

República De Cuba

Ministerio De Educación Superior

Facultad De Geología y Minas

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO ACADÉMICO DE MÁSTER EN GEOLOGÍA.

Tema: Análisis multiespectral para el mapeo de arcillas en el
depósito Cayo Guam

Autor: Ing. Yosvany Cruz Ramírez.

Tutor: Ms. C Georvys Lescaille Capdesuñer

Consultante: Ing. Luis Alberto Pérez García

PENSAMIENTO

“[...], el ser humano, la sociedad humana se ve en la necesidad vital de marchar al mismo ritmo que avanzan los conocimientos técnicos, los conocimientos científicos; la sociedad humana siente una necesidad vital en ese sentido”

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Declaro que soy autor(a) de este trabajo de tesis y que autorizo a la Universidad de Moa a hacer uso del mismo, con la finalidad que estime conveniente.

Firma: _____



Yosvany Cruz Ramírez

yosvany@holguin.geocuba.cu

Yosvany Cruz Ramírez autoriza la divulgación del presente trabajo de diploma bajo licencia Creative Commons de tipo **Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada**, se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de las obras y no realice ninguna modificación de ellas. La licencia completa puede consultarse en: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ar/legalcode>

Yosvany Cruz Ramírez autoriza al departamento de la Universidad de Moa a distribuir el presente trabajo de tesis en formato digital bajo la licencia Creative Commons descrita anteriormente y a conservarlo por tiempo indefinido, según los requerimientos de la institución, en el repositorio de materiales didácticos disponible en: <http://geologia.mineria.edu.cu/textuales/tesis>

Yosvany Cruz Ramírez autoriza al departamento de Geología de la Universidad de Moa a distribuir el presente trabajo de tesis en formato digital bajo la licencia Creative Commons descrita anteriormente y a conservarlo por tiempo indefinido, según los requerimientos de la institución, en la biblioteca digital disponible en: <http://bibliotecadigital.ismm.edu.cu>

AGRADECIMIENTOS

A todo el colectivo del Departamento de Geología de la Universidad de Moa.

A todo el colectivo del Taller de Geología de la Agencia Holguín de GEOCUBA Oriente-Norte.

A todo el colectivo del grupo de Geotecnología de los Materiales:

- Prof. Luis Alberto Pérez García
- Prof. Carlos Alberto Leyva Rodríguez
- Prof. Angel Eduardo Espinosa Borges
- Prof. Liban García Obregón
- Prof. Carlos Herrera Sánchez
- Prof. Alfredo Hidalgo Suárez

DEDICATORIA

A mi novia, por su dedicación, sacrificio, amor y colaboración en los estudios.

A mi mamá, por ser ejemplo y la mejor madre del mundo, que por su dedicación, sacrificio y amor me he convertido en lo que soy.

A mi papá, por estar en cada momento de mi vida y apoyarme en las decisiones que siempre he tomado.

A toda mi familia.

RESUMEN

En la investigación se realizó la caracterización química, mineralógica y el mapeo de los tipos de cortezas de arcillas caoliníticas y cortezas lateríticas presentes en el depósito de Cayo Guam. Como objetivos de la investigación están: caracterizar química y mineralógicamente las arcillas del depósito, realizar combinaciones de banda utilizando los sistemas Sentinel 2, Landsat 8 y Aster, mapear y clasificar las arcillas seleccionadas, y obtener las firmas espectrales de las cortezas de arcillas caoliníticas y cortezas lateríticas presentes en el depósito de Cayo Guam a partir de un levantamiento digital con las imágenes satelitales. Para la caracterización química y mineralógica se hizo uso de la Fluorescencia de Rayos X, Difracción de Rayos X y DRXD, para la clasificación de las cortezas se empleó el procesamiento de imágenes satelitales y se utilizó como patrón la base de datos de firmas espectrales de la USGS. En el estudio de los diferentes tipos de cortezas presentes en el área de estudio y el mapeo mineralógico se usó el software QGIS 3.16. Los resultados de la investigación son los siguientes; la caracterización químico-mineralógica del depósito arrojó que esta es una corteza desarrollada sobre rocas básicas (gabros) enriquecida en Al y Si con el mineral caolinita como fase predominante y minerales acompañantes dickita, nontronita, nacrita, goethita y hematita. Con las imágenes de los Satélites Sentinel 2, Landsat 8 y ASTER L1T procesadas se realizaron las combinaciones de bandas, lográndose identificar y contrastar los dos tipos de cortezas desarrolladas en el área, siendo las combinaciones más importantes la de las bandas 4-3-2 con el Sentinel 2 y las 4-6-8 con las imágenes Aster L1T. Se elaboró un mapa donde se clasifican por sectores los límites espaciales de los dos tipos de cortezas presentes en el depósito lográndose una adecuada diferenciación entre estas. Se obtuvieron los patrones de firmas espectrales de los dos tipos de cortezas, siendo las bandas más importantes las ASTER (4, 5, 6, 7, 8 y 9) que pertenecen al rango del infrarrojo cercano.

SUMMARY

The research carried out the chemical and mineralogical characterization and mapping of the types of kaolinitic clay crusts and lateritic crusts present in the Guam Cay deposit. The objectives of the research are: to chemically and mineralogically characterize the clays of the deposit, to perform band combinations using the Sentinel 2, Landsat 8 and Aster systems, to map and classify the selected clays, and to obtain the spectral signatures of the crusts of kaolinitic clays and lateritic crusts present in the Guam Cay deposit from a digital survey with satellite images. For the chemical and mineralogical characterization, X-ray Fluorescence, X-ray Diffraction and DRXD were used, for the classification of the crusts, satellite image processing was used and the spectral signature database of the USGS. In the study of the different types of crust present in the study area and the mineralogical mapping, the QGIS 3.16 software was used. The research results are as follows; The chemical-mineralogical characterization of the deposit showed that this is a crust developed on basic rocks (gabbros) enriched in Al and Si with the mineral kaolinite as the predominant phase and accompanying minerals dickite, nontronite, nacrite, goethite and hematite. With the images from the Sentinel 2, Landsat 8 and ASTER L1T satellites processed, the combinations of bands were made, managing to identify and contrast the two types of crusts developed in the area, the most important combinations being that of bands 4-3-2 with the Sentinel 2 and the 4-6-8 with the Aster L1T images. A map was prepared where the spatial limits of the two types of crust present in the deposit are classified by sectors, achieving an adequate differentiation between them. The spectral signature patterns of the two types of crusts were obtained, with the most important bands being the ASTER bands (4, 5, 6, 7, 8 and 9) that belong to the near-infrared range.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I - MARCO TEÓRICO CONTEXTUAL	5
1.1 Fundamentos de teledetección.....	5
1.1.1 Energía electromagnética	7
1.2 Espectro electromagnético	9
1.2.1 Interacciones de la energía electromagnética con la atmósfera	10
1.2.2 Interacciones de la energía electromagnética con las superficies	12
1.3. Imágenes satelitales de sensores pasivos.....	13
1.3.1 ASTER L1T	13
1.3.2 SENTINEL 2.....	14
1.3.3 LANDSAT 8	15
1.4 Interés del uso de la teledetección en las investigaciones de arcilla	19
1.5 Características Físico-Geográficas de la Región.....	27
1.5.1 Relieve.....	27
1.5.2 Red hidrográfica.....	27
1.5.4 Tectónica.	28
1.6 Características del área de estudio (Cayo Guam).....	28
1.6.1 Situación geográfica:.....	28
1.6.2 Características generales del área de estudio:	29
CAPÍTULO II - MATERIALES, MÉTODOS Y VOLÚMENES DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.	31
2.1 Etapas de la investigación.	31
2.2 Etapa de campo.	31
2.2.1 Descripción de los itinerarios:.....	31
2.2.2 Resumen del Muestreo y documentación:	32
2.3 Trabajos de Teledetección.....	35
2.3.1 Composición de imágenes en color natural	35
2.3.2 Preprocesamiento para las imágenes satelitales ASTER L1T, LANDSAT 8 OLI, SENTINEL 2.....	35
2.3.2.1 Conversión de niveles digitales a reflectancia	36
2.3.2.2 Corrección atmosférica	36
2.4 Procesamiento de imágenes satelitales.....	37
2.4.1 Combinaciones RGB.....	37
2.4.1.1 RGB para ASTER L1T, LANDSAT 8 OLI y SENTINEL 2.....	37
CAPÍTULO III - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	39
3.1. Resultados de la caracterización química y mineralógica.....	39
3.2.1 Resultados del procesamiento de las imágenes Aster L1T, Sentinel 2 y Landsat 8	42
3.2.2 Resultados del mapeo de arcillas de Cayo Guam	44
3.2.3 Resultados del comportamiento espectral en Cayo Guam.....	45
3.2.4 Resultados de los patrones de firmas espectrales de arcillas caoliníticas y las lateritas	47
CONCLUSIONES.....	50
RECOMENDACIONES	51
BIBLIOGRAFIA	52

ANEXOS.....	1
-------------	---

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de la teledetección (Chuvieco & Huete, 2016).....	6
Figura 2. Tipos de radiación por las cuales se da la teledetección (Chuvieco & Huete, 2016).....	7
Figura 3. Esquema de una onda electromagnética (Chuvieco & Huete, 2016).....	9
Figura 4. Principales bandas espectrales que contiene el espectro electromagnético (Chuvieco & Huete, 2016).....	10
Figura 5. Ventanas atmosféricas adecuadas para la observación de la tierra desde el espacio (Chuvieco & Huete, 2016).....	12
Figura 6. Componentes de una firma espectral (Hauff, 2008).....	17
Figura 7. Firmas espectrales de minerales (Brito, 2012)(Hauff, 2008).....	19
Figura 8: Esquema de ubicación geográfica del área de estudio. Escala 1: 10 000 (Pérez García, 2015).....	29
Figura 9:Esquema geológico de Cayo Guam generado a partir del mapa del IGP escala 1: 100 000.	30
Figura 10: Esquema de ubicación de los puntos de documentados escala 1: 7 500.	31
Figura 11. Imagen panorámica de la manifestación Cayo Guam, se puede observar un intenso acaravamiento producto de la ausencia de cobertura vegetal.	33

Figura 12. Panorámica de uno de los cortes de arcillas caoliníticas en Cayo Guam, a) zona de desarrollo de suelo, b) zona de mezcla de caolinita con gibbsita y c) zona de caolinita abigarrada plástica.	33
Figura 13: Grafico de la DRX de la muestra analizada, con representación de las fases cristalinas más características.	39
Figura 14. Difractograma con orientación preferencial de los cristales Cayo Guam	40
Figura 15. Resultados globales de la caracterización mineralógica del depósito de Cayo Guam	41
Figura 16: Combinaciones de bandas Aster L1T, Sentinel 2 y Landsat 8 a) Color natural b) Infrarrojo cercano c) Tierra/Agua y d) Índice de arcillas	43
Figura 17 Mapa esquemático de distribución de cortezas caoliníticas y cortezas lateríticas en Cayo Guam.....	45
Figura 18: Firmas espectrales de las arcillas el agua y la vegetación Sentinel 2.	46
Figura 19: Firmas espectrales de las arcillas el agua y la vegetación Landsat 8.	46
Figura 20: Firmas espectrales de las arcillas el agua y la vegetación Aster.	47
Figura 21: Firmas espectrales de las arcillas ricas en Aluminio y Silicio Vs lateritas ricas en Hierro y Magnesio	47
Figura 22: Firma espectral de arcillas caoliníticas de Cayo Guam combinación de datos espectrales de Sentinel 2, Aster L1T y Landsat 8.	48
Figura 23: Firma espectral de lateritas de Cayo Guam combinación de datos espectrales de Sentinel 2, Aster L1T y Landsat 8.	49

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Principales ventanas atmosféricas	11
Tabla 2: Descripción de las bandas ASTER L1T (Meyer et al., 2015)	13
Tabla 3: Descripción de las bandas de SENTINEL 2 (Congedo, 2016)	14
Tabla 4: Descripción de las bandas LANDSAT 8 OLI (Congedo, 2016)	15
Tabla 5: Coordenada de los puntos muestreados.....	31
Tabla 6: Combinaciones empleadas para ASTER L1T	37
Tabla 7: Combinaciones empleadas para Landsat 8	37
Tabla 8: Combinaciones empleadas para Sentinel 2	37
Tabla 9: Resultados químicos del depósito de Cayo Guam.....	39

INTRODUCCIÓN

La teledetección de arcillas se ha convertido en una técnica importante para la exploración de recursos naturales y la gestión de la tierra en todo el mundo. La identificación y mapeo de minerales de arcilla es esencial para la industria cerámica, la construcción y otros sectores que utilizan arcilla como materia prima. Además, puede ser una herramienta útil para la identificación y monitoreo de áreas afectadas por la erosión del suelo y otros problemas ambientales (Cruz Sánchez, 2013).

Esta técnica aplicada a la prospección tiene varias ventajas en comparación con los métodos tradicionales de prospección. Algunas de estas ventajas son: la cobertura más amplia y rápida de grandes áreas, la detección de características geológicas y zonas mineralizadas, la capacidad de proporcionar información sobre la distribución espacial de los minerales y la geología de una región, y la capacidad de monitorear la actividad minera y la recuperación ambiental de las áreas mineras. En general, la teledetección puede ser una herramienta valiosa para la prospección y la gestión de los recursos naturales, ya que puede proporcionar información detallada y precisa sobre la geología y los minerales de una región de manera rápida barata y eficiente (Satellite Imaging, 2022).

En los últimos años, se han llevado a cabo numerosas investigaciones para identificar y mapear minerales de arcilla utilizando la técnica de teledetección. En un estudio publicado por (Maged et al., 2023), se evalúa la idoneidad de los depósitos de arcilla del Cretácico Superior (Santoniano) en el área de Abu Zenima como materia prima para la industria de la cerámica. En otro estudio, desarrollada por (Priya & Ghosh, 2022), se utilizó la teledetección hiperespectral para identificar diferentes tipos de minerales de arcilla en el suelo y mapear su abundancia. Además, en una investigación publicada por (Mogrovejo Barrera, 2021), se determinan las zonas de alteración hidrotermal por medio de imágenes satelitales ASTER L1T, LANDSAT 8 OLI y SENTINEL 2., también se ha utilizado para la identificación y caracterización de minerales de arcilla en muestras de laboratorio, como se expone en la investigación de (Ducasse et al., 2018).

Cuba ha sido estudiada utilizando la teledetección en varios temas relacionados con la gestión y conservación de los recursos naturales. Por ejemplo, se ha utilizado esta técnica para evaluar el daño causado por el huracán Irma a los ecosistemas (Turner

et al., 2023), así como para evaluar la salud y el estado de los arrecifes (Ojeda Martínez et al., 2020). También se ha utilizado para la estimación de la superficie total de la isla y sus cayos, así como para la caracterización espectral de los bosques de mangles (Ávila et al., 2020). Sin embargo, no se han encontrado investigaciones específicas sobre el uso de esta técnica en la exploración de arcillas cubanas.

La aplicación de la teledetección de arcillas en Cuba puede ser una herramienta importante para el desarrollo sostenible del país. La identificación y mapeo de minerales de arcilla es útil para la industria cerámica y otros sectores que utilizan arcilla como materia prima. La identificación y mapeo de minerales de arcilla puede ayudar a los productores a seleccionar las mejores fuentes de materia prima y optimizar los procesos de producción.

Las arcillas tienen un papel industrial grande en los diferentes países, en especial en los países en vías de desarrollo. En el caso cubano, es relevante su implementación en la producción artesanal de elementos cerámicos, así como en la producción de materiales de la construcción. En los últimos años, con las investigaciones del llamado cemento bajo en carbono, el interés en las arcillas ha despertado. No podemos dejar de mencionar el renovado interés en la utilización de arcillas en construcciones ecológicas y a partir del desarrollo de las fuerzas productivas locales.

La teledetección permite llenar un nicho en las investigaciones geológicas de bajos recursos, sobre todo en la prospección de los no metálicos, dado que, en el país, las mayores inversiones se realizan en la industria de la exploración de metales.

Con base a lo anterior, es necesario que se realicen más investigaciones en Cuba para identificar y mapear los minerales de arcilla utilizando esta técnica, lo que puede ser útil para la gestión y la exploración de recursos naturales. Sin embargo, la implementación de esta tecnología en la búsqueda de arcillas, y otros materiales en Cuba puede requerir la capacitación de personal especializado, la creación de capacidades tecnológicas y la formación de recursos humanos. Hoy el país no tiene una base de datos de firmas espectrales que permita el reconocimiento mineralógico, por ejemplo.

Para los estudios de teledetección de arcillas, específicamente, el método que promete ser más preciso es el de las firmas espectrales (Bishop et al., 2017). Entre

algunas de las ventajas de la aplicación de esta técnica, se pueden mencionar que permite identificar materiales y minerales en la superficie terrestre, dado que las bandas multiespectrales VNIR (longitudes de ondas del visible al infrarrojo cercano) y SWIR (infrarrojo de onda corta) cubren una amplia gama de características de absorción espectral diversas y únicas de los materiales y minerales. Los minerales indicadores detectados por firmas espectrales sugieren claramente la ubicación de posibles minerales o depósitos en el subsuelo, lo que permite crear mapas predictivos sobre un área de interés, las librerías espectrales se utilizan para identificar diferentes tipos de minerales a partir de análisis espectrales que caracterizan su composición mineralógica y química, y la técnica de correlación espectral permite comparar la firma espectral conocida de un mineral de una biblioteca de referencia con las observaciones obtenidas de las imágenes SWIR, como una forma de correlacionar con confianza los recursos específicos presentes en el terreno (Zazi et al., 2017).

El depósito de arcillas caoliníticas Cayo Guam, ha sido objeto de numerosos estudios en el pasado reciente. Se ha constatado que estas arcillas pueden tener excelentes prestaciones como material cerámico y como puzolana de alta reactividad para la industria del cemento bajo en carbono (Orozco Melgar, 1995; Fadel, 2005; Alvarez, 2013; Garc, 2013; Rodríguez, 2013; Chacón, 2015; Cruz Ramírez, 2019; Hidalgo-Suárez et al., 2019). Donde se está realizando un proyecto de Prospección y Exploración dirigida por el Servicio Geológico de Cuba (IGP). La aflorabilidad inducida por la actividad minera, ha permitido que un área importante del depósito, haya quedado expuesta, haciéndolo un objetivo deseable para la aplicación de teledetección en el área.

El desarrollo de firmas espectrales, a partir de un depósito conocido podría tener efectos beneficiosos para trabajos de prospección futuros, contribuyendo al ahorro de recursos económicos valiosos.

Con base a lo anterior, surge la pertinencia y necesidad de la presente investigación

Problema:

La necesidad del uso del análisis multiespectral en el marco del mapeo de las arcillas en el depósito Cayo Guam.

Objetivo General:

Evaluar el uso del análisis multiespectral en el mapeo de arcillas del depósito Cayo Guam

Objeto:

El depósito de arcillas de Cayo Guam.

Objetivos específicos:

- Caracterizar química y mineralógicamente las arcillas del depósito.
- Realizar combinaciones de banda utilizando los sistemas Sentinel 2, Landsat 8 y Aster.
- Mapear y clasificar las arcillas seleccionadas.
- Obtener las firmas espectrales de las arcillas presentes en el depósito.

Hipótesis:

Si se realizan la caracterización química y mineralógica de las arcillas del depósito, se realizan las combinaciones de bandas utilizando los sistemas Sentinel 2, Landsat 8 y ASTER L1T, se mapean y clasifican las arcillas seleccionadas y se obtienen las firmas espectrales de las mismas, se podrá evaluar el uso del análisis multiespectral para el mapeo de las arcillas del depósito Cayo Guam.

