



## **PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA FISCALIZACIÓN AMBIENTAL**

# **Uso de imágenes satelitales para la localización de zonas mineralizadas con potencial generación de drenaje ácido de roca en la unidad minera Florencia - Tucari**

### **INTEGRANTES:**

<b>Apellidos y Nombres</b>	<b>Especialidad y Carrera</b>
Castro Alvarez, Melissa	Ciencias - Ingeniería Ambiental
Gómez Ari, Gerardo	Economía
Rojas Quispe, Jackeline	Derecho
Romualdo Peña, Joaquín André	Ciencias - Ingeniería Geográfica
Sanca Neyra, Álvaro Diego	Derecho

**NOMBRE DEL ASESOR:**

**Ing. Lenin Córdova Sologure**

**Febrero 2021**

## Índice

1. Justificación de la investigación .....	3
2. Antecedentes y conceptos básicos .....	4
2.1. Antecedentes .....	4
Antecedentes en Perú.....	4
Antecedentes en Latinoamérica.....	4
Antecedentes en el mundo.....	5
2.2. Conceptos básicos .....	6
Teledetección.....	6
La Actividad Minera.....	13
Drenaje Ácido de Roca (DAR).....	13
Minerales sulfurados.....	14
3. Preguntas, objetivos e hipótesis de la investigación .....	14
3.1. Pregunta general, Objetivo general e Hipótesis general .....	14
3.2. Preguntas específicas y Objetivos específicos .....	15
4. Fuentes de información.....	15
5. Metodología de la investigación .....	19
5.1. Metodología de investigación .....	19
5.2. Alcance de la investigación.....	20
5.3. Diseño de la investigación .....	20
5.4. Métodos.....	20
5.5. Flujo metodológico .....	21
6. Bibliografía .....	23

## 1. Justificación de la investigación

La responsabilidad ambiental y económica más grande que enfrenta la industria minera es el drenaje ácido de mina (DAM) debido a su prolongado desarrollo (MINEM, s.f.). Este efluente suele ser drenado hacia cuerpos naturales de agua alterando la vida acuática y la calidad de esta. Un reto significativo al momento de imputar responsabilidades a las empresas mineras por pasivos asociados al DAM es que el drenaje ácido también se puede generar de manera natural, tomando –en este último caso– el nombre de drenaje ácido de roca (DAR). Discriminar con éxito la contaminación generada por estos dos tipos de drenaje ácido es una tarea compleja que desgasta muchos recursos en las instituciones de fiscalización ambiental. Afortunadamente, el vertiginoso desarrollo de tecnologías pone a nuestra disposición diversos métodos y herramientas que pueden ayudarnos a enfrentar el reto; siendo uno de ellos el uso de imágenes satelitales.

Actualmente, las imágenes satelitales representan un importante insumo para el monitoreo de procesos ambientales, como por ejemplo la desglaciación de nevados, el cambio de cobertura de suelo, la deforestación, etc. En ese sentido, cada vez son más los organismos técnicos de distintos países que empiezan a utilizar imágenes satelitales en sus labores. Por ejemplo, en la región, el Instituto Geográfico Nacional de Argentina viene elaborando mosaicos georreferenciados también mediante el uso de imágenes satelitales (IGN, s.f.); y en el plano local, el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) viene desarrollando estudios y análisis de deformaciones, desplazamientos y deslizamientos, mediante el uso de imágenes satelitales (Araujo *et al.*, 2016).

En el Perú, aún existen deficiencias a la hora de discriminar los impactos naturales de los antrópicos por drenaje ácido en una unidad minera, en gran parte porque no existe una metodología que estandarice los pasos a seguir para su discriminación. En ese sentido, el presente proyecto tiene por finalidad, localizar zonas mineralizadas con potencial generación de drenaje ácido de roca, para así presentar un insumo que sirva en la planificación de una supervisión ambiental. En esta línea, mediante un pronto y oportuno discernimiento entre impactos antropogénicos e impactos naturales, el OEFA estaría en capacidad de (i) optimizar el número y la ubicación de los puntos a muestrear e (ii) imputar la posible responsabilidad a sus administrados de forma más precisa, en los casos que ameriten.

Las imágenes ASTER -insumo principal en nuestro proyecto- son de dominio público gracias al programa *Earth Science Data Systems* de la Agencia Aeroespacial Estadounidense (NASA, por sus siglas en inglés), por lo que su uso no implicaría mayor gasto para el OEFA. Si bien es cierto se requerirán profesionales y equipos para el análisis de imágenes, esto podría compensarse con la disponibilidad de información preliminar que permita reducir las acciones de supervisión repetitivas o innecesarias. En ese sentido, se debe considerar el uso de esta herramienta a fin de optimizar los recursos del OEFA mediante la obtención de información preliminar a las actividades que desarrolla, promoviendo la eficiencia y eficacia en sus operaciones.

## **2. Antecedentes y conceptos básicos**

### **2.1. Antecedentes**

#### ***Antecedentes en Perú***

Inga y Ortega (2020) caracterizaron mineralógicamente zonas que generan drenaje ácido de roca en el distrito de San Bernardino, Cajamarca, mediante percepción remota, aplicando un diseño tecnológico no experimental de carácter correlacional – causal. Para realizar el estudio se tuvo en cuenta el análisis de espectros de minerales acidogénicos teniendo como procedimiento: descarga, corrección, enmascaramiento, creación de base de datos y análisis espectrales. Concluyeron que, gracias a imágenes satelitales y el uso de espectros de minerales sulfurosos ya definidos, es posible determinar dichas zonas, simplificando así la labor de exploración en la minería. Esta investigación aportará a la nuestra el conocimiento sobre análisis de espectros de minerales en zonas que generan el drenaje ácido de roca.

Caiza (2018) determinó zonas de alteración hidrotermal en el departamento de Cerro de Pasco mediante la interpretación de imágenes satelitales ASTER L1B, haciendo diferentes combinaciones de bandas (RGB 461, 469, 531, 641 y 943; y los cocientes de bandas 4/6, 4/5, 5/8 y 2/1) y realizando un mapeo espectral por el método SAM (Spectral Angle Mapper). Con esta información proporcionada con técnicas de teledetección, y adicionando información geológica, metalo-genética y estructural, halló 11 nuevos targets de exploración de sulfatos y pórfidos. Este estudio nos ayuda en el entendimiento del método Spectral Angle Mapper en la determinación de zonas de alteración hidrotermal a través de diferentes bandas.

Vereau (2019), realizó un zoneamiento genético de la mineralización y su relación con la extracción y recuperación de minerales en el Yacimiento Corona en Cajamarca, para esto se utilizó un análisis geoquímico ICP-AES (técnica de espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado por inducción). De esta manera, se realizó el diseño de programas de perforación a fin de alcanzar testigos sobre Corona y obtener información de los datos geológicos y geoquímicos de dichas muestras, con la extracción y descripción de los sondajes de perforación, se diseñó el mapa de dominios mineralógicos y alteraciones y se determinó que Corona era un yacimiento del tipo pórfido de cobre y oro. Esta investigación aporta conocimiento sobre la técnica de espectroscopia de emisión atómica para el reconocimiento de zonas con presencia de minerales.

#### ***Antecedentes en Latinoamérica***

Montoya (2015), analizó el pH, la composición mineralógica y la reflectancia espectral de los sedimentos en una zona de minería aurífera en el distrito minero Vetas California en Santander, Colombia, con el propósito de determinar la firma espectral típica del tipo de sedimento asociado a cada rango de pH. Para dicho fin utilizó imágenes satelitales Landsat 7 y muestras de sedimentos, concluyendo que en los drenajes de ácido de mina precipitan óxidos de hierro, cada uno asociado a condiciones específicas de pH, cuyo comportamiento espectral

está relacionado con el de los sedimentos analizados. La investigación realizada nos muestra que a través de la técnica de firma espectral tomando en cuenta el pH se reconocen zonas con presencia de drenaje ácido de mina.

