



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA



**“IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS DE PASIVOS AMBIENTALES
MINEROS MEDIANTE LA TELEDETECCIÓN EN EL DISTRITO
DE ANANEA, PROVINCIA DE SAN ANTONIO DE PUTINA –
PUNO”**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. RODRIGO JOSÉ QUINTO CÁCERES

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEÓLOGO

PUNO – PERÚ

2021



DEDICATORIA

A Dios, por guiarme y mantenerme firme durante todo mi camino personal y profesional, acompañándome en cada acierto y caída.

A mis padres, Wilfredo Quinto y Tereza Cáceres, por su amor incondicional, su esfuerzo y todas las enseñanzas que día a día cultivaron en mí, dándome una formación en valores y principios, que llevaré conmigo cada día de mi vida.

A mi hermana, Nathaly Quinto, quien, con su alegría, su audacia, su tenacidad y dedicación, han servido de motivación y guía para mi persona.

A mi enamorada, Julimar Aguilar, por su amor incondicional, su fe, sus consejos, su ejemplo y la motivación que me ha impulsado a llegar donde estoy.

A mi familia, que vivió momentos difíciles debido a la pandemia del COVID 19, y se mantuvo unida y con Dios.

Rodrigo José Quinto Cáceres



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica, cuyos docentes y compañeros me brindaron los conocimientos y valores necesarios para mi desarrollo profesional.

Al Ing. Agustín Víctor Vélez Vilca, por su disposición, su experiencia, su orientación y asesoramiento incondicional en la elaboración de esta tesis y siendo docente de mi carrera universitaria.

Al USCS (Servicio Geológico de los Estados Unidos), por brindarme el acceso y las herramientas necesarias para el desarrollo de mi investigación.

A mi gran amigo, el Ing. Cristian Vélez Cruz, por su apoyo y respaldo en mi trabajo de investigación.

Rodrigo José Quinto Cáceres



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 17

ABSTRACT..... 18

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES: 20

1.1.1. Antecedentes Internacionales: 20

1.1.2. Antecedentes Nacionales: 22

1.1.3. Antecedentes Regionales: 24

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA: 26

1.2.1 Formulación del Problema: 27

1.2.1.1. Problema General: 27

1.2.1.2. Problemas Específicos: 27

1.3. JUSTIFICACIÓN:..... 28

1.4. HIPÓTESIS:..... 29

1.4.1. Hipótesis General:..... 29

1.4.2. Hipótesis Específicas: 29

1.5. OBJETIVOS: 29

1.5.1. Objetivo General:..... 29

1.5.2. Objetivos Específicos: 29



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. FUNDAMENTOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA:	31
2.1.1. Teledetección:	31
2.1.2. Elementos de la Teledetección:	31
2.1.3. Radiación Electromagnética (REM):	32
2.1.4. El Espectro Electromagnético (EEM):	34
2.1.5. Firmas Espectrales:	36
2.1.6. Tipos de Sensores:	36
2.1.6.1. Sensores Pasivos:	36
2.1.6.2. Sensores Activos:	38
2.1.7. Resolución de los Sensores Remotos:	39
2.1.7.1. Resolución Espacial:	39
2.1.7.2. Resolución Espectral:	39
2.1.7.3. Resolución Radiométrica:	40
2.1.7.4. Resolución Temporal:	42
2.1.8. Tipos de Imágenes de Teledetección:	43
2.1.8.1. Imagen Multiespectral (MS):	43
2.1.8.2. Imagen Pancromática (PAN):	44
2.1.8.3. Imagen Fusionada (PS):	44
2.1.8.4. Imagen Estéreo:	45
2.2. EL SATELITE LANDSAT 8:	45
2.2.1. El Programa LANDSAT:	45
2.2.2. Landsat 8:	47
2.2.3. Bandas del Satélite:	50
2.2.4. Combinaciones de Bandas:	51
2.2.5. Índices Espectrales:	52



2.2.5.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI):	52
2.2.5.2. Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI):	53
2.2.5.3. Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI):	53
2.3. TRATAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN:	54
2.3.1. Corrección de la Imagen:	54
2.3.1.1. Corrección Radiométrica:	54
2.3.1.2. Corrección Geométrica:	55
2.3.1.3. Corrección Atmosférica:	56
2.3.2. Clasificación Digital de la Imagen:	58
2.3.2.1. Clasificación Supervisada:	58
2.3.2.2. Clasificación No Supervisada:	59
2.4. TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG):.....	60
2.4.1. Funciones de un SIG:.....	61
2.4.1.1. Entrada de Datos:.....	61
2.4.1.2. Almacenamiento y Organización de Datos:	62
2.4.1.3. Análisis y Transformaciones:	64
2.4.1.4. Representación Visual:	65
2.5. PASIVOS AMBIENTALES MINEROS:	65
2.5.1. Definición:	65
2.5.2. Tipos de Pasivos Ambientales:	65
2.5.2.1. Labor Minera:	66
2.5.2.2. Residuos Mineros:	67
2.5.2.3. Infraestructura:	67
2.5.3. Normativa Legal:	68
2.5.4. Pasivos Ambientales Mineros en Ananea - Puno:	69



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES Y EQUIPOS:	70
3.2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN:	71
3.2.1. Adquisición de información y material bibliográfico:.....	71
3.2.2. Adquisición de datos:.....	71
3.2.3. Procesamiento y Análisis de Datos:.....	72
3.2.4. Clasificación de la Imagen:.....	72
3.2.5. Análisis de Índices Espectrales:.....	73
3.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS:	73

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. UBICACIÓN:	74
4.2. LÍMITES:	74
4.3. EXTENSIÓN SUPERFICIAL:	74
4.4. POBLACIÓN:	74
4.5. CUENCAS HIDROGRÁFICAS:	76
4.6. GEOMORFOLOGÍA:	77
4.7. LITO - ESTRATIGRAFÍA:	80
4.8. GEOLOGÍA ECONÓMICA:	84
4.8.1. Depósitos Metálicos:.....	84
4.9. ADQUISICIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS (PAMs):	85
4.10. ADQUISICIÓN DE DATOS SATELITALES:	87
4.10.1. Modelos de Elevación Digital (DEM):.....	87
4.10.2. Imágenes Satelitales LANDSAT 8:.....	88
4.11. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS SATELITALES:	91
4.11.1. Delimitación del Área de Investigación:	91



4.11.2. Tratamiento Digital de la Imagen LANDSAT 8:	91
4.11.2.1. Corrección Radiométrica:	91
4.11.2.2. Corrección Atmosférica:	93
4.11.2.3. Corrección Geométrica:	96
4.11.3. Combinación de Bandas:	96
4.12. CLASIFICACIÓN DE LA IMAGEN:.....	99
4.12.1. Definición de Clases:	99
4.12.2. Clasificación Supervisada:.....	100

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. DETERMINACIÓN DE ÁREAS AFECTADAS POR LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN CUERPOS DE AGUA SUPERFICIAL Y GLACIARES.....	103
5.1.1. Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI):	103
5.1.2. Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI):.....	104
5.1.3. Análisis de índices espectrales y cálculo de áreas afectadas en cuerpos de agua superficial y glaciares.	105
5.1.3.1. Índices Espectrales de Glaciares:.....	105
5.1.3.2. Índices Espectrales en Cuerpos de Agua Superficial:	106
5.2. RECONOCIMIENTO DE ÁREAS AFECTADAS POR LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN SUELOS Y VEGETACIÓN.	108
5.2.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI):	108
5.2.2. Análisis de índices espectrales y cálculo de áreas afectadas en suelos y vegetación:	109
5.2.2.1. Índices Espectrales en Material Vegetativo:.....	110
5.2.2.2. Índices Espectrales en Suelos:	111
5.3. IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS AFECTADAS POR LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN ZONAS URBANAS	112



5.3.1. Análisis de índices espectrales y cálculo de áreas afectadas en zonas urbanas:	112
VI. CONCLUSIONES	113
VII. RECOMENDACIONES	114
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
ANEXOS.....	118

ÁREA: Seguridad y Medio Ambiente.

