, establece en el **Artículo 56** que:

“Para asegurar la sustentabilidad del ciclo hidrológico y de los elementos que intervienen en él; se deberán conservar los suelos, áreas boscosas, formaciones geológicas y capacidad de recarga de los acuíferos.”

Expresando en el **Artículo 57** que *“Para la conservación de la calidad del agua se tomarán en consideración los siguientes aspectos:*

- 1. La clasificación de las aguas atendiendo a las características requeridas para los diferentes usos a que deba destinarse.*
- 2. Las actividades capaces de degradar las fuentes de aguas naturales, los recorridos de éstas y su represamiento.*
- 3. La reutilización de las aguas residuales previo tratamiento.*
- 4. El tratamiento de las aguas.*
- 5. La protección integral de las cuencas hidrográficas.*
- 6. El seguimiento continuo y de largo plazo de la calidad de los cuerpos de agua.*
- 7. El seguimiento continuo de los usos de la tierra y sus impactos sobre las principales cuencas hidrográficas, que abastecen de agua a las poblaciones humanas y los sistemas de riego de las áreas agrícolas.”*

Con respecto a la investigación e información ambiental, tratado en el **Capítulo VI** de la presente ley:

“Toda persona natural o jurídica que aproveche o utilice los ecosistemas, deberá recopilar la información relacionada con los recursos que utiliza, su posible deterioro y las acciones para su recuperación y restauración. Esta información deberá ser suministrada al Registro de Información



Ambiental dentro de los periodos, modalidades y costos establecidos por las normas que regulen la materia.”

según expresa el **Artículo 69**, siendo el Estado garante de que dicha información sea de acceso público (**Artículos 64, 71 y 73**), así como de garantizar el intercambio de información entre las instituciones públicas y privadas (**Artículo 68, 72**), implementando para ello el Registro de Información Ambiental (**Artículos 66 y 70**), así como las competencias de la Autoridad Nacional Ambiental (**Artículos 72, 73 y 75**).

En el marco del control ambiental, tratado en el **Título VII** de la presente ley, se establece, en el **Artículo 80**, aquellas actividades capaces de degradar el ambiente, entre las cuales destacan:

- 1. Las que directa o indirectamente contaminen o deterioren la atmósfera, agua, fondos marinos, suelo y subsuelo o incidan desfavorablemente sobre las comunidades biológicas, vegetales y animales.*
- 2. Las que aceleren los procesos erosivos y/o incentiven la generación de movimientos morfodinámicos, tales como derrumbes, movimientos de tierra, cárcavas, entre otros.*
- 3. Las que produzcan alteraciones nocivas del flujo natural de las aguas.*
- 4. Las que alteren las dinámicas físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua.*
- 5. Las que modifiquen el clima.*
- 6. Las que propendan a la acumulación de residuos y desechos sólidos.*
- 7. Cualesquiera otras que puedan dañar el ambiente o incidir negativamente sobre las comunidades biológicas, la salud humana y el bienestar colectivo.”*

El Estado exigirá entonces la evaluación y estudio de impacto ambiental y sociocultural pertinente, a ser realizados por toda persona natural o jurídica, pública o privada que pretenda llevar a cabo una actividad capaz de degradar el ambiente, para su autorización (**Artículos 85, 86, 89 y 96**)

En el contexto de los incentivos económicos y fiscales, tratado en el **Título VIII** de esta ley, según el **Artículo 102**:

“El Estado establecerá los incentivos económicos y fiscales que se otorgarán a las personas naturales y jurídicas que efectúen inversiones para conservar el ambiente en los términos establecidos en la presente Ley, en las leyes que la desarrollen y en las normas técnicas ambientales, a fin de garantizar el desarrollo sustentable.”

, siendo estos incentivos, según establece el **Artículo 104**:



1. Sistema crediticio financiado por el Estado.
2. Exoneraciones del pago de impuestos, tasas y contribuciones.
3. Cualquier otro incentivo económico y fiscal legalmente establecido.

Además: *“Las autoridades estatales y municipales, dentro del ámbito de sus competencias, podrán establecer incentivos fiscales y económicos en función de lo establecido en el presente Título.”*, según lo establece el **Artículo 107**.

Los títulos restantes de la presente ley tratan los temas de Medidas y Sanciones Ambientales, así como de la Jurisdicción Especial Penal Ambiental, la cual compete en conjunción con la **Ley Penal del Ambiente**. En el **Título IX** de la presente ley, se establecen los organismos competentes para la aplicación de las sanciones ambientales, así como las penas a las que estarán sujetos los infractores de esta ley, las cuales comprenden tanto sanciones pecuniarias como medidas privativas de libertad.

6.1.5 Ley de Aguas.

Decreto de fecha 29/11/2006, publicado en la Gaceta Oficial N° 38.595 del 02/01/2007.

Según el **Artículo 1**, la presente ley:

“[...] tiene por objeto establecer las disposiciones que rigen la gestión integral de las aguas, como elemento indispensable para la vida, el bienestar humano y el desarrollo sustentable del país, y es de carácter estratégico e interés de Estado.”

EL **Artículo 2** define Acuífero como un *“Reservorio constitutivo por materiales porosos y permeables del cual se pueden extraer aguas subterráneas.”* y Contaminación de Aguas como la *“Acción y efecto de introducir materias o formas de energía o inducir condiciones en el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica. [...]”*

En el **Artículo 3** se define la gestión integral de las aguas *“[...] el conjunto de actividades de índole técnica, científica, económica, financiera, institucional, gerencial, jurídica y operativa, dirigidas a la conservación y aprovechamiento del agua en beneficio colectivo, [...]”* y cuyos objetivos están planteados en el artículo a continuación:

Artículo 4. *“La gestión integral de las aguas tiene como principales objetivos:*

1. *Garantizar la conservación, con énfasis en la protección, aprovechamiento sustentable y recuperación de las aguas tanto superficiales como subterráneas, a fin de satisfacer las necesidades humanas, ecológicas y la demanda generada por los procesos productivos del país.*
2. *Prevenir y controlar los posibles efectos negativos de las aguas sobre la población y sus bienes.”*



Según el **Artículo 6**:

“Son bienes del dominio público de la Nación:

1. Todas las aguas del territorio nacional, sean continentales, marinas e insulares, superficiales y subterráneas.

[...]”

Además, según lo establecido en el **Artículo 22**, los estados, los municipios, los Consejos Estadales de Planificación y Coordinación de Políticas Públicas y los Consejos Locales de Planificación Pública, ejercerán las competencias en materia de gestión de las aguas asignadas en la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela y demás leyes aplicables, sin menoscabo de las funciones que le sean transferidas, delegadas o encomendadas por el ministerio que ejerza la Autoridad Nacional de las Aguas, y participarán en la toma de decisiones a través de su incorporación en los Consejos previstos en este Título.

Finalmente, el **Título VIII** tratan los temas de las infracciones y sanciones administrativas. Las sanciones pueden ser de carácter pecuniario (multas que pueden ser de carácter acumulativo), involucrar medidas privativas de libertad, ocupación, clausura y prohibición temporal o definitiva de labores, entre otras medidas. Según el **Artículo 113** de la presente ley:

“Las sanciones de multa previstas en esta Ley se aumentarán al doble en los casos de:

- 1. Agotamiento de cualquier fuente de agua por sobreexplotación.*
- 2. Contaminación de acuíferos o de fuentes superficiales.*
- 3. Contaminación por vertido de sustancias, materiales o desechos peligrosos.*
- 4. Usos que afecten o pongan en riesgo el suministro de agua a poblaciones*
- 5. Suministro de información falsa.”*

❖ **Reglamento de la Ley de Aguas**

Decreto publicado en la Gaceta Oficial N° 440.851 del 12/04/2018.

Según su **Artículo 1**, el presente reglamento:

“[...] tiene por objeto desarrollar las normas que regulan las materias contenidas en la Ley de Aguas.”

De este reglamento es importante destacar los siguientes artículos:

En el **Artículo 2** de la presente ley, se define Vulnerabilidad de Acuífero como las *“Características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una fuente contaminante.”*



Según el **Artículo 13**. *“La vulnerabilidad [de los acuíferos] será caracterizada por medio de un índice que incluya, entre otros, los siguientes parámetros: la profundidad del nivel freático o techo del acuífero confinado, la condición del acuífero en relación con su confinamiento y las características litológicas y grado de consolidación de los estratos ubicados encima de la zona saturada. [...]”*

Con base a la información anterior, *“En las cuencas hidrogeológicas del país se realizarán estimaciones del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, basadas en la relación entre la vulnerabilidad del acuífero y las actividades potencialmente contaminantes que se realicen en estas áreas. [...]”* (**Artículo 14**). Lo anterior será Autoridad Nacional de las Aguas, según lo establecido en el **Artículo 10**.

6.1.6 Ley Penal del Ambiente

Publicada en la Gaceta Oficial N°39.913 del 02/05/2012.

Según el **Artículo 1**, la presente ley:

“[...] tiene por objeto tipificar como delito los hechos atentatorios contra los recursos naturales y el ambiente e imponer las sanciones penales. Asimismo, determinar las medidas precautelativas, de restitución y de reparación a que haya lugar y las disposiciones de carácter procesal derivadas de la especificidad de los asuntos ambientales.”

En el **Artículo 5** se establecen las siguientes sanciones principales: prisión, el arresto, la disolución de la persona jurídica, multa y el desmantelamiento de la instalación, establecimiento o construcción; mientras que las sanciones accesorias son definidas en el **Artículo 6**.

Con relación a la contaminación de cuerpos de agua subterráneos:

Artículo 83. *“La persona natural o jurídica que contamine o envenene las aguas destinadas al uso público o a la alimentación pública, poniendo en peligro la salud de las personas, será sancionada con prisión de dieciocho meses a cinco años o multa de un mil ochocientas unidades tributarias (1.800 U.T.) a cinco mil unidades tributarias (5.000 U.T.).”*

Artículo 85. *“La persona natural o jurídica que vierta o arroje materiales no biodegradables, sustancias, agentes biológicos o bioquímicos, efluentes o aguas residuales no tratadas según las disposiciones técnicas dictadas por el Ejecutivo Nacional, objetos o desechos de cualquier naturaleza en los cuerpos de aguas, sus riberas, cauces, cuencas, mantos acuíferos, lagos, lagunas o demás depósitos de agua, incluyendo los sistemas de abastecimiento de aguas, capaces de degradarlas,*



envenenarlas o contaminarlas, será sancionada con prisión de uno a dos años o multa de un mil unidades tributarias (1.000 U.T.) a dos mil unidades tributarias (2.000 U.T.).”

6.1.7 Normas para Regular la Afectación de los Recursos Naturales Renovables

Asociadas a la Exploración y Extracción de Minerales.

Decreto N° 2.219 de fecha 22/04/92, publicado en Gaceta Oficial N° 4.418 Extraordinaria del 27/04/92 de abril de 1992.

Estas normas, según su **Artículo 1**, tienen por objeto:

“[...] establecer los requisitos para obtener autorizaciones y aprobaciones para la ocupación del territorio, y para la afectación de los recursos naturales renovables, así como lineamientos que permitan controlar las actividades de exploración y extracción de minerales metálicos y no metálicos a cielo abierto, a los fines de atenuar el impacto ambiental que pueden ocasionar tales actividades.”

En lo competente a las autorizaciones, tratadas en el **Capítulo II** de la presente norma, se establece en su **Artículo 5** que:

“Las personas naturales o jurídicas que pretendan realizar exploraciones o extracciones de minerales metálicos y no metálicos deberán obtener ante el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables las correspondientes autorizaciones para la ocupación del territorio y para la afectación de los recursos naturales, de acuerdo a las leyes que rigen la materia.”

Este capítulo se divide en seis **Secciones** diferentes que tratan los temas de: autorizaciones o aprobaciones para la ocupación del territorio, las condiciones ambientales para el otorgamiento de concesiones o contratos mineros, las condiciones para el otorgamiento de autorizaciones para afectación de recursos, las autorizaciones para la afectación de recursos naturales renovables a los fines de la exploración y las autorizaciones para la afectación de los recursos naturales renovables con fines de extracción tipo I y tipo II. De este capítulo es importante destacar los siguientes artículos de la **Sección III**:

Artículo 10. *“En las autorizaciones que otorgue el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables se establecerá, entre otras condiciones, la obligación de aplicar las medidas preventivas, mitigantes, correctivas o de control que cada caso requiera.”*, siendo que estas autorizaciones *“[...] serán otorgadas por etapas o por sectores, de acuerdo al plan que se haya propuesto para la exploración o extracción de minerales en las áreas concedidas por el Ministerio de Energía y Minas. [...]”* siendo que *“[...] El incumplimiento de las medidas o condiciones establecidas*



en las autorizaciones, para un sector del área concedida, será causal para no otorgar nuevas autorizaciones.”, esto último establecido en el **Artículo 11**.

Además, según lo establece el **Artículo 12**, “El Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables ordenará la ejecución de las medidas de protección del ambiente, a costa del beneficiario del permiso o autorización, en caso de que éste no las realice en el lapso establecido en dicho instrumento autorizador.”

Finalmente, en el **Capítulo IV** de la presente norma se tratan las disposiciones transitorias y finales, donde se destacan los siguientes artículos:

Artículo 35. “Las personas autorizadas para realizar cualquier actividad de exploración y extracción de minerales en un área determinada serán responsables de recuperarla de la degradación ambiental que ocasionen o de resarcir al Estado los gastos pertinentes [...]”.

Artículo 37. “Sólo se autorizará la intervención de estratos de rocas o sedimentos cuando dicha intervención no afecte el régimen de algún acuífero.”

Otros instrumentos legales de interés por fuera del marco Jurídico que regula la minería en Venezuela son:

❖ Ley Orgánica para la Prestación de los Servicios de Agua Potable y de Saneamiento

Decreto de fecha 20/11/2001, publicado en la Gaceta Oficial Extraordinaria N° 5.568 del 31/12/2001.

Esta ley, según su **Artículo 1**, tiene por objeto:

“[...] regular la prestación de los servicios públicos de agua potable y de saneamiento, establecer el régimen de fiscalización, control y evaluación de tales servicios y promover su desarrollo, en beneficio general de los ciudadanos, de la salud pública, la preservación de los recursos hídricos y la protección del ambiente, en concordancia con la política sanitaria y ambiental que en esta materia dicte el Poder Ejecutivo Nacional y con los planes de desarrollo económico y social de la Nación.”

❖ Ley de Calidad de las Aguas y del Aire Libre.

Decreto de fecha 28/12/2015, publicado en la Gaceta Oficial N° 6.207 del 28/12/2015.

Esta ley, según su **Artículo 1**, tiene por objeto:

“[...] establecer las disposiciones sobre la gestión de la calidad de las aguas y del aire; las molestias ambientales y las condiciones bajo las cuales se debe realizar el manejo de los residuos líquidos y gaseosos con el fin de proteger la salud de los seres vivos y los ecosistemas.”



- ❖ Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos.

Decreto N° 883 de fecha 11/11/95, publicado en Gaceta Oficial Extraordinaria N° 2.021 del 18/12/95.

Este decreto, según su **Artículo 1**, establece:

"[...] las normas para el control de la calidad de los cuerpos de agua y de los vertidos líquidos."

- ❖ Normas sobre Evaluación Ambiental de Actividades Susceptibles de Degradar el Ambiente.

Decreto N° 1.257 de fecha 13/03/96, publicado en Gaceta Oficial N° 35.946 del 25/04/96.

Estas normas, según su **Artículo 1**, tienen por objeto:

"[...] establecer los procedimientos conforme a los cuales se realizará la evaluación ambiental de actividades susceptibles de degradar el ambiente."

- ❖ Normas para la Ubicación, Construcción, Protección, Operación y Mantenimiento de Pozos Perforados Destinados al Abastecimiento de Agua Potable.

Decreto N° 2.048 de fecha 08/09/97, publicado en Gaceta Oficial N° 36.298 del 24/09/97.

Este decreto, según su **Artículo 1**, establece que:

"La ubicación, sondeos de pruebas, construcción, protección, operación y mantenimiento de pozos profundos destinados al abastecimiento de agua para el consumo humano, y el uso del agua proveniente de dichos pozos quedan sujetos a la vigilancia del Ministerio de Sanidad y Asistencia Social, a través de las dependencias responsables de las funciones de Ingeniería Sanitaria, de acuerdo a las disposiciones contenidas en las presentes Normas."



METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA GENERACIÓN DE PRODUCTOS

A continuación, se expone la metodología empleada en este proyecto para generar los productos presentados en el capítulo pertinente a los resultados. La metodología está redactada de manera sucinta, a manera de tomar solamente los aspectos más relevantes para el producto final de cada apartado.

7.1 Compilación de imágenes de prospección remota

Para los fines de este proyecto se emplearon imágenes multiespectrales, así como modelos de elevación digital, correspondientes tanto a la zona de estudio, como a la región central de la cordillera de la costa venezolana. En el caso de las imágenes multiespectrales, se seleccionaron bajo el criterio de que tuvieran la menor cobertura de nubes posible en la región de la mina Loma de Níquel, así como en las regiones aledañas. Las plataformas satelitales de las cuales se obtuvieron estos datos se detallan a continuación.

7.1.1 Plataforma Landsat 8

El satélite Landsat 8, correspondiente a la misión *Landsat Data Continuity Mission (LDCM)*, fue puesto en órbita el 11 de febrero del año 2011. Landsat 8 es el octavo satélite del programa Landsat iniciado en 1972 por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (*USGS*). El satélite está equipado con el sistema de sensoramiento remoto OLI (*Operational Land Imager*) y el sensor infrarrojo termal TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) (*USGS*, 2021).

El satélite Landsat 8 posee una órbita heliosíncrona próxima a los polos, a una altitud de 705 km, inclinada 98,2°; completando una órbita terrestre en 99 minutos. El satélite tiene un ciclo de repetición de 16 días y cruza el ecuador a las 10:00 am +/- 15 min horario local; asimismo adquiere alrededor de 740 escenas al día en el Sistema *path/row* de Referencia Mundial 2 (*WRS-2*), con una superposición de imágenes que varía de 7% en el ecuador hasta un máximo de 85% en latitudes extremas. Las dimensiones de una escena Landsat 8 son de 185 km x 180 km.

Los productos de esta misión, ofrecidos en tres niveles de procesamiento distintos (L1, L2 y L3), se obtuvieron de manera gratuita a través del portal *EarthExplorer* del *USGS*. Para fines de este proyecto, se obtuvo una escena correspondiente a la región central de la Cordillera de La Costa venezolana (ver Fig 48). Los datos de esta imagen se presentan en la Tabla 4 a continuación.

Tabla 4. Datos de la imagen multiespectral Landsat 8 utilizada.

LC08_L2SP_004053_20200411_20200822_02_T1		
Fecha	11 - Abril - 2020	
Path/Row	4 / 53	
Coordenadas de las Esquinas (Lat /Long)	Sup. Izq.	11,16880 / -68,08138
	Sup. Der	11,15525 / -66,00547
	Inf. Izq.	9,07708 / -68,08731
	Inf. Der.	9,06611 / -66,02477
	Centro	10,11847/ -67,04975
Formato	GEOTIFF	
Resolución	30 m x 30 m / 15 m x 15 m	
Datum	WGS84 UTM 19 N	
Dimensiones	170 km x 185 km	

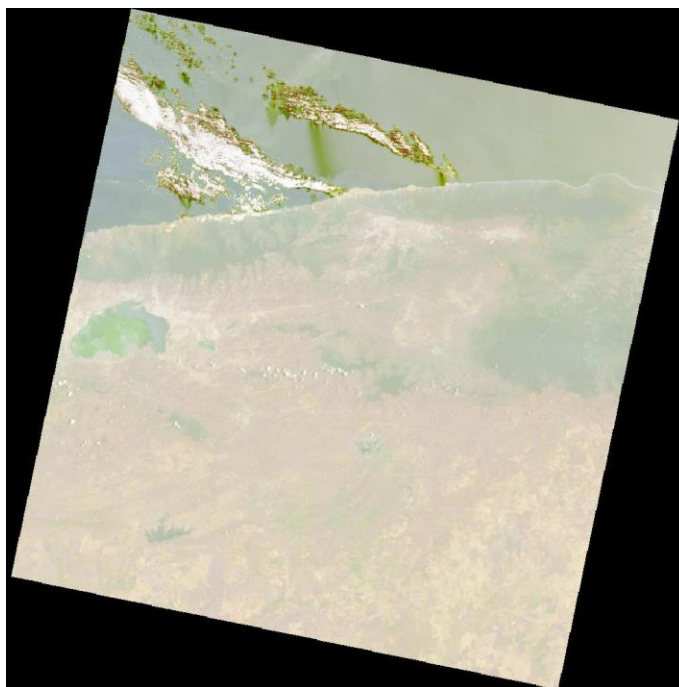


Fig 48. Imagen Landsat 8 LC08_L2SP_004053_20200411_20200822_02_T1 de la región de estudio.

La escena obtenida tiene un nivel de procesamiento L2, lo que implica que esta imagen multiespectral cuenta con corrección atmosférica (TOA) para las bandas de los sensores del sistema OLI, para lo cual se emplean los datos de *Coarse Resolution Water Vapor* y *Ozone* del instrumento MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectrometer*) de los satélites Terra y/o Aqua de la NASA (USGS, 2020).



7.1.2 Plataforma Sentinel 2

La misión Sentinel 2 del programa de observación de la Unión Europea Copérnico de la Agencia Espacial Europea (ESA), comprende dos satélites, Sentinel-2A y Sentinel 2B, puestos en órbita el 23 de junio de 2015 y el 7 de marzo de 2017 respectivamente; con el lanzamiento de un tercer satélite, el Sentinel-2C, pautado para el año 2024. Cada satélite en la misión Sentinel-2 carga con el sistema de instrumento multiespectral MSI (*MultiSpectral Instrument*), que cuenta con sensores para las longitudes de onda VNIR (*Visible Near Infra-Red*) y tres sensores para las longitudes de onda SWIR (*Short Wave Infra Red*), para un total de 13 bandas de captura (ESA, 2021).

Ambos satélites poseen una órbita heliosíncrona y próxima a los polos, desfasadas 180° entre sí, con la finalidad de otorgar una alta frecuencia de repetición de escenas (cada 5 días en el ecuador) completando 14,3 revoluciones al día, con un periodo de 100,6 minutos; además, su cobertura de la superficie terrestre abarca desde los 56° de latitud sur hasta los 84° de latitud norte y poseen un campo de visión de 290 km. Los satélites se ubican a una altura de 786 km, con una inclinación de 98,62°, cruzando el ecuador a las 10:30 am horario local.

Los productos de esta misión, ofrecidos en dos niveles de procesamiento distintos (L-1C y L-2A), se obtuvieron de manera gratuita a través del portal *Copernicus Open Access Hub* de la Agencia Espacial Europea. Para fines de este proyecto se descargaron dos escenas correspondientes a la región central de la Cordillera de La Costa venezolana (ver Fig 49), tomadas por el satélite Sentinel 2B, las cuales fueron combinadas en una misma imagen. Los datos de estas imágenes se presentan a continuación.

Tabla 5. Datos de las imágenes multiespectrales Sentinel 2B utilizadas.

