

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “TOMÁS FRÍAS”**

**VICERRECTORADO**

**DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA**

**FACULTAD: INGENIERÍA GEOLÓGICA  
CARRERA: INGENIERÍA GEOLÓGICA**



**TELEDETECCIÓN APLICADA EN LA IDENTIFICACIÓN DE  
DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEL VOLCÁN OLLAGUE EN EL  
SECTOR BOLIVIANO**

**“INVESTIGACIÓN”**

**AUTOR:** Univ. Vladimir Michel Mamani

**2018  
Potosí – Bolivia**



## **DEDICATORIA.**

A mi querida mamita, Prof. Teresa Mamani Gutiérrez, como pequeño testimonio por su gran apoyo y amor incondicional, siempre estuvo a lado mío y nunca perdió la fe en mí, a la cual dedico este trabajo.

## **AGRADECIMIENTOS.**

Al ingeniero Agustín Pérez Lozano, por confiar en mi capacidad para desarrollarme como estudiante de investigación, gracias.

Al ingeniero Dr. Pedro López Cortes, por tomarme en cuenta y confiar en mis habilidades y conocimiento para la realización de innumerables trabajos realizados a lo largo de la presente gestión.

Al ingeniero Yerko López Velásquez, por aconsejarme y guiarme en la realización del presente trabajo.

## ÍNDICE GENERAL

### INTRODUCCIÓN

#### CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

1.	Fundamentos de deslizamientos de laderas .....	1
1.1.	Factores que influyen en la estabilidad de las laderas .....	1
1.2.	Clasificación de los deslizamientos .....	1
1.2.1.	Según la velocidad del deslizamiento .....	1
1.2.1.1.	Deslizamientos lentos .....	1
1.2.1.2.	Deslizamientos rápidos .....	2
1.3.	Identificación de deslizamientos de ladera por teledetección .....	3
1.4.	Reconocimiento y verificación de campo.....	3
2.	Fundamento teórico de un volcán .....	4
2.1.	Localización de los Volcanes.....	5
2.2.	Partes de un volcán .....	8
2.3.	Tipos de volcanes según su actividad .....	9
2.3.1.	Volcanes activos. ....	9
2.3.2.	Volcanes durmientes o inactivos .....	9
2.3.3.	Volcanes extintos .....	9
2.4.	Clasificación de los volcanes y sus características .....	9
2.4.1.	Clasificación de los volcanes por su forma .....	10
2.4.2.	<i>Clasificación de los volcanes por su tipo de erupción.....</i>	10
2.5.	Peligros Volcánicos. ....	16
3.	Teledetección o Percepción Remota.....	19
4.	Componentes de un Sistema de Teledetección.....	20
4.1.	Fuente de Energía.....	20
4.2.	Cubierta Terrestre .....	20
4.3.	Sistema Sensor .....	20
4.4.	Sistema de Recepción .....	20
4.5.	Interpretación .....	21
4.6.	Usuario Final.....	21
5.	Principios Físicos de la Teledetección.....	21
5.1.	Fundamentos de Percepción Remota .....	21

<b>5.2.</b>	<b>El Espectro Electromagnético.....</b>	<b>22</b>
<b>5.3.</b>	<b>Interacción Atmosfera – Radiación Electromagnética .....</b>	<b>24</b>
<b>5.3.1.</b>	Absorción Atmosférica.....	25
<b>5.3.2.</b>	Dispersión Atmosférica.....	26
<b>5.3.3.</b>	Emisión Atmosférica.....	26
<b>5.4.</b>	<b>Interacción Radiación – Superficie de la Tierra.....</b>	<b>27</b>
<b>5.4.1.</b>	Reflexión .....	28
<b>5.4.2.</b>	Firma Espectral.....	28
<b>5.5.</b>	<b>Interacción Radiación - Materiales .....</b>	<b>28</b>
<b>5.5.1.</b>	Interacción Radiación - Rocas y Minerales.....	30
<b>6.</b>	<b>Sistemas Espaciales de Teledetección .....</b>	<b>32</b>
<b>6.1.</b>	Tipos de Sistemas .....	32
<b>6.1.1.</b>	Sensores Pasivos.....	32
<b>6.1.2.</b>	Sensores Activos .....	33
<b>6.2.</b>	Resolución de un Sistema Sensor .....	33
<b>6.2.1.</b>	Resolución Espacial .....	33
<b>6.2.2.</b>	Resolución Espectral .....	33
<b>6.2.3.</b>	Resolución Radiométrica .....	33
<b>6.2.4.</b>	Resolución Temporal .....	34
<b>6.3.</b>	Plataformas de Teledetección Espacial.....	34
<b>6.3.1.</b>	Programa LANDSAT .....	34
<b>6.3.1.1.</b>	Características del Satélite LANDSAT .....	36
<b>7.</b>	<b>Bases para la Interpretación de Imágenes.....</b>	<b>37</b>
<b>7.1.</b>	Selección del Material de Trabajo .....	37
<b>7.1.1.</b>	Tipo de Sensor.....	37
<b>7.1.2.</b>	Fecha de Adquisición .....	37
<b>7.1.3.</b>	Soporte de las Imágenes .....	37
<b>7.2.</b>	Estructura de la Imagen Satelital .....	37
<b>7.2.1.</b>	Formato de las Imágenes Satelitales .....	39
<b>7.2.1.1.</b>	Bandas Secuenciales .....	39
<b>7.2.2.</b>	Resolución de Una Imagen.....	39

<b>8.</b>	<b>Descripción del Área de Estudio .....</b>	<b>40</b>
<b>8.1.</b>	Ubicación. ....	40
<b>8.2.</b>	Clima. ....	40
<b>8.3.</b>	Flora. ....	41
<b>8.4.</b>	Fauna. ....	42
<b>9.</b>	<b>Marco Geológico Regional.....</b>	<b>43</b>
<b>CAPITULO II – MARCO PRÁCTICO</b>		
<b>10.</b>	<b>Etapa de Gabinete o Pre-Campo.....</b>	<b>45</b>
<b>11.</b>	<b>Etapa de Campo.....</b>	<b>45</b>
<b>12.</b>	<b>Etapa de Gabinete – Post Campo .....</b>	<b>46</b>
<b>13.</b>	<b>Fases Metodológicas del Trabajo de Investigación.....</b>	<b>47</b>
<b>14.</b>	<b>Etapa de Gabinete.....</b>	<b>49</b>
<b>14.1.</b>	Pre – Procesamiento. Imagen Satelital 2018.....	49
<b>14.2.</b>	Delimitación del Área de Estudio .....	49
<b>14.3.</b>	Corrección Radiométrica .....	50
<b>14.4.</b>	Corrección Atmosférica .....	52
<b>15.</b>	<b>Procesamiento. Imagen satelital 2018 .....</b>	<b>53</b>
<b>15.1.</b>	Combinación de Bandas.....	53
<b>15.2.</b>	Clasificación de Imágenes .....	55
<b>15.2.1.</b>	Clasificación supervisada .....	55
<b>15.3.</b>	Clasificación a Formato Vectorial .....	57
<b>15.4.</b>	Procesamiento Vectorial en ARCGIS .....	59
<b>16.</b>	<b>Procesamiento. Imagen Satelital 2003.....</b>	<b>61</b>
<b>CAPITULO III – ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>		
<b>17.</b>	<b>Análisis Espectral – Imagen Satelital 2018 .....</b>	<b>62</b>
<b>18.</b>	<b>Análisis Espectral – Imagen Satelital 2003 .....</b>	<b>63</b>
<b>19.</b>	<b>Análisis del Resultado de Campo .....</b>	<b>64</b>
<b>20.</b>	<b>Área de Estudio y Discusión de Resultados Final.....</b>	<b>64</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>		
<b>RECOMENDACIONES .....</b>		
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		

## **RESUMEN.**

Los deslizamientos por laderas constituyen un riesgo natural geológico producto de la geodinámica externa de la superficie terrestre; este fenómeno generalmente se manifiesta en zonas montañosas donde existe una pendiente relativamente inclinada del terreno. El estudio del mismo corresponde a las ciencias geológicas, específicamente es la geomorfología la que se encarga de analizar y evaluar las causas y consecuencias de su ocurrencia.

La detección de este fenómeno geológico mediante el uso de imágenes satelitales proporciona información fidedigna y veraz, el procesamiento del mismo se basa en la combinación de las bandas espectrales que proporciona el sensor del satélite LANDSAT, y de acuerdo a las características radiométricas de los materiales removidos (rocas, suelos) se podrá hacer una evaluación y comparación de los mismos respecto a los materiales adyacentes fijos, considerando su evolución temporal y espacial.

El Volcán Ollague corresponde a una estructura de relieve positivo, la cual, entre varios factores a estudiarse, presenta deslizamientos de materiales a través de sus laderas. La ubicación geográfica del mismo se halla al sudoeste del departamento de Potosí, situado en plena frontera Bolivia – Chile, en una zona accidentada, alejada y de difícil acceso, situación que dificulta su estudio.

Por la razón expuesta, la aplicación de imágenes de satélite a la identificación de deslizamientos de laderas del Volcán Ollague se convierte en una técnica relevante y complementaria a una visita de campo donde se verificará los datos referidos a movimiento de materiales en sus laderas, que serán previamente delimitados en el análisis visual de las imágenes.

La identificación de este fenómeno geológico podrá evidenciar la evolución del mismo en un rango de tiempo de 15 años, determinar la constitución del material removido, la velocidad de movimiento, y las causas que lo originan, entre otros factores, se considerara el efecto de la microsismicidad del volcán que se considera como un volcán activo.

En síntesis, la teledetección contribuye a analizar, alertar y evaluar el riesgo geológico generado por deslizamientos de laderas del Volcán Ollague en el sector boliviano.

# **TELEDETECCIÓN APLICADA EN LA IDENTIFICACIÓN DE DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEL VOLCÁN OLLAGUE EN EL SECTOR BOLIVIANO**

## **INTRODUCCIÓN.**

### **1. ANTECEDENTES.**

La teledetección aplicada a estudios geológicos ha demostrado ser de gran utilidad para identificar, cartografiar y analizar la dinámica espacial y temporal de la cobertura terrestre. En el caso particular de los riesgos geológicos como deslizamientos de ladera, la teledetección ayudará a evaluar su impacto a escala temporal y espacial. Utilizando imágenes satelitales de un rango de tiempo de 10 años, se podrá detectar deslizamientos de ladera ocurridos en las laderas del Volcán Ollague, en el sudoeste del departamento de Potosí.

Los deslizamientos ocurren en zonas de montaña generalmente pequeñas y con una cierta frecuencia. Existe una amplia variedad de avalanchas dependiendo del tipo de movimiento deslizamiento, escurrimiento, caída; la velocidad del mismo (mm/año), (mm/s), los materiales involucrados (rocas, suelo); y se dan diferentes mecanismos de activación o disparo, tales como movimientos sísmicos, terremotos, lluvia, pendientes empinadas, geomorfología de la zona o distintos tipos de intervención humana. El Volcán Ollague está categorizado como un volcán activo, el mismo que corresponde a un estratovolcán formado hace 3 a 4 millones de años, en la época del Plioceno superior, posee un cráter de cerca de 1250 m de diámetro, en el que existe evidencia del colapso de una estructura anterior, la que habría desaparecido durante algún antiguo evento eruptivo; de esta actividad, se observa evidencia de corridas de lava seca.

La existencia de fumarolas que despiden, es una mezcla de vapor de agua y gas sulfuroso, lo que evidencia la situación activa del mismo. Mediante clasificaciones supervisadas se diferenciaron los deslizamientos de ladera del resto de las unidades del terreno, con una precisión generalmente aceptable. En base a estas clasificaciones determinamos el cambio en el tiempo del área del Volcán Ollague por los deslizamientos de ladera.

Los estudios sobre deslizamientos de ladera basados en teledetección pueden aportar nuevos conocimientos en cuanto a la dinámica de este tipo de disturbio, su impacto en la zona del

sudoeste del departamento de Potosí y su relación con la actividad sísmica del volcán Ollague.

## **2. JUSTIFICACIÓN.**

La escasa existencia de estudios de investigación referidos a la teledetección aplicada a la identificación de riesgos geológicos, dificulta el uso de herramientas innovadoras como el procesamiento de imágenes satelitales en la identificación de deslizamientos. Actualmente universidades, institutos y proyectos de investigación de recursos naturales consideran el uso de estas herramientas como una ventaja en las áreas de prospección o exploración de recursos, puesto que agiliza los procesos de identificación de los mismos. Paralelamente a la elaboración del presente estudio, esté proporcionará una base de datos relevante para el posterior uso del mismo; entre otros beneficiarios, las poblaciones correspondientes al área de trabajo tendrán acceso y conocimiento sobre la constitución geológica del lugar, pudiendo emplearla en posteriores estudios académicos y profesionales.

## **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

¿Cómo aplicar la teledetección en la identificación de los deslizamientos de laderas del Volcán Ollague en el sector boliviano?

## **4. OBJETO DE INVESTIGACIÓN.**

Deslizamientos de laderas en el Volcán Ollague.

## **5. OBJETIVOS.**

### **5.1. OBJETIVO GENERAL.**

- Aplicar la teledetección para la identificación de deslizamientos de laderas del Volcán Ollague en el sector boliviano.

### **5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Recopilar los fundamentos teóricos sobre la teledetección óptica.
- Realizar el procesamiento digital de las imágenes satelitales ópticas.

- Verificar en campo la interpretación visual de deslizamientos de laderas obtenida en el procesamiento digital de las imágenes satelitales.

## **6. CAMPO DE ACCIÓN.**

Procesamiento digital e interpretación visual de imágenes satelitales correspondientes a las laderas del Volcán Ollague en el sector boliviano.

## **7. HIPÓTESIS.**

La teledetección aplicada en el procesamiento digital de imágenes de satélite permitirá identificar los deslizamientos de laderas del Volcán Ollague en el sector boliviano.

## **8. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.**

### **8.1. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES.**

#### **VARIABLE INDEPENDIENTE.**

- Procesamiento digital de las imágenes satelitales ópticas del área del Volcán Ollague.

#### **VARIABLE DEPENDIENTE.**

- Identificación de deslizamientos de laderas del Volcán Ollague.

### **8.2. DEFINICIÓN OPERATIVA DE VARIABLES.**

#### **VARIABLE INDEPENDIENTE.**

VARIABLE	DEFINICIÓN	DIMENSIÓN	INDICADORES	INSTRUMENTOS
Procesamiento digital de las imágenes satelitales ópticas del área del Volcán Ollague.	Determina las propiedades de textura, color, radiancia de las imágenes satelitales	Define las características de desplazamiento de materiales codificadas en las imágenes satelitales	Radiancia Rugosidad Tonalidad Brillo Textura	Satélite espacial óptico

## **VARIABLE DEPENDIENTE.**

<b>VARIABLE</b>	<b>DEFINICIÓN</b>	<b>DIMENSIÓN</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>INSTRUMENTOS</b>
Identificación de deslizamientos de laderas del Volcán Ollague.	Determina la orientación y distribución espacial del material desplazado	Define la cantidad de material que ha sido desplazado	Material suelto desplazado en el área de estudio	Modelos digitales para la identificación de deslizamientos de ladera

## **9. DISEÑO METODOLÓGICO.**

### **MÉTODOS TEÓRICOS.**

**MÉTODO INDUCTIVO – DEDUCTIVO.** El método inductivo – deductivo se aplica para identificar los deslizamientos de ladera mediante el procesamiento de imágenes satelitales, a partir de esto se podrá generalizar su aplicación a través de la comparación textural y de color en un contexto regional, de esta manera se podrá hacer conclusiones que demuestren el valor verdadero del enunciado general.

**MÉTODO DE ANÁLISIS – SÍNTESIS.** La aplicación del método de análisis, se enfoca en estudiar minuciosamente los elementos y factores más significativos que tengan repercusión en el procesamiento de imágenes satélites ópticas, tomando en cuenta los parámetros de desplazamiento de materiales en el área de estudio. Esto es complementado con la aplicación del método de síntesis donde se busca agrupar y relacionar los elementos encontrados en el análisis, formando una nueva estructura de estudio.

### **MÉTODOS EMPÍRICOS.**

**MÉTODO DE LA OBSERVACIÓN.** Este método permite obtener información primaria in situ, donde la observación se realiza para identificar las condiciones actuales del área de estudio, de esta manera tener una noción básica acerca del desplazamiento activo en el terreno aflorante.

**MÉTODO DE LA MEDICIÓN.** Método importante para realizar el procesamiento digital e interpretación visual de las imágenes satelitales, que coadyuven a desarrollar y cumplir los objetivos planteados.

**MÉTODO BIBLIOGRÁFICO.** La recopilación de información necesaria y relevante permite ampliar y profundizar el conocimiento sobre la teledetección aplicada a la geología, lo cual facilita comprender y sistematizar la teoría analizada en una nueva perspectiva.

## **10. TIPO DE INVESTIGACIÓN.**

En el proceso de identificación de deslizamientos de laderas en el Volcán Ollague, sector boliviano; se aplica una investigación científica – descriptiva.

Científica, porque se aplica el método científico de investigación, que procura obtener información relevante y fidedigna a través del procesamiento de imágenes satelitales en la identificación de deslizamientos de laderas del Volcán Ollague, para entender y verificar la situación geológica en la zona de estudio.

Descriptiva, porque el propósito principal es describir las características de los deslizamientos (material removido, rocas o suelos, velocidad de movimiento, agentes que activan el movimiento como la microsismicidad, pendiente, gravedad), obteniendo de esta manera una “situación real” que explique el origen de este riesgo geológico.

## **11. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.**

- Procesamiento digital de imágenes satelitales, mediante la combinación de las bandas espectrales que componen las escenas que son captadas por los sensores de la plataforma satelital LANDSAT, de acceso libre.
- Software ENVI 5.0, empleado para el tratamiento digital de las imágenes de satélite.
- Software ARCGIS 10.5, empleado para la elaboración de la cartografía de campo (mapas, imágenes, perfiles).
- Método geológico de mapeo de campo, utilizado para verificar y evidenciar las características geológicas y los deslizamientos de laderas del Volcán Ollague.

## **12. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.**

## CAPÍTULO I

### MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

#### **1. FUNDAMENTOS DE DESLIZAMIENTOS DE LADERAS.**

Un deslizamiento es un tipo de corrimiento o movimiento en masa de tierra, provocado por la inestabilidad de una ladera. Se produce cuando una gran masa de terreno se convierte en zona inestable y se desliza con respecto a una zona estable, a través de una superficie o franja de terreno de pequeño espesor. Los deslizamientos también son causados por las lluvias que humedecen y empapan el suelo, o también debido a un sismo de cierta intensidad. Los aludes de nieve también pueden originar, cuando llegan a una zona inferior libre de nieve, un deslizamiento de tierra por la fuerte pendiente. En casos extremos cuando se origina por una erupción volcánica se forma un lahar.

Los deslizamientos de laderas, desprendimientos de rocas y aludes son algunos de los procesos geológicos más comunes en la superficie de la Tierra. Forman parte del ciclo natural del terreno ya que la erosión y la gravedad actúan constantemente para transportar materiales de las zonas más altas hacia abajo.

#### **1.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ESTABILIDAD DE LAS LADERAS.**

El que una ladera permanezca estable o sufra un deslizamiento depende de la unión de varios factores, entre los que están:

- **Características del terreno.** Los lugares montañosos con pendientes fuertes son los que con más facilidad sufren deslizamientos, aunque en ocasiones pendientes de muy pocos grados son suficientes para originarlos si la roca está muy suelta o hay mucha agua en el subsuelo.
- **Condiciones climáticas.** En las regiones lluviosas suele haber espesores grandes de materiales alterados por la meteorización y el nivel freático suele estar alto lo que, en conjunto, facilita mucho los deslizamientos.
- **Macizos rocosos con fallas y fracturas.** Tienen especial importancia en los desprendimientos. Parte de las caídas de rocas y otros materiales tiene lugar en lugares en los que el terreno tiene abundantes fracturas y se ha ido produciendo

erosión en la base de sus laderas. En estos lugares cuando llueve intensamente con facilidad se pueden producir desprendimientos.

- **Erosión.** El drenaje superficial, ríos u otros procesos van erosionando la base de las laderas y provocan gran cantidad de deslizamientos.
- **Expansividad de las arcillas.** Las arcillas tienen la propiedad de que al empaparse de agua aumentan su volumen. Esto supone que los terrenos arcillosos en climas en los que alternan periodos secos con otros húmedos se deforman y empujan taludes, rocas, carreteras, etc. provocando deslizamientos y desprendimientos.
- **Acciones antrópicas.** Los movimientos de tierras y excavaciones que se hacen para construir carreteras, ferrocarriles, edificaciones, presas, minas al aire libre, etc. rompen los perfiles de equilibrio de las laderas y facilitan desprendimientos y deslizamientos. Además, normalmente se quitan los materiales que están en la base de la pendiente que es la zona más vulnerable y la que soporta mayores tensiones lo que obliga a fijar las laderas con costosos sistemas de sujeción y a estar continuamente rehaciendo las vías de comunicación en muchos lugares.
- **Movimientos telúricos.** Se conoce la acción de factores como terremotos, sismos, que, en ocasiones, provocan movimientos del terreno.

## 1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS DESLIZAMIENTOS.

### 1.2.1. SEGÚN LA VELOCIDAD DEL DESLIZAMIENTO.

- 1.2.1.1. **DESLIZAMIENTOS LENTOS.** Estos presentan una velocidad casi imperceptible, y puede ser de unos cuantos centímetros de material al año. Se identifican por una serie de características marcadas en el terreno, pocas veces catastróficas.
- 1.2.1.2. **DESLIZAMIENTOS RÁPIDOS.** La velocidad del movimiento es tal que la caída de todo el material puede darse en unos pocos segundos, son frecuentes en temporadas lluviosas o después de actividades sísmicas intensas.

### **1.3. IDENTIFICACIÓN DE DESLIZAMIENTOS DE LADERA POR TELEDETECCIÓN.**

La tecnología actual proporciona herramientas y procedimientos innovadores respecto al mapeo geológico tradicional (de exploración e identificación de riesgos geológicos); empleando para tal caso, el uso de imágenes satelitales que son proporcionadas por plataformas espaciales para realizar estudios científicos relacionados a los cambios en la superficie terrestre.

El objetivo principal del procesamiento de las imágenes satelitales es permitir la identificación, extracción y análisis de datos, teniendo como resultado escenas con la información específica requerida para la interpretación de deslizamientos de laderas.

Las imágenes de satélite, se han convertido en los últimos años en una herramienta de uso frecuente para la extracción de información geológica, siendo cada vez más numerosos los sistemas de teledetección que ponen a disposición una gran variedad de imágenes de gran utilidad en la cartografía geológica. Dada la gran variabilidad de los factores involucrados en la formación de una imagen satelital y de cómo todos estos factores interactúan con las características del territorio observado, es necesario tener en cuenta sus características ópticas; como, por ejemplo: composición de bandas, radiación recibida, tipo de sensor, factores atmosféricos, propiedades del terreno, etc. para poder interpretar fielmente las características geológicas de un área.

### **1.4. RECONOCIMIENTO Y VERIFICACIÓN DE CAMPO.**

La identificación de deslizamientos de laderas a partir del procesamiento de imágenes satelitales, corresponde a trabajar a “distancia” donde, evidentemente, no existe contacto entre el medio emisor (cubierta terrestre) y el sensor del satélite, cuando esté capta la señal electromagnética que es transmitida por la superficie terrestre. Por esta razón y considerando el carácter del “mapeo geológico de campo tradicional” en la elaboración de la cartografía geológica, es admisible y recomendable una posterior campaña de campo, donde será necesario verificar las variables identificadas en la imagen satelital.

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO DE UN VOLCÁN.