Chaparro (2015), realizó una investigación para describir los drenajes ácidos de mina (DAM) como uno de los problemas ambientales generados a consecuencia de la actividad minera. Esta investigación indica que la formación de los DAM inicia cuando los minerales sulfurados como la piritita entran en contacto con oxígeno y agua; siendo el oxígeno el agente oxidante se pueden dar dos casos: en el primero, el hierro ferroso se oxida y convierte en hidróxidos teniendo un pH mayor a 4.5, y en el segundo, el hierro ferroso se oxida a férrico teniendo un pH menor a 4.5. El interés del estudio se encuentra en que los DAM, al ser efluentes de trabajos mineros, están aportando una gran cantidad de acidez y elevadas concentraciones de metales pesados, convirtiéndose así en fuente de contaminación hídrica. Este estudio nos brinda ayuda a entender el proceso de formación del drenaje ácido de mina y su implicancia en problemas ambientales.

Tolosa (2017), realizó una caracterización mineralógica de la Mina Rafaela en Chile, esta zona de Valparaíso cuenta con mineralización en niveles estratificados de origen volcánico, subyacente a una capa superior estratificada de origen sedimentario. Los minerales con mayor presencia en el yacimiento corresponden a calcopiritita, seguida por bornita, covelina y mínimamente calcosina hipógena. Respecto a la mineralogía de alteración, sobresale la presencia de calcita rómbica, granates en rocas calcáreas, epidota, clorita, zeolitas y jaspe en rocas volcánicas y siliciclásticas, cuenta con especularita, piritita, calcopiritita, bornita, covelina y calcosina hipógenas. Esta investigación aporta a la nuestra una relación de similitud de minerales que presenta Chile tanto como en el Perú, siendo el caso de la piritita, la cual al oxidarse genera el drenaje ácido.

### ***Antecedentes en el mundo***

Fatima, Khan, Bakhsh, *et al.* (2017), realizaron una comparación entre las imágenes satelitales ASTER y la gama Landsat-ETM-Khaira Murat (KMR) para la detección litológica y de minerales en el área de Gali Jagir en Pakistán. Al realizar el estudio se aplicó en ambas imágenes satelitales la clasificación de máxima verosimilitud, siendo la ASTER quien mostró una mejor distinción entre varias litologías en comparación con Landsat-ETM, posteriormente los dos tipos de imágenes satelitales se compararon para la detección de minerales en la zona, dando como resultado que las imágenes Landsat-ETM detectaron solo arcilla, mientras que las imágenes ASTER detectaron arcilla y carbonatos. Los investigadores concluyen que, las imágenes ASTER se pueden utilizar satisfactoriamente para el mapeo litológico y mineral. Esta investigación aporta a nuestro trabajo un mayor entendimiento en cuanto a la aplicación de imágenes ASTER respecto a otras imágenes para la detección de minerales.

Rezaei, Hassani, Moarefvand, *et al.* (2020), realizaron una investigación en la que utilizaron imágenes ASTER para la discriminación de unidades de roca en la región de Sangan en Irán. Se fundamentó en el uso de técnicas de teledetección para el Mapeo Geológico y

utilizaron métodos de relación de bandas (RB), mapeador de ángulos espectrales (MAE) y máquinas de vectores de soporte (MVS) para clasificar las principales unidades litológicas. Los resultados que se obtuvieron se compararon con los utilizados convencionalmente en campo, brindando una precisión de casi el 79%, siendo el método MVS el que proporciona resultados superiores. Concluyeron que, este tipo de imágenes satelitales pueden ser favorables en el mapeo geológico y exploración de minerales en regiones inaccesibles. Esta investigación aporta a nuestro trabajo una mayor seguridad de que al ser aplicado sea exitoso en la discriminación de drenaje ácido de roca y de mina, debido que es útil para lugares lejanos, tales como las zonas de la Sierra en donde se ubican en mayor cantidad los yacimientos mineros.

Heidari, Afzal, Lofti, *et al.* (2016), realizaron una investigación para señalar las diferentes zonas mineralizadas de plomo-zinc en el área de Zardu del depósito SEDEX en Irán Central, esto se hizo a través de modelos de concentración-volumen (C-V) de datos geológicos y litogeoquímicos de perforación. El modelo geológico evidenció que los tipos de mineral de sulfuro masivo y pirita-dolomita son los principales tipos de roca que albergan la mineralización. Las zonas mineralizadas “enriquecidas” contienen valores de plomo y zinc superiores al 6,93% y 19,95% respectivamente. Las áreas donde los valores de plomo y zinc eran superiores a 1,58% y 5,88%, respectivamente, se denominan zonas mineralizadas de “alta ley”, y estas zonas están vinculadas a litologías masivas de sulfuro y pirita-dolomita de la región. Las zonas débilmente mineralizadas, etiquetadas como “de baja ley” en el modelo C-V tienen 0 – 0,63% de plomo, 0 – 3,16% de zinc, y están correlacionadas con las unidades litológicas. Este estudio nos aporta nuevos saberes respecto a modelos geológicos para determinar zonas mineralizadas.

## **2.2. Conceptos básicos**

Para poder tener claridad sobre nuestra investigación, consideramos pertinente, tomar en cuenta los siguientes conceptos:

### **Teledetección**

La teledetección es una técnica que nos permite obtener información a distancia de objetos situados sobre la superficie de la tierra, sin estar en contacto directo con ellos. Para que esta técnica sea posible se necesitan tres elementos: el sensor, el objeto observado y el flujo energético, que es el medio por el cual se van relacionar los dos primeros elementos (Chuvieco, 2002). Normalmente esta información se consigue mediante imágenes, que son tomadas desde sensores a bordo de satélites ubicadas en el aire o en el espacio, siendo esta última la más recurrente. Las imágenes tomadas desde el espacio se denominan imágenes satelitales.

### **Energía electromagnética.**

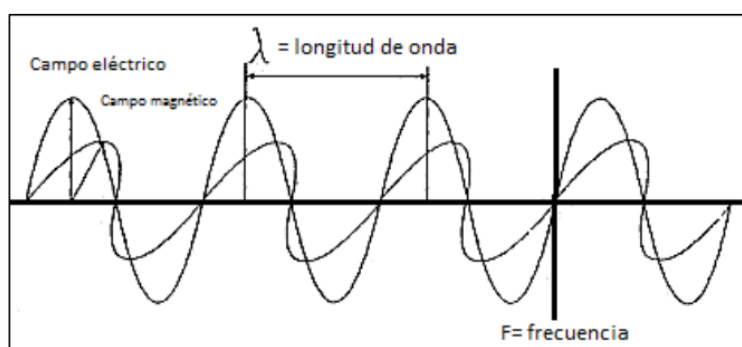
Según la teoría ondulatoria, la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético (Figura 1). Los elementos de este flujo

energético son: longitud de onda ( $\lambda$ ) y frecuencia (F). El primero hace referencia a la distancia entre dos picos sucesivos de una onda, mientras que la frecuencia designa el número de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo. Ambos elementos están inversamente relacionados, como se describe en la fórmula:

$$c = \lambda \cdot F$$

Donde  $c$  indica la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s),  $\lambda$  es la longitud de onda y  $F$  es la frecuencia (Hertz, ciclos por segundo), de la fórmula se puede determinar que, a mayor longitud de onda, menor frecuencia y viceversa (Chuvieco, 2002).

