



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**“Uso de imágenes satelitales ASTER para el mapeo de minerales en el
sector Sumaypamba, Saraguro - Loja”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MINAS

Autores:

JONÁS ANTONIO MONTENEGRO DÍAZ

EDGAR MARCELO TORRES FERNÁNDEZ

Director:

FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA

CUENCA, ECUADOR

2024

Jonás Antonio Montenegro Díaz

Edgar Marcelo Torres Fernández

Trabajo de Titulación

Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

Julio, 2024

**“USO DE IMÁGENES SATELITALES ASTER PARA EL MAPEO DE MINERALES
EN EL SECTOR SUMAYPAMBA, SARAGURO - LOJA”**

DEDICATORIA

Dedico mi trabajo de titulación a Dios, mis padres y hermanos.

A mis padres, Paolo y Miriam, por ser mis mentores y por brindarme su apoyo incondicional.

A mis hermanos, Paola y Salvador, por siempre acompañarme y motivarme a seguir adelante y cumplir con mis metas.

Jonás Antonio Montenegro Díaz

Dedico mi trabajo de titulación a Dios y agradezco a mis padres por su amor incondicional y constantes sacrificios que me permitieron perseguir este sueño. Gracias a mi hermana por su apoyo incondicional y mi inspiración diaria. Gracias a mis profesores, cuya guía y sabiduría fueron fundamentales en mi formación. Gracias a mis compañeros por su apoyo, amistad y experiencias compartidas que enriquecieron mi experiencia universitaria. Finalmente, expreso mi más sincero agradecimiento a todos los que contribuyeron de alguna manera a este logro. Este título es tanto suyo como mío.

Edgar Marcelo Torres Fernández

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a padres, familiares, maestros y amigos.

A los ingenieros Fernando Valencia y Leonardo Núñez por brindarnos su apoyo continuo para la elaboración de este documento.

A todos los profesores que nos formaron durante todos los años de carrera cursados; especialmente a los ingenieros Federico Auquilla, Patricio Feijoo y Eduardo Luna por compartirnos sus conocimientos y darnos una base sólida en nuestra formación académica.

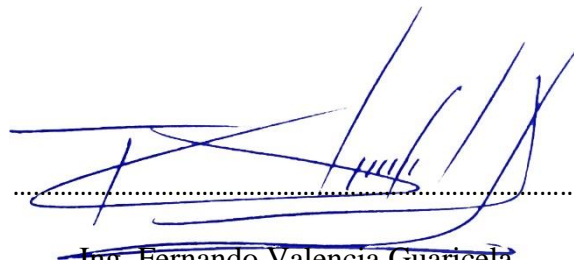
Jonás Antonio Montenegro Díaz

Edgar Marcelo Torres Fernández

RESUMEN

El objetivo fue crear un mapa de alteración hidrotermal para observar zonas con la presencia de minerales utilizando imágenes satelitales ASTER. El estudio se realizó entre los cantones Santa Isabel y Saraguro, pertenecientes a las provincias de Azuay y Loja, considerando que es un sitio con escasa cobertura vegetal y desértico, características que facilitan la teledetección de minerales en el suelo. Para determinar la presencia de minerales se utilizó el programa ENVI en el que se trabajó en algebra de mapas y combinación de bandas de una imagen ASTER corregida radiométrica y atmosféricamente. Los resultados fueron un mapa que indica la presencia de minerales en el 10% del territorio, con: ion hierro (II, III) 5%, moscovita 1%, alunita 1% dolomita 1%, epidota 2%. El mapa fue validado mediante un análisis de minerales realizado en un equipo de absorción atómica que verificó la presencia de hierro.

Palabras clave: ASTER, ENVI, teledetección, alteración hidrotermal.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above a horizontal dotted line.

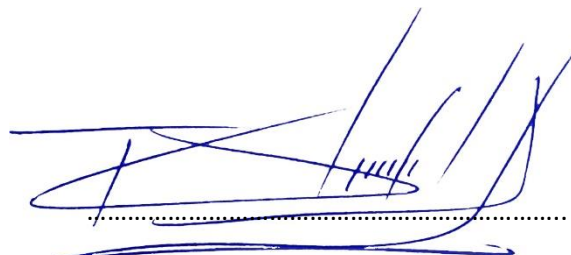
~~Ing. Fernando Valencia Guaricela~~

Director del trabajo de titulación

ABSTRACT

The objective was to create a map of hydrothermal alteration to observe areas with the presence of minerals using ASTER satellite images. The study site was situated between the cantons of Santa Isabel and Saraguro, in the provinces of Azuay and Loja. This location was selected due to its low vegetation cover and desert-like conditions, which facilitated the detection of minerals in the soil through remote sensing. We used map algebra and band combination in the ENVI program on a previously radiometrically and atmospherically corrected ASTER image to determine the presence of minerals. Result was a map that indicated the presence of minerals in 10% of the territory, such as iron (II, III) 5%, muscovite 1%, alunite 1%, dolomite 1%, and epidote 2%. The map was validated through a mineral analysis carried out with an atomic absorption spectrometer, confirming iron's presence at the study site.

Keywords: ASTER, ENVI, remote sensing, hydrothermal alteration



Ing. Fernando Valencia Guaricela

Thesis Director

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|------------|
| DEDICATORIA | iii |
| AGRADECIMIENTOS | iv |
| RESUMEN | v |
| ABSTRACT | vi |
| CAPITULO 1 | xi |
| 1.1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.2 OBJETIVOS | 4 |
| 1.2.1 Objetivo general | 4 |
| 1.2.2 Objetivos específicos | 4 |
| 1.3 MARCO TEÓRICO..... | 4 |
| 1.3.1 Yacimiento mineral | 4 |
| 1.3.2 Yacimiento hidrotermal | 5 |
| 1.3.3 Yacimiento de óxido de hierro | 7 |
| 1.3.4 Teledetección | 8 |
| 1.3.5 Principales componentes de la teledetección | 9 |
| 1.3.6 Tipos de teledetección | 9 |
| 1.3.7 Ventajas de la teledetección | 10 |
| 1.3.8 Limitaciones de la teledetección | 11 |
| 1.3.9 Plataformas de teledetección | 11 |
| 1.3.10 Espectro electromagnético | 12 |
| 1.3.11 Aplicaciones de la teledetección | 14 |
| 1.3.12 Imagen satelital ASTER | 15 |
| 1.3.13 Procesamiento de imágenes ASTER | 18 |

| | | |
|--------------------------------------|---|-----------|
| 1.3.14 | Identificación de yacimientos mediante teledetección | 20 |
| 1.3.15 | Muestreo de suelos..... | 21 |
| 1.4 | ESTADO DEL ARTE..... | 24 |
| CAPÍTULO 2 | | 26 |
| APLICACIÓN METODOLÓGICA | | 26 |
| 2.1 | Sitio de estudio..... | 26 |
| 2.2 | Teledetección: procesamiento de información y álgebra de mapas..... | 29 |
| 2.2.1 | <i>Selección de la imagen satelital ASTER</i> | <i>29</i> |
| 2.2.2 | <i>Creación de máscaras mediante distintos métodos</i> | <i>31</i> |
| 2.3 | Validación mediante muestreo de minerales en el suelo del sitio de estudio | 33 |
| CAPÍTULO 3 | | 35 |
| RESULTADOS | | 35 |
| 3.1 | Características de los elementos minerales encontrados mediante combinación de bandas | 35 |
| 3.2 | Mapeo de los yacimientos minerales | 37 |
| 3.3 | Cuantificación del área con presencia de minerales | 38 |
| 3.4 | Validación de los resultados mediante muestreo de minerales en el sitio de estudio | 38 |
| CAPÍTULO 4 | | 42 |
| CONCLUSIONES..... | | 42 |
| RECOMENDACIONES | | 44 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 45 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Ejemplos de yacimiento mineral. | 5 |
| Figura 2: Ejemplos de un depósito mineral hidrotermal..... | 6 |
| Figura 3: La Teledetección. | 8 |
| Figura 4: Sensores pasivo que captan la radiación reflejada por los objetos a partir de la energía solar (izquierda) y sensores activos que tienen su propia fuente de energía (derecha). | 10 |
| Figura 5: Diagrama del espectro electromagnético, mostrando el tipo y longitud de onda. | 12 |
| Figura 6: Firmas espectrales de campo de minerales de alteración hidrotermal de Los Menucos. Las mismas firmas espectrales de la Figura (a) corregidas a la resolución espectral de ASTER (b). | 13 |
| Figura 7: Bandas espectrales de ASTER, HYPERION y Landsat ETM..... | 17 |
| Figura 8: Imagen ASTER corregida radiométricamente. | 19 |
| Figura 9: Procedimiento para el muestreo de suelos. | 23 |
| Figura 10: Ubicación geográfica del sitio estudio en el Ecuador y dentro de los cantones Santa Isabel y Saraguro de las provincias de Azuay y Loja. | 26 |
| Figura 11: (a) Ubicación del sitio de estudio dentro de los cantones Santa Isabel y Saraguro de las provincias de Azuay y Loja, respectivamente y (b) acercamiento al sitio de estudio en una imagen satelital ASTER con dimensiones de largo =10.53 km; ancho = 7.38 km.. | 28 |
| Figura 12: Imagen de Sumaypamba donde se visualiza las características de suelo desnudo, árido y el clima desértico. | 29 |
| Figura 13: Imagen satelital ASTER. Fecha 20/04/2015. | 31 |
| Figura 14: Flujoograma de actividades dentro del software ENVI para la identificación de yacimientos minerales..... | 32 |
| Figura 15: Flujoograma de algebra de mapas en el software ENVI. | 33 |

| | |
|--|----|
| Figura 16: Ejemplificaciones de los minerales encantados en el sitio de estudio. | 36 |
| Figura 17: Sitio de estudio con la presencia de los minerales encontrados. | 37 |
| Figura 18: Porcentaje de área cubierta por (a) cada tipo de mineral encontrados en el sitio de estudio y (b) el área de intersección de todos los minerales encontrados..... | 38 |
| Figura 19: Puntos de toma de muestreo de suelos. | 39 |
| Figura 20: Porcentaje de minerales encontrados mediante análisis de laboratorio en el sitio de estudio. | 40 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Características de las 14 bandas de las imágenes satelitales ASTER..... | 16 |
| Tabla 2: Máscaras creadas mediante la combinación de bandas ASTER. | 21 |
| Tabla 3: Elementos identificados mediante combinación de bandas y codificación..... | 35 |
| Tabla 4: Resultados de óxidos de hierro, muestra 1 zona presencia de minerales y muestra 2 zona con menor presencia de minerales..... | 40 |

INTRODUCCIÓN

En Ecuador existe un limitado conocimiento sobre los recursos y reservas naturales que posee. De hecho, se considera que solamente el 8% del territorio nacional ha sido objeto de prospección, esta limitante se da por el desconocimiento de tecnologías modernas como el uso de imágenes satelitales y la teledetección, falta de la promoción de la investigación y escasos recursos económicos para desarrollar este tipo de estudios. A esta problemática se suma factores como la oposición de ciertos grupos sociales a proyectos de tipo extractivos o a la minería en general. Independientemente de ello, el uso de imágenes satelitales y la teledetección deben ser consideradas herramientas indispensables para comprender la naturaleza y el potencial minero del Ecuador. La teledetección facilitaría el trabajo en campo y reduciría los costos y tiempos en cuanto a las etapas de prospección y exploración inicial de proyectos mineros (Enami, 2016).

A continuación, detallamos características sobre la teledetección para la identificación de yacimientos hidrotermales.

Un satélite artificial está equipado con instrumentos y cámaras de alta resolución y es puesto en órbita mediante cohetes. Estos satélites permiten, entre otras cosas, explorar la superficie de la Tierra, y por ende identificar los minerales que en ella se encuentran (EOS DATA ANALYTIC, 2023). La capacidad de estos satélites para captar información es muy superior a la de los sensores terrestres, gracias a su amplio campo de visión y mayor resolución espacial. Los satélites artificiales espaciales se clasifican según la tarea que desempeñan, como comunicaciones, investigación científica, predicción meteorológica u observación terrestre, y todos obedecen las mismas leyes físicas y cálculos matemáticos una vez en el espacio. Finalmente, los datos que se obtienen de los sensores son procesados y posteriormente interpretados por los técnicos especialistas en la materia (¿Qué es la Teledetección, 2021.)

En la actualidad, existen diferentes tipos de satélites espaciales. Mencionamos por ejemplo los Landsat, ASTER, ALOS. Los Landsat que poseen 7 bandas multiespectrales que van desde el visible hasta el infrarrojo medio con una resolución de 30 metros. Los ASTER que poseen 14 bandas separadas en 3 grupos (VNIR, SWIR y TIR). Los ALOS que están compuestos por 3 sistemas independientes (PRSIM, AVNIR-2, PALSAR) que adquieren simultáneamente imágenes ópticas e imágenes de radar con diversas resoluciones (NASA, 2020). Todos ellos pueden ser utilizados para encontrar yacimientos minerales (Jara, 2012).