LÍNEA: Teledetección y Sensores Remotos.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 12 de noviembre del 2021



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura Nro. 1: Componentes de un Sistema de Teledetección. Fuente: Chuvieco (1995).	32
Figura Nro. 2: Propagación de la Energía Electromagnética. Fuente: Pérez y Muñoz (2006)	33
Figura Nro. 3: El Espectro Electromagnético. Fuente: Chuvieco (2002)	35
Figura Nro. 4: Firmas Espectrales de una Imagen Sentinel - 2B. Fuente: Plataforma Copernicus (2020)	36
Figura Nro. 5: Sensor Pasivo. Fuente: Bravo (2017).....	37
Figura Nro. 6: Banda multiespectral del Sensor Pasivo Landsat 8. Fuente: USGS (2019)	37
Figura Nro.7: Sensor Activo. Fuente: Bravo (2017).....	38
Figura Nro.8: Imagen Tridimensional del Sensor Activo LIDAR. Fuente: Open Topography (2020).....	38
Figura Nro.9: Comparación de Píxel de una Imagen. Fuente: Bravo (2017)	39
Figura Nro.10: Comparación de número y ancho de las bandas RGB, Multiespectral e Hiperespectral.....	40
Figura Nro.11: Niveles de bit X píxel.....	41
Figura Nro.12: Resolución Radiométrica de una Imagen Satelital. Fuente: Bravo (2017)	41
Figura Nro.13: Mayor resolución temporal gracias a la reorientación de sensores en pases consecutivos. Fuente: Labrador et al (2012).....	42
Figura Nro.14: Imagen Multiespectral R, G, B, NIR y SWIR e índices derivados.	43
Figura Nro.15: Imagen Fusionada con resolución 15 metros. Fuente: USGS Landsat 8 (2020).	44
Figura Nro.16: Imagen Estéreo con distintos ángulos de visión. Fuente: Bravo (2017)	45
Figura Nro.17: Satélite ERTS – 1, lanzado en 1972. Fuente: USGS (2019).....	46
Figura Nro.18: Satélite Landsat 8, vista desde el espacio. Fuente: USGS (2019)	48



Figura Nro. 19: Sensor OLI y TIRS del satélite Landsat 8. Fuente: UCSG (2019)	49
Figura Nro. 20: Combinación de bandas RGB del satélite Landsat 8. Fuente: Gis & Beers (2017)	51
Figura Nro. 21: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	52
Figura Nro. 22: Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI).....	53
Figura Nro. 23: Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI).	54
Figura Nro. 24: Imagen Landsat 8 calibrada radiométricamente.....	55
Figura Nro. 25: Imagen Landsat 8 calibrada geométricamente.	56
Figura Nro. 26: Imagen Landsat 8 calibrada atmosféricamente.	57
Figura Nro. 27: Clasificación Supervisada a partir de los píxeles de las áreas de entrenamiento.	59
Figura Nro. 28: Componentes de un Sistema de Información Geográfica (SIG).	61
Figura Nro. 29: Modelo Vectorial (puntos, líneas y polígonos)	62
Figura Nro. 30: Modelo Raster.	63
Figura Nro. 31: Análisis y transformación de Modelo de Elevación Digital (DEM)..	64
Figura Nro. 32: Representación visual de un SIG.	65
Figura Nro. 33: Mapa de Ubicación de la zona de estudio.	75
Figura Nro. 34: Mapa de Subcuencas Hidrográficas del distrito de Ananea.	76
Figura Nro. 35: Mapa de Pendientes del distrito de Ananea.	78
Figura Nro. 36: Mapa Geomorfológico del distrito de Ananea.	79
Figura Nro. 37: Mapa Geológico del distrito de Ananea. FUENTE: Geocatmin.....	82
Figura Nro. 38: Columna Estratigráfica de los cuadrángulos de Putina y la Rinconada (30x – 30y) FUENTE: INGEMMET, boletín N° 66 (1996)	83
Figura Nro. 39: Mapa de ubicación de Pasivos Ambientales Mineros del distrito de Ananea.	87
Figura Nro. 40: Modelos de Elevación Digital ALOS PALSAR con resolución 12,5 metros, para el área de estudio.	88



Figura Nro. 41: Metadata de la Imagen Satelital LANDSAT 8, elegida para la zona de estudio.....	89
Figura Nro. 42: Bandas espectrales del sensor OLI, de la imagen satelital LC08_L1TP_002070_20210502_20210508_01_T1	90
Figura Nro. 43: Modelo de Elevación Digital ALOS PALSAR (12,5m) corregido y recortado en base al área de estudio.	91
Figura Nro. 44: Cálculo de Radiancia aplicando el re-escalamiento Apply FLASHH Settings.	92
Figura Nro. 45: Factor de escala de Radiancia.	93
Figura Nro. 46: Parámetros de corrección atmosférica del módulo de FLAASH.	95
Figura Nro. 47: Corrección atmosférica de la Imagen satelital LANSAT 8.....	96
Figura Nro. 48: Combinación 4 – 3 – 2 (Color Natural).....	97
Figura Nro. 49: Combinación 5 – 4 – 3 (Color Infrarrojo)	97
Figura Nro. 50: Combinación 7 – 6 – 4 (Falso Color).....	98
Figura Nro. 51: Combinación 7 – 6 – 5 (Penetración Atmosférica).....	98
Figura Nro. 52: Combinación 7 – 4 – 2 (Geología)	99
Figura Nro. 53: Definición de clases en el área de estudio.	100
Figura Nro. 54: Clasificación Supervisada de la Imagen LANSAT 8.....	100
Figura Nro. 55: Áreas principales de impacto producidas por los Pasivos Ambientales Mineros.....	102
Figura Nro. 56: Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) de la zona de estudio.....	103
Figura Nro. 57: Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI) de la zona de estudio	104
Figura Nro. 58: Rangos Espectrales de los Glaciares	105
Figura Nro. 59: Rangos espectrales de cuerpos de agua saludables	106
Figura Nro. 60: Rangos espectrales de cuerpos de agua medianamente saludables... ..	106
Figura Nro. 61: Rangos espectrales de cuerpos de agua poco saludables	107
Figura Nro. 62: Rangos espectrales de aguas contaminadas por relaves.....	108



Figura Nro. 63: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) de la zona de estudio.....	109
Figura Nro. 64: Rangos espectrales del material vegetativo muy saludable.	110
Figura Nro. 65: Rangos espectrales del material vegetativo medianamente saludable.	110
Figura Nro. 66: Rangos espectrales de suelos contaminados.	111



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla Nro. 1: Características de la región espectral.....	35
Tabla Nro. 2: Evolución del programa LANDSAT.....	47
Tabla Nro. 3: Características del satélite LANDSAT 8.....	50
Tabla Nro. 4: Bandas del satélite LANDSAT 8.....	50
Tabla Nro. 5: Combinación de Bandas RGB del satélite LANDSAT 8.....	51
Tabla Nro. 6: Cálculo y descripción del NDVI entre -1 a 1. Fuente: Bravo (2017).....	52
Tabla Nro. 7: Ventajas de un Modelo Vectorial y un Modelo Raster.....	63
Tabla Nro. 8: Desventajas de un Modelo Vectorial y un Modelo Raster.....	64
Tabla Nro. 9: Tipos de Pasivos Ambientales.....	66
Tabla Nro. 10: Actualización del Inventario de Pasivos Ambientales.¡Error! Marcador no definido.	
Tabla Nro. 11: Coordenadas UTM con referencia a la Zona de Estudio.....	74
Tabla Nro. 12: Límites de la Zona de Estudio.....	74
Tabla Nro. 13: Cuencas Hidrográficas de la zona de estudio.....	76
Tabla Nro. 14: Unidades Geomorfológicas del distrito de Ananea.....	77
Tabla Nro. 15: Pasivos Ambientales del distrito de Ananea.....	85
Tabla Nro. 16: Características de la Imagen Satelital LANSAT 8, elegida para la zona de estudio.....	88
Tabla Nro. 17: Modelos de Atmósfera.....	95
Tabla Nro. 18: Áreas de Clases e Histograma de la zona de estudio.....	101
Tabla Nro. 19: Análisis de cuerpos de agua superficial y glaciares.....	105
Tabla Nro. 20: Análisis de suelos y vegetación.....	109
Tabla Nro. 21: Análisis de zonas urbanas.....	112