	S2B_MSIL2A_20200125T145719_N0213_R039_T19PFM_20200125T171539.SAFE		S2B_MSIL2A_20200125T145719_N0213_R039_T19PGM_20200125T171539.SAFE	
Fecha	25 - Enero - 2020			
Tile	T19PFM		T19PGM	
Coordenadas de las Esquinas (Lat/Long)	Sup. Izq.	10,85412 / -68,08509	Sup. Izq.	10,85005/-67,17081
	Sup. Der	10,84949 / -67,08083	Sup. Der	10,84244 / -66,16708
	Inf. Izq.	9,86118 / -68,08797	Inf. Izq.	9,85748 / -67,17655
	Inf. Der.	9,85698 / -67.08686	Inf. Der.	9,85059 / -66,17597
	Centro	10,35584 / -67,58519	Centro	10,35054 / -66,67260
Formato	GEOTIFF			
Resolución	10 m x 10 m / 20 m x 20 m / 60 m x 60 m			
Datum	WGS84 UTM 19 N			
Dimensiones	110 km x 110 km			

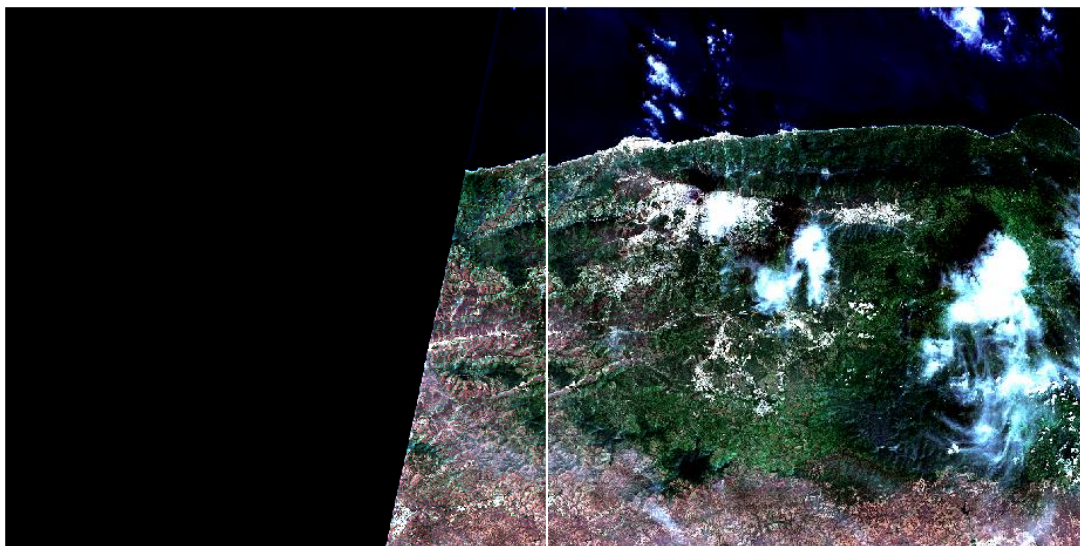


Fig 49. Imágenes Sentinel 2B

S2B_MSIL2A_20200125T145719_N0213_R039_T19PFM_20200125T171539 (derecha) y
S2B_MSIL2A_20200125T145719_N0213_R039_T19PGM_20200125T171539 (izquierda).

Las escenas obtenidas tienen un nivel de procesamiento L-2A, lo que implica que estas imágenes multispectrales cuentan con corrección atmosférica (TOA) para todas las bandas. Los valores de reflectancia corresponden a la reflectancia en superficie, también denominada *Bottom Of Atmosphere* (BOA).

7.1.3 Plataforma ALOS-PALSAR

El satélite ALOS (*Advance Land Observing Satellite-1*), también llamando DAICHI, del programa de observación satelital japonés de la Agencia Aeroespacial de Exploración Japonesa (JAXA), fue puesto en órbita el 24 de enero de 2006. Este satélite tuvo como objetivo contribuir en el campo del mapeo topográfico a escala global, monitoreo de desastres y el estudio de recursos naturales, para lo cual el satélite cuenta entre sus equipos con un radar de apertura sintética de banda L tipo *Phased Array* (PALSAR), así como con los sistemas PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument Stereo Mapping*) y AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2*). El satélite ALOS fue declarado “muerto en órbita” a causa de problemas de energía producto de fallas en el sistema de paneles solares del satélite (JAXA, 2008).

El satélite ALOS cuenta con una órbita heliosíncrona, próxima a los polos, con una inclinación de 98,16° y a una altitud de 691,65 km. El periodo orbital del satélite es de 98,7 minutos, con un periodo



de recurrencia de 46 días, pasando por el ecuador a las 10:30 am +/- 15 min horario local y un campo de visión de 70 km.

En la Tabla 6 a continuación, se presentan las especificaciones del sistema PALSAR del satélite ALOS.

Tabla 6. Especificaciones del sistema PALSAR del satélite ALOS.

ALOS-PALSAR FINE RESOLUTION		
Misión	2006-2011	
Modo de haz	polarización simple (FBS)	polarización dual (FBS)
Polarización	HH o VV	HH+HV o VV+HV
Resolución	10 m o 30 m	20 m
Ancho de Swath	70 km	
Angulo Off-Nadir	34.3°	
Límite de Obs.	Latitud: desde 87.8° N hasta 75.9° S	

Los productos de esta misión, ofrecidos en tres niveles de procesamiento distintos (Level 1.0, Level 1.5, *Radiometric Terrain Corrected*) y se obtuvieron de manera gratuita a través del portal Vertex de la Instalación Satelital de Alaska (ASF) de la NASA. Como ya se ha mencionado, se descargaron escenas correspondientes a la región central de la Cordillera de La Costa venezolana (ver Fig 50). Los datos de estas imágenes se presentan en la Tabla 7 a continuación.

Tabla 7. Datos de las imágenes DEM ALOS-PALSAR utilizadas.

	AP_27264_FBS_F0180_RT1		AP_27264_FBS_F0190_RT1	
Fecha	08 - Marzo - 2011			
Modo de haz	FBS			
Coordenadas de las Esquinas (Lat/Long)	Sup. Izq.	10,19129 / -67,40108	Sup. Izq.	10,68087 / -67,5129
	Sup. Der	10,18692 / -66,67318	Sup. Der	10,67647 / -66,77174
	Inf. Izq.	9,54169 / -67,40421	Inf. Izq.	10,03442 / -67,51597
	Inf. Der.	9,53760 / -66,67774	Inf. Der.	10,03028 / -66,77630
	Centro	9,86457 / -67,03904	Centro	10,35573 / -67,14423
Path/Frame	130 / 180		130 / 190	
Polarización	HH			
Resolución	12.5 m			
Datum	WGS84 UTM 19 N			
Nivel de Prosc.	L 1.5			

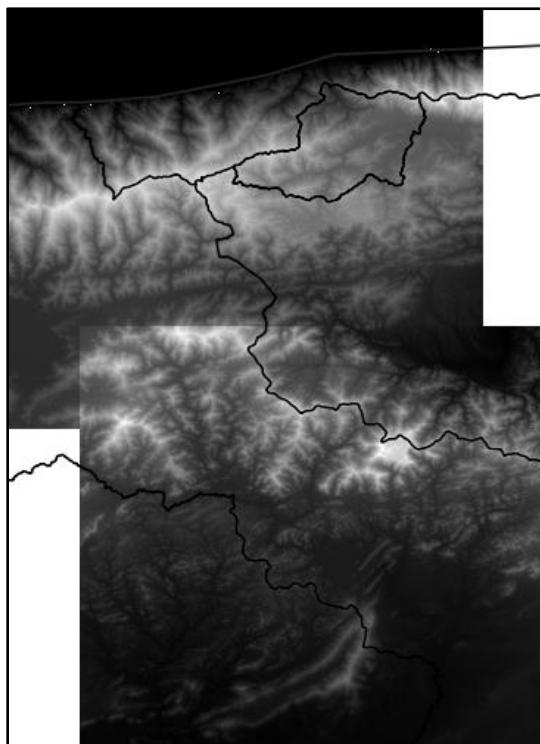


Fig 50. DEM ALOS PARSAL AP_27264_FBS_F0180_RT1 y AP_27264_FBS_F0190_RT1 con límites estatales de la región de estudio.

Las escenas obtenidas cuentan con correcciones por terreno y radiométricas (RTC), que consisten en remover la influencia de la dispersión topográfica en la imagen, así como las distorsiones geométricas que producen errores en la geolocalización. Estas distorsiones se producen ya que el sensor PALSAR posee un nadir, o ángulo de observación, de 34.1° . La corrección por terreno, también llamada ortorectificación, mueve los píxeles de la imagen hacia su ubicación espacial correspondiente con respecto a la relación espacial con los demás píxeles de la imagen.

7.2 Análisis de imágenes satelitales

Las escenas multiespectrales fueron procesadas empleando el software QGIS (Quantum GIS), un sistema de información geográfica *open source* de uso gratuito. El programa cuenta con múltiples herramientas para el análisis de datos georreferenciados, entre las cuales destacan las librerías de GDAL (*Geospatial Data Abstraction Library*) y GRASS GIS (*Geographic Resources Analysis Support System*) (QGIS, 2021).

La versión de QGIS utilizada en este proyecto fue la 3.16.8 “Hannover” del 19 de junio de 2021.



En el programa QGIS, cada banda de las imágenes multiespectrales está representada por una capa o *raster* individual. Por ello, las distintas capas de las imágenes multiespectrales fueron combinadas en una único *raster* que contiene las distintas bandas. Esto se hizo con base en la plataforma satelital y a la resolución de las bandas. De esta manera, se generó un *raster* multibanda para las bandas Landsat, todas con una resolución de 30 m a excepción de la banda pancromática (banda 8) y las bandas termales (bandas 11 y 12); y tres *raster* multibanda Sentinel, para las bandas con 10 m, 20 m y 60 m de resolución. Partiendo de estos *raster* combinados, se procedió a generar las imágenes de falso color, lo cual se explica a continuación.

7.2.1 Combinación de bandas

Las imágenes multiespectrales, a diferencia de una imagen fotográfica, están descompuestas en múltiples bandas asociadas al rango de longitud de onda del espectro EM en el cual cada sensor del satélite midió la reflectancia de la superficie terrestre. Debido a esto, es posible observar distintas propiedades de la superficie terrestre, asociadas a la longitud de onda observada; sin embargo, es posible combinar estas bandas para crear imágenes de “falso color”, que permiten combinar la información proporcionada por cada banda en una misma imagen.

Con base a lo antes expuesto, se crearon diferentes imágenes de falso color para las escenas obtenidas de las plataformas Landsat 8 y Sentinel 2B, con la finalidad de realizar un análisis visual de los terrenos que abarcan el área de estudio (ver Fig 51).

Ya que la fecha de captura de las escenas Sentinel corresponden a inicios del periodo de sequía en Venezuela y la fecha de captura de las escenas Landsat corresponden a finales de este periodo, es posible observar los cambios en la distribución de la cobertura vegetal, permitiendo diferenciar la vegetación perenne de la temporal, así como la distribución de la vegetación en las zonas aledañas a la mina.

Además, ciertas combinaciones de bandas permiten destacar la presencia de cuerpos de agua, así como determinar el tipo de suelo observado, basados en patrones espectrales conocidos.

Para realizar la combinación de bandas en el programa QGIS, es necesario asignar una banda de la imagen multiespectral a cada uno de los tres colores complementarios rojo, verde y azul (RGB), ya que la combinación de estos tres colores es la empleada para crear imágenes multicolor en un fondo negro.

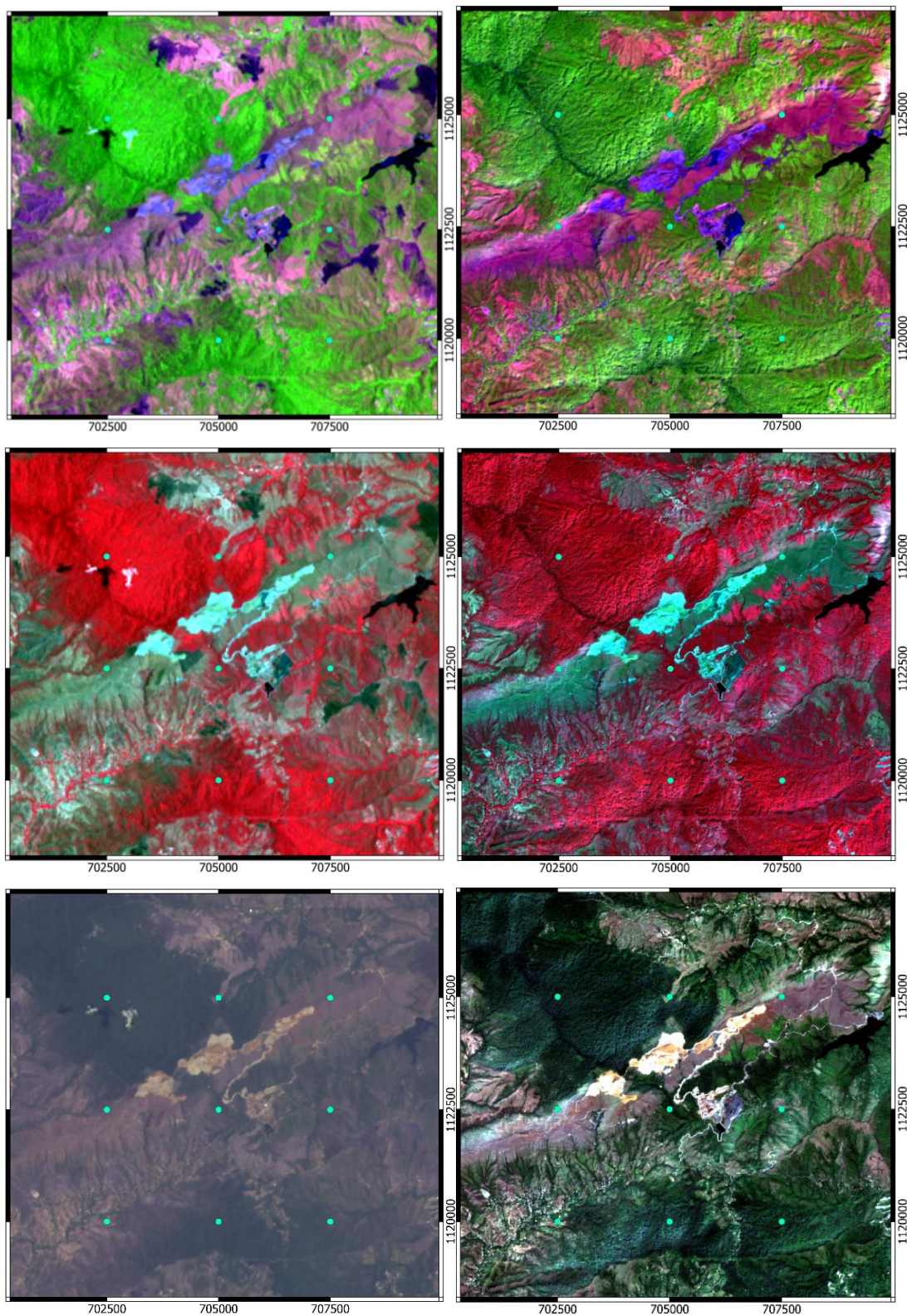


Fig 51. Combinaciones de banda Agricultura, Infrarrojo y Natural para las imágenes Landsat 8 (columna izquierda) y Sentinel 2B (columna derecha). Nota: Proyección UTM en la zona 19N.

Entre estas combinaciones de bandas, es importante destacar la denominada limonita-hematita. Esta se hizo con base al patrón espectral de la limonita y la hematita observado en la Fig 52 a continuación.

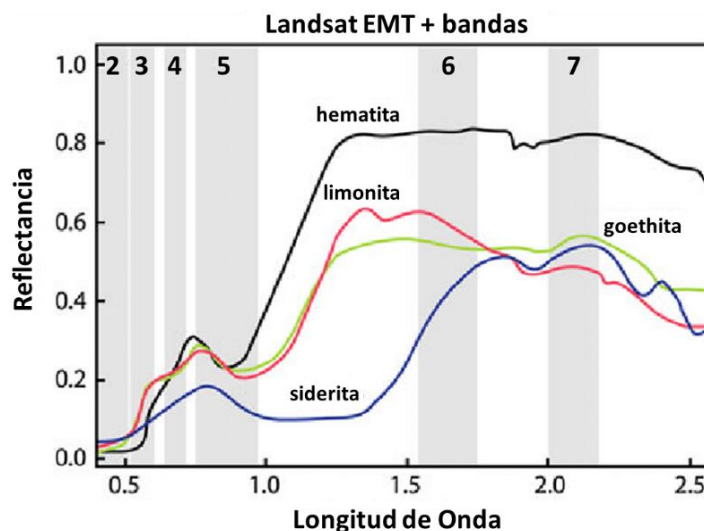


Fig 52. Patrón espectral de absorción de diferentes minerales de Fe y las bandas de la plataforma Landsat. Modificado de Ciampanili et al. (2013).

Como podemos observar, para la limonita y la hematita, existen zonas de absorción importantes entre las longitudes de onda 0-0,55 μm . Basados en los rangos de captura de los sensores Landsat y Sentinel, se asignaron los colores rojo y azul a las bandas 1 y 2 de Landsat y 2 y 4 de Sentinel, asignado el color verde a una banda donde no existiera absorción (bandas 4 para Landsat y Sentinel). De esta manera, al generar la imagen de color falso, la limonita-hematita aparece en color verde (ver Fig 74), pudiendo así diferenciar el suelo saprolítico de la mina del suelo limonítico, asociados al perfil de meteorización.

7.2.2 Clasificación de imágenes

El objetivo principal de la clasificación de imágenes es categorizar automáticamente todos los píxeles de una imagen en clases según el tipo de terreno (p.e. vegetación, suelo, agua, etc.). Este proceso se realiza generalmente utilizando los patrones espectrales para agrupar en clases; es decir, píxeles que comparten combinaciones similares de reflexión o emisión espectral, son agrupados en clases que se asume representan categorías particulares de los rasgos superficiales (Lillesand et al., 2015).



Sin embargo, siempre existe una redundancia en la información que aporta cada banda, además de que los datos originales (bandas de la imagen multiespectral) suele ser bastante pesada para el procesamiento computacional. Por ello, se suele emplear un análisis de componentes principales (PCA), que transforma el set de datos originales correlacionadas en un nuevo set de muchas menos capas, que representan la mayoría de la información presente en el set de datos original (este procedimiento se explica con detalle más adelante) (González, 2021).

Independiente del tipo de datos empleados, existen dos métodos para llevar a cabo la clasificación: el método supervisado, en el cual el usuario selecciona “áreas de entrenamiento” para cada clase en la imagen con base a las cuales el algoritmo de clasificación va a agrupar los píxeles de la imagen y el método no supervisado, en el cual el algoritmo de clasificación agrupa los píxeles en clases basado en la información de cada píxel, sin necesidad de que el usuario seleccione áreas de entrenamiento. Posterior a la clasificación no supervisada, el usuario procede entonces a determinar, mediante un análisis visual, si la distribución de las clases creadas es correcta y si la cantidad de clases generadas es ideal (Lillesand *et al.*, 2015). Este último método fue el empleado en este proyecto y se explica más adelante.

Todos los procesos explicados a continuación se realizaron para las imágenes Landsat y Sentinel.

❖ Cálculo de *raster* texturales

Previo al análisis de componentes principales, explicado en el inciso a continuación, se generaron capas texturales a partir del *raster* de la banda azul (banda 2 para Landsat y Sentinel). Inicialmente, se utilizó la herramienta **r.recode** de la librería GRASS, para recodificar el *raster*, pasando del rango original de los datos de reflectancia a un número menor de valores. El rango original de reflectancia para la banda azul fue dividido a intervalos iguales, asignándole a cada intervalo un número, empezando desde el 1. De esta manera, se obtuvieron 12 valores distintos para la imagen Sentinel y 21 valores distintos para la imagen Landsat. Este procedimiento implica una reducción en la resolución radiométrica de la imagen, pero facilita el procesamiento computacional (ver Fig 53). En la Tabla 8 a continuación, se muestran los parámetros para la recodificación de la banda azul de las imágenes Sentinel 2B.

Tabla 8. Rangos de reclasificación de la Banda Azul Sentinel 2B.

Reclasificación Banda 2 (Azul) Sentinel 2B		
Rango Original (BV)		Reclass
-10000	123	0
123	200	1
200	300	2
300	400	3
400	500	4
500	600	5
600	700	6
700	800	7
800	900	8
900	1000	9
1000	1100	10
1100	1200	11
1200	10000	12

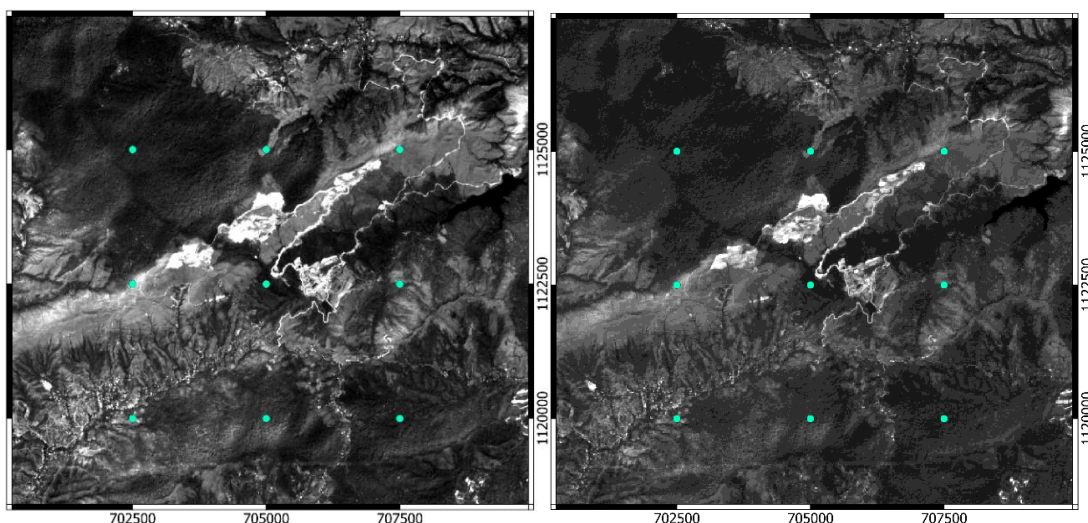


Fig 53. Cambio de resolución radiométrica de la banda 2 (Azul) de la imagen Sentinel 2B tras la recodificación. Imagen original (izquierda) y recodificada (derecha).

Posteriormente, se empleó la herramienta **r.texture** para generar capas texturales a partir de la banda recodificada. Para ello, empleando esta herramienta se calculó la uniformidad o segundo momento angular (ASM), entropía (ENT), contraste (CON), correlación (CORR), varianza (VAR) y la primera derivada de la medida de correlación (MOC1) del *raster* recodificado. Más allá de los valores numéricos resultado de estas operaciones, lo importante de este procedimiento es la información que dichas operaciones puedan aportar respecto a la distribución de los terrenos en la mina, un criterio principalmente visual. Bajo este principio, se seleccionaron los *rasters* de entropía y primera

derivada de la medida de correlación (ver Fig 54), para ser posteriormente utilizados en el análisis de componentes principales.

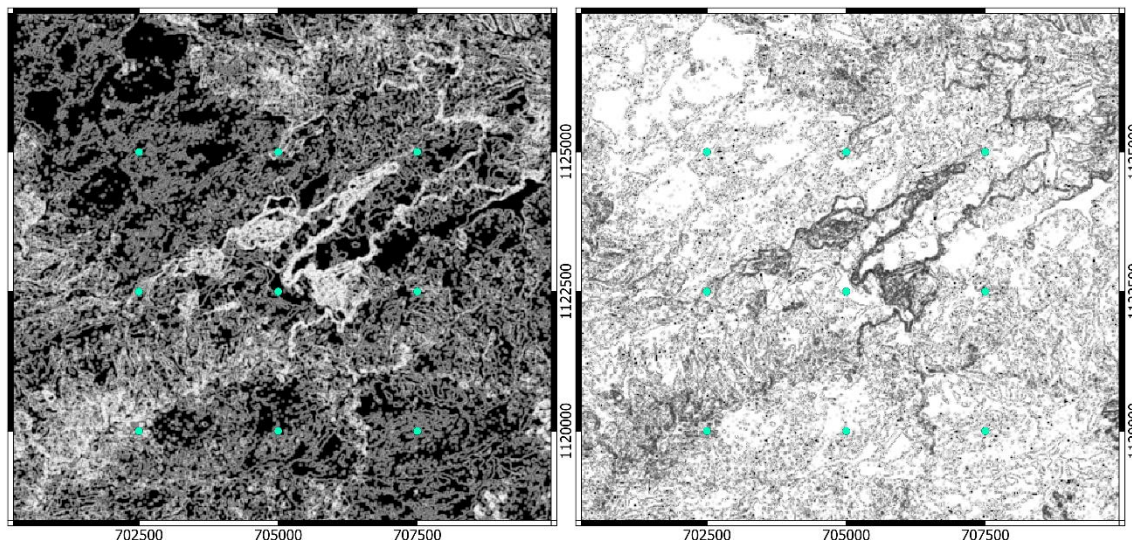


Fig 54. Raster de entropía (izquierda) y de la primera derivada de la media de la correlación (derecha) generados a partir de la banda 2 de la imagen Sentinel 2B recodificada.

En las imágenes anteriores es posible observar cómo se diferencia el área de la mina del área boscosa circundante, además, es posible diferenciar el desarrollo urbano de la comunidad al suroeste, así como el embalse del río Mesia al este.

❖ Análisis de Componentes Principales

Habiendo calculado los *rasters* texturales, se procedió a realizar el análisis de componentes principales (PCA), empleando el plugin *Semi-Automatic Classification Plugin* (SACP) de QGIS.