Las imágenes satelitales y sus diferentes espectros o bandas son útiles para detectar minerales en formaciones geológicas y también para identificar minerales en sedimentos y acumulaciones de desechos mineros. En específico, las imágenes multiespectrales ASTER brindan la información necesaria sobre la reflexión de la luz y la absorción de la materia, de esta manera se facilita la identificación de zonas con alteraciones hidrotermales por medio de las bandas (VNIR y SWIR) (Medina et al., 2020). De hecho, las imágenes satelitales ASTER fueron utilizadas para la detección de yacimientos mineros en Perú, España, Ecuador, etc. En Ecuador, el sitio específico de estudio se localiza en Zaruma donde se detectó la presencia de hidroxilos y óxidos (Mogrovejo, 2021). Posteriormente, con los yacimientos identificados mediante las imágenes ASTER se puede realizar verificaciones de la presencia de estos minerales en campo. En consecuencia, podemos decir que el uso de estas imágenes satelitales ASTER disminuye el trabajo del técnico (ejemplo: de un ingeniero en minas o geólogo) al identificar previo al trabajo en campo los sitios con una concentración anómala de minerales.

El trabajo en campo implica, por ejemplo, el muestreo de minerales en el suelo, que es una práctica crucial en la exploración geológica y la prospección minera, este proceso implica la recolección de muestras de suelo en áreas de interés identificadas mediante imágenes satelitales para analizar su contenido mineral. Los geólogos utilizan una variedad de técnicas, como la excavación manual o el uso de herramientas especializadas, para obtener muestras

representativas de diferentes profundidades y ubicaciones. Estas muestras se analizan en laboratorio de suelos para determinar la presencia y la concentración de minerales de interés, lo que proporciona información valiosa para la evaluación del potencial minero y la planificación de futuras operaciones de extracción.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, el objetivo del presente estudio es mapear las concentraciones anómalas de minerales en una zona desértica de la cordillera sur del Ecuador (parroquia de Sumaypamba). Seleccionamos este sitio de estudio porque es desértico, presenta una escasa cobertura vegetal y se encuentra alejada de la zona urbana. Estas son las características que permiten tener una imagen satelital más limpia y al momento de realizar las distintas combinaciones entre bandas determinar con mayor facilidad los distintos tipos de yacimientos. Además, las actividades de minería se realizan alejadas de centros poblados.

CAPÍTULO 1

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

El objetivo de este trabajo es mapear la presencia de minerales en una zona desértica de Sumaypamba mediante imágenes satelitales.

1.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos del trabajo consideran:

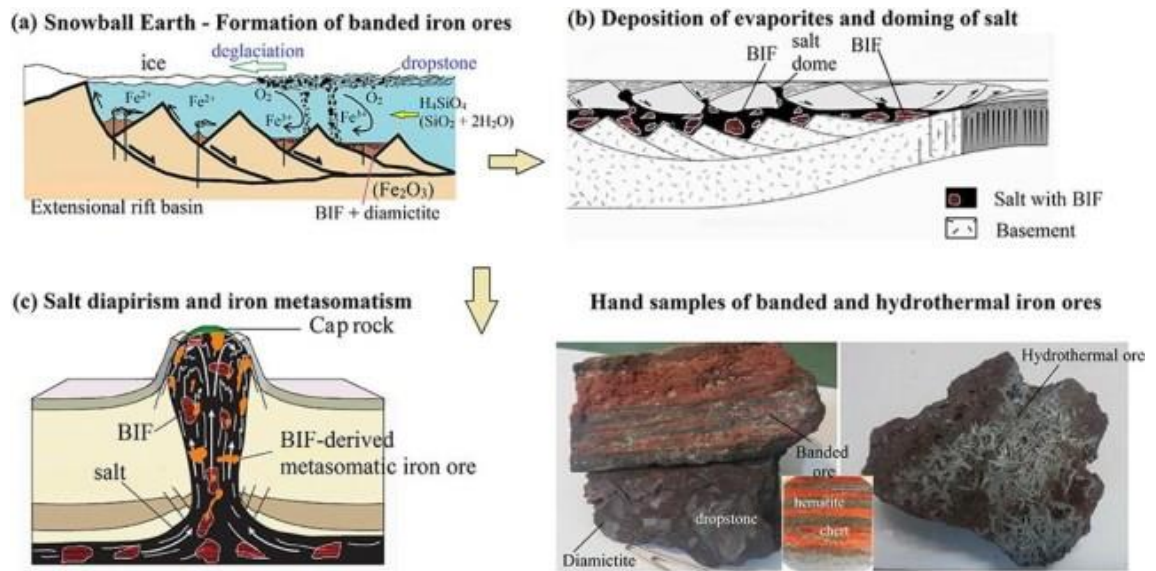
- Caracterizar el sitio de estudio, de manera que presenten las mejores condiciones para la teledetección.
- Procesamiento de imágenes ASTER y análisis de resultados.
- Corroborar en campo los resultados alcanzados por el proceso de teledetección.

1.3. MARCO TEÓRICO

1.3.1. Yacimiento mineral

Los procesos naturales en la tierra y océanos conducen a la acumulación de minerales en la corteza. Se define como yacimiento mineral a una concentración natural de materias primas minerales estadísticamente anómala en la corteza terrestre debida a procesos geológicos. La concentración de materias primas minerales se denomina “grado” de un yacimiento mineral, la profundidad a la que se encuentra y la calidad de los mismos son considerados los criterios que justifican que el desarrollar o no las actividades mineras para que la explotación del yacimiento sea económicamente rentable. Entonces, por tonelada de roca que contiene los minerales deseados, los costos de separarlos de la roca deben ser menores que el valor del mineral por tonelada de roca. La **Figura 1** muestra ejemplos de zonas de acumulación evidente de minerales y considerados yacimientos minerales.

Figura 1: Ejemplos de yacimiento mineral.



Fuente: Mahmut (2023).

En este sentido, las materias primas minerales son todos los minerales, las rocas y los elementos y compuestos que se extraen de ellos. En resumen, las materias primas minerales son las sustancias que se extraen de la corteza terrestre para aprovechar sus propiedades físicas o químicas en distintos ámbitos (ejem. desarrollo tecnológico, joyería, construcción, etc.). Las materias primas minerales según sus aplicaciones pueden ser energéticas (carbón, petróleo, gas e hidrocarburos naturales), no metálicas (áridos, rocas ornamentales, minerales refractarios, abrasivos) y metálicas.

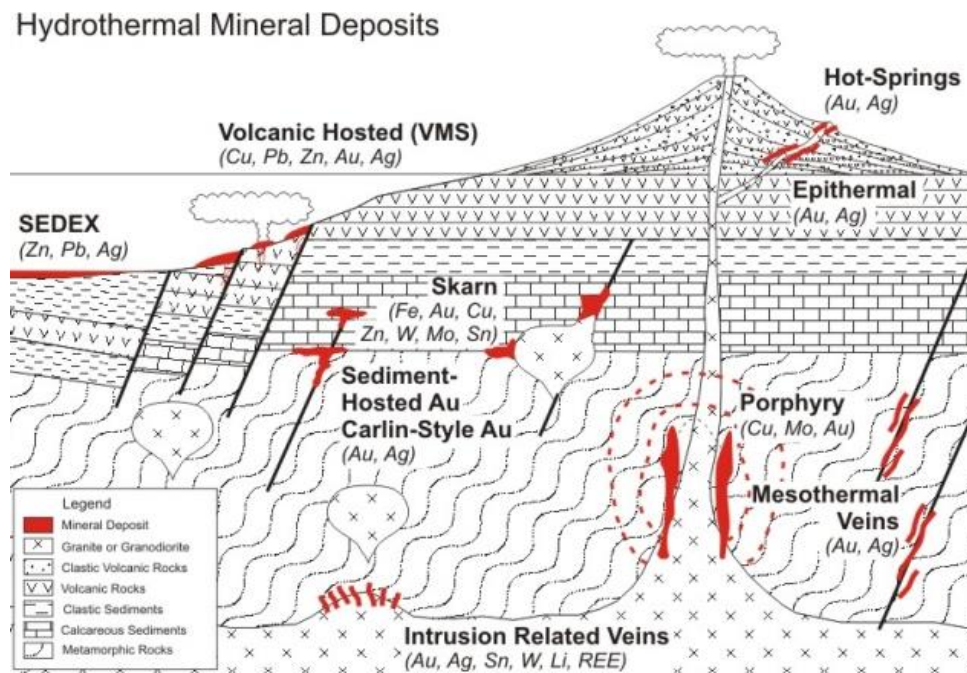
1.3.2. Yacimiento hidrotermal

La alteración hidrotermal resulta de la transformación de la mineralogía de las rocas en una nueva asociación de minerales o nuevas rocas por las reacciones producidas entre las rocas iniciales y agua caliente o vapor de agua bajo condiciones ideales de temperatura, presión (bajas temperaturas y presiones si se compara con otros tipos de metamorfismo) y

composición de fluidos. Estas nuevas rocas forman minerales nuevos o secundarios con diferente química, textural y mineralogía (Browne, 2022).

Existen varias manifestaciones de actividades hidrotermales, entre las que se encuentran las vetas, vetillas, stockwork, diseminado y roca alterada (Griem, 2020).

Figura 2: Ejemplos de un depósito mineral hidrotermal.



Fuente: Mahmut (2023).

- Vetas: son formaciones tabulares, cristalizaciones de fases acuosas en el ambiente hidrotermal.
- Vetillas: son vetas de menor extensión y grosor conectadas a una veta principal.
- Stockwerk: hace referencia a un conjunto de vetillas y vetas.
- Diseminado: hace referencia a una mena se encuentra dispersa en la roca
- Roca alterada: hace referencia a cuando las transformaciones se observan en toda la roca.

1.3.3. Yacimiento de óxido de hierro

Los minerales se encuentran en ambientes ígneos, metamórficos y sedimentarios (ASIMET, 2022). La calidad y composición del mineral depende de la región geográfica y de la edad geológica en que se formó (Cenozoica, Mesozoica, Paleozoica, Pre-Cambriana). Los yacimientos de óxidos de hierro de acuerdo con su composición química se clasifican y en óxidos, carbonatos o compuestos de carbono, sulfuros y silicatos.

Para la extracción, el mineral de hierro se somete a:

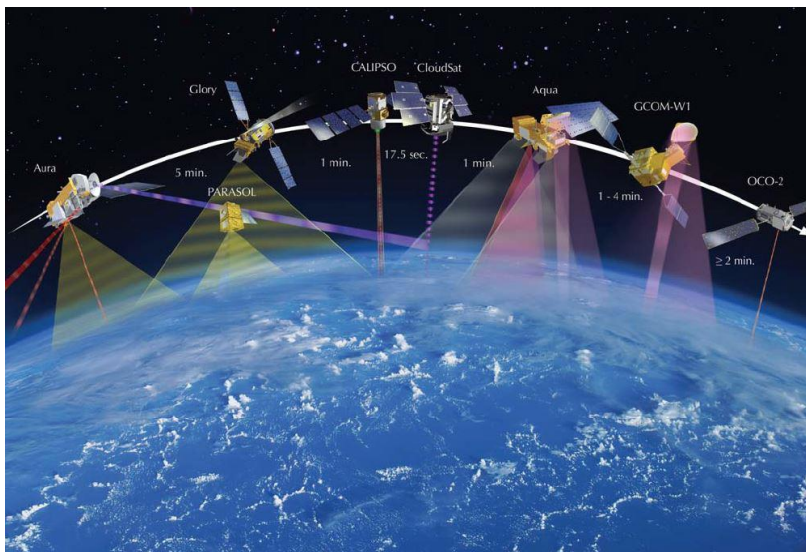
- Exploración de la geología de la región para encontrar las mejores prospecciones de mineral.
- Perforación y explotación del mineral.
- Transporte a la trituradora primaria para su procesamiento.
- El mineral triturado se clasifica en cribas, como productos gruesos y finos.
- Apilación para el acopio.
- Comercialización.

En Latinoamérica las principales minas de hierro se encuentran en Bolivia, Brasil, Colombia, México, Perú y Venezuela. A nivel mundial los principales productores de hierro son Australia, Brasil, Estados Unidos y Canadá (BHP, 2021). En este sentido, en el año 2023 la producción mundial de mineral de hierro fue de 2.500 millones de toneladas métricas (Fernández, 2024)

1.3.4. Teledetección

La teledetección es también conocida como detección o percepción remota y es la obtención de información sobre un objeto distante. La fotografía es la forma más común de teledetección, la fotografía se obtiene mediante la detección y medición de la radiación electromagnética reflejada o emitida por los objetos de interés, esto porque los satélites llevan instrumentos o sensores que miden la radiación electromagnética reflejada o emitida. En consecuencia, la teledetección es la ciencia y tecnología encargada de obtener información sobre objetos o áreas a distancia desde satélites, aviones o drones, sin estar en contacto directo con ellos.

Figura 3: La Teledetección.



Fuente: Díaz (2024)

Los sensores remotos son una de las más valiosas herramientas para identificar los yacimientos minerales. Los sensores remotos son sistemas o instrumentos que capturan la información de un objeto a distancia (remoto). Consecuentemente, la teledetección o percepción remota (remote sensing) se refiere a la adquisición de datos de la superficie terrestre (escaneándola a distancia) y al posterior procesamiento e interpretación de esos

datos (NASA, 2020). La aplicación puede ser en meteorología, color oceánico, mapeo del suelo, calidad del aire y minería.