CAPÍTULO I - MARCO TEÓRICO CONTEXTUAL

1.1 Fundamentos de teledetección

La teledetección es una ciencia multidisciplinaria encargada de la adquisición de información por medio de sensores terrestres, espaciales, aéreos transportados o sensores in situ y su posterior procesamiento. La adquisición de datos se fundamenta en la energía electromagnética, debido a que los objetos en superficie reflejan, absorben y emiten energía a lo largo de las regiones del espectro electromagnético, permitiendo así la identificación, clasificación y delimitación espacial de los mismos (Campbell y Wynne, 2011). Según (Chuvieco & Huete, 2016) la adquisición y posterior interpretación de información satelital se fundamenta en seis componentes.

1) Fuente de energía.

Se basa en la radiación electromagnética que detecta el sensor, siendo la fuente de energía más común la emitida por el sol.

2) Cubierta terrestre

Son todos los objetos y componentes ambientales presentes en la superficie terrestre que receptan la energía proveniente del sol y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas y químicas.

3) Sistema sensor

Compuesto por el sensor y la plataforma que lo contiene, su función es captar la energía proveniente de las distintas coberturas terrestres, codificar, grabar y enviar a un sistema de recepción.

4) Sistema de recepción – comercialización

Se refiere a la estación que recepta la información proveniente de la plataforma satelital, en donde se graba en un formato adecuado, se realizan correcciones y finalmente se distribuye a los usuarios.

5) Intérprete

Convierte los datos en información temática de interés por medio de técnicas visuales o digitales.

6) Usuario final

Usa la información extraída de acuerdo a su área de interés.

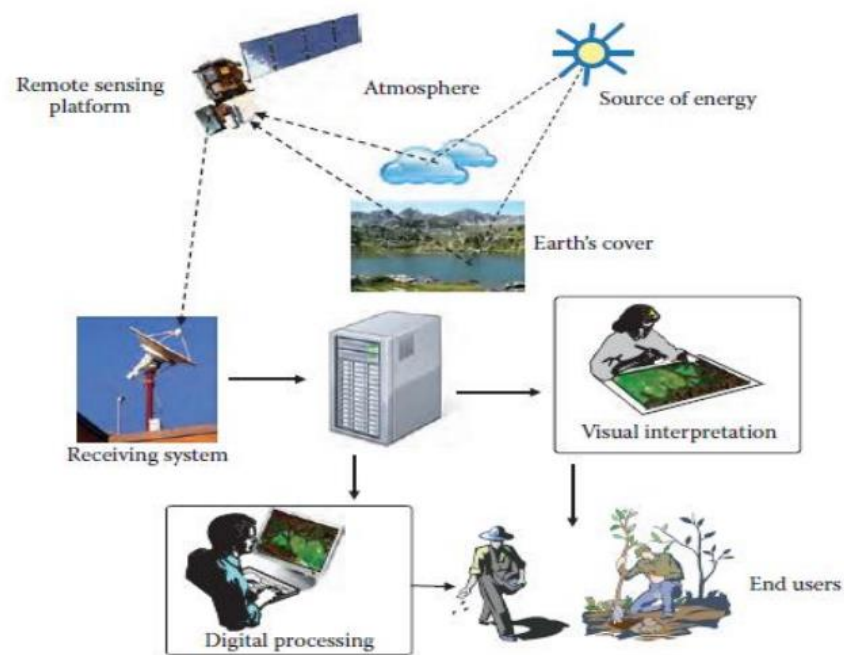


Figura 1. Componentes de la teledetección (Chuvieco & Huete, 2016).

(Chuvieco & Huete, 2016) establecen una semejanza entre el mecanismo de percepción de un sensor y el ojo humano. La comparación parte de que para que sea factible la visión, nuestros sentidos primero tienen que descifrar la información proveniente del objeto. Por lo tanto, el ojo es capaz de distinguir un objeto sólo cuando existe la suficiente energía lumínica. Cabe recalcar que la energía lumínica no la proporciona el objeto, si no el foco energético que lo ilumina (sol). En base a este ejemplo se establece que un sistema de teledetección está compuesto fundamentalmente por tres componentes: sensor (ojo), objeto observado y el flujo energético que permite la detección. Por lo tanto, la adquisición de información se da por tres vías: reflexión, emisión y emisión-reflexión.

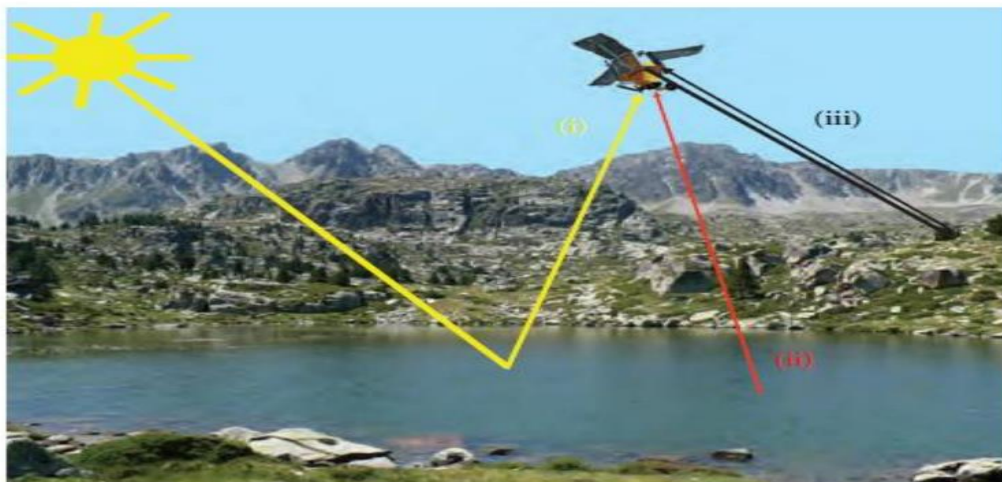


Figura 2. Tipos de radiación por las cuales se da la teledetección (Chuvieco & Huete, 2016).

Nota: Tipos de radiación: (i) reflexión, (ii) emisión, (iii) emisión-reflexión.

La reflexión es la forma más importante en teledetección, debido a que proviene directamente de la luz solar, el sol ilumina la superficie y esta refleja esa energía acorde a sus características físicas y químicas. La interacción entre superficie y sensor no es total debido a la presencia de la atmósfera que absorbe o dispersa una parte de la energía. La emisión se caracteriza por la energía emitida por la superficie u objeto, por lo tanto, se necesita de un sensor que sea capaz de generar su propio flujo energético y de captar la emisión producida por la superficie. La emisión reflexión es una combinación de las dos formas. En teledetección el flujo energético que existe constituye una forma de radiación electromagnética. La energía se transporta de un lugar a otro ya sea por convección, conducción y radiación, siendo esta última la base de los sistemas de teledetección (Chuvieco & Huete, 2016).

1.1.1 Energía electromagnética

La radiación electromagnética se explica a través de dos teorías que compaginan entre sí. La primera expuesta por Huygens y Maxwell que la conciben como un haz ondulatoria. La segunda expuesta por Planck, Einstein que la describe como una unidad discreta de energía, fotones o cuantos con masa igual a cero.

En base a la teoría ondulatoria, la energía electromagnética se transmite siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz, con presencia de dos campos de fuerzas ortogonales entre sí (eléctrico y magnético). El flujo energético está compuesto por tres propiedades. La primera es la longitud de onda (λ) definida

como la distancia que existe entre los picos de una onda. La segunda es la frecuencia (ν) haciendo referencia al número de ciclos en los que se pasa por un punto fijo en una unidad de tiempo. Finalmente, la tercera es la amplitud que es definida como la altura de cada pico, generalmente es medida en niveles de energía (Watts por metro cuadrado por micrómetro) (Chuvienco & Huete, 2016).

$$c = \lambda \nu \quad (1)$$

Donde:

c : Velocidad de la luz ($3 \times 10^8 \text{ m/s}^{-1}$).

λ : longitud de onda en micrómetros ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$).

ν : Frecuencia en Hertz ($1 \text{Hz} = 1 \text{ ciclo por segundo}$).

Basándonos en la teoría cuántica podemos calcular la cantidad de energía transportada por un fotón (es necesario conocer su frecuencia).

$$Q = h \nu \quad (2)$$

Donde:

Q Energía radiante de un fotón (Julios)

ν : Frecuencia.

h : Constante de Planck ($6.6 \times 10^{-34} \text{ J s}$)

Sustituyendo (2) en (1) obtenemos:

$$Q = h(c/\lambda)$$

De esta expresión se deduce que a mayor longitud de onda o menor frecuencia el contenido energético será menor y viceversa. Esta deducción nos indica que las radiaciones de ondas largas son más difíciles de detectar en relación con las cortas.

Razón por la cual, las ondas largas requieren de medios de detección especializados (Chuvienco & Huete, 2016).

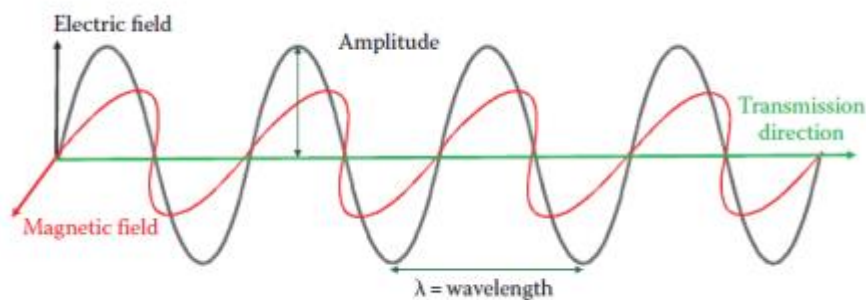


Figura 3. Esquema de una onda electromagnética (Chuvieco & Huete, 2016).

1.2 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético se define como una gama de energías que se producen por la interacción entre materia y energía en forma de ondas electromagnéticas. La posición que ocupa esa energía dentro del rango del espectro puede ser expresada en electronvoltios (eV), longitud de onda (cm, μm) o frecuencia (Hz). La energía se produce cuando una partícula con masa (electrón, ion, molécula) se acelera. Por ejemplo, en niveles moleculares, la generación de energía se da cuando los átomos son acelerados a estados vibratorios superiores. Finalmente, la energía puede presentarse en regiones: nucleares (partículas subatómicas), químicas (ion, molécula), térmica o mecánica (molécula o partícula mayor) (P. E. Clark & Rilee, 2010).

Las bandas espectrales más utilizadas en teledetección se clasifican en los siguientes grupos:

Espectro visible (0.4 – 0.7 μm)

Es la única radiación electromagnética que puede percibir el ojo humano, debido a que coincide con las longitudes de onda en donde es mayor la radiación solar. En este rango la luz se divide en prismas o rejillas de difracción, generalmente Figura 3. Esquema de una onda electromagnética conocidos como colores primarios Azul (0.4 – 0.5 μm), Verde (0.5 – 0.6 μm) y Rojo (0.6 – 0.7 μm). Cabe recalcar que un color primario no se forma a partir de mezclas de los otros dos, pero los demás colores fundamentalmente se forman por la combinación de los primarios.

Infrarrojo cercano (0.7 – 1.2 μm)

Más conocido como el infrarrojo fotográfico, se encuentra fuera del rango de

percepción humana. Esta porción del espectro es usada generalmente para determinar el estado fitosanitario de las plantas.

Infrarrojo medio (1.2 – 8 μm)

En el rango de (1.2 – 2.5 μm) se localiza la región del SWIR (infrarrojo de onda corta), esta porción del espectro es de vital importancia en la detección de minerales de alteración hidrotermal, debido a que estos muestran sus características espectrales en este rango, también sirve para estimaciones de suelo y vegetación.

Térmico (8 – 14 μm)

Localizado en la porción emisiva del espectro terrestre, se usa principalmente para detectar el calor proveniente de los tipos de cubiertas terrestres. En geología se usa para hacer caracterización litológica.

Micro – ondas (> 1mm)

Las longitudes de onda más grandes de este rango se utilizan generalmente en las comunicaciones por radio. Mientras que las pequeñas guardan cierta similitud con las termales.

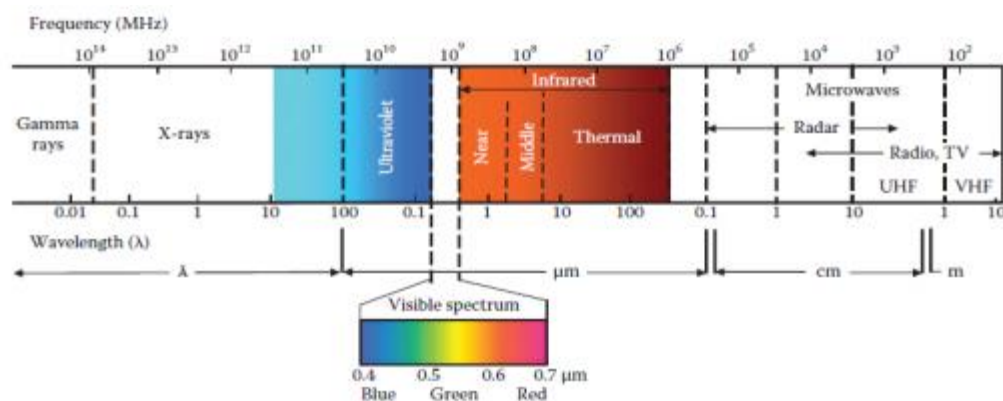


Figura 4. Principales bandas espectrales que contiene el espectro electromagnético (Chuvieco & Huete, 2016).

1.2.1 Interacciones de la energía electromagnética con la atmósfera

La atmósfera terrestre está compuesta por Nitrógeno, Oxígeno, Argón, vapor de agua, Ozono, Dióxido de Carbono, polvo y aerosoles. Estos componentes generan impactos negativos ya sea en la calidad de las imágenes o en la adquisición de

datos, debido a que alteran la radiación originalmente emitida entre los objetos y el sensor.

El CO₂, ozono y vapor de agua provocan que la energía electromagnética sea absorbida, dispersada y emitida (CHUVIECO y HUETE, 2016).

(Campbell y Wynne, 2011) describen las alteraciones de la energía electromagnética de la siguiente manera. La absorción se produce cuando la atmósfera impide el paso ya sea total o parcial el flujo de radiación. La dispersión se refiere a la redirección de la energía, debido a la presencia de partículas en suspensión o presencia de gases atmosféricos. El porcentaje de dispersión depende básicamente del tamaño de las partículas, su abundancia, longitud de onda de la radiación y la profundidad de la atmósfera a la cual fluye.

La emitida afín a los cuerpos calientes, relacionada con la refracción que es la curvatura de los rayos de luz en la zona de contacto entre los dos medios que emiten luz. Por último, la refracción se produce en la atmósfera a medida que la luz atraviesa sus diversas capas, cabe recalcar que cada capa presenta características de brillo, humedad y temperaturas distintas. Siendo estos cambios los que producen la curvatura de los rayos.

(Campbell y Wynne, 2011) y (Chuvieco & Huete, 2016). afirman que la atmósfera tiende a ser selectiva sobre las longitudes de onda que llegan a incidir sobre ella, siendo esta una limitante al momento de realizar procesos de teledetección. Para facilitar el proceso de teledetección, se han establecido determinadas bandas espectrales en las cuales es factible la observación de la superficie terrestre, estas bandas son las denominadas ventanas atmosféricas. La selección de las bandas se realiza en base a un análisis de los espectros de absorción de los gases atmosféricos, teniendo como característica fundamental que en ellas la transmisividad de la atmósfera es lo suficientemente alta para que la radiación fluya libremente (atmósfera clara).

Tabla 1 Principales ventanas atmosféricas

Ultravioleta	0.30 - 0.75 μm
y Visible	0.77 - 0.91 μm

Infrarrojo Cercano	1.55 - 1.75 μm
	2.05 - 2.4 μm
Infrarrojo Termal	8.0 - 9.2 μm
	10.2 - 12.4 μm
Microondas	7.5 - 11.5 mm
	20.0 + mm

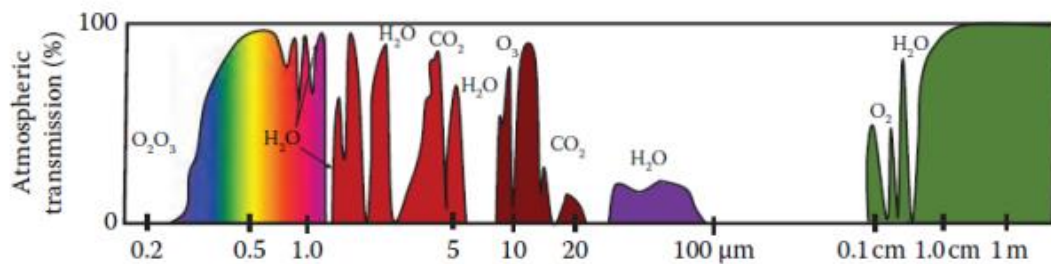


Figura 5. Ventanas atmosféricas adecuadas para la observación de la tierra desde el espacio (Chuvieco & Huete, 2016)

1.2.2 Interacciones de la energía electromagnética con las superficies

La energía electromagnética al contacto con la superficie terrestre es reflejada, absorbida o transmitida. Cada uno de estos procesos está directamente relacionado con la naturaleza del objeto, la longitud de onda y el ángulo de iluminación. Siendo la energía reflectada la base de la teledetección.

Resolución de los sensores pasivos:

Es la capacidad que tiene un sensor para la diferenciación de coberturas u objetos presentes en el área observada. Para realizar este proceso, el sensor se basa en las diferencias de radiación obtenidas (resolución radiométrica), resolución de la captura (resolución espacial), la cantidad de bandas espectrales con las que trabaja (resolución espectral) y la variación de tiempo empleado para volver a captar una misma área (resolución temporal). Generalmente, los sensores usados en la exploración minera priorizan la resolución espacial, espectral y aquellos que contienen un reducido ciclo temporal. Por ejemplo, los minerales de alteración hidrotermal se mapean mejor en las bandas de infrarrojo de onda corta, debido a

que sus características espectrales que se acoplan mejor a esas longitudes de onda (Chuvieco & Huete, 2016).

1.3. Imágenes satelitales de sensores pasivos

1.3.1 ASTER L1T

El Radiómetro de Emisión y Reflexión Térmica Avanzada del Espacio (ASTER) es un generador de imágenes multiespectrales, que fue lanzado a bordo de la plataforma EOS Terra a cargo de la Administración Espacial Aeronáutica de los Estados Unidos (NASA) en diciembre de 1999, está compuesto por cuatro telescopios, que cubren 14 bandas de frecuencia. De estos cuatro telescopios, tres de ellos apuntan hacia el nadir, y uno apunta hacia atrás (duplicando la frecuencia de la banda 3 del nadir). El sensor tiene una resolución temporal de 16 días para las 14 bandas y un tiempo de 5 días para las bandas del visible e infrarrojo cercano (Meyer et al., 2015).

Consta de tres subsistemas ópticos, los cuales son: Radiómetro visible e infrarrojo cercano (VNIR), Radiómetro infrarrojo de onda corta (SWIR), Radiómetro infrarrojo termal (TIR). Los mismos cuentan con una resolución espacial de 15, 30 y 90 m respectivamente.

Nivel de procesamiento L1T:

El nivel L1T, se crea a partir de correcciones geométricas y radiométricas de los datos de nivel AST_L1A. El nivel L1T se logra por la aplicación de modelos terrestres y satelitales, puntos de control y modelos de elevación, dando como resultado un mapa rotado hacia el norte (Meyer et al., 2015) Los procesos antes mencionados tienen la finalidad de entregar al usuario una imagen con una proyección cartográfica definida en Universal Transverse Mercator (UTM) y una disminución de errores topográficos debido al relieve de la zona.