**Figura 1.** Esquema de una onda electromagnética.

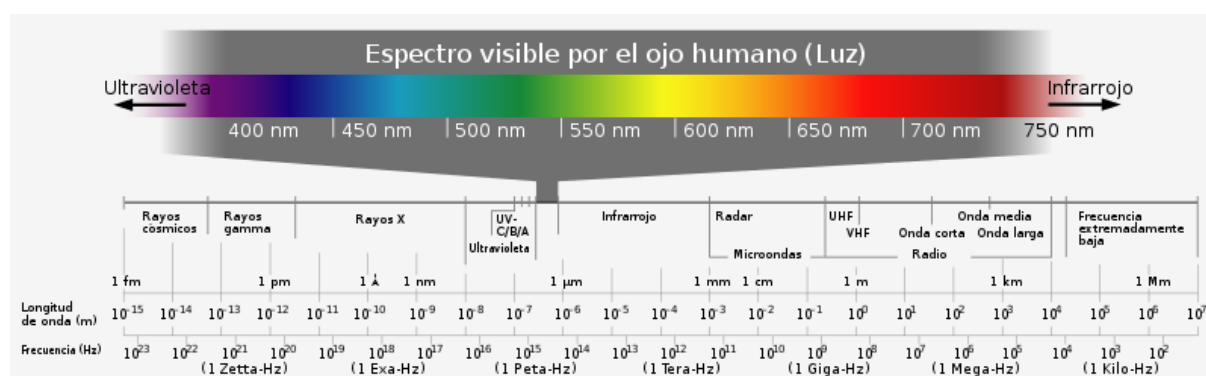


Fuente: Teledetección Ambiental (Chuvieco, 2002).

## Espectro electromagnético

La energía radiante, entre ellas la radiación electromagnética, puede ser clasificado en función de sus longitudes de onda o frecuencia. A pesar de que la sucesión es continua, se suele agrupar una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar (Figura 2). A la organización de estas longitudes de onda en bandas, se le denomina espectro electromagnético.

**Figura 2.** Espectro electromagnético que detalla el rango del espectro visible en nanómetros (nm).



Fuente: Sistemas electrónicos de comunicaciones. (Frenzel et al., 2003).

Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales que son frecuentemente empleadas (Rodríguez, 2008):

**Espectro visible (400 a 700 nm).** Es la única porción del espectro capaz de ser percibida por el ojo humano. Suelen distinguirse tres bandas elementales: azul (400 a 500 nm), verde (500 a 600 nm) y rojo (600 a 700 nm).

**Infrarrojo cercano (700 a 1300 nm).** Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

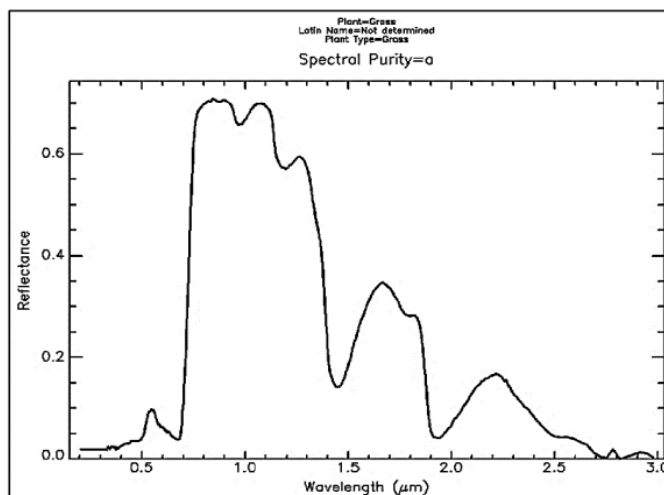
**Infrarrojo medio (1300 a 8000 nm).** En esta banda se mezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.

**Infrarrojo lejano o térmico (8000 a 14000 nm).** Comprende la porción emisiva del espectro, donde se detecta el calor proveniente de la cubierta terrestre.

### Firma espectral

Es el perfil específico de reflectancia emitido por una superficie. Se conoce también como la ‘huella dactilar’ que caracteriza cada objeto, ya que dependiendo de cómo refleja la radiación, se puede hallar las propiedades del mismo (Figura 3). Las firmas espectrales son a menudo representadas gráficamente en un eje de coordenadas, donde la longitud de onda está en el eje de las abscisas, y la reflectancia en el eje de las ordenadas.

**Figura 3.** Firma espectral de la vegetación sana



Fuente: ASTER Spectral Library (Baldrige et al., 2009).

### Librería espectral

Es un repositorio digital donde se encuentran firmas espectrales de distintos tipos de superficie y objetos específicos (minerales, árboles, plantas, etc.), que han sido recolectadas en campo por un instrumento adecuado. Entre las librerías espectrales relacionadas a minerales más importantes tenemos la librería ASTER, USGS (United State Geological Survey) y ASU (Arizona Statal University).

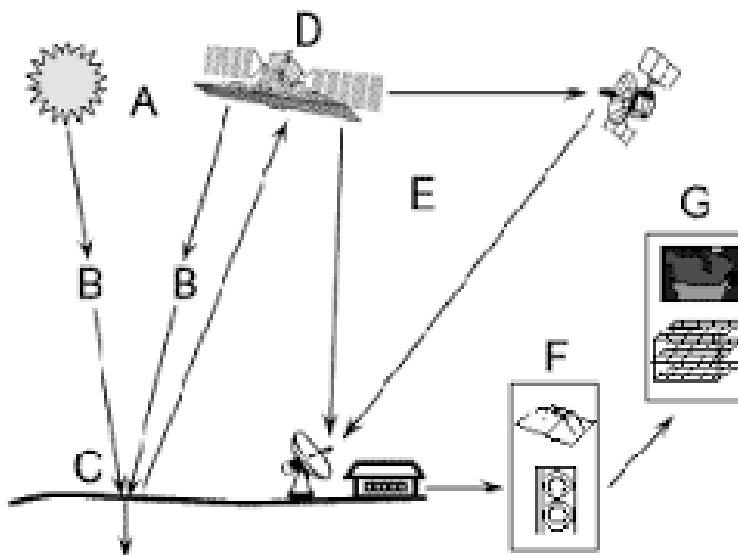


## Imagen Satelital

Se define como la representación visual de la información captada por un sensor a bordo de una plataforma que se encuentra en el espacio. Por lo general, este sensor cuenta con una serie de bandas capaces de obtener información adicional (regiones no visibles del espectro), por lo que estas imágenes son muy utilizadas para estudiar procesos a escala global, mayormente relacionados al medio ambiente.

El proceso de obtención de una imagen satelital es el siguiente: la fuente de energía (A), que en este caso es el sol, emite radiación electromagnética (B), que lleva hasta la superficie terrestre (C). Una vez que la radiación es captada por la superficie, parte de esta energía se refleja en distintas direcciones, llegando una porción de esta hasta el sensor que se encuentra en el espacio (D). Esta información es transmitida a la plataforma del sensor en tierra como una señal digital (E), en forma de una matriz numérica. Es aquí donde la imagen recibe las correcciones necesarias para su posterior tratamiento (F). Finalmente, es el usuario final el que dispone de esta imagen corregida el que le da el uso necesario (G), adaptándose a sus necesidades.

**Figura 4.** *Proceso de obtención de una imagen satelital*



Fuente: Teledetección Ambiental (Chuvieco, 2002).

## Sensores y resoluciones

Un sensor es un aparato que se encuentra sobre una plataforma (normalmente un satélite), que reúne la tecnología para transformar la radiación electromagnética en información perceptible y analizable. Se puede definir dos tipos: sensor pasivo, el cual capta la radiación emitida o reflejada por la Tierra; y sensor activo, que capta la radiación proveniente del mismo sensor.