Como se mencionó previamente, en términos generales, el PCA es una técnica matemática que consiste en transformar los datos originales de las bandas de la imagen multiespectral, que tiene un alto grado de correlación, en un nuevo set de variables no correlacionadas llamadas componentes principales (PC), que contienen la mayoría de la información presente en el set de datos original. Estos nuevos componentes son combinaciones lineales de las bandas de la imagen original, derivados en un orden descendiente de importancia basados en la varianza entre los datos de cada banda; es decir, el primer componente principal (PC1) corresponde a la máxima proporción de varianza de los datos originales. Todos los componentes subsecuentes corresponden a las máximas proporciones de las varianzas restantes (PC2, PC3, PC4, ..., PCn) y son ortogonales entre sí. Existirán tantos componentes principales como bandas empleadas en el análisis; sin embargo, generalmente

los primeros tres componentes corresponden a la mayoría de la varianza del set de datos, siendo posible descartar los demás componentes subsecuentes, reduciendo la dimensionalidad de la data (Landmap, 2021).

Desde el punto de vista geométrico, el análisis PCA se observa en la Fig 55 a continuación.

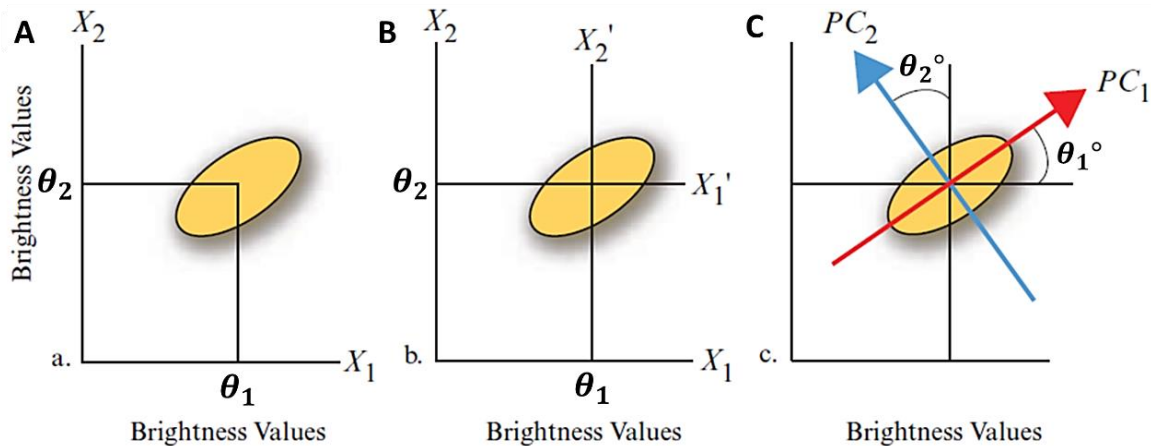


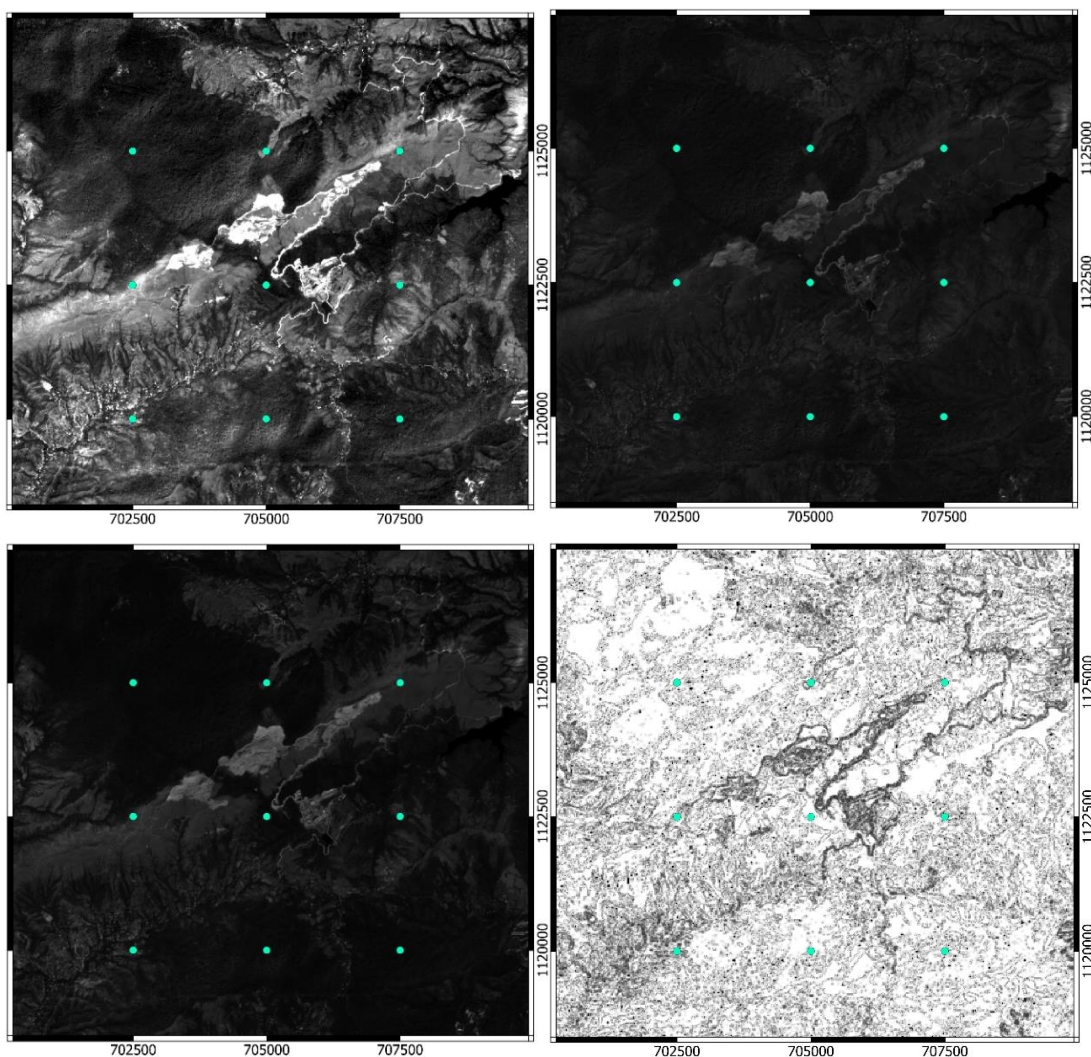
Fig 55. Representación gráfica de la relación espacial de los primeros dos componentes principales. Modificado de Jensen (2015).

Partiendo de dos bandas X_1 y X_2 a transformar en sus componentes principales PC_1 y PC_2 . En la Fig 55.A, observamos un gráfico de dispersión de los valores de brillo (*Brightness Values*, BV) asociado con cada pixel en ambas bandas y así como sus medias respectivas θ_1 y θ_2 . La extensión de la varianza de la distribución de puntos es un indicador de la correlación y la calidad de la información asociada a ambas bandas (Jensen, 2015). Mientras mayor es la varianza, mayor es la dispersión de los datos y mientras mayor es la dispersión, mayor es la información contenida en la dirección de máxima varianza (Jaadi, 2021).

Las coordenadas de medición inicial (ejes X_1 y X_2) no son necesariamente el mejor arreglo espacial de los datos multiespectrales para su análisis, debido a la redundancia de la información aportada. El propósito del PCA es trasladar y/o rotar los ejes originales, para que los BV originales de los ejes X_1 y X_2 sean reproyectados a un nuevo eje de coordenadas X_1' y X_2' (Fig 55.B), que es posteriormente rotado un ángulo ϕ de manera que el eje X_1' está asociado con la máxima varianza de la dispersión de puntos original (Fig 55.C). Este nuevo eje se denomina el primer componente principal (PC_1), mientras que el segundo componente principal (PC_2) es perpendicular (ortogonal) al PC_1 .

✓ Análisis de Componentes Principales para las imágenes del proyecto

Para este proyecto, el análisis tanto de la imagen Landsat, como de la imagen Sentinel, se realizó utilizando los *rasters* de las bandas del espectro visible 2, 3 y 4 (azul verde y rojo), ya que, en su conjunto, aportan la información más detallada de los diferentes terrenos en la mina Loma de Níquel y el área circundante, a diferencia de las bandas del espectro infrarrojo que, a pesar de permitir diferenciar la densidad de vegetación así como cuerpos de agua en superficie, no permiten discriminar de manera satisfactoria los terrenos asociados a suelos expuestos en el área estudiada. Además, se emplearon los *rasters* texturales ENT y MOC1 previamente calculados, para un total de cinco *rasters* o bandas para ambas imágenes (ver Fig 56).



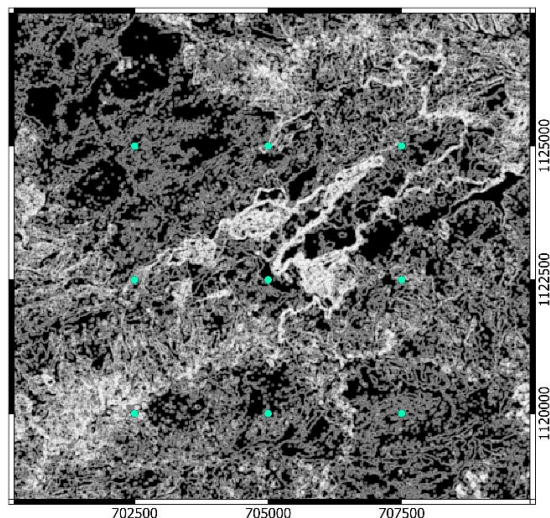


Fig 56. Ejemplo de las bandas Sentinel 2B utilizadas para su PCA: banda 2 (superior izq), banda 3 (superior der), banda 4 (medio izq), MOC1 (medio derecha) y entropía. Nota: Proyección UTM zona 19N.

Para reproyectar los datos originales de los ejes asociados a cada banda a los nuevos ejes de los componentes principales, es necesario obtener ciertos coeficientes de transformación que se pueden aplicar de manera lineal a los valores originales de los píxeles (Jensen, 2015). El ANEXO 2 en la página 157, explica los pasos realizados por el *plugin* SACP utilizado para el análisis de componentes principales.

En la Fig 57 a continuación, se muestran algunos de los componentes principales generados a partir de la imagen Landsat y de la imagen Sentinel.

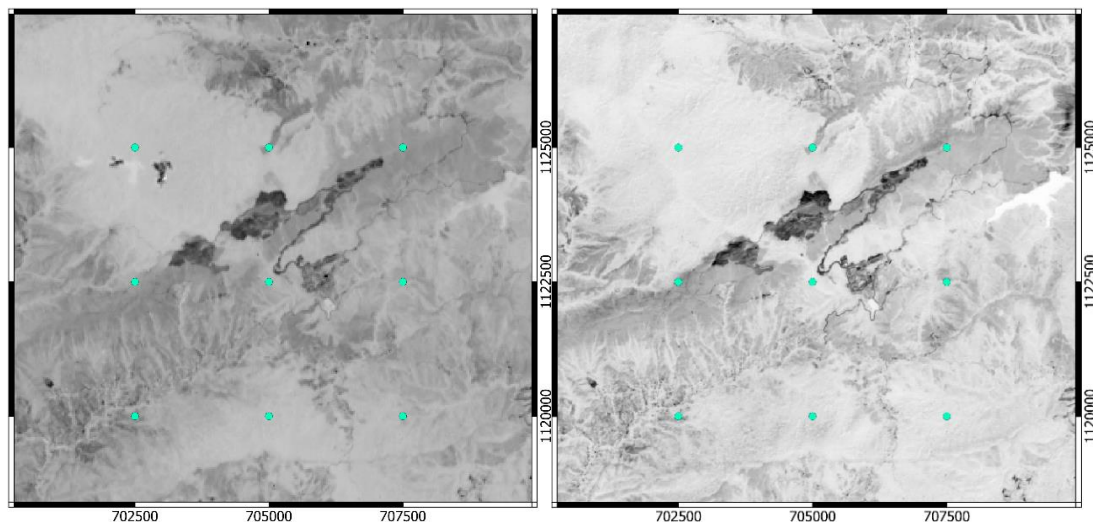


Fig 57. Primer componente principal (PC1) de la imagen Landsat 8 (izquierda) y Sentinel 2B (derecha).

❖ Clasificación no supervisada

Como se mencionó previamente, el método empleado para la clasificación de las imágenes fue el no supervisado. De igual manera que para el cálculo de componentes principales, se utilizó el *plugin* SACP de QGIS. Para la clasificación, se emplearon los componentes principales previamente generados.

Existen varios algoritmos que se pueden utilizar para agrupar píxeles con base a patrones espectrales. En este caso, se empleó el método de *K-means*, en el cual se seleccionó el número de clases en las cuales el algoritmo agrupó los píxeles de la imagen. Culminado este proceso, se analizó la calidad de la clasificación de los terrenos de cada imagen y asignó a las clases generadas su nombre correspondiente.

Esto se observa en el ejemplo de la Fig 58 a continuación, donde un pixel de una imagen ha sido clasificado en una de tres clases distintas S, C y D, con base a los datos de BV de dos bandas.

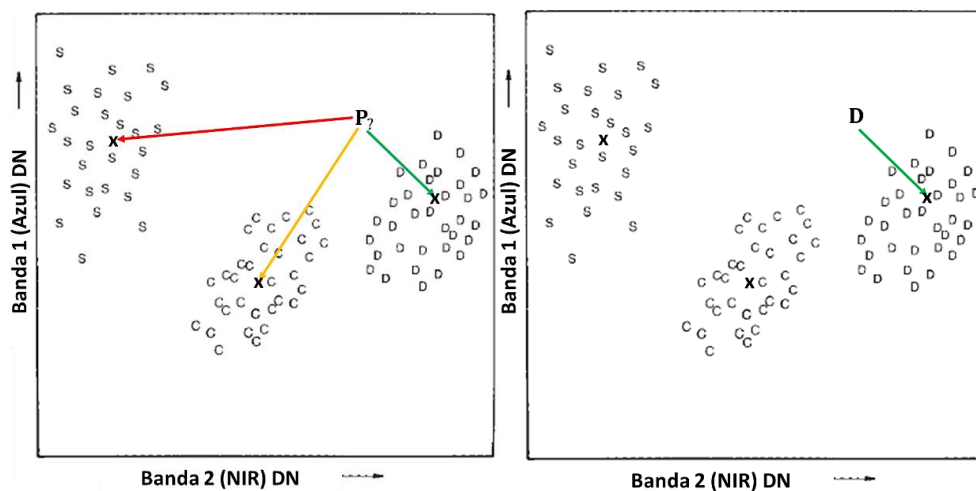


Fig 58. Clasificación de un pixel desconocido en una de tres clases basados en la proximidad de sus BV al centroide de cada clase. Modificado de Lillesand et al. (2015).

En el caso de este proyecto, para la clasificación tanto de la imagen Landsat, como de la imagen Sentinel, se emplearon los primeros tres componentes principales de cada imagen y un total de 15 iteraciones para cada clasificación, ya que se observó que la calidad de ésta no mejoraba más allá de este número. Para ambas imágenes se generaron clasificaciones para 7, 8, 9 y 10 clases distintas, con el fin de obtener la mejor clasificación posible. Para el caso de la imagen Sentinel se observó que la clasificación con mejor ajuste visual se obtuvo para una cantidad de 9 clases, mientras que para la imagen Landsat el mejor resultado se obtuvo con 10 clases.

Posteriormente, basado en la resolución espacial de los píxeles de cada imagen, se determinó el área asociada a cada clase y se eliminaron aquellas clases cuyas áreas no eran representativas. De



esta manera, se obtuvieron 5 clases para la imagen Sentinel y 4 clases para la imagen Landsat. Las clases obtenidas fueron: vegetación densa, transición vegetación-roca, suelo, suelo ferruginoso y saprolito. Esta última clase no está presente en la imagen Landsat, debido a una menor resolución espacial de esta imagen (30x30 m) comparada con la imagen Sentinel (10x10 m). Además, debido a que la imagen Landsat presentaba nubes dentro del área de interés clasificada, los píxeles, tanto de las nubes como de sus sombras, fueron eliminados posterior a la clasificación.

❖ Aplicación de filtros a las imágenes clasificadas

Habiendo culminado con la clasificación de las imágenes, se procedió a aplicar un filtro de mayoría a ambas imágenes, el cual reasigna la clasificación de los píxeles aislados dentro de clases a las que no corresponden, esto con el fin de eliminar clasificaciones erróneas asociadas a distorsiones en el patrón espectral de estos píxeles.

7.3 Análisis de modelos de elevación digital

Una vez descargadas los modelos de elevación de la región central de la cordillera de la costa, estos se combinaron en un mismo *raster* para facilitar el procesamiento posterior. Los DEM descargados tienen una resolución espacial de 12,5x12,5 m, generados a partir de un remuestreo de *rasters* con una resolución espacial de 30x30. De igual manera que con las imágenes satelitales, se utilizó el software QGIS para el procesamiento de este set de datos; además, se empleó el programa de análisis de imágenes de percepción remota PCI Geomática. A continuación, se explica los productos obtenidos a partir de estos datos de elevación.

7.3.1 Identificación de redes de drenaje y cuencas hidrográficas

Teniendo el DEM de la región de interés, se utilizó el algoritmo **Strahler Order** de la librería SAGA de QGIS, el cual genera un *raster* correspondiente a las redes de drenaje de una región, a partir de un DEM; clasificando cada drenaje con base a la clasificación Horton-Strahler, desde el inicio del drenaje, hasta su salida al mar. El valor de cada píxel del *raster* corresponde al orden Strahler asociado al drenaje al que pertenece y los píxeles que no corresponden a un drenaje tienen un valor igual a cero. De esta manera se obtuvo una *raster* de la red drenaje cuyo orden de clasificación Strahler varía de 1 a 12.

Ya que este algoritmo clasifica los drenajes independientemente de si son cursos de agua perennes o intermitentes, se procedió a analizar a partir de cual orden Strahler la clasificación

concordaba con los cursos de agua existentes, próximos a la región de la mina Loma de Níquel. De esta manera, se concluyó que a partir del orden 5 se presentaba el mejor ajuste con los cursos de agua en la región de la mina.

Una vez conocido el orden Strahler mínimo de interés, se utilizó el algoritmo **Channel Network & Drainage Basins** de SAGA, el cual, a partir del *raster* DEM y el orden Strahler mínimo, extrae los cursos de agua mayores o iguales a este orden, así como las cuencas hidrográficas presentes en la región que abarca el DEM en formato vectorial. De esta manera se extrajeron los drenajes asociados a la cuenca del Río Tuy, así como aquellos asociados a la cuenca alta del Río Guárico.

Además, utilizando el algoritmo **Upslope Area** de SAGA se extrajeron las subcuencas hidrográficas en la región de la mina, partiendo de un DEM del área, así como las coordenadas del punto a partir del cual se quiere determinar el área de drenaje río arriba; el cual debe ubicarse dentro de una red de drenaje ya determinada por el algoritmo de **Strahler Order**. Se ubicaron cuatro puntos: en la desembocadura del Río Cagua en el Río Tuy al norte de la mina, en la desembocadura del Río Mesia en el Río Tuy al este de la mina, en la desembocadura del Río Caramacate en el Río Guárico al sur de la mina y en la desembocadura de un afluente en el Río Pao al oeste de la mina, extrayendo un total de cuatro subcuencas asociadas a la mina Loma de Níquel, dos que pertenecen a la cuenca superior del Río Guárico y dos que pertenecen a la cuenca del Río Tuy (ver Fig 59).

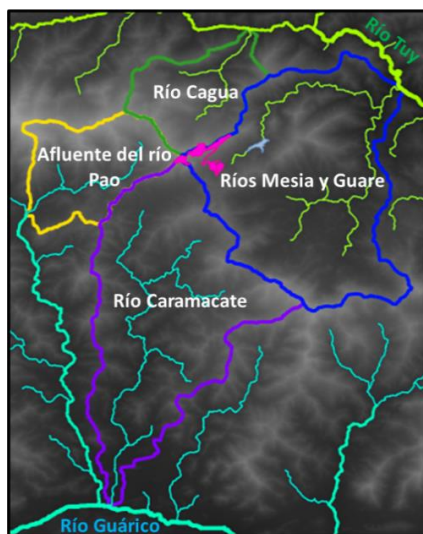


Fig 59. Subcuencas asociadas a la mina Loma de Níquel.

7.3.2 Identificación de lineamientos y sus intersecciones

Puesto que, en hidrogeología, los lineamientos son rasgos lineales superficiales que pueden ser indicativos de estructuras de interés en el subsuelo, tales como fallas o fracturas, asociadas al

movimiento de aguas subterráneas. Partiendo de los lineamientos, se procuró identificar la ocurrencia de intersecciones entre estos lineamientos, a modo de indicación de la probable presencia de aguas subterráneas. Además, cabe mencionar que la distribución de estas intersecciones puede ser indicativa de estructuras subterráneas de interés como familias de fallas, fracturas u otras discontinuidades.

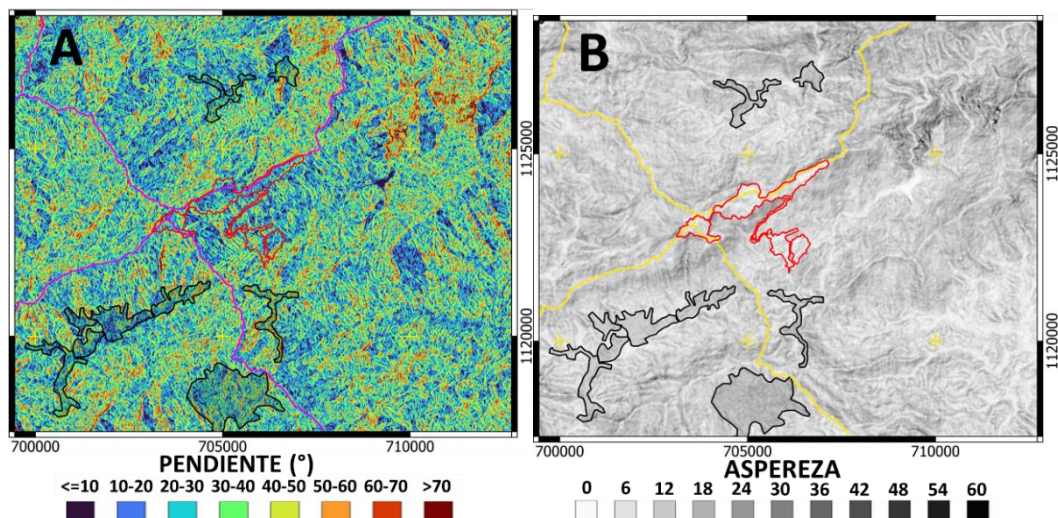
Considerando que los rasgos superficiales de la región en la que se ubica la mina Loma de Níquel están dominados principalmente por la topografía del terreno, se decidió emplear un modelo de elevación digital del área para la extracción de lineamientos, cuyos límites están definidos por las cuatro subcuencas extraídas previamente. Este DEM se extrajo a partir del DEM original de la región central de la Cordillera de la Costa.

A continuación, se exponen los pasos seguidos para la extracción de lineamientos y sus intersecciones utilizados.

❖ Generación de rasters para PCA

Previo al análisis de componentes principales, para la zona de interés se generaron cuatro *rasters*: de pendientes (ver Fig 60.A) (algoritmo **Slope**), de aspereza (ver Fig 60.B) (algoritmo **Roughness**), de sombra (algoritmo **Hillsahde**) y de sombra promedio, generando 8 *rasters* de sombra en 8 direcciones cardinales distintas y utilizando el algoritmo **Merge** para integrarlos en un mismo *raster* promedio. Esto se hizo empleando la librería GDAL de QGIS.

De esta manera se generaron las dos últimas capas que se observan en la Fig 60.C y Fig 60.D a continuación.