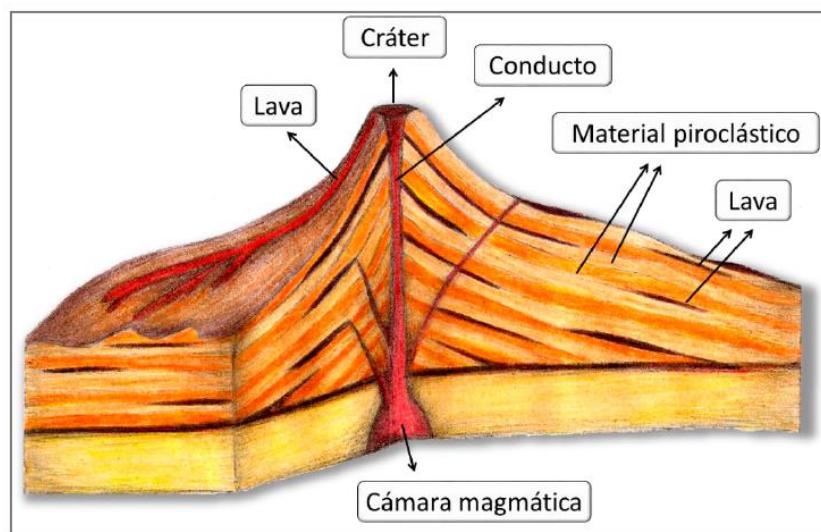
Un volcán es el resultado visible en la superficie terrestre de un largo proceso geológico, por el cual aflora material rocoso fundido (magma) y gases del interior de la Tierra de una manera más o menos violenta. La sucesiva acumulación de este material en los alrededores de la zona de emisión forma un relieve, que generalmente adopta una forma cónica que se denomina edificio volcánico y que puede llegar a tener considerable altura. El orificio por el que sale este material se denomina boca eruptiva, cráter o caldera.

Por lo general, los volcanes se forman en los límites de las placas tectónicas, aunque existen los llamados puntos calientes, donde no hay contacto entre placas.

Los volcanes pueden tener muchas formas y despedir distintos materiales. Algunas de las formas más comunes son el estratovolcán, el cono de escoria, la caldera volcánica y el volcán en escudo. También existen numerosos volcanes submarinos ubicados a lo largo de las dorsales oceánicas. Algunos volcanes alcanzan una altitud superior a los 6.000 metros sobre el nivel del mar.

El volcán puede arrojar material fluido y caliente al exterior de forma no explosiva, denominándose entonces lava, la cual se desliza por la acción de la gravedad por las pendientes del edificio volcánico pudiendo cubrir grandes extensiones en las cercanías del volcán.

**FIGURA 1.** Descripción de un volcán, indicando las partes que lo conforman.



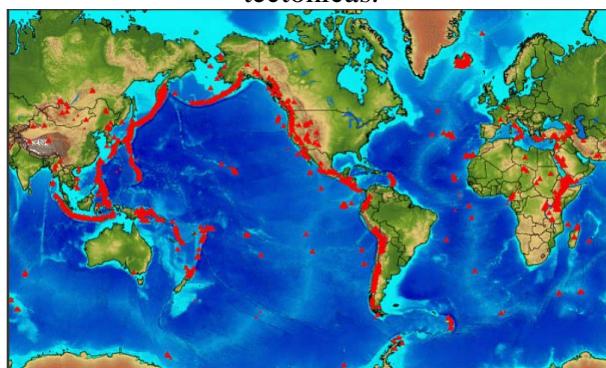
El volcán puede arrojar también de manera violenta fragmentos de lava al aire de muy diversos tamaños y diferente grado de consolidación con trayectorias de gran alcance, así como formar una gruesa columna de material ascendente (principalmente de gases y del material más fino) encima de la boca emisora, cuya altura depende del grado explosivo de la erupción y que al dispersarse o colapsar entrañan un grave peligro. Estos materiales se denominan genéricamente piroclastos (bombas volcánicas, lapilli, ceniza, etc.) y se diferencian por su tamaño, composición y por su dinámica de deposición.

Los volcanes son una manifestación en superficie de la energía interna de la Tierra. La temperatura y la presión se incrementan a medida que nos acercamos al centro de la Tierra, alcanzándose temperaturas de 5000 °C en el núcleo. El efecto combinado de la temperatura y la presión a distintas profundidades provoca un comportamiento diferente de los materiales que se estructuran en varias capas.

## 2.1. LOCALIZACIÓN DE LOS VOLCANES.

La localización geográfica de los volcanes actuales está relacionada con la división en placas de la corteza terrestre. A medida que se fue enfriando la superficie de la Tierra, fueron apareciendo zonas sólidas de materiales ligeros que flotaban sobre otros todavía fundidos. Estas zonas sólidas dieron lugar a las primeras masas continentales que son arrastradas por las corrientes de convección del interior de la Tierra. Con el tiempo, han ido creciendo estas masas continentales, disminuyendo las corrientes de convección y aumentando la rigidez de las capas exteriores al irse enfriando la Tierra.

**FIGURA 2.** Distribución mundial de los volcanes, a través de los límites en las placas tectónicas.

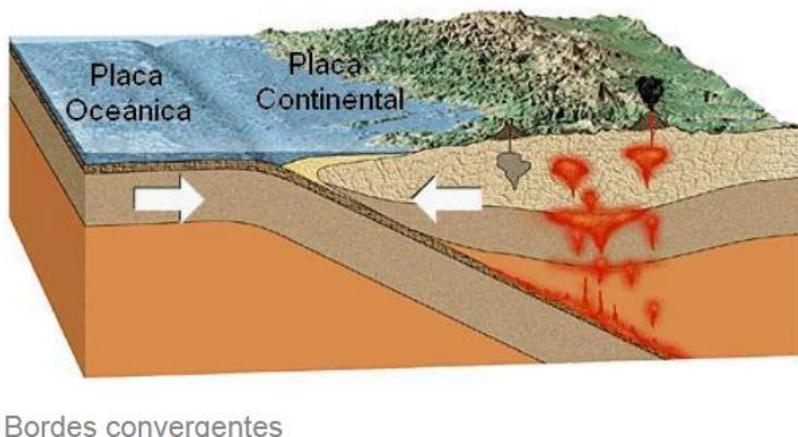


En la actualidad, la superficie de la Tierra está dividida en bloques, llamados placas tectónicas, que siguen moviéndose a diferente velocidad (varios centímetros por año). En los bordes de estas placas es donde se concentran las manifestaciones externas de la actividad del interior de la Tierra; procesos orogénicos (pliegues y fallas), volcanes y terremotos. Estos bordes pueden ser **convergentes, divergentes y transcurrentes**.

En los **bordes convergentes**, una de las placas se introduce debajo de la otra en un proceso llamado *subducción*, que da origen a una intensa actividad sísmica y a magmas, que pueden salir al exterior, formando zonas volcánicas características (Los Andes, Japón). La corteza oceánica, más pesada, se hunde debajo de la corteza continental más ligera. Ésta es arrastrada en una trayectoria oblicua hacia el interior de la Tierra hasta que alcanza una profundidad en la que se funde. Entonces asciende por fisuras verticales y es expulsada hacia la superficie por una chimenea volcánica. El movimiento relativo de ambas placas da origen a terremotos superficiales y profundos.

El más famoso ejemplo es el llamado “**Cinturón o anillo de fuego**”, que rodea el océano Pacífico. Otra cordillera volcánica se extiende a lo largo de más de 1.000 km desde Guatemala hasta Panamá, con unos 80 volcanes; los que están en actividad sobrepasan la treintena. Se estima que en la cordillera de los Andes hay más de 60 que pueden considerarse activos.

**FIGURA 3.** Borde convergente entre la placa oceánica y la placa continental



En los **bordes divergentes, dorsales oceánicas y rift continentales**, donde la corteza oceánica se estira y se separa, se forma una zona lineal débil; ésta sirve de salida para la

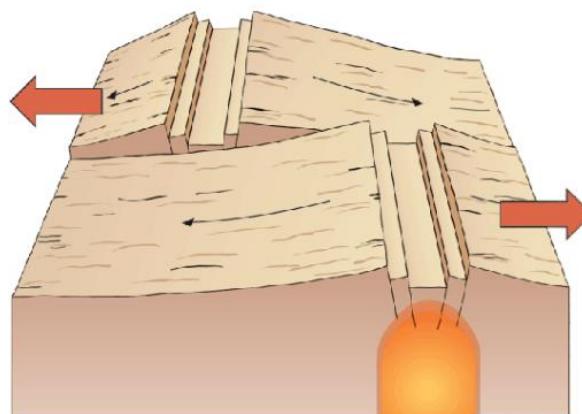
erupción de magma que asciende por corrientes de convección gigantes situadas en el manto. Las placas se separan facilitando el ascenso del magma (Dorsal del Atlántico, Islandia, Rift africano). Las placas divergentes que se separan como consecuencia del ascenso de material procedente del manto, forman una nueva corteza en las dorsales oceánicas o rift continentales.

**FIGURA 4.** Borde divergente dispuesto en una dorsal oceánica



Existen otras áreas volcánicas situadas sobre fracturas asociadas a los **bordes transcurrentes** (Islas Azores, Portugal). En estas zonas el movimiento de las placas es paralelo y de sentido contrario, conocidas también por **zonas de falla transformante**. Otros volcanes están situados en zonas intraplaca (Hawai, USA).

**FIGURA 5.** Borde transcurrente dentro de la placa continental

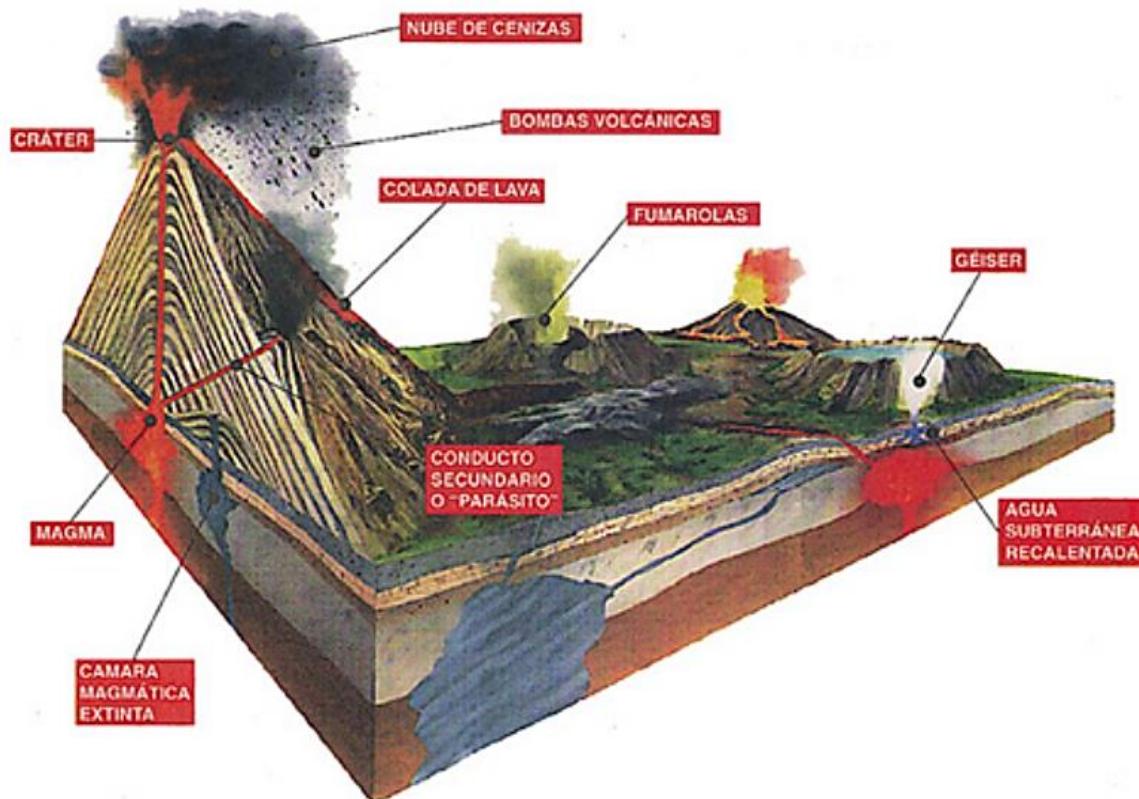


Borde Transformante

## 2.2. PARTES DE UN VOLCÁN.

Las características generales de todo volcán son las siguientes:

**FIGURA 6.** Partes que conforman un volcán



- **Cono volcánico:** formado por la misma presión del magma al ascender) tiene forma de cono y está formado por lavas y cenizas solidificadas.
- **Caldera:** depresión causada por el hundimiento de la cámara magmática.
- **Cámara magmática:** una bolsa que se encuentra en el interior de La Tierra formada por minerales y rocas en estado líquido por consecuencia de las altísimas temperaturas y presiones.
- **Cráter:** boca de erupción del volcán.
- **Cráter parásito:** segundas salidas de lava.
- **Magma:** mezcla multifase de sólidos, líquidos y gas producidos por la fusión entre la base de la corteza terrestre y la parte superior del manto.
- **Lava:** magma que asciende alcanzando la superficie.
- **Chimenea central:** vía principal por la que el magma asciende.
- **Fumarola:** son emisiones de gases de las lavas en los cráteres.
- **Solfataras:** son emisiones de vapor de agua y ácido sulfídrico.

- **Mofetas:** son fumarolas frías que desprenden dióxido de carbono.
- **Géiseres:** son pequeños volcanes de vapor de agua hirviendo.

### **2.3. TIPOS DE VOLCANES SEGÚN SU ACTIVIDAD.**

Los volcanes, teniendo en cuenta la frecuencia de sus erupciones, se pueden clasificar en tres tipos: activos, inactivos (durmientes) o extintos.

**2.3.1. Volcanes activos.** Los volcanes activos son aquellos que pueden entrar en actividad eruptiva en cualquier momento, es decir, que permanecen en estado de latencia. Esto ocurre con la mayoría de los volcanes, pues ocasionalmente entran en actividad, permaneciendo en reposo la mayor parte del tiempo. El período de actividad eruptiva puede durar desde una hora hasta varios años, como fue el caso del volcán de Pacaya y del Irazú. A día de hoy, no se ha descubierto ningún método seguro para predecir las erupciones.

**2.3.2. Volcanes durmientes o inactivos.** Los volcanes durmientes son aquellos que mantienen ciertos signos de actividad, como la presencia de aguas termales, y han entrado en actividad esporádicamente. Dentro de esta categoría suelen incluirse las fumarolas y los volcanes con largos períodos de inactividad entre una erupción y otra. Un volcán se considera durmiente si desde hace siglos no ha tenido una erupción.

**2.3.3. Volcanes extintos.** Los volcanes extintos, son aquella cuya última erupción fue registrada hace más de 25 000 años. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que puedan despertar y liberar una erupción más fuerte que la de un volcán que está despierto, causando grandes desastres. También se les llama extintos porque fueron alejados de su fuente de magma, perdiendo poco a poco su actividad, esto sucede únicamente en volcanes de punto caliente, a diferencia de los volcanes de zonas de subducción.

### **2.4. CLASIFICACIÓN DE LOS VOLCANES Y SUS CARACTERÍSTICAS.**

Los volcanes se pueden clasificar según el tipo de lava, de emplazamiento tectónico, tamaño, localización geográfica, actividad, morfología, número de erupciones. Según la Agencia Científica de Ciencias Naturales de Estados Unidos, la mayoría de los geólogos clasifican a

los volcanes en cuatro tipos principales: los conos de ceniza, los volcanes compuestos o estrato-volcanes, los volcanes en escudo o domos basálticos y los domos de lava.

A continuación, se presentarán la clasificación de los volcanes en base a su morfología o tipo de estructura y por el tipo de actividad o de erupción que presentan.

#### **2.4.1. CLASIFICACIÓN DE LOS VOLCANES POR SU FORMA.**

Los geólogos han clasificado los volcanes en tres categorías morfológicas: volcanes en escudo, conos de cenizas y conos compuestos (también conocidos como estratovolcanes).

- a. VOLCANES EN ESCUDO.** Es un volcán de grandes dimensiones y está formado a partir de las capas de sucesivas de emisiones de lavas muy fluidas, con escasas manifestaciones piroclásticas, formando edificios cónicos de pendientes muy suaves ( $6\text{--}8^\circ$ ) que se denominan volcanes en escudo, caracterizados además por cráteres de gran diámetro ocupados por lagos de lava. Es un término similar al de caldera volcánica. Los volcanes en escudo se dan a lo largo de los límites de las placas tectónicas o encima de puntos calientes.
- b. CONOS DE CENIZA.** Un cono de cenizas es un mini volcán formado principalmente por Piroclastos expulsados a partir de una sola chimenea. Tiene un tipo de lava semisólida, compuesta por cenizas y lava viscosa. Se forman donde las erupciones son de tipo explosivo con predominio de materiales piroclásticos. Generalmente, los conos de cenizas son fruto de un único episodio eruptivo que a veces dura sólo unas pocas semanas y en raras ocasiones supera unos pocos años. Una vez para la erupción, el magma del tubo que conecta la cámara magmática y la chimenea se solidifica y el volcán no vuelve a entrar en erupción jamás.
- c. CONOS COMPUESTOS O ESTRATOVOLCANES.** Un estratovolcán es una gran estructura volcánica de apariencia casi simétrica compuesta por múltiples capas lava endurecida, depósitos piroclásticos y cenizas volcánicas emitidos a partir de una chimenea principal, esto mediante la alternancia de épocas de actividad explosiva, dándole así una forma cónica y una monumental altura. Estos volcanes están caracterizados por un perfil escarpado y erupciones periódicas y explosivas. La lava que fluye desde su interior es altamente viscosa y se enfriá y endurece antes de que pueda llegar lejos. Cuando las erupciones de un volcán están acompañadas de gases

calientes y cenizas se produce lo que se conoce como flujo piroclástico o nube ardiente. Los estratovolcanes son comunes en zonas de subducción, donde forman cadenas o “arcos” a lo largo de los límites de la placa tectónica, donde la corteza oceánica se desliza bajo la corteza continental (los Andes) o bajo otra plataforma oceánica (Islandia). La mayoría de estos volcanes se encuentran en una estrecha zona que rodea el Océano Pacífico, a la que se denomina *Anillo o Cinturón de fuego*

#### **2.4.2. CLASIFICACIÓN DE LOS VOLCANES POR SU TIPO DE ERUPCIÓN.**

La temperatura, composición, viscosidad y elementos disueltos de los magmas son los factores fundamentales de los cuales depende el tipo de explosividad y la cantidad de productos volátiles que acompañan a la erupción volcánica.

- **HAWAIANO.** Se caracteriza por una abundante salida de magma bastante fluida, sin que tengan lugar desprendimientos gaseosos explosivos; estas lavas se desbordan cuando rebasan el cráter y se deslizan con facilidad por la ladera del volcán, formando grandes ríos, lagos de lava que pueden recorrer grandes distancias. Los gases son liberados en forma tranquila. Las erupciones violentas son raras y los gases pueden impulsar fuentes de lava que llegan a alcanzar los 500 m. de altura.

**FIGURA 7.** Volcán Kilauea, ubicado en Hawai, en estado de Erupción, Las erupciones tipo hawaiano, se caracterizan por magma abundante y fluida.



- **ESTROMBOLIANO.** Este tipo de volcán recibe el nombre del Stromboli, volcán de las islas Lípari (mar Tirreno), al Norte de Sicilia (Italia). Se originan cuando hay alternancia de los materiales en erupción, formándose un cono estratificado en capas de lavas fluidas y materiales sólidos. Las erupciones Strombolianas se caracterizan por ser explosiones intermitentes de lava basáltica que salen despedidas de un solo cráter o viento y están separadas por períodos de calma de extensión variable. El proceso de cada explosión corresponde a la evolución de una burbuja de gases liberados por el propio magma.

**FIGURA 8.** La Erupción del Volcán Stromboli, Italia, le da nombre a esta clasificación.



- **VULCANIANO.** Del nombre del volcán Vulcano en las islas Lípari. Se desprenden grandes cantidades de gases de un magma poco fluido, que se consolida con rapidez; por ello las explosiones son muy fuertes y pulverizan la lava, produciendo una gran nube de gases cargados de ceniza, arena y fragmentos de rocas que alcanzan varios kilómetros de altura. Este tipo de erupción está representado por el Etna y el Vulcano, en la zona del Mediterráneo.

**FIGURA 9.** Erupción del Monte Etna, que pertenece a esta clasificación.



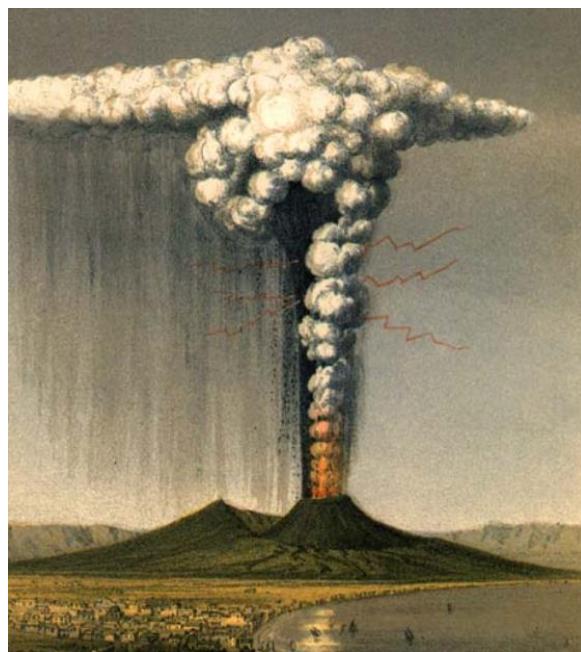
- **VESUBIANO.** El volcán que le da nombre a este grupo es el Vesubio (Nápoles). Difiere del vulcaniano en que la presión de los gases es muy fuerte y produce explosiones muy violentas. Forma nubes ardientes que, al enfriarse, producen precipitaciones de cenizas, que pueden llegar a sepultar ciudades, como ocurrió con Pompeya y Herculano, provocado por la colosal erupción del Monte Vesubio. En sus erupciones, son arrastrados los materiales que taponaban la chimenea e impedían la salida al exterior de los gases, a la que sigue la emisión de magma incandescente. En ocasiones la erupción finaliza con la expulsión de grandes volúmenes de gases y vapores.

**FIGURA 10.** Erupción del Popocatépetl.



- **PLINIANO.** Son erupciones muy violentas que levantan columnas verticales de gases, piroclástos y fragmentos de roca a varias decenas de kilómetros de altura. Las erupciones plinianas se destacan por la elevada cantidad de cenizas y piroclástos, las columnas de cenizas se caracterizan por semejarse a gigantescas coliflores que se elevan miles de metros desde el cráter. Las erupciones plinianas son catastróficas y muy destructivas. Su peligrosidad se debe al carácter explosivo y al gran volumen de material arrojado a la atmósfera en unas pocas horas.

**FIGURA 11.** Erupción Pliniana del Monte Vesubio.



- **PELEANO.** Las erupciones de tipo Peleano, son lavas muy viscosas, casi sólidas, que unas veces forman domos o cúpulas, otras veces forman agujas o penachos, compuestos por lavas muy viscosas y ácidas, que se originan en el foco del volcán. La lava es extremadamente viscosa y se consolida con gran rapidez, llegando a tapar por completo el cráter; la enorme presión de los gases, sin salida, provoca una enorme explosión que levanta este tapón que se eleva formando una gran aguja. La erupción va acompañada de fuertes explosiones y la lava se abre paso a través de grietas laterales. Los volcanes de este tipo son realmente peligrosos, expulsan gran cantidad de material piroclástico que de por sí es mortal debido a sus altas temperaturas y

velocidades. Al contacto con glaciares o lagunas cratericas estos forman mortales lahares que recorren las quebradas arrasando todo a su paso.