Esta captación de radiación es un fenómeno continuo en cuatro dimensiones (espacio, tiempo, longitud de onda y radiancia). Por esta razón, el sensor debe ser capaz de discretizar estos fenómenos, creando así los conceptos de resolución:

**Resolución espacial:** Es el tamaño del píxel (mínimo objeto observable en una imagen satelital).

**Resolución temporal:** Indica el intervalo de tiempo entre cada imagen obtenida por la plataforma.

**Resolución radiométrica:** Es la capacidad de discriminación entre variaciones de radiación que capta el sensor.

**Resolución espectral:** Indica el número y anchura de bandas que es capaz de medir el sensor.

### Sensor ASTER

El sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) es un transmisor de imágenes multispectrales que fue creado por una cooperación entre la NASA y el Ministerio de Comercio Economía e Industria de Japón (METI). Fue lanzado el 18 de diciembre de 1999 a bordo del satélite TERRA, y cuenta con instrumentos elaborados con el fin de observar la superficie terrestre, la biósfera, atmósfera y los océanos. Una de las características principales de este sensor es su alta cantidad de bandas entre el VNIR y el SWIR, siendo muy utilizado para mapear distintos tipos de minerales.

**Figura 5.** Características del sensor ASTER

Sensor	Subsistema	Banda	Rango espectral	Resolución espacial	Resolución radiométrica
ASTER	VNIR	1	0.52 - 0.60 $\mu\text{m}$	15 m	8 bits
		2	0.63 - 0.69 $\mu\text{m}$		
		3N	0.78 - 0.86 $\mu\text{m}$		
		3B	0.78 - 0.86 $\mu\text{m}$		
	SWIR	4	1.600 - 1.700 $\mu\text{m}$	30 m	8 bits
		5	2.145 - 2.185 $\mu\text{m}$		
		6	2.185 - 2.225 $\mu\text{m}$		
		7	2.235 - 2.285 $\mu\text{m}$		
		8	2.295 - 2.365 $\mu\text{m}$		
	TIR	9	2.360 - 2.430 $\mu\text{m}$	90 m	12 bits
		10	8.125 - 8.750 $\mu\text{m}$		
		11	8.750 - 8.825 $\mu\text{m}$		
		12	8.925 - 9.275 $\mu\text{m}$		
		13	10.25 - 10.95 $\mu\text{m}$		
14		10.95 - 11.65 $\mu\text{m}$			

Fuente: Elaboración propia.

Este sensor adquiere escenas con un ancho de barrido de 60x60 Km, con una resolución temporal de 16 días, las cuales son captadas a una altura de 705 Km (Rodríguez, 2008). Adicionalmente el sensor tiene una resolución espectral que va desde 0.520 hasta 11.650 micrómetros, distribuida en 14 bandas que a su vez se agrupan en tres subsistemas independientes: VNIR, SWIR y TIR.

### **Pre-procesamiento de imágenes ASTER**

Para que se pueda trabajar de una forma más eficiente con una imagen satelital, es necesaria aplicarle una serie de calibraciones y técnicas que nos ayudarán a obtener un resultado adecuado en cualquier estudio que se haga. Estas correcciones son:

**Calibración Geométrica.** Esta calibración corrige los desplazamientos y distorsiones geométricas en la imagen, asignándole una coordenada (x,y) a cada pixel mediante la identificación de puntos de control. Adicionalmente, se hace una corrección de altura sobre el nivel del mar y se proyecta los datos a un plano de referencia predeterminado como Datum, en coordenadas UTM o Geográficas.

**Calibración Radiométrica.** Los datos de una imagen satelital vienen almacenados en una matriz numérica. A cada valor numérico de esta matriz se le denomina nivel digital (ND). Estos valores no representan de manera directa una variable física y, por lo tanto, no es conveniente trabajar con estos "datos crudos". De esta manera, la corrección radiométrica convierte los valores de ND a valores de reflectancia. Este proceso se realiza en dos etapas (ERSDAC, 2002): Conversión de ND a radiancia y conversión de radiancia a reflectancia aparente.

**Calibración Atmosférica.** A menudo sucede que la toma de imágenes satelitales desde el sensor se da bajo condiciones heterogéneas en la atmósfera, ya que presenta distintas concentraciones de vapor de agua, aerosoles, entre otros, lo cual generan un ruido espectral. De esta manera, la corrección atmosférica reduce los efectos causados por estas alteraciones, obteniendo así una imagen más clara y homogénea.

**Elaboración de máscaras.** Las máscaras es una técnica muy usada en teledetección que consiste en identificar y extraer un conjunto de píxeles que presenten propiedades similares. Existen varias formas de elaborar una máscara, por ejemplo, delimitando un polígono que cubra una determinada área o también definiendo límites en el valor del píxel, que es la técnica más usada. El enmascaramiento de píxeles nos ayuda a extraer elementos de una superficie cuyos valores de radiancia o reflectancia varían mucho en relación a lo que se desea conseguir. Por ejemplo, es común el enmascaramiento de nubes en todos los trabajos para una mejor visualización del resultado final, así como también, se enmascara la vegetación, cuerpos de agua, etc.

## Técnicas de mapeo espectral

**Método SAM (Spectral Angle Mapper).** El método SAM o Mapeo de Ángulo Espectral, es un método de comparación automática entre los espectros de cada píxel de una imagen y un conjunto de espectros de referencia (Kruse et al., 1993). Estos últimos pueden ser extraídos de una librería espectral o pueden obtenerse con muestras de campo en un laboratorio.

El algoritmo básico permite tratar los espectros como vectores en un espacio  $n$ -dimensional, en donde  $n$  es el número de bandas incluidas en la clasificación. La comparación se realiza en términos de la diferencia angular (llamado ángulo espectral) entre los vectores de la imagen y de referencia (Pérez et al., 2010). Esta diferencia se calcula con la siguiente ecuación:

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n r_i^2}} \right)$$

En donde  $t$  es el espectro de estudio y  $r$  el espectro de referencia. El número  $n$  representa el número de bandas estudiadas y  $\alpha$  es el ángulo entre vectores. El resultado del método es una imagen de clasificación SAM y un número  $n$  de imágenes que muestran la distancia angular entre cada espectro de la imagen y el espectro de referencia, medida en radianes (Pérez et al., 2010).

**Combinación de bandas.** La visualización de una banda por si sola en algún programa de procesamiento de imágenes nos mostrará solo una tonalidad de grises. Sin embargo, al combinar tres bandas, asignándoles a cada éstas los colores primarios: Rojo, Verde y Azul (RGB), se logra la visualización de la imagen en falso color, resaltando las características de acuerdo al tipo de banda que se utilizó. A esto se le denomina combinación de bandas.

Para el presente proyecto se plantea realizar combinaciones de bandas con los subsistemas VNIR y SWIR, mediante las cuales se pueden reconocer diferentes características geológicas como: litología, estructuras, zonas de alteración hidrotermal, geomorfología, vegetación, etc. (Rodríguez, 2008).

**Cocientes de bandas.** Esta técnica consiste en dividir los niveles digitales de los píxeles de dos bandas diferentes. Se aplica para discriminar materiales con comportamiento reflectivo muy distinto entre bandas, lo que ayuda a diferenciar materiales que espectralmente pueden presentar una respuesta similar. Los resultados serán píxeles de color más oscuro cuando el denominador es mayor que el numerador y viceversa (Rodríguez, 2008).

## **La Actividad Minera**

En la actualidad la actividad Minera en nuestro país está conformada por una serie de ordenamientos jurídicos y dispositivos legales relativos al aprovechamiento económico de todos y cada uno de los recursos mineros ubicados a lo largo y ancho de todo el territorio peruano que es objeto de una serie de concesiones independientemente de que sean minerales de tipo metálicos o no metálicos, incluyendo los recursos que se encuentran tanto a tajo abierto en el suelo, en socavón e incluso en el subsuelo de todo el Perú, así como en los yacimientos mineros que se encuentran en la zona de dominio marítimo correspondiente a las 200 millas marinas de soberanía peruana.