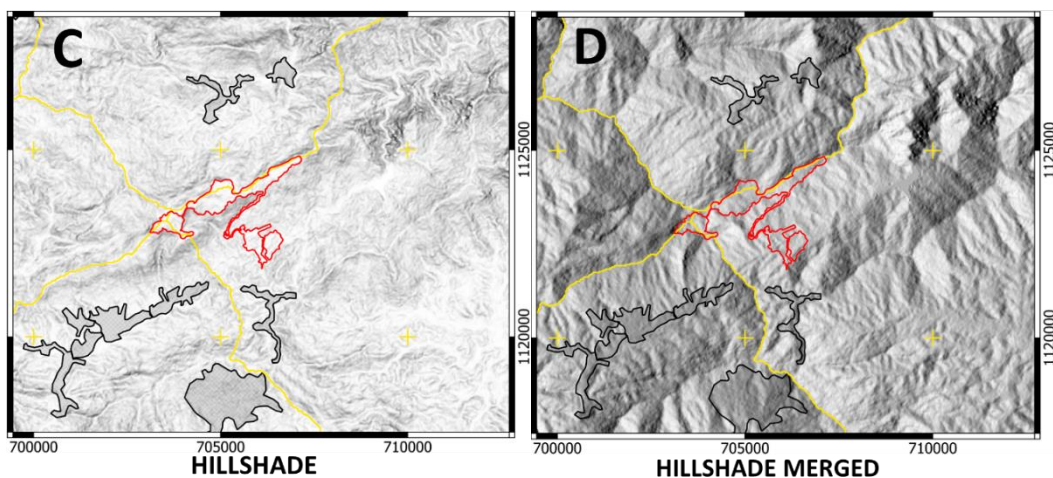
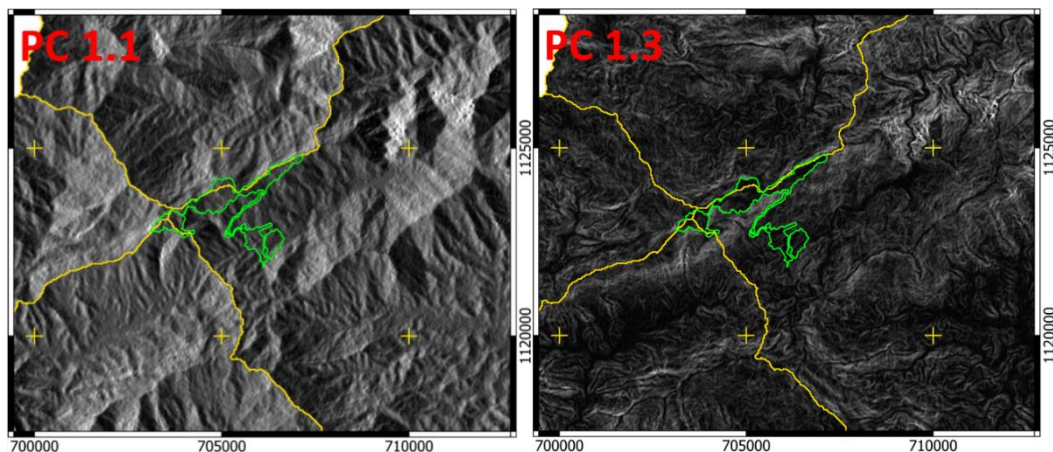


Fig 60. Ejemplo de los rasters utilizados para el PCA de la imagen Sentinel 2B. Nota: en amarillo se muestra los límites de las subcuencas hidrográficas asociadas a la mina y los polígonos representan los centros poblados en las proximidades de la mina (color rojo).

❖ Análisis de componentes principales

Una vez generados los *rasters*, se calcularon los componentes principales empleando el *plugin* SACP, siguiendo el mismo procedimiento utilizado para el análisis de las imágenes multiespectrales. Sin embargo, para este caso, se calcularon dos sets de componentes principales. El primero se calculó a partir de los cuatro *rasters* de pendientes, aspereza, HS promedio y HS combinado; y el segundo se calculó sin utilizar el *raster* de HS combinado. De esta manera de obtuvieron dos grupos de componentes principales: un primer grupo de cuatro y un segundo grupo de tres. Del primer grupo, calculado a partir de los cuatro *rasters*, se seleccionaron el primer, tercer y cuarto componente principal (PC1.1, PC1.3 y PC1.4), mientras que, del segundo grupo, se seleccionó el primer componente principal PC2.1. Estos componentes se pueden observar en la Fig 61 a continuación.



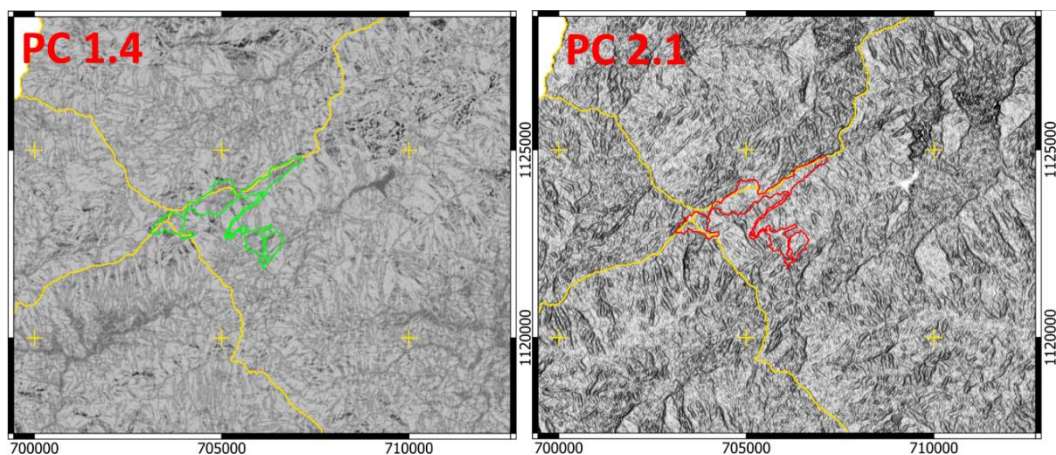
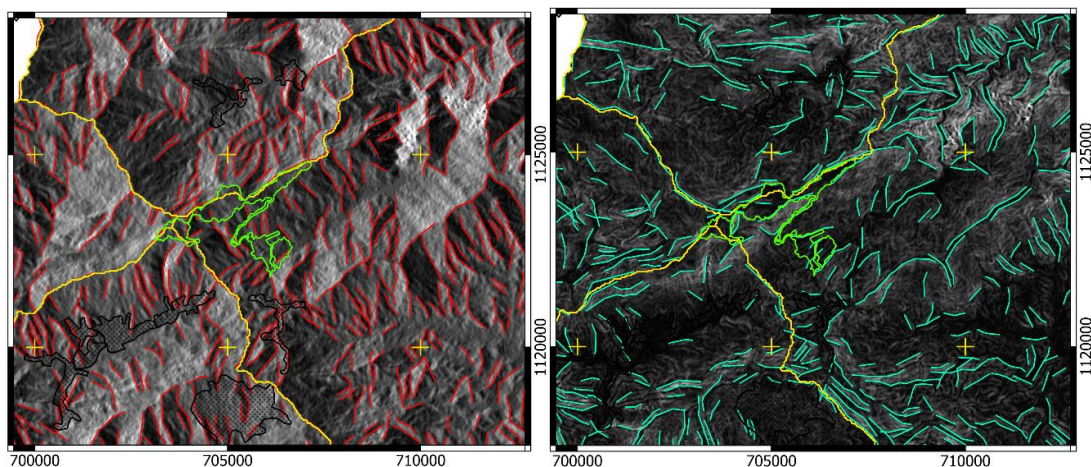


Fig 61. Componentes principales generados a para el análisis de lineamientos.

❖ Extracción de lineamientos

Ya calculados los componentes principales PC1.1, PC1.3, PC1.4 y PC2.1, estos *rasters* se cargaron en el programa PCI Geomática, para realizar la extracción de lineamientos. Con este propósito, se empleó el algoritmo **LINE**, el cual extrae los rasgos lineales de una imagen. Este algoritmo consiste en tres etapas: la primera etapa aplica un operador de detección de bordes (*edge detection*) a la imagen, produciendo una imagen de gradientes (*gradient image*). La segunda etapa, aplica un umbral o límite a la imagen de gradientes para crear una imagen de bordes binaria (*binary edge image*) y la tercera etapa extrae los lineamientos de la imagen de bordes binaria como una capa de polilíneas (*polyline*) vectorial (ver Fig 62).



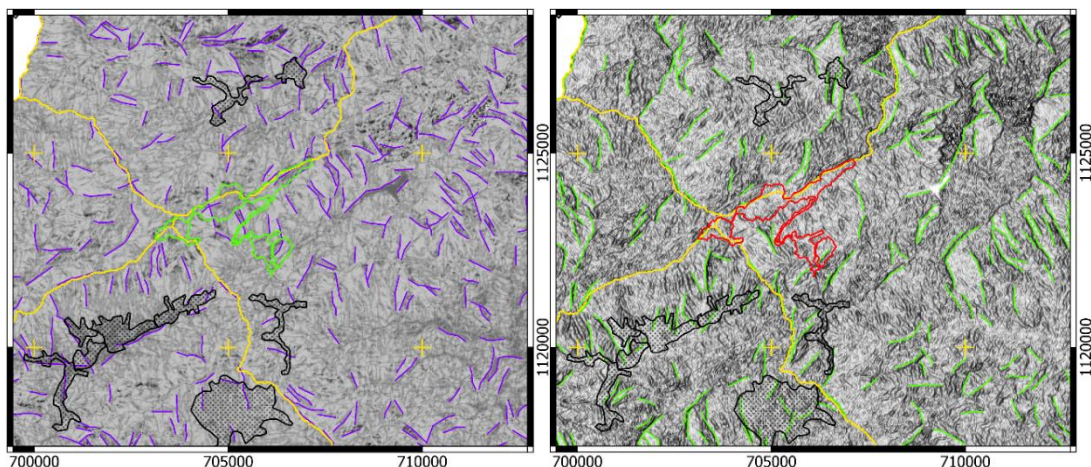


Fig 62. Lineamientos extraídos de los cuatro componentes principales.

❖ Extracción de intersecciones

Una vez extraídos los lineamientos de los cuatro *rasters* de componentes principales, las capas vectoriales de estos lineamientos se cargaron nuevamente al programa QGIS. Previo a la extracción de intersecciones, se generó una capa vectorial de las fallas cuaternarias presentes en la zona de interés a partir de un mapa geológico del área, obteniendo cinco capas vectoriales asociadas a la extracción de los lineamientos a partir de los cuatro componentes principales y la capa vectorial asociada a las fallas presentes en la zona de estudio. Utilizando el algoritmo **Merge Vector Layers** de QGIS, las capas vectoriales se combinaron en una misma capa, quedando así con dos capas vectoriales, la de lineamientos y la de fallas (ver Fig 63).

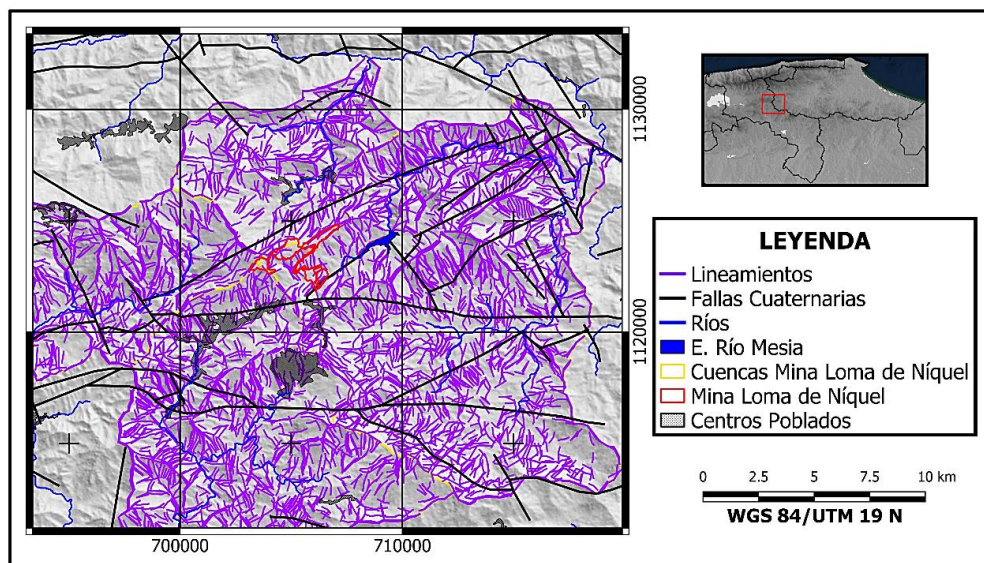


Fig 63. Mapa de lineamientos extraídos de los componentes principales (morado) y fallas cuaternarias (negro).

Empleando el algoritmo **Line intersections** de QGIS se extrajeron las intersecciones de las líneas en cada capa vectorial, así como las intersecciones entre las líneas de ambas capas; en otras palabras, se extrajeron las intersecciones entre los lineamientos y entre las fallas, así como las intersecciones de los lineamientos con las fallas, obteniendo de esta manera una capa vectorial de puntos cuyas coordenadas están asociadas a las intersecciones (ver Fig 64).

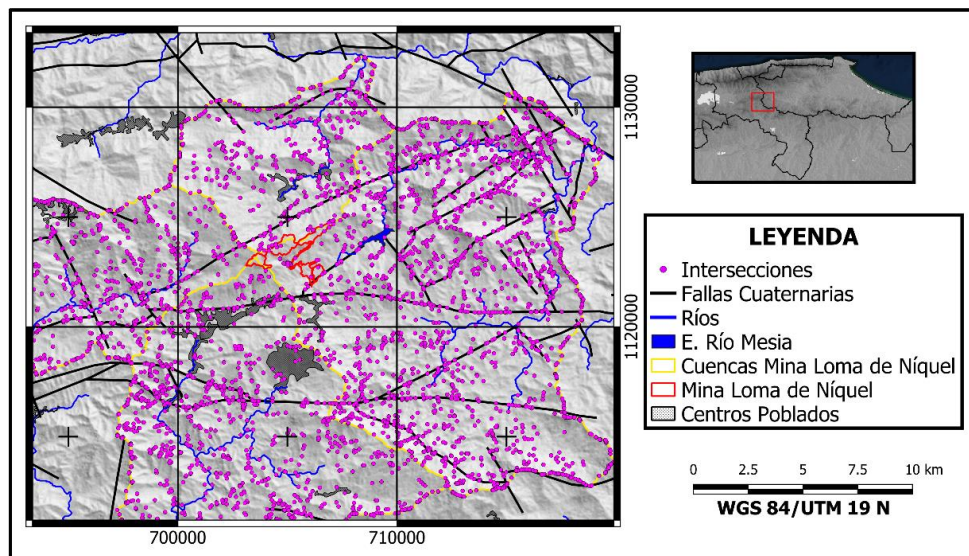


Fig 64. Mapa de intersecciones.

❖ Filtrado de intersecciones

Habiendo extraído las intersecciones entre los lineamientos y las fallas, se procedió a filtra éstas con base a dos criterios: la curvatura y la pendiente del terreno. Ya que la extracción de lineamientos se realiza para todo rasgo superficial de carácter lineal, esto implica que tanto los valles como las crestas de las montañas califican como lineamientos, lo cual se puede observar en la Fig 64 arriba. Los fluidos en una superficie tienden a desplazarse a través del camino que ofrezca menos resistencia. Esto último, desde el punto de vista hidrológico, está asociado a las áreas cóncavas de la superficie como valles o quebradas.

Con base a lo anterior, se generó un *raster* de curvatura utilizando el algoritmo **Curvature** de la librería SAGA, partiendo del DEM de la zona (ver Fig 65). Los pixeles de este *raster* tienen valores que varían de positivos a negativos dependiendo de la convexidad o concavidad del terreno respectivamente.

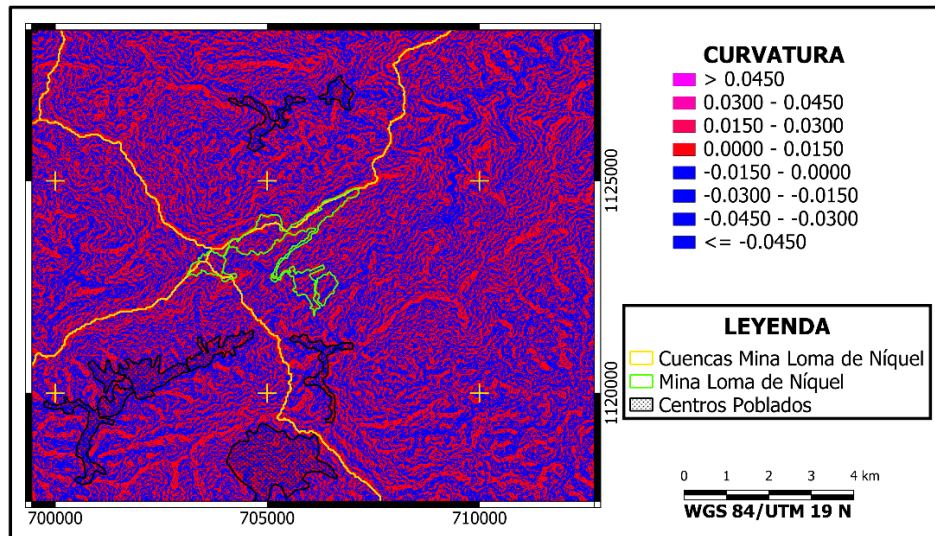


Fig 65. Raster de curvatura.

Luego, utilizando el algoritmo **Sample Raster Values** de QGIS, se extrajo el valor de curvatura (C) correspondiente a cada intersección de la capa vectorial asociado a la ubicación en superficie de cada punto. Una vez hecho esto, utilizando la herramienta **Query Builder**, se filtraron todas aquellas intersecciones ubicadas en un área cuya curvatura fuese mayor o igual a cero, eliminando de esta manera intersecciones asociadas a zonas planas y convexas de la superficie, en otras palabras, las crestas montañosas (ver Fig 66).

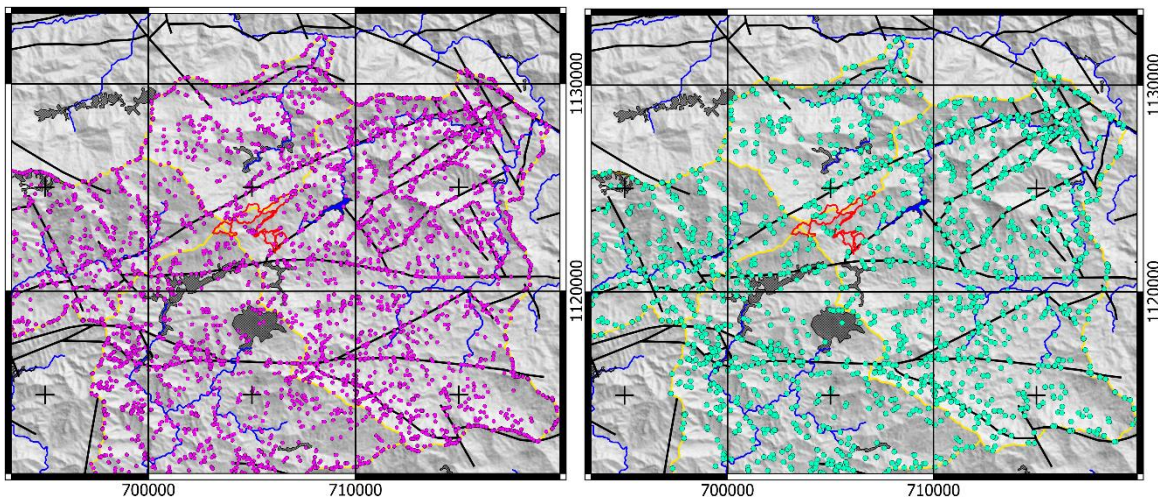


Fig 66. Mapa de intersecciones (izquierda) e intersecciones filtradas por curvatura (derecha).

Además, la ocurrencia del agua subterránea, así como la accesibilidad para su extracción, tienen relación con la pendiente del terreno. Las zonas de altas pendientes están relacionadas con una

mayor velocidad del flujo de agua superficial, lo que dificulta la percolación del agua en el terreno, caso contrario de las zonas de baja pendiente. Con base a este principio, utilizando nuevamente el algoritmo **Sample raster values**, se extrajo del *raster* de pendientes previamente generado, los valores de pendiente para cada punto de la capa vectorial de intersecciones ya filtradas por curvatura (C). Utilizando la herramienta **Query Builder**, se filtraron aquellas intersecciones ubicadas en un área cuya pendiente (P) fuese mayor a 20° , obteniendo los puntos de la Fig 67 a continuación.

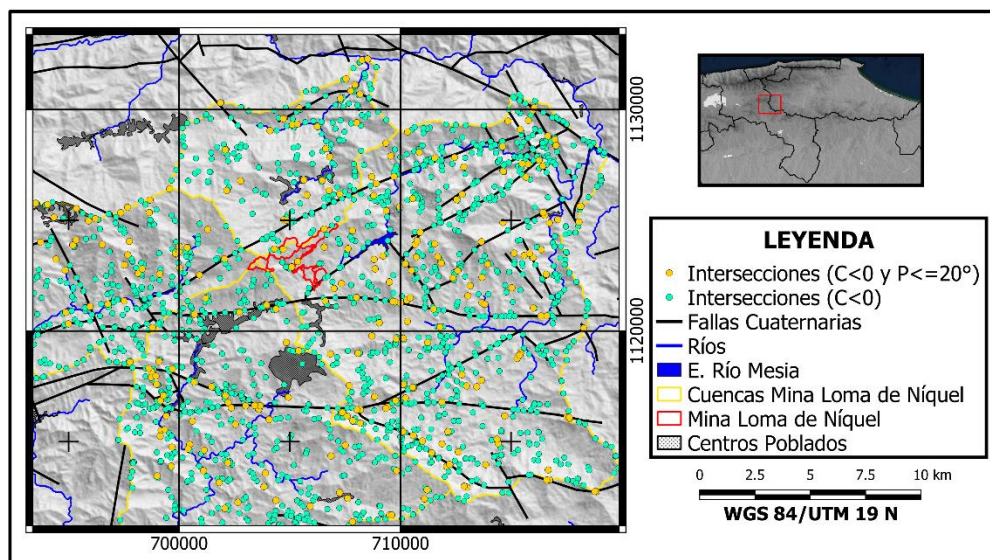


Fig 67. Mapa de intersecciones filtradas por curvatura y pendiente.

En la Tabla 9 a continuación, se muestran las intersecciones correspondientes a cada etapa de filtrado.

Tabla 9. Cantidad de intersecciones en cada etapa de filtrado.

	Intersecciones Originales	Intersecciones Filtradas por Curvatura (≤ 0)	Intersecciones filtradas por curvatura y pendiente ($< 20^\circ$)
Cantidad	10.391	4.673	647
%	100%	44,97%	6,23%

❖ Densidad de intersecciones

Utilizando la capa vectorial de intersecciones filtradas por curvatura, se generó un *raster* de probabilidad de intersección utilizando el *plugin Heatmap*. Este *plugin* emplea una función Kernel (ver Fig 68) la cual centra en cada punto de la capa vectorial y la hace rotar sobre el eje de las ordenadas, modificando el peso de la función con base a los puntos presentes en el radio de

evaluación. El Kernel utilizado fue de tipo *Quartic*, con un radio de evaluación de 1,5 km. El *raster* generado consiste en una serie de contornos cuyos valores están asociados al número de puntos (intersecciones) presentes en el área. Estos valores no tienen una escala representativa, por lo cual se decidió representar las curvas con tonos de color, siendo los tonos más opacos los asociados a una mayor cantidad de intersecciones de lineamientos (y por tanto una mayor probabilidad) y los tonos más claros los asociados a una menor probabilidad de intersecciones de lineamientos (ver Fig 68).

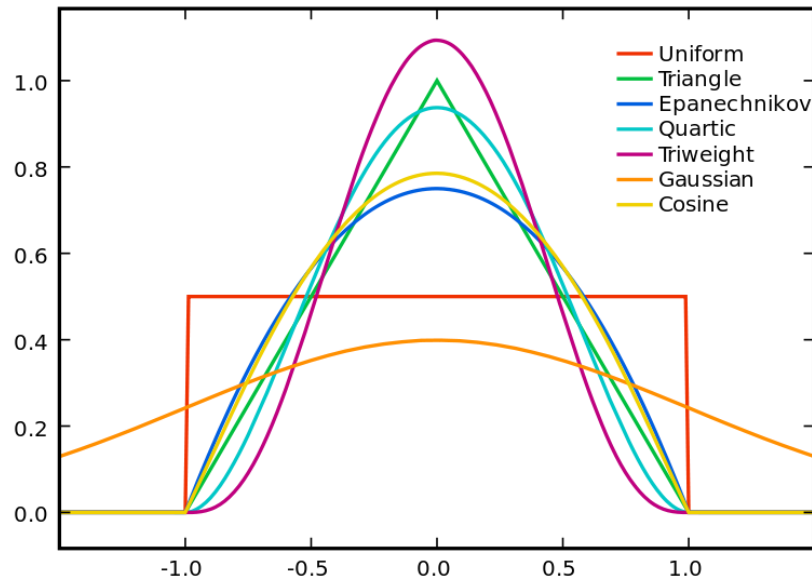


Fig 68. Gráfico de las distintas funciones Kernel.