**FIGURA 12.** Erupción del Monte Santa Helena, Estados Unidos.



- **MAAR.** Los volcanes de tipo maar se encuentran en aguas someras, o presentan un lago en el interior del cráter, o en ocasiones forman atolones. Se forman debido al contacto del magma con depósitos acuíferos grandes los cuales se mezclan y crean erupciones consistentes en lodo a altas temperaturas, gases y nubes de vapor, frecuentemente estos volcanes emiten nubes de gases tóxicos que pueden ser mortales. Sus explosiones son extraordinariamente violentas ya que a la energía propia del volcán se le suma la expansión del vapor de agua súbitamente calentado; son explosiones freáticas. Normalmente no presentan emisiones lávicas ni extrusiones de rocas.

**FIGURA 13.** Volcán Irazu, tipo Maar.



- **ERUPCIONES SUBMARINAS.** En el fondo oceánico se producen erupciones volcánicas cuyas lavas, si llegan a la superficie, pueden formar islas volcánicas. Las erupciones submarinas son más frecuentes que las de los volcanes que emiten en las tierras emergentes. Éstas suelen ser de corta duración en la mayoría de los casos, debido al equilibrio isostático de las lavas al enfriarse, entrando en contacto con el agua, y por la erosión marina.

**FIGURA 14.** Erupción Marina



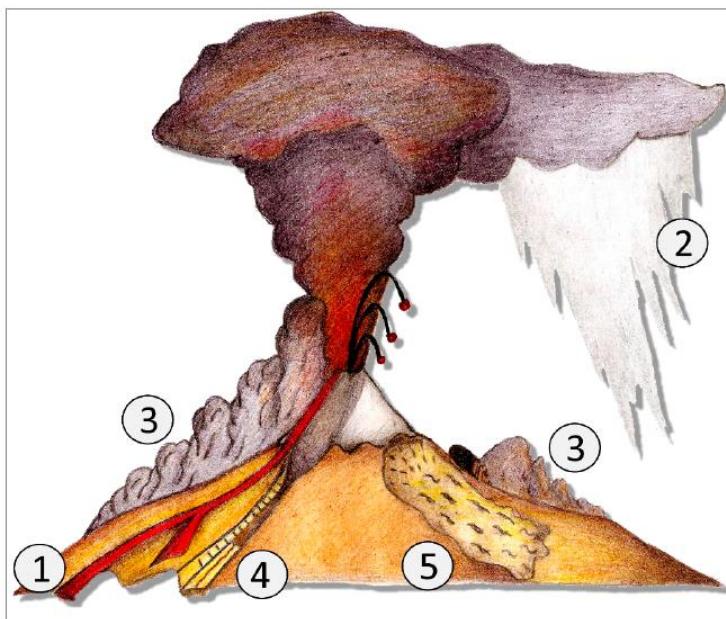
- **ERUPCIÓN ISLÁNDICA O FISURAL.** A pesar de que las erupciones volcánicas están relacionadas con estructuras en forma de cono, la mayor parte del material volcánico es extruido por fracturas en la corteza denominadas fisuras. Estas fisuras permiten la salida de lavas de baja viscosidad que recubren grandes áreas y se originan a lo largo de una dislocación de la corteza terrestre, que puede tener varios kilómetros. A lo largo de las dorsales oceánicas, donde la expansión del suelo oceánico es activa, las erupciones fisúrales generan nuevo suelo oceánico. Islandia está ubicada encima de la dorsal centro atlántica y ha experimentado numerosas erupciones fisúrales.

## 2.5. PELIGROS VOLCÁNICOS.

El proceso de salida del magma al exterior se denomina erupción volcánica. Durante una erupción pueden tener lugar procesos muy distintos, dependiendo de las características del

magma y las del propio proceso de salida a la superficie. En general se distinguen siete peligros volcánicos principales: coladas de lava (1), caída de cenizas (2), flujos piroclásticos (3), emanaciones de gases, lahares (4), deslizamientos de ladera (5) y tsunamis.

**FIGURA 15.** Erupción de un volcán, indicando los productos del mismo que representan un peligro



- **Coladas de lava.** Si el magma es emitido a la superficie como un líquido, la erupción se denomina efusiva y su principal peligro volcánico asociado son las coladas de lava. El camino que seguirá una colada de lava y su velocidad dependen fundamentalmente de la topografía, de las propiedades físicas de la lava (especialmente de la viscosidad) y del ritmo de emisión. En general las lavas muy fluidas tienden a ocupar grandes extensiones con poco espesor mientras que las lavas más viscosas son de mayor altura y recorren distancias menores. Al irse enfriando la colada, su viscosidad aumenta rápidamente y su velocidad disminuye. Lejos del centro de emisión, la velocidad típica de las lavas es de pocos metros por hora. Si el magma es muy viscoso y es emitido lentamente, no es capaz de formar coladas de lava y se acumula alrededor del centro de emisión formando un domo.
- **Caída de cenizas.** Durante una erupción explosiva se emiten a la atmósfera una mezcla de gases y piroclastos de muy diversos tamaños. Los fragmentos más grandes siguen trayectorias balísticas desde el centro de emisión, denominándose bombas

volcánicas. Generalmente su alcance se limita a unos pocos kilómetros del centro de emisión. El resto de las partículas son arrastradas hacia arriba por los gases volcánicos generando una pluma volcánica. Si esta columna posee suficiente capacidad ascensional, se genera una columna convectiva, que puede alcanzar alturas de varias decenas de kilómetros. Cuando la densidad de la mezcla de gases y partículas es igual a la de la atmósfera circundante, la columna detiene su ascenso y las cenizas empiezan a caer hacia la superficie terrestre. Durante su caída son transportadas por los vientos y dispersadas por la turbulencia atmosférica. Las cenizas de caída pueden cubrir áreas enormes, de miles de kilómetros cuadrados, generando depósitos de espesores desde centímetros hasta metros, dependiendo de la distancia al centro de emisión.

- **Flujos piroclásticos.** Si la pluma generada por una erupción explosiva no tiene la energía suficiente o la densidad adecuada (menor que la de la atmósfera circundante) para poder desarrollarse o mantenerse como una columna convectiva se produce un colapso. El resultado de este colapso son flujos densos de una mezcla de gases y partículas sólidas a muy alta temperatura (hasta unos 700°C) que se desplazan a grandes velocidades (hasta unos 550 km/h) denominados **coladas piroclásticas**. Cuando estos flujos son más diluidos (por ejemplo, los originados por un derrumbe de domo) presentan un movimiento más turbulento y se denominan oleadas piroclásticas. El conjunto de flujos que incluye coladas y **oleadas piroclásticas** junto con casos intermedios se denomina **flujo piroclástico**.
- **Emanaciones gaseosas.** Los gases que inicialmente se encuentran disueltos en el magma, se separan de éste al originar una erupción explosiva, siendo inyectados en la atmósfera a altas temperaturas y velocidades. Además de ser emitidos de forma violenta durante una erupción, los gases pueden escaparse por pequeñas fracturas o fisuras del edificio volcánico y alrededores de forma más o menos continua, dando lugar a lo que se denomina como fumarolas. Algunos gases como el dióxido de carbono pueden escapar por difusión a través del suelo en extensas áreas alrededor del edificio y generar una nube que se mueve a la altura de unos pocos centímetros del suelo, de acuerdo con la topografía, hasta que se diluyen en la atmósfera.
- **Lahares.** Los lahares o flujos de lodos son avalanchas de material volcánico no consolidado, especialmente cenizas, movilizadas por agua. Su comportamiento es

similar a las riadas, canalizándose por los barrancos e incorporando rocas, troncos, etc., lo que aumenta su poder destructivo. El agua necesaria para producir esta movilización puede provenir de intensas lluvias, de la fusión de glaciares o nieve de la cima del volcán debida a una erupción o de desbordamiento de lagos craterícos. Los lahares pueden producirse sin erupción.

- **Deslizamientos de ladera.** Muchos edificios volcánicos están formados por la acumulación de los materiales de sucesivas erupciones sin cohesión entre ellos. La superposición de materiales duros y blandos da lugar a una estructura que, en algunos casos, puede resultar inestable y producir el colapso de una parte del edificio. Las capas de materiales blandos y el agua pueden facilitar el movimiento del conjunto. Asimismo, la intrusión de un gran volumen de magma en el edificio volcánico puede desestabilizarlo y producir el deslizamiento de una de sus laderas. El deslizamiento de una ladera volcánica puede disparar una erupción u ocurrir como consecuencia de ella.
- **Tsunamis.** Los tsunamis (del japonés TSU: puerto o bahía, NAMI: ola) pueden ser un peligro secundario generado por otro peligro volcánico, bien por un deslizamiento de ladera de un gran edificio volcánico, por grandes flujos piroclásticos masivos que entran en contacto con una masa de agua, generalmente el mar o por una erupción submarina. Pueden alcanzar alturas de varios metros y penetrar distancias de decenas de metros desde la orilla del mar o del lago.

### **3. TELEDETECCIÓN O PERCEPCIÓN REMOTA.**

La Teledetección se define como una disciplina fundamentada en principios físicos - ópticos que tiene como finalidad la medición de magnitudes de la energía electromagnética de objetos o superficies, a fines de obtener información de éstos sin tener contacto con los mismos.

*“Es la adquisición de información sobre un objeto a distancia, esto es, sin que exista contacto material entre el objeto o sistema observado y el observador<sup>1</sup>. ”*

---

<sup>1</sup> Sobrino, J., (2001), Teledetección, Ed. Universitat de Valencia, Valencia – España, p. 15.

Una vez obtenida la información por intermedio de Sensores montados en plataformas, la porción de energía electromagnética es digitalizada y convertida en imágenes. La Teledetección comprende el tratamiento de esa información mediante técnicas desarrolladas para la obtención de productos que podrán ser analizadas de acuerdo a las distintas perspectivas de aplicación en lo particular. El avance de la tecnología aeroespacial ha brindado una apertura hacia el conocimiento en todas las áreas de las ciencias de la tierra debido a las grandes posibilidades y ventajas que presenta la utilización de las distintas imágenes hoy disponibles en el mercado. Debido a ello, podemos llegar a acordar que los datos suministrados por esta disciplina, resultan ser una fuente indispensable de información primaria para la evaluación de las cubiertas terrestres. No obstante, para una aplicación productiva de los datos provenientes de los Sensores Remotos se requiere de técnicas específicas de tratamiento digital, correcciones de modelos terrestres y atmosféricos que permitan la generación de productos.

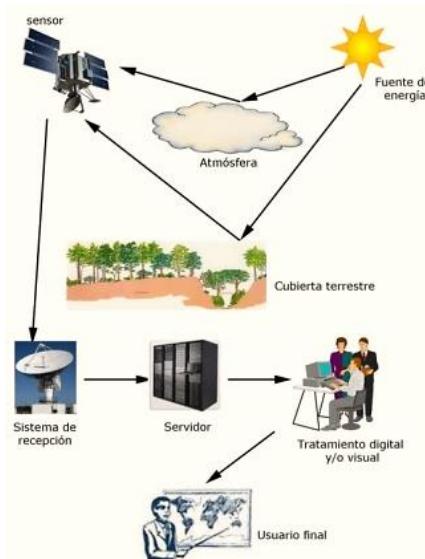
#### **4. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE TELEDETECCIÓN.**

Se ha definido la teledetección espacial como aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, estamos suponiendo que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, ya por emisión propia. A su vez, es preciso que ese haz energético recibido por el sensor se transmita a la superficie terrestre, donde la señal detectada pueda almacenarse y, en última instancia, sea interpretada para una determinada aplicación. En definitiva, un sistema de teledetección espacial, incluye los siguientes elementos:

- 4.1. FUENTE DE ENERGÍA.** Donde se da el origen del flujo energético detectado por el sensor. Puede tratarse de un foco externo al sensor, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por este (teledetección activa). La fuente de energía más importante obviamente es la energía solar
- 4.2. CUBIERTA TERRESTRE.** Formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente de una fuente de energía (sol, sensor remoto), ya la reflejan o emiten de acuerdo a sus características.

- 4.3. **SISTEMA SENSOR.** Compuesto por el sensor, propiamente dicho, y la plataforma que lo sustenta. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.
- 4.4. **SISTEMA DE RECEPCIÓN.** En donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado, y, tras las oportunas correcciones, se distribuye a los intérpretes.
- 4.5. **INTERPRETACIÓN.** Donde se analiza la información, normalmente en forma de imágenes analógicas o digitales, convirtiéndola en una clave temática o cuantitativa, orientada a facilitar la evaluación del problema en estudio.
- 4.6. **USUARIO FINAL.** Encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.

**FIGURA 16.** Componentes de un Sistema de Teledetección



## 5. PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA TELEDETECCIÓN.

### 5.1. FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA.

Teledetección es la técnica que permite obtener información a distancia de objetos sin que exista un contacto material, en nuestro caso se trata de objetos situados sobre la superficie terrestre. Para que esta observación sea posible es necesario que, aunque sin contacto material, exista algún tipo de interacción entre los objetos y el sensor. En este caso la

interacción va a ser un flujo de radiación que parte de los objetos y se dirige hacia el sensor.

Este flujo puede ser, en cuanto a su origen, de tres tipos:

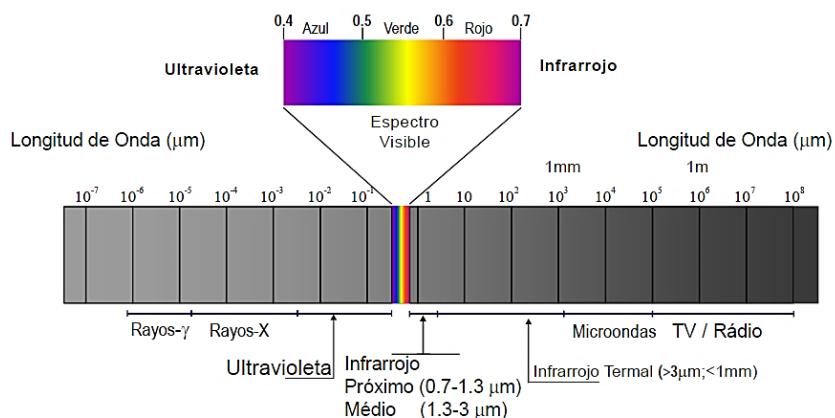
- Radiación solar por reflexión de los objetos (luz visible e infrarrojo reflejado)
- Radiación terrestre por emisión de los objetos (infrarrojo térmico)
- Radiación por emisión – reflexión, emitida por el sensor y reflejada por los objetos (radar)

La primera de ellas es la forma más importante de teledetección, pues se deriva directamente de la luz solar, principal fuente de energía de nuestro planeta. El sol ilumina la superficie terrestre, que refleja esa energía en función del tipo de cubierta presente sobre ella. Ese flujo reflejado se recoge por el sensor, que lo transmite posteriormente a las estaciones receptoras. Entre superficie y sensor se interpone la atmósfera, que dispersa y absorbe parte de la señal original. De igual forma, la observación remota puede basarse en la energía emitida por las propias cubiertas, o en la que podríamos enviar desde un sensor que fuera capaz, tanto de generar su propio flujo energético, como de recoger posteriormente su reflexión sobre la superficie terrestre. En cualquiera de estos casos, el flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electro - magnética.

## 5.2. EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.

El espectro electromagnético es la distribución de radiación electromagnética según la energía radiante. Las regiones del espectro electromagnético se definen según: longitud de onda, frecuencia y energía. Estas regiones antes nombradas se las denomina bandas, las cuales tiene sus propias frecuencias medidas en Hertz y longitudes de ondas que van desde los micrómetros hasta los kilómetros.

**FIGURA 17.** Espectro Electromagnético.



Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual, la terminología más común es la siguiente:

- **Espectro Visible (0,4 a 0,7  $\mu m$ )**. Se denomina así por tratarse de la única radiación electro – magnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul (0,4 a 0,5  $\mu m$ ); verde (0,5 a 0,6  $\mu m$ ); y rojo (0,6 a 0,7  $\mu m$ ), en razón de los colores elementales asociados a esas longitudes de onda.
- **Infrarrojo próximo (0,7 a 1,3  $\mu m$ )**; a veces se denomina también infrarrojo reflejado y fotográfico, puesto que puede detectarse a partir de films dotados de emulsiones especiales. Resulta de especial importancia para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- **Infrarrojo medio (1,3 a 8  $\mu m$ )**, en donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.
- **Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14  $\mu m$ )**, que incluye la porción emisiva del espectro terrestre.
- **Micro-ondas (a partir de 1 mm)**, con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

A continuación, se muestra un esquema del espectro electromagnético que representa las características de cada región espectral.

**TABLA 1.** Características de la Región Espectral.

REGIÓN ESPECTRAL	LONGITUD DE ONDA ( $\lambda$ )	CARACTERÍSTICAS
Rayos Gamma	< 0,03 nm	Radiación completamente absorbida por las capas superiores de la atmósfera, no se usa en teledetección
Rayos X	0,03–30 nm	Radiación completamente absorbida por la atmósfera, no se usa en teledetección
Rayos Ultravioleta	0,03–0,4 $\mu m$	La radiación con $\lambda < 0,3 \mu m$ es completamente absorbida por la capa de ozono

Espectro Visible (rojo, verde, azul)	$0,4\text{--}0,7 \mu\text{m}$	Se puede detectar a través de foto detectores y películas fotosensibles normales (color y B/N)
Infrarrojo Próximo	$0,7\text{--}1,3 \mu\text{m}$	Discrimina masas vegetales y concentraciones de humedad
Infrarrojo Medio	$1,3\text{--}8 \mu\text{m}$	Estima el contenido de humedad en la vegetación y detección de focos de alta temperatura
Infrarrojo Térmico	$8\text{--}14 \mu\text{m}$	Detecta el calor proveniente de la mayor parte de la cubierta terrestre
Micro – ondas	$0,1\text{--}100 \text{ cm}$	Radiación de grandes longitudes de onda, capaces de penetrar nubes, nieblas y lluvia
Ondas de radio	$> 100 \text{ cm}$	Radiación con las mayores longitudes de onda del espectro

### 5.3. INTERACCIÓN ATMOSFERA – RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

La radiación es el proceso en el cual se transmite la energía proveniente de una fuente natural (el sol) y viaja a través de un material o a través del espacio. La luz, el calor y el sonido son tipos de radiación. La trasferencia de radiación es fundamental para sensores remotos. Ese traslado de energía hacia a dentro y fuera del sistema (tierra – atmósfera – océano) con una variación muy amplia, es lo que permite el estudio y análisis de las propiedades de los materiales afectados.

La atmósfera es el medio dentro del cual la radiación electromagnética viaja desde el sol hacia el sensor. Las imágenes desde el espacio son el resultado de la luz del sol que atraviesa la atmósfera de la tierra dos veces; es decir incide sobre la superficie y es recibida por el receptor luego de haber atravesado nuevamente la atmósfera. Por otra parte, un sensor térmico aerotransportado, detecta energía emitida directamente de los objetos de la superficie de la tierra, y por consiguiente esta radiación tiene un recorrido más corto pues atraviesa la atmósfera una sola vez. El efecto neto de la atmósfera sobre la energía transmitida varía con estas diferencias de recorrido, como así también con la intensidad de la señal emitida, con la longitud de onda y con las condiciones atmosféricas al momento de la observación.

Como es sabido, la atmósfera se compone de gases – anhídrido carbónico, oxígeno, ozono, nitrógeno y argón, principalmente – vapor de agua y aerosoles. Entre estos componentes, el anhídrido carbónico, ozono y vapor de agua son los principales responsables de la interacción con la energía electro – magnética.

Su efecto es triple:

- Absorción de la energía en determinadas bandas del espectro, lo que limita la observación espacial a aquellas bandas en donde esta absorción es menos intensa o nula.
- Dispersión, de determinados flujos, en función de su longitud de onda.
- Emisión, como todo cuerpo caliente, que tiene su mayor importancia en el infrarrojo térmico.

Estos procesos introducen modificaciones, en ocasiones muy severas, en la radiación originalmente propagada entre la cubierta y el sensor

**5.3.1. ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA.** La absorción es el proceso por el cual la energía radiante incidente en la atmósfera es retenida por una sustancia. En este caso la sustancia es la atmósfera. Cuando la atmósfera absorbe la energía, el resultado es una transformación irreversible de esa radiación en otra forma de energía. Esta energía se transforma según la naturaleza del medio o elemento que está siendo absorbido. El medio (atmósfera) absorberá solo una porción de la energía total, mientras que el resto se reflejará, se refractará o se esparcirá. Los principales causantes de esta absorción son:

- Oxígeno ( $O_2$ ), que filtra las radiaciones ultravioletas por debajo de 0,1 um, así como pequeños sectores del infrarrojo térmico y las micro – ondas
- Ozono ( $O_3$ ), que elimina la energía ultravioleta, rayos X y rayos GAMMA inferior a 0,3 um, así como un sector de las micro – ondas (en torno a 27 mm)
- Vapor de agua, con una fuerte absorción en torno a 6 um y otras menores entre 0,6 y 2 um.
- Anhídrido carbónico ( $CO_2$ ), que absorbe en el infrarrojo térmico (15 um), con importantes efectos en el infrarrojo medio, entre 2,5 y 4,5 um.

Como consecuencia de esta absorción, la observación espacial se reduce a determinadas bandas del espectro, conocidas como ventanas atmosféricas, en donde la transmisividad de la atmósfera es suficientemente alta. Las principales ventanas atmosféricas son:

- Espectro visible e infrarrojo cercano, situada entre 0,3 y 1,35 um.

- Varias en el infrarrojo medio: de 1,5 a 1,8 um, 2 a 2,4 um; 2,9 a 4,2 um y 4,5 a 5,5 um
- Infrarrojo térmico, entre 8 y 14 um
- Micro – ondas, por encima de 20 mm, en donde la atmósfera es prácticamente transparente.

Estas ventanas atmosféricas son idóneas para realizar procesos de teledetección, por lo cual el diseño de los sensores espaciales tiende a ajustarse a estas bandas, evitando interferencias extrañas al fenómeno que pretende observarse.

**5.3.2. DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA.** Es la difusión impredecible de la radiación por gases y partículas atmosféricas en suspensión. La dirección de la energía es modificada sin previsión y en forma caótica, en función de las partículas atmosféricas. Existen tres tipos básicos de dispersión:

- Rayleigh, cuando afecta a longitudes de onda mayores al diámetro de la partícula.
- Mie, cuando se trata de partículas de diámetro similar a longitud de onda.
- No selectivo, cuando se mencionan las partículas de mayor tamaño que la longitud de onda.
- **Dispersión Rayleigh.** Es el más común, afecta a las longitudes de onda más cortas, es la de mayor influencia en teledetección, causante, por ejemplo, del color azul del cielo. Afecta a las longitudes de onda inferiores al diámetro de la partícula.
- **Dispersión Mie.** La longitud de onda de la radiación y el tamaño de las partículas de la atmósfera son de igual diámetro. Ejemplo vapor de agua y partículas de polvo que son los principales responsables de este tipo de dispersión. La dispersión Mie tiene mayor influencia hacia las longitudes de onda más largas, los atardeceres rojos son un ejemplo.
- **Dispersión No Selectiva.** Afecta por igual a diversas longitudes de onda. Ocurre cuando las partículas atmosféricas productoras de la dispersión (vapor de agua y polvo) son más grandes que la longitud de onda de la energía que actúa recíprocamente con el medio. En consecuencia, las nubes o nieblas tienden a aparecer blancas, ya que dispersan por igual toda la luz visible.