A nivel global y en las principales plazas energéticas e industriales de todo el orbe se dice que el Perú es un país eminentemente minero, por su privilegiada ubicación geográfica; dado que se encuentra en una zona geológicamente rica en toda clase de minerales. Esta importante condición ha posicionado actualmente a la actividad minera como la principal industria generadora de fuente de divisas e ingresos económicos de nuestro país. La minería en sí reporta en promedio una cifra que excede actualmente y generosamente más del 60% de contribuciones a las arcas fiscales captadas vía impuestos directos e indirectos por la Superintendencia Nacional de Aduanas y Administración Tributaria – SUNAT – y que forman parte de los ingresos que administra actualmente para todos los sectores de la economía del país el Ministerio de Economía y Finanzas del Perú – MEF – gracias al aporte principalmente de la Gran Empresa, siendo ésta una actividad económica esencial y fundamental; dado que; interviene en toda la estructura económica de nuestro país.

La Minería también contribuye directamente al desarrollo del entorno geográfico, laboral, sociocultural e incluso ambiental de las poblaciones adyacentes a los Grandes Proyectos Mineros, mediante las buenas relaciones que se deben mantener con todas y cada una de las comunidades campesinas y nativas, al igual que con los pueblos originarios y ancestrales, para poder iniciar sus respectivas operaciones extractivas de carácter minero.

Todo ello nos conduce a tener en cuenta que actualmente la mayor parte del territorio nacional no ha sido todavía explorado, menos aún explotado, a pesar de que satelital y geológicamente se conocen las áreas donde pueden estar depositadas las ingentes y comprobadas riquezas mineras lo cual nos conduce a poder afirmar de pleno derecho que es indispensable contar un ordenamiento normativo moderno; como el que contiene actualmente, la legislación minera peruana influenciada por el Análisis Económico del Derecho; que no solo incentiva sino que ha generado y genera la creciente Inversión Extranjera en zonas aún inexploradas o en plena fase y proceso de explotación. (Montoya, 2016).

## **Drenaje Ácido de Roca (DAR)**

Es un proceso dependiente del tiempo y que involucra procesos de oxidación tanto química como biológica y fenómenos fisicoquímicos incluyendo la precipitación y el encapsulamiento. (UNMSM, 2013).

## Etapas del Drenaje Ácido de Roca (DAR).

**Etapa I.** La acidez es generada y rápidamente neutralizada en las etapas iniciales cuando la roca que contiene minerales sulfurados es expuesta al oxígeno y al agua. El drenaje de agua es casi neutro. Mientras se produce la oxidación de los minerales sulfurosos, existe suficiente alcalinidad disponible como para neutralizar la acidez y precipitar el hierro en forma de hidróxido.

**Etapa II.** A medida que continúa la generación de ácido y se agotan o se vuelven inaccesibles los minerales carbonatados, el pH del agua disminuye y el proceso se encamina hacia su segunda etapa. Cuando el pH del microambiente disminuye hasta 4.5, ocurren reacciones de oxidación tanto químicas como biológicas.

**Etapa III.** A medida que los minerales alcalinos se consumen o recubren, o bien, se produce acidez a mayor velocidad que alcalinidad, el pH se vuelve ácido. Las reacciones dominantes se transforman de oxidación química a principalmente oxidación biológicamente catalizada. De las reacciones de oxidación sulfurosa, se produce hierro ferroso, que se oxida biológicamente y se convierte en hierro férrico. Este, a su vez, reemplaza el oxígeno como el oxidante principal. (MINEM, s.f.).

### Minerales sulfurados

Son minerales formados por la combinación de azufre (anión  $S^{2-}$ ) con elementos metálicos, tales como el hierro, zinc, plomo, cobre, entre otros. La mayoría de estos metales son opacos, presentan un brillo metálico característico, y tienen un elevado peso específico (Rivera, 2005). En general, son buenos conductores de calor y tienen interés económico por tratarse de menas metálicas, como la esfalerita (ZnS), calcopirita (CuS), galena (PbS), etc.

## 3. Preguntas, objetivos e hipótesis de la investigación

### 3.1. Pregunta general, Objetivo general e Hipótesis general

*Tabla 1. Pregunta general, Objetivo general e Hipótesis general*

<b>Pregunta General</b>	<b>Objetivo General</b>	<b>Hipótesis General</b>
¿De qué manera las imágenes satelitales nos permiten localizar zonas mineralizadas con potencial generación de drenaje ácido de roca en la unidad minera Florencia – Tucari?	Ubicar las zonas mineralizadas con potencial generación de drenaje ácido de roca en la unidad minera Florencia – Tucari mediante la aplicación de imágenes satelitales.	El empleo de imágenes satelitales nos permitirá ubicar zonas mineralizadas con potencial generación de drenaje ácido de roca en la unidad minera Florencia – Tucari. De esta manera se facilitará el ejercicio de las funciones del OEFA en esta localidad.

### 3.2. Preguntas específicas y Objetivos específicos

**Tabla 2.** Preguntas y Objetivos específicos

<b>Preguntas Específicas</b>	<b>Objetivos Específicos</b>
¿Qué tipo de imagen satelital nos permitirá localizar zonas mineralizadas con potencial generación de drenaje ácido de roca en la unidad minera Florencia – Tucari?	Determinar el tipo de imagen satelital adecuado para ubicar zonas mineralizadas con potencial generación de drenaje ácido de roca en la unidad minera Florencia - Tucari.
¿Cuáles son los motivos por los cuales la unidad minera Florencia – Tucari presenta reportes de denuncias relacionadas a impactos ambientales?	Identificar los motivos por los cuales la unidad minera Florencia – Tucari presenta reportes de denuncias relacionadas a impactos ambientales.
¿De qué modo el uso de imágenes satelitales favorece la optimización de recursos económicos en la fiscalización ambiental a la unidad minera Florencia-Tucari?	Calcular los beneficios económicos producto del uso de imágenes satelitales en la fiscalización ambiental a la unidad minera Florencia-Tucari.
¿Cuáles son las ventajas del uso de imágenes satelitales durante las acciones de fiscalización en tiempos de Emergencia Sanitaria a Nivel Nacional debido a la pandemia por COVID-19?	Establecer las ventajas del uso de imágenes satelitales durante las acciones de fiscalización en tiempos de Emergencia Sanitaria a nivel nacional debido a la pandemia por COVID-19.
¿De qué forma el uso de imágenes satelitales impulsa una actuación más rápida y eficiente del OEFA en procedimientos aplicados a la fiscalización ambiental?	Verificar si el uso de imágenes satelitales impulsa una actuación más rápida en los procedimientos aplicados a la fiscalización ambiental en el OEFA.

### 4. Fuentes de información

**Tabla 3.** Fuentes de Bases de Datos

<b>Base de datos</b>	<b>¿Qué se espera obtener?</b>
SINADA Servicio de Información Nacional y Denuncias Ambientales <a href="https://www.oefa.gob.pe/sinada/">https://www.oefa.gob.pe/sinada/</a>	Obtención y cuantificación de denuncias ambientales por zonas, permitiéndonos de esta manera identificar si la unidad minera Florencia - Tucari, tiene un rango elevado de impacto ambiental.
OEFA – Portal de Noticias Institucionales <a href="https://www.oefa.gob.pe/noticias-institucionales/">https://www.oefa.gob.pe/noticias-institucionales/</a>	Obtener información de las acciones realizadas por el OEFA en cuanto a los daños evidenciados a causa del vertimiento de aguas ácidas y otros, en la unidad minera Florencia - Tucari.