1.3.5. Principales componentes de la teledetección

Fuente de energía: Por lo general es el sol, que emite energía que interactúa con el satélite para la toma de imágenes de la superficie de la Tierra, estos son los sensores remotos pasivos. Los sensores activos proporcionan su propia fuente de energía para la iluminación.

Interacción con la atmósfera: La radiación puede ser absorbida, reflejada o dispersada por los componentes de la atmósfera.

Interacción con la superficie terrestre: La radiación interactúa con los objetos en la superficie terrestre, donde puede ser reflejada, absorbida o transmitida.

Detección y medición: Los sensores montados en plataformas como satélites, aviones o drones capturan la radiación reflejada o emitida por la superficie terrestre.

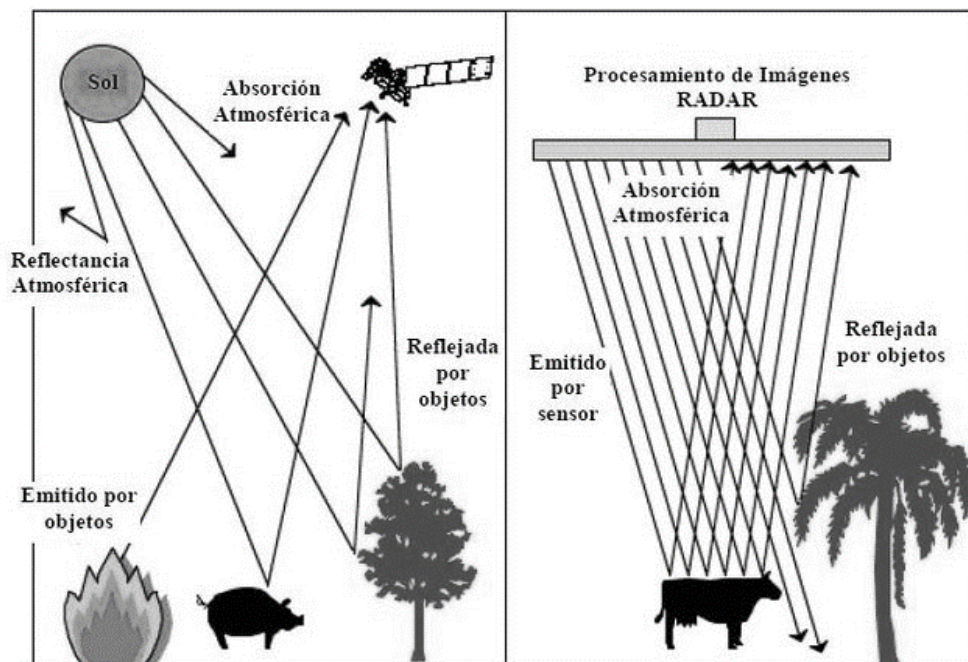
Procesamiento y análisis: Los datos capturados se procesan y analizan para extraer información útil sobre las características físicas y químicas de los objetos o áreas observadas. Este último proceso lo realiza un técnico en tierra.

1.3.6. Tipos de teledetección

- **Teledetección pasiva:** Utiliza la radiación natural reflejada o emitida por los objetos, generalmente utiliza la luz solar. Ejemplo: imágenes satelitales ópticas ASTER.
- **Teledetección activa:** Utiliza una fuente de radiación artificial que el sensor emite y luego detecta la radiación reflejada. Ejemplo: SENTINER-radar y LIDAR.

La teledetección pasiva emplea sensores que miden la cantidad de energía solar reflejada por un objeto en la superficie terrestre mediante la combinación de múltiples de bandas (o longitudes de onda) y las convierten en datos digitales. La teledetección activa es el proceso de teledetección que funciona con su propia fuente de emisión o luz, estos dispositivos emplean microondas, que son relativamente inmunes a las condiciones meteorológicas. La **Figura 4** ejemplifica la teledetección pasiva y activa (Lara, 2016).

Figura 4: Sensores pasivos que captan la radiación reflejada por los objetos a partir de la energía solar (izquierda) y sensores activos que tienen su propia fuente de energía (derecha).



Fuente: Lara (2016).

1.3.7. Ventajas de la teledetección

- **Cobertura amplia:** Capacidad de monitorear grandes áreas de manera rápida y eficiente.

- **Accesibilidad remota:** Posibilidad de acceder a áreas remotas y de difícil acceso.
- **Datos multiespectrales:** Proporciona información en diferentes bandas del espectro electromagnético, permitiendo una mejor caracterización de los objetos y superficies.

1.3.8. Limitaciones de la teledetección

Resolución espacial: Los sensores tienen diferentes resoluciones, es decir tamaño de píxel de la imagen. Cuanto más alta es la resolución del píxel, menor es el área que cubre un solo píxel. Las limitaciones en la resolución espacial pueden dificultar la identificación de objetos pequeños.

Resolución Temporal: Es el tiempo que tarda un satélite para completar un ciclo de órbita. Cuanto más tiempo pasa entre visitar un sitio, menor es la temporalidad.

Condiciones atmosféricas: La presencia de nubes y otros fenómenos atmosféricos pueden afectar la calidad de las imágenes. La detección mediante imágenes satelitales en sitios tropicales es difícil por la menor cantidad de imágenes libres de nubosidad disponibles.

Costos: Equipos y procesamiento de datos pueden ser costosos; para estudios especializados se requiere de supercomputadoras.

1.3.9. Plataformas de teledetección

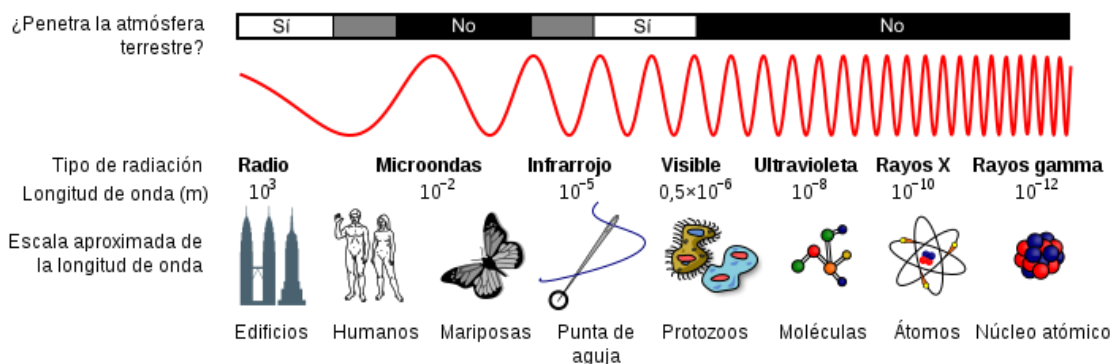
Las plataformas son los satélites, por ejemplo, los LANDSAT, METEOSAT, SPOT, ASTER, GEOEYE o aviones que transportan los equipos o sensores requeridos para la captura, almacenamiento y transmisión de las imágenes. En la actualidad, existen tres tipos de plataformas de acuerdo con la distancia que tienen de la superficie terrestre: nivel superficial, aéreas, satelitales.

Los datos adquiridos de los satélites son las imágenes satelitales; las cuales se pueden aplicar a diversos campos de estudio relacionados con la cobertura de la tierra, tipos de vegetación, cuerpos de agua y fenómenos hidrológicos, temperatura y clima de la superficie terrestre, identificación de sitios de interés mineralógicos, etc.

1.3.10. Espectro electromagnético

Se denomina espectro electromagnético al conjunto de todos los tipos de radiación que se desplazan en ondas. Se denomina espectro electromagnético a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) un objeto. El espectro electromagnético se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la radiación ultravioleta, la luz visible y la radiación infrarroja, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio. La **Figura 5** indica el espectro electromagnético de algunos elementos.

Figura 5: Diagrama del espectro electromagnético, mostrando el tipo y longitud de onda.

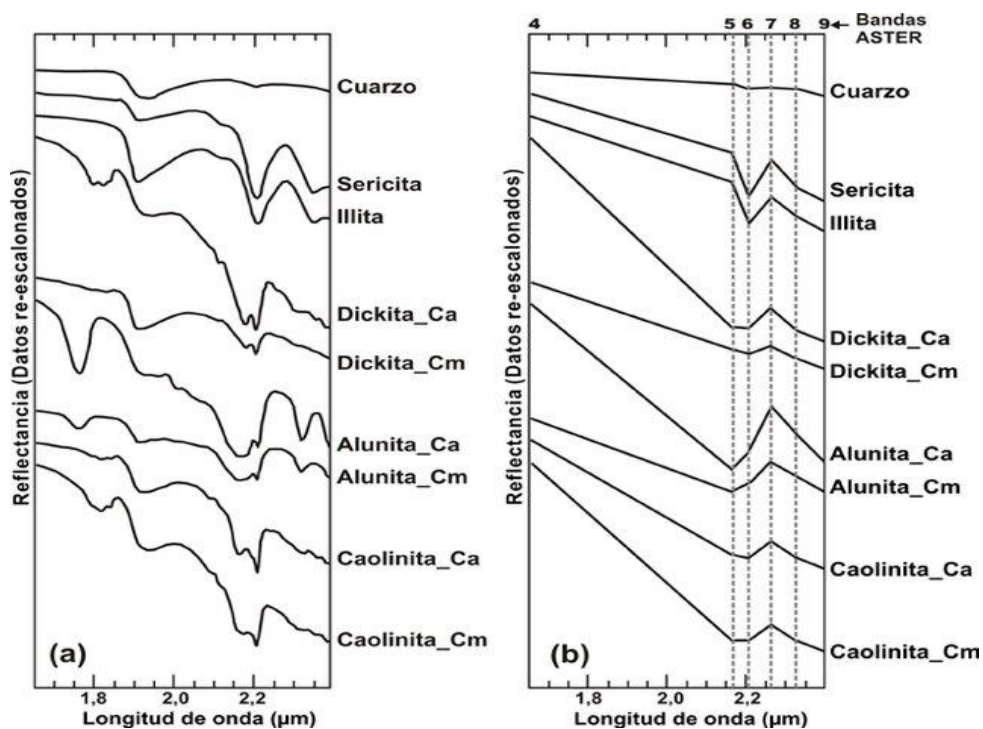


Fuente: Agencia Nacional del Espectro Visible de Colombia.

Cada objeto tiene una firma espectral, es decir que la cantidad de radiación solar que un determinado mineral refleja transmite y dispersa debido a su composición química que es

única (posee “huella dactilar”). En la **Figura 6**, se indica la firma espectral de algunos minerales encontrados en Los Menucos – Río Negro (Ducart et al., 2005). Los Minerales encontrados considerando el intervalo de 1,6 a 2,4 μm , que coincide con las bandas espectrales 4 a 9 de ASTER (Tabla 1) son dickita Ca y dickita Cm (dickita de cristalinidad alta y media), alunita Ca y alunita Cm (alunita de cristalinidad alta y media), caolinita Ca y caolinita Cm (caolinita de cristalinidad alta y media).

Figura 6: Firmas espectrales de campo de minerales de alteración hidrotermal de Los Menucos. Las mismas firmas espectrales de la Figura (a) corregidas a la resolución espectral de ASTER (b).



Fuente: Ducart et al. (2005).

Asimismo, las imágenes multispectrales se pueden utilizar en estudios de cobertura vegetal, por ejemplo, para determinar la producción de biomasa, determinar la presencia de plagas o la salud de la vegetación, monitoreo del crecimiento de los bosques, alcance de

incendios mediante la combinación de bandas y el cálculo de los índices de vegetación. Para estudios de recursos hídricos como la dinámica de cuerpos de agua, estrés hídrico, presencia de agentes contaminantes y turbidez. Para investigaciones en suelos como tipos y calidad de los suelos, nivel de humedad, y también pueden ayudar a distinguir rocas superficiales. Para estudios de la atmósfera y el clima, donde se puede analizar la calidad del aire y la presencia de contaminantes o el monitoreo de lluvias y tormentas (Martínez-Barbáchano y Solís-Miranda, 2018). En minería y geología son útiles para detectar los afloramientos, capas de roca meteorizada, controlar la vegetación en las zonas de exploración, monitorización de pozos abiertos situados en la superficie durante la extracción, identificar zonas de explotación, viabilidad y restauración de los terrenos tras la explotación minera (EOS Data Analytics, 2024).

1.3.11. Aplicaciones de la teledetección

La teledetección es una herramienta esencial en múltiples disciplinas debido a su capacidad para proporcionar datos precisos y actualizados a gran escala.

- **Meteorología:** Monitoreo y predicción del clima y fenómenos atmosféricos.
- **Agricultura:** Evaluación de la salud de cultivos, detección de plagas y gestión de recursos hídricos.
- **Geología y minería:** Mapeo geológico, exploración de recursos minerales y monitoreo de desastres naturales como terremotos y deslizamientos de tierra.
- **Gestión ambiental:** Monitoreo de la deforestación, gestión de recursos hídricos y evaluación de impactos ambientales.

- **Urbanismo y planificación territorial:** Monitoreo del crecimiento urbano, planificación de infraestructuras.