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- DEM:** Modelo de Elevación Digital.
- DGM:** Dirección General de Minería.
- EEM:** Espectro Electromagnético.
- ETM+:** Enhanced Thematic Mapper Plus.
- ERTS:** Earth Resources Technology Satellite.
- FLAASH:** Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Hypercubes.
- Ha:** Hectáreas.
- INGEMMET:** Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- IRC:** Infrarrojo Cercano.
- IRM:** Infrarrojo Medio.
- IRT:** Infrarrojo Térmico.
- LDCM:** Landsat Data Continuity Mission.
- MINEM:** Ministerios de Energía y Minas.
- MS:** Imagen Multiespectral.
- MSS:** Multiespectral Scanner Sensor
- NASA:** National Aeronautics Space Administration
- ND:** Niveles Digitales.
- NDSI:** Índice de Nieve de Diferencia Normalizada.
- NDVI:** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.
- NDWI:** Índice de Agua de Diferencia Normalizada.
- OLI:** Operational Land Imager.
- PAN:** Imagen Pancromática.
- PAMs:** Pasivos Ambientales Mineros.



PS: Pan – sharpened.

RM: Resolución Ministerial.

RBV: Return Bean Vidicon

REM: Radiación Electromagnética.

SIG: Sistemas de Información Geográfica.

TIRS: Thermal Infrared Sensor.

TM: Thematic Mapper

USGS: Servicio Geológico de los Estados Unidos



RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo por objetivo principal identificar los impactos de los pasivos ambientales mineros mediante la teledetección en el distrito de Ananea, Provincia de San Antonio de Putina – Puno, ubicado dentro de los cuadrángulos 30x y 30y. Esta investigación posee una metodología cuantitativa, del tipo descriptivo - transversal, pues no se manipuló deliberadamente variables de campo, sin embargo, se utilizó información espectral del satélite LANDSAT 8 del año 2021, proporcionada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), y los datos del inventario de pasivos ambientales mineros generado por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), y así, se realizó un procesamiento y análisis mediante los programas ArcGis 10.5 y ENVI 5.3, determinando el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI), el Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI), el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), y las firmas espectrales de cada elemento de la zona de estudio. Esto dio como resultado, que el área total de los cuerpos de agua afectados por los pasivos ambientales mineros, comprende un total de 1341.9 Ha., mientras que los glaciares que se ven comprometidos por estos, constituyen un área de 307.29 Ha.; de la misma forma, los suelos y vegetación dañados, integran un área total de 14549.2 Ha.; y las zonas urbanas afectadas poseen un área total de 750.81 Ha.; cada elemento analizado fue clasificado y cuantificado de acuerdo al nivel de degradación o contaminación que reflejaba su signatura espectral. Finalmente, con los cálculos obtenidos, esta investigación servirá como fuente de información geoespacial, que puede ser utilizada por instituciones públicas o privadas para la remediación y/o mitigación de los pasivos ambientales mineros.



Palabras Clave: Firmas Espectrales, Impacto Ambiental, Landsat 8, Pasivos Ambientales.

ABSTRACT

The main objective of this research work was to identify the impacts of mining environmental liabilities through remote sensing in the Ananea district, San Antonio de Putina Province - Puno, located within the 30x and 30y quadrangles. This research has a quantitative methodology, of the descriptive - transversal type, since field variables were not deliberately manipulated, however, spectral information from the LANDSAT 8 satellite of the year 2021, provided by the United States Geological Survey (USGS), was used. and the data from the inventory of mining environmental liabilities generated by the Ministry of Energy and Mines (MINEM), and thus, a processing and analysis was carried out using the ArcGis 10.5 and ENVI 5.3 programs, determining the Normalized Differential Water Index (NDWI), the Normalized Differential Snow Index (NDSI), the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and the spectral signatures of each element of the study area. This resulted in the total area of the water bodies affected by mining environmental liabilities, comprising a total of 1,341.9 Ha., While the glaciers that are compromised by these, constitute an area of 307.29 Ha .; in the same way, the damaged soils and vegetation make up a total area of 14,549.2 Ha .; and the affected urban areas have a total area of 750.81 Ha .; Each element analyzed was classified and quantified according to the level of degradation or contamination that its spectral signature reflected. Finally, with the calculations obtained, this research will serve as a source of geospatial information, which can be used by public or private institutions for the remediation and / or mitigation of mining environmental liabilities.



Keywords: Spectral Signatures, Environmental Impact, Landsat 8, Environmental Liabilities.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El distrito de Ananea, ubicado a 4660 m s. n. m. en la provincia de San Antonio de Putina – Puno, es conocido por su actividad minera desde el siglo pasado, y es un caso particular debido a su altitud y las dificultades geográficas que presenta; lamentablemente, la explotación de sus recursos ha sido de manera informal e ilegal, ya que dichas explotaciones han dejado a través de los años diversos pasivos ambientales, los cuales se generaron cuando las actividades mineras abandonaron el lugar donde operaban, sin reparar los daños ambientales que ocasionaron. Estos pasivos, contaminaron los cuerpos de agua, suelos, vegetación y afectaron la salud de la población que vive cerca de estos.

El Ministerio de Energía y Minas (MINEM), genera el inventario, la clasificación y actualización de los pasivos ambientales en el Perú, sin embargo, no proporciona información sobre el área de influencia de estos pasivos, ni el nivel de impacto que estos generan en los componentes terrestres; aunado a esto, los responsables de las operaciones mineras no presentan planes para la remediación de estos pasivos, perjudicando así, no solo al medio ambiente, sino a la sociedad en su conjunto.

Es así, que la presente investigación utilizó técnicas de teledetección para la adquisición de datos de la superficie terrestre, con el satélite LANDSAT 8. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor, generó una serie de datos que fueron procesados para obtener información interpretable y poder determinar las áreas de



impacto de dichos pasivos ambientales mineros, para así poder cuantificarlos y hacer análisis espectral de cada elemento de la superficie terrestre.

1.1. ANTECEDENTES:

1.1.1. Antecedentes Internacionales:

Buzzi et al. (2017) "*Cartografía de calizas con datos hiperespectrales AISA Eagle II en una zona montañosa con vegetación: una corrección atmosférica geológicamente orientada*" Las calizas son rocas objeto de atención preferente en la exploración de petróleo, y afloran con frecuencia en zonas extensas con diferencias espectrales mínimas entre distintas formaciones geológicas. Las absorciones típicas de carbonatos en 2,2 y 2,3 μm no forman parte del intervalo de longitudes de onda del AISA Eagle II (0,4-0,97 μm), con una resolución espectral de 0,048 μm en 128 canales y 1 m de resolución espacial. La zona de estudio es una montaña rocosa carbonatada con vegetación densa en el prepirineo catalán (Mont - rebei, Lleida). El enmascaramiento de las áreas cubiertas por vegetación y los efectos de sombra anteceden necesariamente al análisis geológico usando imágenes hiperespectrales. Las formaciones calizas afloran en las laderas montañosas, en crestas rocosas poco extensas y amplios abanicos de cantos sueltos. El suelo de distintas formaciones geológicas se distingue espectralmente sólo por su reflectancia global en distintas formaciones geológicas. Los afloramientos rocosos presentan absorciones típicas de óxidos de hierro en las costras sobre las superficies meteorizadas de las rocas que los distinguen de las formaciones de cantos en derrubios. El uso de espectros de campo seleccionados con criterios geológicos en la corrección atmosférica de imágenes hiperespectrales, mejora la capacidad cartográfica en zonas con formaciones geológicas litológicamente similares y respuestas espectrales homogéneas.