<p>SINIA Sistema Nacional de Información Ambiental <a href="https://sinia.minam.gob.pe/">https://sinia.minam.gob.pe/</a></p>	<p>Obtención de información relevante sobre estadísticas ambientales de la región Moquegua durante el periodo (2019-2020); asimismo, sobre los indicadores ambientales para el análisis situacional de la unidad minera Florencia-Tucari.</p>
<p>Gerencia Regional de Energía y Minas Gobierno Regional de Moquegua <a href="http://www.regionmoquegua.gob.pe/">http://www.regionmoquegua.gob.pe/</a></p>	<p>Obtener información de la institución, sobre el cumplimiento de la normatividad vigente en cuanto a las actividades de supervisión y fiscalización ambiental del Gobierno Regional de Moquegua respecto al sector minería dentro de la región. A través de esta fuente podemos acceder a información precisa sobre la empresa.</p>
<p>Observatorio de Conflictos Mineros De América Latina (OCMAL) <a href="https://www.ocmal.org/">https://www.ocmal.org/</a></p>	<p>Revisar el historial específico de denuncias ambientales y acciones gubernamentales en torno a la unidad minera Florencia-Tucari. Consultar historial específico de noticas que el Observatorio tiene para la unidad minera.</p>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4. Fuentes Bibliográficas**

<b>Fuentes bibliográficas</b>	<b>¿Qué se espera obtener?</b>
<p>Teledetección Ambiental Chuvieco, E. (2002). <i>Teledetección Ambiental</i>. Editorial Ariel, S.A.</p>	<p>Conocer la definición de la técnica de la teledetección, características, métodos y objetos.</p>
<p>The spectral image processing system – interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. Kruse, F., Boardman, J., Lefkoff, A., Heidebrecht, K., Shapiro, A., Barloon, P. y Goetz, A. (1993).</p>	<p>Obtención de información acerca de las imágenes satelitales, más específicamente acerca del sistema de procesamiento se imágenes espectrales, todo ello relacionado con la técnica de la teledetección.</p>
<p>Reconocimiento de alteración hidrotermal con el sensor ASTER, en el curso medio del río Santa Cruz. Pérez, D., D’Odorico, P. y Godeas, M. (2010).</p>	<p>Conocer el funcionamiento, objetivo y características del sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), que tendrá como finalidad calibrar las imágenes satelitales de observación. Para la observación y monitoreo satelital a la unidad minera Florencia – Tucari.</p>



Normas Técnicas Para Diseño Ambiental (Guías) - Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas  
<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/manedrenaje.pdf>

Conocer los pasos de identificación, predicción, control y evaluación del drenaje ácido de roca en las minas ubicadas en el Perú. De tal manera definir de una manera más aproximada, la dimensión actual de emisión del drenaje ácido de mina, dentro de las Unidades Mineras a nivel nacional.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5. Normas Legales Peruanas**

<b>Normas Legales Peruanas</b>	<b>¿Qué se espera obtener?</b>
Ley General del Ambiente – LEY 28611 <a href="https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-28611.pdf">https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-28611.pdf</a>	Conocer aspectos relevantes sobre el marco normativo legal y desarrollo sostenible para la Gestión Ambiental dentro del territorio nacional.
Ley General de Minería – DL. N° 109 <a href="https://www.peru.gob.pe/docs/PLANES/94/PLAN_94_DL%20N%C2%BA%20109_2008.pdf">https://www.peru.gob.pe/docs/PLANES/94/PLAN_94_DL%20N%C2%BA%20109_2008.pdf</a>	Conocer y comprender todo lo relativo a la normativa de aprovechamiento de las sustancias y recursos minerales, dentro del ejercicio de las actividades mineras
Reglamento de Protección Ambiental para las Actividades de Exploración Minera – D.S. N° 042-2017-EM <a href="https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/reglamento-de-proteccion-ambiental-para-las-actividades-de-e-decreto-supremo-n-042-2017-em-1600033-2/">https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/reglamento-de-proteccion-ambiental-para-las-actividades-de-e-decreto-supremo-n-042-2017-em-1600033-2/</a>	Conocer la normativa, sobre los aspectos ambientales de las actividades de exploración minera, de conformidad con el ordenamiento normativo ambiental vigente.
Reglamento de Procedimientos Mineros – D.S. 020-2020-EM <a href="http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/LIBROS/RPM/RPM2020.pdf">http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/LIBROS/RPM/RPM2020.pdf</a>	Identificar la forma en la que se tramitan y se llevan a cabo los procedimientos mineros, en cuanto a los límites máximos permisibles, entre otros.
Reglamento de Protección y Gestión Ambiental para las Actividades de Explotación, Beneficio, Labor General, Transporte y Almacenamiento Minero - D.S. N° 040-2014-EM <a href="https://www.senace.gob.pe/download/senacenormativa/NAS-4-6-01-DS-040-2014-EM.pdf">https://www.senace.gob.pe/download/senacenormativa/NAS-4-6-01-DS-040-2014-EM.pdf</a>	Conocer los principales lineamientos de protección y gestión ambiental de las actividades realizadas dentro de la actividad minera como: explotación, transporte, almacenamiento entre otros, etc.

<p>Ley que regula los Pasivos Ambientales de la actividad minera – LEY N° 28271  <a href="https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-28271.pdf">https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-28271.pdf</a></p>	<p>Identificar los principales pasivos ambientales producidos por las actividades mineras, la responsabilidad y el financiamiento de las áreas afectadas por estos, al ecosistema circundante y la propiedad.</p>
<p>Reglamento para el cierre de minas – DS. N° 033-2005-EM  <a href="http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgaam/legislacion/proy_regla_cierre_minas.pdf">http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgaam/legislacion/proy_regla_cierre_minas.pdf</a></p>	<p>Obtención de conceptos, fundamentales en cuanto al tema de investigación.</p>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6. Normas Legales Internacionales**

<b>Normas Legales Internacionales</b>	<b>¿Qué se espera obtener?</b>
<p>Ley 45 – Ley de Minería Ecuador  <a href="https://www.oas.org/juridico/PDFs/mesicic4_ecu_mineria.pdf">https://www.oas.org/juridico/PDFs/mesicic4_ecu_mineria.pdf</a></p>	<p>Conocer el ejercicio de los derechos soberanos del estado ecuatoriano, de administración y regulación de la actividad en el sector minero.</p>
<p>Ley N° 685 – Código de Minas – Colombia  <a href="https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/2001/ley_0685_2001.pdf">https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/leyes/2001/ley_0685_2001.pdf</a></p>	<p>Análisis desde el punto de vista de derecho comparado – colombiano; acerca del manejo de la explotación de recursos mineros, y la forma de aprovechamiento adecuada y racional de las mismas.</p>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 7. Actores por entrevistar**

<b>Perfil de personas a entrevistar</b>	<b>¿Qué se espera obtener?</b>
<p>Alcalde de la Municipalidad Distrital de Carumas</p>	<p>Obtención de Información específica acerca del cumplimiento o de las acciones tomadas en cuanto problemática de impacto ambiental producida por la unidad minera Florencia - Tucari, dentro de su jurisdicción.</p>
<p>Sub Gerente de Estudios Pre-Inversión y Medio Ambiente de la Municipalidad Distrital de Carumas.</p>	<p>Obtención de información acerca de informes sobre los planes y políticas locales en materia ambiental, asimismo conocer los planes de supervisión y monitoreo de impactos ambientales negativos dentro del radio de impacto de la unidad minera Florencia – Tucari.</p>

Alcalde de la Municipalidad de Mariscal Nieto – Moquegua Regidores de la Municipalidad Provincial de Mariscal Nieto	Obtención de información por parte de las autoridades de la entidad edil en cuanto al monitoreo y control de las unidades mineras adscritas dentro de su jurisdicción en este caso de la unidad minera Florencia – Tucari.
Sub Gerente de Gestión del Medio Ambiente, de la Municipalidad Provincial de Mariscal Nieto.	Obtención de información acerca de los mecanismos e instrumentos implementados en cuanto a la mantención de ambientes a nivel de la provincia.
Profesionales y especialistas del Organismo de Fiscalización Ambiental (OEFA).	Obtención de información, por medio de las opiniones directas de éstos con la finalidad de identificar las principales dificultades para la ubicación de las áreas que generan drenaje ácido de (DAR) roca, dentro de la unidad minera objeto de investigación.
Rango de Edad (30-60) años	Conocer y analizar la opinión general de los pobladores en cuanto a los cambios ambientales generados y detectados por su comunidad, a causa de los pasivos mineros producidos por la actividad minera de la unidad minera de Florencia–Tucari.