Tabla 2: Descripción de las bandas ASTER L1T (Meyer et al., 2015)

Bandas	Longitud de onda (μm)	Descripción	Resolución (m)
VNIR Banda1	0.52.-0.600	Visible Verde/Amarillo	

VNIR Banda2	0.630-0.690	Visible rojo	15 (8 bit)
VNIR Banda3N	0.760-0.860	Infrarrojo Cercano	
VNIR Banda3B	0.760-0.860		
SWIR Banda4	1.600-1.700	Infrarrojo de onda corta	30 (8 bit)
SWIR Banda5	2.145-2.185		
SWIR Banda6	2.185-2.225		
SWIR Banda7	2.235-2.285		
SWIR Banda8	2.295-2.365		
SWIR Banda9	2.360-2.430		
TIR Banda10	8.125-8.475	Infrarrojo Térmico	90 (12 bit)
TIR Banda11	8.475-8.825		
TIR Banda12	8.925-9.275		
TIR Banda13	10.250-10.950		
TIR Banda14	0.950-11.650		

1.3.2 SENTINEL 2

La agencia espacial europea (ESA) define a las imágenes SENTINEL 2 de la siguiente manera. El satélite es parte de una constelación de satélites europea que tiene como finalidad la observación de la tierra, fue lanzado el 23 de junio de 2015, por medio del cohete Vega. Consta de una franja ancha de escaneo multiespectral y una alta resolución espacial, temporal y radiométrica. Las imágenes SENTINEL 2, del nivel de procesamiento L1c tienen una cobertura de 100 x 100 km. La resolución de la imagen depende de las bandas, las mismas que pueden ser de 10, 20 o 60 m respectivamente (Zuhlke et al., 2015).

Tabla 3: Descripción de las bandas de SENTINEL 2 (Congedo, 2016)

Bandas	Longitud de onda (μm)	Descripción	Resolución (m)
--------	-----------------------	-------------	----------------

Banda1	0.433	Coastal Aerosol	60
Banda2	0.490	Azul	10
Banda3	0.560	Verde	10
Banda4	0.655	Rojo	10
Banda5	0.705	Vegetación Roja	20
Banda6	0.740	Vegetación Roja	20
Banda7	0.830	Vegetación Roja	20
Banda8	0.842	Infrarrojo cercano	10
Banda 8A	0.865	Vegetación Roja	20
Banda9	0.945	Vapor de Agua	60
Banda10	1.375	Infrarrojo de Onda corta	60
Banda11	1.610	Infrarrojo de Onda corta	20
Banda12	2.190	Infrarrojo de Onda corta	20

1.3.3 LANDSAT 8

El satélite LANDSAT 8, fue construido por la empresa “Orbital Sciences Corporation” en Gilbert, Arizona. El satélite opera en una órbita a 705 km sobre el Ecuador, tiene una resolución temporal de 16 días. El satélite cuenta con dos sensores: “Operational Land Image” (OLI) con longitudes de onda que van desde los 0.433 hasta los 2.290 μm . Consta de 9 bandas (B1 – B9) de onda corta con una resolución espacial de 30 m (excepto la pancromática B8 que su resolución es de 15m). El “Thermal Infrared Sensor” (TIRS) tiene longitudes de onda de 10.60 hasta 12.51 μm y una resolución espacial de 100 m (Missions, 2016).

Tabla 4: Descripción de las bandas LANDSAT 8 OLI (Congedo, 2016)

Bandas	Longitud de onda (μm)	Descripción	Resolución (m)
--------	------------------------------------	-------------	----------------

Banda1	0.43-0.45	Coastal Aerosol	30
Banda2	0.45-0.51	Azul	30
Banda3	0.53-0.59	Verde	30
Banda4	0.64-0.67	Rojo	30
Banda5	0.85-0.88	Infrarrojo cercano	30
Banda6	1.57-1.65	Infrarrojo de Onda corta	30
Banda7	2.11-2.29	Infrarrojo de Onda corta	30
Banda8	0.50-0.68	Pancromático	15
Banda9	1.36-1.38	Cirrus	30
Banda10	10.60-11.19	Infrarrojo Térmico	100
Banda11	11.50-12.51	Infrarrojo Térmico	100

Rasgos espectrales (firmas espectrales)

La información espectral de reflectancia proveniente de objetos o superficies detectadas por los sensores son representadas de forma visual mediante un conjunto de pares ordenados, en donde el eje de las abscisas (eje X) contiene las longitudes de ondas, mientras que el eje de las ordenadas (eje y) contiene el porcentaje de reflectancia. Esta representación es conocida con el nombre de espectro de reflectancia o firmas espectrales.

Cada mineral tiene una firma espectral única y distintiva, estas están compuestas por sus rangos de absorción, los cuales representan la composición mineralógica de la muestra, la concentración de minerales, la estructura cristalina, el contenido de agua y las consideraciones ambientales (generalmente son distorsiones producto de la interacción de la energía reflejada con la atmósfera). En la identificación de minerales, las firmas obtenidas ya sea en campo o por medio de información satelital son comparadas mediante software con firmas referenciales provenientes de bibliotecas espectrales, con la finalidad de generar identificaciones precisas.

Componentes de las firmas espectrales

Las firmas espectrales contienen una curva envolvente de absorción con rasgos localizados en longitudes y amplitudes de ondas característicos, permitiendo la identificación de las variaciones químicas de un compuesto. Los rasgos de absorción son presentados como mínimos (puntos bajos de la gráfica) respecto a la envolvente general de la curva. La profundidad de los rasgos depende de la intensidad de las vibraciones de energía presentes en las longitudes de onda específicas, las cuales son características de cada mineral. Por lo tanto, la intensidad de la profundidad es producto de la concentración del mineral y de las propiedades físicas del mismo. Finalmente, "FWHM" significa "Full Width at Half Maximum" (ancho total a la mitad del máximo). Puede utilizarse para determinaciones de simetría relacionadas con la cristalinidad. (Clark et al., 1990) indica que otro uso del "FWHM" es determinar la posición de una banda y la detección de su desplazamiento.

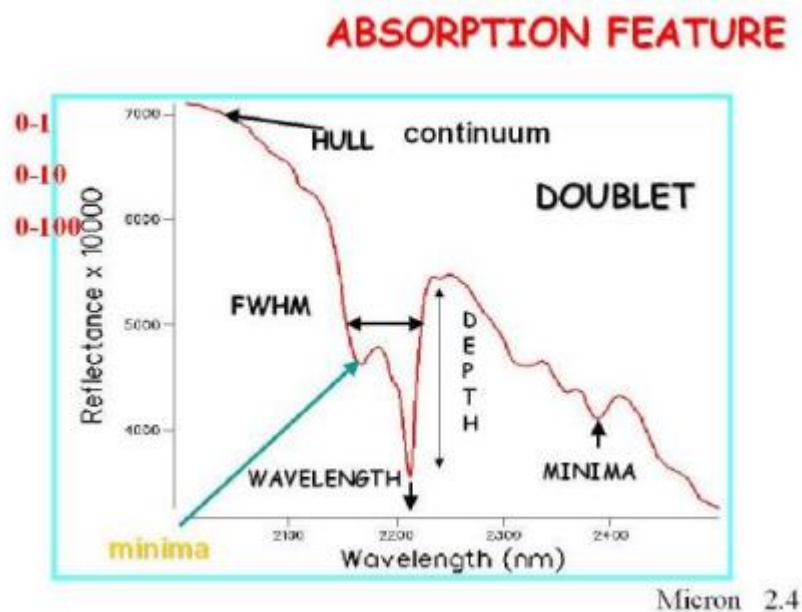


Figura 6. Componentes de una firma espectral (Hauff, 2008)

Espectrometría de reflectancia de minerales de alteración hidrotermal

Los yacimientos hidrotermales se encuentran localizados espacial y temporalmente en base a los rasgos característicos que presentan (temperatura y presión de formación, asociaciones minerales y conjuntos minerales), por tal motivo es de vital

importancia la comprensión (fuentes y evolución) y caracterización de los conjuntos minerales de alteración (variaciones fisicoquímicas) presentes en los diferentes tipos de alteración hidrotermal, el conocer a detalle las asociaciones minerales es igualmente valioso, debido a que la identificación de un mineral puede indicar la presencia de otros. Cada zona de alteración hidrotermal contiene mezclas complejas de conjuntos minerales ya sean primarios (originales) o los minerales producto del metasomatismo (minerales nuevos).

Los conjuntos minerales de alteración presentan granos finos, incluso algunos de ellos carecen de cristalinidad (ambientes de baja temperatura) complicando su identificación óptica, de modo que muchas de las interpretaciones de minerales y sus relaciones paragenéticas tienden al error.

La espectroscopia de reflectancia surge como una potente herramienta de interpretación mineralógica, especialmente cuando usamos un espectrómetro manual, el cual nos entrega información en tiempo real sobre la presencia y contenido de minerales de alteración. Convirtiéndose así en una herramienta poderosa para la exploración mineral con poca inversión y gran calidad de resultados (Kerr et al., 2011).

Comportamiento espectral de minerales típicos de alteraciones

Hidrotermales Para la detección de minerales de alteración hidrotermal por medio de espectrometría de reflectancia hacemos referencia a que estos presentan sus rasgos espectrales característicos en la región SWIR (infrarrojo medio) del espectro electromagnético.

(Clark et al. 1990), (Hauff, 2008) y (Hunt, 1977) en sus respectivas publicaciones afirman que la zona SWIR es sensible a moléculas y radicales como OH, H₂O, NH₄, CO₃ y a enlaces del catión OH como Al-OH, Mg-OH y Fe-OH.

La espectroscopia por SWIR detecta las energías vibracionales de los enlaces químicos entre átomos y moléculas en la capa octaédrica del compuesto, permitiendo la detección de materiales tanto cristalinos como amorfos.

(Mamani Ticona, 2017) afirma que los minerales de alteración no sólo son identificables en base a sus características distintivas, también pueden ser identificadas por la forma de su firma espectral, la cual contiene información vital

como la posición de sus ondas, su intensidad, forma de la depresión relacionada a la absorción y la forma total del espectro.

Para que sea posible la identificación de minerales, su presencia debe ser mayor al 5% de la muestra, salvo la ventaja de que el mineral a mapear sea altamente reflectivo. Cuando se trata con mezclas de minerales afines al infrarrojo medio, se habla que el mineral dominante es fácilmente detectable, pero los demás minerales deberán estar presentes en más del 10% para generar datos confiables. Cuando se trata de minerales escasamente reflectantes su presencia debe ser mayor al 20%.

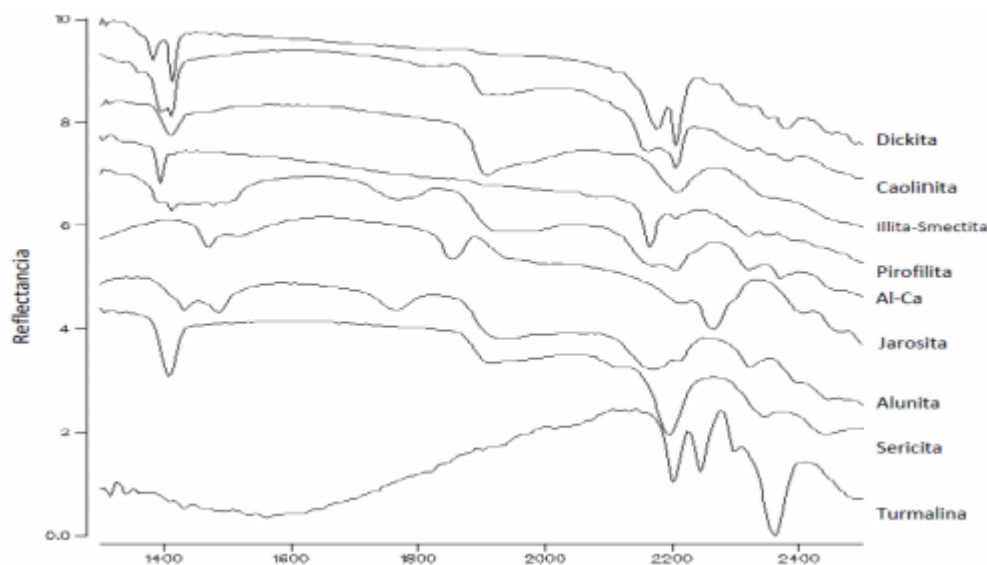


Figura 7. Firmas espectrales de minerales (Brito, 2012)(Hauff, 2008)

1.4 Interés del uso de la teledetección en las investigaciones de arcilla

Du et al., (2023) en su artículo "Clay minerals on Mars: An up-to-date review with future perspectives" realizan una revisión actualizada de la literatura científica sobre la presencia de minerales de arcilla en Marte, en el mismo se destaca que la presencia de minerales de arcilla en Marte proporciona evidencia de la presencia de agua líquida en el pasado del planeta y de la evolución geológica bajo diferentes ambientes. Además, se discuten los diferentes tipos de minerales de arcilla encontrados en Marte y se presentan algunos estudios de caso que ilustran su formación y distribución en el planeta, destaca la importancia de la investigación futura en la exploración de Marte y la necesidad de seguir investigando la presencia de minerales de arcilla en el planeta. En particular, se discuten las perspectivas

futuras de la investigación en la detección de minerales de arcilla en Marte y su relación con la presencia de agua líquida en el planeta.

Maged et al., (2023) en su artículo "Evaluation insight into Abu Zenima clay deposits as a prospective raw material source for ceramics industry: Remote Sensing and Characterization" es un estudio que evalúa la idoneidad de los depósitos de arcilla del Cretácico Superior (Santoniano) en el área de Abu Zenima como materia prima para la industria de la cerámica. El estudio utiliza técnicas de teledetección y caracterización para evaluar la calidad y la cantidad de los depósitos de arcilla en la zona, en él se destaca la importancia de la evaluación de la idoneidad de los depósitos de arcilla para la industria de la cerámica y cómo la teledetección y la caracterización pueden ser herramientas valiosas para este propósito. Además, se presentan algunos estudios de caso que ilustran la aplicación de estas técnicas en la evaluación de la idoneidad de los depósitos de arcilla para la industria de la cerámica.

Khalil et al., (2022) en la investigación "Utilizing Remote Sensing and Lithostratigraphy for Iron and Clay Minerals Mapping in the North of Aswan Area, Egypt" se utilizó técnicas de teledetección y litroestratigrafía para mapear los minerales de hierro y arcilla en el norte del área de Aswan, Egipto. El estudio se centra en las formaciones de Araba, Gilf y Abu Ballas, que contienen sedimentos de arcilla y hierro, se destaca la importancia de la teledetección y la litroestratigrafía en la exploración de minerales y cómo estas técnicas pueden ser herramientas valiosas para la identificación y el mapeo de los minerales de hierro y arcilla.

Priya & Ghosh, (2022) en su estudio titulado "Soil clay minerals abundance mapping using AVIRIS-NG data" utiliza tecnología avanzada de teledetección hiperespectral para identificar diferentes tipos de minerales de arcilla en el suelo y mapear su abundancia. El estudio se centra en la identificación y el mapeo de los minerales de arcilla, como la caolinita, la montmorillonita y la illita, utilizando datos de AVIRIS-NG. El estudio utiliza técnicas de teledetección hiperespectral para identificar diferentes tipos de minerales de arcilla en el suelo y mapear su abundancia. Se clasificaron muestras representativas de diferentes tipos de minerales de arcilla, como la caolinita, la montmorillonita y la illita, utilizando datos de AVIRIS-NG, destaca la importancia de la teledetección hiperespectral en la identificación y el mapeo de los

minerales de arcilla en el suelo y cómo estas técnicas pueden ser herramientas valiosas para la gestión de los recursos naturales y la agricultura.

Lamrani et al., (2021) en la investigación titulada "Bentonite clay minerals mapping using ASTER and field mineralogical data: A case study from the eastern Rif belt, Morocco" utiliza técnicas de teledetección y datos mineralógicos de campo para mapear la distribución espacial de los minerales de arcilla de bentonita en el área de Zeghanghane, ubicada en el cinturón oriental de Rif, Marruecos. El estudio se centra en la identificación y el mapeo de los minerales de arcilla de bentonita utilizando datos de ASTER y datos mineralógicos de campo.

Según Mogrovejo Barrera, (2021) en su trabajo titulado: "Teledetección espacial mediante la aplicación de imágenes satelitales tipo ASTER L1T, LANDSAT 8 OLI y SENTINEL 2 en zonas de alteración hidrotermal"; se planteó como objetivo determinar zonas de alteración hidrotermal mediante la aplicación de teledetección espacial por medio de imágenes satelitales ASTER L1T, LANDSAT 8 OLI y SENTINEL 2. La detección de zonas con presencia de alteración hidrotermal se realizó mediante técnicas de realce espectral como: Composiciones RGB, Cocientes de bandas, Índices de Identificación Litológica (exclusivo de ASTER), Análisis de Componentes Principales y el Método Angular Espectral (SAM). El análisis SAM requirió de un proceso a detalle, debido a que se realizó una comparación entre las firmas espectrales extraídas de cada imagen satelital con las firmas que ofrece el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Los mejores resultados son los derivados de la imagen ASTER L1T, debido a que esta cuenta con una mejor resolución y sensibilidad espectral en sus bandas, específicamente en la región del SWIR.

Percival et al., (2017) en la investigación titulada `` Customized spectral libraries for effective mineral exploration: mining national mineral collections ``, se discute cómo la teledetección (VNIR y MIR) se utiliza para estudiar los minerales de arcilla más allá de la Tierra. El estudio se centra en la aplicación de la espectroscopia VNIR-SWIR (visible e infrarrojo cercano y de onda corta) para la identificación mineral de arcillas especiales. Los principales resultados del estudio son que la espectroscopia VNIR-SWIR se utiliza para caracterizar los minerales de arcilla y óxidos de hierro mediante espectroscopía de reflectancia difusa. Además, la teledetección es una herramienta útil para la identificación y caracterización de minerales de arcilla en

otros planetas y cuerpos celestes. La espectroscopia VNIR-SWIR se utiliza para la identificación de minerales de arcilla especiales, lo que puede ser útil para la exploración espacial y la minería en otros planetas. En resumen, la investigación destaca la importancia de la teledetección y la espectroscopia VNIR-SWIR para la identificación y caracterización de minerales de arcilla en otros planetas y cuerpos celestes.

Gasmi et al., (2022) en la investigación titulada `` Satellite Multi-Sensor Data Fusion for Soil Clay Mapping Based on the Spectral Index and Spectral Bands Approaches'', se utilizó la fusión de datos de múltiples sensores satelitales para mapear la arcilla del suelo mediante enfoques de índices espectrales y bandas espectrales. El objetivo del estudio fue identificar y mapear la arcilla del suelo utilizando la teledetección. Los principales resultados del estudio son que la fusión de datos de múltiples sensores satelitales es una herramienta útil para la identificación y mapeo de la arcilla del suelo. Además, los enfoques de índices espectrales y bandas espectrales son útiles para la identificación y mapeo de la arcilla del suelo. El estudio destaca la importancia de la teledetección para la identificación y caracterización de la arcilla del suelo en diferentes contextos y aplicaciones, como la gestión de la tierra y la agricultura. En resumen, la investigación demuestra que la teledetección es una herramienta útil para la identificación y mapeo de la arcilla del suelo, lo que puede ser útil para la gestión de la tierra y la agricultura.