Tello, L. & Díaz, J. (2021). *“Análisis de la contaminación ambiental usando técnicas de teledetección y análisis de componentes principales”* El estudio muestra uno de los principales problemas en Colombia, que es la contaminación ambiental debido al crecimiento de la población y la industrialización. La contaminación afecta a las grandes ciudades, perjudicando el medio ambiente y la salud humana. Es por ello que se presenta una metodología para el análisis de la contaminación ambiental en Medellín, usando técnicas de percepción remota, imágenes Landsat 7 y 8 y variables de calidad del aire. A partir de las técnicas aplicadas combinadas con la estimación del primer componente principal, el cual contenía el 90 % de variación de la información, se obtuvo un mapa de calidad ambiental que permitió identificar que los focos de contaminación se presentan en sectores con poca cobertura de vegetación, gran cantidad de construcciones y gran flujo vehicular. Por otro lado, las zonas con calidad de aire bueno son sectores que presentan una mayor cobertura de vegetación, por lo general ubicados en los extremos de la ciudad y de estrato socioeconómico 4, 5 y 6. Este mapa puede ser insumo en la oportuna toma de decisiones en cuanto a la planificación urbana, ya que permite la pronta intervención en las zonas donde la calidad ambiental es deficiente.

Zavala, N. (2020). *“Caracterización geológica - geomorfológica de la subcuenca Río Zapotal del cantón Santa Elena, provincia de Santa Elena, aplicando técnicas de Teledetección.”* El presente estudio se realizó en la provincia de Santa Elena, en el cantón del mismo nombre. Se aplicaron técnicas de teledetección para caracterizar los aspectos geológicos y geomorfológicos de la subcuenca Zapotal. Para este procedimiento se utilizó información base como curvas de nivel e imágenes satelitales, y se las procesó en un sistema de información geográfica. Por otro lado, se usó el software PCI Geomatica, especializado en tratamiento de imágenes satelitales para extraer lineamientos del área de



estudio. También, se utilizaron combinaciones de bandas para extraer información acerca de la presencia de minerales en el territorio. Con los resultados obtenidos se realizó la validación de la información con la comprobación en el campo, a través de observaciones directas, medición de datos y toma de muestras de mano para su descripción macroscópica. Se identificaron 5 unidades geomorfológicas y se obtuvo el mapa de los lineamientos (posibles fallas). Se reconocieron diferentes mineralizaciones, identificándose 3 tipos de minerales: óxidos ferrosos, minerales de arcilla y minerales ferrosos.

1.1.2. Antecedentes Nacionales:

Gamarra, S. (2017). *“Análisis de la cobertura y el uso de la tierra utilizando imágenes de resolución espacial medio para el distrito de San Ramón – Chanchamayo – Junín – Perú”* La investigación muestra una contribución a la planificación y ordenamiento del territorio del distrito de San Ramón, mediante el conocimiento de la cobertura y uso de la tierra, utilizando imágenes Landsat 8, sensor pasivo de resolución espacial media del año 2016, con el propósito de determinar, cuantificar y visualizar, las coberturas y usos de la tierra. La metodología empleada muestra resultados eficientes con un sobresaliente aporte del algoritmo Random Forest en el proceso de clasificación, con un 97,2 por ciento de confiabilidad. Se usó como base la leyenda CORINE Land Cover, alcanzando 3 niveles de detalle y 13 clases; así mismo se empleó el software ENVI EX para la segmentación que más se ajuste a la imagen. La consistencia del mapa muestra resultados eficientes con un 95,33 por ciento de precisión global del mapa y un valor del índice Kappa de 0,922. De acuerdo a los resultados de la investigación, la clasificación supervisada utilizando el algoritmo Random Forest puede ser una alternativa eficiente y precisa a implementar para clasificar imágenes satelitales de sensores pasivos, cuando se



requiere delimitar la cobertura y uso de la tierra en la Amazonía peruana, con posibilidad de aplicación en otras zonas del país.

Montaño, R. (2019). *“Análisis dinámico multitemporal del Río Piura aplicando teledetección, en el distrito de Piura, provincia de Piura, departamento de Piura”* El trabajo de investigación tuvo como objetivo identificar mediante la teledetección, el Índice diferencial de Agua Normalizado (NDWI) y la técnica de análisis multitemporal el área que llegó a cubrir el agua en los márgenes del río Piura, entre las coordenadas UTM WGS84-17S Este: 538419.975m Este: 546129.975m y Norte: 9429286.962m – Norte: 9436287.665m. Utilizando 2 imágenes satelitales del sensor Landsat 5 TM, 8 imágenes satelitales del sensor Landsat 7 ETM y 2 imágenes satelitales del sensor Sentinel 2, que se obtuvieron del servidor EarthExplorer y el software QGIS 2.18.18, con las bandas Green (verde) y NIR (infrarrojo cercano) se obtuvo valores numéricos en los cuerpos de agua y aplicando algoritmos en el procesamiento digital para reclasificarlos y categorizarlos, obteniendo valores calculados de la superficie de agua dentro de la zona de estudio entre los años 1997 y 2017. De acuerdo a los objetivos, los resultados obtenidos demostraron que aplicando la teledetección y la técnica de análisis multitemporal son efectivos para los cálculos del área que llegó a cubrir el agua en los márgenes del río Piura, obteniendo como resultado un área mínima de 39.776 ha y un área máxima de 134.054 ha. Se validó con la prueba estadística de “Chi Cuadrado” con una exactitud de 95%, calculando un valor Chi Cuadrado de 63.778.

Ramírez, E. & Villena, E. (2017). *“Teledetección de pasivos ambientales de origen químico utilizando imágenes satelitales Landsat 8 en la provincia de Hualgayoc-2017”* La investigación tuvo por objetivo utilizar técnicas de teledetección como herramienta previa a la identificación de Pasivos Ambientales Mineros (PAMs) a través



de análisis de firmas espectrales en minerales, cuerpos de agua y tipos de vegetación. La investigación se realizó dentro de los cuadrángulos 14F y 14G de la provincia de Hualgayoc, región Cajamarca, Perú. En la investigación se utilizó una imagen Landsat 8 WRS-2 del año 2016, el barrido fue realizado por el satélite Landsat 8 con Path / Row (9/65), imagen recopilada de la USGS (U.S. Geological Survey) de la NASA, la imagen no presentaba ningún tipo de tratamiento, por lo cual se realizó una corrección atmosférica, geométrica y radiométrica; luego se realizó el recorte de la zona de interés y se procedió a elegir los posibles minerales más representativos de la zona de la librería espectral del software. Para determinar los niveles de abundancia de agua y vegetación, se utilizaron: El Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI), y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), así como firmas espectrales. Todos estos parámetros dentro de las imágenes satelitales fueron procesados por medio del programa ENVI 5.3. Los resultados mostraron que los minerales más representativos en la zona fueron: Covelina, calcopirita, pirita, pirita- limonita y galena, encontrándose en mayor proporción Galena y los principales metales asociados a los minerales fueron: Cobre, hierro y plomo; siendo el más abundante el hierro. Así también se identificaron los principales cuerpos de agua en la zona y los tipos de vegetación donde se emplazarían los PAMs, de ello se determinó, que los principales PAMs más cercanos a cuerpos de agua y que tendrían suelos pobres en términos de vegetación, serían los ubicados en : Rio Llaucano en las coordenadas (774000, 9265000), Rio Arascorque (767000, 9254000), Rio de la quebrada (772000, 9265000), y Rio el tingo (762000, 9254000), por lo cual serían los de mayor prioridad para la remediación ambiental.

1.1.3. Antecedentes Regionales:

Alata, A. (2018). *“Análisis Multitemporal de la explotación minera con aplicación de Percepción Remota y SIG en los distritos de Ananea y Cuyocuyo - Puno,*



Entre 1975 – 2017.” El estudio indica que el uso de suelo no regulado por el desarrollo de la minería ilegal informal en yacimientos primarios del suelo aluvial, ha modificado el edafopaisaje y el relieve de manera irreversible. La superficie degradada en los distritos de Ananea y Cuyo Cuyo asciende a 8064.32 hectáreas, que representa el 5.47% de la extensión total del territorio, con un avance de cambio promedio de 131.1 has por cada año, la obtención de mapas temáticos alcanzó niveles altamente aceptables, el coeficiente de Kappa obtenido fue de 0.91 a 0.98 y la precisión global entre 94.67% a 97.48%, la obtención de imágenes del MSAVI con Landsat 8 fue de: (-0.26 a 0.69) y con Sentinel 2 (-0.16 a 0.57) respectivamente, éstos coeficientes indican desde áreas sin vegetación hasta coberturas de vegetación óptima.