---

Fuente: Elaboración propia

## 5. Metodología de la investigación

### 5.1. Metodología de investigación

La presente investigación se enfoca en el **paradigma cuantitativo**, debido a que los datos a utilizar como producto de la interpretación de imágenes satelitales se representan mediante cantidades y se deben analizar con métodos estadísticos. (Hernández et al., 2014).

La **metodología de la investigación es mixta**, comienza con el planteamiento de un problema que demanda el uso e integración de los enfoques cuantitativo y cualitativo. (Hernández et al., 2014). Como investigación enfocada a la fiscalización ambiental, por un lado, presenta una faceta cuantitativa, ya que se recogerá información empírica y se medirán los resultados obtenidos a partir de la interpretación de imágenes satelitales en zonas ubicadas cerca de la unidad minera Florencia – Tucari. Por otro lado, presenta una faceta cualitativa debido a que los resultados no sólo se van a basar y reflejar en datos numéricos, sino también en diversos actores relacionados a la presente investigación y los beneficios que traerían consigo los resultados al momento de realizar acciones de supervisión (a fin de poder discriminar entre impactos naturales y antropogénicos).

## 5.2. Alcance de la investigación

El **alcance será descriptivo**, ya que se busca especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. (Hernández et al., 2014). Recopilamos información para conducirnos hacia la localización de zonas mineralizadas con posibles impactos ambientales naturales mediante el uso de imágenes satelitales; por ello, es que nuestra investigación girará en torno a la unidad minera Florencia – Tucari y describir cómo llevar a cabo el proceso que conlleva usar imágenes satelitales a fin de localizar zonas mineralizadas y dar a conocer la posibilidad de predecir y discriminar impactos ambientales naturales de los antropogénicos.

## 5.3. Diseño de la investigación

El diseño será **No experimental – longitudinal**. En la investigación no experimental las variables independientes ocurren y no es posible manipularlas, no se tiene control directo sobre dichas variables ni se puede influir en ellas, porque ya sucedieron, al igual que sus efectos. (Hernández, 2014). Para comprobar la hipótesis de la presente investigación, no se manipularán intencionalmente las variables de campo como la contaminación en el agua originada por la explotación minera; sin embargo, haremos uso de información satelital para realizar un procedimiento que nos permita determinar cómo a partir de la presencia de zonas mineralizadas podemos llegar a ubicar aquellas áreas con potencial impacto ambiental. Se utilizará un modelo **longitudinal** dado que la información obtenida de interpretación de las imágenes satelitales corresponde a diferentes puntos en el tiempo, lo que nos servirá para obtención de resultados exactos en la determinación de zonas mineralizadas con potencial impacto ambiental. Los estudios longitudinales tienen la ventaja de que proporcionan información sobre cómo las categorías, conceptos, procesos, variables, comunidades, fenómenos, y sus relaciones evolucionan al paso del tiempo. (Hernández et al., 2014).

## 5.4. Métodos

Finalmente, **el método será inductivo**, en base a los hechos observados (agua contaminada en zonas cercanas a la unidad minera Florencia – Tucari), nos preguntamos cómo discriminar los impactos naturales de los antropogénicos mediante el uso de imágenes satelitales. Por ello llegamos a la conclusión que la interpretación de estas imágenes plantean una propuesta de solución. Este modelo crea leyes a partir de la observación de los hechos, mediante la generalización del comportamiento observado (Behar, 2008). Luego de toda la información recabada, definiremos qué debemos considerar para poder discriminar impactos ambientales naturales de los antropogénicos, y no solo guiarnos de una perspectiva visual al momento de ubicar una zona mineralizada, sino también de lo observado por parte de las actividades de la unidad minera Florencia – Tucari.

## 5.5. Flujo metodológico

La presente investigación tratará de ubicar zonas mineralizadas con potencial generación de drenaje ácido de mina mediante imágenes satelitales. Para realizar este proyecto de investigación, dividiremos el trabajo en cuatro partes: pre-procesamiento de la imagen ASTER, procesamiento de la imagen ASTER, mapeo espectral de minerales y, por último, análisis, comparación y validación de resultados.

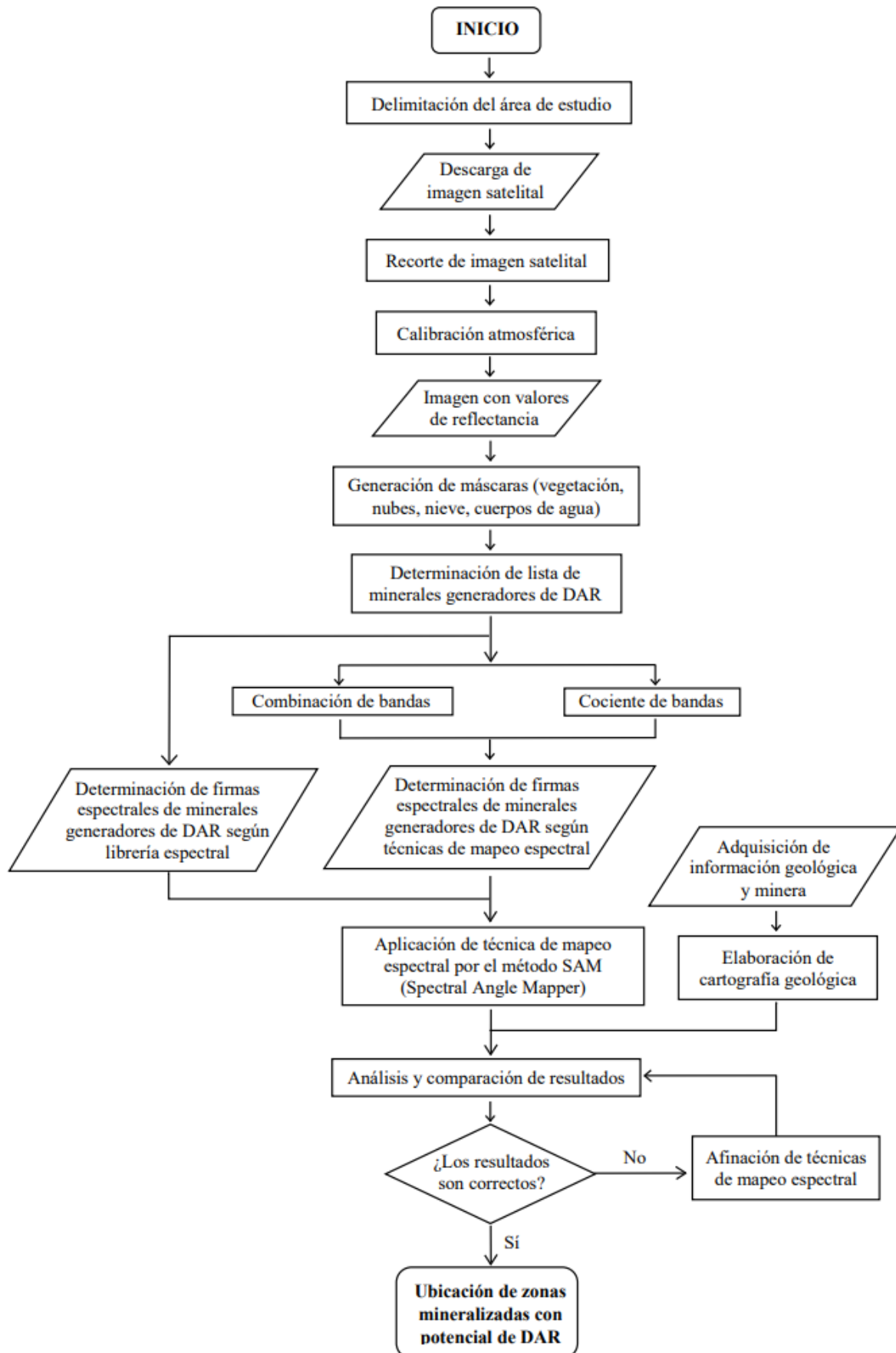
El pre-procesamiento empieza delimitando el área de estudio a trabajar en el software ArcGIS, en base a la extensión de la unidad minera Florencia-Tucari y su radio de influencia directa. Luego se procede a descargar la imagen satelital. Para esto, se utilizará una imagen que sea de libre acceso (en este caso será una imagen ASTER), mediante el portal Earth Data de la NASA. Una vez que se tiene estos dos insumos, se procede a recortar la imagen satelital en función al área de estudio, para simplificar los procesos computacionales.