1.3.12. Imagen satelital ASTER

Una imagen satelital es una representación visual de la información capturada por un sensor o satélite artificial (sensor remoto). Las imágenes ASTER (captadas desde 1999 por el satélite Terra) presentan una órbita heliosincrónica a una distancia de 705 kilómetros, con un ciclo de repetición de 16 días, un ancho de barrido de 60 kilómetros y una distancia entre orbitas de 172 Km. ASTER está compuesto por 3 subsistemas, VNIR, SWIR y TIR; cada uno de cuales presenta características particulares tales como 3 bandas en la región espectral del visible e infrarrojo cercano (VNIR) con una resolución espacial de 15 metros; 6 bandas en la región espectral del infrarrojo de onda corta (SWIR) con una resolución espacial de 30 metros y 5 bandas en el infrarrojo térmico con una resolución espacial de 90 metros (Geo Soluciones, 2019). ASTER también presenta un telescopio con visión hacia atrás que escanea en la región espectral de la banda 3B, lo que nos permite realizar modelos digitales de terreno (MDT) por pares estereoscópicos. La **Tabla 1** indica las características de las 14 bandas de las imágenes satelitales ASTER.

Tabla 1: Características de las 14 bandas de las imágenes satelitales ASTER.

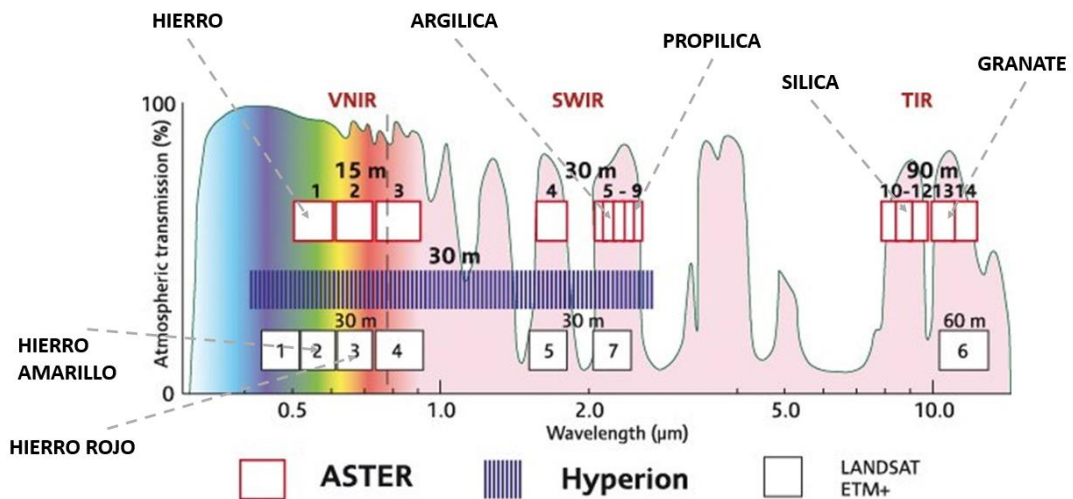
| Subsistema | Banda n* | Rango Espectral | Resolución Espacial | Descripción |
|------------|----------|---------------------------|---------------------|----------------------------------|
| VNIR | 1 | 0.52-0.60 μm | 15 m | Visible e infrarrojo cercano 1 |
| | 2 | 0.63-0.69 μm | | Visible e infrarrojo cercano 2 |
| | 3N | 0.78-0.86 μm | | Visible e infrarrojo cercano 3N |
| | 3B | 0.78-0.86 μm | | Visible e infrarrojo cercano 3B2 |
| SWIR | 4 | 1.600-1.700 μm | 30 m | Infrarrojo de onda corta 4 |
| | 5 | 2.145-2.185 μm | | Infrarrojo de onda corta 5 |
| | 6 | 2.185-2.225 μm | | Infrarrojo de onda corta 6 |
| | 7 | 2.235-2.285 μm | | Infrarrojo de onda corta 7 |
| | 8 | 2.295-2.365 μm | | Infrarrojo de onda corta 8 |
| | 9 | 2.360-2.430 μm | | Infrarrojo de onda corta 9 |
| TIR | 10 | 8.125-8.475 | 90 m | Infrarrojo térmico 10 |
| | 11 | 8.475-8.825 | | Infrarrojo térmico 11 |
| | 12 | 8.925-9.275 | | Infrarrojo térmico 12 |
| | 13 | 10.25-10.95 | | Infrarrojo térmico 13 |
| | 14 | 10.95-11.65 | | Infrarrojo térmico 14 |

Fuente: ArcMap, 2021; Geo Soluciones, 2019.

Las bandas de las imágenes satelitales ASTER (u otras, como las Landsat) permiten discriminar entre distintos tipos de litología e identificar minerales. Las bandas más utilizadas para el mapeo de minerales son las correspondientes al espectro visible (VNIR, resolución = 15 m) e infrarrojo (SWIR, resolución = 30 m). El procesamiento de las imágenes (o específicamente una combinación de las bandas de las imágenes) consiste en operaciones que

transforman una imagen en otra donde se resalta una cierta información de interés y atenúa otra que no es relevante para el objetivo de estudio. El procesamiento dependerá del objetivo de estudio y de los recursos tecnológicos disponibles. El procesamiento se detallará en la sección de métodos, sin embargo, es importante mencionar que ciertas longitudes de onda, independientemente del tipo de imagen satelital al que pertenezcan, permiten identificar y mapear ciertos minerales en la corteza terrestre, tal como se ejemplifica en la **Figura 7** (Waldhoff et al., 2008).

Figura 7: Bandas espectrales de ASTER, HYPERION y Landsat ETM



Fuente: Waldhoff et al. (2008).

En la **Figura 7**, los cuadros rectangulares (rojo: ASTER, negro: Landsat ETM+, azul: HYPERION) indican las bandas de los sensores. La resolución espacial respectiva se indica en la parte superior de los cuadros. La curva coloreada en el fondo representa la transmisión atmosférica en función de la longitud de onda. La línea discontinua vertical marca el margen aproximado de luz visible. Abreviaturas de secciones del espectro de luz visible: VNIR (visible e infrarrojo cercano), SWIR (infrarrojo de onda corta) y TIR (infrarrojo térmico). En

este sentido, las bandas de VNIR de ASTER (**Tabla 1**) pueden ser utilizadas para detectar vegetación y de óxidos de hierro presentes en rocas y en suelos. Mientras que el rango espectral de las bandas del SWIR abarcan la zona de absorción característica de filosilicatos, carbonatos y minerales de alteración. Las cinco bandas del TIR son utilizadas para estimar el contenido de sílice en las rocas (Región et al., n.d.). La finalidad de este estudio es mapear los minerales en una zona desértica ubicada en la cordillera sur del Ecuador mediante la combinación de bandas ASTER.

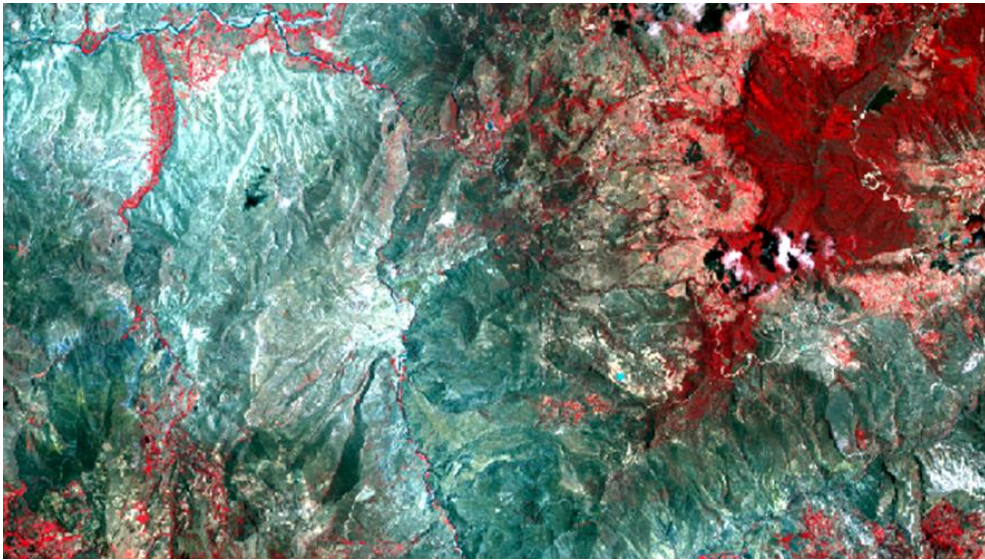
1.3.13. Procesamiento de imágenes ASTER

Corrección radiométrica

La corrección radiométrica tratar los valores de píxel de una imagen satelital para que estos sean homogéneos en intensidad, al corregir las imperfecciones debidas a distorsiones por fallos de los propios sensores del satélite, alteraciones en el movimiento del sensor a bordo del satélite o la interferencia de la atmósfera. La corrección radiométrica permite mejorar (homogenizar) los pixeles de la imagen satelital. Esto lo hace eliminando o reduciendo los efectos de los factores atmosféricos, de sensores y de iluminación (Gis&Beers, 2018).

En el caso de las imágenes satelitales ASTER para la detección de los yacimientos minerales, la calibración radiométrica se realiza para crear imágenes VNIR (3 bandas), SWIR (6 bandas) y TIR (5 bandas), y se obtiene una imagen como la indicada en la Figura 6, pero dependerá de las características del sitio de estudio. En la **Tabla 1** se indican y describen las bandas que constituyen cada una de estas imágenes.

Figura 8: Imagen ASTER corregida radiométricamente.



Fuente: Elaboración propia con información del sitio web Earth Explorer USGS

Calibración atmosférica

La calibración atmosférica quita los efectos que ocasionan los aerosoles, nubosidad y la radiación intrínseca. Es decir, la corrección atmosférica se aplica a las imágenes satelitales ASTER para eliminar el efecto de los aerosoles en la atmósfera y la radiancia intrínseca que se introduce en el sensor y se ve reflejado en la imagen (Revista Geográfica de América Central, 2014).

Apilamiento de bandas - layer stacking

Permite realizar combinaciones de bandas que generan nuevas imágenes de múltiples bandas, las cuales permiten observar de una mejor manera la cobertura del suelo. La finalidad es combinar múltiples bandas para producir una nueva imagen de múltiples bandas, denominadas como imágenes multibanda, útiles para visualizar e identificar las clases de cobertura del suelo disponibles. Para apilar varias las bandas, estas deben tener la misma extensión (número de filas y columnas) (Geoinformers, 2019).

1.3.14. Identificación de yacimientos mediante teledetección

Máscaras

En las imágenes se pueden observar varios elementos: vegetación, nubes, agua entre otros. El enmascaramiento hace referencia a la identificación de estos elementos mediante las técnicas de combinación y cociente de bandas.

Álgebra de bandas - razones de bandas

Para seleccionar las bandas en la que los minerales presentan mayor absorción, elaboran las regiones de interés mediante (ROI), se define el umbral (threshold) con el histograma que se genera. El umbral de varios objetos, tipos de vegetación, zonas urbanas y minerales ya está previamente definido. En la **Tabla 2** se indica los objetos a enmascarar, las bandas y los umbrales definidos para el presente estudio.

El álgebra de bandas es una operación aritmética mediante el uso de las bandas de las imágenes satelitales. Puede elegir algoritmos predefinidos o puede introducir su propia fórmula de línea única. El álgebra de bandas es una operación aritmética mediante el uso de las bandas de las imágenes satelitales. Puede elegir algoritmos predefinidos o puede introducir su propia fórmula de línea única.

Tabla 2: Máscaras creadas mediante la combinación de bandas ASTER.

| TIPO | Combinación de Bandas | Color-código | Umbral | Observación | * | Referencia del Valor de umbral |
|----------------------------|---|--------------|---------------|------------------------------|---|---|
| Máscara | | | | | | |
| Máscara de vegetación NDVI | NDVI | Verde | 0.5-1 | | | (Rajan Girija y Mayappan, 2019). |
| Zonas Urbanas | | Plomo | | No necesaria para el estudio | | |
| Sombras y agua | VNIR+SWIR Band 3 | Azul | 0.5-1 | | X | (Universidad Politécnica Nacional del Perú, 2023) |
| Razones de bandas | Bandas | | | | | |
| Máscara de vegetación NDVI | NDVI Band 2 / Band 3 | Verde | 1.1-3 | | X | (Universidad Politécnica Nacional del Perú, 2023) |
| Ion Hierro (III) | SWIR+VNIR (Band 2 / Band 1) | Rojo | 2.3-3 | | X | (Rajendran & Nasir, 2019) |
| Algebra de bandas | | | | | | |
| Ion Hierro(II) | SWIR+VNIR (Band 5 / Band 3) + (Band 1 / Band 2) | Naranja | 2.3-3 | | X | (Rajendran & Nasir, 2019) |
| Epidota | SWIR+VNIR (Band 7 / Band 9) / Band 8 | Amarillo | 2.17-2.4 | | X | (Rajendran & Nasir, 2019) |
| Moscovita | SWIR+VNIR (Band 5 / Band 7) / Band 6 | Morado | 2.1-2.4 | | X | (Rajendran & Nasir, 2019) |
| Alunita | SWIR+VNIR (Band 4 + Band 6) / Band 5 | Café | 2.15- 2.30 | | X | (Rajendran & Nasir, 2019) |

Fuente: Elaboración propia.

1.3.15. Muestreo de suelos

El patrón de muestreo depende del objetivo de estudio, condiciones del suelo, geología, hidrología y meteorología. Además, depende de la accesibilidad pues en muchos casos la distancia y las vías de acceso son un problema en los ecosistemas de montaña andino.