❖ Proximidad a cursos de agua

Finalmente, empleando la función **Proximity**, se generó un *raster* de proximidad a cursos y cuerpos de agua superficiales. Esto se hizo partiendo de un *raster* donde cada pixel asociado a un curso o cuerpo de agua superficial se le asignó el valor de 1, mientras que al resto de los píxeles se le asignó un valor de 0 que representa un valor nulo en QGIS. Partiendo del *raster* de proximidad, se extrajeron los contornos de proximidad a intervalos de 100 m para toda la zona empleando la función **Contour**; seleccionando finalmente las curvas de 100 m, 300 m y 500 m, con base a la máxima influencia que un cuerpo de agua superficial puede tener en el suelo circundante según el nivel freático, siendo la cota de 500 m un perímetro seguro (ver Fig 69).

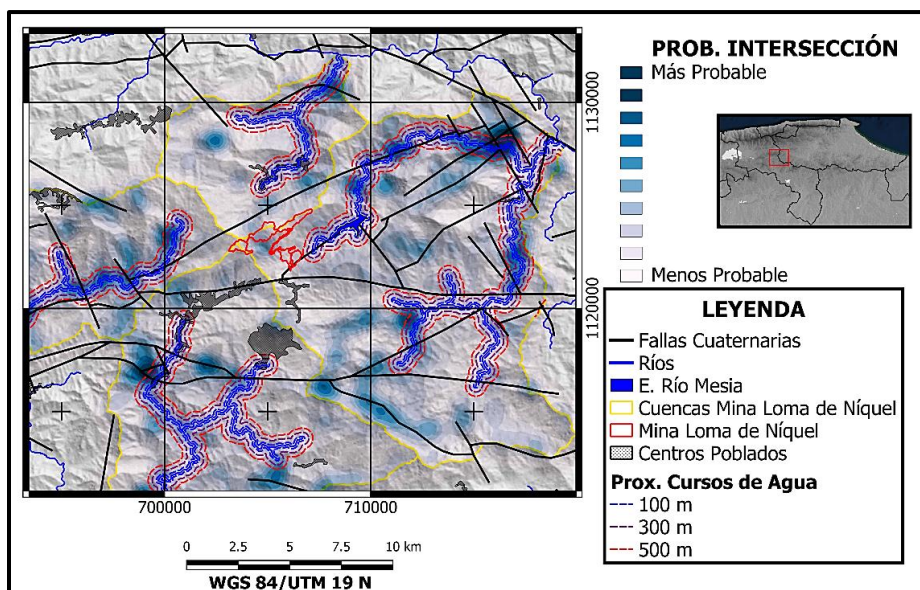


Fig 69. Mapa de probabilidad de intersección.

7.4 Generación de mapas

Los mapas que se describen a continuación, generados en QGIS, se encuentran en el apartado de Resultados más adelante.

7.4.1 Mapa hidrogeológico

Partiendo del Mapa Geológico de Venezuela presentado por FUNVISIS, La Universidad Central de Venezuela y el USGS en 2006, así como el Mapa de Fallas Cuaternarias de Venezuela, se generó un mapa geológico de la zona de estudio que contiene información con respecto a: Las unidades geológicas que forman la Faja de Loma de Hierro, las fallas cuaternarias presentes, incluyendo el sistema de fallas de La Victoria, los cuerpos de agua superficiales, las subcuencas hidrográficas asociadas a la mina, un *raster* de elevación (DEM) y el terreno que abarca la operación minera de Loma de Níquel.

7.4.2 Mapa hidrográfico

Se generaron dos mapas hidrográficos de la zona de estudio, uno a escala regional donde se muestra la Cuenca Hidrográfica del Río Tuy, así como la Cuenca Hidrográfica del Río Guárico hasta su desembocadura en el embalse de Camatagua, llamada Cuenca Alta del Río Guárico y uno a escala local donde se muestran las cuatro subcuencas hidrográficas asociadas a la Mina Loma de Níquel.



Ambos mapas muestran los cursos del Río Tuy y el Río Guárico, así como sus afluentes correspondientes y cuentan además con un modelo de elevación digital.

7.4.3 Mapa de lineamientos e intersecciones

Se generaron además una serie de mapas donde se muestran tanto los lineamientos extraídos utilizando la metodología explicada en el apartado 7.3.2, así como mapas donde se muestran las intersecciones sin filtrar, filtradas por curvatura y filtradas por curvatura y pendiente. Estos datos fueron integrados en mapas donde se muestra la proximidad a cuerpos de agua, la geología de la zona de estudio, la probabilidad de intersección y la clasificación de terrenos para un total de 11 mapas distintos.

7.4.4 Mapa de clasificación de terrenos

Finalmente, se generaron 6 mapas partiendo de la clasificación de terrenos para la imagen Landsat 8 y Sentinel 2. En estos mapas se muestra la clasificación de terrenos dentro de la región definida por las subcuencas hidrográficas asociadas a la mina, mostrando además las áreas asociadas a centros poblados, los cursos y cuerpos de agua superficiales y el área de la mina. Como se mencionó previamente, la clasificación a partir de la imagen Sentinel corresponde al periodo de lluvias en Venezuela y la clasificación a partir de la imagen Landsat 8 al periodo de sequía

7.5 Planteamiento de perfiles de Tomografía de Resistividad Eléctrica

7.5.1 Análisis de la zona de estudio

Debido a la baja resolución espacial de las imágenes multiespectrales, no fue posible utilizar estas para el diseño y planteamiento en superficie de los perfiles. Con este propósito, se empleó la herramienta Google Earth que, en colaboración con la empresa *Maxar Technologies* ofrecen imágenes a color y un modelo de elevación digital con una resolución espacial de 5 metros (ver Fig 70).

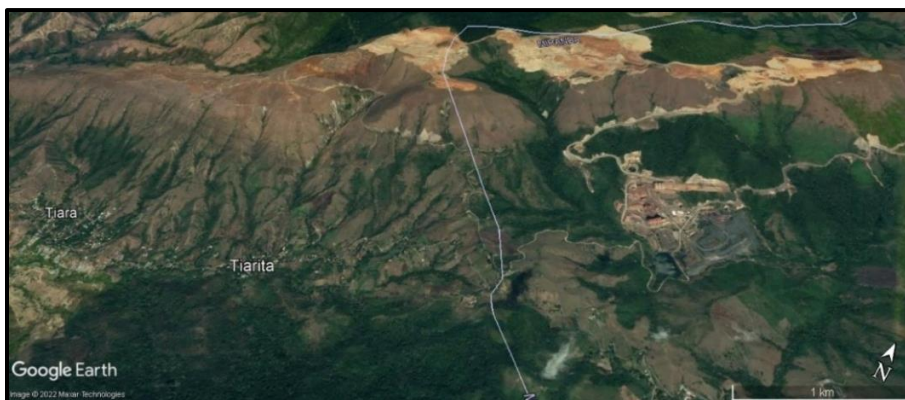


Fig 70. Imagen Google Earth de la mina Loma de Níquel y Tiara.

Utilizando Google Earth, se plantearon una serie de perfiles preliminares teniendo en cuenta que no hubiese una variación brusca de la pendiente a lo largo del perfil, ya que esto afecta negativamente el procesamiento de las medidas tomadas. Para ello, se empleó la herramienta de *elevation profile* de Google Earth, la cual despliega un perfil de elevación para el perfil seleccionado (máxima, mínima y promedio), así como su largo, la pendiente máxima, la pendiente promedio y la pendiente en cada punto del perfil que se seleccione (ver Fig 71).

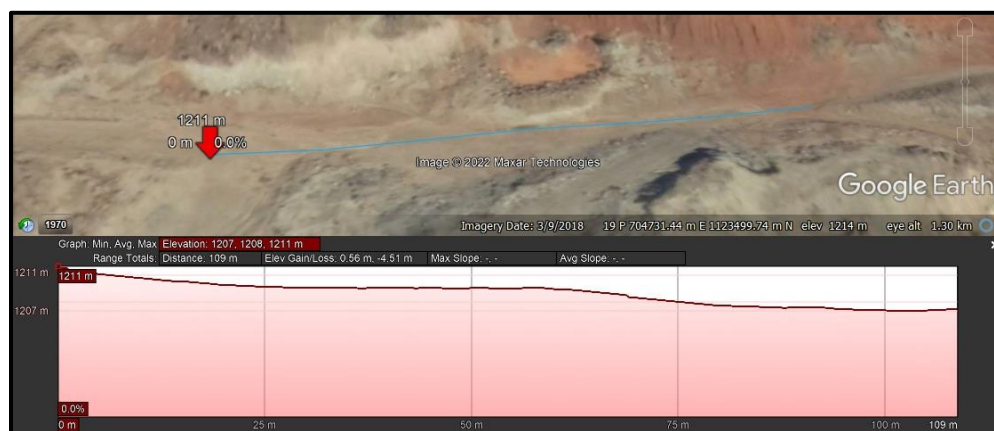


Fig 71. Perfil de elevación del planteamiento del perfil TRE N° 7.

En total se plantearon 16 perfiles distintos en toda el área de explotación de la mina, con una separación interelectródica de 5 m (ver Fig 77).

7.5.2 Selección de la modalidad TRE

Como se mencionó en el apartado 5.2.1 del Marco Teórico, las tomografías de resistividad eléctricas pueden emplear tres modalidades distintas para la toma de datos: el método



Schlumberger, el método Werner y el método Dipolo-Dipolo. El método Schlumberger y Werner permiten una mejor resolución horizontal y son preferibles en zonas donde existan fuentes de ruido eléctrico considerables. Por otro lado, el método Dipolo-Dipolo es preferible cuando se buscan objetivos profundos ya que permite una mejor resolución vertical. Considerando que los acuíferos de la mina son de tipo fracturado, ubicándose en el cuerpo ofiolítico rocoso, se seleccionó este último método como el mejor para la prospección de acuíferos en la mina empleando TRE.

7.6 Análisis del conflicto Tiara-Loma de Níquel

Para esta etapa del proyecto se emplearon artículos de noticias y fuentes web respecto a acontecimientos en la Parroquia de Tiara asociado a las actividades mineras en Loma de Níquel, así como un análisis del marco legal que rige la actividad minera en Venezuela, como fundamentos para realizar un análisis del conflicto Tiara-Loma de Níquel bajo el marco del concepto de Licencia Social e Impacto Ambiental. Para ello, se identificaron los principales actores del conflicto, las características del proyecto, los entes públicos involucrados; así como los impactos ambientales, socioeconómicos y a la salud que han dado origen a dicho conflicto. Con base a este análisis, se diseñaron una serie de propuestas con el fin mejorar la relación entre ambas partes. Estas propuestas se encuentran en el apartado de Resultados a continuación.



RESULTADOS

8.1 Condiciones de la Mina Loma de Níquel

Desde hace casi una década la mina Loma de Níquel, tras pasar al control de la Corporación Venezolana de Minería (CVM), se encuentra en estado inoperativo. Sin embargo, en el año 2017 el estado venezolano mostró interés por reactivar la extracción de ferroníquel en el yacimiento, con el apoyo de trasnacionales Suizas, Holandesas, Rusas y Chinas.

8.2 Trasfondo Legal

En el marco legal venezolano, el artículo 129 de la CRBV, los artículos 14 y 15 de la Ley de Minas, los artículos 8, 9, 10, 11 y 46 de la Ley de Diversidad Biológica, los artículos 2, 13 y 14 del reglamento de la Ley de Aguas y los artículos 56, 57 y en especial el artículo 47 de la Ley Orgánica del Ambiente, citado a continuación:

“La Autoridad Nacional Ambiental, ante la presunción o inminencia de impactos negativos al ambiente, deberá prohibir o, según el caso, restringir total o parcialmente actividades en ejecución que involucren los ecosistemas, recursos naturales o la diversidad biológica, sin que ello genere derechos de indemnización.”

establecen el conjunto de responsabilidades y competencias del estado, la comunidad y cualquier ente público o privado que desarrolle la actividad minera (o cualquier otra actividad) en el territorio nacional, con miras a la conservación del medio ambiente y la disminución y control del impacto ambiental y sociocultural.

Además, el Artículo 37 de las Normas para Regular la Afectación de los Recursos Naturales Renovables Asociadas a la Exploración y Extracción de Minerales, es diáfano al establecer que:

“Sólo se autorizará la intervención de estratos de rocas o sedimentos cuando dicha intervención no afecte el régimen de algún acuífero.”

8.3 Análisis previo al planteamiento de campo

Conociendo la importancia de determinar los posibles impactos ambientales que conllevarían la reactivación de la actividad minera, surge la necesidad de realizar una serie de estudios con este propósito. Entre estos estudios, quizá el más importante es determinar la existencia y ubicación de acuíferos en la zona de explotación de la mina Loma de Níquel, ya que la contaminación de estos, a causa de su carácter fracturado e interconectado, puede conducir a impactos negativos en la calidad

del agua en áreas extensas. Para este estudio destaca el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) por su precisión.

8.3.1 Distribución de terrenos en la mina

Uno de los principales indicios de la presencia de agua subterránea es la vegetación y su distribución en la superficie, además de ser un indicativo del carácter del impacto ambiental de una actividad en una región. Con este propósito se presentan a continuación dos imágenes satelitales clasificadas según el tipo de terreno superficial (ver Fig 72).

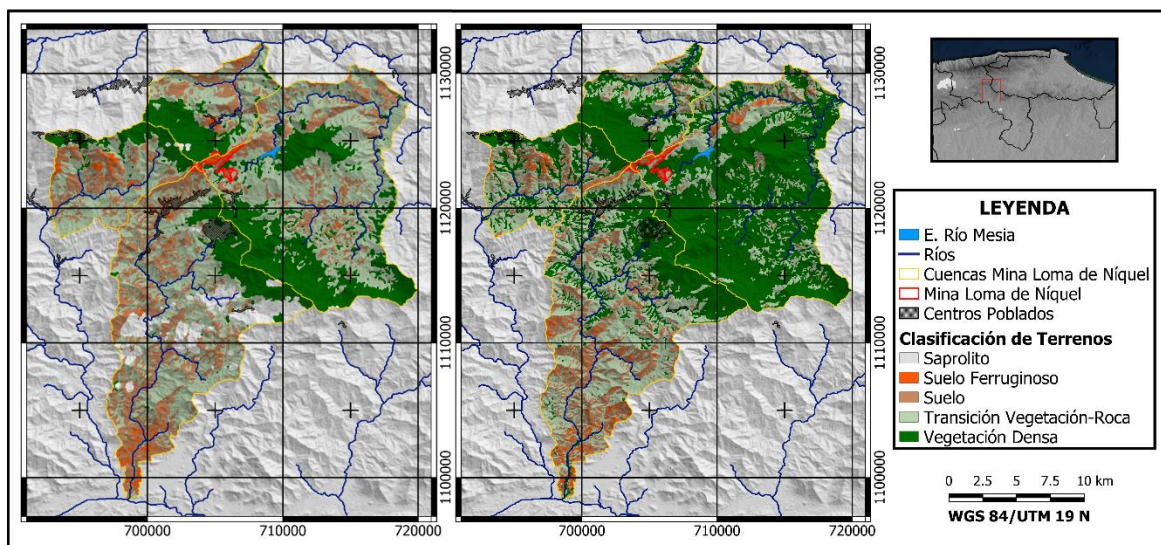


Fig 72. Clasificación de las imágenes satelitales Landsat 8 (izquierda) y Sentinel 2B (derecha).

A la izquierda se presenta una imagen Landsat 8 tomada en el periodo de sequía en Venezuela del año 2020 y la imagen de la derecha es una imagen Sentinel 2B tomada en el periodo de lluvias de ese mismo año. Como se puede observar, entre ambas épocas del año existe un cambio drástico en la extensión de la vegetación densa, donde el carácter persistente de ésta (observada en la imagen Landsat) se encuentra en una franja de dirección NO-SE que pasa por la mina Loma de Níquel, extendiéndose en la época húmeda hacia el SO y principalmente el NE de esta franja.

Dicha franja de vegetación se ubica entre la división de las cuencas hidrográficas del Río Tuy y Río Guárico y es atravesada en dirección SO-NE por el Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro (donde se emplaza la mina), pudiendo además observar cómo, en general, no existe vegetación densa sobre la región asociada a esta formación.

Sin embargo, al hacer un aumento en la región de la mina en la imagen Landsat 8 y Sentinel 2B (ver Fig 73), se observa la existencia de vegetación densa inmediata al área de explotación, lo cual es indicio de la presencia de acuíferos en la zona.

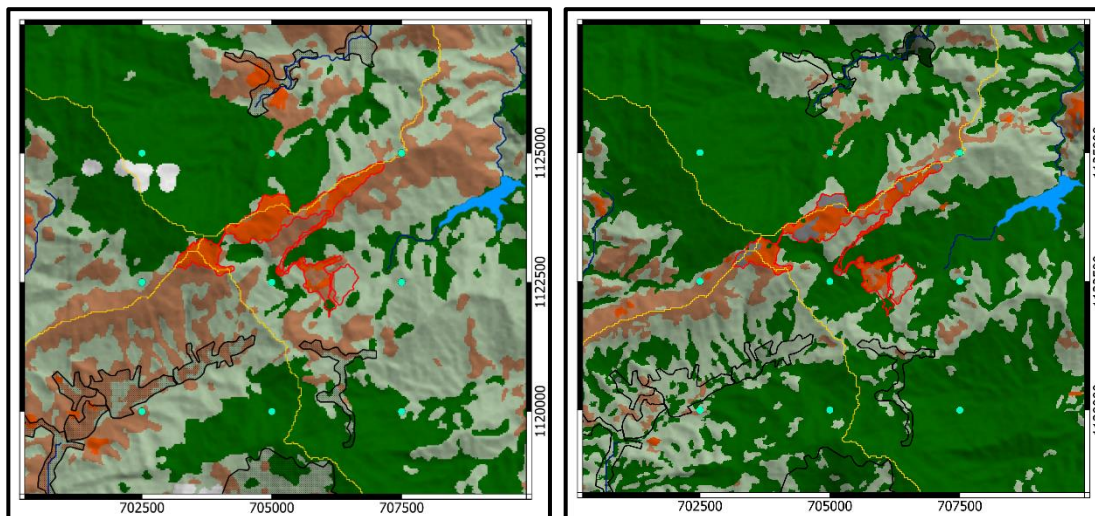


Fig 73. Imágenes clasificadas Landsat 8 (izquierda) y Sentinel 2B (derecha) en la zona de la mina Loma de Níquel.

Además, en la imagen Sentinel 2B es posible diferenciar los terrenos ferruginosos (en color naranja) y saprolíticos (en color gris) de la mina. Esto se puede apreciar de una manera más detallada en la imagen a continuación, donde, se empleó una combinación de bandas RGB 3-4-2, que resalta el terreno ferruginoso (limonita-hematita) en un color verde manzana y el terreno saprolítico (niquelífero) en un color blanco (ver Fig 74).

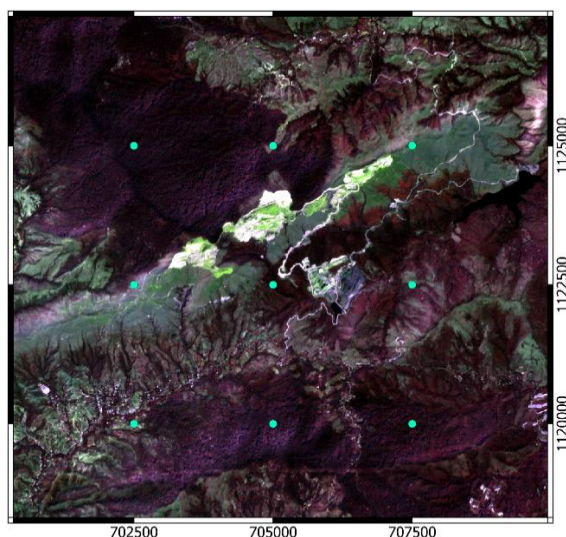


Fig 74. Combinación de bandas limonita-hematita para la imagen Sentinel 2B. Nota: Proyección UTM zona 19N.

8.3.2 Análisis geomorfológico y topográfico

Conociendo la distribución superficial de los terrenos de la mina y su variación en el tiempo, es necesario, previo al planteamiento de un método de prospección para los acuíferos, analizar la topografía y geomorfología del terreno. Esto se hizo mediante un análisis de lineamientos, para lo cual se empleó las características topográficas, geológicas (fallas cuaternarias) y geomorfológicas del terreno mencionadas en el apartado 7.3.2 de la metodología, con el fin de generar un mapa de densidad de intersecciones como el que se observa a continuación (ver Fig 75).

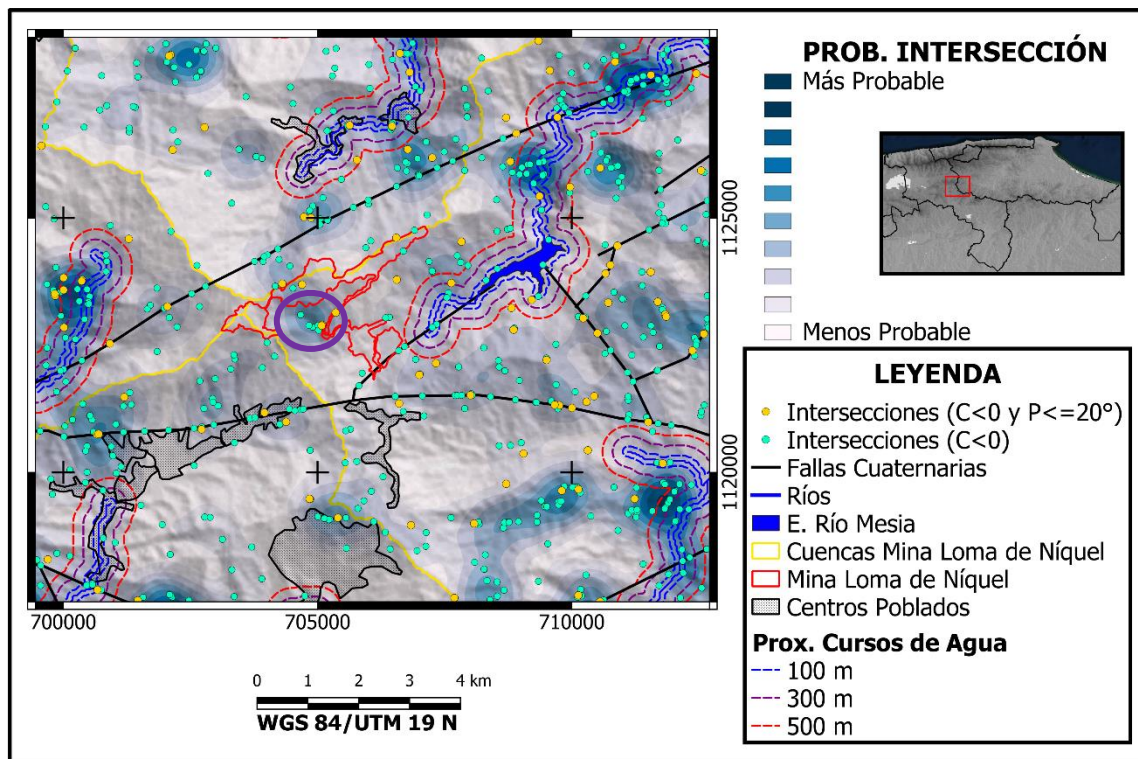


Fig 75. Mapa de densidad de intersecciones en la región de la mina Loma de Níquel.

En este mapa es posible observar una zona de alta probabilidad de intersección (en morado) en la ladera inmediatamente al sur del área de explotación de la mina (en rojo), que coincide con una zona de vegetación persistente y que no está asociada a una falla cuaternaria activa (ver Fig 76), siendo este un indicio claro de la presencia de agua subterránea (morado).

Además, analizando los puntos asociados a intersecciones, filtrados por curvatura (concavidad $C < 0$) y pendiente ($< 20^\circ$), vemos que dos de estos puntos se ubican dentro de la zona en explotación de la mina. Los lineamientos pueden estar relacionados a fracturas y las intersecciones entre éstos

marcan puntos en la superficie relacionados a zonas donde existe una mayor probabilidad de infiltración de aguas superficiales.