**5.3.3. EMISIÓN ATMOSFÉRICA.** El efecto de emisión atmosférica resulta fundamental en el trabajo dentro del infrarrojo térmico, si se pretende obtener mediciones de temperatura a partir de las imágenes satelitales. Al igual que cualquier cuerpo por encima del cero absoluto, la propia atmósfera emite su propia energía calorífica, por lo que ese parámetro debe considerarse para estimar la emitancia espectral originalmente proveniente de la superficie terrestre.

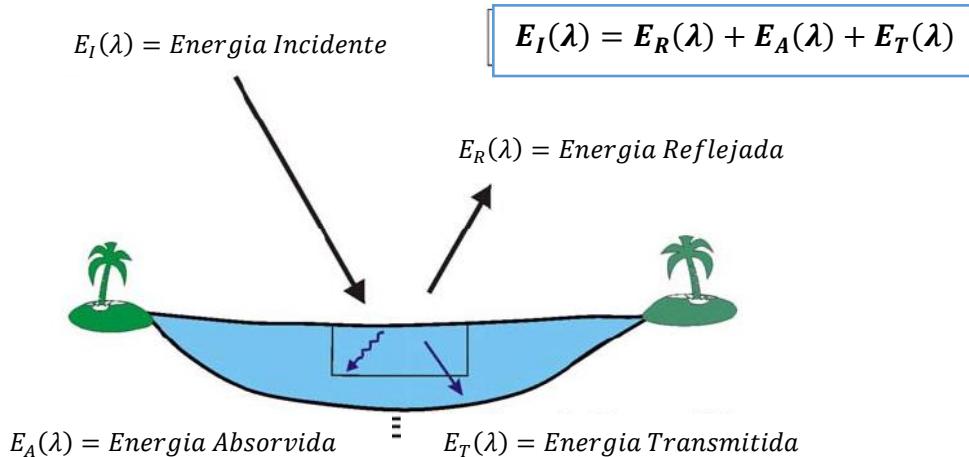
#### 5.4. INTERACCIÓN RADIACIÓN - SUPERFICIE DE LA TIERRA.

Cuando la energía electro – magnética incide sobre la superficie de la tierra, puede interactuar de las siguientes tres formas: reflejada, absorbida y/o transmitida, siendo:

- $E_i(\lambda)$  (a) energía incidente
- $E_r(\lambda)$  (a) energía reflejada
- $E_a(\lambda)$  (a) energía absorbida
- $E_t(\lambda)$  (a) energía transmitida

Todas estas componentes son función de la longitud de onda. Se debe notar que la proporción de energía reflejada, absorbida y transmitida varía para distintos materiales o elementos del terreno, dependiendo del tipo de material y de su condición. Estas diferencias permiten distinguir diferentes rasgos y/o elementos en una imagen. Por otra parte, dependiendo de la longitud de onda, y aun dentro de un mismo elemento o material, la proporción de energía reflejada, absorbida y transmitida variará con las distintas longitudes de onda.

**FIGURA 18.** Interacciones básicas entre la energía electro – magnética y la superficie de la tierra.



Así, dentro de la porción del espectro visible, estas variaciones con la longitud de onda dan por resultado el color. Por ejemplo, decimos que un objeto es azul o verde cuando reflejan mucho en la porción azul o verde del espectro. Así, un objeto azul reflejará mucho en la parte azul del espectro.

En este sentido cualquier objeto emite y refleja una radiación electro – magnética en respuesta a su interacción con las fuentes propias y externas. ***Por lo tanto, cada objeto posee una respuesta, “firma o signaturapectral”, que es propia de cada material y dependerá de su energía reflejada o emitida.***<sup>2</sup> Cada firma o respuesta spectral de los materiales, dependerá de su estructura atómica y molecular y del tipo de superficie y de su temperatura. Muchos sistemas de sensores remotos operan en las regiones de longitud de onda donde predominan la energía reflejada.

**5.4.1. REFLEXIÓN.** La reflexión es el proceso por el cual “una porción de energía radiante incidente sobre una superficie gira hacia atrás”. Una tercera parte de la energía del sol se refleja. Sin la reflexión, habría una porción grande del mundo alrededor nuestro que no veríamos. Si un objeto no emite su propia luz, no se vería. La forma en que los objetos reflejan la energía es función de las características de la superficie del objeto. La reflexión puede ser especular o difusa.

- **Reflexión especular.** Se da en superficies planas y donde los ángulos de incidencia y reflexión son iguales.
- **Reflexión difusa (lambertian).** Se da en superficie áspera que refleja uniformemente en todas las direcciones.

**FIGURA 19. a)** Reflexión especular; **b)** reflexión difusa



<sup>2</sup> Perez, D., (2007), Introducción a los Sensores Remotos - Aplicaciones en Geología, Ed. Dpto. Cs. Geológicas, UBA, Buenos Aires - Argentina, p. 14.

La mayoría de las superficies de la tierra no tienen reflexión especular o difusa, variando entre los dos extremos según el tipo de superficie y longitud de onda de la energía incidente. Cuando la longitud de onda de la energía incidente es más pequeña que las variaciones de altura de la superficie o el tamaño de la partícula de una superficie, la reflexión es difusa (FIGURA 4, b). Las reflexiones difusas contienen la informaciónpectral sobre el color de la superficie reflejada, por lo que es importante poder medir. Las reflexiones de una superficie pueden ser cuantificadas midiendo la energía incidente que se refleja, en función de la longitud de onda y es llamado espectro de reflexión.

El conocimiento de las propiedades espetrales de los materiales en las distintas regiones del espectro electro – magnético es muy importante para la elección de las bandas espetrales en las que el material puede ser reconocido por la información del registro de los sensores.

Esto tiene mucha importancia en diferentes aplicaciones (minería, petróleo y gas, geología ambiental, etc) ya que cada material tendrá una curva espectral única y característica por lo cual podrá ser identificado en base a esa respuesta espectral.

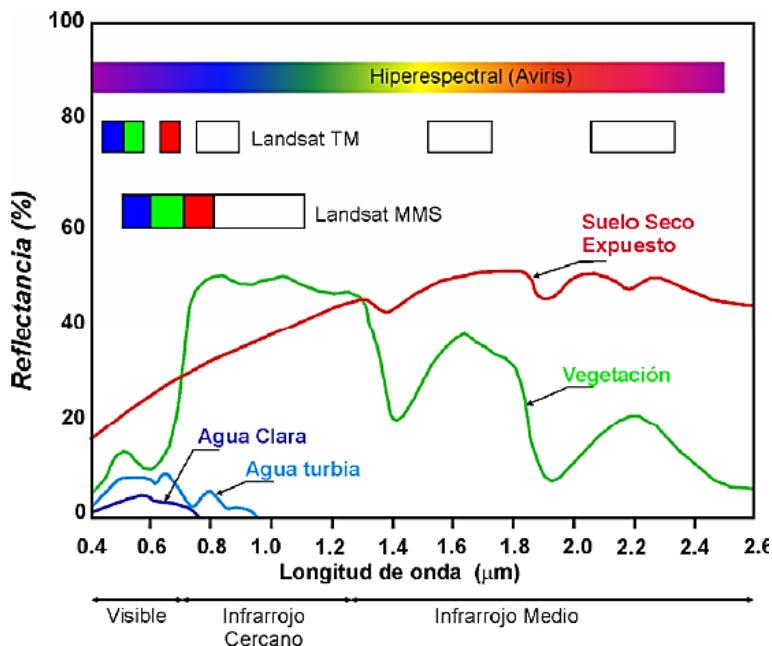
**5.4.2. FIRMA ESPECTRAL.** Cada objeto refleja la luz visible según una combinación característica de radiaciones de distintas longitudes de onda. A esta combinación en el espectro visible la llamamos "color", en realidad a esta combinación la deberíamos llamar como "firma espectral". Diferentes tipos de superficies, como el agua, la tierra desnuda o la vegetación, reflejan la radiación de manera distinta en varios canales. La radiación reflejada en función de la longitud de onda se llama firma espectral de la superficie.

## **5.5. INTERACCIÓN RADIACIÓN - MATERIALES.**

La superficie de la tierra está cubierta en su mayor parte por suelos, rocas, agua y vegetación. El conocimiento de sus propiedades espetrales es muy importante para la elección de las bandas en el espectro electro – magnético para su estudio mediante sensores remotos. El significado de los diferentes rangos de longitud de onda depende de la interacción entre la radiación electro – magnética y los materiales.

La figura 5, muestra como reflejan la energía en el espectro visible e infrarrojo, los tres materiales dominantes de la superficie terrestre: suelo, vegetación y agua. Cada una de estas curvas es característica del material o elemento indicado y representa su firma espectral.

**FIGURA 20.** Curvas espetrales características de diferentes materiales.



**5.5.1. INTERACCIÓN RADIACIÓN - ROCAS Y MINERALES.** Los rasgos que caracterizan las respuestas espetrales de los minerales y/o rocas dependen de procesos electrónicos y transiciones vibracionales, que ocurren en la estructura atómica y molecular de los mismos. Las diferencias en las longitudes de onda, entre estos pueden servir para discriminar materiales con distinta composición mineralógica. Se considera los efectos de las rocas y minerales en los tres mayores rangos de las longitudes de onda de la radiación electro – magnética, 0,4 a 2,5  $\mu m$  [visible, 0,4 a 0,7  $\mu m$ ; very near-infrared (VNIR) o infrarrojo cercano, 0,7 a 1300  $\mu m$ ; short-wave infrared (SWIR) o infrarrojo medio, 1,3 a 3,0  $\mu m$ ]; 8 – 14  $\mu m$  termal MIR; y las microondas (1 mm – 30 cm)

Los procesos electrónicos dentro de un átomo, están asociados a intercambios de energía; por lo que pueden ocupar órbitas específicas con determinados niveles de energía. Los componentes más comunes de las rocas y minerales son oxígeno, silicio y aluminio; con variables proporciones de hierro, magnesio, calcio, sodio y potasio; y una pequeña cantidad de otros elementos.

El oxígeno, silicio y aluminio tiene poco o nada de efecto en los espectros del visible al infrarrojo cercano. Sin embargo, ellos existen como iones con diferentes valencias, pudiendo tener un proceso de transferencia de carga con los metales de transición del hierro como, cobre, níquel, cromo, cobalto, magnesio, vanadio, titanio y escandio. El fenómeno más común de carga de transferencia en la migración de electrones desde el hierro al oxígeno, y el resuelto es una banda de absorción ancha de longitud de onda más corto que  $0,55 \mu m$ . El  $Fe^{+2}$  a  $Fe^{+3}$ , produce absorciones a  $0,48$  y  $0,92 \mu m$ .

En resumen, en las regiones del visible y parte del infrarrojo próximo (hasta  $1 \mu m$ ), en el espectro de los minerales que tiene hierro en su composición, aparecen anchas bandas de absorción como resultado de determinadas transiciones electrónicas producidas en los cationes metálicos.

Estos rasgos de los mencionados metales de transición, han sido la base para la detección de materiales limoníticos a partir de datos LANDSAT del Thematic Mapper.

En la región del visible ( $0,4$  a  $0,7 \mu m$ ) al infrarrojo próximo SWIR ( $0,7$  a  $2,5 \mu m$ ), aparecen minerales con espectros de absorción característicos. En este caso las transiciones de vibración están asociadas a la presencia del ion hidroxilo  $OH^-$  y/o moléculas de agua. esta última produce una fuerte absorción a los  $1,4$  y  $1,9 \mu m$ . El ion hidroxilo  $OH^-$  muy frecuente en los silicatos absorbe a los  $2,77 \mu m$ . Las variaciones según la localización y el átomo al que está unido, produce que el  $AlOH$  absorbe a los  $2,2 \mu m$  y el  $MgOH$  a  $2,3 \mu m$ . Estos rasgos son prominentes en minerales como las micas, arcillas y anfíboles y exhiben en esta región un espectro característico. Similares características presentan los carbonatos, con bandas de absorción dentro del SWIR entre los  $1,9$  y  $2,35 \mu m$ , siendo el rasgo más indicativo el que se produce entre  $2,31$  y  $2,34 \mu m$ .

En el infrarrojo termal, región del espectro  $8$  a  $14 \mu m$ , los procesos vibracionales actúan en las estructuras moleculares de los silicatos, dando la configuración del espectro y permitiendo diferenciar las rocas silicatadas. El cuarzo presenta un mínimo de Emisividad a  $8,5 \mu m$ , mientras que la olivina a  $10 \mu m$ . En esta banda

(8 a 14  $\mu\text{m}$ ) es máximo el flujo térmico que emite la superficie terrestre, lo que permite diferenciar ciertos materiales. Los datos obtenidos en estas bandas son muy útiles en estudios geotérmicos, monitoreo de volcanes, salidas de acuíferos al mar y detección de contaminantes.

A 1,6 um, las rocas presentan una reflectividad muy alta, en particular las rocas alteradas que contiene materiales arcillosos muestran un máximo de reflectividad. Este tipo de información espectral, por medio de las bandas LANDSAT, Thematic Mapper, permite detectar rocas alteradas no limoníticas asociadas a procesos de alteración hidrotermal. Entre 3 y 5 um, se producen gran cantidad de rasgos espectrales debido a las variaciones que se dan en sulfatos y carbonatos. Sin embargo, las absorciones atmosféricas debidas a CO<sub>2</sub> y al vapor de agua, junto a las dificultades técnicas de registro de la radiación en estas longitudes de onda, son la causa de que por ahora no se utilicen estos espectros en sensores remotos.

Por encima de los 15 um, también se tienen las bandas de absorción de vibración de silicatos, sin embargo, en esa región la atmósfera es opaca a las radiaciones, inutilizándola para las observaciones terrestres.

## 6. SISTEMAS ESPACIALES DE TELEDETECCIÓN

### 6.1. TIPOS DE SISTEMAS.

Entre las variadas formas de clasificar sensores remotos, una de las más habituales considera su procedimiento de recibir la energía procedente de las distintas cubiertas. En este sentido, se habla de dos tipos de sensores, PASIVOS, cuando se limitan a recibir la energía proveniente de un foco exterior a ellos y ACTIVOS, cuando son capaces de emitir su propio haz de energía.

**6.1.1. SENSORES PASIVOS.** Los sensores pasivos se limitan a recoger la energía electro – magnética procedente de las cubiertas terrestres, ya sea está reflejada de los rayos solares, ya en virtud de su propia temperatura.

**6.1.2. SENSORES ACTIVOS.** La característica común de los sistemas activos es su capacidad de emitir un haz energético que, posteriormente, recogen tras su reflexión sobre la superficie que se pretende observar.

## **6.2. RESOLUCIÓN DE UN SISTEMA SENSOR.**

De acuerdo con algunos autores, se puede definir como:

*“La resolución de un sistema sensor, es su habilidad para registrar, discriminándola, información de detalle.<sup>3</sup>”*

Que depende del efecto combinado de todos los componentes físicos del sistema.

**6.2.1. RESOLUCIÓN ESPACIAL.** Este concepto designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. Este objeto se visualiza en la unidad mínima de información representada en la imagen, al que se denomina pixel (pixel: es un elemento de una imagen de dos dimensiones, el cual es más pequeño e invisible de una imagen digital). Se mide en unidades de mm sobre la foto, o m sobre el terreno.

La resolución espacial tiene un papel protagonista en la interpretación de la imagen, por cuanto marca, de alguna forma, el nivel de detalle que está ofreciendo.

**6.2.2. RESOLUCIÓN ESPECTRAL.** Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. En este sentido, un sensor será tanto más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que facilita la caracterización espectral de las distintas cubiertas.

**6.2.3. RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA.** Hace mención a la sensibilidad del sensor, esto es, a su capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Al igual que en los otros tipos de resolución, cuanto mayor sea la precisión radiométrica, tanto mejor podría interpretarse la imagen. Se expresa en el número de bits de cada uno de los elementos contenidos en la imagen.

---

<sup>3</sup> Chuvieco, E., (1990), Fundamentos de Teledetección Espacial, Ed. RIALP S.A., Madrid, p. 90.

**6.2.4. RESOLUCIÓN TEMPORAL.** Este concepto alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor. En otras palabras, refiere a la periodicidad con la que esté adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales (altura, velocidad, inclinación), así como del diseño del sensor, principalmente del ángulo de observación y de abertura.

### **6.3. PLATAFORMAS DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL.**

La palabra satélite del latín, *satelles o satellitis*, se refiere a un cuerpo que gravita alrededor de un astro / estrella de masa preponderante (dominante), en particular alrededor de un planeta.

El concepto de satélite se utiliza para referirse a las plataformas que son puestas en órbita en forma artificial, alrededor de la tierra y en las cuales son colocados dispositivos o instrumentos, que son los llamados sensores. La trayectoria de un satélite en torno al astro, p. e. la tierra, es denominada órbita. En el caso de los satélites artificiales la órbita es definida en función de parámetros, como radio de inclinación, inclinación de plano de órbita y periodo de revolución. El número de revoluciones diarias significa cuantas veces el satélite gira en torno de la tierra en un día, y es importante ya que define la altitud a la que el satélite deberá ser colocado.

Las características de los proyectos más interesantes aplicadas en teledetección corresponden a los programas:

**6.3.1. PROGRAMA LANDSAT.** El proyecto LANDSAT corresponde a una serie de satélites construidos y puestos en órbita por EE. UU. desde el año de 1972; para la observación en alta resolución de la superficie y el monitoreo de los recursos terrestres.

La constelación LANDSAT está formada por 8 satélites, que ha constituido el proyecto más fructífero de teledetección espacial desarrollado hasta el momento. La buena resolución de sus sensores, el carácter global y periódico de la observación que realizan, proporciona información de alto valor científico.

Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7, 8 u 9 bandas espectrales, que fueron elegidas especialmente para el monitoreo de la vegetación, para aplicaciones geológicas y para el estudio de los recursos naturales. Estas bandas pueden combinarse produciendo una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones. El proyecto LANDSAT es operado por la NASA y las imágenes satelitales son comercializadas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) desde 1972.

**TABLA 2.** Constelación de Satélites LANDSAT

SATÉLITE	FECHA DE LANZAMIENTO	ACTIVIDAD
ERTS 1	23 / Julio /1972	Inactivo
LANDSAT 2	22 / Enero /1975	Inactivo
LANDSAT 3	05 / Marzo /1978	Inactivo
LANDSAT 4	16 / Junio /1982	Inactivo
LANDSAT 5	01 / Marzo /1984	Inactivo
LANDSAT 6	03 / Octubre /1993	Fallido
LANDSAT 7	15 / Abril /1999	Activo
LANDSAT 8	11 / Febrero /2013	Activo

El satélite LANDSAT-8, fue lanzado el 11 de febrero de 2013, es un satélite óptico de resolución media cuyo objetivo es proporcionar información para actividades relacionadas con la agricultura, geología, la ciencia y también en el ámbito estatal.<sup>4</sup>

Es un satélite más completo respecto a su antecesor, LANDSAT-7, con sus funciones mejoradas para monitorizar la calidad del agua y nubes atmosféricas altas.

Este satélite contiene dos sensores: el sensor Operacional de Imágenes de Tierra (OLI) y un sensor Infrarrojo Térmico (TIRS).

- **OLI** está formado por 9 bandas espectrales que van desde lo visible pasando por los infrarrojos hasta el espectro de radiación de bajas ondas. Con las imágenes de resolución espaciales, que oscilan entre los 15 y los 30 m (ver tabla 3), **LANDSAT-**

---

<sup>4</sup> Versión libre procedente de la página web. Geocento, 2015. Disponible en: <http://geocento.es/galeria-de-satelites-para-buscar-y-adquirir-imagenes/satelite-imagenes-landsat-8/>

**8** proporciona imágenes de satélite de calidad que podrían demostrar los diferentes usos que se le podría dar a la tierra desde el espacio.

- **TIRS** está compuesto por dos bandas espectrales, las cuales detectan infrarrojos térmicos, una herramienta imprescindible para medir la temperatura de la superficie de la Tierra.

#### 6.3.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL SATÉLITE LANDSAT-8.

- **ALTITUD DE ORBITA** 705 KM
- **ANCHO PASADA** 185 km
- **DISTANCIA DE MUESTREO** 15 – 30 km
- **LANZAMIENTO/VIDA UTIL** 2013 – 2018 (Hasta 2023)
- **TIEMPO REVISITA** 16 días
- **BANDAS ESPECTRALES:**

**TABLA 3.** Características espectrales del LANDSAT-8.

<b>BANDAS</b>	<b>LONGITUD DE ONDA (NM)</b>	<b>GSD (M)</b>
Coastal Aerosol	300	30
Azul	450 – 510	30
Verde	530 – 590	30
Rojo	640 – 670	30
Infrarrojos	850 – 880	30
SWIR 1	1570 – 1650	30
SWIR 2	2110 – 2290	30
Pancromática	500 – 680	15
Cirrus	1360 – 1380	30
Infrarrojos Térmicos 1	10600 - 11190	30
Infrarrojos Térmicos 2	11500 – 12510	30

## **7. BASES PARA LA INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES.**

Para realizar la interpretación de deslizamientos en las imágenes satelitales, se toma en cuenta diversos factores; los más importantes están enmarcados en los objetivos<sup>5</sup> del área de estudio y los medios disponibles para su realización (imágenes).

**7.1. SELECCIÓN DEL MATERIAL DE TRABAJO.** Se considera los siguientes elementos:

- 7.1.1. TIPO DE SENSOR.** En la identificación de riesgos geológicos, la plataforma satelital adecuada corresponde al programa LANDSAT, donde la información proporcionada ofrece mayor detalle en cuanto a la resoluciónpectral, temporal y espacial; parámetros que manifiestan con mayor claridad los fenómenos de interés.
- 7.1.2. FECHA DE ADQUISICIÓN.** Evidentemente la fecha más conveniente corresponderá a aquella más cercana a la actual. En trabajos referidos a geología, probablemente se requiera una fecha invernal, al ser mayor el efecto de sombras, y, por tanto, la detección de deslizamientos.
- 7.1.3. SOPORTE DE LAS IMÁGENES.** Corresponde a la composición total de bandas espectrales que posee cada escena, que a su vez es proporcionada por la plataforma satelital.

## **7.2. ESTRUCTURA DE LA IMAGEN SATELITAL.**

Las imágenes obtenidas a partir de los sensores remotos son una representación digital de los objetos terrestres.

Una imagen digital está compuesta por una grilla la cual está formada por celdas; esta estructura de grilla, también llamada *RASTER*, tiene un arreglo espacial según un sistema de coordenadas formado por líneas horizontales “*rows*” y columnas verticales “*samples*”. Cada una de estas celdas de la imagen raster, se denomina pixel “*picture element*”.

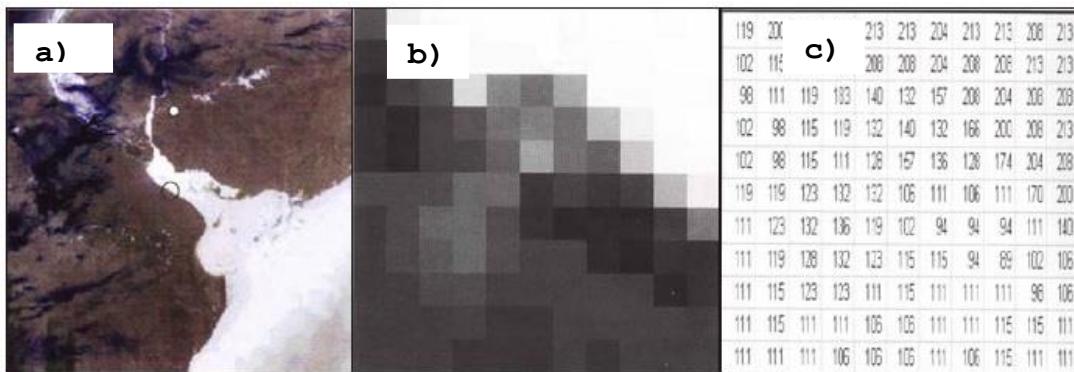
Cada celda o pixel, posee un atributo numérico “*z*”, el cual indica el nivel de gris de esa celda, y que varía dentro de toda la gama del blanco al negro, según la cantidad de niveles de

---

<sup>5</sup> Chuvieco, E., (1990), Fundamentos de Teledetección Espacial, Ed. RIALP S.A., Madrid, p. 131.

grises. Esos niveles de gris se conocen como DN “digital number” o **NÚMERO DIGITAL (DN)**, El DN de una celda o pixel, representa la intensidad de energía electromagnética de acuerdo a las longitudes de onda en las que está programado el sensor para captar, ya sea reflejada o emitida, medida por el sensor, en los diferentes materiales para un área de superficie terrestre.