Patrón de muestreo

Se refiere a las formas en que se puede distribuir los puntos de muestreo en el sitio de estudio. Se recomienda un patrón de muestreo combinado de al menos dos técnicas de muestreo, elegidas dependiendo del tipo y la distribución de los minerales, para obtener una representación exacta de los posibles minerales en el sitio de estudio. Luego de seleccionado el patrón de muestreo, se elabora un mapa donde se especifican los puntos de muestreo para que sea la guía para la toma de muestras en campo.

Patrón de muestreo estadístico

Es un muestreo regular que no requiere de conocimiento previo de la extensión exacta del sitio de estudio. Sigue un patrón geométrico de rejillas (ej. regulares, triangulares, circulares, etc.) y toma las muestras a intervalos regulares para cubrir uniformemente toda el área seleccionada. Es eficaz para determinar zonas críticas y patrones espaciales (en superficie). Los patrones de muestreo dentro de esta clasificación son en rejilla, triangular, circular, simple, múltiple, diagonal (Guía para Muestreo de Suelos, 2020.)

Patrones de muestreo aleatorio

Recomendado para sitios homogéneas menores a 5 ha delimitadas por referencias visibles.

Situaciones no-muestréales

Indican que no se deben tomar muestras que pudieron ser alteradas por personas, animales o por alguna actividad.

No tomar muestras de suelo a la orilla de los caminos, alambrados, bebederos, dormideros, montes, surcos muertos, antiguas construcciones y sectores de carga de fertilizantes o agroquímicos.

Las muestras de suelo virgen se deberán tomar dentro del monte o debajo de los alambrados, estas sirven como puntos de comparación con los suelos bajo cultivo.

Tipo y cantidad de muestras a tomar

Las muestras se toman una vez seleccionado el patrón de muestreo. A continuación, se detalla algunos requerimientos en cuanto a la toma de muestras en ecosistemas de montaña andinos, los tipos de muestras son:

- **Muestra simple** Las muestras colectadas en una sola extracción, en un tiempo y lugar particular.

Figura 9: Procedimiento para el muestreo de suelos.



Fuente: Articulación Sena -Agrícola (2012).

- **Muestra compuesta** Es una muestra constituida por un conjunto de muestras simples debidamente mezcladas. Su resultado de laboratorio es un valor analítico medio del mineral analizado. El número de muestras simples constitutivas

depende del mineral analizado y del diseño de muestreo. Permite un muestreo mayor sin aumentar el número de muestras a analizar en laboratorio.

Tamaño de la muestra

El tamaño de la muestra para determinaciones químicas, mineralógicas, fisicoquímicas y texturales debe ser tal que proporcione la conservación de duplicados. La cantidad no debe ser inferior a 500 g y es más recomendable una muestra de 2 kg, en general cuanto más grueso es el material mayor cantidad de muestra se necesita.

1.4.ESTADO DEL ARTE

En Pumpuentza perteneciente a la provincia de Morona Santiago se utilizó las imágenes satelitales ASTER para identificar minerales de caolinita, goetita, hematita, jorosita y pirofilita (Minas et al., 2021.). Las imágenes ASTER tienen una resolución de 15, 30 y 90 m, y se trabajó sobre un área total de 133.000 hectáreas (Minas et al., 2021.).

En los cantones de Girón, Nabón y Oña se utilizaron las imágenes satelitales ASTER y LANSAT 8, donde se lograron encontrar minerales como alunita y caolín-esmectita en un área total de 1270 km² (Medina, 2019.).

En estudios relacionados a la utilización de imágenes satelitales se pudo encontrar que en la zona de Zaruma perteneciente la provincia del Oro se realizó un estudio para encontrar yacimientos de alteración hidrotermal para el cual se emplearon imágenes satelitales de tipo ASTER, LANDSAT 8 OLI Y SENTINE 2, donde se determinó que las imágenes satelitales ASTER son mejores para realizarte tipo de estudio, debido a que tienen una mejor resolución y sensibilidad espectral (Mogrovejo, 2021)

En un estudio realizado en Cajamarca poblado de Shicuana en Perú se utilizó imágenes satelitales de tipo ASTER para prospectar depósitos minerales, se logró encontrar minerales de argílica moderna (illita, montmorillonita) y minerales de argílica avanzada (caolinita, alunita y sílice) (Guerrero, 2020).

En la zona de Huambocancha Alta perteneciente al vecino país de Perú se utilizó una imagen satelital ASTER descargada del USGS; teniendo como finalidad encontrar yacimientos de alteración hidrotermal en donde se encontraron minerales de: alunita, caolinita, illita y montmorillonita (Mariñas, 2018).

Basándonos en los estudios, tesis y artículos científicos anteriores podemos afirmar que la utilización de imágenes satelitales de tipo ASTER, la combinación de bandas y álgebra de mapas ha facilitado el descubrimiento de yacimientos minerales, los principales minerales encontrados en estos trabajos corresponden a: caolinita, alunita y óxidos de hierro, es por ello que consideramos probar la utilidad de las imágenes ASTER para identificar minerales en el Ecuador.

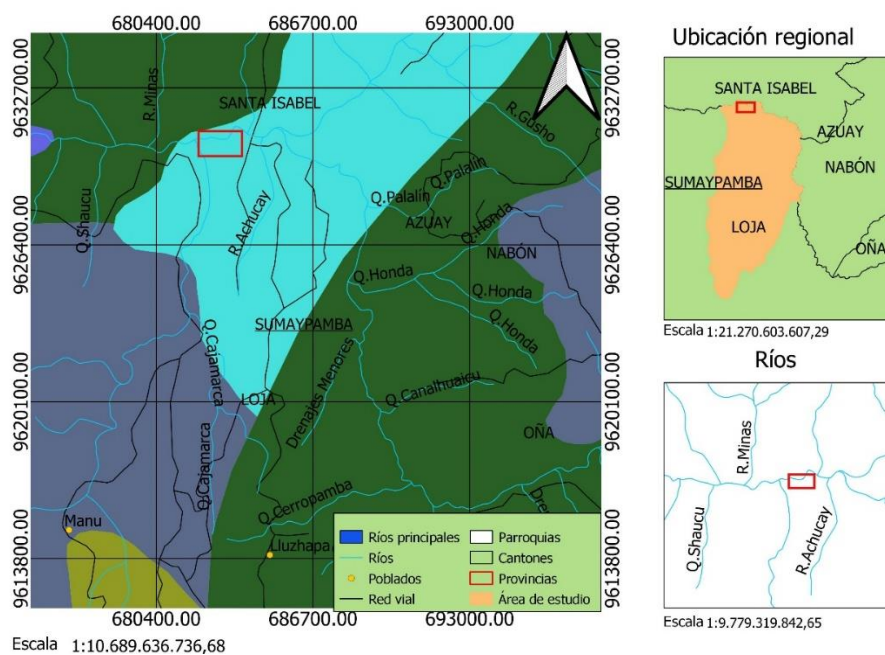
CAPÍTULO 2

APLICACIÓN METODOLÓGICA

2.1 Sitio de estudio

El sitio de estudio se encuentra ubicado al Sur del Ecuador, entre los cantones Santa Isabel perteneciente a la provincia de Azuay y Saraguro perteneciente a la provincia de Loja. La **Figura 10** indica la ubicación de los cantones. El sitio de estudio tiene un área de 77.71 Km² (largo = 10.53 km; ancho = 7.38 km) y se indica en la **Figura 11**.

Figura 10: Ubicación geográfica del sitio estudio en el Ecuador y dentro de los cantones Santa Isabel y Saraguro de las provincias de Azuay y Loja.



Fuente: Elaboración propia con información del Instituto Geográfico Militar del Ecuador (2003).

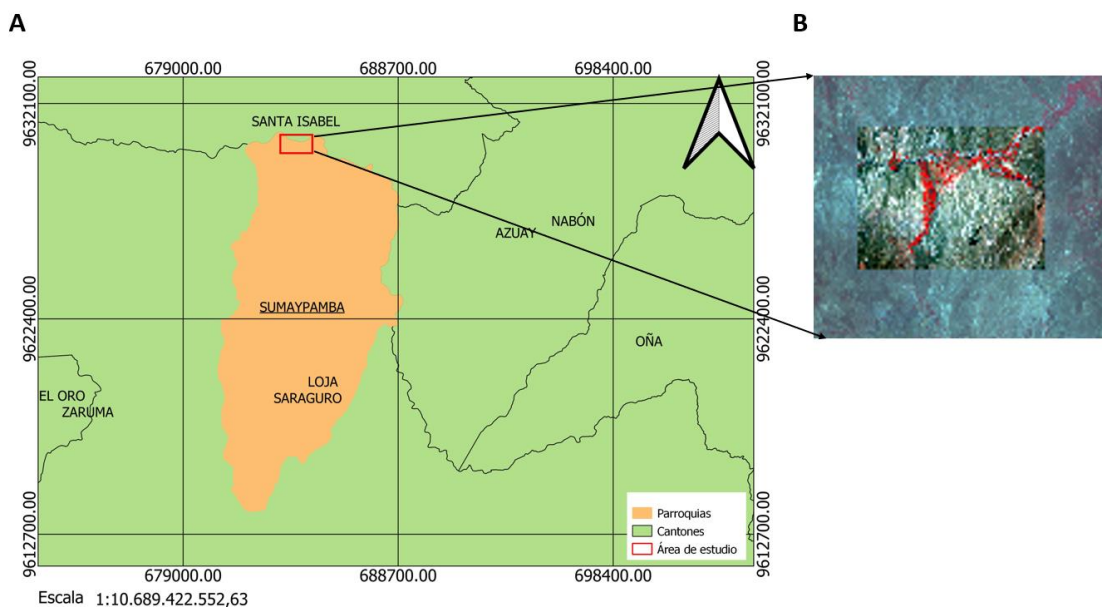
El sitio de estudio posee un clima temperado-seco, la lluvia anual varía entre 50 y 600 mm y la temperatura diaria varía entre 10 y 26 °C.

La vegetación puede ser: cinchona, cascarilla, ficus, etc. y está dispersa en el sitio de estudio, siendo mayor la presencia de suelo desnudo.

Los suelos son aluviales, con gran contenido de arcillas, la disponibilidad de materia orgánica y nitrógeno es media y el pH varía entre neutro y alcalino (7-8). Taxonómicamente corresponden a Entisoles (81.4%), Alfisoles e Inceptisoles (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquia de Sumaypamba, 2015). En mayor medida son suelos Entisoles, estos son suelos minerales derivados de materiales aluviónico y poseen una textura moderadamente gruesa a fina.

La topografía es variable entre plana a extremadamente empinada (Survey Staff, 1999). La geología de la zona está comprendida entre: El grupo Ayancay que se expande desde el cantón de Santa Rosa hasta el cantón Cuenca, la formación volcánica Saraguro que se encuentra formada por lavas andesíticas y piroclasto y la formación Chinchillo que posee lavas de riolitas y andesitas (Survey Staff, 1999)

Figura 11: (a) Ubicación del sitio de estudio dentro de los cantones Santa Isabel y Saraguro de las provincias de Azuay y Loja, respectivamente y (b) acercamiento al sitio de estudio en una imagen satelital ASTER con dimensiones de largo = 10.53 km; ancho = 7.38 km.



Fuente: Elaboración propia con información del Instituto Geográfico Militar del Ecuador (2003).

En consecuencia, el sitio de estudio se encuentra en una zona desértica como se indica en la **Figura 12**, con suelo desnudo y de baja nubosidad, por lo que es factible para la aplicación de teledetección para la identificación de yacimientos minerales.

Figura 12: Imagen de Sumaypamba donde se visualiza las características de suelo desnudo, árido y el clima desértico.



Fuente: Elaboración propia.

2.2 Teledetección: procesamiento de información y álgebra de mapas

2.2.1 Selección de la imagen satelital ASTER

Se obtuvieron las imágenes satelitales ASTER (USGS EARTH EXPLORER: <https://earthexplorer.usgs.gov/>). Es importante seleccionar imágenes donde el porcentaje de nubosidad sea el menor posible (en este caso: < 10%). Esta es una característica deseada para la identificación de los yacimientos minerales.

Es indispensable que las imágenes seleccionadas tengan una baja cobertura nubosa sobre el sitio de estudio para tener visibilidad y claridad ya que las nubes bloquean la superficie terrestre, impidiendo que los sensores satelitales capturen imágenes del terreno y poder detectar minerales. Además, como los satélites utilizan diversas bandas del espectro electromagnético para identificar la composición de la superficie terrestre, las nubes pueden reflejar y absorber la radiación en estas bandas y distorsionar los datos. Si no se consiguen imágenes libres de nubosidad se requiere de técnicas adicionales de procesamiento y

corrección, lo cual puede no siempre ser exitoso y además añade complejidad y tiempo al análisis.

Teniendo en cuenta lo anterior, se seleccionó una imagen satelital con un porcentaje de nubosidad menor al 10%.

La imagen ASTER tiene un área de 60 km x 60 km y una resolución espacial (tamaño de pixel) que varía entre 15 a 90 metros, dependiendo de la banda espectral, y tiene 14 bandas espectrales que cubren desde el visible hasta el infrarrojo térmico. Las imágenes visitan la misma área aproximadamente cada 16 días.