Rahal et al., (2023) en la investigación titulada `` Mapping of clay soils by remote sensing in the area of Mers El Kébir, Algeria'', se mapearon los suelos arcillosos mediante teledetección en el área de Mers El Kébir, Argelia, lo que permitió determinar su potencial de contracción y expansión. Como principales resultados, se obtuvo un mapa con la ubicación de sectores con presencia de arcillas susceptibles a la expansividad y una ecuación empírica para la estimación de la carga contra hinchamiento, lo cual permite una mejor información que sirve de base a proyectistas para la toma de decisión en el diseño de cimentaciones la investigación destaca la importancia de la teledetección para la identificación y mapeo de los suelos arcillosos, lo que puede ser útil para la gestión de la tierra y la construcción de infraestructuras.

Shabou et al., (2023) en la investigación titulada `` Soil Clay Content Mapping Using a Time Series of Landsat TM Data in Semi-Arid Lands ´´, se utilizó una serie temporal de datos Landsat TM para mapear el contenido de arcilla del suelo en tierras semiáridas mediante la detección de suelos desnudos y la predicción de contenido de arcilla. El objetivo del estudio fue identificar y mapear el contenido de arcilla del suelo utilizando la teledetección. Los principales resultados del estudio son que la serie temporal de datos Landsat TM es una herramienta útil para la identificación y mapeo del contenido de arcilla del suelo en tierras semiáridas. Además, la detección de suelos desnudos y la predicción de contenido de arcilla son enfoques útiles para la identificación y mapeo del contenido de arcilla del suelo. La investigación destaca la importancia de la teledetección para la identificación y mapeo del contenido de arcilla del suelo, lo que puede ser útil para la gestión de la tierra y la agricultura.

Abrams et al., (2019) en la investigación titulada `` New Techniques for Clay Mineral Identification by Remote Sensin´´, se discuten las nuevas técnicas para la identificación de minerales de arcilla mediante teledetección. El estudio se centra en la aplicación de la espectroscopia VNIR-SWIR (visible e infrarrojo cercano y de onda corta) para la identificación mineral de arcillas. Los principales resultados del estudio son que la espectroscopia VNIR-SWIR es una herramienta útil para la identificación y caracterización de minerales de arcilla mediante teledetección. Además, la investigación destaca la importancia de la teledetección para la identificación y caracterización de minerales de arcilla en diferentes contextos y aplicaciones, como la exploración de recursos naturales y la gestión de la tierra. En resumen, el estudio demuestra que la teledetección y la espectroscopia VNIR-SWIR son herramientas útiles para la identificación y caracterización de minerales de arcilla, lo que puede ser útil para la exploración de recursos naturales y la gestión de la tierra.

Ducasse et al., (2018) en la investigación titulada ``Estimation of Montmorillonite in Clay Samples Using Laboratory SWIR Imaging Spectroscopy´´, se discute la estimación de montmorillonita en muestras de arcilla mediante espectroscopía de imágenes SWIR de laboratorio. El objetivo del estudio fue desarrollar un método para estimar la cantidad de montmorillonita en muestras de arcilla utilizando espectroscopía de imágenes SWIR de laboratorio. Los principales resultados del estudio son que la espectroscopía de imágenes SWIR es una herramienta útil para

la estimación de la cantidad de montmorillonita en muestras de arcilla. Además, la investigación destaca la importancia de la teledetección para la identificación y caracterización de minerales de arcilla en diferentes contextos y aplicaciones, como la exploración de recursos naturales y la gestión de la tierra. En resumen, la investigación demuestra que la teledetección y la espectroscopía de imágenes SWIR son herramientas útiles para la estimación de la cantidad de montmorillonita en muestras de arcilla, lo que puede ser útil para la exploración de recursos naturales y la gestión de la tierra.

Paul et al., (2018) en la investigación titulada `` Mapping soil organic carbon and clay using remote sensing in Brazilian soils'', se utilizó la teledetección para mapear el carbono orgánico del suelo y la arcilla en suelos de Brasil. El objetivo del estudio fue identificar y mapear el carbono orgánico del suelo y la arcilla utilizando la teledetección. Los principales resultados del estudio son que la teledetección es una herramienta útil para la identificación y mapeo del carbono orgánico del suelo y la arcilla. Además, la investigación destaca la importancia de la teledetección para la identificación y caracterización de minerales de arcilla en diferentes contextos y aplicaciones, como la gestión de la tierra y la agricultura.

Zabloskii & others, (2016) en la investigación titulada `` The method of detection of clay minerals and iron oxide based on landsat multispectral images (as exemplified in the Territory of Thai Nguyen Province, Vietnam ´´, se utilizó la teledetección para detectar y mapear minerales de arcilla, óxidos de hierro y minerales ferrosos en la provincia de Thai Nguyen, Vietnam. El objetivo del estudio fue identificar y mapear los minerales de arcilla, óxidos de hierro y minerales ferrosos utilizando la teledetección. Los principales resultados del estudio son que la teledetección es una herramienta útil para la identificación y mapeo de minerales de arcilla, óxidos de hierro y minerales ferrosos.

Janaki Rama Suresh et al., (2016) en la investigación titulada ``Hyperspectral Analysis of Clay Minerals'', se utilizó la espectroscopía hiperespectral para analizar los minerales de arcilla. El objetivo del estudio fue identificar y caracterizar los minerales de arcilla utilizando la espectroscopía hiperespectral. Los principales resultados del estudio son que la espectroscopía hiperespectral es una herramienta útil para la identificación y caracterización de minerales de arcilla. Además, la investigación destaca la importancia de la teledetección para la exploración de

recursos naturales y la gestión de la tierra. En resumen, el estudio demuestra que la espectroscopía hiperespectral es una herramienta útil para la identificación y caracterización de minerales de arcilla, lo que puede ser útil para la exploración de recursos naturales y la gestión de la tierra.

Pérez et al., (2008) en la investigación titulada "Aplicaciones de la teledetección al estudio de los depósitos cuaternarios cubanos", se enfoca en el uso de la teledetección para el estudio de los depósitos cuaternarios en Cuba. Las técnicas de teledetección han sido ampliamente utilizadas en las investigaciones geológicas en Cuba durante los últimos años. El objetivo del estudio es identificar y mapear los depósitos cuaternarios utilizando técnicas de teledetección. El procesamiento de imágenes permitió la identificación de los depósitos cuaternarios en Cuba y la comparación de los resultados obtenidos por teledetección con los datos obtenidos en el campo.

Ávila et al., 2020 en la investigación titulada "Caracterización espectral de los bosques de mangles en Cuba a través de sensores remotos: un enfoque metodológico", se enfoca en evaluar las características espectrales y su variabilidad espacial de los bosques de mangles en Cuba utilizando sensores remotos. El estudio describe y aplica un método para evaluar las características espectrales y su variabilidad espacial de los bosques de mangles en Cuba utilizando sensores remotos. Además, el estudio evalúa las características espectrales de los bosques de mangles en Cuba y describe su variabilidad espacial. El estudio demuestra la utilidad de la teledetección para la caracterización espectral y el monitoreo de los bosques de mangles en Cuba.

Turner et al., (2023) en la investigación titulada "Extent, Severity, and Temporal Patterns of Damage to Cuba's Ecosystems following Hurricane Irma: MODIS and Sentinel-2 Hurricane Disturbance Vegetation Anomaly (HDVA)", tuvo como objetivo evaluar el daño causado por el huracán Irma a los ecosistemas de Cuba utilizando técnicas de teledetección. El estudio desarrolló un enfoque de "anomalía de vegetación" de series temporales de múltiples resoluciones, donde se compararon las observaciones posteriores a la perturbación en la vegetación fotosintéticamente activa con las observaciones previas a la perturbación para estimar la extensión, gravedad y patrones temporales de los cambios ecológicos. Se creó la Anomalía de Vegetación de Perturbación de Huracanes (HDVA) para evaluar el daño a la

cobertura vegetal. El estudio encontró que el enfoque HDVA fue efectivo para evaluar el daño causado por el huracán Irma a los ecosistemas de Cuba. Los resultados del estudio pueden ser utilizados para informar las decisiones de gestión y los esfuerzos de restauración en las áreas afectadas.

Caballero-Aragón et al., (2023) en la investigación titulada "A decade of study on the condition of western Cuban coral reefs, with low human impact", se enfoca en el estudio de los arrecifes de coral en la costa oeste de Cuba con bajo impacto humano. El objetivo del estudio es evaluar la salud y el estado de los arrecifes de coral utilizando técnicas de teledetección. El estudio encontró que los arrecifes de coral en la costa oeste de Cuba tienen un bajo impacto humano y están en buen estado de salud. Los resultados del estudio pueden ser utilizados para informar las decisiones de gestión y conservación de los arrecifes de coral en Cuba.

Ojeda Martínez et al., (2020) en la investigación titulada "Cuba surface estimation from shoreline mapping, generated by Sentinel-2 image processing", se utilizó datos de teledetección de Sentinel-2 para estimar la superficie de la línea costera de Cuba; se centró en la estimación de la superficie total de la isla de Cuba y sus cayos utilizando un método expedito. Para lograrlo, se utilizó un método expedito que permitió obtener una estimación rápida y precisa. El estudio destaca la importancia de la teledetección y sus aplicaciones en la detección de la línea costera, ya que la técnica más comúnmente utilizada en Cuba para la detección de la línea costera es la interpretación visual, ya sea en el campo, por fotografía aérea o satelital. La investigación demuestra la utilidad de la teledetección para la estimación de la superficie de la línea costera de Cuba y su importancia en la gestión y conservación de los recursos marinos. En resumen, el estudio destaca la importancia de la teledetección para la estimación de la superficie de la línea costera de Cuba y su impacto en la gestión y conservación de los recursos marinos, y presenta un método expedito para la estimación de la superficie total de la isla de Cuba y sus cayos.

Las investigaciones realizadas en otros países demuestran que la teledetección se usa con éxito en la exploración de arcillas, con la implementación de diferentes sistemas de satélites y combinaciones de bandas.

1.5 Características Físico-Geográficas de la Región.

1.5.1 Relieve

El relieve del territorio se caracteriza por una franja costera llana con alturas hasta de 200 metros, bastante estrecha y las altas montañas del sistema Sagua – Baracoa, que se extienden hacia el sur con alturas superiores a los mil metros, la mayor de las cuales es el Pico Toldo en las Cuchillas de Moa, con mil ciento setenta metros sobre el nivel del mar, ricas en recursos forestales y variados helechos.

La franja costera tiene una extensión de unos 40 kilómetros, llana y en ocasiones con ligeras alturas. Esa zona es seguida por un sistema premontañoso que se prolonga hasta unos seis a diez kilómetros al sur de la costa con alturas medias entre 200 y 500 metros. Sus principales elevaciones son el Cerro de Miraflores al oeste, las minas de la Pedro Soto Alba y las alturas de Cayo Guam.

La otra característica del territorio es la parte montañosa, con alturas entre 500 y más de 1000 metros, que incluyen las Cuchillas de Moa, Calentura, Farallones y las de Gran Tierra.

La zona montañosa del territorio alcanza 363 km², el 50 por ciento del total, la que se encuentra dentro del Plan Turquino y una gran parte de ella se encuentra dentro del Parque Nacional Alejandro de Humboldt, Patrimonio de la Humanidad(Chacón, 2015).

1.5.2 Red hidrográfica.

En la región de estudio se desarrolla una red fluvial densa y dendrítica, representada por numerosos ríos y arroyos, entre los que se encuentran el río Moa, Cabañas, Yagrumaje, Cayo Guam, Quesigua, Cupey, Yamanigüey y Jiguaní, entre otros; todos ellos mantienen un buen caudal todo el año ya que su fuente de alimentación principal son las precipitaciones atmosféricas. Estos ríos desembocan en el Océano Atlántico, formando deltas cubiertos de mangles, apreciándose en los mismos una zona de erosión y otra de acumulación.

Los ríos forman terrazas al llegar a la zona de pie de monte y presentan no pocos meandros, sus orillas son abruptas y erosionadas en la zona montañosa mientras que en las partes bajas son llanas y acumulativas. Son alimentados por las precipitaciones atmosféricas teniendo como origen las zonas montañosas del grupo Sagua - Baracoa. Generalmente sobrepasan los 1.5 m/s de velocidad, los gastos

oscilan entre 100 y 400 L/s, en período de estiaje y hasta más de 300 m³/s durante avenidas en períodos húmedos. Se puede decir que el nivel de los ríos cambia en dependencia de las precipitaciones, los niveles más bajos se observan en el período de seca, cuando los ríos se alimentan solamente de aguas subterráneas, correspondiente a los meses de julio a septiembre y los más elevados en la época de lluvias máximas, la cual está comprendida de octubre a enero.

1.5.4 Tectónica.

La tectónica de la región es compleja, se pone de manifiesto la superposición de fenómenos tectónicos originados en condiciones geodinámicas contrastantes y en diferentes períodos, así el sistema de mantos tectónicos y el intenso plegamiento que caracterizan la estructura geológica de las secuencias más antiguas surgieron en un ambiente de compresión máxima.

En contraposición a esto los eventos tectónicos más jóvenes surgieron en lo fundamental, bajo la acción de esfuerzos de tracción de la corteza terrestre, estos esfuerzos han originado sistemas de fallas que dividieron la zona en una serie de bloques horsticos y grabens que enmascararon las estructuras más antiguas. Por otra parte, los movimientos de traslación horizontal que provocan el desplazamiento de los mantos tectónicos de Cuba Oriental fueron de gran magnitud, principalmente para las serpentinas que forman una unidad aloctona.

1.6 Características del área de estudio (Cayo Guam).

1.6.1 Situación geográfica:

Depósito ubicado al sureste de la localidad de Moa, provincia de Holguín, específicamente en los márgenes del río Cayo Guam, a unos 2 km de la carretera Moa-Baracoa, a 200 m aproximadamente de la antigua planta de Beneficio de Cromo actual "Molino de piedras" perteneciente a la Empresa Social Socialista (DOMUS), en torno a las coordenadas X: 700 000, 709 000 y Y: 206 000, 220 000 según el sistema de Lambert. El área de estudio comprende aproximadamente una extensión de más de 10 000 m² (Pérez García, 2015) ver Figura 8.

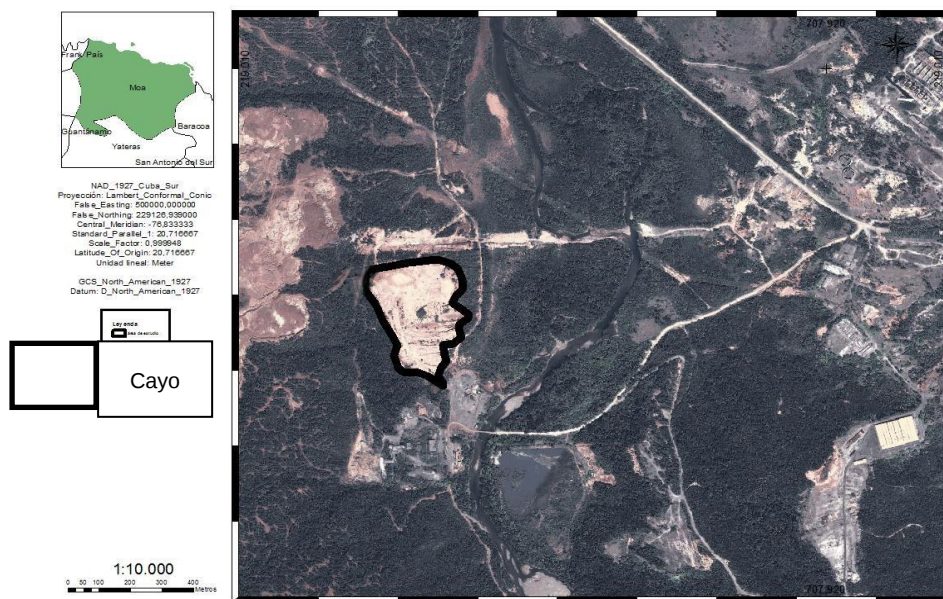


Figura 8: Esquema de ubicación geográfica del área de estudio. Escala 1: 10 000 (Pérez

1.6.2 Características generales del área de estudio:

El depósito tiene grandes taludes donde se pueden diferenciar sectores con variedad de tonalidades, estas pueden ser blanco- amarillentas, amarillo- pardo y otras, donde las rocas del basamento a partir de las que se originaron las potentes cortezas de intemperismo están representadas por cúmulos máficos y en menor grado cúmulos ultramáficos. Posee una potencia promedio de 10 m. Es un depósito desarrollado sobre gabros (corteza sobre gabros). Se considera un depósito "residual" que es el tipo genético de las lateritas níquelíferas que están a su alrededor, diferenciados por la roca madre. En la base del depósito afloran gabros muy intemperizados alterados a un material de color blanco y aspecto terroso-arcillosos, muy deleznable y con alta plasticidad. Hacia la parte superior existe una transición gradual a materiales similares a los de la base del corte formando una corteza de meteorización de colores variables desde el rosado hasta el rojo intenso, a partir de análisis químicos se ha demostrado un incremento en el contenido de hierro y que durante el proceso de alteración hubo un aumento considerable de alúmina y la consecuente migración del Fe, Ca y Mg para la formación de la caolinita como mineral residual la cual tuvo su origen en la meteorización de cuerpos de gabros formando potentes capas que constituyen depósitos de gran extensión, (Orozco Melgar, 1995).

En la Figura 9 se puede observar la geología del área de estudio

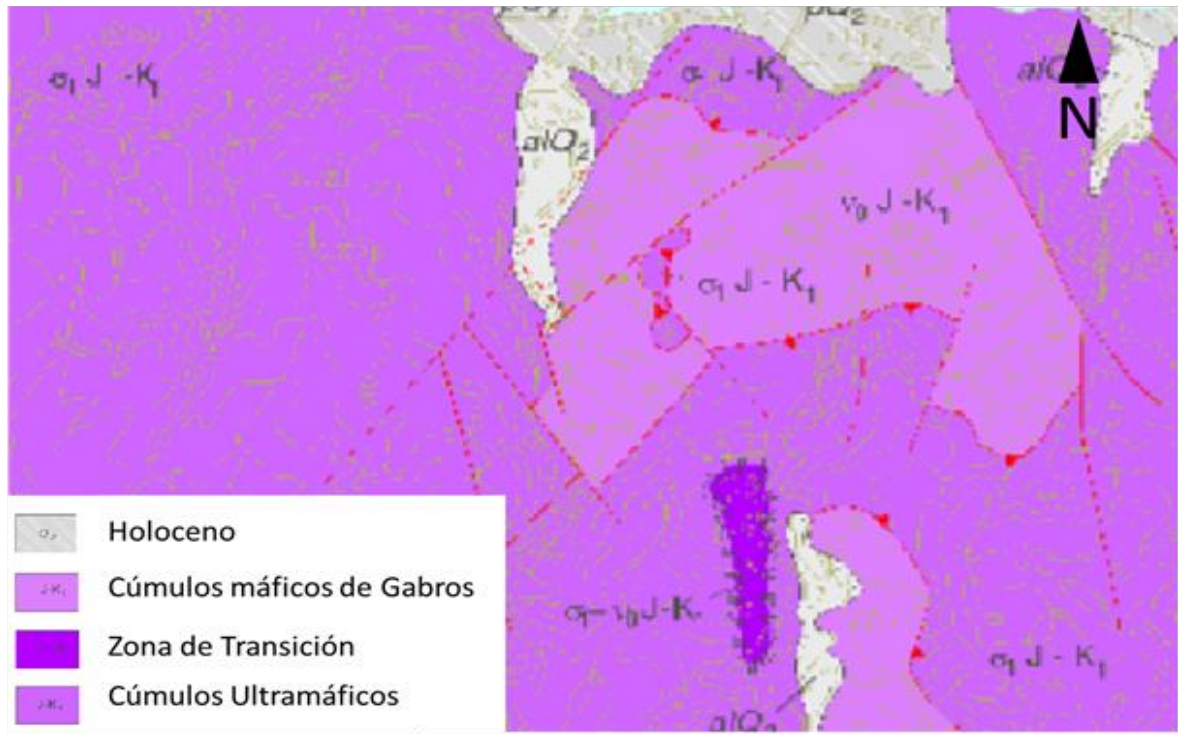


Figura 9:Esquema geológico de Cayo Guam generado a partir del mapa del IGP escala 1: 100 000.