Choquehuanca, V. (2019). *“Análisis multitemporal del crecimiento urbano de la ciudad de Puno mediante imágenes satelitales, entre los años 1980 – 2017”* El estudio se realizó en la ciudad de Puno, ubicado entre las coordenadas Norte: 8248372.2977 Este: 389775.6983, Altitud: 3887.889 m.s.n.m., en el sistema de coordenadas UTM WGS-84, zona 19 L Sur. Cuyo objetivo fue analizar la dinámica de la expansión urbana de la ciudad de Puno entre los años 1980 y 2017, utilizando técnicas de teledetección mediante uso de imágenes de satélite y análisis multitemporal. La metodología consistió en determinar el crecimiento urbano de la ciudad de Puno, para ello se emplearon imágenes satelitales multiespectrales de Landsat 2, 5 y 8; Se aplicó el método de vectorización visual y la clasificación supervisada de máxima probabilidad basado en información espectral de la imagen satelital Landsat. Se determinó que el proceso de crecimiento urbano por los dos métodos de clasificación en la prueba del t student con niveles de significación de $\alpha = 0.01$ y $\alpha = 0.05$, son estadísticamente iguales, correlacionando el crecimiento poblacional y crecimiento espacial urbano según el coeficiente de correlación Pearson se tiene un valor de 0.947 significa que existe una relación muy significativa y una correlación



positiva muy alta y en los métodos Kendall y Spearman resultó 1.000** significa que existe una correlación positiva perfecta, la obtención de nivel de exactitud temática es casi perfecta, el coeficiente de Kappa se ha situado entre 0.87 a 0.99 y la precisión global entre 89.81% a 99.02% y en los errores de omisión y comisión resulta que en la clase de área urbana tiene en promedio de error de omisión de 7.02 % y el error de comisión es 2.15 % de la clase del área urbana.

Gutiérrez, Y. (2018). *“Determinación de la dinámica espacial de bofedales mediante imágenes satelitales Landsat frente a escenarios del cambio climático en la cuenca del río Coata durante el período de 1984-2016.”* La investigación consistió en determinar la extensión superficial de dichos bofedales utilizando algoritmos de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), mediante imágenes satelitales Landsat 5 y Landsat 8, también se realizó recopilación de información de precipitación acumulada anual y temperatura máxima anual, y se analizó la tendencia que presentan dichos factores climáticos durante los años indicados, lo cual resultó una tendencia significativa en la temperatura máxima anual. Finalmente se realizó una regresión lineal múltiple y se tuvo como resultado, que el factor climático que más influye en el comportamiento de los bofedales es la temperatura máxima, debido a que el coeficiente de correlación resultó ($R^2 = 0.46$) lo que significa que existe una relación significativa. Se concluye que a medida que la temperatura máxima anual aumenta, la extensión superficial de los bofedales disminuye o en algunos casos los bofedales desaparecen, lo que implica que, uno de los factores en el comportamiento de los bofedales es el cambio climático.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:



Según la última actualización del Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros, aprobada por R.M. N° 200-2021-MINEM/DM, actualmente en el país tenemos 7668 Pasivos Ambientales, de los cuáles 1154 pertenecen a la región Puno y 15 se encuentran localizados en el Distrito de Ananea, Provincia de San Antonio de Putina. En el inventario se especifican los tipos y subtipos de PAMs (Pasivos Ambientales Mineros) y el nombre del Derecho Minero, más no especifica las áreas afectadas por estos, ni el impacto producido en los diferentes cuerpos de agua (ríos, lagos y glaciares) suelos y vegetación.

Además, debido al difícil acceso geográfico y los problemas sociales del distrito de Ananea, han dificultado los estudios ambientales y su posible remediación, pese a que el gobierno peruano ha destinado un fondo para la mitigación de los Pasivos Ambientales, pero hasta la fecha, no se tiene una metodología ni parámetros establecidos para determinar cuál pasivo debe ser priorizado.

Es por ello que esta investigación utilizó imágenes del satélite LANDSAT 8, para identificar y calcular las áreas afectadas por los PAMs en todo el Distrito de Ananea, Puno. Cuantificando toda la zona de estudio y analizando los comportamientos de los Índices y Firmas Espectrales en los diferentes componentes de la naturaleza, mediante el uso de los softwares ArcGis 10.5 y ENVI 5.3. Proporcionando así información geoespacial que puede ser utilizada por instituciones públicas o privadas para la mitigación de los pasivos ambientales.

1.2.1 Formulación del Problema:

1.2.1.1. Problema General:



- ¿Se pueden identificar los impactos de los pasivos ambientales mineros mediante la teledetección en el distrito de Ananea, Provincia de San Antonio de Putina - Puno?

1.2.1.2. Problemas Específicos:

- ¿Es posible determinar, mediante la teledetección, las áreas afectadas por los Pasivos Ambientales Mineros en los cuerpos de agua superficial y glaciares de la zona de investigación?
- ¿Se pueden reconocer, mediante la teledetección, las áreas afectadas por los Pasivos Ambientales Mineros en los suelos y vegetación, en el distrito de Ananea?
- ¿Cómo identificar las zonas urbanas afectadas por los Pasivos Ambientales del distrito de Ananea, a través de la teledetección?

1.3. JUSTIFICACIÓN:

El distrito de Ananea se ha visto afectado en los últimos años por elevados niveles de contaminación producto de los pasivos ambientales, los cuáles son instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonadas o inactivas, y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población y su ecosistema circundante.

El daño producido por los Pasivos Ambientales Mineros no ha sido cuantificado, y no se sabe con precisión la cantidad de áreas afectadas por los mismos, tanto en cuerpos de agua, como en suelos y vegetación. Ya que el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) solo da reporte de los responsables y titulares de las concesiones, esperando que estos



tomen acciones de estudios y remediación de los pasivos ambientales mineros, pero sin mucho éxito.

En consecuencia, la falta de estudios a gran escala, ha limitado la percepción de los niveles de contaminación en todo el distrito de Ananea, impidiendo así, dar posibles tratamientos a todas las zonas afectadas.

Por lo cual la presente investigación utilizó técnicas de teledetección, empleando imágenes actuales del satélite Landsat 8 como herramienta para la identificación, cuantificación y análisis del impacto de los Pasivos Ambientales Mineros de todo el distrito de Ananea, generando así un estudio base para posibles remediaciones y/o mitigaciones, y que estas puedan ser usadas por gobiernos locales, regionales y nacionales.

1.4. HIPÓTESIS:

1.4.1. Hipótesis General:

- Utilizando la técnica de la teledetección, se pueden identificar los impactos de Pasivos Ambientales Mineros en el distrito de Ananea, Provincia de San Antonio de Putina – Puno.

1.4.2. Hipótesis Específicas:

- Con el uso de la teledetección, puede determinarse las áreas afectadas por los Pasivos Ambientales Mineros en los cuerpos de agua superficial y glaciares de la zona de investigación.
- Mediante la teledetección, puede reconocerse las áreas afectadas por los Pasivos Ambientales Mineros en suelos y vegetación del distrito de Ananea.



- A través de la teledetección, puede identificarse las zonas urbanas afectadas por los Pasivos Ambientales Mineros del distrito de Ananea.

1.5. OBJETIVOS:

1.5.1. Objetivo General:

- Identificar los impactos de pasivos ambientales mineros mediante la teledetección en el distrito de Ananea, Provincia de San Antonio de Putina – Puno.