La imagen seleccionada fue tomada el día 20 de abril del 2015. La imagen es ASTER nivel T1 V3 que hace referencia a las imágenes ya están ortorectificadas. Este es el proceso fotogramétrico por el cual se asegura que los pixeles de la imagen estén en su posición geográfica (ArcMap, 2021) y evitar desplazamientos de las observaciones respecto a lo observado en tierra (González, 2021). La imagen fue recortada a 77.71 km² para abarcar el sitio de estudio de Sumaypamba ya que este terreno presenta las condiciones adecuadas para realizar la teledetección, escasa vegetación, alejada de sitios poblados, poca nubosidad entre otros factores, la zona de estudio corresponde a las coordenadas 675394.71 m E y 9622329.49 m S, 685882.20 m E y 9623055.95 m S, 685701.89 m E y 9630595.73 m S, 675236.81 m E y 9630392.04 m S. El recorte se realizó mediante las herramientas del programa ENVI con dimensiones de 10.53 km de largo y 7.38 km de ancho.

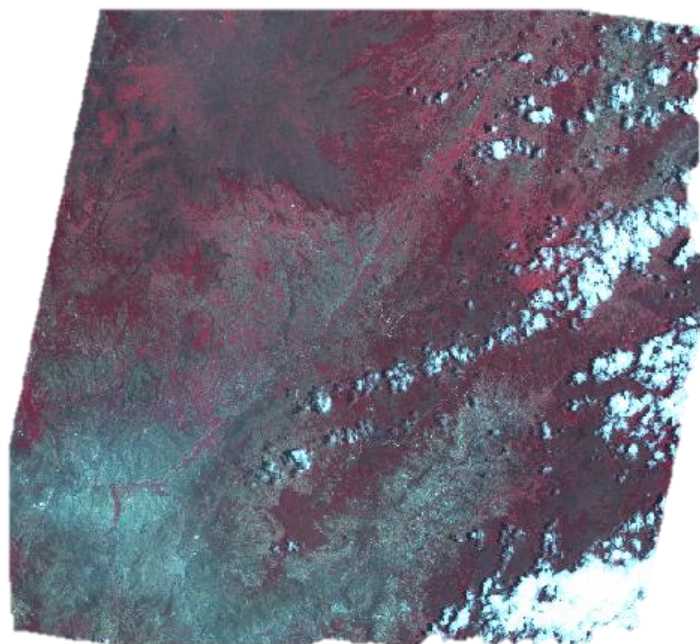
Para el presente estudio utilizamos la imagen ASTER:

AST_L1T_00310022001155014_20150420015710_66236.hdf creada el 2015 04

20.HDF

La **Figura 11** imagen B indica la imagen satelital ASTER tomada para realizar la teledetección.

Figura 13: Imagen satelital ASTER. Fecha 20/04/2015.



Fuente: Elaboración propia con información del sitio web Earth Explorer USGS

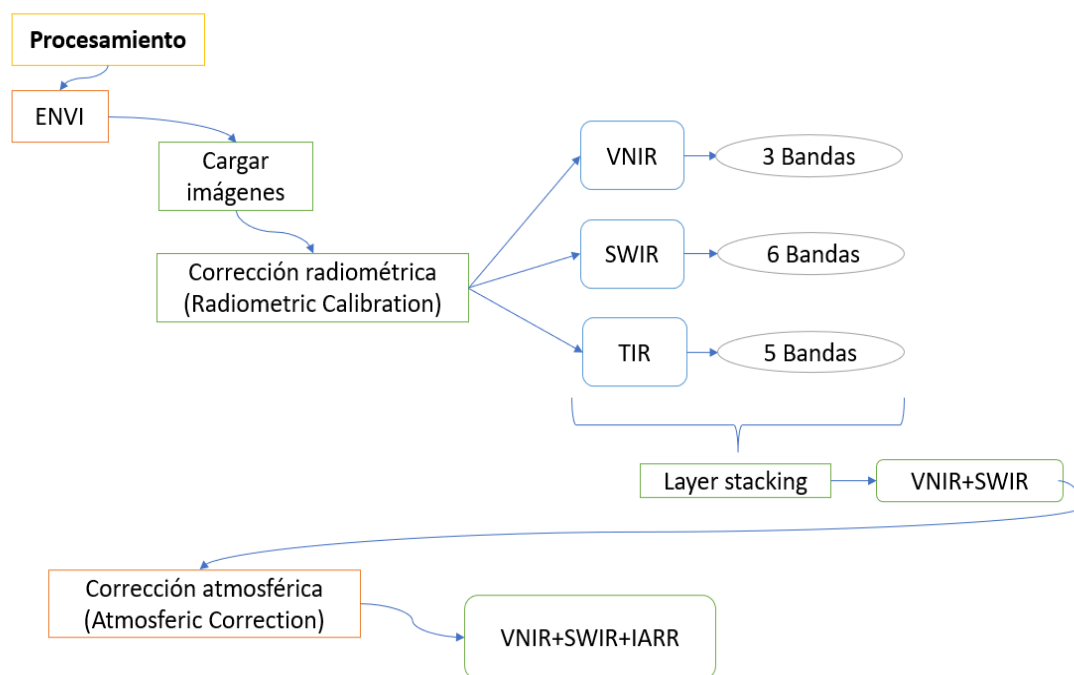
Del conjunto de bandas que conforman la imagen satelital ASTER se tomaron 9 bandas de las cuales se realizaron las combinaciones necesarias para determinar los distintos tipos de minerales presentes en el área de estudio.

2.2.2 Creación de máscaras mediante distintos métodos

La metodología del procesamiento hiperespectral utilizada fue propuesta por Boardman, (OXFORD, 2023) y se encuentra implementada en el programa ENVI 5.1. La **Figura 14** es un diagrama de flujo que resume las actividades realizadas dentro del software ENVI para la calibración radiométrica y atmosférica. La calibración radiométrica tuvo por finalidad corregir las imperfecciones debidas a distorsiones por fallos del sensor (Gis&Beers, 2018) y se realizó para crear las imágenes VNIR (3 bandas), SWIR (6 bandas) y TIR (5 bandas). En la **Tabla 1** se indican y describen las bandas que constituyen cada una de estas

imágenes. La calibración atmosférica mientras tanto eliminó los efectos ocasionados por los aerosoles, nubosidad y la radiación intrínseca (Revista Geográfica de América Central, 2014).

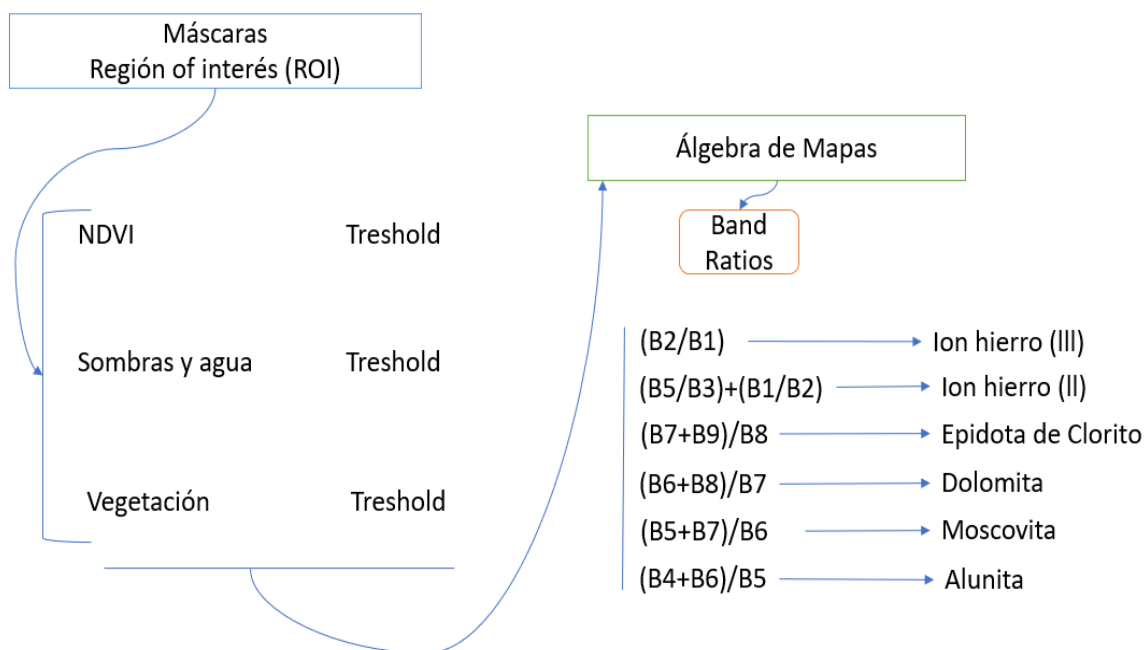
Figura 14: Flujo de actividades dentro del software ENVI para la identificación de yacimientos minerales.



Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 15** se resume las actividades desarrolladas de álgebra de mapas en el software ENVI para la identificación de yacimientos minerales. Para la identificación de los yacimientos minerales se trabajó con máscaras, razones de bandas y álgebra de mapas. Todas ellas son técnicas que permiten identificar la presencia de yacimientos sobre el sitio de estudio. En la **Tabla 2** se indican operaciones aritméticas para la identificación de características del terreno.

Figura 15: Flujograma de algebra de mapas en el software ENVI.



Fuente: Elaboración propia.

2.3 Validación mediante muestreo de minerales en el suelo del sitio de estudio

Las muestras de suelo sirven para validar la presencia de minerales en los sitios indicados en el mapa obtenido.

Si se identifica la presencia de minerales en los sitios indicados en los mapas obtenidos con las imágenes ASTER, significa que, la combinación de bandas utilizadas crear el mapa apropiado y la técnica puede ser utilizada para análisis de presencia de minerales en zonas desérticas de características similares a las del sitio de estudio.

Se tomaron dos muestras compuestas con un peso de 2 kg; cada muestra compuesta está formada de tres muestras simples que se tomaron de acuerdo con un patrón de muestreo. Las muestras se tomaron en los sitios que en las capas indiquen la presencia de mayores contenidos de minerales. Las muestras se enviaron a laboratorio para su respectivo análisis.

El análisis se realizó para validar lo observado en la combinación de bandas de imágenes satelitales.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1 Características de los elementos minerales encontrados mediante combinación de bandas

Los elementos mapeados en la teledetección mediante combinación de bandas fueron Ion Hierro (III), Ion Hierro (II), Epidota, Moscovita, Alunita y se indican en la **Tabla 3** y se describen a continuación:

Tabla 3: Elementos identificados mediante combinación de bandas y codificación.

| | | | | | | | |
|--------------|----------------|-----------------------|------------------|-----------------|---------|-----------|---------|
| Codificación | | | | | | | |
| Elemento | Sombras y agua | Máscara de vegetación | Ion Hierro (III) | Ion Hierro (II) | Epidota | Moscovita | Alunita |

Fuente: Elaboración propia.

Ion hierro(III), Fe^{3+} Se encuentra en forma de polvo, presenta coloración azul, verde o violeta (Formulación Química, 2022).

Ion hierro(II), Fe^{2+} Se encuentra en forma de polvo con una tonalidad negra (Chemicals, 2022)

Epidota, $\text{Ca}^2(\text{Al, Fe})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$, Silicato de hidróxido de hierro que tiene tonalidad verde claro y oscuro (Vives de la cortada, 2022). La epidota tiene su origen en las calizas y esquistos cuando sufren metamorfismo. La epidota también puede ser el producto de una alteración hidrotermal de feldespato, piroxenos, granates y otros (Lumitos, 2023). Sus usos más comunes se encuentran en la joyería con objetos de bajo valor económico y en los museos de geología (Lumitos, 2023).

Moscovita, $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$, Pertenece al grupo de la mica tiene tonalidad: blanca, plateada y marrón (Yandry Maldonado, 2021). Se origina de las rocas ígneas acidas, metabólicas de grado medio-alto. Es frecuente su uso como aislante térmico y eléctrico y también en la industria de la pintura y el papel (Fundación Integra, 2021).

Alunita, $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$, Es un mineral que contiene aluminio y potasio, contiene impurezas que le dan un color similar al del hierro (Asturnatura, 2017). Su origen está relacionado a soluciones frías provenientes de sulfatos ocasionados por la oxidación de sulfuros sobre rocas ígneas. Entre sus usos más comunes es utilizada para crear el papel de alumbre, también es utilizada para obtener aluminio metálico, fertilizantes, cementos entre otros (EcuRed, 2020).

La **Figura 16** ejemplifica los minerales previamente indicados encontrados en el sitio de estudio.

Figura 16: Ejemplificaciones de los minerales encontrados en el sitio de estudio.