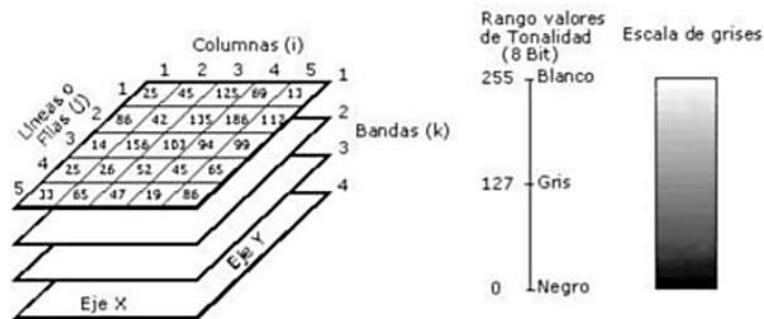
**FIGURA 21.** Carácter digital de la imagen, A) imagen digital de 344 filas por 328 columnas, B) sector ampliado de “a” de 11 x 11 pixeles, C) DN números digitales individuales de la radiancia promedio medida en cada pixel de “b”.



La posición de cada píxel en la imagen satelital está determinada por un eje de coordenadas XYZ.

- X: N° de la columna de la matriz
- Y: N° de la fila de la matriz
- Z: ND (valor de intensidad de escala de grises)

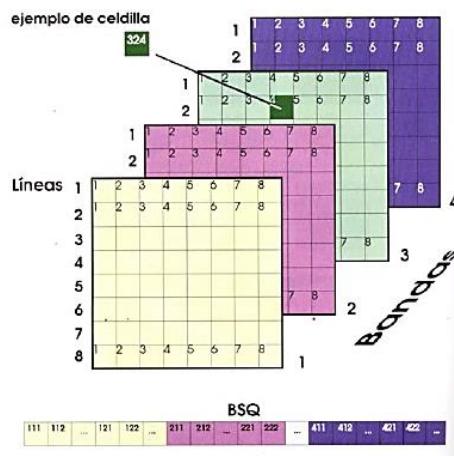
**FIGURA 22.** Componentes de una imagen digital.



## 7.2.1. FORMATO DE LAS IMÁGENES SATELITALES.

7.2.1.1. **BANDAS SECUENCIALES (BSQ).** Los números digitales de cada banda se disponen físicamente uno a continuación del otro hasta completar la banda. A continuación, se disponen los de la siguiente banda y así sucesivamente hasta completar la imagen multiespectral. Entre banda y banda se inserta un archivo cabezal o Header y uno de cola Trailer, que informa de la longitud de onda de la adquisición. Este formato es propio de las imágenes LANDSAT.

**FIGURA 23.** Formato digital de una imagen.



7.2.2. **RESOLUCIÓN DE UNA IMAGEN.** Este parámetro describe el número de pixeles que el usuario puede desplegar en un dispositivo (monitor), o el área que el pixel representa en la imagen en la superficie terrestre, se considera las resoluciones espacial o geométrica, spectral, radiométrica y temporal.

## **8. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

### **8.1. UBICACIÓN.**

El Volcán Ollague, geográficamente está ubicado hacia el suroeste de Bolivia, formando parte de la Cordillera Occidental, región caracterizada por los volcanes dispuestos de norte a sur, en cadena, a lo largo de la frontera Bolivia – Chile.

El área de estudio se halla delimitada por las siguientes coordenadas geográficas:

21° 15.550' Latitud Sur                    68° 15.255' Longitud Oeste

21° 22.536' Latitud Sur                    68° 7.507' Longitud Oeste

Políticamente pertenece al Municipio San Pedro de Quemes, Provincia Nor Lípez, hacia el suroeste del departamento de Potosí.

**8.2. CLIMA.** La región donde tiene un clima árido y frío en su totalidad, condiciones climáticas que se da en función a la altura, dando lugar a una insolación e irradiación muy amplia, con poca humedad; donde los vientos cordilleranos y frecuentes heladas son característicos durante el año.

El clima en toda la región es oligotérmica con promedios de temperatura anual en un rango entre 8° y 15° C. se caracteriza por tener un clima bastante frío y seco, las temperaturas varían de oeste a este desde – 5° C hasta 22 ° C. El clima del Municipio corresponde a la de región polar de alta montaña estepa con invierno seco y frío y clima de tundra.

**8.3. FLORA.** La vegetación se caracteriza por la escasa cobertura vegetal por el clima frío y seco.

**TABLA 4.** Principales pisos ecológicos en la región del volcán Ollague.

<b>Espacio Fisiográfico</b>	<b>Vegetación Predominante</b>	<b>Descripción</b>
Vegetación de la Cordillera Occidental o Volcánica	Matorrales	Vegetación que caracteriza las pendientes de montañas, serranías y los paisajes en colina, mayormente siempre verdes, es decir que la mayor parte del año permanece con hojas, también otros arbustos caducifolios. Destacan la th'ola, koa th'ola

(3.650 a 6.000 m.s.n.m.)		( <i>Fabiana squamata</i> ), tara th'ola, pulica th'ola, lamphaya, qhiru th'ola.
	Pajonales bajos y ralos	Escasamente distribuidas, características de llanuras y pendientes de los conos volcánicos, que se ubican en la parte sudoeste de la región que abarca la mancomunidad, con altitudes mayores a 4.000 m.s.n.m.; en las montañas y serranías de forma aislada y en manchones, mayormente en pendientes, se observan este tipo de vegetación. Un rasgo importante de este tipo de vegetación es la existencia de plantas en forma de cojín o almohadilla de raíz profunda y de coloración similar al material presente sobre la superficie, mimetizándose en el medio; estas especies fueron determinadas como <i>Junellia</i> sp., <i>Pycnophillum</i> sp. y <i>Nototriche</i> cf. <i>Arcoma</i> . Destacan el iru ichu, y sicuya e ichu ( <i>Stipa frigida</i> ) gramíneas bajas <i>Stipa</i> cf. <i>Nardoides</i>
	Herbáceo	En estratos más bajos es común observar especies herbáceas blandas. Destacan la yawara ( <i>Stipa</i> cf <i>nardoides</i> , <i>Stipa</i> spp.) llapha ( <i>Muhlenbergia perviana</i> ) y otras hierbas.

Las principales especies corresponden a:

**TABLA 5.** Especies de flora en la región del volcán Ollague.

Nombre Común	Nombre Científico	Tipo	Uso
Thola	<i>Bacharis deacintifolia</i>	Arbusto	Forraje, leña, protección del suelo, teñidos, medicinal para dolores estomacales y diarreas
Lampaya	<i>Lampaya Castelli</i>	Arbusto	Combustible
Chachacoma	<i>Fabiana densa</i>	Arbusto	Combustible
Sicuya	<i>Senecio anedephylum</i>	Arbusto	Forraje
Queñua	<i>Polylepis tomentilla</i>	Arbol	Combustible
Cebadilla	<i>Bromus unioloides</i>	hierva	forraje
Paja brava	<i>Festuca orthophylla</i>	Hierba	Forraje, techado y protección del suelo
Kaylla	<i>Ñaygarrikarpus cristatum</i>	Arbusto	Forraje para llamas y ovejas, protección del suelo

Yareta	<i>Azorella glabra</i>	Arbusto	Medicinal se aplican cataplasmas, protección del suelo
Kauchi	<i>Identificación local</i>	Arbol	Forraje, protección del suelo
Salvia	<i>Lepechenia graveolens</i>	Hierba	Medicinal y protección del suelo

**8.4. FAUNA.** La fauna silvestre, es variada, encontrándose desde mamíferos, aves y peces. Se tiene principalmente a la vicuña, el suri y las pariguanas o flamencos andinos, gato montés, entre los carnívoros depredadores se destacan en la región el zorro, puma. Con respecto a la familia de los roedores son abundantes destacando la vizcacha, el topo y la rata. También se encuentran armadillos como el quirquincho en proceso de extinción y finalmente los infaltables carroñeros como son el cóndor y el zopilote.

**TABLA 6.** Principales especies de fauna en la región del volcán Ollague.

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO
Puma	<i>Felis Concolor</i>
Zorro	<i>Canepatus chinga</i>
Alcon	<i>Falco peregrinus</i>
Aguila	<i>Aquila pequeña</i>
Zorrino	<i>Connepatus suffocans</i>
Viscacha	<i>Lagidium viscacia</i>
Avestruz	<i>Pterocnemia pennata</i>
Perdiz	<i>Perdix rubra</i>
Vicuña	<i>Vicugna vicugna</i>
Condor	<i>Vultur Gryphus</i>
Liebre	<i>Oryctolagus cuniculus</i>

## 9. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.

El Volcán Ollague, se encuentra en la provincia geológica de la Cordillera Occidental de los Andes de Bolivia, consiste de una cadena montañosa volcánica de 750 km de longitud y 40 km de ancho promedio (área 30,000 km<sup>2</sup>), esta unidad morfo-estructural constituyó un eugeosinclinal y miogeosinclinal durante el Jurásico Superior y el Cretácico Inferior, los que fueron rellenados por flujos de lava y rocas piroclásticas, y por secuencias de areniscas y limolitas, respectivamente. Durante el Cretácico Superior, en el miogeosinclinal se

depositaron sedimentos continentales; y en el eugeosinclinal se emplazaron grandes plutones granitoides que conforman el Batolito de la Costa del Perú y Chile.

A partir del Oligoceno Superior hasta el Reciente, la Cordillera Occidental evolucionó como un arco volcánico-eugeosinclinal hacia el oeste y un trasarco miogeosinclinal al este. La actividad volcánica alcalina se inició en el Oligoceno Superior (28-21 Ma), contemporáneamente con el primer período mayor de deformación tectónica andina.

La parte central de esta cordillera, se caracteriza por la presencia de volcanes aislados y alineados, los que alcanzan alturas considerables. Las unidades aflorantes de edad eocena-oligocena, consisten de areniscas, limolitas, conglomerados, areniscas tobáceas y tobas. Sobre estas unidades formacionales, se depositaron las rocas del Complejo volcánico Antajavi-Huaricunca- Serkhe del Mioceno Superior, las que a su vez se encuentran cubiertas por tobas de flujo. Finalmente, al sud del complejo se presentan sedimentos lacustres cuaternarios, intercalados localmente con tobas de flujo no soldadas (Flores y Jiménez, 1997).

En el área del volcán Ollague, se observan coladas de lava traquianandesítica a traquidacítica, lahares, flujos de detritos y piroclastitas de estratovolcanes, así como domos de composición andesítica a riolítica, depositados y/o emplazados durante el Pleistoceno y Holoceno, con una mayor afluencia de volcanes con actividades fumarólicas y/o solfatáricas.

Geomorfológicamente la región se halla constituida por conos volcánicos, formados por coladas de lavas intercaladas con brechas de arrastre y brechas de explosión, que conforman los estratovolcanes.

Las coladas de lava dan lugar a lomadas o mesetas lávicas, que son resultado de efusiones sucesivas, durante periodos de reactivación de posiblemente varios eventos volcánicos.

La geoforma habitual de las estructuras volcánicas es cónica y en forma de mesetas en algunos sectores.

El ciclo geomórfico fluvial se encuentra interrumpido por efecto del aporte de materiales volcánicos, las pocas precipitaciones pluviales que se registran en el área, provocan que la erosión fluvial sea reducida, sin embargo, se describen como valles los principales cauces de agua. Estos presentan amplias llanuras aluviales, abanicos aluviales formados por sus tributarios y algunas terrazas fluviales. Dentro de una clasificación genética estos ríos pueden

ser considerados como subsecuentes ya que su curso ha sido desviado por el emplazamiento de cuerpos volcánicos, no obstante, la mayoría de las quebradas son consecuentes ya que fluyen siguiendo la pendiente del terreno.

La topografía regional es accidentada, con relieves enmarcados a la secuencia volcánica, ondulaciones fuertes se manifiestan en la región con alturas que oscilan entre los 3500 y 5000 msnm.

## **CAPITULO II**

### **MARCO PRÁCTICO – MATERIALES Y MÉTODOS**

El presente capítulo comprende el proceso práctico de investigación realizado en el Volcán Ollague, en el cual se utiliza los métodos científicos para lograr concretizar el objetivo formulado inicialmente y verificar a través de este la hipótesis planteada. A continuación, se describe de manera secuencial las etapas generales de investigación en las ciencias geológicas.

La metodología aplicada consiste tres etapas:

#### **10. ETAPA DE GABINETE O PRE-CAMPO.**

En esta etapa se efectuó una recopilación de información escrita, gráfica y digital como: informes de estudios realizados, mapas topográficos, mapas geológicos, imágenes satelitales y bibliotecas espectrales y otros trabajos de investigación sobre el Volcán Ollague

#### **11. ETAPA DE CAMPO.**

Corresponde al trabajo de campo realizado en la zona de estudio, utilizando una hoja topográfica de referencia. Así mismo, para la ubicación espacial en el terreno se recurrió al Sistema de Posicionamiento Satelital (GPS).

Sobre la base de resultados obtenidos en el análisis de una imagen satelital, que permiten la identificación de los deslizamientos de laderas en la zona de estudio, se procedió al recorrido de estas áreas a objeto de su contrastación *in situ*.

Así mismo, en las visitas *in situ* se realiza la toma de muestras de rocas, de la geología superficial, para determinar la constitución del material en las laderas.

La visita de campo se desarrolla para determinar la presencia de materiales no consolidados en las laderas del volcán Ollague, la visita “*in situ*” nos permitirá identificar exactamente, mediante coordenadas la ubicación de estos deslizamientos respecto a su posicionamiento global.

En la visita de campo se determinó la presencia de material volcánico no consolidado, dispuesto a través de las laderas del volcán Ollague,

Por revisión bibliográfica se presupone la existencia de LAHARES, estos materiales no han sido verificados en campo, su identificación está sujeta al análisis espectral de las imágenes satelitales.

## **12. ETAPA DE GABINETE – POST CAMPO.**

Corresponde al procesamiento, análisis de la información constatada y recolectada en el campo para la conformación de una base de datos para la elaboración del producto final expresado en el: Tratamiento de las imágenes satelitales LANDSAT 8 respecto a la corrección radiométrica, atmosférica y la ortorectificación.

El análisis de correlación y comportamiento en los dos tipos de imágenes satelitales, permiten la identificación de las diferentes zonas de deslizamientos

Esta etapa, comprende el tratamiento digital de las imágenes satelitales, donde se aplicarán dos procesos:

- I. PRE – PROCESAMIENTO.** Este procedimiento implica el tratamiento preliminar de las imágenes satelitales correspondientes al volcán Ollague, donde se hará una calibración y corrección radiométrica, atmosférica, delimitación y extracción del área de estudio.
- II. PROCESAMIENTO.** La metodología aplicada está enfocada a la determinación de la presencia de material no consolidado presente en las laderas del volcán Ollague, se aplican métodos de CLASIFICACIÓN, para determinar esta situación se utiliza el método para estimar la cantidad de material volcánico no consolidado.
  - a. MÉTODO CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.** Este método se aplica para determinar la presencia de material volcánico no consolidado, puesto que se tiene un conocimiento del área de estudio “in situ”, en base a una coordenada de control que ha sido extraída del campo para identificar su presencia en las laderas del volcán Ollague.
  - b. MÉTODO DE CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA.** Este método se aplica para determinar la presencia de LAHARES, en la visita de campo no se pudo verificar la existencia de este material, su identificación está sujeta al procedimiento de clasificación no supervisada y una combinación de bandas adecuada para identificar materiales húmedos, para de esta manera determinar la presencia de estos materiales húmedos.

### **13. FASES METODOLÓGICAS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.**

#### **I. ETAPA DE CAMPO.**

El itinerario de campo, se realizó de la siguiente manera:

En una primera etapa se realiza el mapeo geológico, trabajo llevado a cabo en dos días, de acuerdo al siguiente procedimiento:

#### **PRIMER DÍA.**

Visita al volcán Ollague se realizó en fecha: 27 / 10 / 2018

El mapeo se realiza con asesoramiento del director de investigación, donde se procede:

- El punto de inicio constituye la población Avaroa, situado en plena frontera Bolivia – Chile, ubicada en la siguiente coordenada:

#### **PUNTO CONTROL 1.**

**ESTE:** 581092 m.

**NORTE:** 7654836 m.

**ALTURA:** 4004 m.

- A partir de esta ubicación se realiza un recorrido en movilidad hasta las cercanías del volcán Ollague, situado a 9 km. hacia el este del mismo.
- Las rocas observadas corresponden a coladas de lava andesítica á dacítica, de estructura masiva, de tamaño de bloques superiores a 2 m. de diámetro, intercalado con material brechoso anguloso. La ubicación de este punto está dada por la coordenada:

#### **PUNTO CONTROL 2.**

**ESTE.** 587700 m.

**NORTE.** 7647284 m.

**ALTURA.** 3995 m.

- La caminata prosigue pendiente arriba, en dirección oeste, llegando al punto de control 3, el cual se ubica donde se evidencia la presencia de material volcánico no consolidado.

#### **PUNTO CONTROL 3.**

**ESTE.** 587700 m.

**NORTE.** 7647284 m.

**ALTURA.** 4090 m.

- Finalmente, el recorrido se dirige en dirección sureste, que, de acuerdo a la imagen satelital, se evidencia la presencia de material volcánico no consolidado dispuesto en la ladera sureste del volcán Ollague, su ubicación:

#### **PUNTO CONTROL 4.**

**ESTE.** 587188 m.  
**NORTE.** 7641503 m.  
**ALTURA.** 4120 m.

#### **SEGUNDO DÍA.**

Visita al volcán Ollague se realizó en fecha: 28 / 10 / 2018

El segundo trayecto, tiene su punto de inicio en la estación Avaroa

- El trayecto se dirige en dirección sureste, la caminata tiene un recorrido de 4 km.
- El punto mapeado corresponde rocas del domo dacítico asociado a vulcanismo resurgente, la coordenada corresponde a:

#### **PUNTO CONTROL 5.**

**ESTE:** 581229 m.  
**NORTE:** 7649789 m.  
**ALTURA.** 3920 m.

#### **14. ETAPA DE GABINETE.**

El tratamiento digital de la imagen satelital correspondiente a la escena LANDSAT para el año 2018 y 2003, comprende las siguientes especificaciones:

1. Se desarrolla con la meta de identificar dos tipos de materiales de deslizamientos en las laderas del volcán Ollague:
  - a. Material volcánico no consolidado
  - b. Lahares (material húmedo)
2. Para la identificación de ambos materiales, el trabajo de “PRE-PROCESAMIENTO” es el mismo, se sigue la misma metodología de tratamiento digital

**3.** Para el trabajo de “PROCESAMIENTO DIGITAL”, se aplican dos métodos diferentes:

- a. Clasificación Supervisada: Para material volcánico no consolidado
- b. Clasificación No Supervisada: Para los lahares

A continuación, se describen los procesos mencionados de forma detallada:

#### **14.1. PRE – PROCESAMIENTO. IMAGEN SATELITAL 2018.**

El objetivo del uso del pre procesamiento de una imagen satelital es el de maximizar la precisión de los resultados a obtener, en el presente trabajo se siguen los siguientes pasos requeridos:

**14.2. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.** Esta fase contempla la delimitación de la zona de estudio referida al volcán Ollague, la cual será analizada de la imagen satelital completa, que corresponde a la escena:

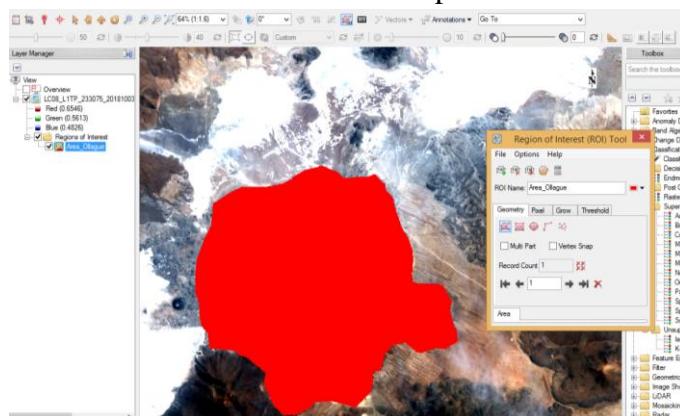
**PATH:** 233  
**ROW:** 75

Este procedimiento permitirá trabajar exclusivamente en el volcán Ollague, descartando varias áreas que componen la imagen satelital.

La delimitación se realiza utilizando la herramienta “ROI TOOL – Region of Interest”, la cual nos permite delinear un polígono enmarcando el área del Volcan Ollague.

La extracción de esta área delimitada se realiza con la herramienta “SUBSET DATA FROM ROIs”, obteniendo de esta manera, la siguiente imagen:

**FIGURA 24.** Delimitación del área correspondiente al volcán Ollague.



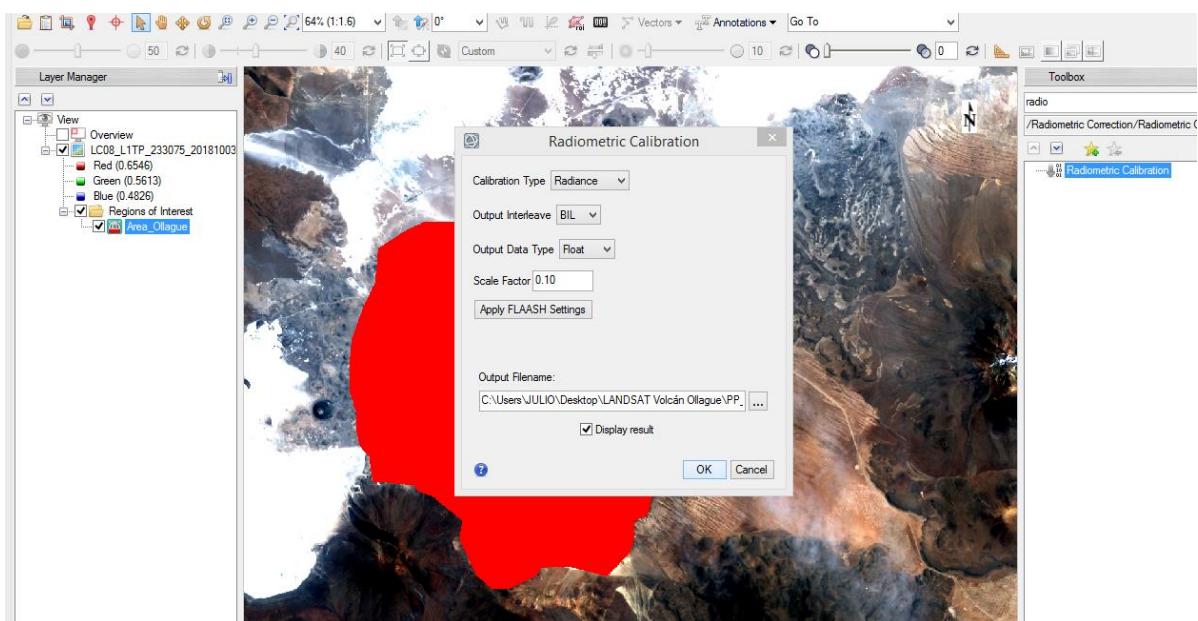
### 14.3. CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA.