El procesamiento empieza con la calibración atmosférica de la imagen ASTER. Cabe recalcar que no es necesario hacerle una calibración radiométrica, ya que esta imagen viene ya calibrada en este aspecto. Una vez corregida la imagen, se tiene la escena con valores de reflectancia, que es lo apropiado para calcular los índices espectrales. Estos índices nos ayudarán a generar las máscaras de vegetación, nubes, nieve y cuerpos de agua, para posteriormente quedarnos con una superficie donde predomina el suelo desnudo (para ubicar los minerales).

Luego, se aplicarán una serie de técnicas para mapear espectralmente los minerales escogidos. Estas técnicas son la combinación de bandas y cociente de bandas, que nos ayudarán a discriminar por medio de tonalidades la ubicación de estos minerales. Luego de hallarlos visualmente, se extraerán sus firmas espectrales y se creará una biblioteca espectral con todas las firmas halladas. Posteriormente se aplicará el método SAM, el cual comparará las firmas espectrales halladas en la escena con las firmas espectrales que se encuentran en la librería espectral de apoyo, que en este caso será la librería de la USGS.

Por último, la fase de validación consiste en comparar los resultados obtenidos del método SAM (que sería la ubicación de los minerales) con la información geológica-minera de la zona. Para esto, se realiza la cartografía temática del área de estudio con informes de distintas entidades, como INGEMMET u otros estudios realizados por empresas privadas. Si la ubicación de los minerales por el método SAM es correcta, se realiza un mapa final con la localización de estos minerales, y si no, se afinan las técnicas de mapeo espectral, hasta tener un resultado apropiado. Finalmente, se realiza la correlación entre los minerales hallados y la generación de drenaje ácido, esto constatado con informes de evaluación y supervisión del OEFA.

*Flujo metodológico del proyecto de investigación*



## 6. Bibliografía

- Araujo Huamán, G. E., Valderrama Murillo, P. A., Miranda Cruz, R., Fídel Smoll, L., Taipe Maquerhua, E. L., Huarez Yarlequé, C. M., Díaz Apaza, J., Loaiza Jordan, Y., Villón Reinoso, C. (2016). *Análisis de la dinámica de deformación y desplazamiento del deslizamiento de Sigwas mediante el uso de imágenes satelitales multitemporales*. Congreso Peruano de Geología.  
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/1600>
- Behar Rivero, D. (2008). *Metodología de la Investigación*. Editorial Shalom 2008.
- Caiza, E. (2018). *Estimación de zonas de alteración hidrotermal mediante interpretación de imágenes satelitales tipo ASTER y uso del equipo TERRASPEC en la zona oriental de Cerro de Pasco, Perú*. [Tesis de bachiller, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio digital de la Universidad Central del Ecuador.  
<http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/14217>
- Chaparro, L. (2015). Drenajes Ácidos de Mina, Formación y Manejo. *Esaica*, Vol. 1, No. 1 pp. 55-57. DOI: [10.15649/24225126.272](https://doi.org/10.15649/24225126.272)
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección Ambiental*. España: Uigraf. S.A.
- ERSDAC. (2002). *ASTER User's Guide*.
- Heidari, A., Afzal, P., Lofti, M. y Jafarirad, A. (2016). Identification of mineralized zones in the Zardu area, Kushk SEDEX deposit (Central Iran), based on geological and multifractal modeling. *Open Geosciences*. Vol. 8, No. 1 pp. 143-153. DOI: [10.1515/geo-2016-0014](https://doi.org/10.1515/geo-2016-0014)
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. México D.F.: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A.
- Inga, F. y Ortega L. (2020). *Caracterización mineralógica mediante percepción remota y posibilidad de drenaje ácido de roca en el distrito de San Bernardino*. [Tesis de bachiller, Universidad Privada del Norte]. Repositorio institucional de la Universidad Privada del Norte.  
<http://hdl.handle.net/11537/23969>
- Instituto Geográfico Nacional (s.f.). *Mosaico de imágenes satelitales*. Consultado el 09 de febrero de 2021.  
<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/SensoresRomotos/MosaicosSatelitales>

- Kruse, F., Boardman, J., Lefkoff, A., Heidebrecht, K., Shapiro, A., Barloon, P. y Goetz, A. (1993). *The spectral image processing system –interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data*. Remote Sens. Environ. Vol. 44: 145-163.
- MINEM. (s.f.). *Ministerio de Energía y Minas: Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas*. Obtenido de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/manedrenaje.pdf>
- Montoya, J. (2015). *Identificación de drenajes ácidos de mina con sensores remotos*. [Tesis de Magíster, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56679>
- Montoya, V. E. (2016). *El impacto de la Minería en el Perú, bajo la exégesis del Análisis Económico del Derecho, periodo del 2010 al 2015*. Universidad Peruana las Américas. Lima.
- Pérez, D., D’Odorico, P. y Godeas, M. (2010). *Reconocimiento de alteración hidrotermal con el sensor ASTER, en el curso medio del rio Santa Cruz (31°40’S), Provincia de San Juan*. Revista de la Asociación Geológica Argentina 66 (4): 653-633.
- Red Nacional de Teledetección Ambiental. (2010). *Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente*. Madrid:CSIC.
- Rivera, H. (2005). *Geología General*. Editorial Megabyte.
- Rodríguez, F. (2008). *Determinación de zonas de alteración hidrotermal mediante imágenes ASTER, Oeste de Cajamarca*. Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Cusco-Perú, 107p.
- Tolosa, L (2017). *Geología, Alteración y Mineralización del Yacimiento Estratoligado de Mina Rafaela, Cabildo, V Región*. [Tesis de Grado, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional de la Universidad de Chile. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/150350>
- UNMSM, F. I. (2013). “*Drenaje ácido de roca (DAR)*”. Lima
- Vereau, J. (2019). *Zoneamiento genético de la mineralización y su relación con la extracción y recuperación de minerales en el área del Yacimiento Corona*. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM*. Vol. 23 No. 1 pp. 21-28.