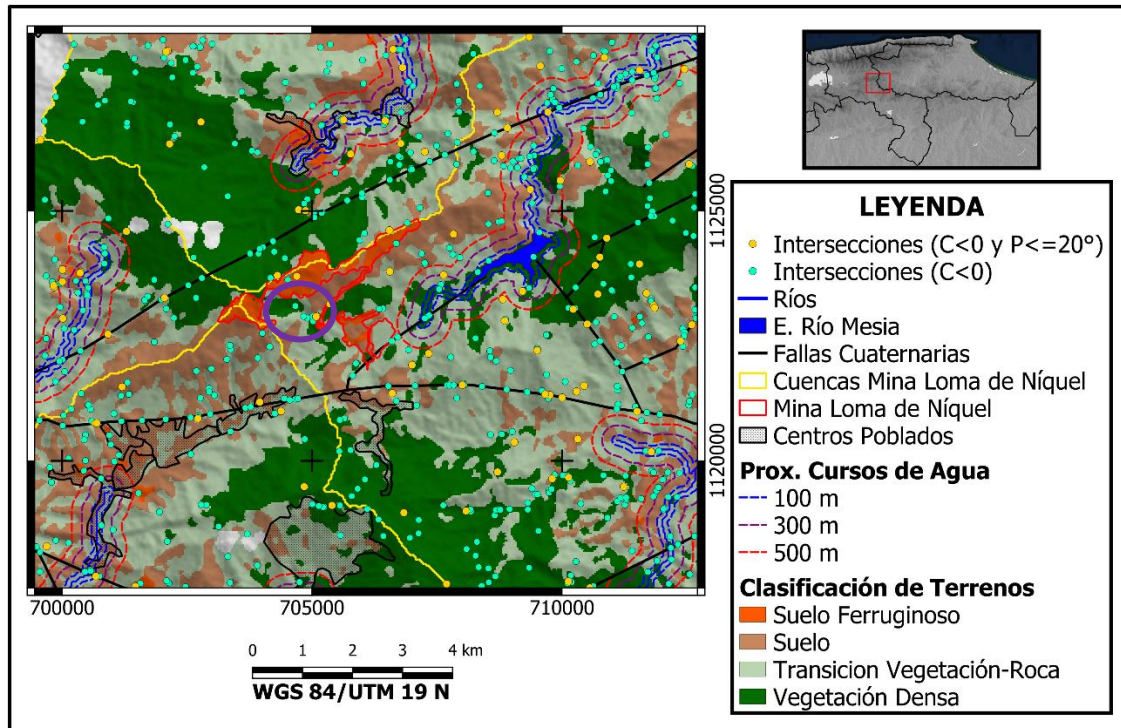


Fig 76. Mapa de intersecciones con clasificación de terrenos para la temporada de sequía.

8.4 Planteamiento de perfiles de Tomografía de Resistividad Eléctrica

Con base al análisis de los terrenos de la mina, su topografía y geología, se plantearon una serie de perfiles en diferentes regiones de la mina teniendo en cuenta dos factores primordiales:

- 1) La proximidad del perfil al cuerpo rocoso ofiolítico fracturado, basado en el perfil de meteorización de la mina (hematita-saprolito-roca ofiolítica).
- 2) Los cambios de pendiente dentro de cada perfil TRE.

El primero de estos factores responde a que, mientras más cercano en profundidad se encuentre el perfil con respecto al basamento rocoso ofiolítico de la mina, más cerca se encontrará de las fracturas de éste y por ende se tendrá una mejor resolución en profundidad de éstas. Por otro lado, el segundo factor atañe al procesamiento de los datos una vez que se tomen las medidas en un determinado perfil. Como se mencionó en el apartado de Metodología, si los electrodos de medición dentro del perfil tienen marcadas variaciones en sus elevaciones (que se traducen en cambios de

pendientes bruscos dentro del perfil), esto trae consecuencias negativas al momento de procesar los datos tomados.

Los 16 perfiles mostrados en el mapa a continuación (ver Fig 77), responde a las mejores ubicaciones en la mina para la toma de perfiles de tomografía de resistividad eléctrica que se ajustan a los dos factores mencionados al inicio de este apartado.

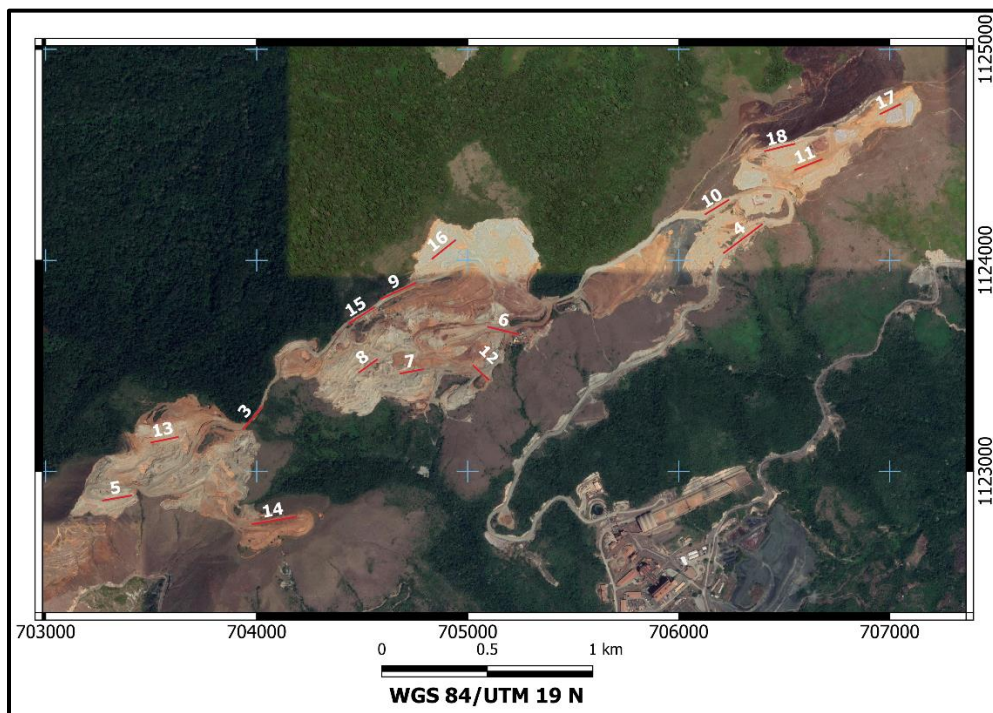


Fig 77. Perfiles planteados para la toma de datos TRE.

En la Tabla 10 a continuación, se muestran los cálculos de profundidad estimada de cada uno de los perfiles, basados en la metodología dipolo-dipolo para la toma de datos.

Tabla 10. Cálculo de parámetros para los perfiles TRE con la modalidad dipolo-dipolo.

Perfil	Núm. Electrodos	Separación (m)	Long. Perfil (m)	Total Medidas	Prof. Máx. (m)	Prof. Efectiva (m)
3	28	5	140	145	27,5	25,0
4	46		230	376	42,5	40,0
5	27		135	135	25,0	25,0
6	30		150	165	27,5	27,5
7	22		110	92	22,5	20,0
8	21		105	84	20,0	20,0
9	36		180	234	32,5	32,5
10	26		130	126	25,0	22,5
11	28		140	145	27,5	25,0

12	20		100	77	20,0	17,5
13	26		130	126	25,0	22,5
14	42		210	315	37,5	37,5
15	28		140	145	27,5	25,0
16	28		140	145	27,5	25,0
17	22		110	92	22,5	20,0
18	29		145	155	27,5	25,0
TOTAL	459		2295	2557		
PROMEDIO	29		143	160	27,3	26

Como se puede apreciar en la tabla anterior, basado en la modalidad dipolo-dipolo utilizada para el diseño de los perfiles, la profundidad promedio que alcanza cada perfil es de 27,3 m, donde el perfil que alcanza menor la profundidad es el 12, con 20 m, y el que alcanza la mayor profundidad es el 4, con 42,5 m, asociado a que la profundidad de medición es directamente proporcional a la longitud del perfil. Se considera que una profundidad de entre 20 y 30 metros es suficiente para alcanzar el basamento ofiolítico considerando la ubicación de los perfiles en la laterita niquelífera (saprolito), estrato inmediatamente superior al basamento rocoso en el perfil de meteorización de la mina.

Respecto a la toma de datos y la profundidad, para el arreglo dipolo-dipolo se estima que la pseudo-profundidad de la media tomada es la mitad de la distancia entre los pares electrodos de corriente y voltaje (ka), proyectada en profundidad desde el eje de simetría vertical entre ambos pares de electrodos. Solo cuando la distancia entre los pares de electrodos es igual a la separación entre cada uno de los electrodos del perfil ($ka=a$), se considera la profundidad de la medida igual a la distancia entre los pares de electrodos. Con el fin de entender lo anteriormente expuesto de una mejor manera, se presenta la Fig 78 a continuación:

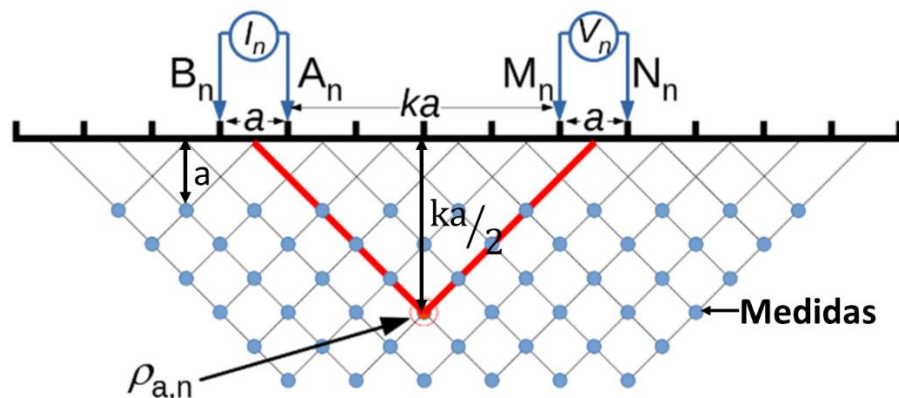


Fig 78. Modelo de la toma de datos para una TRE utilizando la modalidad dipolo-dipolo. Modificado de Cozzolino et al. (2022).



Así como de la longitud del perfil, la profundidad de medición del perfil depende también de la distancia entre los electrodos. Sin embargo, se presentan dos limitantes más para este parámetro. El primero corresponde a la cantidad de electrodos que puede manejar un equipo. Para este proyecto se usó como referencia el equipo SARIS (*Scintrex Automated Resistivity Imaging Survey*) de la compañía Scintrex, el cual tiene capacidad de emplear cables multielectródicos inteligentes, así como usar el método de *daisy-chain*, que permite conectar varios cables a un mismo dispositivo de manera lineal. Por lo tanto, la cantidad de electrodos no es una limitante primordial en este proyecto.

Por otro lado, la distancia inter-electródica también influye en la cobertura de puntos de medición en profundidad que se utilizan para interpolar el perfil de resistividades aparentes y obtener el perfil de resistividad real. Es por ello que, mientras mayor es el número de electrodos, mejor es la cobertura del perfil TRE en profundidad; pero esto también aumenta la cantidad de medidas por perfil y hace engorroso el procesamiento de los datos de resistividad aparente.

Teniendo en consideración lo antes expuesto, se seleccionó una distancia inter electródica de cinco metros para todos los perfiles. Esto permite una cantidad moderada de medidas por perfil, con un promedio de 160 medidas por perfil y un total de 2557 medidas entre todos los perfiles. Además, es posible omitir las medidas a mayor profundidad asociadas a la región de baja densidad de medidas de resistividad aparente (ver Fig 79), ya que la interpolación a partir de pocos datos no es confiable para una interpretación hidrogeológica; reduciendo así la cantidad de medidas a tomar.

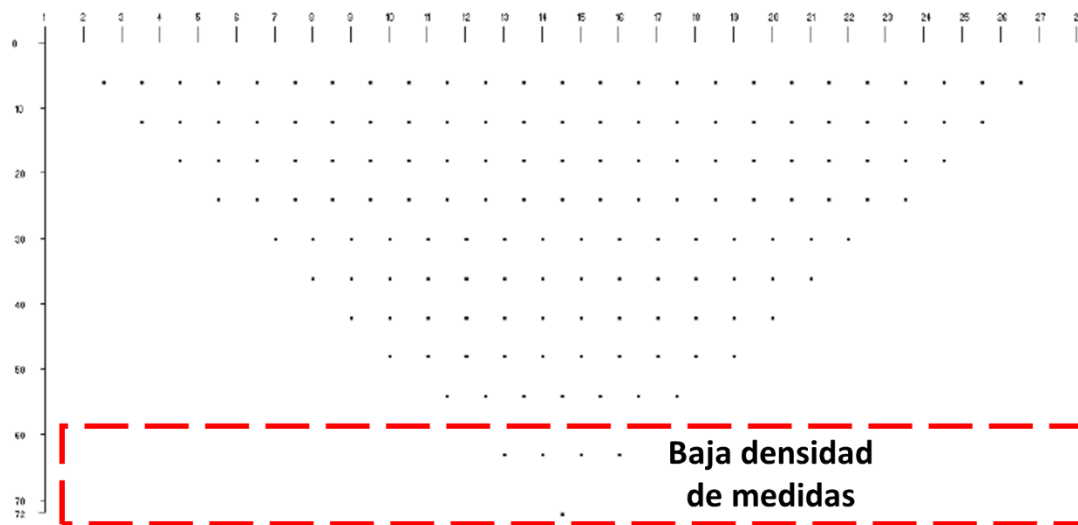


Fig 79. Medidas de resistividad aparente en un perfil TRE. Modificado de Hemeda (2013).



Lo anteriormente expuesto conduce finalmente al tema de costos. Debido a las circunstancias económicas actuales en Venezuela, no es posible dilucidar un costo estimado para el proyecto, ya que la industria de la geofísica de prospección está bastante deprimida. Sin embargo; se puede hablar de métodos para reducir los posibles costos de la campaña de campo para la toma de datos TRE. El mejor método y el de menor costo, es la realización de calicatas eléctricas. Éstas emplean la modalidad Wernner para la toma de datos de resistividad aparente a un mismo nivel de profundidad.

Previo a la toma de datos en un perfil TRE, se realizaría una calicata eléctrica con el fin de observar los datos de resistividad aparente a una determinada profundidad del perfil. Para ello, se debe definir un horizonte de profundidad de interés dentro del cual se plantean patrones de resistividad aparente esperados que pudieran estar asociados a la existencia de un acuífero. De no observarse el comportamiento esperado, se puede descartar la toma de datos para el perfil TRE basados en los datos de resistividad aparente obtenidos mediante la calicata eléctrica.

La ventaja del método de calicata eléctrica aplicado previo a la toma del perfil TRE, es que no requiere de un procesamiento de datos, ya que se trata de la búsqueda de un patrón de baja resistividad aparente, por lo cual basta con los resultados de resistividad aparente, los cuales se obtienen rápidamente. Aun así, si se desea una mayor precisión, se pueden procesar estos datos de resistividad aparente para obtener los datos de resistividad real de manera rápida, siendo posible obtener dichos resultados finales inclusive el mismo día de la toma de los datos en campo.

Otro aspecto importante para destacar es que los perfiles planteados no son los “finales”, entendiéndose esto como aquellos perfiles que se realizarían en la campaña de campo previo a la reapertura de la mina, ya que esto también depende principalmente de los objetivos de reapertura, el presupuesto designado al proyecto, las áreas que se dispongan para la explotación de mineral de ferroníquel, entre otros factores.

Aunado a lo anterior, se tienen entonces tres parámetros que contribuyen a la reducción de costos asociados a la toma de perfiles TRE:

- 1) Los objetivos de reapertura para la explotación del mineral.
- 2) Las áreas que se dispongan para la extracción.
- 3) El descarte de perfiles TRE mediante los resultados previos de calicata eléctrica.

8.5 Métodos de prospección complementarios

Tras la obtención y el procesamiento de los datos de resistividad aparente para obtener los perfiles de resistividad real, es posible identificar la presencia de acuíferos fracturados con bastante

seguridad. Sin embargo; dependiendo de la ubicación del perfil con respecto a las fracturas del basamento rocoso ofiolítico, no será posible identificar la dirección del buzamiento de la fractura (si el perfil es paralelo o sub-paralelo al rumbo) o su rumbo (si el perfil es perpendicular o sub-perpendicular al rumbo).

Con este propósito, para aquellos perfiles donde se identifiquen acuíferos fracturados o fracturas de interés, se puede realizar un Estudio de Resistividad Azimutal (ARS), utilizando un sondeo eléctrico vertical (SEV) con modalidad cuadrada. Este tipo de SEV es especialmente utilizado para identificar la anisotropía en las propiedades resistivas de cuerpos rocosos, donde los resultados se expresan de manera azimutal (ver Fig 80). Gracias a esto posible conocer el rumbo de una o un grupo de fracturas.

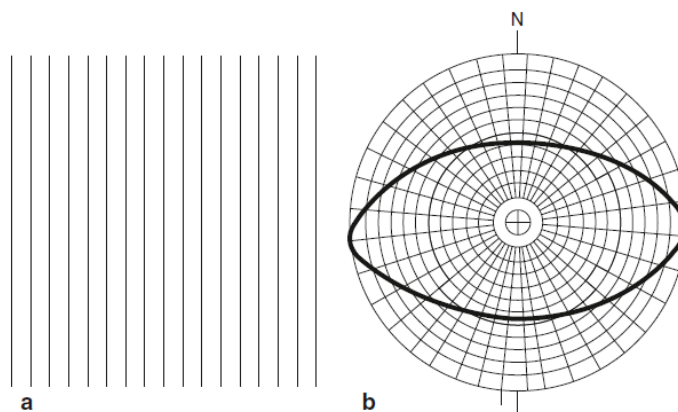


Fig 80. Set de fracturas paralelas (a) y el diagrama de resistividad azimutal resultante (b). Tomado de Singhal et al. (2010).

Además del estudio de resistividad y anisotropía dentro de la mina y asociado a la necesidad de conservar los recursos hídricos de la región que surten a varias comunidades aledañas, son necesarios estudios posteriores a mayor escala superficial. Entre estos estudios a gran escala, los que ofrecen los mejores resultados en función a su costo son los métodos aerotransportados, siendo el de mayor uso el Método Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TDEM).

El método TDEM ofrece una excelente profundidad de investigación y es capaz de penetrar las capas iniciales del subsuelo poco conductivas que dominan la región fuera del suelo expuesto de la mina. A partir de los resultados obtenidos tras la aplicación de este método de prospección es posible obtener información respecto al nivel freático de la zona, la presencia de acuíferos importantes y, de realizarse varios estudios similares en el tiempo, se puede recabar información respecto a la variación del nivel freático, así como del régimen anual del agua subterránea, con base



a la variación de la distribución de zonas de baja resistividad que estarían asociadas al agua subterránea.

8.6 Análisis del conflicto Tiara-Loma de Níquel

Además de la necesidad de identificar los acuíferos presentes en el área de explotación mineral de la Mina Loma de Níquel, existe otro factor importante previo a la reanudación de operaciones, centrado en el impacto ambiental y social sufrido por la comunidad de Tiara ubicada al oeste de la mina. Este conflicto se analiza con más detalle a continuación.

Ya en la década de los sesenta, se otorgaron las concesiones para la exploración y explotación del yacimiento de Ni contiguo a la selva nublada de “Loma de Hierro”, ubicada en la Serranía del Interior y próxima a la parroquia de Tiara, cuya población consta de 3.173 habitantes según el censo realizado en el año 2015. No fue sino hasta la década de los noventa que, con los cambios en las normativas ambientales y mineras, así como en las políticas impositivas, se realizaron los estudios de prefactibilidad económica, otorgando la concesión de explotación a la empresa COFEMINAS, para que luego Minera Loma de Níquel C.A. (MLDN), filial de Anglo-American, comenzara la explotación en el 2001. La duración del proyecto se estimaba en 30 años, con una producción aproximada de 40 millones de Tm de ferroníquel para la exportación (Mellado & Rodríguez, 2021).

8.6.1 Etapas históricas del conflicto

En el conflicto se diferencian 3 etapas:

Primera Etapa:

- ✓ Los argumentos de la empresa COFEMINAS sobre la base de los derechos de servidumbre mineros en contra de la Asociación Agropecuaria “San Andrés”, representantes de los agricultores desalojados de las tierras donde se construyó el complejo industrial de Loma de Níquel. Estos demandaban, primero con protestas, acciones de calle y denuncias en la prensa regional y luego jurídicamente ante los tribunales agrarios (Mellado & Rodríguez, 2021):
 - a) Derechos como pisatarios de las tierras.
 - b) Indemnización por bienhechurías (única lograda).
 - c) Reubicación de las familias y construcción de la Escuela Rural.
- ✓ Ante el avance del proyecto ya en la etapa del Estudio de Impacto Ambiental (EIA), las comunidades de Tiara que no fueron consultadas ni informadas de los impactos del proyecto percibieron esto de manera negativa, considerando que afectaría sus modos de vida y su



territorio. Para los tiareños en contra del proyecto minero, la selva nublada “Loma de Hierro”, representa simbólicamente una “caja de agua”, “nuestra propia existencia”, sin ella “no habrá más Tiara”; sabemos que “la minera estuvo taladrando la montaña y en cualquier momento se va a romper el equilibrio y se perderá el agua” (Mellado & Rodríguez, 2021).

Segunda Etapa:

- ✓ A partir de 1997 con la construcción del complejo industrial, incluyendo una carretera; la represa de agua; la aducción del gas y la subestación eléctrica, se intensificaron los impactos socioambientales y culturales. Cientos de tiareños lograron un empleo en las empresas contratadas por MLDN. Decenas de viviendas fueron acondicionadas para el alojamiento de los trabajadores foráneos. Así mismo, el comercio local se diversificó. Todo esto se tradujo en un cambio en el estilo de vida (Mellado & Rodríguez, 2021).
- ✓ En este contexto nace un movimiento anti-minero que se hizo eco a través de los medios impresos, denunciando a MLDN por contaminación de las aguas, el aire, los cultivos y enfermedades respiratorias y dérmicas, además del deterioro de la principal carretera hacia la comunidad. El movimiento fue criminalizado por el gobierno, por la empresa y por algunos tiareños que anhelaban un empleo en la minera. MLDN se defendió argumentando que “Tiara siempre ha tenido níquel en sus aguas”, “así lo demuestran los análisis de laboratorio y el EIA”, y “nosotros no contaminamos la atmosfera ya que cumplimos con las medidas y parámetros exigidos por las normativas ambientales”. Además “como prueba desarrollamos una granja donde se cultivan hortalizas y flores que no sufren ninguna alteración” (Mellado & Rodríguez, 2021).
- ✓ Otras demandas por parte de la vocería de los *consejos comunales* fueron: obras civiles, reparación de la vía de acceso y mantenimiento de las vías internas, mantenimiento de las escuelas y ambulatorios, abastos de alimentos y contratación de trabajadores. Para ello, las estrategias fueron oficios dirigidos a la minera, la denuncia en la prensa y cierres de la carretera principal. Por su parte, los sindicatos mineros lucharon sus reivindicaciones contractuales, paralizando las operaciones y cerrando las vías de acceso al complejo en varias oportunidades (Mellado & Rodríguez, 2021).
- ✓ Mientras tanto, el Estado demandaba a MLDN por no cumplir con los alcances mineros. Ello hizo que en el 2008 algunas concesiones le fueran rescindidas, hasta que en el 2012 el estado venezolano, con el apoyo del sindicato minero y los dirigentes de los consejos comunales



afectos al gobierno, tomó el control administrativo del proyecto a través de la Corporación Venezolana de Minería (CVM) (Mellado & Rodríguez, 2021).