Se aplicó la corrección radiométrica en la imagen satelital LANDSAT (2018) para convertir los valores obtenidos por un sensor remoto, en valores de reflectancia en superficie, usando para ello los coeficientes radiométricos provistos en el archivo de metadatos MTL.txt

La caracterización radiométrica y la calibración de los sensores es un proceso necesario para obtener datos de alta calidad y en consecuencia productos con altos niveles de confiabilidad. A continuación, se muestra el procedimiento de esta conversión utilizando el software ENVI 5.3

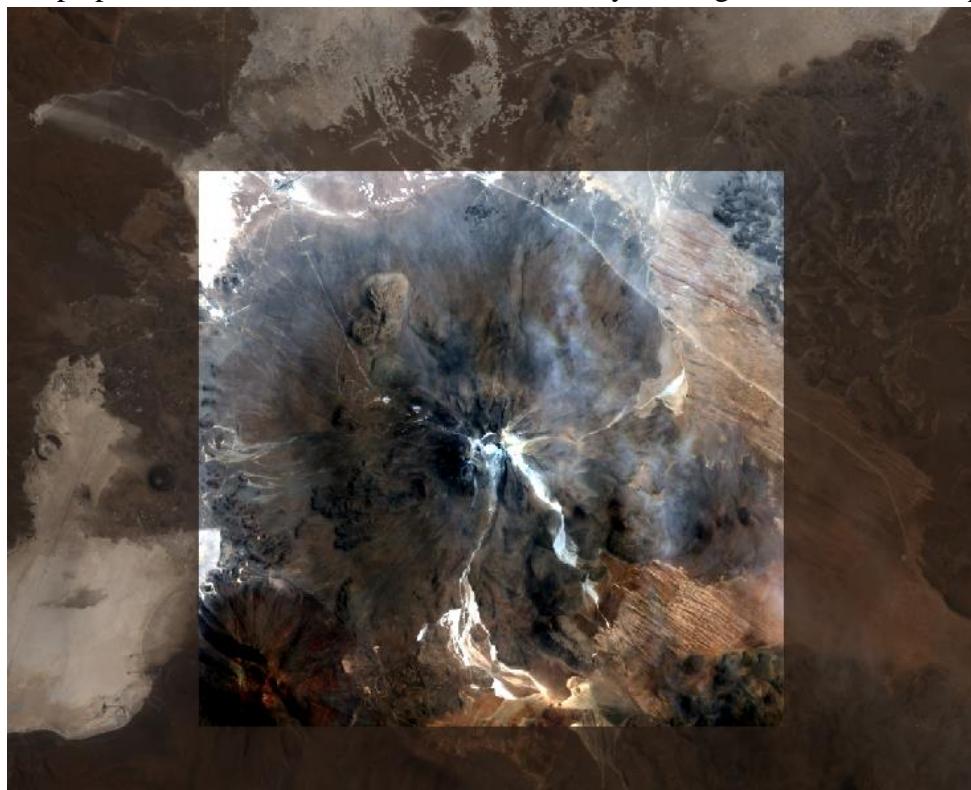
- Se utiliza la herramienta “RADIOMETRIC CALIBRATION” con su tipo de calibración “RADIANCIE”
- 

**FIGURA 25.** Activación de la herramienta “RADIOMETRIC CALIBRATION”



- Del procedimiento aplicado, se obtiene la siguiente imagen, con ND (niveles digitales) corregidos a “Radiancia Espectral”.

**FIGURA 26.** La imagen del fondo muestra la zona de estudio en ND crudos, la imagen en solape por delante, muestra, la zona del volcán ya corregida a Radiancia Espectral.



#### 14.4. CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA.

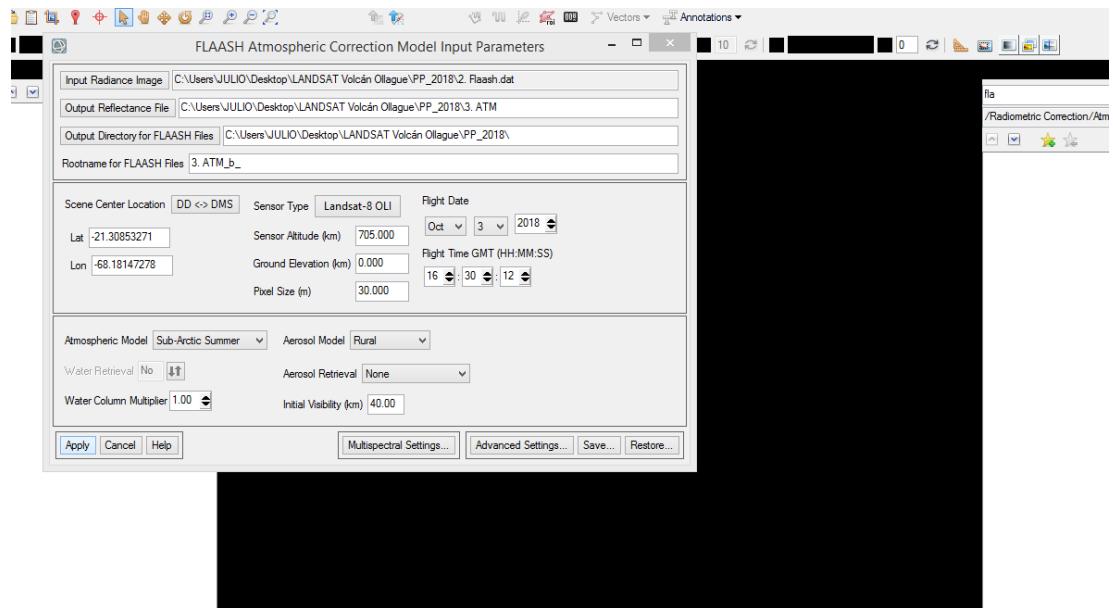
El cálculo del valor de la reflectancia en superficie implica introducir algún tipo de corrección sobre el efecto que imprime la atmósfera sobre la señal recibida por el sensor (en términos de Scattering y absorción)

Se emplea el método FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hyperscubes) es un módulo avanzado de corrección atmosférica disponible en el software ENVI, el cual se basa en el algoritmo de transferencia de radiación MODTRAN4, el cual busca eliminar los efectos de la absorción y dispersión, causados por las moléculas y partículas atmosféricas en suspensión, de la radiancia recibida por el sensor y convertir esa radiancia a valores de reflectividad de superficie.

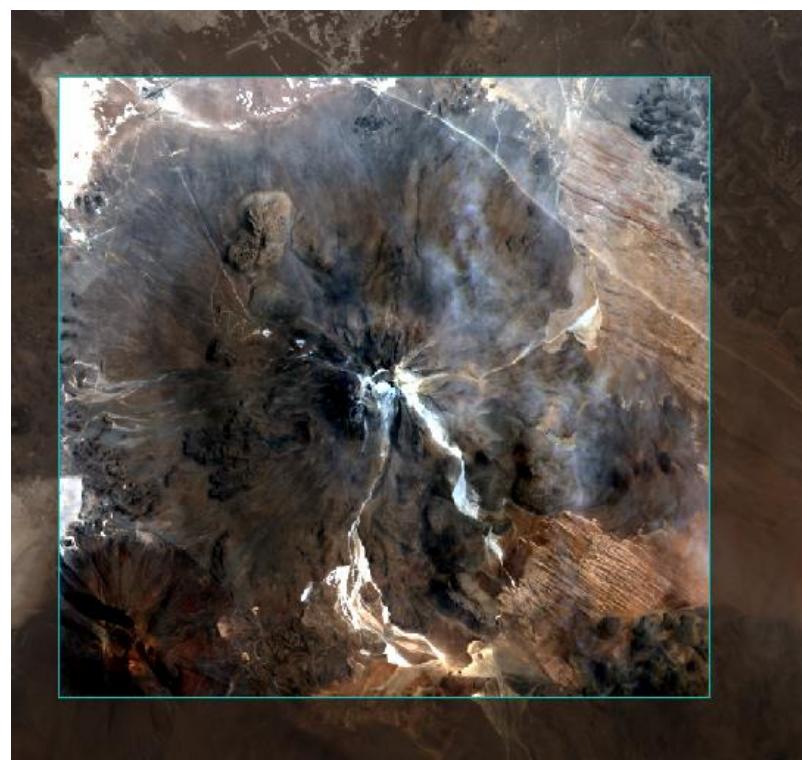
A continuación, se muestra el procedimiento de esta conversión utilizando el software de teledetección ENVI 5.3.

- Se activa la herramienta “FLAASH ATMOSPHERIC CORRECTION”

**FIGURA 27.** Corrección atmosférica, herramienta “FLAASH ATMOSPHERIC CORRECTION”



- Del procedimiento aplicado, se obtiene la siguiente imagen, con los valores de “Reflectancia Aparente” calibrados mediante corrección atmosférica.
  - **FIGURA 28.** La figura muestra, la imagen corregida atmosféricamente.



## 15. PROCESAMIENTO. IMAGEN SATELITAL 2018.

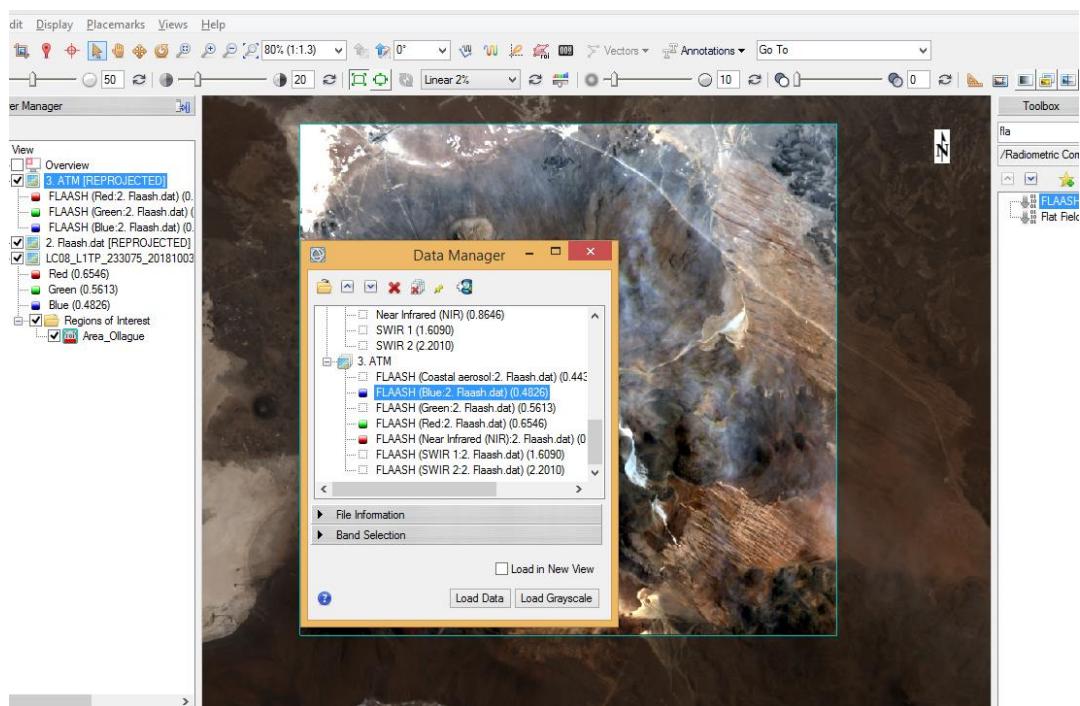
### 15.1. COMBINACIÓN DE BANDAS.

Las bandas y sus combinaciones son función del uso y aplicación de algoritmos, que permiten discriminar aspectos específicos como afloramientos rocosos, zonas mineralizadas, vegetación, estructuras geológicas y otras características inherentes a los elementos que afloran en superficie terrestre. De las diferentes combinaciones se ha seleccionado la composición en falso color RGB / 542, esta combinación es la más adecuada para identificar deslizamientos (Blodgett, 1998).

A continuación, se muestra el procedimiento empleado para la combinación de bandas en falso color:

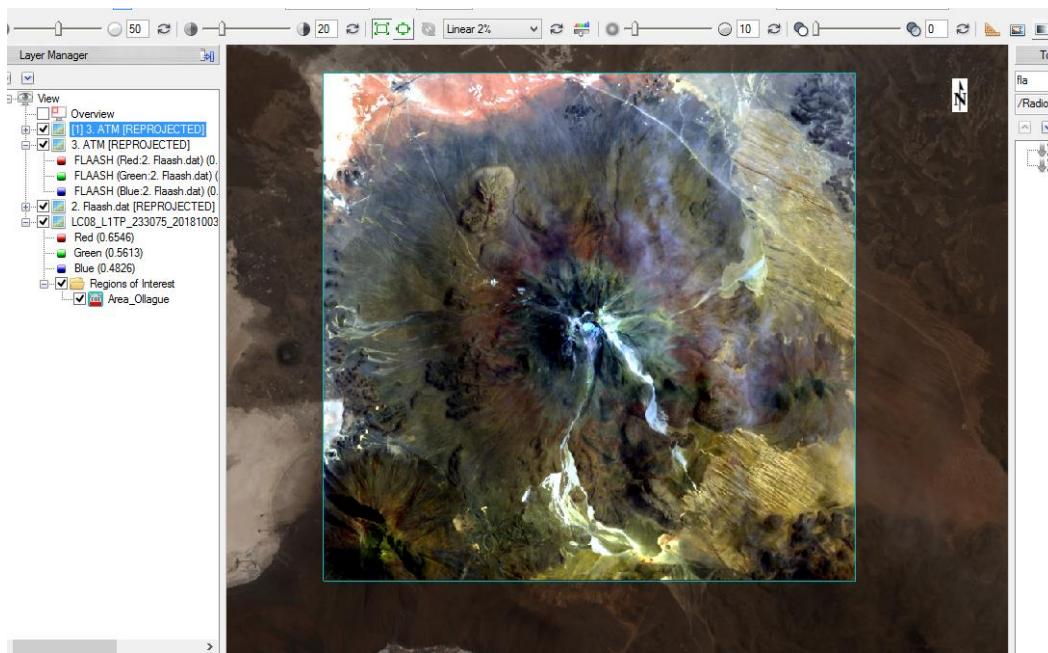
- Con la opción “DATA MANAGER” se direccionan las bandas respectivas 542 a los canales RGB.

**FIGURA 29.** Activación de la herramienta “DATA MANAGER”



- De la combinación de bandas, se obtiene la siguiente composición en falso color:

**FIGURA 30.** Imagen en composición de falso color RGB / 542, empleada para identificar deslizamientos.



## 15.2. CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES.

Este procedimiento tiene el objetivo principal de:

“Buscar la caracterización particular de cada cubierta, válida para una determinada imagen y un territorio en concreto”.

Debido que no se trata solamente de establecer un modelo entre medidas digitales y parámetros físicos, sino entre medidas digitales, en un momento dado y tipo de cubierta. En este sentido, la clasificación supone un enfoque cualitativo, si bien, por tratarse de un proceso numérico, incorpora un aparato estadístico, ciertamente importante.

Fruto de la clasificación digital, se obtiene una cartografía o inventario de las categorías del objeto de estudio. Por ello el papel protagonista de la teledetección, es quien realiza la interpretación de los ND, todo esto mediante la categorización, en pocas palabras, se realizará una clasificación.

### 15.2.1. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.

“Parte de un cierto conocimiento de la zona de estudio, adquirido por experiencia previa o por trabajos de campo”.

El procedimiento consiste que el usuario introduzca sobre la pantalla, los vértices que definen cada una de aquellas áreas representativas, asignándolas a una de las categorías definidas previamente en la leyenda. El ordenador calcula las estadísticas elementales de cada categoría, media, rango, desviación típica, matriz de varianza, etc. A partir de los ND, de todos los pixeles incluidos en los campos de entrenamiento asignados a esa clase.

De acuerdo a lo anterior, se enmarca regiones de interés que corresponden a zonas de deslizamientos de materiales no consolidados, estos se presentan comúnmente en las laderas del volcán Ollague.

A continuación, se describe el procedimiento aplicado en el software ENVI 5.3:

- Se identifica aquellos lugares correspondientes a zonas de deslizamientos, previo el reconocimiento de campo, donde se obtuvieron las siguientes coordenadas “in situ”:

**PUNTO 1. ESTE:** 587188 m.

**NORTE:** 7641503 m.

**ALTURA:** 4120 m.

**ZONA:** 19 Sur

**PUNTO 2. ESTE:** 589157 m.

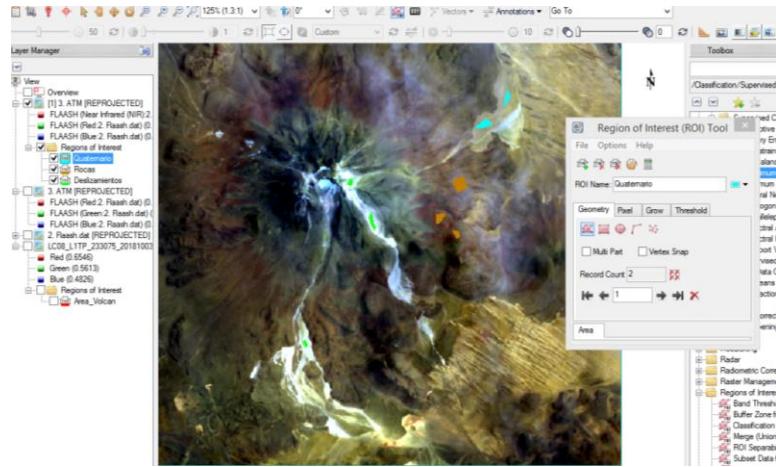
**NORTE:** 7644386 m.

**ALTURA:** 4240 m.

**ZONA:** 19 Sur

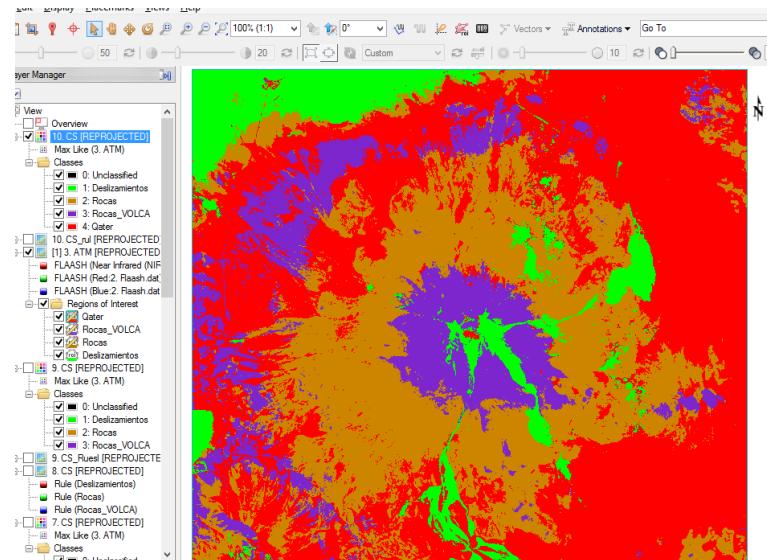
- La delimitación se la realiza con la herramienta “ROI TOOL – Regiones de Interés”

**FIGURA 31.** Identificación de los deslizamientos, en base a las coordenadas presentes en el volcán Ollague, mediante el empleo de la herramienta ROIs.



- La delimitación completa, en las laderas del volcán Ollague, se realiza empleando la herramienta de clasificación supervisada “MAXIMUM LIKELIHOOD CLASSIFICATION”, la cual delimitará aquellas zonas con presencia de deslizamientos de ladera, y de igual manera, permitirá diferenciar las demás coberturas presentes en la ladera.

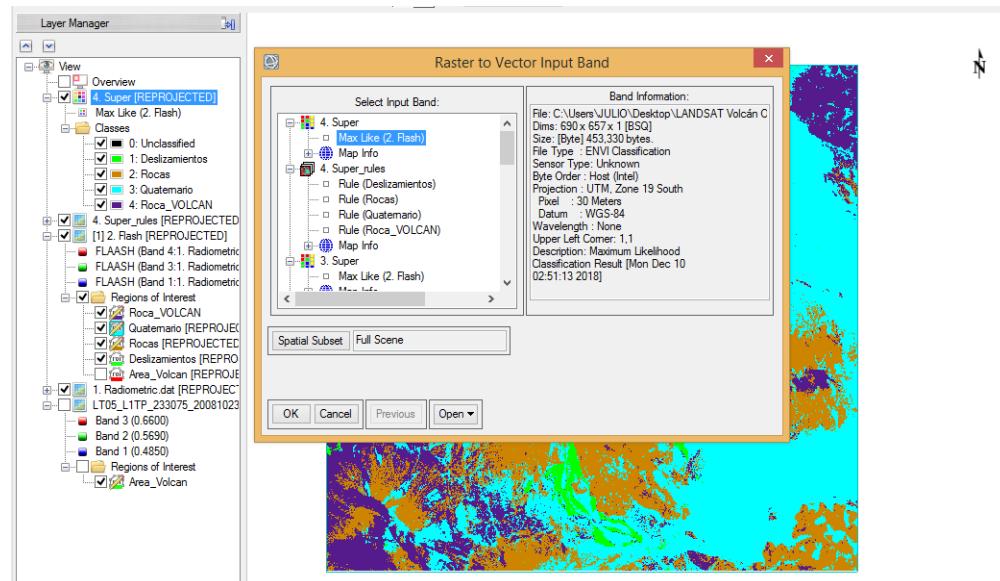
**FIGURA 32.** Imagen del volcán Ollague, procesada mediante la clasificación supervisada, los deslizamientos están representados por la coloración verdosa, claramente se observa que están dispuestos pendiente abajo, por sobre la ladera.



### 15.3. CLASIFICACIÓN A FORMATO VECTORIAL.

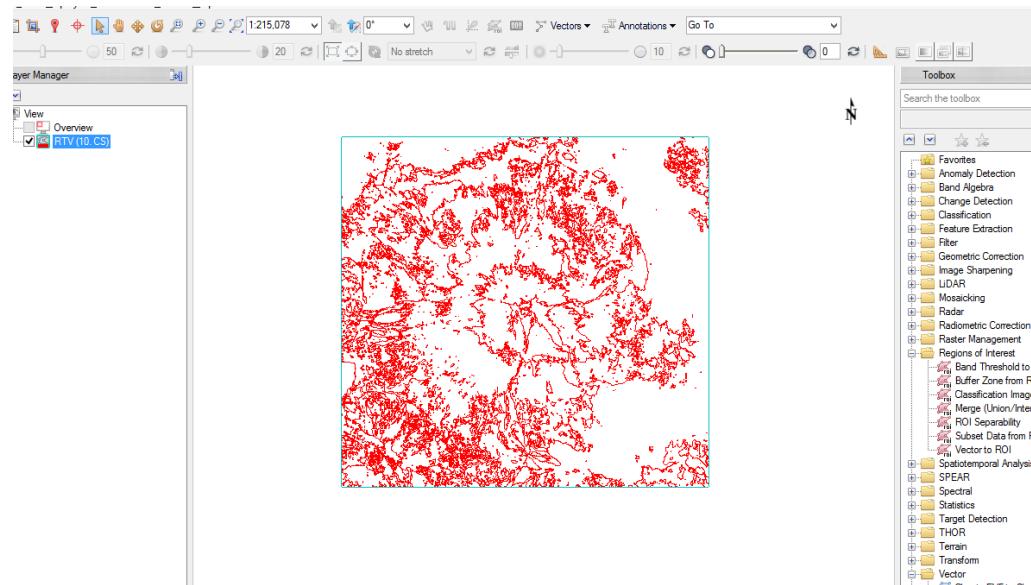
Procedimiento aplicado para convertir el archivo generado en la clasificación supervisada a un formato vectorial, esto nos permite obtener un archivo en formato (.shp) el cual podrá ser procesado posteriormente en el software ARCGIS para determinar las magnitudes de área, perímetro, y orientación que ocupan los deslizamientos en la ladera de volcán Ollague.