1.5.2. Objetivos Específicos:

- Determinar, mediante la teledetección, las áreas afectadas por los Pasivos Ambientales Mineros en los cuerpos de agua superficial y glaciares de la zona de investigación.
- Reconocer las áreas afectadas por los Pasivos Ambientales Mineros en suelos y vegetación del distrito de Ananea, por teledetección.
- Identificar las zonas urbanas afectadas por los Pasivos Ambientales Mineros del distrito de Ananea, a través de la Teledetección.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. FUNDAMENTOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA:

2.1.1. Teledetección:

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. 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. (Schomwandt, 2007).

2.1.2. Elementos de la Teledetección:

Según (Chuvienco, 1995). Un sistema de teledetección espacial incluye los siguientes elementos:



- **Fuente de energía**, que supone 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.
- **Cubierta terrestre**, formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética, y la refleja o emite de acuerdo a sus características físicas.
- **Sistema sensor**, compuesto por el sensor propiamente dicho (cámaras, radar, etc.) y la plataforma que lo sustenta (satélite, avión, globo). Tiene como misión captar la energía proveniente de la cubierta terrestre y almacenarla o enviarla directamente al sistema de recepción.
- **Sistema de recepción-comercialización**, en donde se recibe la información del sistema sensor, se graba en formato apropiado, y, tras las oportunas correcciones, se distribuye a los intérpretes.
- **Interprete**, que analiza esa 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.
- **Usuario final**, encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.

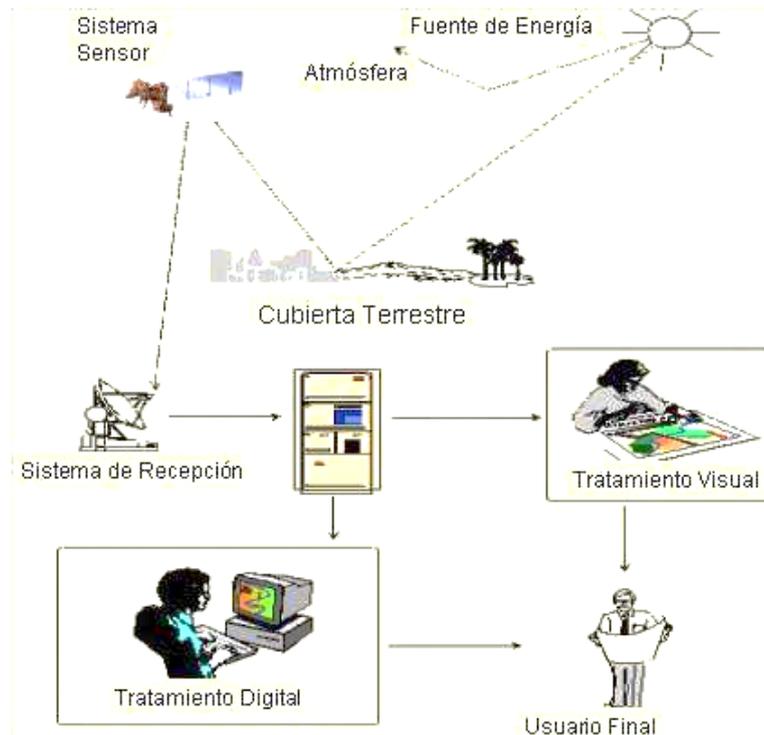


Figura Nro. 1: Componentes de un Sistema de Teledetección. Fuente: Chuvieco (1995).

2.1.3. Radiación Electromagnética (REM):

La observación remota es posible gracias a la interacción de un flujo energético con las cubiertas terrestres. Dicho flujo recibe el nombre de Radiación Electromagnética (REM) y ha sido explicada por dos teorías físicas. (Pérez y Muñoz, 2006)

- La primera es la Teoría Ondulatoria. Para ella la Radiación Electromagnética es un fenómeno ondulatorio de propagación en el que actúan dos campos perpendiculares: el magnético y el eléctrico. Esta teoría se explica sobre la base de dos conceptos fundamentales que son la longitud de onda y la frecuencia.

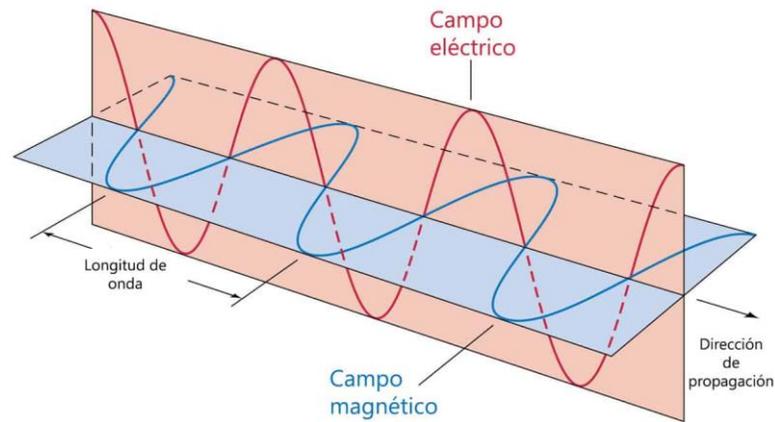


Figura Nro. 2: Propagación de la Energía Electromagnética. Fuente: Pérez y Muñoz (2006)

La fórmula general en donde se sustentan estas teorías es la siguiente:

$$c = \lambda * F$$

Donde C es la velocidad de propagación de la luz con un valor constante (3×10^8 m/seg), siendo λ y F la longitud de onda y la frecuencia respectivamente. De esta fórmula se deduce que longitudes de ondas pequeñas tendrán altas frecuencias y viceversa.

- Por otra parte, la teoría cuántica nos explica el fenómeno de la radiación electromagnética basándose en sus propiedades energéticas, siendo la fórmula esencial lo siguiente:

$$Q = h * F$$

Donde Q es la cantidad de energía transportada por la onda, h es una constante (la constante de Plank) y F es la frecuencia.

Despejando F en la fórmula precedente y sustituyendo nos encontraríamos con la siguiente expresión:

$$Q = h \left(\frac{c}{\lambda} \right)$$

Del análisis de esta expresión se deduce que a medida que trabajemos con longitudes de ondas mayores, sus contenidos energéticos serán menores y por tanto habrá más dificultades para la detección de estas radiaciones.

2.1.4. El Espectro Electromagnético (EEM):

El Espectro Electromagnético (EEM) es la distribución de radiación electromagnética según la energía. Las regiones del Espectro Electromagnético se definen según, longitud de onda, frecuencia y energía. (Pérez. 2007).

Comprende desde las longitudes de onda más corta (rayos gamma, rayos X), hasta las kilométricas (telecomunicaciones). Las unidades de medida más comunes se relacionan con la longitud de onda. Para las más cortas se utilizan micrómetros o micras ($1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ metros), mientras las más largas se miden en centímetros o metros. Normalmente a estas últimas (denominadas micro – ondas) se les designa también por valores de frecuencia (en Gigahertz, $\text{GHz} = 10^9 \text{ Hz}$). (Chuvieco, 2002).