CAPÍTULO II - MATERIALES, MÉTODOS Y VOLÚMENES DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.

2.1 Etapas de la investigación.

2.2 Etapa de campo.

2.2.1 Descripción de los itinerarios:

Durante el trabajo de campo se empleó el método de reconocimiento geológico, para esto se trabajó siguiendo una marcha ruta, para estudiar las áreas más perspectivas puesto que se encontraban identificadas por trabajos geológicos anteriores.

En la Figura 10 a continuación se observa la ubicación de los puntos de documentación.

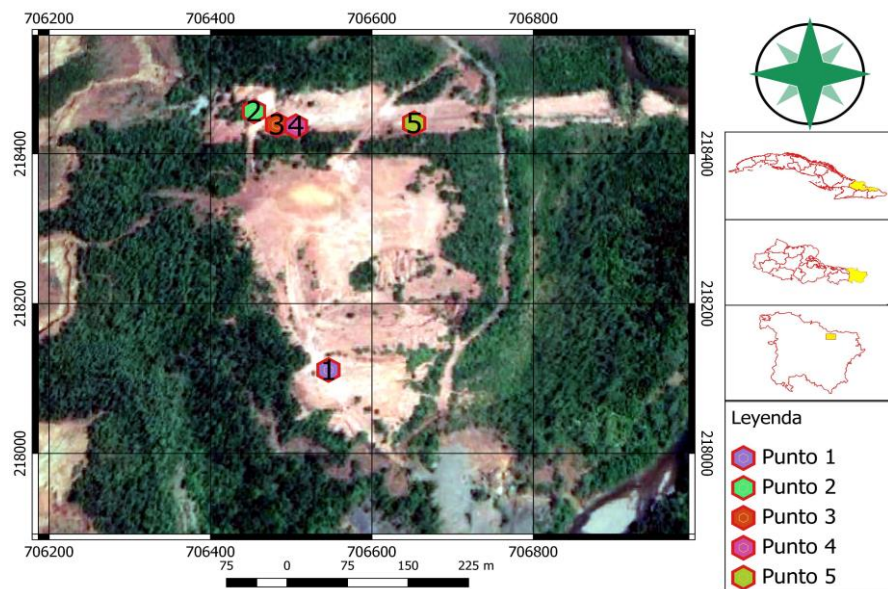


Figura 10: Esquema de ubicación de los puntos de documentados escala 1: 7 500.

Tabla 5: Coordenada de los puntos muestreados

Nº	Long	Lat
1	20° 36´ 21,12344´´	-74° 51´ 3,8628´´
2	20° 36´ 33,4770´´	-74 51 6,8443´´
3	20 36´ 33,4770´´	-74 51´ 6,8443´´
4	20 36´ 32,4759´´	-74 51´ 4,9210´´
5	20° 36´ 32,6368´´	-74° 50´ 54,6748´´

2.2.2 Resumen del Muestreo y documentación:

Se comenzó el muestreo por la manifestación Cayo Guam (*Figura 11*). Con base al estudio bibliográfico, se conoce que existen tres horizontes en Cayo Guam, un horizonte laterítico en la parte superior donde predominan los óxidos e hidróxidos de hierro (*Figura 12 a*), un horizonte intermedio donde predomina una mezcla de caolinita con gibbsita (*Figura 12 b*) y un horizonte inferior compuesto por caolinita de alta plasticidad (*Figura 12 c*). Se tomaron muestras básicas y muestras compósitos en base a la variabilidad de los horizontes. La tarea es relativamente sencilla, pues se puede observar claramente donde comienza uno y termina el otro y la variabilidad es en la vertical siendo bastante homogéneos en la horizontal. Los perfiles tienen unos 10 m de potencia; desde 0 a los 30 cm existe una capa de suelo pardo negro, sobre el suelo se desarrolla una vegetación que puede llegar a ser considerable. Se observan raíces que no sobrepasan los 30 cm de profundidad. Desde los 30 cm hasta los 5 m se observan arcillas más homogéneas de una coloración parda rojiza. El material es deleznable, poco plástico. A partir de los 5 m Se observan arcillas caoliníticas de coloración abigarrada (blanco, rojo, rosado, morado, amarillo), poseen alta plasticidad al contacto con agua y por el contrario son muy deleznales secas. Es visible un intenso agrietamiento, atribuidos a la hidratación y deshidratación de las arcillas (grietas de desecación). Existe un segundo grupo de grietas rellenas por un material arcilloso blanco probablemente caolinita, estas poseen un espesor entre 1 -2 cm y hasta 5-6 cm. El agrietamiento no tiene una orientación preferencial. Existe un acaravamiento intenso en el área por la fuerte meteorización a la que ha sido sometida y la agravante de no tener cobertura vegetal. Se aprecia un bandeamiento, o alternancia de capas oscuras y claras, probablemente heredado de la roca madre (gabros bandeados). Además, se observan gabros relícticos alterados dentro de las arcillas.



Figura 11. Imagen panorámica de la manifestación Cayo Guam, se puede observar un intenso acarcavamiento producto de la ausencia de cobertura vegetal.

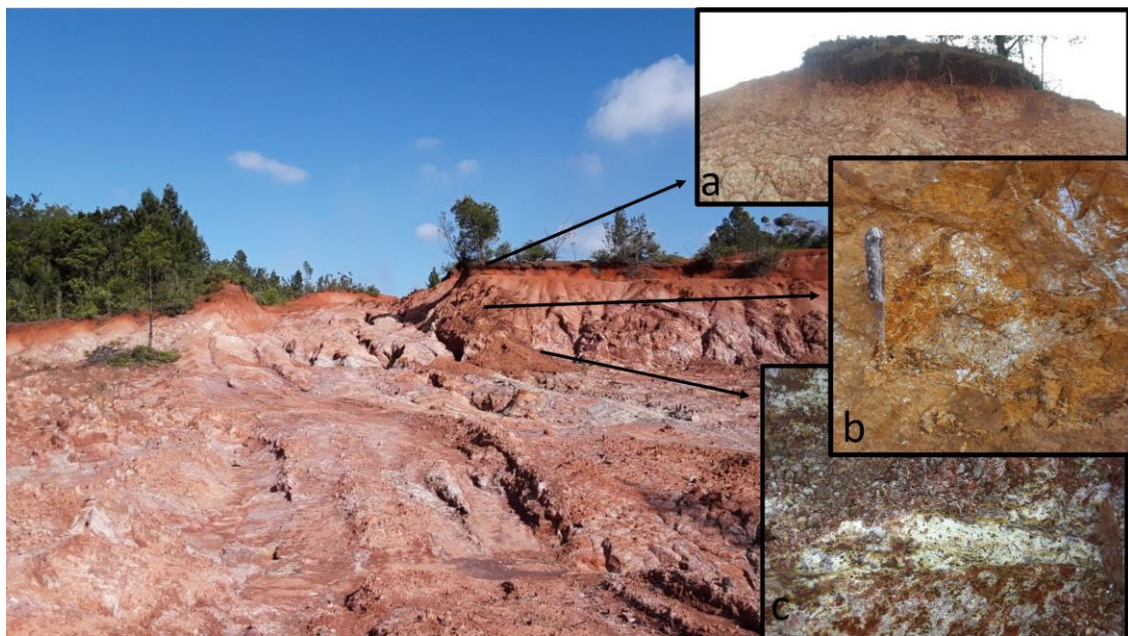


Figura 12. Panorámica de uno de los cortes de arcillas caoliníticas en Cayo Guam, a) zona de desarrollo de suelo, b) zona de mezcla de caolinita con gibbsita y c) zona de caolinita abigarrada plástica.

2.2.2. Preparación de las muestras para difracción de Rayos X y análisis químicos

Las muestras para Difracción de Rayos X se secaron a 105 ° C durante 12 horas, para lograr un mejor secado sin alterar la composición mineralógica. Se molieron a mano en un mortero de ágata durante 15 minutos aproximadamente. Se utilizaron 15 mL de isopropanol para la trituración en húmedo, añadiendo 5 mL cada 5 minutos. El resultado fue una pasta que luego se secó a 40 °C durante 12 horas. La granulometría resultante fue inferior a 20 micrómetros.

Al tratarse de muestras de arcilla, se decidió en todos los casos realizar preparaciones con orientación preferencial de los cristales, de acuerdo a las metodologías descritas en el Manual de Difracción de Rayos X del U. S. Geological Survey según lo descrito por Poppe *et al.* (2002). Las muestras que ya habían sido molidas y previamente secadas, se colocaron en un tubo de ensayo (4-5 g) donde se adicionó una mezcla de agua con 10% de amoníaco. Luego se colocaron en una máquina de ultrasonido durante 15 minutos. Pasado ese tiempo, se les dejó reposar durante una hora y luego se les aplicó nuevamente 15 minutos de ultrasonido.

Se prepararon tres series para orientación preferencial, la primera se colocó sobre placas de vidrio y se dejó reposar durante 12 horas sin ningún tratamiento. La segunda se trató a 60 °C en atmósfera de glicol durante 24 horas y la tercera se sometió a una temperatura de 550 °C grados durante 24 horas. Las diferentes series de mediciones de DRX se realizaron con: radiación CuK α y una rejilla de divergencia de 0.5 °. Las muestras se analizaron entre 5 y 80 ° (2 θ), con un paso angular de 0,008 ° y un tiempo por paso de 30 segundos. En el caso de las muestras con orientación preferencial se analizaron entre los 5 y 20° (2 θ) con rejilla de divergencia de 10,5 °, pero con paso angular de 0,02 °. La cuantificación fue realizada utilizando el método Rietveld con adición de un patrón interno de Al₂O₃ para la cuantificación de fases amorfas o pobremente cristalinas.

Las muestras para Fluorescencia de Rayos X se secaron a 105°C durante 24 horas, luego se pulverizaron en el molino de anillos hasta obtener una granulometría por debajo de 5 micrones. Se tomaron 2g de muestra previamente homogeneizada y cuarteada y se calcinaron durante 2 horas, a una temperatura de 950 °C. El calcinado resultante se colocó para enfriar, en un desecador de vidrio. El método

utilizado fue el de la perla fundida. En el mismo intervalo de temperatura se calculó las pérdidas por ignición.

Las muestras para determinación de Carbono-Azufre total se secaron a 40 °C y luego se molieron en el molino de anillos, para finalmente ser analizadas en un analizador de Carbono Azufre total ELEMENTRAC CS-i.

Cabe destacar que en cada una de las preparaciones se garantizó la adecuada homogeneización y cuarteo de las muestras para asegurar la representatividad de los análisis químicos y mineralógicos.

2.3 Trabajos de Teledetección

El principal material utilizado en estos estudios son las Imágenes satelital Sentinel2, Landsat 8 y Aster L1b, adquiridas descargas gratuitamente desde <http://glovis.usgs.gov>. Los lineamientos cartográficos necesitan, además de la imagen satelital, tener en cuenta el mapa topográfico para eliminar lineamientos relacionados con el ser humano actividades (carretera, ferrocarril...). Luego mapa geológico.

2.3.1 Composición de imágenes en color natural

Las composiciones de color en imágenes satelitales, se las realiza por medio de la asignación de los colores primarios (rojo, verde y azul) a un juego de tres bandas distintas de una imagen, en base a un criterio y orden establecido. En definitiva, una composición en color natural, nos permite visualizar la imagen tal cual el ojo humano la observaría, es decir la vegetación será representada por color verde, cuerpos de agua en azul, etc. (CHUVIECO y HUETE, 2016).

2.3.2 Preprocesamiento para las imágenes satelitales ASTER L1T, LANDSAT 8 OLI, SENTINEL 2

Las imágenes satelitales empleadas en este trabajo presentan un elevado nivel de preprocesamiento, es decir, los servidores entregan los productos en niveles de radiancia, por lo cual, únicamente es necesaria la aplicación de una corrección atmosférica a la imagen con la finalidad de obtener niveles de reflectancia. Esto implica una corrección de la radiación que cualquier superficie refleja, sobre la radiación que incide sobre la misma, permitiéndonos obtener la reflectancia relativa

de la imagen, de modo que sea posible observar los picos de absorción, reflexión que los materiales presentan en las bandas de los sensores (Caiza, 2018).

Caiza (2018) manifiesta que las correcciones antes mencionadas deben ser realizadas en softwares especializados en el manejo de imágenes satelitales multiespectrales o hiperespectrales, debido a que los procesos se realizan mediante procesos matemáticos que implican el paso de niveles digitales a reflectancia. Para nuestro trabajo, las correcciones se realizaron en el software QGIS.

2.3.2.1 Conversión de niveles digitales a reflectancia

La información contenida en una imagen satelital está en niveles digitales, los cuales no representan a una variable biofísica, es decir son valores crudos. Por lo tanto, no se los puede usar para la obtención de índices espectrales, mucho menos compararlos con los obtenidos de bibliotecas espectrales. Esto debido a que los índices espectrales trabajan exclusivamente con valores de reflectancia.

La conversión de niveles digitales a reflectancia se da en dos pasos:

1. Conversión de ND a radiancia (corrección radiométrica).
2. Conversión de radiancia a reflectancia aparente (cálculo de reflectancia en el sensor).

Si a los procesos anteriores le sumamos la eliminación de los efectos atmosféricos, se convertiría de una reflectancia en el sensor a una reflectancia en la superficie terrestre (corrección atmosférica) (Caiza, 2018).

2.3.2.2 Corrección atmosférica

La corrección atmosférica se realizó en el software QGIS, mediante la herramienta Semi-Automatic Classification funciona a partir del análisis de toda la escena y posterior cálculo de un espectro medio, el mismo que será usado como referencia para los demás píxeles. Finalmente, el espectro de referencia obtenido es dividido por el valor de cada píxel de la imagen con el objetivo de pasar de niveles de radiancia a niveles de reflectancia (Visual Information Solutions, 2009).

2.4 Procesamiento de imágenes satelitales

2.4.1 Combinaciones RGB

Las combinaciones de bandas son utilizadas en teledetección debido a que al asignar un juego de bandas a los canales RGB (rojo, verde y azul), estos realzan la respuesta espectral de los minerales, mostrándolos en distintas coloraciones de acuerdo a su composición. Esta técnica es realizada generalmente para un mapeo preliminar de zonas con presencia de minerales arcillosos y óxidos.

2.4.1.1 RGB para ASTER L1T, LANDSAT 8 OLI y SENTINEL 2

Se ha empleado las siguientes combinaciones en RGB:

Tabla 6: Combinaciones empleadas para ASTER L1T

Combinaciones de Aster	RGB
Color infrarrojo (vegetación)	3-1-2
Vegetación saludable	4-3-2
Infrarrojo de onda corta	6-3-1
Índice de Arcillas	4-6-8

Tabla 7: Combinaciones empleadas para Landsat 8

Descripción	RGB
Color natural	4-3-2
Falso color (urbano)	7-6-4
Color infrarrojo (vegetación)	5-4-3
Tierra/agua	5-6-4
Infrarrojo de onda corta	7-5-4
Análisis de vegetación	6-5-4

Tabla 8: Combinaciones empleadas para Sentinel 2

Descripción	RGB
Color natural	4-3-2
Falso color (urbano)	12-11-4

Color infrarrojo (vegetación)	8-4-3
Tierra/agua	5-6-4
Infrarrojo de onda corta	12-8-4
Análisis de vegetación	11-8-4

CAPÍTULO III - ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

3.1. Resultados de la caracterización química y mineralógica

Los análisis químicos y mineralógicos generalizados se muestran en la Tabla 9, Figura 13 y Figura 14. Se analizaron doce elementos químicos expresados en óxidos, de los cuales presentaron bajos contenidos el sodio, potasio y calcio, lo contrario ocurre con el silicio, hierro y aluminio, típico de una corteza de meteorización desarrollada sobre gabros. Los bajos valores de magnesio y sodio tras la descomposición de los gabros demuestran una pobre concentración de estos elementos por la excesiva migración geoquímica.

Tabla 9: Resultados químicos del depósito de Cayo Guam

Depósito	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	CO ₂	SO ₃	PPI	MnO	TiO ₂
CG	31,66	37,16	0,09	0,07	10,29	0,00	0,56	0,60	0,27	15,22	0,30	0,39

El análisis de la muestra para DRX permitió establecer la presencia de caolinita, nacrita, hematita, nontronita, goethita y dickita. ver Figura 13. **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

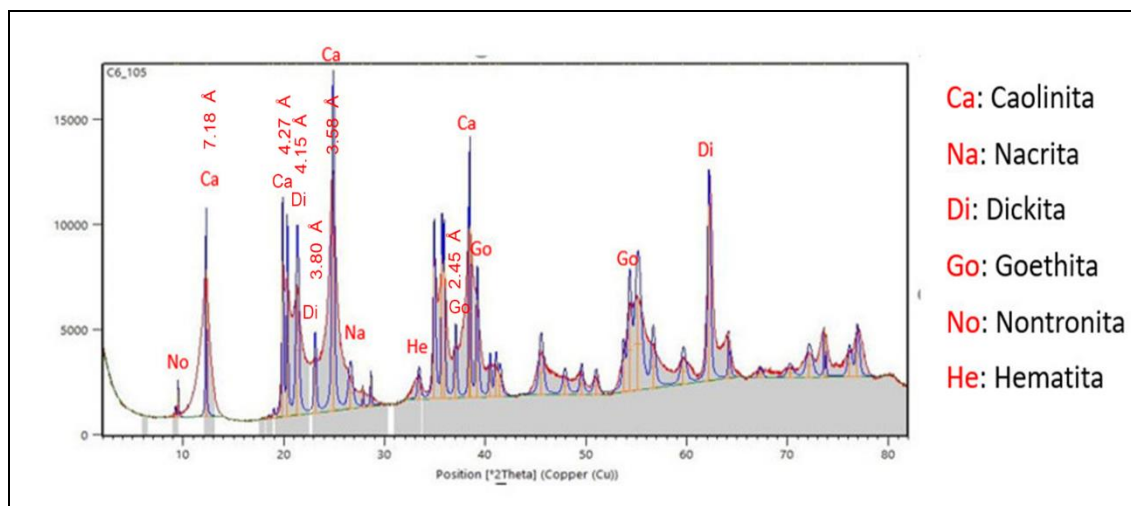


Figura 13: Grafico de la DRX de la muestra analizada, con representación de las fases cristalinas más características.

Se prestó especial atención a la composición mineralógica de las fases arcillosas, para lo cual se realizaron preparaciones con orientación preferencial de cristales, calentamiento en atmósfera de glicol y calcinación a 550 °C, esto último para hacer

colapsar los picos de los minerales del grupo caolinita. La combinación de estas preparaciones permite hacer presiones en las paragénesis de la fase arcillosa.

Los registros difractométricos de la muestra muestran reflejos fuertes cercanos a los 7,23-7,15 Å, que desaparecen por completo al someter a la muestra a temperaturas de 550 °C.

En el caso de Cayo Guam, se observa una paragénesis arcillosa sencilla, compuesta por fases del grupo caolinita, que no se hinchan en atmósfera de glicol y colapsan a 550 °C Figura 14.