Tercera Etapa:

- ✓ Bajo la gestión de la CVM, mientras Anglo-American reclama compensación en el CIADI ("tribunal" de arbitraje en el Banco Mundial), la incertidumbre se apoderó de los trabajadores mineros ya que no se estaba exportando lo producido entre el 2012 y 2013. Esto generó acciones colectivas por parte de los trabajadores: asambleas y cierres de la vía de acceso como presión para que el estado agilizará la venta y garantizara la estabilidad laboral (Mellado & Rodríguez, 2021).
- ✓ Aunque finalmente se pudo concretar la exportación del Ni y el Estado garantizó la continuidad laboral, las operaciones mineras aminoraron hasta quedar totalmente paralizadas, esto, debido a la falta de repuestos para los equipos y de algunos elementos químicos fundamentales para el proceso (Mellado & Rodríguez, 2021).
- ✓ Por otro lado, las comunidades quedaron desasistidas en cuanto a la prestación de los servicios de salud, en el mantenimiento de las infraestructuras escolares y en otras compensaciones que eran asumidas anteriormente por MLDN. De hecho, se activó el comité de salud local, apoyados por médicos y enfermeras, con protestas de cierre del ambulatorio y denuncias públicas en los medios, como estrategias para que el gobierno regional (CORPOSALUD) asumiera sus responsabilidades (Mellado & Rodríguez, 2021).
- ✓ En este contexto sociopolítico y económico, las comunidades se preguntan en cuanto a su futuro, ¿Qué pasará cuando el yacimiento de níquel se acabe y tengamos que lidiar con los pasivos socioambientales dejados por la explotación? Esto ha incidido en la vocería de los 11 Consejos Comunes de la parroquia, en los agricultores y ganaderos, así como en los Consejos Educativos que realizan asambleas, y talleres participativos con dos temas centrales en base a dos posibles escenarios (Mellado & Rodríguez, 2021):
 - 1) De reactivarse las operaciones mineras, buscar la forma de adquirir conocimiento con la ayuda de terceros y articularse colectivamente para plantearse una equilibrada relación con la CVM o con cualquier otra empresa minera, para ser escuchados en lo referente a la violación de sus derechos y sus planes de desarrollo local.



- 2) La creación de plataformas de lucha a diferentes escalas para que la explotación minera cierre definitivamente y el estado contribuya a tomar las medidas a fin de minimizar los pasivos socioambientales.

8.6.2 Detalles del conflicto

En la Tabla 11 a continuación, se exponen los detalles del conflicto (Mellado & Rodríguez, 2021):

Tabla 11. Detalles del conflicto Tiara-Loma de Níquel.

Conflicto entre la parroquia de Tiara y la MLDN		
Ubicación	País	Venezuela
	Estados	Aragua y Miranda
	Municipio	Santos Michelena, Aragua
	Parroquia	Tiara
Comodity	Níquel (Ni) – Aleación de ferroníquel para la exportación	
Área del proyecto (Ha)	1.400	
Inversión (USD)	600.000.000	
Tipo de población	Rural	
Habitantes	3.173 (Censo 2015)	
Compañías extranjeras y empresas estatales involucradas	Minera Loma de Níquel C.A. (MLDN) - Venezuela	
	Corporación Venezolana de Minería S.A. (CVM) - Venezuela	
	Anglo American – Reino Unido	
Actores gubernamentales	Ministerio del Poder Popular para Petróleo y Minería	
	Ministerio para la Minería Ecológica	
	Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas	
	Ministerio del Poder Popular para la Salud	
	Asamblea Nacional Legislativa	
	Asamblea Regional Legislativa	
	Defensoría del Pueblo	
	Consejos Comunales de Tiara	
	Comuna de Tiara	
	Alcaldía de Santos Michelena	
	Gobernación de Aragua	
	Gobernación de Miranda	
	Alcaldía de Guaicaipuro	
Instituciones financieras internacionales	Banco Mundial (CIADI) – Estados Unidos de América	
Organizaciones de Justicia Ambiental	Comités de salud (Tiara)	
	Consejos comunales	
Fuentes de conflicto	Primer Nivel	Extracción de minerales
	Segundo Nivel	Procesamiento mineral
		Derechos de acceso al agua
		Exploración minera
		Colas de origen minero



		Represas y distribución del agua
		Infraestructura y redes de transporte
Grupos que se movilizan	Agricultores	
	Gobierno local/Partidos políticos	
	Vecinos/ciudadanos/comunidades	
	Movimientos sociales	
	Sindicato de trabajadores del proyecto	
	Científicos locales/profesionales	
	Consejos comunales	
	Consejos educativos	
	Movimiento ambiental local	
	Comité de salud local	
Formas de movilización	Bloqueos	
	Investigaciones con participación de la comunidad	
	Creación de reportes alternativos (conocimiento)	
	Desarrollo de relaciones/ acción colectiva	
	Desarrollo de propuestas alternativas	
	Protestas de calle/marchas	
	Huelgas laborales	

8.6.3 Impactos negativos sufridos

A continuación, se listan los tipos de impactos generados producto de la actividad minera:

❖ Impactos Ambientales

Visibles:

- ✓ Contaminación del aire.
- ✓ Pérdida de biodiversidad (vida salvaje, diversidad de plantas).
- ✓ Inundaciones.
- ✓ Contaminación Sónica.
- ✓ Contaminación del suelo.
- ✓ Erosión.
- ✓ Exceso de desechos.
- ✓ Deforestación y pérdida de la cubierta vegetal.
- ✓ Contaminación del agua superficial/Disminución de la calidad del agua.
- ✓ Contaminación y agotamiento de fuentes de agua subterráneas.
- ✓ Perturbación de sistemas hidrológicos y geológicos.
- ✓ Reducción de la conectividad hidrológica y ecológica.



- ✓ Derrames de colas de mina.

Potenciales:

- ✓ Incendios.

❖ **Impactos a la Salud:**

Visibles:

- ✓ Exposición a riesgos inciertos.
- ✓ Problemas de salud relacionados al alcoholismo, prostitución.
- ✓ Enfermedades y accidentes producto de la actividad laboral.
- ✓ Muertes.

Potenciales:

- ✓ Enfermedades infecciosas.

❖ **Impactos Socioeconómicos:**

Visibles:

- ✓ Incremento en la corrupción de diferentes actores.
- ✓ Incremento en el crimen y la violencia.
- ✓ Desalojos.
- ✓ Problemas sociales (alcoholismo, prostitución, etc.).
- ✓ Violación de derechos humanos.
- ✓ Pérdida de tierras.
- ✓ Impacto directo en el estilo o modo de vida campesina.
- ✓ Desaparición del empleo indirecto una vez que la empresa privada cesó sus funciones.
- ✓ Cierre de comercios.
- ✓ Cese de la prestación de las medidas compensatorias por parte de la CVM.

8.6.4 Referencias legales

En lo referente al marco legal, además de los artículos y normativas mencionados en el apartado 8.2 que hacen referencia a las competencias de los entes públicos y privados en lo referente al desarrollo sustentable y el impacto ambiental y sociocultural, los artículos 3, 4, 6, 21 y 113 de la Ley de Aguas, así como los artículos 3, 10 y 15 de las Normas para Regular la Afectación de los Recursos Naturales Renovables Asociadas a la Exploración y Extracción de Minerales, establecen los



organismo estatales y sus competencias en lo referente a la conservación de recursos hídricos, así como las responsabilidades de los entes privados que posean una concesión para la explotación de recursos que puedan afectar de manera negativa este recurso.

Además, es importante destacar los artículos 36 y 37 de Ley Orgánica del Ambiente, que hacen referencia a la responsabilidad de los entes públicos y privados que lleven a cabo proyectos que utilicen recursos naturales a:

“[...] generar procesos permanentes de educación ambiental [...]”, siendo que “Todas las personas tienen el derecho y el deber de participar en los asuntos relativos a la gestión del ambiente.”

8.6.5 Análisis de los impactos y su gestión por MLDN

Como se expuso en el apartado 8.6.1, el proyecto minero de Loma de Níquel estuvo plagado de conflictos y causas de conflicto desatendidas desde sus inicios en 1997 con la construcción de la infraestructura para el procesamiento del mineral. La factibilidad de un proyecto no solo depende del carácter técnico, sino del aspecto social, representado en el concepto de la Licencia Social para Operar, la cual es otorgada por la comunidad con base a la credibilidad, confianza y legitimidad que demuestre la empresa encargada del proyecto minero para con las comunidades aledañas que se verán afectadas por éste.

Los impactos negativos sufridos en la comunidad de Tiara fueron resumidos en el punto 8.6.3 y clasificados en tres grupos distintos: Ambientales, a la Salud y Socioeconómicos. Sin embargo; varios de estos impactos tienen un aspecto de inevitabilidad asociados a la puesta en marcha de un proyecto minero, como al impacto en una comunidad aislada del influjo de un gran capital, así como del paso de una economía fundamentalmente agrícola a una economía de servicios.

❖ Análisis de impactos ambientales

En cuanto a los impactos de tipo ambiental, los de carácter inevitable fueron: La contaminación del aire, contaminación sónica, contaminación del suelo, erosión, pérdida de cubierta vegetal, contaminación del agua superficial, reducción de la conectividad ecológica y la perturbación de sistemas hidrológicos y geológicos. Por lo tanto, el plan gestión ambiental para estos impactos debe ser de tipo mitigativo, buscando reducir su escala más que eliminarlos completamente. Por otro lado, el exceso de desechos, inundaciones, derrames de colas de mina, contaminación y agotamiento de fuentes de agua subterráneas y la pérdida de biodiversidad, deben ser tratados con



una gestión ambiental de carácter preventivo o, en su defecto, correctivo, ya que responden a una mala gestión del proyecto o a accidentes inesperados.

¿Qué acciones tomó la Minera Loma de Níquel con respecto a los impactos ambientales del proyecto? En el Reporte Social de la MLDN del año 2012, respecto a los resultados del Plan del Compromiso con la Comunidad 2008-2011, se encuentra un resumen de las medidas tomadas para la preservación del medio ambiente. Es importante destacar que la empresa contaba con el certificado ISO 14001:2005 de Sistema de Gestión Ambiental (ya en des uso tras la actualización a la norma ISO 14001:2015).

El plan de gestión ambiental de Anglo American, bajo su estándar *Anglo American Environmental Way*, incorporaba el seguimiento de variables ambientales como la calidad del agua, con un control mensual respecto a su pH (Un), Sólidos Disueltos, Sólidos Suspendidos, Sólidos Totales, Hierro Total (Fe), Cromo (Cr), Plomo (Pb), Zinc (Zn), Níquel (Ni), Sulfatos (SO₄), DBO₅, DQO, Oxígeno Disuelto (O₂), TPH, Coliformes Totales (NMP/100 mL), Coliformes Fecales (NMP/100 mL) y Apariencia, para los ríos Mesia, Boca de Cagua y Tiara, así como de las aguas subterráneas de la población de Tiara; además de análisis de los efluentes de la planta de tratamiento de aguas residuales con base a su pH (Un), Sulfatos (SO₄), Cloruros (Cl), Detergentes, Nitrógeno Total, Sólido Suspendido Total (104 °C), Sólidos Sedimentables, Sólidos Flotantes, DBO, DQO, Coliformes Totales (NMP/100 mL) y Apariencia y, por último, el control del caudal ecológico de la presa principal (al menos 25 L/s).

Además, se realizaban controles de la calidad del aire anuales, tanto en áreas adyacentes a Loma de Níquel, como dentro del establecimiento, respecto a las partículas totales suspendidas.

Según los resultados reportados en el informe, no se encontró ningún indicativo de contaminación de aguas o del aire fuera de los parámetros establecidos por la normativa nacional para cada uno de los factores analizados.

❖ Análisis de impactos socioeconómicos y a la salud

Los impactos ambientales mencionados anteriormente podrían considerarse como los impactos directos producto de la actividad minera, mientras que los impactos indirectos pertenecerían a esta categoría. Los de carácter inevitable fueron un incremento de la corrupción, el impacto al estilo y modo de vida campesino, la aparición de problemas sociales, la desaparición del empleo directo una vez la empresa cese sus funciones y el cierre de comercios una vez cese el proyecto; mientras que los de carácter evitable fueron los desalojos, el incremento de la violencia, la violación de derechos humanos y la pérdida de tierras. Sin embargo, a diferencia de los impactos ambientales, ejercidos



sobre objetos inanimados, los impactos socioeconómicos son más complejos en su mitigación y prevención.

Como se mencionó en el apartado 8.6.1, ya desde la década de los noventa surgieron varios problemas relacionados a la indemnización a los agricultores por los terrenos donde se construyó la planta de procesamiento mineral, así como a otros problemas asociados a la construcción de la infraestructura necesaria para el funcionamiento de la mina. A medida que se desarrolló el proyecto, algunas de estas causas fueron atendidas, como la construcción de una nueva vía a Tiara hecha principalmente de cemento, material mucho más resistente al desgaste; así como la construcción de escuelas y ambulatorios en la comunidad de Tiara y demás infraestructura de servicio. Sin embargo, surgieron nuevos problemas como el deterioro social, el aumento del crimen, impactos al estilo de vida y a la salud, que se tradujeron en protestas de un movimiento anti-minero que cobró cada vez más fuerza y que culminó en el cese de las concesiones por parte del estado venezolano a Anglo American en el año 2012.

¿Qué acciones tomó MLDN a lo largo del periodo de operaciones 2008-2011 bajo Anglo American? Como en el apartado anterior, las medidas tomadas se encuentran en el Reporte Social de la MLDN del año 2012. Dentro del marco del Plan de Compromiso con la Comunidad 2008-2011, Anglo American contaba con:

- ✓ Un programa de formación juvenil para la capacitación en oficios y programas de aprendizaje en conjunción con el Instituto Nacional de Capacitación y Educación (INCE), así como la oferta de pasantías y tesis para estudiantes universitarios.
- ✓ Apoyo a la gestión educativa con el mantenimiento y operación de la Escuela Los Bagres, la capacitación, infraestructura, dotación de materiales y equipos a escuelas de la zona en el marco del proyecto “Escuelas en Acción” y la preservación del patrimonio cultural.
- ✓ Un programa de prevención integral enfocado en la prevención del consumo de drogas, la formación de valores para la vida y un enfoque en la promoción del deporte.
- ✓ Apoyo a la gestión de salud con el mantenimiento y la cobertura de gastos operativos del Ambulatorio Tiara y La Esperanza, la dotación de medicamentos, todo en coordinación con los organismos públicos competentes.
- ✓ El desarrollo de proveedores y emprendedores con la promoción de cooperativas y empresas de producción social, acompañamiento técnico, formación y financiamiento crediticio.



- ✓ El aprovechamiento de la Arena Industrial (escombreras) con la investigación y desarrollo en alianza con universidades y entes privados, así como el acompañamiento a cooperativas y la transferencia de tecnología.
- ✓ El mantenimiento de vías, que comprendía la vía principal hacia Tiara, incluyendo el tramo desde la planta de procesamiento hasta la comunidad de Tiara.
- ✓ Inversión en infraestructura eléctrica en conjunción la Compañía Anónima de Administración y Fomento Eléctrico (CADAFE).
- ✓ El programa “Granja Minera de Loma de Níquel” con la siembra y desarrollo de cultivos y la distribución de productos de la granja a organizaciones comunitarias.
- ✓ El programa “Sembrar el Mañana” enfocado en la creación de viveros escolares, charlas y labores de extensión dirigidas a niños, jóvenes y docentes de escuelas en alianza con el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (Misión Árbol) y jornadas de recolección de semillas.

Algunos de los beneficios reportados entre los años 2008-2011 son la participación de 1.417 personas en el plan de entrenamiento y formación juvenil, con más de 40.000 horas de formación, otorgando 59 becas para estudios superiores. Con respecto al programa prevención, en alianza con la fundación CENTEGRUPO y bajo el Comité para la Promoción de Siembra de Valores para la Vida, durante los años 2008-2011 participaron 2.338 personas, donde los beneficiarios indirectos se encontraban en el orden de 1.186 personas.

A nivel de inversión, el monto para la contratación de servicios a proveedores locales alcanzó un total de Bs.F, 145.011.348, que representó alrededor de US\$33.723.570,00; una suma sustancial. En total, entre los años 2008-2011, la inversión social alcanzó un monto tal de Bs.F 117.616.000,00, lo que equivalía a US\$ 27.352.558,14. En la Tabla 12 a continuación se observa un desglose de dichos gastos:

Tabla 12. Resumen de inversión social en el marco del plan de Compromiso con la Comunidad 2008-2011 (miles de Bs.F). Modificado de Reporte Social MLdN (2012).

	Área/Rubro	2008	2009	2010	2011	Monto Acumulado
APORTE PROGRAMAS DE RESPONSABILIDAD SOCIAL	Infraestructura y transporte	361	941	508	6.041	7.851
	Salud y educación	22	428	50	383	883
	Recreación, cultura y deporte	35	62	46	436	579
	Servicios varios	322	34	305	1.285	1.946
	SUB-TOTAL	740	1.465	909	8.145	11.259

**UBA**Universidad de Buenos Aires
Argentina *virtus robur et studium*Especialización en Geología Minera
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

APORTES RELACIONADOS CON VENTAJAS ESPECIALES	Mantenimiento vialidad	3.102	2.986	36	1.264	7.388
	Tickets alimentación	5.118	6.176	6.219	9.440	26.953
	Servicios varios	0	46	82	0	128
	Refacciones, mantenimiento	14	382	368	173	937
	Depreciación edificio PDVAL	0	0	20	44	64
	SUB-TOTAL	8.234	9.590	6.725	10.921	35.470
APORTES LEYES	ONA	0	967	376	3.845	5.208
	LOCTI	12.274	4.681	16.286	23.554	56.795
	Ley Deporte	0	0	0	8.884	8.884
	SUB-TOTAL	12.274	5.668	16.662	36.283	70.887
TOTAL		21.248	16.723	24.296	55.349	117.616

A nivel de empleo, MLDN contaba con un promedio anual de empleos de 800, donde el 88% de la fuerza laboral provenía de los estados Aragua y Miranda. Esto representó, en el período entre 2008-2011, Bs.F. 527.567.000,00 (US\$ 122.690.000,00) en sueldos y beneficios; mientras que los aportes al estado representaron Bs.F. 325.455.000,00 (US\$ 75.687.209,30) en ingresos fiscales y Bs.F. 1.426.519.000,00 (US\$ 331.748.604,65) en adquisición de bienes y servicios adicionales.

8.7 Propuestas en el marco de la Licencia Social y el Desarrollo Sustentable

El plan de Compromiso con la Comunidad 2008-2011, se llevó a cabo en el marco del Desarrollo Sustentable según el siguiente esquema de compromisos (ver Fig 81):

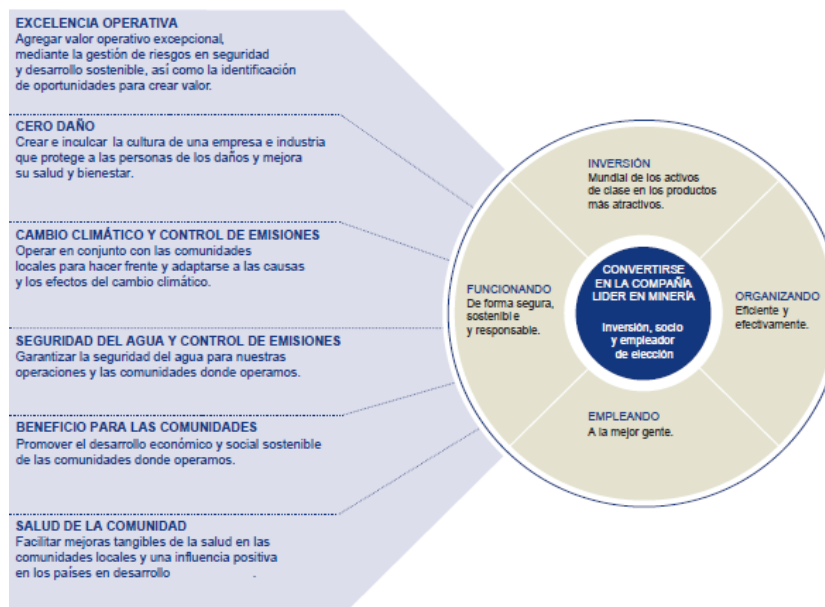


Fig 81. Compromisos de MLDN en el desarrollo sostenible. Tomado de Reporte Social MLDN (2012).



donde se abarcan los aspectos operativos, ambientales, sociales y económicos reclamados por las comunidades aledañas a la mina Loma de Níquel. Con base a los resultados reportados en el apartado 8.6.5, es posible considerar que dichos compromisos fueron en buena parte cumplidos y, sin embargo, solo un año más tarde la concesión para la explotación le fue retirada a Anglo American, producto de incesantes protestas por parte de miembros de la comunidad en el marco de un movimiento anti-minero.

Un factor importante en el marco de la Licencia Social para Operar es la necesidad de involucrar a representantes de la comunidad en el proceso de toma de decisiones que les afecten directamente. Esto se expresa de manera similar en el artículo 37 de la Ley Orgánica del Ambiente en cuanto a la necesidad de involucrar a los agentes del conflicto: La comunidad de Tiara, el Estado y el ente público o privado encargado de la explotación del recurso minero, en lo referente a la gestión del ambiente, que necesariamente involucra las distintas etapas de desarrollo de un proyecto (Artículo 2, Ley Orgánica del Ambiente), incluyendo así la etapa de explotación.

Este factor no se ve reflejado en los compromisos realizados por Anglo American y MLDN en su plan 2008-2011 y podría servir para explicar parte de las causas del movimiento anti-minero, asociado a que la comunidad (o parte de ella) no se sentía representada en sus inquietudes. Además, en lo referente a la contaminación de aguas y del aire, al no quedar evidenciado en los resultados reportados en el informe, sugiere una falla en la comunicación efectiva de los mismos a la comunidad. Otro factor importante son las protestas por parte de sindicatos de trabajadores de la mina respecto a reivindicaciones laborales, lo que podría sugerir incumplimientos contractuales por parte de MLDN. Finalmente, el cambio drástico social y económico sufrido por las comunidades aledañas a la mina sirvió como agente catalizador de este movimiento.

Con base a lo anterior, es posible resumir los factores del conflicto en tres categorías: comunicación efectiva, reivindicaciones contractuales y efectos socioculturales. Este último factor se vio especialmente resaltado tras el cese de la concesión en el año 2012 y el cese de explotación en el año 2013 por parte de la CVM, ya que esto representó el cese de los servicios de salud, educación, entre otros, prestados para el beneficio de las comunidades, lo cual ocurrió en el marco de nuevas propuestas.

Desde enero del año 2012 hasta enero del año 2022, el bolívar ha perdido un 10.418.604.651.162,8% (diez billones cuatrocientos dieciocho mil seiscientos cuatro millones seiscientos cincuenta y un mil ciento sesenta y dos coma ocho por ciento) de su valor, asociado al



periodo hiperinflacionario ocurrido entre los años 2017 y 2021, lapso en el cual el Banco Central de Venezuela realizó dos cambios del cono monetario (el primero en 2018 y el segundo en 2021), retirando un total de 11 ceros de la denominación monetaria. En el año 2018 se registró la mayor tasa inflacionaria anual del Índice de Precios de Consumo (IPC) del ciclo hiperinflacionario, con una inflación anual acumulada del 130.060,02% y en febrero del año 2019 se alcanzó el máximo inflacionario interanual de 344.509,5% sobre febrero del 2018 (datosmacro.com, 2022). En diciembre del año 2021 Venezuela salió finalmente de su ciclo hiperinflacionario, con una inflación anual acumulada del 686,4% y se estima que la inflación anualizada para el año 2022 sea del 66% acumulado, aunque el FMI proyecta que será de alrededor del 500% (Contreras, 2022).

Con base a la información anterior se hace evidente la catástrofe económica que vivió el país posterior al cierre de operaciones de la mina. Desde el año 2013, el PIB venezolano se ha reducido en un 80% y el FMI estima para el año 2022 una reducción adicional del 1,5% (Contreras, 2022). Es este el contexto fundamental bajo el cual se deben plantear las nuevas propuestas en el marco de la Licencia Social para la reapertura de operaciones en la mina. Esta situación presenta un beneficio aparente para MLDN ya que las comunidades aledañas serán más receptivas a la posibilidad de empleo asociada al reinicio de operaciones, con lo cual se facilitaría la obtención de la Licencia Social para Operar.

Partiendo de lo antes expuesto, se considera necesario retomar las medidas de gestión socioeconómicas llevadas a cabo bajo la dirección de Anglo American, mencionadas en el apartado 8.6.5. Además, sería necesario formar lo que podría describirse como un comité conjunto de representantes de las comunidades aledañas a la mina Loma de Níquel y de la compañía encargada del proyecto minero en gestión conjunta con la CVM que, con la mediación de los entes estatales competentes, analicen las propuestas presentadas por MLDN en lo referente al desarrollo de la explotación y procesamiento del mineral de ferroníquel que tengan consecuencias directas para la comunidad.

Asimismo, es necesario asignar a representantes de la mina que estén en comunicación constante y efectiva con representantes de las diferentes comunidades de la zona, para recabar de primera mano el impacto de las acciones tomadas por la compañía en la comunidad, con miras a mantener la credibilidad, aceptación social y la confianza.