**FIGURA 33.** Activación de la herramienta para la conversión del archivo raster a archivo vectorial.



El nuevo archivo creado en formato vectorial, contiene la delimitación de las coberturas presentes en la ladera del volcán Ollague, es de vital importancia la delimitación de los deslizamientos, este archivo será procesado nuevamente en el software ARCGIS para su interpretación final.

**FIGURA 34.** Archivo en formato vectorial, generado a partir del archivo raster que corresponde a la clasificación supervisada.



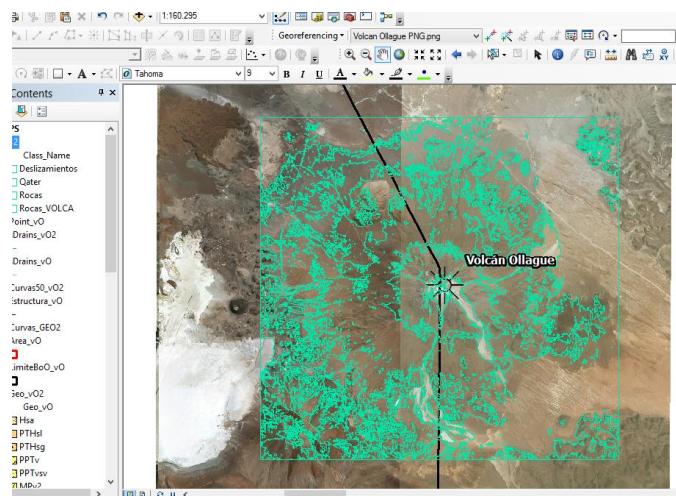
#### 15.4. PROCESAMIENTO VECTORIAL EN ARCGIS.

El uso del programa ARCGIS 10.5, permite, manipular el archivo vectorial, que ha sido procesado previamente en el software ENVI 5.3, lo que se pretende, es determinar las características de área y perímetro de los deslizamientos identificados en las laderas del volcán Ollague, con el propósito fundamental de obtener mapas temáticos que demuestren esta situación.

El procedimiento seguido en el programar ARCGIS es el siguiente:

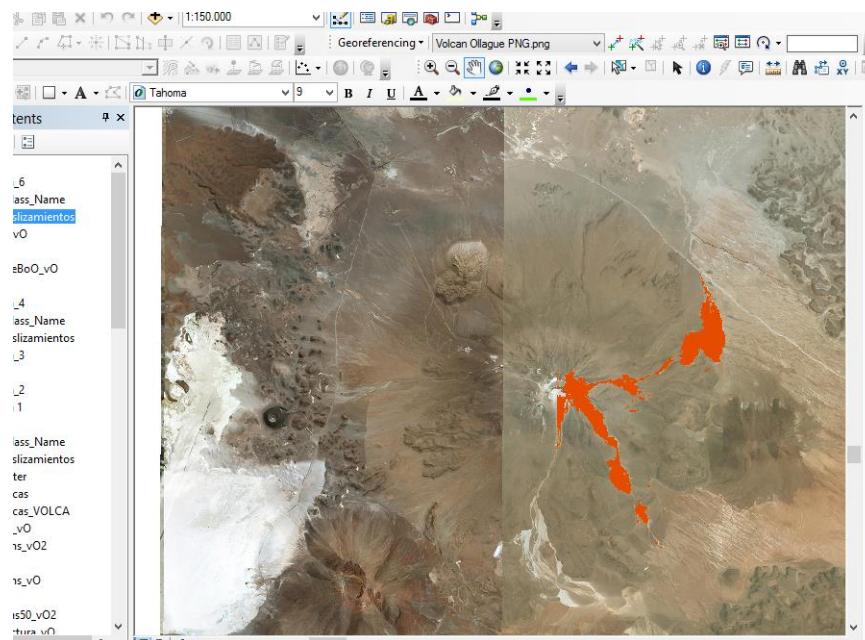
- Procedemos a agregar el archivo vectorial a la ventana de visualización del programa ARCGIS, al mismo la sobreponemos sobre la imagen satelital, para ver la concordancia geográfica entre estos dos archivos.

**FIGURA 35.** Sobre posicionamiento del archivo vectorial a la imagen satelital, en el programa ARCGIS 10.5



- A continuación, separamos el área correspondiente a los deslizamientos de las demás coberturas presentes en el archivo vectorial:

**FIGURA 36.** Separación y delimitación de los polígonos correspondientes a zonas de deslizamientos en las laderas del volcán Ollague para el año 2018.



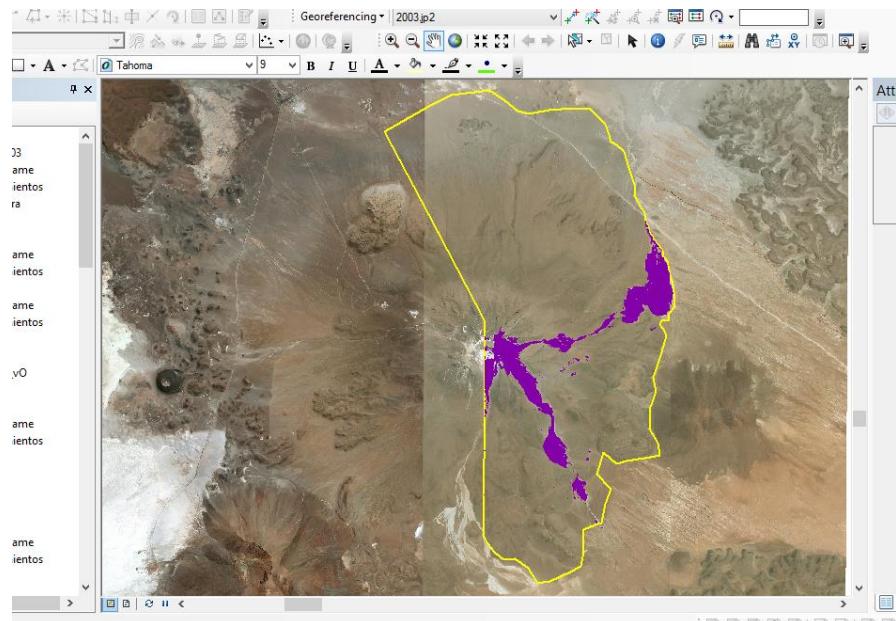
En la imagen de la figura 36, se observa la delimitación de las áreas que presentan deslizamientos de materiales no consolidados en las laderas del volcán Ollague, estas se diferencian en polígonos de coloración anaranjada, la línea de color negro, es la delimitación internacional que separa a Bolivia de la República de Chile.

## 16. PROCESAMIENTO. IMAGEN SATELITAL 2003.

Previamente se mencionó de forma detallada el procesamiento completo para el tratamiento de la imagen satelital correspondiente al año 2018, se abarco tanto el pre – procesamiento, como el procesamiento formal, describiendo paso a paso la metodología empleada para obtener el archivo vectorial final que demostrará la identificación de deslizamientos de ladera en el volcán Ollague.

El tratamiento de la imagen satelital del año 2003 comprende la misma metodología, tanto para el pre – procesamiento como para el procesamiento, de todo el tratamiento aplicado se obtiene la siguiente imagen, correspondiente a la identificación de deslizamientos de ladera en el volcán Ollague para el año 2003.

**FIGURA 37.** Separación y delimitación de los polígonos correspondientes a zonas de deslizamientos en las laderas del volcán Ollague para el año 2003.



## **CAPÍTULO III** **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Los resultados del presente trabajo por cuestiones metodológicas y técnicas, se agrupan en dos aspectos fundamentales, es decir: resultados generados por las imágenes LANDSAT y resultados logrados a través del mapeo geológico de campo, siendo que estos resultados se correlacionan y están directamente asociados a la identificación de deslizamientos de laderas. El trabajo comprendió las zonas de estudio correspondientes a las laderas del volcán Ollague, trabajadas en su parte este, netamente en el sector boliviano; la parte del volcán dispuesta en la República chilena no fue objeto de estudio, el ingreso a este territorio no se realizó por razones técnicas y políticas.

### **17. ANÁLISIS ESPECTRAL – IMAGEN SATELITAL 2018.**

El análisis realizado se aplica netamente en el sector boliviano de la ladera del volcán Ollague, dispuesto en la región este.

El análisis espectral de las imágenes satelitales, realizado en el software ENVI 5.3, produce el siguiente resultado, que está asociado a la técnica de “clasificación de imágenes satelitales”.

#### **PRIMER RESULTADO.**

Un primer resultado, basado en la metodología de clasificación supervisada, determina que el material volcánico no consolidado presenta características espectrales atribuidas a “Infrarrojo cercano”; la emisividad intensa que ofrecen estos materiales se debe a la alta reflectividad que presentan, de manera efectiva dentro del rango Visible – Infrarrojo.

El apoyo realizado, en la conversión de las características espectrales a archivos vectoriales, con el apoyo del software ARCGIS 10.5, determina:

**TABLA 7.** Tabla de resultados, Imagen Satelital 2018

<b>CLASIFICACIÓN SUPERVISADA – IMAGEN 2018</b>	
Área cubierta por deslizamientos:	7,6 km <sup>2</sup>
Perímetro:	91,16 km
Área total de laderas:	218,25 km <sup>2</sup>

Porcentaje ocupado por deslizamientos	3,48 % del 100 %
Material no consolidado identificado:	Flujos de detritos intercalados con bloques, cantos, till.

## 18. ANÁLISIS ESPECTRAL – IMAGEN SATELITAL 2003.

El análisis espectral, la metodología aplicada, también se realiza en la imagen satelital correspondiente al año 2003, el área de trabajo, evidentemente es el mismo al analizado en la imagen satelital del año 2018.

Análogamente el procesamiento en las imágenes satelitales, realizado en el software ENVI 5.3, produce el siguiente resultado, que está asociado a la técnica de “clasificación de imágenes satelitales”.

### PRIMER RESULTADO.

Un primer resultado, basado en la metodología de clasificación supervisada, determina que el material volcánico no consolidado presenta características espectrales atribuidas al “Infrarrojo Cercano”. El apoyo realizado, en la conversión de las características espectrales a archivos vectoriales, con el apoyo del software ARCGIS 10.5, determina:

**TABLA 8.** Tabla de resultados, Imagen Satelital 2003

CLASIFICACIÓN SUPERVISADA – IMAGEN 2003	
Área cubierta por deslizamientos:	5,3 km <sup>2</sup>
Perímetro:	88,22 km
Área total de laderas:	218,25 km <sup>2</sup>
Porcentaje ocupado por deslizamientos	2,46 % del 100 %
Material no consolidado identificado:	Flujos de detritos intercalados con bloques, cantos, till.

## 19. ANÁLISIS DEL RESULTADO DE CAMPO.

El trabajo de campo, mapeo geológico, se realizó con la base de un mapa topográfico, una imagen satelital, y el recorrido a pie en la zona de estudio.

Topográficamente se siguió el camino de tierra dispuesto en las laderas del volcán Ollague, el camino seguido se dirigió hasta llegar a la fumarola, en el cráter del volcán, en el transcurso se logró identificar deslizamientos, con las siguientes características:

- El material volcánico no consolidado identificado corresponde a: flujos de detritos intercalados con bloques, cantes, till.
- La estructura es disgregada con bloques de roca de tamaño pequeño, mediano y grande, con un diámetro que varía entre: 5, 10, 30 cm.
- La coloración del material volcánico no consolidado es grisácea clara a oscura.

## **20. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS FINAL.**

La corregistro espacial entre las imágenes se hizo en un área total de 218,25 km<sup>2</sup>, en la escena correspondiente al 2018, se determina que el área afectada por deslizamientos es de 7,6 km<sup>2</sup>, representando el 3,48 % del área total

En la escena del año 2003, el área afectada por deslizamientos es de 5,3 km<sup>2</sup>, representando el 2,42% de un área total de 218,25 km<sup>2</sup>.

Ambas situaciones agrupan a un tipo de material volcánico no consolidado, identificado como: flujos de detritos intercalados con bloques, cantes, till.

Esta situación demuestra que el área afectada por deslizamientos aumento en un 1,06%, representando un área de 2,3 km<sup>2</sup>, de aumento, referido al área que ocupan los deslizamientos de ladera, para un intervalo de tiempo de 15 años.

## **CONCLUSIONES.**

- Se concretó la identificación de deslizamientos de laderas en el volcán Ollague, a través de la utilización de la técnica de teledetección que corresponde a una metodología de trabajo a distancia o percepción remota.
- Se determinó que en un área total de 218,25 km<sup>2</sup>, en la escena correspondiente al 2018, se identifica que el área afectada por deslizamientos es de 7,6 km<sup>2</sup>, representando el 3,48 % del área total. En la escena del año 2003, el área afectada por deslizamientos es de 5,3 km<sup>2</sup> representando el 2,42% de un área total de 218,25 km<sup>2</sup>. Esta situación demuestra que el área afectada por deslizamientos aumento en un 1,06%, representando un área de 2,3 km<sup>2</sup>, de aumento, referido al área que ocupan los deslizamientos de ladera, para un intervalo de tiempo de 15 años.

- El área de trabajo correspondiente al análisis de deslizamientos de ladera, en el volcán Ollague, corresponde a una extensión de “218 km<sup>2</sup>”, ocupando un 47% del total del cono volcánico, lugar correspondiente al sector este, lado boliviano.
- El material removido por deslizamientos de ladera en el volcán Ollague, está compuesto por material volcánico no consolidado, flujos de detritos intercalados con bloques, cantos, till.
- La magnitud de área determinada para los deslizamientos identificados en las laderas del volcán Ollague, no representa un peligro real para una población determinada de seres vivos, ni algún ecosistema, considerando que la población humana más cercana se encuentra a 4 km. hacia el noreste, muy alejada para que los deslizamientos tengan algún efecto sobre esta.
- La identificación de deslizamientos de laderas en el volcán Ollague, corresponde a áreas extensas, su análisis se realiza en tiempo relativamente corto, esto es posible solamente utilizando imágenes satelitales espectrales.
- La aplicación de la teledetección como técnica de identificación de deslizamientos de laderas representa una metodología novedosa, su utilización ofrece ventajas referidas a la posibilidad de acceder a áreas topográficamente inaccesibles, así mismo aminora los costos económicos producidos por el trabajo tradicional de campo.
- La utilización de la imagen del satélite LANDSAT 8 se debe a la buena resolución espacial que ofrece (30 m.) este valor es empleado con existo en el estudio y análisis de áreas extensas, tal es el caso de las laderas del volcán Ollague.
- Para la diferenciación de las coberturas terrestres, en base a su clase espectral, se aplicó la técnica “CLASIFICACIÓN SUPERVISADA”, debido a que el conocimiento del área del trabajo “in situ” es aceptable, la gran extensión del mismo y la inaccesibilidad topográfica no permitió ingresar a toda el área de estudio.
- La teledetección corresponde a una herramienta de gran utilidad para realizar trabajos a escala espacial y/o temporal amplia, En el caso particular de Landsat TM, la buena resolución espectral (7 bandas) y espacial (30 m × 30 m) de las imágenes, sumadas a la cobertura espacial (180 Km × 180 Km) de cada escena y a su cobertura temporal (desde 1982 hasta 2018), permiten identificar alteraciones ambientales relativamente

pequeñas, evaluar sus efectos a escala regional y determinar tasas de cambio durante la última década

- Los resultados obtenidos muestran que es posible diferenciar con buena precisión deslizamientos de ladera dentro de la matriz de la ladera del volcán Ollague y determinar el área afectada por este tipo de disturbios, mediante un análisis multitemporal de las imágenes satelitales.

## **RECOMENDACIONES.**

- El mapeo de campo en el volcán Ollague, puso en evidencia el peligro presente en el área de estudio, existen zonas topográficamente inaccesibles, zonas con pendiente empinada, zonas inestables, lo cual indica el alto riesgo para la persona que realiza el trabajo de campo, así mismo, demuestra que, una de las mejores opciones para acceder a estas zonas es la utilización de la percepción remota mediante la manipulación de imágenes satelitales, puesto que minimiza el riesgo de sufrir accidentes.
- El análisis espectral para identificar deslizamientos de laderas del volcán Ollague, puede extrapolarse a otros centros volcánicos, minimizando costos y tiempo de trabajo, puesto que el método empleado puede replicarse en diferentes situaciones.
- Es imprescindible, en el proceso de calibración de las imágenes satelitales realizar la corrección radiométrica y corrección atmosférica, este procedimiento nos proporciona escenas con una calidad alta, puesto que elimina aquellas imperfecciones adquiridas en la captación de la señal o aquellas producidas por una mala calibración del sensor del satélite.
- La aplicación de la técnica “Clasificación Supervisada”, debe ser utilizada únicamente cuando se tiene un conocimiento general del área de estudio.
- Para la identificación de deslizamientos en las laderas de un volcán, es recomendable analizar todos los materiales sueltos (lahares, material volcánico, material cuaternario) puesto que la inclinación natural de las laderas en los volcanes, constituye un factor activador para la remoción de todo este material.
- El análisis multitemporal debe realizarse trabajando durante un intervalo de tiempo de 10 años, como mínimo, puesto que la cobertura terrestre presenta cambios

significativos en su conformación, cuando transcurre un tiempo prolongado de cambios.

- Es recomendable, para el análisis de deslizamientos en laderas, trabajar con imágenes satelitales procedentes de la plataforma LANDSAT, esta constelación de satélites posee una biblioteca de datos desde el año de 1982, representando de esta manera una buena referencia para identificar los cambios generados a través del tiempo en zonas susceptibles de sufrir deslizamientos.

## BIBLIOGRAFÍA.

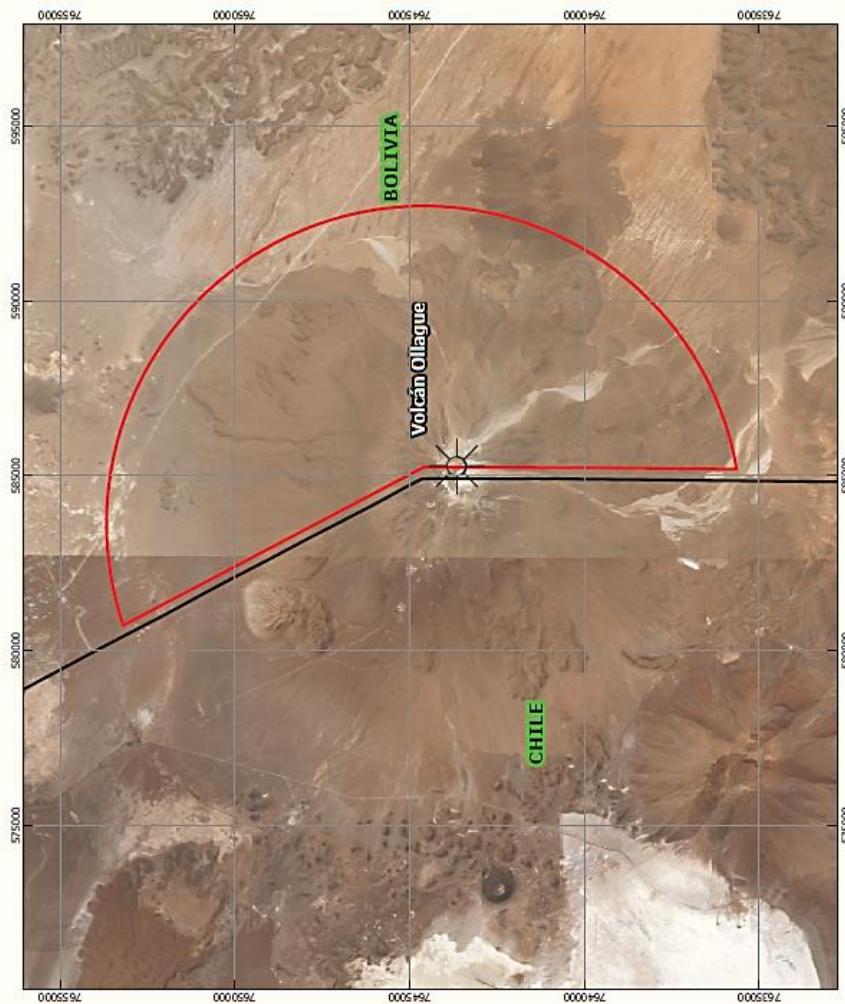
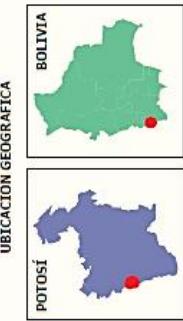
- Ariza, A. (2013), Productos LDCM – Landsat 8, Descripción y Corrección de Productos LANDSAT 8, trabajo de Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá – Colombia.
- Basterra, I., (2006), Teledetección – Procesamiento Digital de Imágenes Satelitales, UNNE, p. 3 – 32.
- Brizuela, I., (2007), Aplicación de Métodos de Corrección Atmosférica de Datos LANDSAT 5 para Análisis Multitemporal XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Ed. Martin 2007. J.B. Kennerley, Geology of Loja Province, Southern Ecuador.
- Castro, S., (----), Discriminación Litológica con ASTER, SEGEMAR, Buenos Aires, p-1 – 7.
- Chuvieco, E., (1990), Fundamentos de Teledetección Espacial, Ediciones RIALP S.A., Madrid.
- Delgado, M., Padilla, F., Barrientos, V., (2010), Mapas Geológicos y Problemas, Ed. Universida de da Coruña, Coruña – España, p. 8 – 12.
- Gonzales, M., Carreño, F., (2007), Aplicación de Imágenes LANDSAT (TM y ETM+) en Estudios Geoestructurales en el NO del Macizo Iberico, Departamento de Geología – Universidad de Alcalá, Coruña – España, p. 1 – 16.
- Guerra, R., (2005), Aplicación de la Teledetección en el Mapeo Geológico utilizando una sub escena de LANDSAT TM, p. 1 – 18.
- Karszenbaum, H., (----), Introducción a la Teledetección Cuantitativa, UBA, Buenos Aires, p. 2 – 46.

- ⊕ Marchionni, D., (2014), La Teledetección por Radar como Fuente de Información Litológica y Estructural, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires.
- ⊕ Marquetti, C., Becchio, R., Nakashima, K., (2004), Aplicación de Datos ASTER para el Mapeo de la Hoja Geológica Andalgalá Catamarca – Argentina, SEGEMAR – JICA, Buenos Aires, p. 1 – 12.
- ⊕ Noyola, M., Hinojosa, A., (2005), Caracterización Litológica de Regiones Desérticas Mediante Técnicas de Percepción Remota, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Baja California – México, p. 1 – 17.
- ⊕ Oliva, A., (2015), Evaluación de Riesgos por Deslizamientos de Laderas, Evaluación, Grupo ITEICO, México, p. 1 – 43.
- ⊕ Pérez, D., (2007), Introducción a los Sensores Remotos – Aplicaciones en Geología, Dpto. Cs. Geológicas – UBA, Buenos Aires, p. 2 – 45.
- ⊕ Puerta, R., (2013), Manual de ArcGIS – Nivel Intermedio, Departamento de Ciencias de los Recursos Naturales Renovables – Universidad Agraria de la Selva, Perú, p. 8 – 21.
- ⊕ Ruiz – Armenta, J., (----), Técnicas de Procesamiento de Imágenes en la Exploración de Yacimientos Minerales de Origen Hidrotermal, Instituto de Geofísica – UNAM, Distrito Federal – México, p. 2 – 34.
- ⊕ Schalamuk, I., (2010), Aplicación de la Teledetección Espacial Óptica y de Radar para el Análisis Geológico y Detección de Áreas Mineralizadas en el Sector Central del Macizo del Deseado, Provincia de Santa Cruz, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires.
- ⊕ Schomwandt, D., (-----), Teledetección Aplicada a las Ciencias Agronómicas y Recursos Naturales, SIIA, p. 3 – 62.
- ⊕ Sobrino, J., Paolini, L., (2002), Detección de Deslizamientos de Ladera mediante Imágenes LANDSAT TM, Revista de Teledetección - Universidad de Valencia, Valencia – España, p. 21 – 30.
- ⊕ Vicens, L., (2009), Adquisición de Datos: lección 9, Clasificación de Imágenes, Programa UNIGIS de Postgrado y Master Internacional a distancia en Sistemas de Información Geográfica, UNIGIS Girona.