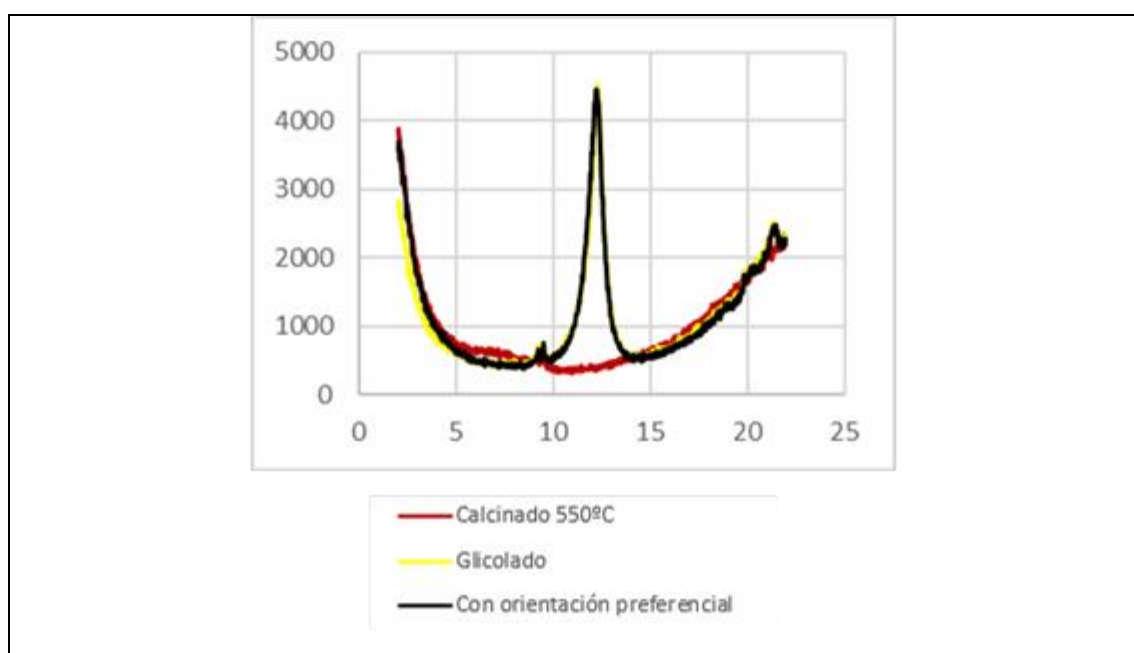


Figura 14. Difractograma con orientación preferencial de los cristales Cayo Guam

El Al_2O_3 se correlaciona bien con el contenido de minerales arcillosos del grupo de las caolinitas (caolinita, dickita y nacrita) el resto de los macro y micro elementos tienen un comportamiento más heterogéneo, pero en general están de acuerdo con la composición mineralógica global. En el caso de depósito de Cayo Guam, existe un alto contenido de minerales arcillosos 1:1 y un alto contenido de fases amorfas o poco cristalinas, aluminosilicatos potencialmente hidratados y fases ricas en hierro con un tamaño de partícula muy pequeño (Serrano Romero, 2022) ver Figura 15.

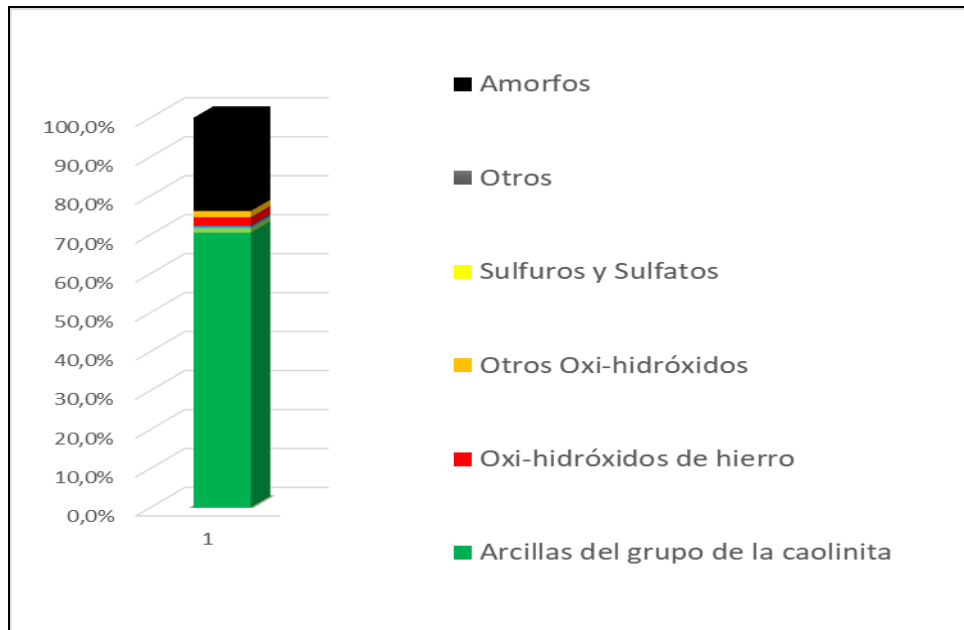


Figura 15. Resultados globales de la caracterización mineralógica del depósito de Cayo Guam

3.2 Resultados de la Teledetección

3.2.1 Resultados del procesamiento de las imágenes Aster L1T, Sentinel 2 y Landsat 8

La combinación de bandas (4-3-2) con el Sentinel 2 a una resolución de 15m por pixel, es útil para generar una imagen a color natural, que se aproxima a los colores naturales que observan el ojo humano, se utiliza para la detección de zonas urbanas, analizar superficies y elementos específicos como vegetación, uso de suelo, cuerpos de agua, entre otros (MappingGIS, 2019), en el caso de la Figura 16 a) existe un contraste de coloración entre las cortezas de meteorización de las arcillas caoliníticas, de un color crema claro y el color de las cortezas lateríticas de un color pardo a pardo-rojizo. Esto es especialmente útil porque las cortezas son un reflejo superficial de las rocas madres a partir de las que se han formado.

La combinación de las bandas (8-4-3) con las imágenes Sentinel 2 a una resolución de 15m por pixel permite analizar en el infrarrojo cercano, donde ocurre un cambio del contraste de los materiales muy perceptibles (Figura 16 b), Las cortezas de afinidad caoliníticas, desarrolladas sobre gabros, se pueden observar en coloración amarilla. Por otro lado, la coloración de color pardo a pardo claro corresponde a las cortezas lateríticas ricas en Fe y Mg desarrolladas sobre rocas ultrabásicas. En este caso si es posible realizar un contraste entre las cortezas ricas en Al y las ricas en Fe, dado por la sensibilidad de las arcillas al infrarrojo cercano.

La combinación de las bandas (5-6-4) con las imágenes Landsat 8 a una resolución de 30m por pixel (ver Figura 16 c), permite diferenciar cuerpos de agua de otros materiales. Si se analizan las combinaciones anteriores con Sentinel 2, se puede apreciar que, dentro de la zona minada de las cortezas lateríticas, existen áreas con un color blanco a blanco azulado, que se interpretan como zonas húmedas o de acumulación de agua poco profunda.

Por otro lado, la combinación de las bandas (4-6-8) con las imágenes Aster L1T a una resolución de 30m por pixel permite, contrastar específicamente las arcillas caoliníticas, con una coloración rosado claro y las cortezas lateríticas con una coloración parda (Figura 16 d). Si se correlaciona lo anterior, con el sensor Sentinel 2, en el infrarrojo cercano (bandas 8-4-3 de la Figura 16 b) se puede observar un nuevo contraste, en este caso las arcillas caoliníticas de coloración amarilla y las

lateritas en colores pardos. Esto es posible ya que ambos sensores son sensibles en la región del infrarrojo cercano, aun cuando utilizan diferentes bandas.

Lo anterior demuestra un cambio de coloración en las arcillas caoliníticas que va desde el amarillo hasta el rosado, no así con las cortezas lateríticas que permanecen pardas. Esto se puede explicar por las bandas de infrarrojo que tiene cada sistema, por ejemplo, Sentinel posee dos bandas en esta región y el sistema ASTER posee 5, aportando mejores detalles a la hora de su aplicación.

Una vez realizadas las diferentes combinaciones, haciendo uso de los satélites Sentinel 2, Landsat 8 y ASTER podemos decir que todas las combinaciones realizadas son importantes para seleccionar y discriminar sectores de interés y caracterizarlos ópticamente por sus respuestas espectrales, pero las combinaciones más significativas son las combinaciones (8-4-3) con las imágenes Sentinel 2 y las (4-6-8) con las imágenes Aster LT1.

Las imágenes con mejor resolución y tamaño se pueden encontrar en los anexos 1, 2 ,3 y 4 del presente trabajo.

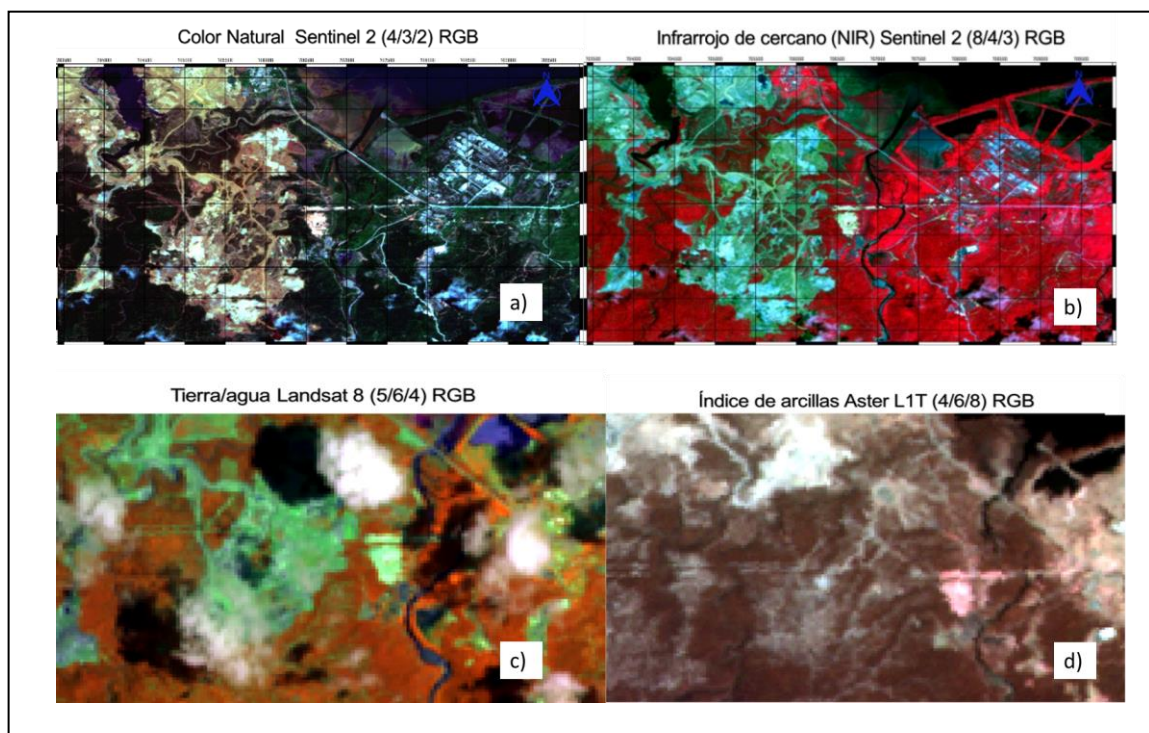


Figura 16: Combinaciones de bandas Aster L1T, Sentinel 2 y Landsat 8 a) Color natural b) Infrarrojo cercano c) Tierra/Agua y d) Índice de arcillas

3.2.2 Resultados del mapeo de arcillas de Cayo Guam

Para los materiales en superficie se realizó una clasificación supervisada, esto es, la actividad realizada por el especialista una vez que el mismo tiene conocimiento de lo que predomina en los sectores seleccionados, el software se dedicará a procesar y analizar matemáticamente el comportamiento de cada objeto en cada uno de los puntos correspondientes a la información que tiene de cada pixel y el mismo hará uso de esta para hacer una correlación de la respuesta espectral en cada uno de los intervalos de las bandas que tiene para su análisis, permitiéndole generar una firma promedio para cada uno de los materiales definidos, ya sean arcillas, lateritas, vegetación o cuerpos de agua. Con los resultados de este procesamiento se confeccionó un mapa esquemático ver Figura 17 Mapa esquemático de distribución de cortezas caoliníticas y cortezas lateríticas en Cayo Guam. Figura 17:

Grupos de materiales clasificados utilizando el Qgis:

1. Cortezas con afinidad caolinítica, ricas en Al-Si, desarrolladas sobre gabros.
2. Cortezas lateríticas, ricas en Fe, desarrolladas sobre rocas ultrabásicas
3. Vegetación
4. Cuerpos de agua

Una vez interpretados estos resultados del mapeo de arcillas aplicando la clasificación supervisada, se puede decir que es una técnica muy precisa y se correlaciona perfectamente con los trabajos de campo, y los mapas de constitución geológica. Esto permite valorar la utilidad de esta tecnología que puede facilitar el trabajo, haciendo solamente necesario la comprobación en campo sin tener que hacer uso de los métodos tradicionales de prospección que son de mayor costo.

El uso de la clasificación supervisada en áreas de interés, como se pudo observar (Figura 17) arroja muy buenos resultados de contraste entre los cuerpos seleccionados. De esta forma, se puede apreciar el depósito Cayo Guam de coloración amarilla, y a la vez varias diseminaciones de arcillas caoliníticas dentro de la zona minada, también en la zona de desembocadura del río Yagrumaje, lo cual es consistente con los intensos fenómenos de arrastre y posterior sedimentación y finalmente en la zona este del área consistente con otras manifestaciones expuestas de arcillas caoliníticas.

Un valor agregado a efectos de la minería de las lateritas es la localización de cuerpos aluminosos que constituyen corteza estéril para Ni-Co.

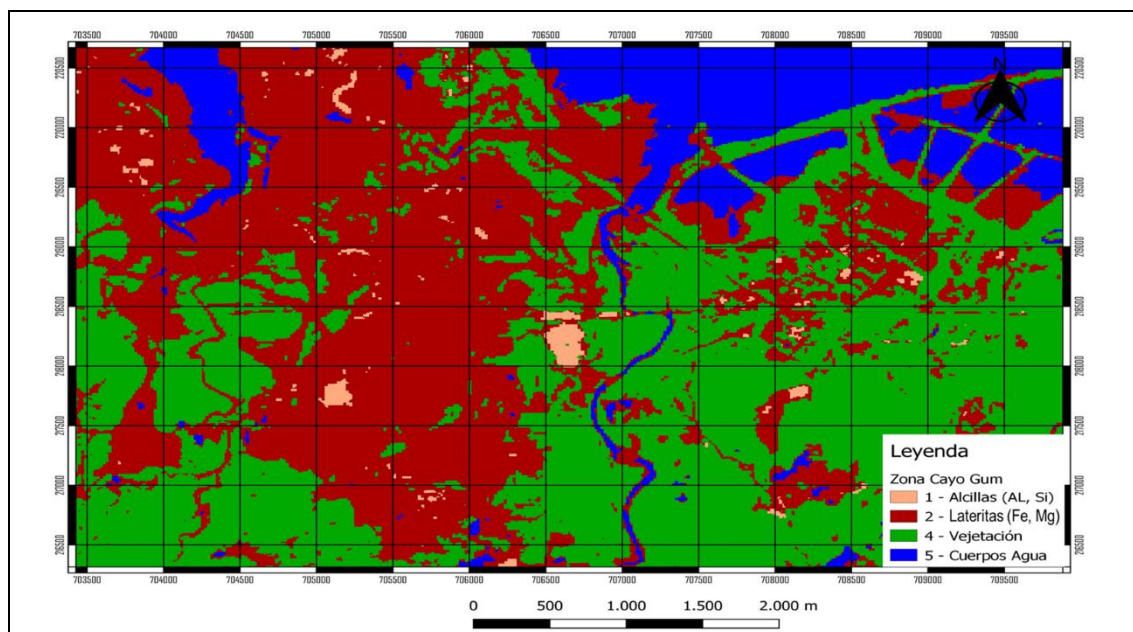


Figura 17 Mapa esquemático de distribución de cortezas caoliníticas y cortezas lateríticas en Cayo Guam.

3.2.3 Resultados del comportamiento espectral en Cayo Guam

Para los cuatro grupos de materiales, definidos en el acápite anterior, se obtienen firmas espectrales promedios de las imágenes de los satélites Sentinel 2, Landsat 8 y Aster L1T.

En las gráficas de las Figuras 18, 19 y 20 se pueden observar los valores de reflectancia de cada uno de los grupos.

En amarillo, las cortezas de meteorización desarrolladas sobre gabros, son perfectamente distinguible con los tres satélites, aunque el ASTER ofrece mejor resolución (Figura 20), esto debido a que incluye una mayor cantidad de bandas en la región del infrarrojo cercano.

Lo anterior es relacionable, en primer lugar, con la composición de las cortezas caoliníticas, ricas en aluminio y silicio, de coloraciones claras, que aportan mayor reflectancia. Lo contrario ocurre con las cortezas lateríticas, ricas en oxi-hidróxidos de hierro, que absorben más longitud de onda y tienen valores de reflectancia inferiores.

Podemos decir que el uso de los resultados de las firmas espectrales de cada uno de estos sensores, nos permite definir que las arcillas caoliníticas poseen mayores valores de reflectancia que las lateritas. Que la firma espectral de estos dos

materiales, tiene similitud en los sistemas Sentinel 2 y Landsat 8 y esto puede estar relacionado con que ambos cuerpos minerales contienen óxidos e hidróxidos de hierro.

Por otro lado, las imágenes ASTER si permiten hacer una diferenciación más detallada, dado que los cambios no son solo en la intensidad de la reflectancia, sino que al tener más bandas se puede observar mejor el comportamiento dentro del infrarrojo cercano.

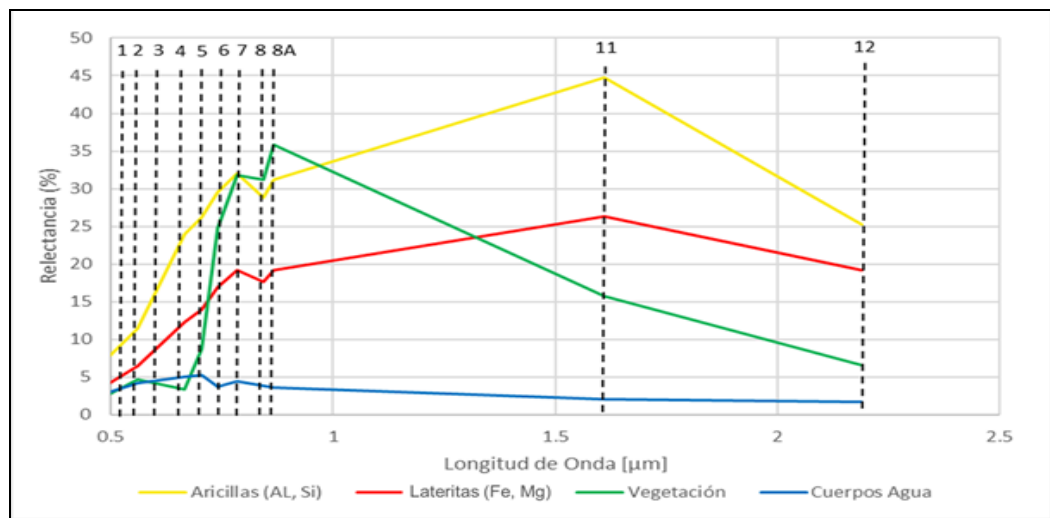


Figura 18: Firmas espectrales de las arcillas el agua y la vegetación Sentinel 2.