En lo referente a la gestión de impactos ambientales, el mapa a continuación muestra la ubicación de las estaciones de monitoreo para la calidad del agua y del aire (ver Fig 82).

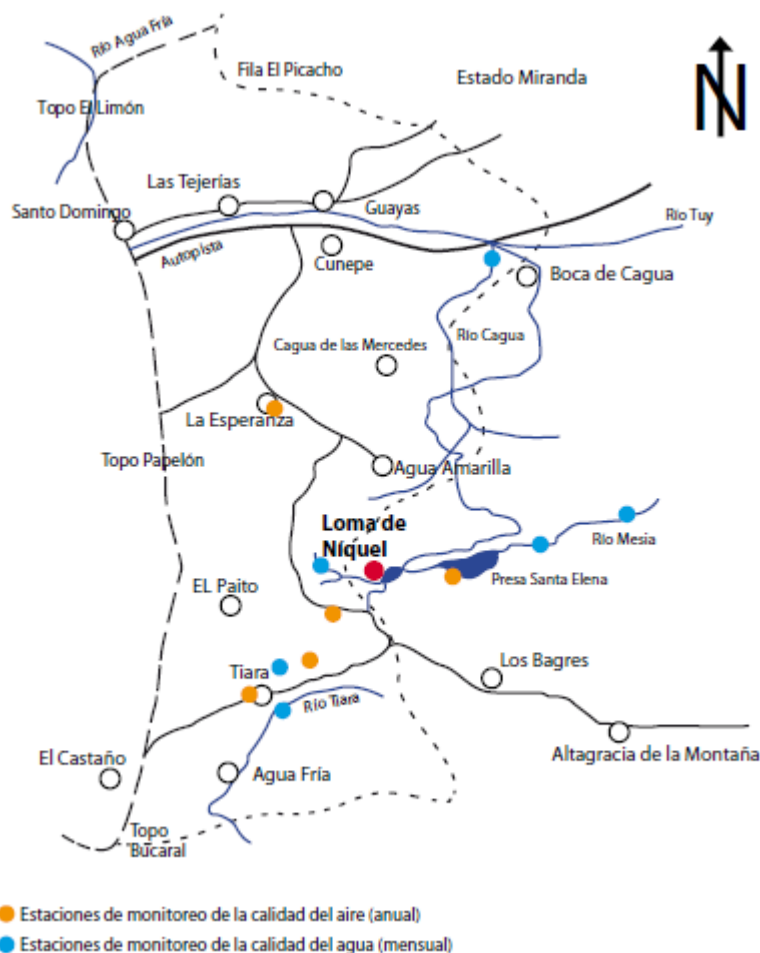


Fig 82. Estaciones de monitoreo ambiental de MLdN. Tomado de Reporte Social MLdN (2012).

Como se puede observar, de las seis estaciones de monitoreo de agua, solo una de ellas corresponde al análisis de aguas subterráneas, la cual está ubicada en la población de Tiara y muy lejana de la fuente contaminante (la mina), mientras que el resto corresponde a un análisis de fuentes superficiales. Sin embargo, el avance de una pluma de contaminación dentro de un acuífero o sistema de acuíferos interconectados depende de la conductividad hidráulica de estos (factor actualmente desconocido), pudiendo tardar semanas, meses o años en manifestarse en el flujo de agua superficial.

Las intersecciones producto del análisis de lineamientos en los mapas mostrados en el apartado 8.3.2 (en especial aquellas filtradas por curvatura y pendiente), sirven de guía para la perforación de nuevos pozos de monitoreo entre la fuente contaminante y las zonas de posible afectación como lo son cuerpos de aguas superficiales y pozos de agua de comunidades aledañas, en especial la comunidad de Tiara. La perforación de nuevos pozos de monitoreo de la calidad de aguas



subterráneas contribuiría a una oportuna detección, y por ende corrección, de fuentes de contaminación producto de la actividad minera.

Con respecto a la calidad del aire, el proceso más crítico que se realiza en la mina que contribuye negativamente a la contaminación del aire es la etapa de calcinación en el procesamiento del mineral, explicado en el apartado 5.14.2 del marco teórico. Este proceso causa la ionización del polvo de ferroníquel, que tiende a elevarse y dispersarse a causa de las cargas eléctricas repelentes entre las partículas, por lo cual los hornos cuentan con electrofiltros para recoger este polvo de mineral ionizado que es enviado directamente a la planta de peletización. Además, el monitoreo de la calidad del aire debería realizarse de manera cuatrimestral con el fin de identificar el efecto que tiene el clima y su cambio a lo largo del año sobre este parámetro.

Además, MLDN contaba con un programa de reforestación en las zonas intervenidas del proyecto, iniciado en el año 2000 y que utilizaba especies vegetales autóctonas de la región. Tras el cierre de operaciones en 2012, el plan de reforestación quedó paralizado, por lo cual se propone la retoma de este plan en conjunción con las operaciones de la mina.

Finalmente, es necesario realizar un nuevo estudio de impacto ambiental para determinar las condiciones actuales en que se encuentra la mina y realizar un planteamiento en lo referente a la gestión ambiental, incorporando las propuestas mencionadas en los párrafos anteriores.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La mina Loma de Níquel representa un depósito estratégico para la nación venezolana, por lo cual, desde el año 2017 el Estado venezolano ha mostrado un renovado interés en reanudar las operaciones de explotación y procesamiento del mineral de ferroníquel. Sin embargo, son necesarios estudios previos a su reapertura, siendo uno de los principales la prospección e identificación de posibles acuíferos en el área de explotación de la mina.

El método de tomografía de resistividad eléctrica en la modalidad dipolo-dipolo, representa la mejor opción para la prospección debido a su gran resolución vertical y horizontal, lo que, aunado al carácter fracturado de los acuíferos, ayuda a facilitar su identificación. Sin embargo, este método por sí solo no es capaz de identificar el alcance total de las estructuras en el subsuelo ya que está limitado a una representación gráfica en dos dimensiones, por lo cual, métodos complementarios como el método electromagnético en el dominio del tiempo y los sondeos eléctricos verticales en la modalidad electródica cuadrada pueden llegar a ser necesarios si se desea obtener una imagen más amplia de la interconexión de este tipo de estructuras. Todos los métodos anteriormente expuestos se plantearon con base a los indicios superficiales de la presencia de agua subterránea manifestados en el análisis hidrogeológico de la zona de estudio, paso primordial en este trabajo.

De la misma manera como son necesarios estudios de carácter geofísico, son necesarios estudios de carácter social y ambiental, en especial con respecto al conflicto social comunidad de Tiara-Loma de Níquel. Con base al análisis realizado, se concluye que, en un posible evento de reapertura, las políticas y proyectos manejadas por Anglo American cuando manejaba las operaciones deben retomarse, ya que se considera que éstas abarcaban la gran mayoría de aspectos que dieron origen a las quejas por parte de las comunidades aledañas a la mina. Sin embargo, se les debe aunar una mayor integración entre representantes de la mina y de la comunidad, con la mediación de los entes estatales pertinentes, que permita hacer expedito la comunicación de cualquier eventualidad en la cual la comunidad desee ser escuchada, ya que la falta de este aspecto en la relación de la mina con la comunidad se identificó como un factor importante que dio origen al conflicto.

Se recomienda, además, realizar un nuevo estudio de impacto ambiental, ya que el alcance de estos, así como las acciones a tomar para su manejo y mitigación, pueden haber sido modificados tras casi una década de inactividad en el proyecto minero. Así mismo, se recomienda hacer un estudio de carácter social de las comunidades aledañas a la mina para determinar los parámetros de legitimidad, credibilidad y confianza asociados a la obtención de la licencia social para operar,



factor importante para el reinicio del proyecto. Finalmente, se recomienda estudiar la posibilidad de realizar estudios de resistividad de carácter regional y en varias instancias a lo largo de un año, con el fin de obtener información respecto al régimen de aguas subterráneas en las subcuencas hidrográficas asociadas a la mina Loma de Níquel, con especial énfasis en las subcuencas de los ríos Mesia y Guare, la subcuenca del río Cagua y la subcuenca del afluente del río Pao.



BIBLIOGRAFÍA

- ASF. (23 de agosto de 2021). *ALOS PALSAR - Radiometric Terrain Correction*. Obtenido de Alaska Satellite Facility: <https://asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/alos-palsar-rtc/alos-palsar-radiometric-terrain-correction/>
- Astier, J. (1975). *Geofísica Aplicada a la Hidrogeología*. Madrid, España: Parainfo.
- Auge, M. (2008). *Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea*. Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires.
- Avendaño, L. M. (2014). *Planteamiento Minero para la Explotación a Cielo Abierto de Puzolana Correspondiente al Título Minero L 0764-15 Ubicado en el Municipio de Paipa, Departamento de Boyacá*. Boyacá, Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Bellotti, M. (2011). Minería a cielo abierto versus glaciares en alerta roja en Argentina. 1-4.
- Birbe, N. (2009). *Actualización Geológica de la Zona de Explotación del Yacimiento Loma de Hierro, Estado Miranda*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.
- Boutilier, R., & Thomson, I. (2019). *The Social License*. Milton Park, Inglaterra: Routledge.
- Britannica. (15 de enero de 2021). *Iron deposits*. Obtenido de Britannica: <https://www.britannica.com/science/mineral-deposit/Iron-deposits>
- Castillo, A. (2017). *Control de Sedimentos en Minería Venezolana a Cielo Abierto*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.
- Castillo, D., Oyarzún, R., & Arumí, J. (2020). *Hidrogeología de Medios Rocosos Fracturados*. Concepción, Chile: Serie Comunicacional CRHIAM.
- CIAR Global. (2019). Anglo American pierde arbitraje con Venezuela envuelta en denuncias medioambientales. *CIAR Global*.
- Contreras, B. (2022). FMI publica proyecciones para Venezuela: poco crecimiento y más inflación. *TalCual*.
- datosmacro.com. (8 de junio de 2022). *IPC de Venezuela*. Obtenido de datosmacro.com: <https://datosmacro.expansion.com/ipc-paises/venezuela>
- Davie, T. (2002). *Fundamentals of hydrogeology*. New York, Estados Unidos: Routledge.
- Dentith, M., & Mudge, S. T. (2014). *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. New York, Estados Unidos: Cambridge University Press.
- Díaz, D., & Sotillo, F. (2006). *Evaluación del Río Guare como Fuente de Abastecimiento y Aprovechamiento Turístico para la población de Táchira Ubicada en el Municipio Guaicaipuro del Estado Miranda*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.



- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1997). *Physical and Chemical Hydrogeology*. New York, Estados Unidos: Wiley.
- ESA. (23 de agosto de 2021). *Sentinel 2*. Obtenido de Sentinel:
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>
- ESRI. (23 de abril de 2021). *Dirección de Flujo*. Obtenido de ArcGis for Desktop:
<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/flow-direction.htm>
- ESRI. (19 de abril de 2021). *What is raster data?* Obtenido de ArcGIS for Desktop:
<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
- Evert, K.-J. (2010). *Encyclopedic Dictionary of Landscape and Urban Planning: Multilingual Reference Book in English, Spanish, French and German*. Springer Science & Business Media.
- Ferenčić, A. J. (1969). Geology of the San Isidro iron ore deposit, Venezuela. *Mineral. Deposita*, 283-297.
- Franquiz, M. L. (15 de enero de 2021). *Arco Minero del Orinoco vulnera fuentes vitales y diversidad cultural en Venezuela*. Obtenido de La Izquierda Diario:
<http://www.laizquierdadiario.com/ve/Arco-Minero-del-Orinoco-vulnera-fuentes-vitales-y-diversidad-cultural-en-Venezuela>
- Gallardo, T. A. (2008). *Caracterización Mineralógica del Perfil Laterítico de Ni de Loma Ortega*. República Dominicana. República Dominicana.
- Garmendia, A. S., Salvador, A. A., Crespo, C. S., & Garmendia, L. S. (2005). *Evaluación de impacto ambiental*. Madrid, España: Pearson Educación, S.A.
- Gege, P. (26 de junio de 2013). Basic concepts and challenges of remote sensing. Burghausen, Bavaria, Alemania.
- Geoscience Australia. (15 de enero de 2021). *Iron*. Obtenido de Geoscience Australia:
<https://www.ga.gov.au/education/classroom-resources/minerals-energy/australian-mineral-facts/iron#heading-6>
- González, L. (25 de agosto de 2021). *Principal Component Analysis*. Obtenido de The Landscape Toolbox:
https://wiki.landscapetoolbox.org/doku.php/remote_sensing_methods:principal_components_analysis
- Herrera, J. H. (2006). *Métodos de minería a cielo abierto*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Herrera, Y. (2014). *Diseño de un sistema de clasificación granulométrico para el carbón mineral, empleado en Loma de Níquel, estado Miranda*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.



- Hispagua. (20 de abril de 2021). *Hidrogeología*. Obtenido de Hispagua Sistema Español de Información sobre el Agua: <https://hispagua.cedex.es/datos/hidrogeologia>
- IMTA. (21 de abril de 2021). *¿Qué es una cuenca?* Obtenido de Instituto Mexicano de Tecnología y Agua: <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-es-una-cuenca-211369>
- Jaadi, Z. (25 de agosto de 2021). *A Step-by-Step Explanation of Principal Component Analysis (PCA)*. Obtenido de built in: <https://builtin.com/data-science/step-step-explanation-principal-component-analysis>
- JAXA. (2008). *ALOS Data User Handbook*. Chofu, Japón: JAXA.
- Jensen, J. R. (2014). *Remote Sensing of the Enviroment. An Earth Resource Perspective*. Harlow, Reino Unido: Pearson.
- Jensen, J. R. (2015). *Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective*. Glenview, Estados Unidos: Pearson Education.
- Keller, G. R. (1987). Rock and mineral properties. *Electromagnetic methods in applied geophysics*, 13-52.
- King, H. M. (15 de enero de 2021). *Iron Ore*. Obtenido de Geology.com: <https://geology.com/rocks/iron-ore.shtml>
- Kirsch, R. (2009). *Groundwater Geophysics*. Berlin, Alemania: Springer.
- Landmap. (25 de agosto de 2021). *Análisis de componenetes principales*. Obtenido de Landmap: <http://learningzone.rspsoc.org.uk/index.php/Learning-Materials/Image-Processing-for-ENVI/10.2.-Principal-Components-Analysis>
- León, A. (2013). *La Ecorregión Metropolitana de Caracas: Propuesta para una Gestión Ambiental del Territorio*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Danvers, Estados Unidos: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Linsley, M. R., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. (1949). *Introduction*. Tokio, Japón: McGraw-Hill Book Company and Kogakusha Company.
- Llamas, M., & Galofré, A. (1983). Conceptos básicos y definiciones. En E. Custodio, & M. Llamas, *Hidrología Subteranea* (págs. 249-278). Barcelona, España: Omega.
- Loke, M. H., Chambers, J. E., & Kuras, O. (2011). Instrumentation, electrical resistivity. En H. K. Gupta, *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics* (págs. 599-604). Dordrecht, Alemania: Springer.
- Martínez, J. A. (2007). *Evaluación del Sistema de Información Geográfica (SIG) como herramienta en el Marco de la Planeación Urbana del D.F.* Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Massolo, L. (2015). *Introducción a las herramientas de gestión ambiental*. La Plata, Argentina: Editorial de la Universidad de La Plata.



- Mastrorosa, G. (2018). *Caracterización Geofísica de Acuíferos en la Parroquia El Junquito, Municipio Libertador, Dtto. Capital*. Caracas, Venezuela: Universidad Simón Bolívar.
- MdPPpDME. (2017). Motor Minería apuntala plan de reactivación de Loma de Níquel. *Ministerio del Poder Popular para Desarrollo Minero Ecológico*.
- MdPPpDME. (2019). Venezuela encendió planta recuperadora de níquel. *Ministerio del Poder Popular para Desarrollo Minero Ecológico*.
- Mellado, M., & Rodríguez, L. (18 de enero de 2021). *Níquel mine in Loma de Hierro, Venezuela*. Obtenido de Environmental Justice Atlas: <https://ejatlas.org/conflict/loma-de-hierro>
- MITECO. (21 de abril de 2021). *Cuencas y subcuencas hidrográficas*. Obtenido de Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico: <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/cuencas-y-subcuencas.aspx>
- Moran, M. E., & Malma, M. M. (2013). *Sistema de Información Geográfica con interfaz Web de la Ciudad de Puno*. Puno, Perú: Universidad Nacional del Altiplano.
- Ochoa, K., & Reyes, R. (2011). *Propuesta de los Parámetros para el Diseño de Estabilidad de Taludes y de los Depósitos Finales en Minera Loma de Níquel, C.A. Municipio Guaicaipuro, Estado Miranda*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.
- Paquet, H., & Clauer, N. (1997). *Soils and Sediments. Mineralogy and Geochemistry*. Estrasburgo, France: Springer.
- Parker, M. (2017). *Digital Signal Processing 101. Everything you Nedd to Know to Get Started*. Oxford, Reino Unido: Elsevier.
- Parra, O. (2019). Empresa rusa Techzvetmet ratifica interés en invertir en minería de níquel en Venezuela. *Ministerio del Poder Popular para Desarrollo Minero Ecológico*.
- Proenza, J. (2015). *Mineralogía y Geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, REE en Yacimientos Lateríticos*. Barcelona, España: Sociedad Española de Mineralogía.
- QGIS. (24 de agosto de 2021). *Discover QGIS*. Obtenido de QGIS: <https://qgis.org/en/site/about/index.html>
- QGIS. (21 de abril de 2021). *Explorando las herramientas hidrológicas en QGIS*. Obtenido de COUSGwiki: https://dges.carleton.ca/CUOSGwiki/index.php/Exploring_the_Hydrological_Tools_in_QGIS#:~:text=QGIS%20has%20an%20extensive%20set,SAGA%20%3E%20Terrain%20Analysis%3A%20Hydrology.
- Reyes, R. (2011). *Planificación de la Exploatción Mineral para la Conformación de la Pila 186-A, en Minera Loma de Níquel, Estado Miranda*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.
- Rodríguez, C. (2012). *Evaluación y Propuesta para el Control y Desempeño del Área de Trituración de Mineral*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.



- Salinas, S. R. (2016). *Formación de la laterita de Camán, XIV región Chile*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Schellmann, W. (23 de abril de 2021). *An Introduction to Laterite*. Obtenido de The Laterite Story: <http://www.laterite.de/>
- Sexton, P. A. (19 de abril de 2021). *What is a geographic information system (GIS)?* Obtenido de USGS: https://www.usgs.gov/faqs/what-a-geographic-information-system-gis?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products
- SGM. (3 de marzo de 2021). *Servicio Geológico Mexicano*. Obtenido de Geofísica: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Geofisica/Introduccion-geofisica.html>
- Singhal, B., & Gupta, R. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Springer.
- Urbani, F., Rodríguez, J., Braboza, L., Díaz, A., Omaña, L., Orta, M., . . . Peña, M. (2004). *Atlas Geológico de la Cordillera de la Costa Venezuela*. Caracas, Venezuela: FUNVISIS.
- Urbani, F. (2018 a). Evolución del Conocimiento Geológico de la Cordillera de la Costa, Venezuela. *Boletín de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales*, XXIII(36), 70-97.
- Urbani, F. (2018 b). Una Revisión de los Terrenos Geológicos del Sistema Montañoso del Caribe, Norte de Venezuela. *Boletín de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales*, XXIII(36), 119-157.
- USGS. (2018). *Minerals Yearbook*. U.S. Geological Service.
- USGS. (2020). *Landsat 8-9. Operational Land Imager (OLI) - Thermal Infrared Sensor (TIRS). Collection 2 Level 2 (L2). Data Format Control Book (DFCB)*. Sioux Falls, Estados Unidos: USGS.
- USGS. (2020). *Mineral Commodity Summaries 2020*. U.S. Geological Service.
- USGS. (23 de agosto de 2021). *Landsat Missions*. Obtenido de USGS: https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con
- USGS. (19 de abril de 2021). *USGS*. Obtenido de What are digital elevation models (DEMs)?: https://www.usgs.gov/faqs/what-are-digital-elevation-models-dems?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products
- Waldbaum, J. C. (1978). *From Bronze to Iron. Studies in Mediterranean Archaeology*. Goteburg, Suecia: Paul Astroms Forlag.
- Wightman, W. E., Jalinoos, F., Sirles, P., & Hanna, K. (2003). Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems. *Federal Highway Administration, Central Federal Lands Highway Division*.

**ANEXO 1: TABLA DE ABREVIATURAS**

TRE	Tomografía de Resistividad Eléctrica
MLDN	Minera Loma de Níquel
CVM	Corporación Venezolana de Minería
SEV	Sondeo Eléctrico Vertical
TDEM	<i>Time Domain Electro Magnetics</i>
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
GDAL	<i>Geospatial Data Abstraction Library</i>
SAGA	<i>System for Automated Geoscientific Analyses</i>

ANEXO 2: PASOS SEGUIDOS POR EL PLUGIN SACP EN EL ANÁLISIS DE COMPONENTES**PRINCIPALES**

- ✓ Estandarización de los rangos de las bandas

El primer paso para realizar el análisis de componentes principales fue estandarizar los rangos de las variables iniciales para que cada una de ellas contribuya de igual manera en el análisis. Esto se realizó dividiendo cada uno de los *rasters* entre la media de su rango de valores (Jaadi, 2021).

- ✓ Cálculo de la covarianza

Una vez estandarizados los rangos de las variables, el plugin SACP calcula la matriz de covarianza de las variables (los cinco *raster*), con la finalidad de analizar la relación entre éstas con base a como varían de la media entre sí (ver ecuación ~~Error! Reference source not found.~~). En este caso, la matriz de covarianza tiene una dimensión de 5x5. Una covarianza positiva indica que las variables están directamente correlacionadas, mientras que una covarianza negativa indica que las variables están inversamente correlacionadas (Jaadi, 2021).

$$Cov_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} & C_{1,3} & C_{1,4} & C_{1,5} \\ C_{2,1} & C_{2,2} & C_{2,3} & C_{2,4} & C_{2,5} \\ C_{3,1} & C_{3,2} & C_{3,3} & C_{3,4} & C_{3,5} \\ C_{4,1} & C_{4,2} & C_{4,3} & C_{4,4} & C_{4,5} \\ C_{5,1} & C_{5,2} & C_{5,3} & C_{5,4} & C_{5,5} \end{bmatrix} \text{ donde } C_{i,j} = C_{j,i} \quad (8)$$

- ✓ Computación de los *Eigenvectors* y *Eigenvalues* de la matriz de covarianza para identificar los componentes principales

Los *Eigenvectors* y *Eigenvalues* de la matriz de covarianza se calculan de manera que:



$$EV_{5 \times 5} \cdot Cov_{5 \times 5} \cdot EV^T_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} \lambda_{1,1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{2,2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{3,3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{4,4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{5,5} \end{bmatrix} = E_{5 \times 5} \quad (9)$$

Donde **EV** es la matriz de *Eigenvectors*, **EV^T** es la matriz de *Eigenvectors* transpuesta y **E** es la matriz de *Eigenvalues* ($\lambda_{n \times n}$ donde n es el número de componentes principales). Los *Eigenvalues* $\lambda_{i,j}$ son iguales a 0, por tanto, pueden ser ignorados. El número de *Eigenvalues* siempre es igual al número de bandas analizadas.

Los *Eigenvalues* contienen información importante respecto a la varianza asociada a cada componente principal. El porcentaje de varianza asociado a cada componente principal se puede calcular mediante la ecuación **Error! Reference source not found.** a continuación.

$$\%_p = \frac{\text{eigenvalue } \lambda_p \times 100}{\sum_{p=1}^n \text{eigenvalue } \lambda_p} \quad (10)$$

Donde $\%_p$ es el porcentaje total de varianza asociada a la componente principal p .

✓ Generación de componentes principales

Para generar las imágenes asociadas a los componentes principales (PC) se identificaron los BV originales asociados con un pixel cualquiera. Para fines de esta explicación, se utilizarán los BV de un pixel de una imagen hipotética. Este pixel, ubicado en la fila 1 y columna 1, tiene BV asociados a 5 bandas diferentes, representados por el vector X a continuación.

$$X_{5,1} = \begin{bmatrix} BV_{1,1,1} = 20 \\ BV_{1,1,2} = 30 \\ BV_{1,1,3} = 50 \\ BV_{1,1,4} = 15 \\ BV_{1,1,5} = 62 \end{bmatrix}, \text{ donde } BV_{\text{fila,columna,banda}}$$

A los datos de cada pixel se les aplicó la transformación apropiada para que esta sea proyectada en cada uno de los ejes de los componentes principales.