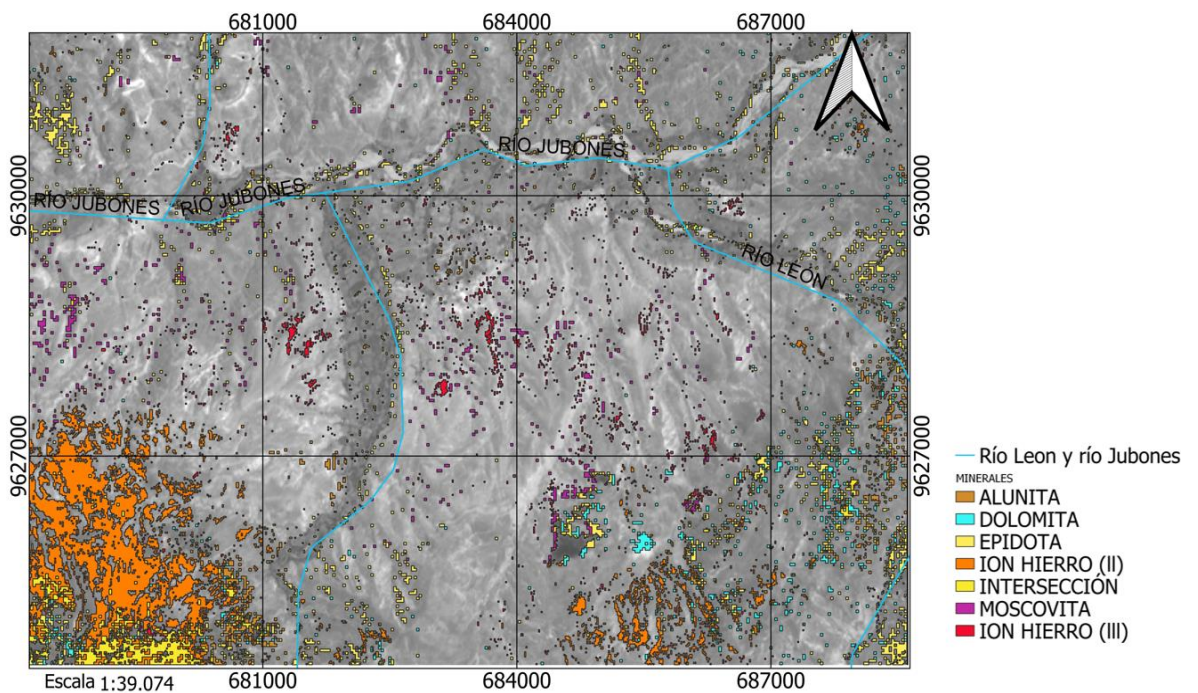


Fuente: Cristalografía y Mineralogía-UCM, 2019.

3.2 Mapeo de los yacimientos minerales

En la **Figura 17** se puede apreciar en el mapa las zonas de alteración hidrotermal, en el que se representa en color café la zona con alteración de alunita, de color celeste la zona con alteración de dolomita, de color amarillo la zona con alteración de epidota, de color tomate la zona con alteración de hierro ferrosos, de color morado la zona con alteración de moscovita, de color rojo la zona con alteración de óxido de hierro y finalmente de color verde la zona en la que interceptan de todos los minerales. La codificación de colores de la **Figura 17** sigue el propuesto en la **Tabla 2** y **Tabla 3** del presente documento.

Figura 17: Sitio de estudio con la presencia de los minerales encontrados.



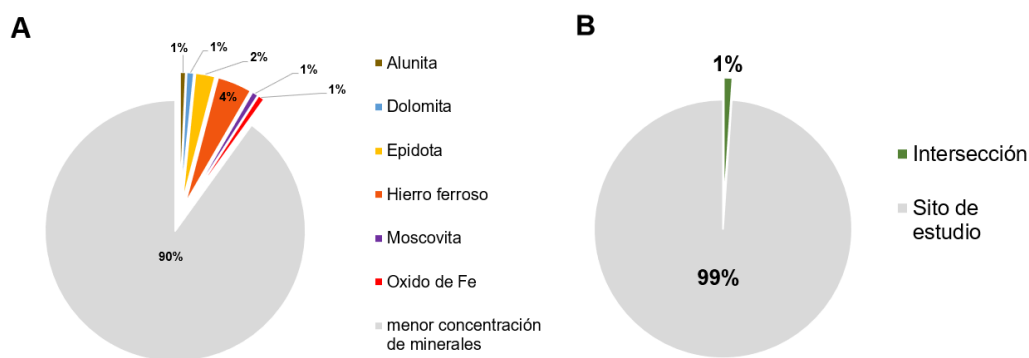
Fuente: Elaboración propia.

3.3 Cuantificación del área con presencia de minerales

Se realizó un análisis estadístico en el programa Excel con la finalidad de determinar el porcentaje de minerales presentes en el área de estudio y de esta manera poder establecer cuál es el mineral que se presenta en una mayor y menor cantidad.

El área de estudio tiene 77.71 km², en la **Figura 18 A** el 90% es terreno que no se ha encontrado la presencia de los minerales estudiados y en el 10% restante existe la presencia de: alunita con 1%, dolomita con 1%, epidota con 2%, ion hierro (II) 4%, moscovita con 1% y ion hierro (III) 1%. En la **Figura 18 B** el 1% indica la intersección de todos los minerales encontrados respecto al total del área de estudio.

Figura 18: Porcentaje de área cubierta por (a) cada tipo de mineral encontrados en el sitio de estudio y (b) el área de intersección de todos los minerales encontrados.



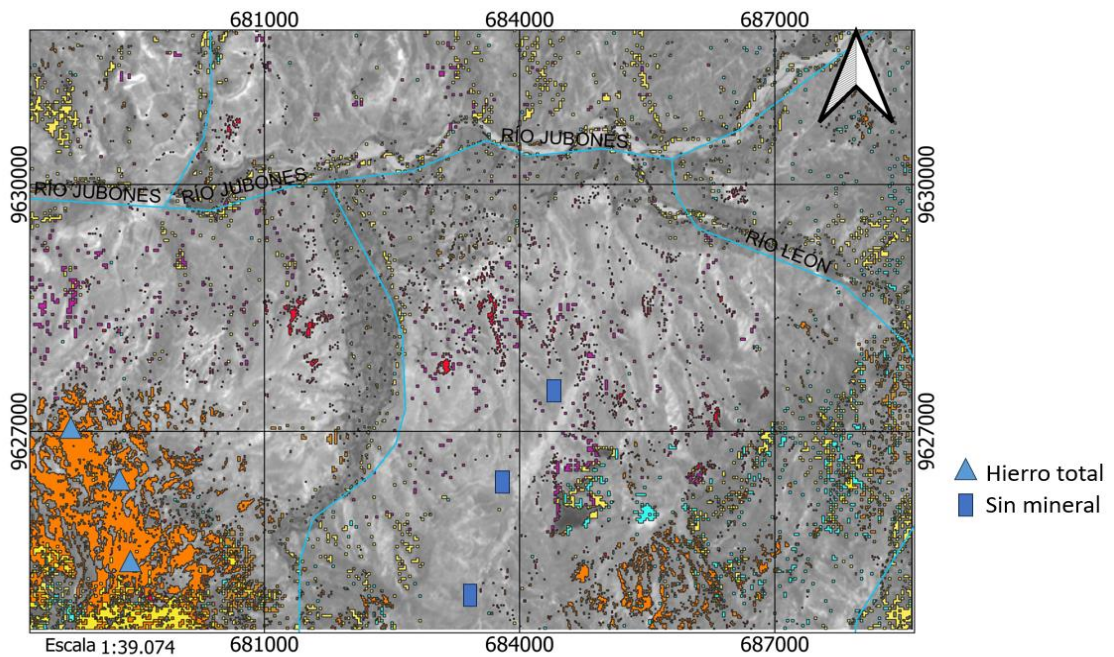
Fuente: Elaboración propia.

3.4 Validación de los resultados mediante muestreo de minerales en el sitio de estudio

Se tomaron dos muestras de suelo compuestas cada una con tres muestras simples, en la **Figura 19** se indican los sitios en donde se tomaron estas muestras.

Los sitios seleccionados dentro del área de estudio, para la toma de muestras de validación, corresponden a las zonas, que, en la teledetección, se encontraron la mayor presencia de minerales de hierro y la menor presencia de los minerales.

Figura 19: Puntos de toma de muestreo de suelos.



Fuente: Elaboración propia.

El mineral seleccionado para análisis de laboratorio es el óxido de hierro que corresponde al ion hierro (II) y ion hierro (III) este se presenta en mayor volumen con respecto a los demás minerales; también se envió una muestra a laboratorio de la zona en donde existe una menor presencia de los minerales estudiados. En la **Tabla 4** se indica los resultados de óxidos de hierro de la zona con presencia de mineral y de la zona en donde existe una menor presencia de los minerales estudiados.

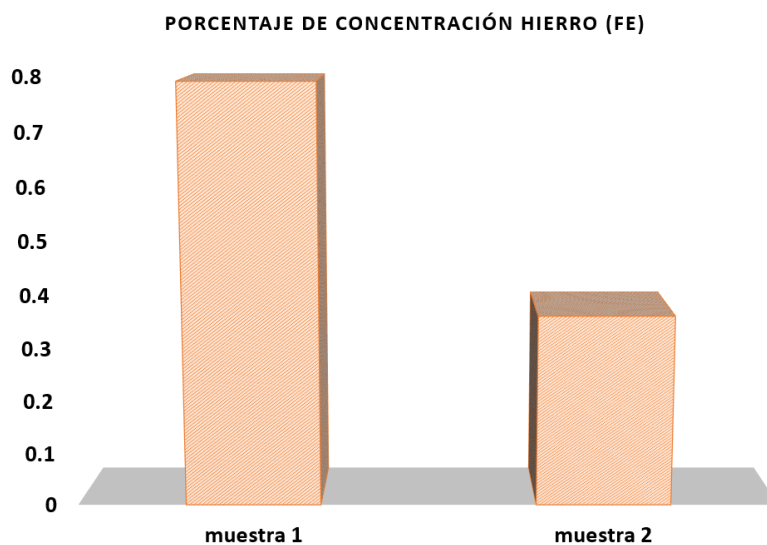
Tabla 4: Resultados de óxidos de hierro, muestra 1 zona presencia de minerales y muestra 2 zona con menor presencia de minerales.

| TABLA DE RESULTADOS MEDIANTE ANÁLISIS DE ABSORCIÓN ATÓMICA EN LABORATORIO | | | |
|---|--|---------------------|------------|
| Código | Descripción de la muestra | Hierro (Fe) total % | Fecha |
| 01/0424 | Muestra 1 | 0.79 | 2024-05-13 |
| 01/0425 | Muestra 2 | 0.36 | 2024-05-13 |
| MÉTODO | Procedimiento para determinación de elementos por digestión con ácidos concentrados, previo a lectura por absorción atómica en muestras minerales. | | |

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados de laboratorio.

En la muestra 1 se obtuvo un 0.79 % sobre el área indicada con mayor presencia de este mineral en el sitio de estudio. Esta muestra se tomó en el sitio en el que el algebra de mapas indica que hay presencia de minerales. Este resultado sugiere que la combinación de bandas para ion hierro (II) y ion hierro (III) fueron las correctas al estar presente este mineral en la muestra de suelo. En la **Tabla 4** y **Figura 20** se indica el contenido de óxidos de hierro.

Figura 20: Porcentaje de minerales encontrados mediante análisis de laboratorio en el sitio de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

En la muestra 2 se obtuvo el 0.36 % sobre el área indicada lo que indica que también existe la presencia de minerales de óxido de hierro, pero en menor cantidad. Esto sugiere que la combinación de bandas no detecta la presencia de óxido de hierro cuando el contenido de óxido de hierro es de 0.36%. En la **Tabla 4 y Figura 20** se indica el contenido de óxidos de hierro.

Como resultado del estudio tenemos que en el sitio de estudio ubicado en Sumaypamba el uso de sensores para la detección de yacimientos minerales ha sido probado y validado con muestras de suelo tomadas en el sitio. Los resultados de la combinación de bandas indican la presencia de los minerales de alunita con 1%, dolomita con 1%, epidota con 2%, ion hierro (II) 4%, moscovita con 1% y ion hierro (III) 1% en el 10% del territorio. La muestra de suelo 1 confirmó su presencia. Además, la muestra de suelo 2 tomada en las zonas donde no se identificaron minerales mediante la combinación de bandas, corroboró la validez de los resultados por la concentración muy inferior de minerales obtenida.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El presente trabajo de titulación mapeo exitosamente la presencia de minerales en una zona desértica de Sumaypamba, en Ecuador, mediante el uso de sensores remotos. En específico, la finalidad fue utilizar imágenes ASTER y el programa ENVI para la detección de minerales en zonas desérticas y montañosas del Ecuador e incrementar la evidencia técnica/científica sobre su viabilidad.

Se identificó una zona con las prestaciones adecuadas para poder realizar la teledetección: escasa vegetación, ausencia de viviendas y vías, ausencia de ríos y lagunas y poca nubosidad; estas son las prestaciones que debe cumplir la zona para poder realizar una adecuada detección de minerales por medio de la teledetección.

Se seleccionaron las imágenes ASTER son de libre acceso y porque el tamaño del pixel es adecuado para la detección de minerales. Sin embargo, en la imagen ASTER seleccionada, el sitio de estudio debe estar libre de nubosidad, caso contrario no se podrá realizar la identificación de minerales. La problemática de la selección de una imagen satelital libre de nubosidad es común para la zona tropical de Sur América.