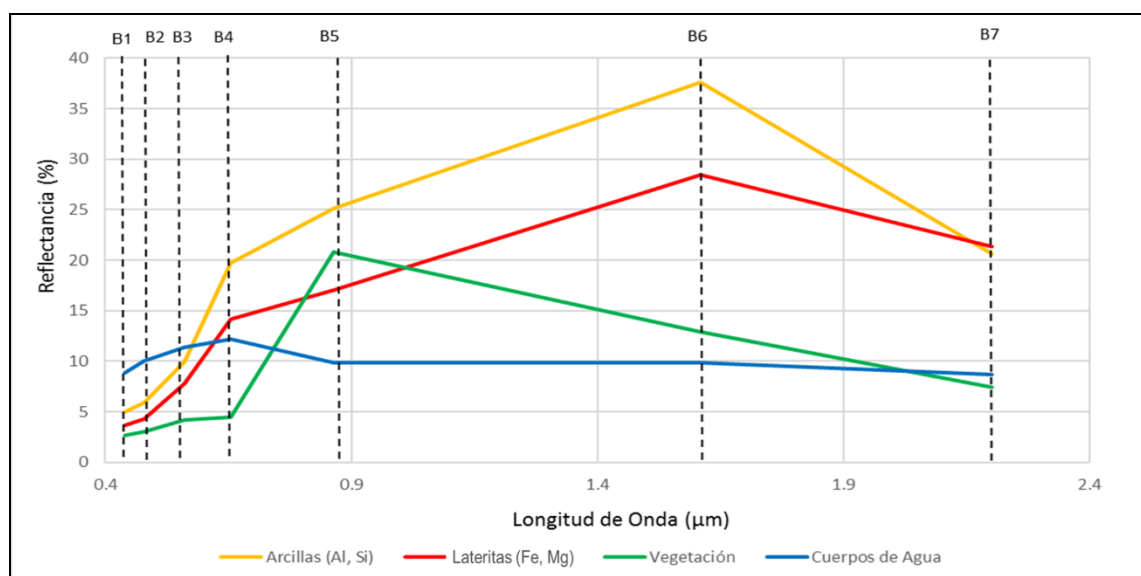


Figura 19: Firmas espectrales de las arcillas el agua y la vegetación Landsat 8.

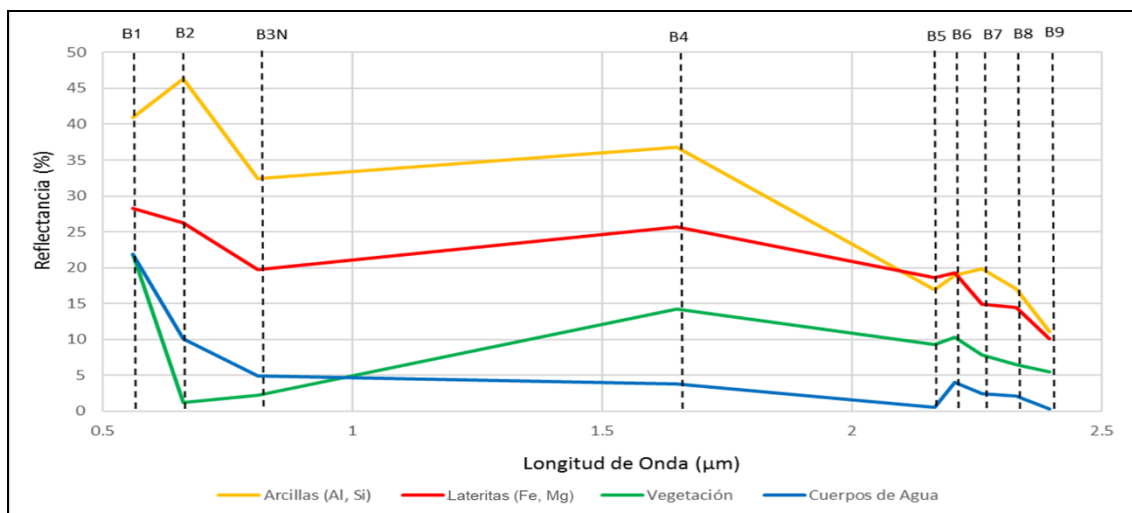


Figura 20: Firmas espectrales de las arcillas el agua y la vegetación Aster.

3.2.4 Resultados de los patrones de firmas espectrales de arcillas caoliníticas y las lateritas

Con los resultados gráficos de las firmas espectrales de los dos tipos de cortezas de meteorización, que son las lateritas desarrolladas sobre rocas ultrabásicas y las arcillas caoliníticas formadas sobre gabros, se reconstruyeron dos firmas espectrales con una mayor información del comportamiento espectral de estos materiales. Para ellos se utilizó los registros de reflectancia en las diferentes longitudes de ondas para las bandas de los paquetes de imágenes, obteniendo firmas que nos brindan mayor información y precisión ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Figura 21.

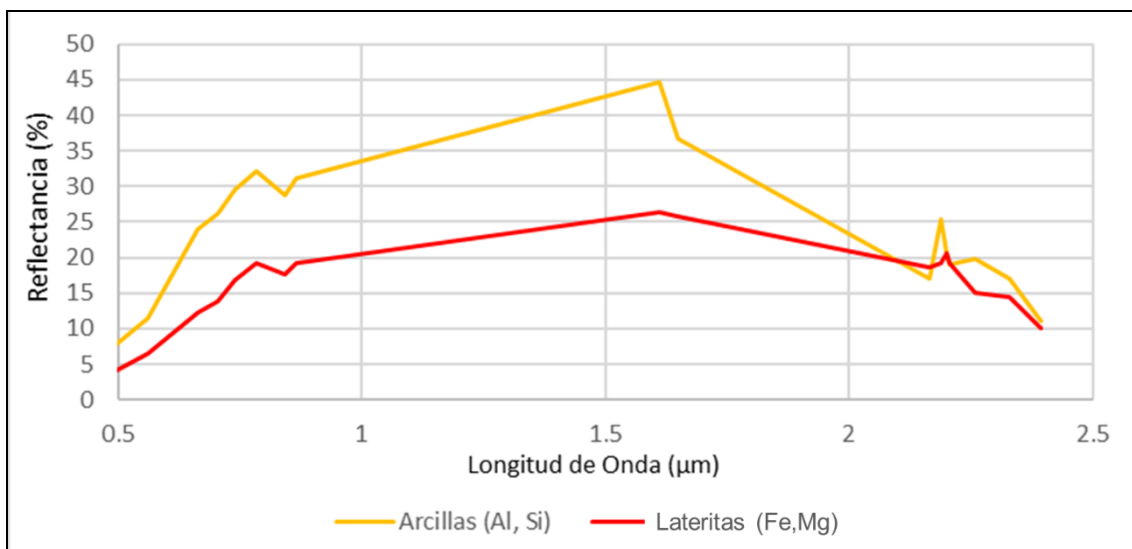


Figura 21: Firmas espectrales de las arcillas ricas en Aluminio y Silicio Vs lateritas ricas en Hierro y Niquel

Para la identificación de las arcillas caoliníticas se empleó el manual de firmas espectrales (USGS, 2023), comparando los valores de los picos más significativos de la firma, que son la absorbancia entre los 0,8-1 μm , 1,6-1,8 μm y 2,1-2,3 μm , permitiendo identificar el mineral caolinita como mineral predominante en estas arcillas ver Figura 22.

En el caso de las lateritas ferro niquelíferas se comparó los valores de los picos más significativos de la firma, que son la absorbancia entre los 0,8-0,9 μm y la reflectancia 1,5-1,6 μm y 2-2,2 μm identificándose el mineral goethita como mineral predominante en las lateritas ver Figura 23.

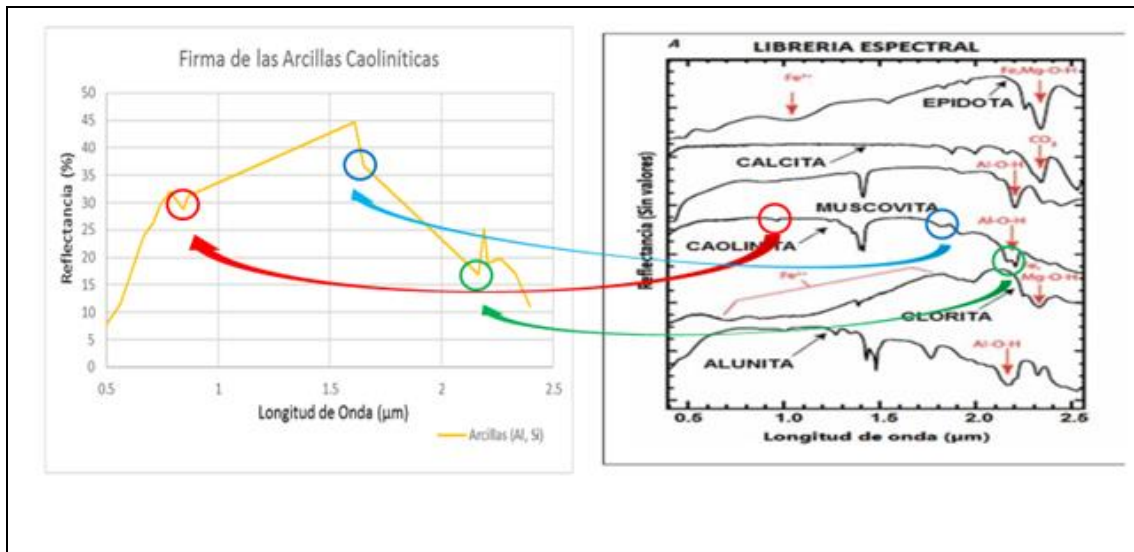


Figura 22: Firma espectral de arcillas caolínicas de Cayo Guam combinación de datos espectrales de Sentinel 2, Aster L1T y Landsat 8.

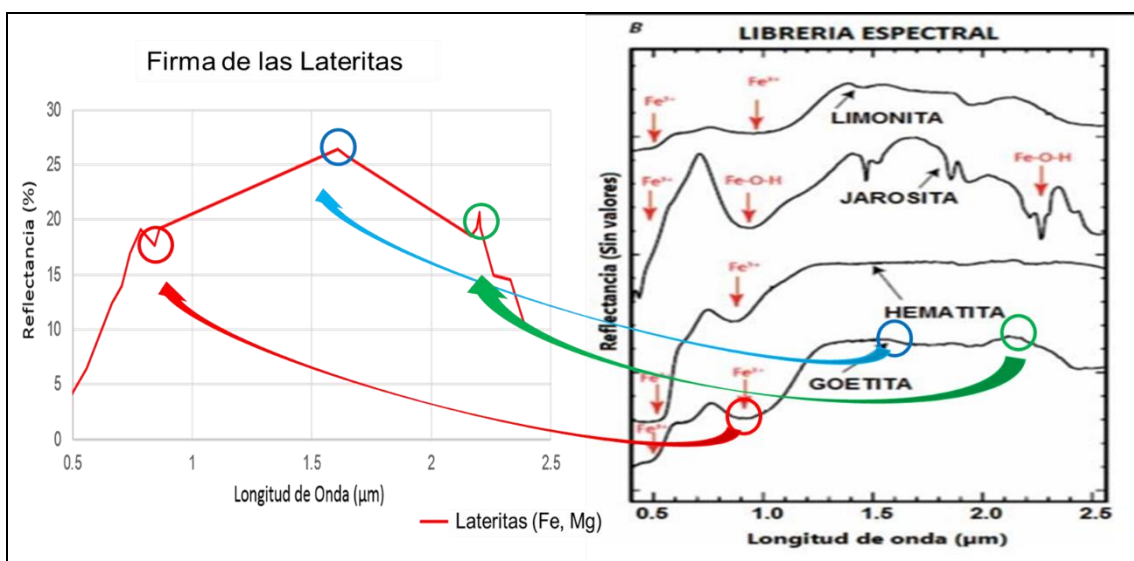


Figura 23: Firma espectral de lateritas de Cayo Guam combinación de datos espectrales de Sentinel 2, Aster L1T y Landsat 8.

Las bandas de mayor utilidad en el satélite Sentinel 2 son las bandas 8 que está en el rango del infrarrojo cercano y las bandas 4 y 3 que están en el rango del espectro visible.

Para el satélite Landsat 8 las bandas de mayor utilidad es la banda 5, que está en el rango del infrarrojo cercano y las bandas 3 y 4 que están en el rango del espectro visible, pero en esta investigación no se muestran combinaciones utilizándolas, ya

que son homologas a la combinación (8-4-3) del satélite Sentinel 2, que tienen una mejor resolución.

Finalmente, se debe decir, que las más importantes son las bandas del satélite ASTER (4, 5, 6, 7, 8 y 9) que pertenecen al rango del infrarrojo cercano siendo las más idóneas para el estudio de arcillas.

CONCLUSIONES

- La caracterización químico-mineralógica del depósito arrojó que esta es una corteza desarrollada sobre rocas básicas (gabros) enriquecida en Al y Si con el mineral caolinita como fase predominante y minerales acompañantes (dickita, nontronita, nacrita, goethita y hematita) y el contenido de amorfo es de 24%.
- Con las imágenes de los Satélites Sentinel 2, Landsat 8 y ASTER L1T procesadas se realizaron las combinaciones de bandas, lográndose identificar y contrastar los dos tipos de cortezas desarrolladas en el área, siendo las combinaciones más importantes la de las bandas 8-4-3 con el Sentinel 2 y las 4-6-8 con las imágenes Aster L1T.
- Se elaboró un mapa donde se clasifican por sectores los límites espaciales de los dos tipos de cortezas presentes en el depósito lográndose una adecuada diferenciación entre estas.
- Se obtienen los patrones de firmas espectrales de los dos tipos de cortezas, siendo las bandas más importantes las ASTER (4, 5, 6, 7, 8 y 9) que pertenecen al rango del infrarrojo cercano.

RECOMENDACIONES

Extender los resultados de la presente investigación a otras manifestaciones de arcillas de más variada génesis geológica y a las cortezas ferro-niquelíferas.

En las próximas investigaciones se utilicen métodos que permitan obtener las firmas espectrales de minerales eliminando el factor vegetación en la superficie objeto de estudio.

BIBLIOGRAFIA

- Abrams, M. J., Goetz, A. F. H., & Lang*, H. (2019). New techniques for clay mineral identification by remote sensing. *AAPG Bulletin*, 67(3), 410.
- Alvarez, A. (2013). *Activación Térmica de Arcillas de la Región de Cayo Guam para su Aprovechamiento como Material Puzolánico*. Activación Térmica de Arcillas de la Región de Cayo Guam para su Aprovechamiento como Material Puzolánico.
- Ávila, D. D., Benítez, E. A. C., Flores, D. D. C., Ferrer-Sánchez, Y., & Tamé, F. L. F. (2020). Caracterización espectral de los bosques de mangles en Cuba a través de sensores remotos: un enfoque metodológico. *Acta Botánica Cubana*, 219(2).
- Bishop, J. L., Michalski, J. R., & Carter, J. (2017). Remote detection of clay minerals. In *Developments in clay science* (Vol. 8, pp. 482–514). Elsevier.
- Brito, M. (2012). *Mezclas de arcillas y residuos sólidos de construcción para su utilización en la industria de materiales*. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez.”
- Caballero-Aragón, H., Perera-Valderrama, S., Cobián-Rojas, D., Gonzalez, Z. H., Méndez, J. G., & la Guardia, E. (2023). A decade of study on the condition of western Cuban coral reefs, with low human impact. *PeerJ*, 11, e15953.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing*. Guilford press.
- Chacón, M. (2015). *Evaluación de mezclas de materiales arcillosos de la zona de Cayo Guam y arena sílice residual para su utilización en la industria cerámica*. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez.”
- Chuvieco, E., & Huete, A. (2016). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing*. [Libro].
- Clark, P. E., & Rilee, M. L. (2010). *Remote sensing tools for exploration: observing and interpreting the electromagnetic spectrum*. Springer Science & Business Media.
- Clark, R. N., King, T. V. V., Klejwa, M., Swayze, G. A., & Vergo, N. (1990). High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B8), 12653–12680.

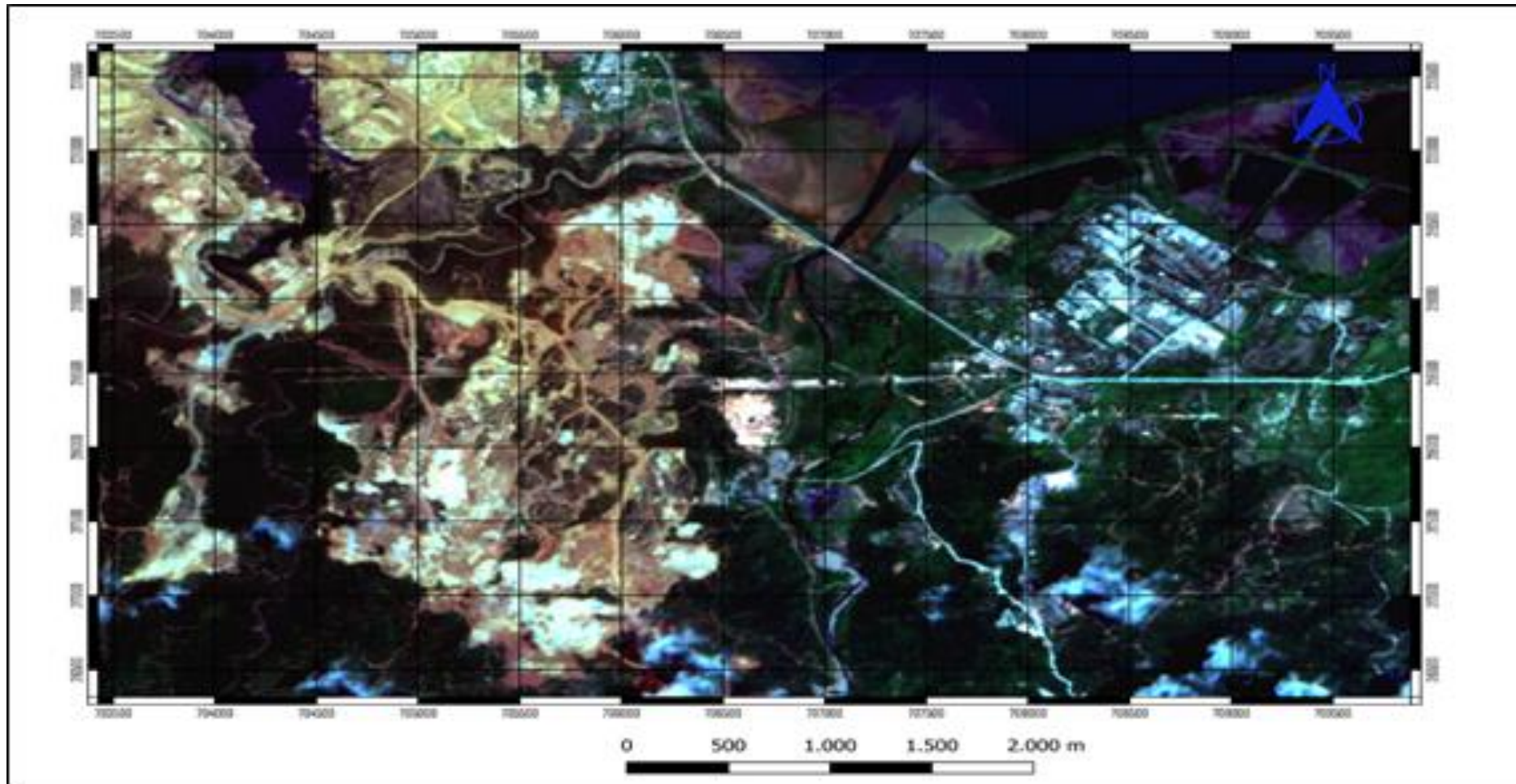
- Congedo, L. (2016). Semi-automatic classification plugin documentation. *Release*, 4(0.1), 29.
- Cruz Ramírez, Y. (2019). *Evaluación de las arcillas caoliníticas del depósito Cayo Guam para la producción de cemento de bajo carbono*. Departamento de Geología.
- Cruz Sánchez, A. de la. (2013). *Identificación de los riesgos ambientales y sanitarios de la producción de gas mediante fracturación hidráulica y bases para una propuesta metodológica de vulnerabilidad de las aguas subterráneas*.
- Du, P., Yuan, P., Liu, J., & Ye, B. (2023). Clay minerals on Mars: An up-to-date review with future perspectives. *Earth-Science Reviews*, 104491.
- Ducasse, E., Adeline, K., Briottet, X., Hohmann, A., Bourguignon, A., & Grandjean, G. (2018). Estimation of Montmorillonite in Clay Samples Using Laboratory SWIR Imaging Spectroscopy. *Remote Sensing*, 12(11), 1723.
- Fadel, M. (2005). *Evaluación preliminar y caracterización de la manifestación de caolinitas en la zona de Cayo Guam, Moa*. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez.”
- Garc, D. (2013). *Análisis de los factores de degradación de los suelos en la cuenca del Río Cayo Guam*. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez.”
- Gasmi, A., Gomez, C., Chehbouni, A., Dhiba, D., & Elf, H. (2022). *Satellite Multi-Sensor Data Fusion for Soil Clay Mapping Based on the Spectral Index and Spectral Bands Approaches*. *Remote Sens.* 2022, 14, 1103. s Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published~....
- Hauff, P. (2008). An overview of VIS-NIR-SWIR field spectroscopy as applied to precious metals exploration. *Spectral International Inc*, 80001, 303–403.
- Hidalgo-Suárez, A., Serrano-Romero, A., Herrera-Sánchez, C. G., Cruz-Ramírez, Y., Espinosa-Borges, Á. E., García-Obregón, L., Pereira-Báez, M. J., & Pérez-García, L. A. (2019). Caracterización de procesos geológicos en el depósito de arcillas de Cayo Guam y su relación con la producción de cemento de bajo carbono. *Ciencia & Futuro*, 9(1), 19–31.
- Hunt, G. R. (1977). Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near