## **REFERENCIAS INTERNET.**

- ⊕ Volcanes, (2018), Los Volcanes, Origen, Clasificación, Erupciones, Disponible en: [<https://bibliotecadeinvestigaciones.wordpress.com/ciencias-de-la-tierra/geologia/los-volcanes/>], Consultado en: (14 de mayo de 2018; hrs. 19:30).
- ⊕ Teledetección, (2018), Teledetección en Geología, Disponible en: [[http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1852-77442014000107](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-77442014000107)], Consultado en: (27 de abril de 2018; hrs. 19:30).
- ⊕ Teledetección, (2018), Teledetección aplicada a áreas mineralizadas, Disponible en: [[https://www.researchgate.net/publication/262757003\\_Aplicacion\\_de\\_la\\_teledeteccion\\_espacial\\_optica\\_y\\_de\\_radar\\_para\\_el\\_analisis\\_geologico\\_y\\_la\\_deteccion\\_de\\_areas\\_mineralizadas\\_en\\_el\\_sector\\_central\\_del\\_Macizo\\_del\\_Deseado\\_Provincia\\_de\\_Santa\\_Cruz](https://www.researchgate.net/publication/262757003_Aplicacion_de_la_teledeteccion_espacial_optica_y_de_radar_para_el_analisis_geologico_y_la_deteccion_de_areas_mineralizadas_en_el_sector_central_del_Macizo_del_Deseado_Provincia_de_Santa_Cruz)], Consultado en: (27 de abril de 2018; hrs. 21:00)
- ⊕ Satélites LANDSAT, (2018), LANDSAT 8, Disponible en: [<http://geocento.es/galeria-de-satelites-para-buscar-y-adquirir-imagenes/satelite-imagenes-landsat-8/>], Consultado en: (3 de septiembre de 2018; hrs. 14:00).

# **ANEXOS**

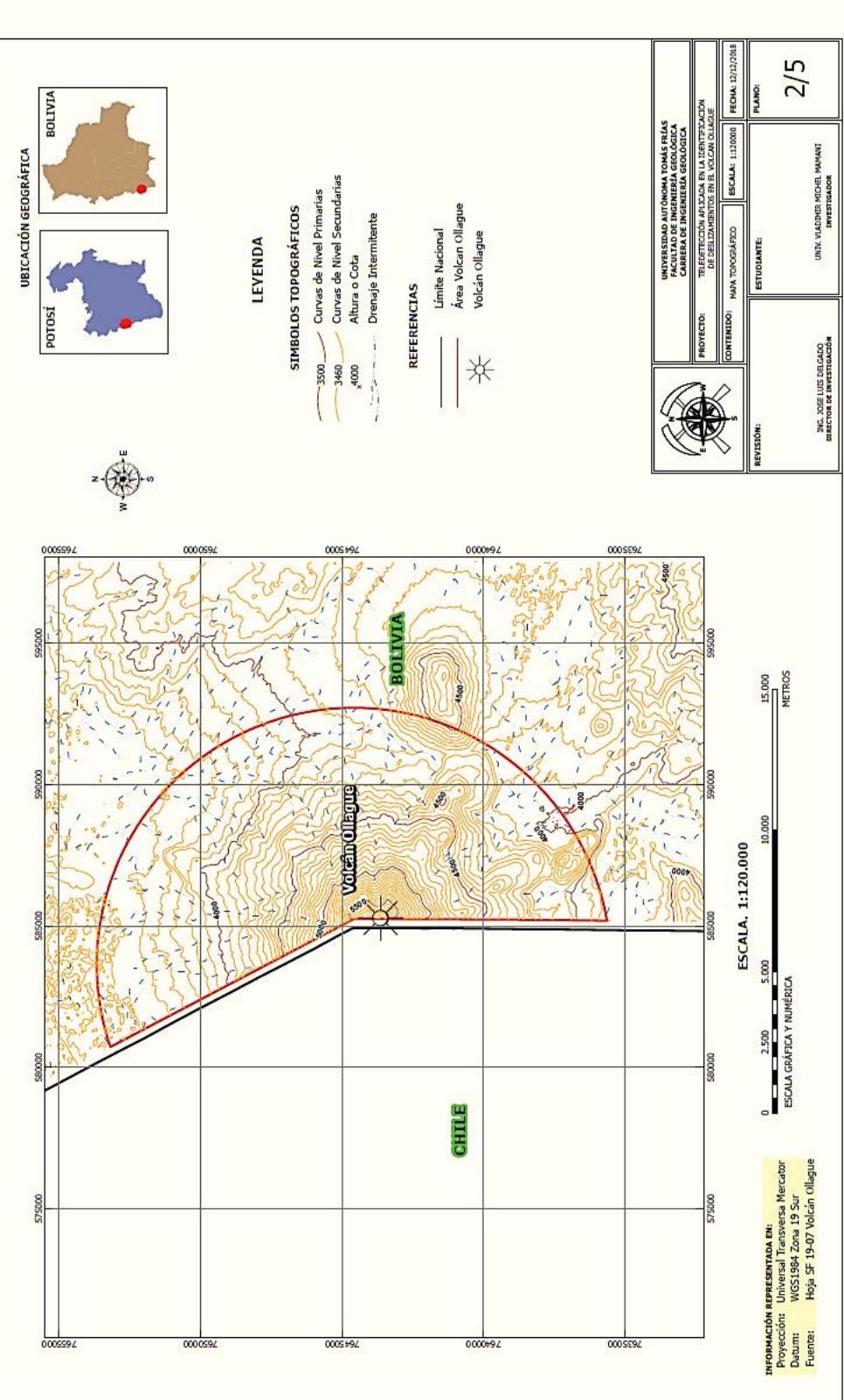


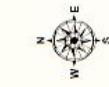
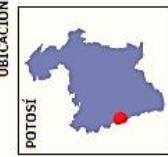
REFERENCIAS

Límite Nacional  
Área Volcán Ollague  
Volcán Ollague

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA TONALÁ PELÍAS	
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
CARRERA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
PROYECTO:	TELEDETECIÓN APLICADA EN LA IDENTIFICACIÓN
CONTENIDO:	DE RENDAMIENTOS EN EL VOLCÁN OLLAGUE
IMAGEN SATELITAL	ESCALA: 1:50000
ESTUDIANTE:	FECHA: 03/09/2018
DIRECCIÓN: DR. JOSÉ LUIS DELGADO	PLANO:
DATUM: UNIV. VIADIOS MICHEL MAMANI	1/5
FUENTES: INVESTIGADOR	

INFORMACIÓN REPRESENTADA EN:  
Proyección: Universal Transversa Mercator  
Datum: WGS1984 Zona 19 Sur  
Fuente: Google Earth





## LEYENDA UNIDADES GEOLÓGICAS

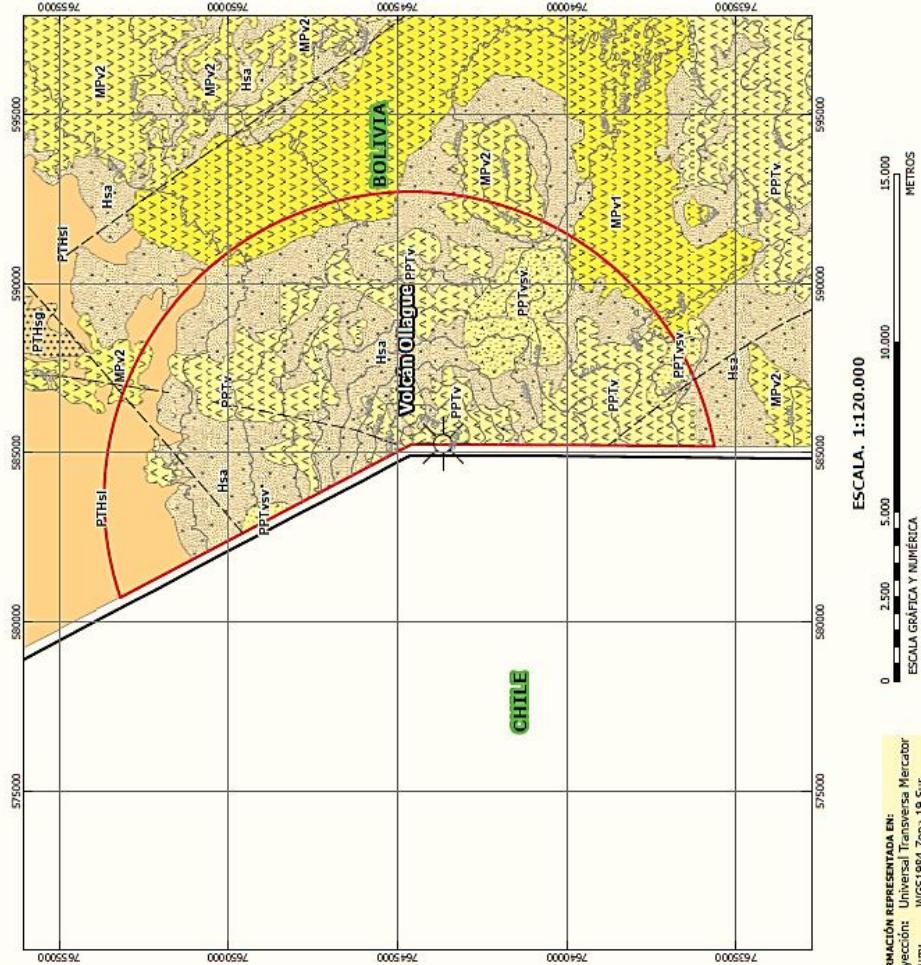
	Holoceno Sedimentario Aluvial y Coluvial (Hsa). Bloques, cantos, gravas, arenas, limos y arcillas.
	Pleistoceno o Holoceno, sedimentario laústrie y fluvial, gravas, arenas, limos, arcillas, calizas y estromatitas (Galeras), TIL.
	Pleistoceno o Holoceno, sedimentario glacial (PThs1g), TIL.
	Pleoceno a Pleistoceno, volcánico, coladas de lava andesítica (Cerro Azul, Cerro Colorado, Cerro Negro).
	Pleoceno o a Pleistoceno, subvolcánico, domos dacíticos asociados a volcanismo resurgente y fumarol (eventos Ollague, San Andrés, Ollagüe).
	Mioceno o Plioceno, volcánico, dacítico (MPv2). Coladas de lava andesítica a dacítica, rocas volcánicas sedimentarias y productadas asociadas a estructuras volcánicas.
	Mioceno o Plioceno, volcánico, productadas dacíticas a tafílicas, con actividad volcánica variable de sedimentaria (eventos Peñas Grandes, Tomasa).

## ESTRUCTURAS

	Contacto Geológico
	Falla Intensa
	Curvas de Nivel
	Límite Nacional
	Área Volcán Ollagüe

## REFERENCIAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA TOMAS FRÍAS FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA CÁMARA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	PROYECTO: TELÉTOPOGRAFÍA EN LA IDENTIFICACIÓN DE DESLIZAMIENTOS EN EL VOLCÁN OLLAGÜE	CONTENIDO: MAPA GEOLÓGICO	FECHA: 12/12/2018	PLANO:
				3/5
REVISIÓN:		ESTUDIANTE:		
ING. JOSE LUIS DELGADO DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN		UNIV. VLAUDIR MICHÉL MAMANI INVESTIGADOR		





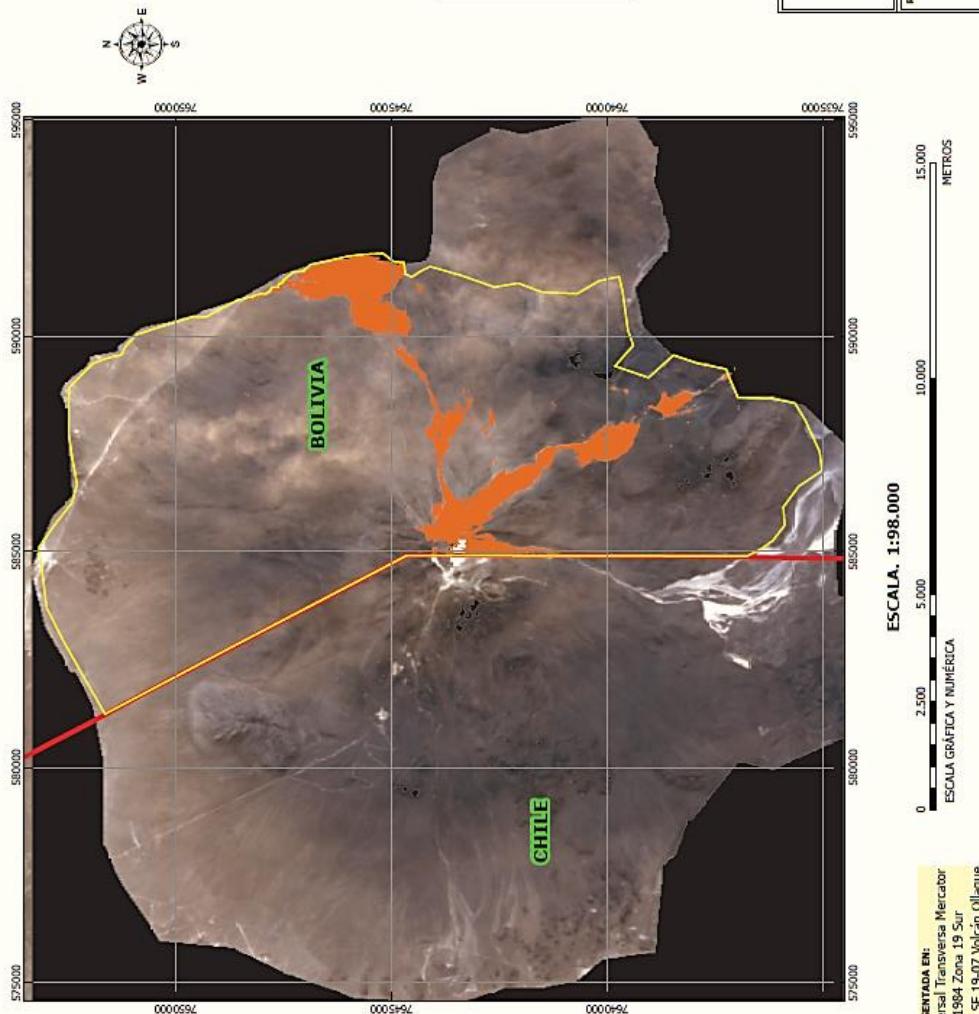
**REFERENCIAS**

- Límite Nacional
- Área Volcán Ollague
- Volcán Ollague

**LEYENDA**

	Deslizamiento de Ladera - Año 2018
ÁREA:	7.6 km <sup>2</sup>
PERÍMETRO:	91.16 km
MATERIAL:	Flujos de detritos intercalados con bloques, cantos, till.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA TÓMAS FRÍAS FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLOGICA CARRERA DE INGENIERIA GEOLÓGICA
PROYECTO: TEL EXPOSICIÓN ALTAADA EN LA IDENTIFICACIÓN DE DESLIZAMIENTOS EN EL VOLCÁN CILLAGUE
CONTENIDO: HOJA DE IDENTIFICACIÓN DE DESLIZAMIENTOS - AÑO 2018
ESCALA: 1:98000 FECHA: 12/12/2018
ESTUDIANTE: INIC. ROCIO LUIS DELGADO DIRECCION DE INVESTIGACIONES UNIT. V. ALDOSTRE MICHÉL MARÍA INVESTIGADORA
REVISIÓN: INIC. ROCIO LUIS DELGADO DIRECCION DE INVESTIGACIONES
PLANO: <b>4/5</b>





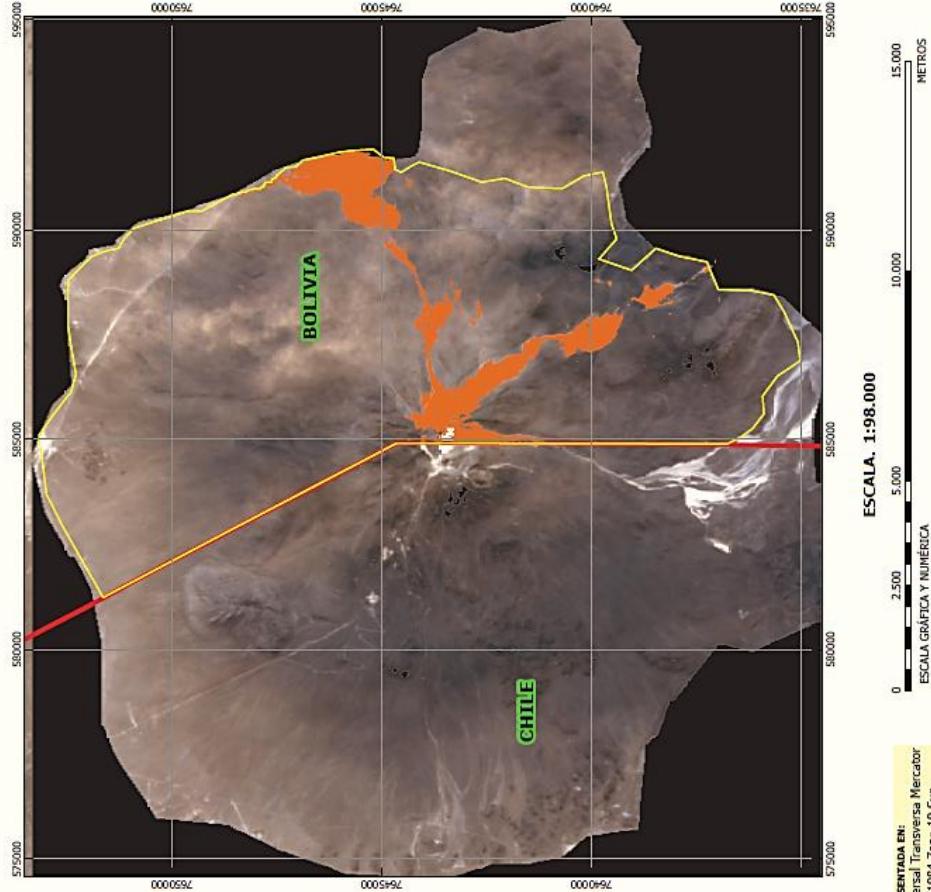
REFERENCIAS

Límite Nacional  
Área Volcán Ollague  
Volcán Ollague

LEYENDA

Deslizamiento de Ladera - Año 2018

ÁREA: 7.6 km<sup>2</sup>  
PERÍMETRO: 91,16 km  
MATERIAL: Flujos de detritos intercalados con bloques, cantos, till.



INFORMACIÓN REPRESENTADA EN:  
Proyección: Universal Transversa Mercator  
Datum: WGS1984\_Zona 19-Sur  
Fuente: Hoja SF 19-07 Volcán Ollague

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA TOMÁS FRÍAS	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
CARRERA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	PROYECTO: TE_SISTEMAS DE MONITOREO Y CLASIFICACIÓN DE DESLIZAMIENTOS EN EL VOLCÁN OLLAGUE
CONTENIDO: MAPA DE IDENTIFICACIÓN DE DESLIZAMIENTOS - AÑO 2018	ESCALA: 1:98,000
ESTUDIANTE:	FECHA: 22/12/2018
REVISIÓN:	
DRA. ROCÍO LUIS DÍAZ COORDINADORA DE INVESTIGACIÓN	
DR. VÍCTOR MIGUEL MAMANI DIRECTOR DE ESTADÍCIA	
PLANO:	4/5

## **REPORTE FOTOGRÁFICO.**



**FOTOGRAFÍA 1.** Vista panorámica del volcán Ollague, en la cima puede apreciarse la fumarola de gas.



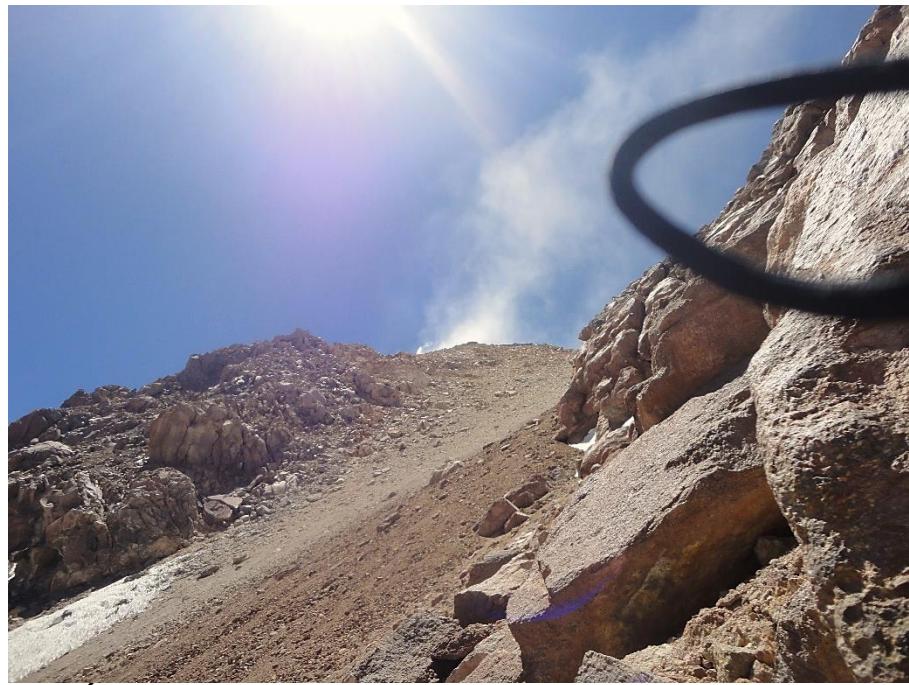
**FOTOGRAFÍA 2.** Domo dacítico, ubicado hacia el noreste del volcán Ollague.



**FOTOGRAFÍA 3.** Ubicación geográfica a través de los planos de control



**FOTOGRAFÍA 4.** Vista de la ladera sureste del volcán Ollague, se observa parte del material que está siendo arrastrado pendiente abajo.



**FOTOGRAFÍA 5.** Imagen correspondiente a la ladera del volcán, la pendiente es muy pronunciada, además se observa el material volcánico no consolidado que es susceptible de sufrir deslizamientos.



**FOTOGRAFÍA 6.** Deslizamientos de ladera en el volcán Ollague, compuesto de flujos de detritos intercalados con bloques, cantos, till.



**FOTOGRAFÍA 7.** Deslizamientos de ladera en el volcán Ollague, compuesto de flujos de detritos intercalados con bloques, cantos, till, dispuestos a pie de monte.



**FOTOGRAFÍA 8.** Detritos intercalados con bloques, cantos, till, dispuestos a pie de monte del volcán Ollague.