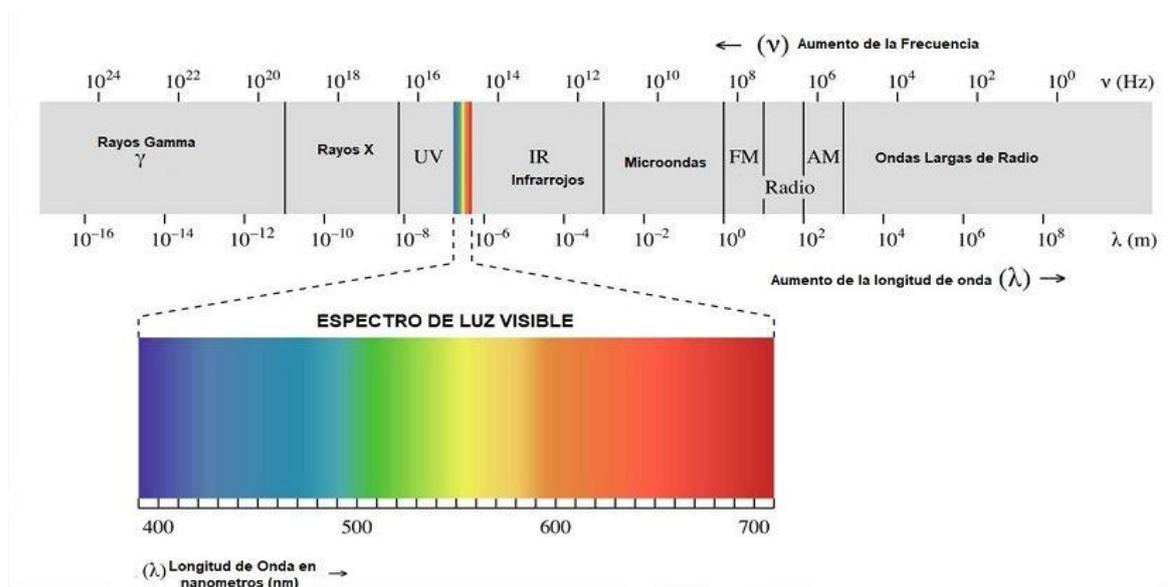


Figura Nro. 3: El Espectro Electromagnético. Fuente: Chuvieco (2002)

Conviene destacar una serie de regiones espectrales, las más comunes son:

Tabla Nro. 1: Características de la región espectral.

Fuente: Bravo Morales (2017)

2.1.5. Firmas Espectrales:

Cualquier objeto, como consecuencia de su interacción con las fuentes de energía propias o externas, emitirá y/o reflejará una radiación electromagnética. Cada objeto o sistema posee una respuesta o contraste espectral propio, en términos de energía reflejada y energía emitida, y que se conoce como signatura o firma espectral. (Castaño et al., 1994).

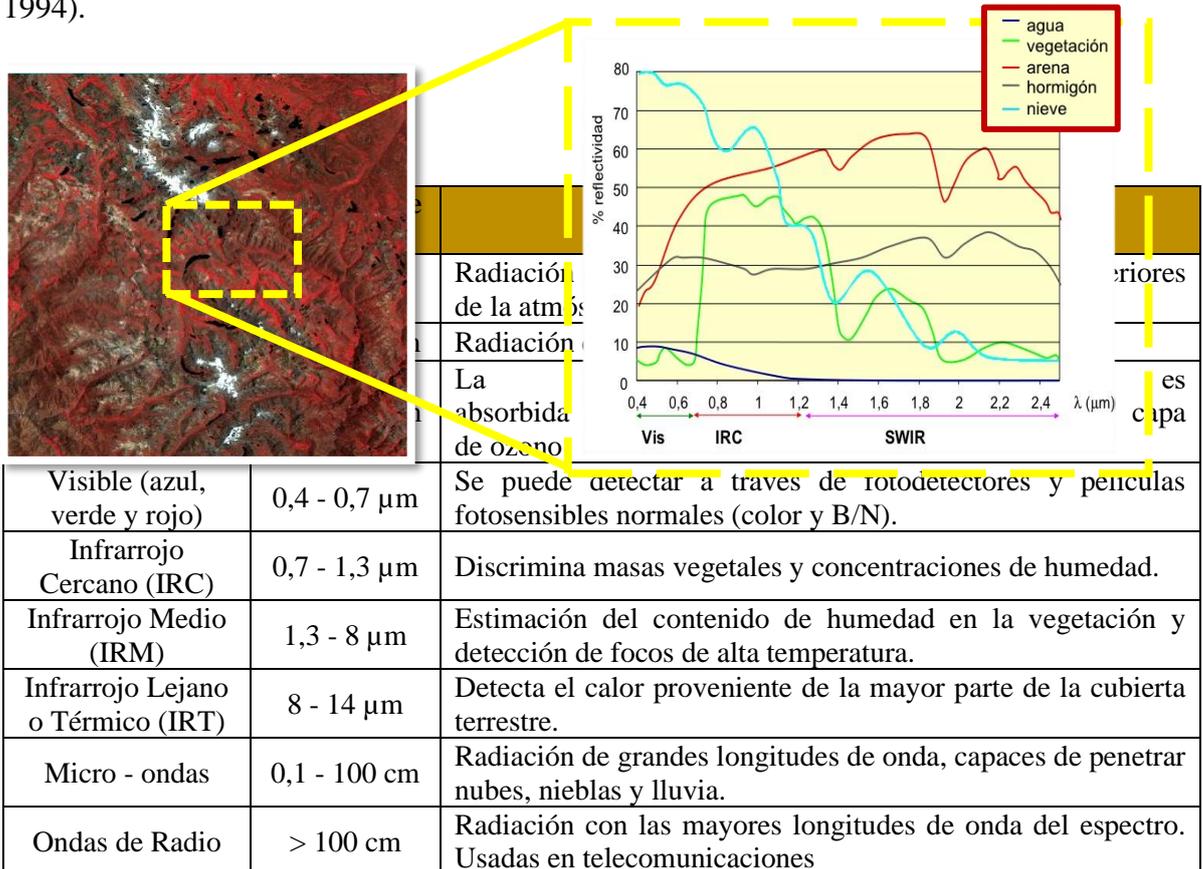


Figura Nro. 4: Firmas Espectrales de una Imagen Sentinel - 2B. Fuente: Plataforma Copernicus (2020)

2.1.6. Tipos de Sensores:

2.1.6.1. Sensores Pasivos:

Los sensores pasivos se limitan a recoger la energía electromagnética procedente de las cubiertas terrestres, ya sea reflejada de los rayos solares, y emitida en virtud de su propia temperatura. (Chuvieco, 1995)

Son de mayor valor en las aplicaciones de la percepción remota en la evaluación de los recursos naturales. Los sensores pasivos simplemente reciben las señales emitidas naturalmente y reflejadas por los objetos percibidos. Estas señales pueden proveer una información muy rica sobre los objetos percibidos. Ejemplos: ASTER, Landsat, MODIS, SENTINEL. (Bravo, 2017)

Muchos sensores pasivos tienen sensibilidad multiespectral, lo cual significa que recogen simultáneamente datos de diferentes bandas espectrales. Las mediciones sobre diferentes zonas del espectro electromagnético, aportan una amplia información sobre distintos aspectos del medio ambiente.

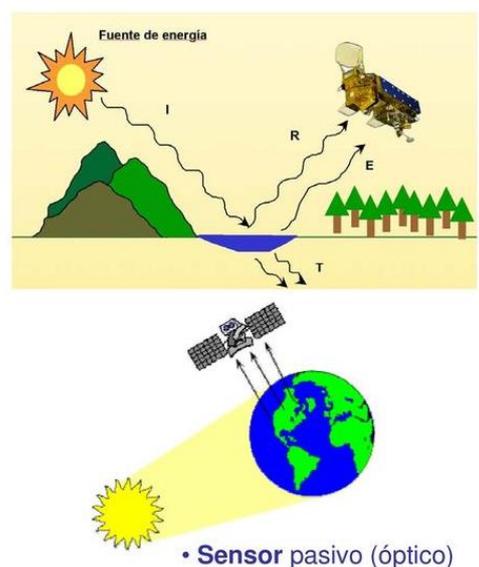


Figura Nro. 5: Sensor Pasivo. Fuente: Bravo (2017).



Figura Nro. 6: Banda multispectral del Sensor Pasivo Landsat 8. Fuente: USGS (2019)

2.1.6.2. Sensores Activos:

La característica en 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. (Chuvieco, 1995)

El sensor emite radiación dirigida hacia el objetivo a ser estudiado. La radiación reflejada de ese objeto es detectada y medida por el sensor. Ejemplos: Lidar, Radar, Sonar. (Bravo, 2017).