Luego de seleccionado el sitio de estudio y las bandas de la imagen ASTER, se creó, mediante álgebra de mapas, un mapa de alteraciones hidrotermales en el programa ENVI. En el mapa de identificaron las zonas con mayor y menor presencia de minerales; en específico, la mayor presencia de minerales se encontró en la parte suroeste del sitio de estudio

Luego de realizado el mapa e identificada la presencia de minerales, mediante un análisis estadístico que se realizó en el programa Excel se pudo determinar que el 10% del área de estudio tiene una mayor presencia de los minerales estudiados y el 90 % del área restante tiene una presencia mucho menor de minerales.

Se determinó que en la zona suroeste existe la intersección de todos los minerales: alunita, dolomita, epidota, ion hierro (II), moscovita y ion hierro (III); estos minerales también fueron encontrados en Zaruma provincia del Oro y en el vecino país de Perú en Cajamarca y en Huambocancha Alta, lo que indica que estos dos países tienen una geología similar.

En el sitio de estudio se logró detectar que el hierro ferroso con un 4.29 % y la epidota con un 2.44% son los minerales que se encuentran en mayor cantidad. Mediante un análisis estadístico se determinó que solo el 1% de toda el área de estudio presenta la intersección de todos los minerales estudiados. Los resultados obtenidos fueron validados mediante muestreo de suelos en el sitio de estudio.

Mediante análisis de laboratorio químico metalúrgico en la muestra 1 se pudo validar que en el sitio de estudio existe 0.79 % de óxido de hierro, y en la muestra 2 existe una cantidad menor que es el 0.36 % de minerales de óxido de hierro.

Consideramos que el uso de sensores remotos, imágenes ASTER y el programa ENVI se puede implementar en áreas montañosas desérticas con suelo desnudo y cuando la nubosidad es leve o inexistente. Es importante destacar que el registro de las imágenes ASTER está disponible desde 1999, lo que permite acceder y utilizar estas imágenes para la detección de minerales. Es crucial asegurarse de que el uso del suelo en el sitio de estudio no haya cambiado desde la fecha de la imagen seleccionada para que el álgebra de mapas que se realice con la imagen represente la realidad del territorio y los resultados puedan ser útiles en la toma de decisiones.

Recomendaciones

La técnica probada en esta tesis permitió identificar y mapear la presencia de minerales de manera eficiente y precisa. Se recomienda la aplicación de esta técnica de teledetección para la prospección de minerales, para abarcar áreas extensas de interés minero, y, con los mapas de minerales creados, reducir los costos referentes a muestreo de suelos y trabajo de campo.

La teledetección y las imágenes ASTER nos permiten tener la capacidad de analizar datos históricos y actuales. Esto facilita el monitoreo continuo de las áreas de interés, lo que permite mejorar la planificación en cuanto a zonas de interés minero (o mayor presencia de minerales) y crecimiento urbano-rural; ayudando a las empresas mineras y gobiernos a tomar decisiones informadas sobre el manejo de los minerales en el territorio.

Se recomienda crear laboratorios químicos metalúrgico en la ciudad de Cuenca ya que la mayoría de estos se encuentran en la provincia del Oro y es por esta razón que los resultados de los análisis son más tardados.

Se recomienda probar algebra de mapas para la detección de minerales utilizando otras imágenes satelitales de libre acceso, como las imágenes LANDSAT, que también han sido ampliamente utilizadas para la detección de minerales.

Se recomienda promocionar el uso de programas como ENVI para el análisis de minerales y minería, por ejemplo, mediante la creación de cursos o incluyendo talleres sobre estos programas dentro del plan de estudios de la carrera de ingeniería en minas. La integración de ENVI en la formación académica permitirá a los estudiantes adquirir habilidades para el análisis de datos geospaciales, lo que facilitará su inserción en el campo laboral.

BIBLIOGRAFÍA

¿Qué es la Teledetección? (2023.). <http://www.ign.es>

Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquia de Sumaypamba. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorio de la Parroquia Sumaypamba*.

<https://docplayer.es/149635652-Plan-de-desarrollo-y-ordenamiento-territorial-de-la-parroquia-sumaypamba.html>

Agencia Nacional del Espectro Visible de Colombia. (2019.). *Generalidades del Espectro*

¿Qué es el espectro radioeléctrico? Retrieved March 2, 2024, from

https://portalespectro.ane.gov.co/Style%20Library/ane_master/Index.aspx

ArcMap. (2021). *Principios Básicos de Ortorrectificación de un Dataset Ráster*.

<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/fundamentals-of-orthorectifying-a-raster-dataset.htm>

Asturnatura. (2017, Julio 3). *Alunita*.

ASIMET. (2022). *Mineral de hierro en Latinoamérica*. <https://www.asimet.cl/mineral-de-hierro-en-latinoamerica/>

Browne. (2022). *Alteraciones hidrotermales*.

<https://www.ugr.es/~minechil/apartado10.htm#:~:text=La%20alteraci%C3%B3n%20hidrotermal%20es%20el,todo%20de%20composici%C3%B3n%20de%20fluidos>.

BHP. (2021). *Mineral de hierro*.

Griem. (2020). *Fases Hidrotermales*.

<https://www.geovirtual2.cl/depos/ftermal01.htm#Alteracion>

Ducart, D. F., Crósta, A., Roberto, C., & Filho, S. (2005). *Discriminación de Minerales de Alteración Hidrotermal Mediante la Clasificación Espectral de Imágenes Aster: Los Menucos, Río Negro. XVI Congreso Geológico Argentino - Simposio Internacional Avances de La Teledetección En Geología.*

<https://www.researchgate.net/publication/304182040>

EcuRed. (2020, Marzo 9). *Alunita*. <https://ecured.cu/Alunita>

Enami. (2016). *Ecuador Minero*. <https://www.enamiep.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/07/Ecuador-Minero.pdf>

EOS DATA ANALYTIC. (2023, April 26). *Tipos De Satélites: Sus Órbita Y Funciones*.
Tipos De Satélites: Sus Órbita Y Funciones

EOS Data Analytics. (2024). *¿Cómo Se Utiliza La Teledetección En La Industria Minera?*
<https://eos.com/es/blog/uso-de-la-teledeteccion-en-la-industria-minera/#:~:text=Las%20im%C3%A1genes%20de%20sat%C3%A9lite%20son,de%20tierra%20vallas%20etc.>

Mahmut. (2023). *Depósitos hidrotermales*. <https://es.geologyscience.com/ramas-de-la-geolog%C3%ADa/geolog%C3%ADa-minera/dep%C3%B3sitos-hidrotermales/>

Formulación Química. (2022, Mayo 13). *Fe₂O₃ / Óxido de Hierro (III)*.
<https://www.formulacionquimica.com/Fe2O3/>

Fundación Integra. (2021). *Los Minerales*.
https://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,365,m,108&r=ReP-26748-DETALLE_REPORTAJESABUELO

Geo Soluciones. (2019). *Aster*. <https://www.geosoluciones.cl/aster/>

Geoinformers. (2019, Febrero 25). *Apilamiento de Capas de Bandas de Imágenes Sentinel-2 Mediante el Programa R*. <https://www.geoinformers.com/post/layer-stacking-of-sentinel-2-image-bands-using-r-program#:~:text=What%20is%20layerstack%3F,Land%20Use%20Land%20Cover%20classes>.

Gis&Beers. (2018, Febrero 6). *Corrección radiométrica de imágenes satélite*. <https://www.gisandbeers.com/correccion-radiometrica-imagenes-satelite/#:~:text=La%20correcci%C3%B3n%20radiom%C3%A9trica%20es%20una,imperfcciones%20presentes%20en%20los%20p%C3%ADxels>.

González, C. V. (2021). *Imágenes ASTER Remote Sensing Geoimage SAC*. www.rs-geoimage.com

Guía para Muestreo de Suelos. (n.d.).

Ingeoexpert. (2018, Febrero). *Yacimientos minerales ¿Cómo se forman los depósitos minerales y qué tipos existen?* <https://ingeoexpert.com/2018/02/19/yacimientos-minerales/>

Mogrovejo. (2021). *Teledetección espacial mediante la aplicación de imágenes satelitales tipo ASTER LIT, LANDSAT 8 OLI y SENTINEL 2 en zonas de alteración hidrotermal*. [file:///C:/Users/PC/Downloads/16863%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/PC/Downloads/16863%20(3).pdf)

Jara. (2012). *La Teledetección Enfocada a la Obtención de Mapas Digitales*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/779/1/ti839.pdf>

Díaz. (2024). *Desvelando los secretos de los planetas: la Teledetección*. <https://josevicentediaz.com/2024/02/06/desvelando-los-secretos-de-los-planetas-la-teledeteccion/>

Lara, B. (2016). Vista de Fragmentación de pastizales en el centro de la provincia de Buenos Aires, mediante imágenes LANDSAT. *Revista Cartográfica* 92, 91(109).

Guerrero. (2020). *PROSPECCIÓN DE DEPÓSITOS MINERALES MEDIANTE DATOS DEL SENSOR ASTER, CENTRO POBLADO SHICUANA, CAJAMARCA 2020.*

Lumitos. (2023, Mayo 7). *Química. Es.*

<https://www.quimica.es/enciclopedia/Epidota.html#:~:text=La%20epidota%20es%20un%20componente,ellos%20de%20las%20rocas%20%C3%ADgneas.>

Mariñas. (2018). *Teledetección de Áreas para Prospección Minera Mediante la Interpretación de Imágenes Satelitales ASTER y Firmas Espectrales, en Huambocancha Alta, Cajamarca, 2018.*

Medina, D., Andy, A., & Lara, J. (2020). *Escuela Superior Politécnica del Litoral.*

<file:///C:/Users/PC/OneDrive/Escritorio/T-70502.pdf>

Minas, C., De, P., De, Y., Hidrotermal, T., La, M., De, U., Aster, I., & La, E. N. (n.d.).

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Sede Morona Santiago Facultad de Recursos Naturales Parroquia Pumpuentza del Cantón Taisha, Provincia de Morona Santiago.

Miguel. (2012). *Articulación sena -agrícola.*

Mineralogía I 2º LG Guion de Prácticas guion Elaborado por: Dpto. Cristalografía y

Mineralogía-UCM. (n.d.). Retrieved March 3, 2024, from

<https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag->

[15563/Gui%C3%B3n%20de%20pr%C3%A1cticas.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15563/Gui%C3%B3n%20de%20pr%C3%A1cticas.pdf)

- Mogrovejo, I. (2021). “*Teledetección Espacial Mediante la Aplicación de Imágenes Satelitales Tipo ASTER LIT, LANDSAT 8 OLI y SENTINEL 2 en Zonas de Alteración Hidrotermal.*” file:///C:/Users/PC/Downloads/16863.pdf
- NASA. (2020). *Fundamentos de la Teledetección (Percepción Remota) NASA ARSET.*
https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2023-03/Fundamentals_of_RS_Span.pdf
- Noah Chemicals. (2022, Julio 15). *¿Qué es la Diferencia Entre Óxido Férrico y Ferroso?*
<https://espanol.noahchemicals.com/blog/que-es-la-diferencia-entre-oxido-ferrico-y-ferroso/>
- OXFORD. (2023, Mayo 2). *Espectrógrafos para UV, NIR y SWIR.*
https://andor.oxinst.com/products/spectrographs-solutions?ppc_keyword=spectrographic+analysis&gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIl5ug4uLahAMVPZ9aBR1XWwmKEAAYASAAEgLkDvD_BwE
- Rajendran, S., & Nasir, S. (2019). *ASTER Capability in Mapping of Mineral Resources of Arid Region: A Review on Mapping of Mineral Resources of the Sultanate of Oman.* In *Ore Geology Reviews* (Vol. 108, pp. 33–53). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.014>
- Cataviña, D., & California, B. (n.d.). *Estudio Físico y Químico del Volcanismo Hiperalkalino en la Región de Cataviña, Baja California.*
<http://asterweb.jpl.nasa.gov/characteristics.asp>
- Revista Geográfica de América Central. (2014, May 3). *Metodología para la Corrección Atmosférica de Imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 y Landsat 8 con El Módulo Flaash del Software Envi.* <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/index>

Fernández. (2024). *Peso bruto de la producción de mineral de hierro a nivel mundial de 2006 a 2023*. <https://es.statista.com/estadisticas/1064240/volumen-de-la-produccion-global-de-hierro/#:~:text=Al%20igual%20que%20en%202022,aproximadamente%201.500%20millones%20de%20toneladas.>

Survey Staff, S. (1999). *Soil Taxonomy a Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service*. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-06/Soil%20Taxonomy.pdf>

Universidad Politécnica Nacional del Perú. (2023, Octubre 17). *Teledetección*. Universidad Politécnica Nacional del Perú.

Vives de la Cortada. (2022, Julio 8). *Epidota*. <https://vivescortadaimport.com/diccionario-minerales/minerales/epidota/index.php>

Waldhoff, G., Bubenzer, O., Bolten, A., Koppe, W., Waldhoff, G., Bubenzer, O., Bolten, A., Koppe, W., & Bareth, G. (2008). *Spectral Analysis of Aster, Hyperion, and Quickbird Data for Geomorphological and Geological Research in Egypt (Dakhla Oasis, Western Desert)*. <http://www.uni-koeln.de/sfb389>

Maldonado. (2021, marzo 13). *Moscovita: Significado, propiedades y usos*. <https://geologiaweb.com/minerales/moscovita/>