- infrared. *Geophysics*, 42(3), 501–513.
- Janaki Rama Suresh, G., Sreenivas, K., & Sivasamy, R. (2016). Hyperspectral analysis of clay minerals. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 443–446.
- Khalil, H., Mousa, G., Abdeen, M., Ghobara, O., & others. (2022). Utilizing Remote Sensing and Lithostratigraphy for Iron and Clay Minerals Mapping in the North of Aswan Area, Egypt. *Delta Journal of Science*, 44(2), 1–16.
- Lamrani, O., Aabi, A., Boushaba, A., Seghir, M. T., Adiri, Z., & Samaoui, S. (2021). Bentonite clay minerals mapping using ASTER and field mineralogical data: A case study from the eastern Rif belt, Morocco. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 24, 100640.
- Maged, A., Abu El-Magd, S. A., Radwan, A. E., Kharbish, S., & Zamzam, S. (2023). Evaluation insight into Abu Zenima clay deposits as a prospective raw material source for ceramics industry: Remote Sensing and Characterization. *Scientific Reports*, 13(1), 58.
- Mamani Ticona, T. (2017). *Aplicación de imágenes ASTER en la detección de zonas de alteraciones hidrotermales, sector Titire, Carumas, Moquegua*.
- MappingGIS. (2019). *Combinación de bandas en imágenes de satélite Landsat y Sentinel*.
- Meyer, D., Siemonsma, D., Brooks, B., & Johnson, L. (2015). *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Level 1 Precision Terrain Corrected Registered At-Sensor Radiance (AST_L1T) Product, Algorithm Theoretical Basis Document*. US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Missions, L. (2016). Using the USGS Landsat8 product. *US Department of the Interior-US Geological Survey--NASA*.
- Mogrovejo Barrera, I. I. (2021). *Teledetección espacial mediante la aplicación de imágenes satelitales tipo Aster L1t, Landsat 8 Oli y Sentinel 2 en zonas de alteración hidrotermal*. Universidad del Azuay.
- Ojeda Martínez, D., Martínez Fernández, P., Matamoros Fombellida, P. C., Morejón González, M., Álvarez Portal, R., & de la Rosa, K. (2020). Cuba Surface

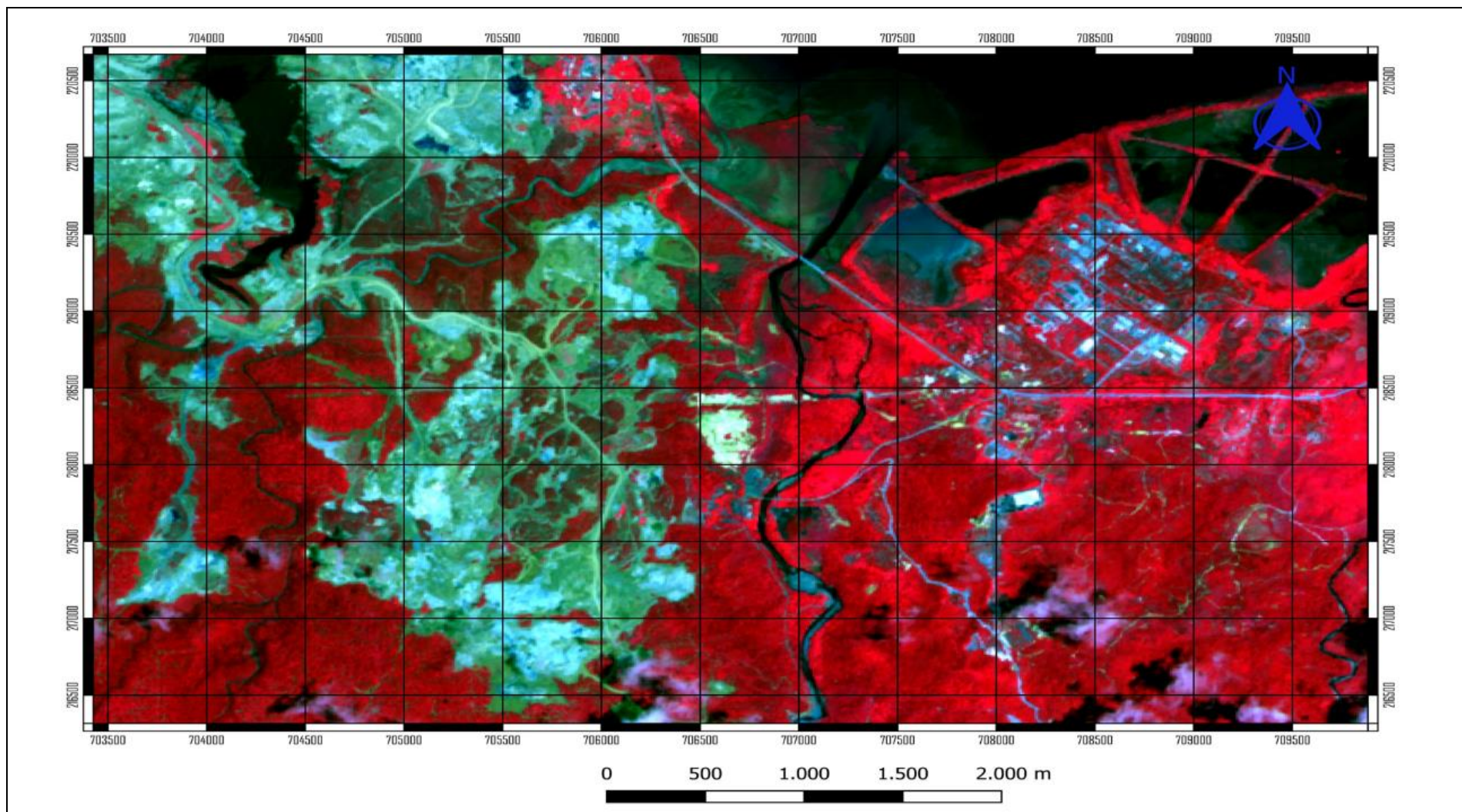
- Estimation from Shoreline Mapping, Generated by SENTINEL-2 Image Processing. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 175–180.
- Orozco Melgar, G. (1995). *Caracterización de las arcillas de Cayo Guam*.
- Paul, S. S., Coops, N. C., Johnson, M. S., Krzic, M., Chandna, A., & Smukler, S. M. (2018). Mapping soil organic carbon and clay using remote sensing to predict soil workability for enhanced climate change adaptation. *Geoderma*, 363, 114177.
- Percival, J. B., Bosman, S. A., Potter, E. G., Peter, J. M., Laudadio, A. B., Abraham, A. C., Shiley, D. A., & Sherry, C. (2017). Customized spectral libraries for effective mineral exploration: mining national mineral collections. *Clays and Clay Minerals*, 66(3), 297–314.
- Pérez García, L. A. (2015). *Caracterización por medio de Espectroscopia Infrarroja de las manifestaciones de caolinita del río Cayo Guam*. 26.
- Pérez, P., CM, C. A. E. A., Peñalver Hernández, L. L., Cabrera, M., & Denis-Valle, R. (2008). Aplicaciones de la teledetección al estudio de los depósitos cuaternarios cubanos. *XIII Simposio Internacional de La Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Informacion Espacial*.
- Poppe, L. J., Paskevich, V. F., Hathaway, J. C., & Blackwood, D. S. (2002). *A Laboratory Manual for X-Ray Powder Diffraction (U. S. Geological Survey Open-File Report)*.
- Priya, S., & Ghosh, R. (2022). Soil clay minerals abundance mapping using AVIRIS-NG data. *Advances in Space Research*.
- Rahal, F., Baba-Hamed, F.-Z., & Guenanou, F. (2023). Mapping of clay soils by remote sensing in the area of Mers El Kébir, Algeria. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*.
- Rodríguez, R. I. (2013). Caracterización de materiales arcillosos del depósito Cayo Guam para su posible empleo como material cementicio suplementario. *Roger Samuel Almenares Reyes (Tutor). Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico*.
- Satellite Imaging, C. (2022). *Exploración Mineral Y Minería*.

- Serrano Romero, A. (2022). *Uso de una metodología integral para la cuantificación de fases minerales en depósitos de arcilla de Cuba oriental por el método Rietveld con uso de patrón interno*. Universidad de Moa.
- Shabou, M., Mougenot, B., Lili Chabaane, Z., Walter, C., Boulet, G., Ben Aissa, N., & Zribi, M. (2023). Soil clay content mapping using a time series of Landsat TM data in semi-arid lands. *Remote Sensing*, 7(5), 6059–6078.
- Turner, H. C., Galford, G. L., Hernandez Lopez, N., Falcón Méndez, A., Borroto-Escuela, D. Y., Hernández Ramos, I., & González-Díaz, P. (2023). Extent, Severity, and Temporal Patterns of Damage to Cuba's Ecosystems following Hurricane Irma: MODIS and Sentinel-2 Hurricane Disturbance Vegetation Anomaly (HDVA). *Remote Sensing*, 15(10), 2495.
- USGS. (2023). *Spectroscopy Lab*.
- Zabloskii, V. R., & others. (2016). The method of detection of clay minerals and iron oxide based on landsat multispectral images (as exemplified in the Territory of Thai Nguyen Province, Vietnam). *Gornye Nauki i Tekhnologii= Mining Science and Technology (Russia)*, 4(1), 65–75.
- Zazi, L., Boutaleb, A., & Guettouche, M. S. (2017). Identification and mapping of clay minerals in the region of Djebel Meni (Northwestern Algeria) using hyperspectral imaging, EO-1 Hyperion sensor. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(11), 252.
- Zuhlke, M., Fomferra, N., Brockmann, C., Peters, M., Veci, L., Malik, J., & Regner, P. (2015). SNAP (sentinel application platform) and the ESA sentinel 3 toolbox. *Sentinel-3 for Science Workshop*, 734, 21.

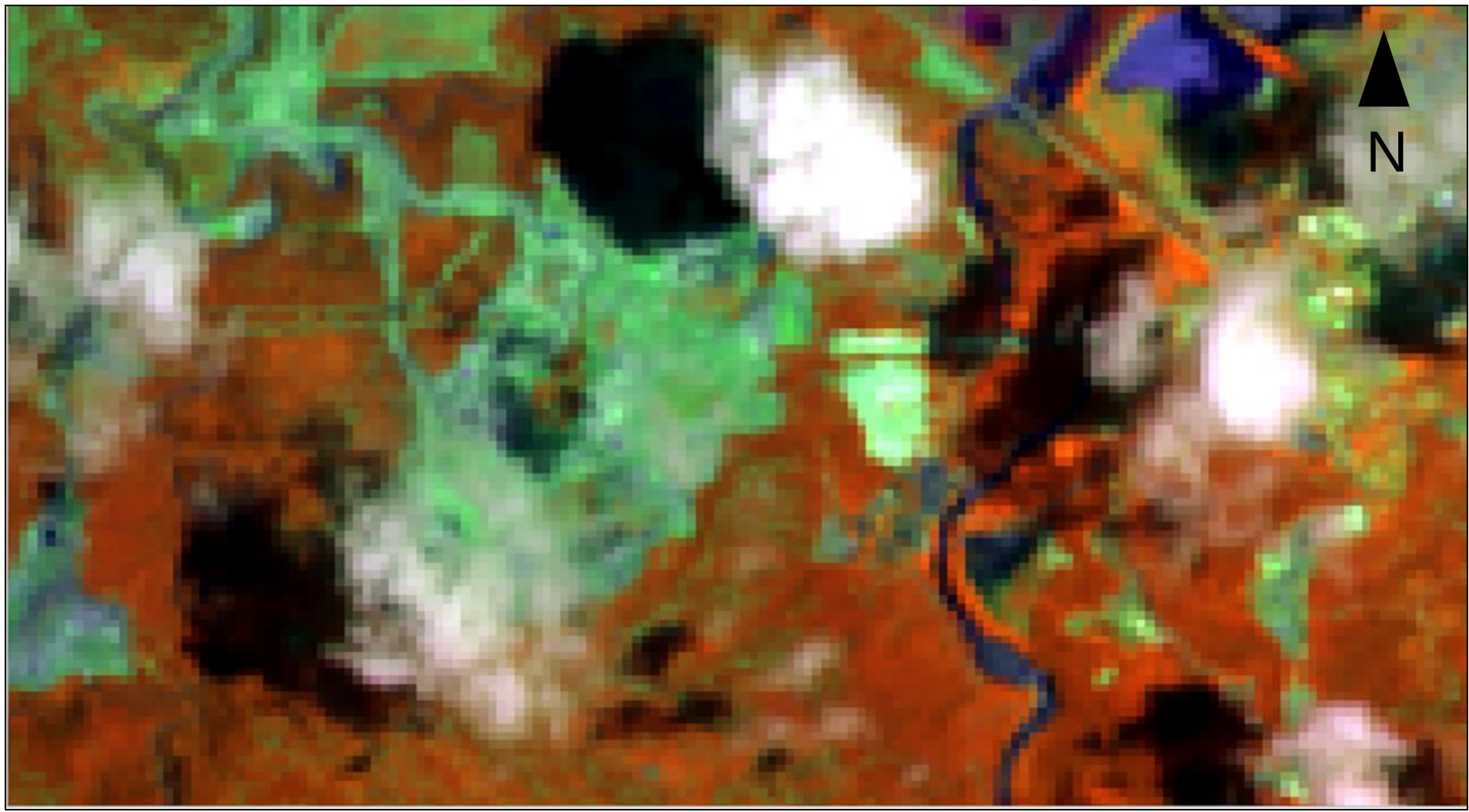
ANEXOS



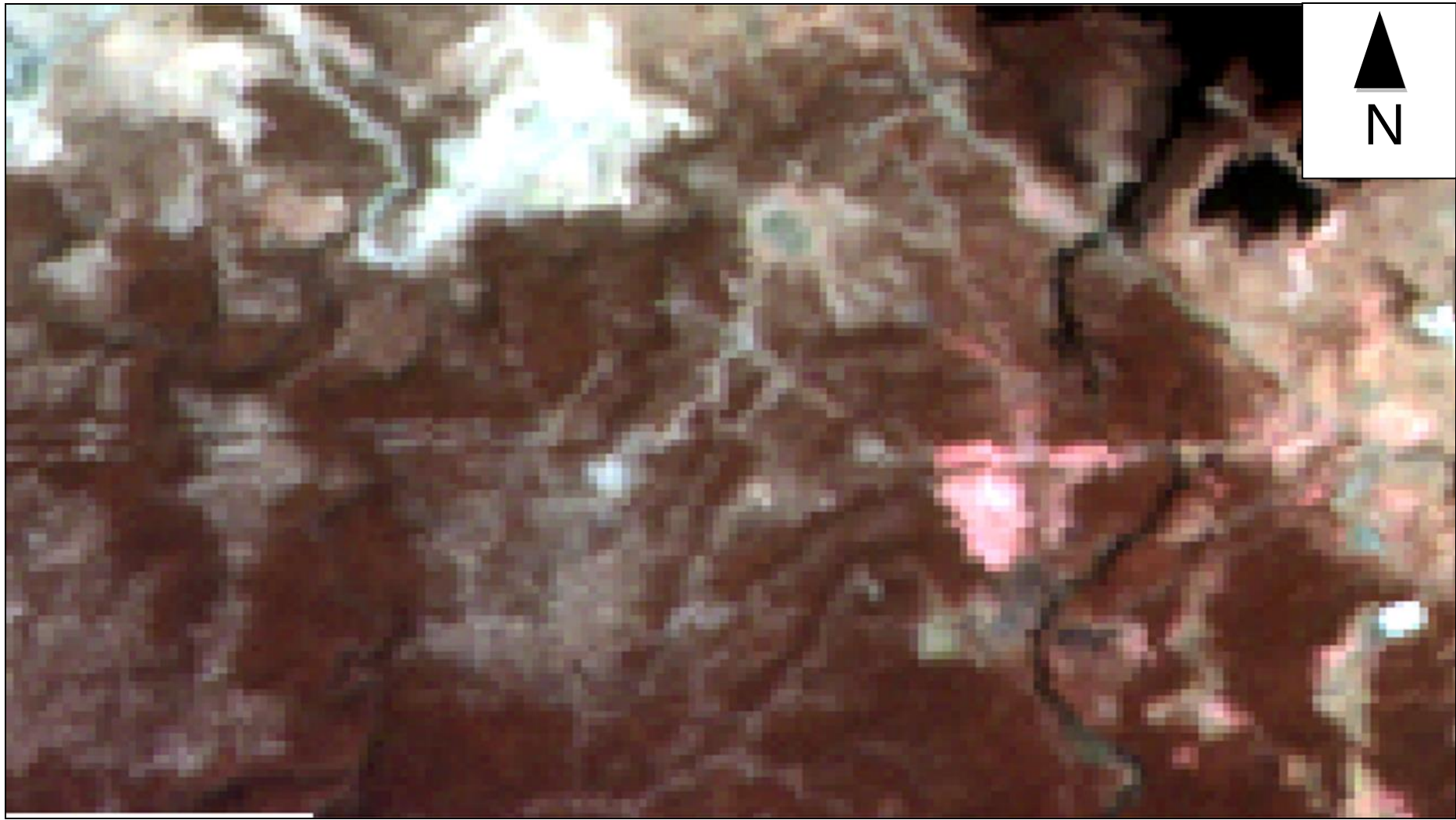
Anexo 1 Combinación Sentinel 2 (4/3/2) RGB ``Color Natural´



Anexo 2 Combinación Sentinel 2 (8/4/3) RGB ``Infrarrojo cercano``



Anexo 3 Combinación Landsat 8 (5/6/4) RGB `` Tierra/agua ``



Anexo 4 Combinación Aster (4/6/8) RGB `` Índice de arcillas ``