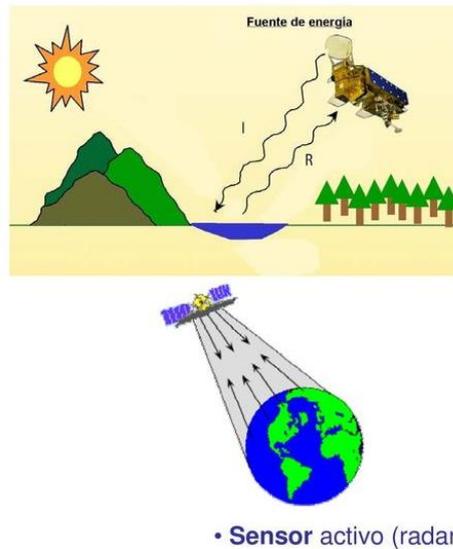


Figura Nro.7: Sensor Activo. Fuente: Bravo (2017).

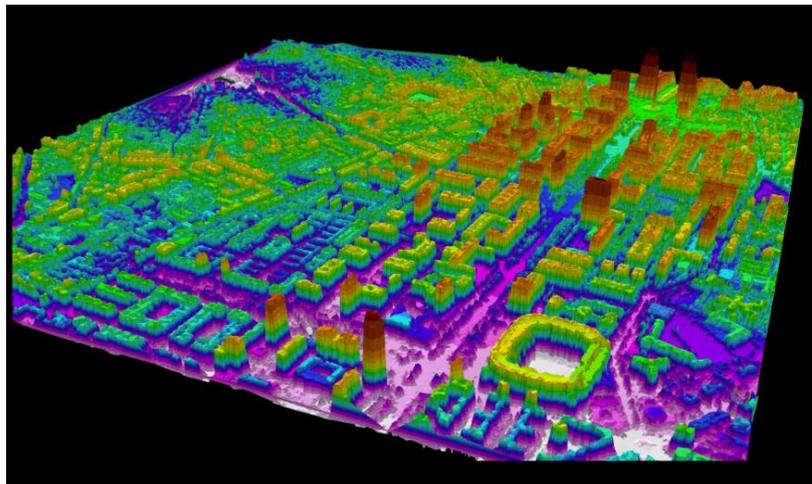


Figura Nro.8: Imagen Tridimensional del Sensor Activo LIDAR. Fuente: Open Topography (2020).

2.1.7. Resolución de los Sensores Remotos:

2.1.7.1. Resolución Espacial:

Es la distancia que corresponde a la unidad mínima de información incluida en la imagen (píxel). Así, a menor tamaño del píxel mayor será la resolución espacial, lo que implica que el sensor obtendrá más detalle de los objetos. (Bravo, 2017).

Son varios los factores que determinan la resolución espacial de un sensor remoto (distancia sensor-superficie terrestre, ángulo de visión y campo de visión instantáneo).

Para el caso de los sensores a bordo de satélites estos factores son prácticamente fijos, por lo que la resolución espacial puede ser considerada constante, siempre y cuando el ángulo de visión no sea grande. (Labrador et al, 2012).

Figura Nro.9: Comparación de Píxel de una Imagen. Fuente: Bravo (2017)

2.1.7.2. Resolución Espectral:

La resolución espectral indica el número y ancho de las bandas en las que el sensor puede captar radiación electromagnética. En principio cuanta más banda incluya un sensor mejor, ya que cada banda constituye una variable para caracterizar la superficie captada. Por otro lado, es preferible que estas bandas sean estrechas para que su poder discriminante se incremente. Si las bandas son muy anchas van a recoger valores promediados que ocultarán elementos de diferenciación. (Chuvieco, 1995).

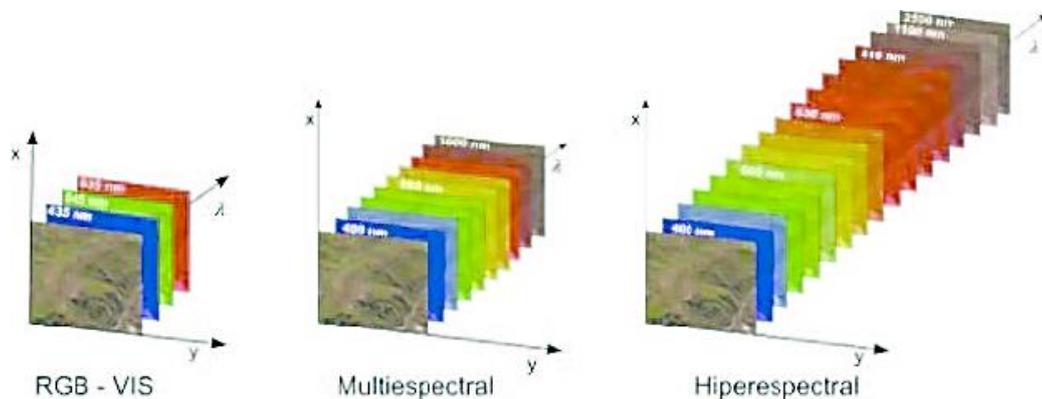


Figura Nro.10: Comparación de número y ancho de las bandas RGB, Multiespectral e Hiperespectral



2.1.7.3. Resolución Radiométrica:

La resolución radiométrica está dada por el número de niveles digitales (ND), representando niveles de grises, captados por el sensor. Es decir, la resolución radiométrica es la capacidad que tiene un sensor de poder discriminar, albedos con diferencia de radiación reflejada o emitida (cantidad de niveles de grises). Cuanto mayor es el número de niveles de grises, mayor es la resolución. Una imagen con dos niveles (blanco y negro) tendrá menos resolución que otra imagen con 32 niveles de grises en blanco y negro.

El número de niveles de grises que el sensor puede detectar depende de su sistema de grabación y se expresa en función de número binarios “bits”. El valor en bits se expresa en potencia de 2^n siendo n el número de bits usados en la grabación. Por ejemplo: un sensor con 8 bits de resolución, tiene un rango de $2^8 = 256$ niveles de grises. (Pérez, 2007).

Aunque la resolución radiométrica define el máximo número de niveles digitales detectables por un sensor, normalmente una imagen real no los contiene todos y además, no suele haber máximos y mínimos simultáneamente. En estos casos se pueden aplicar técnicas de tratamiento de imágenes para mejorar su apariencia visual, pero nunca la resolución radiométrica propia del sensor. (Labrador et al, 2012).

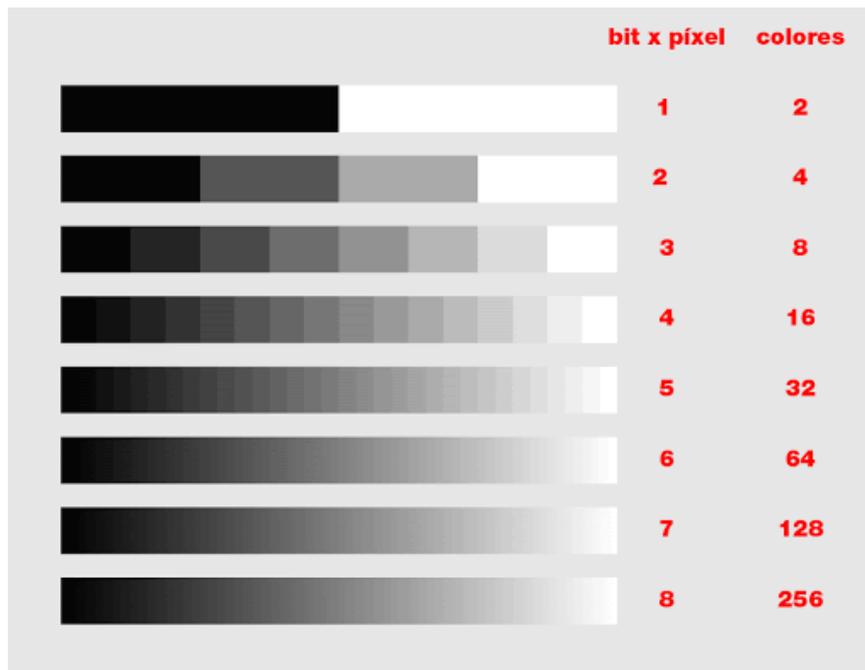


Figura Nro.11: Niveles de bit X píxel

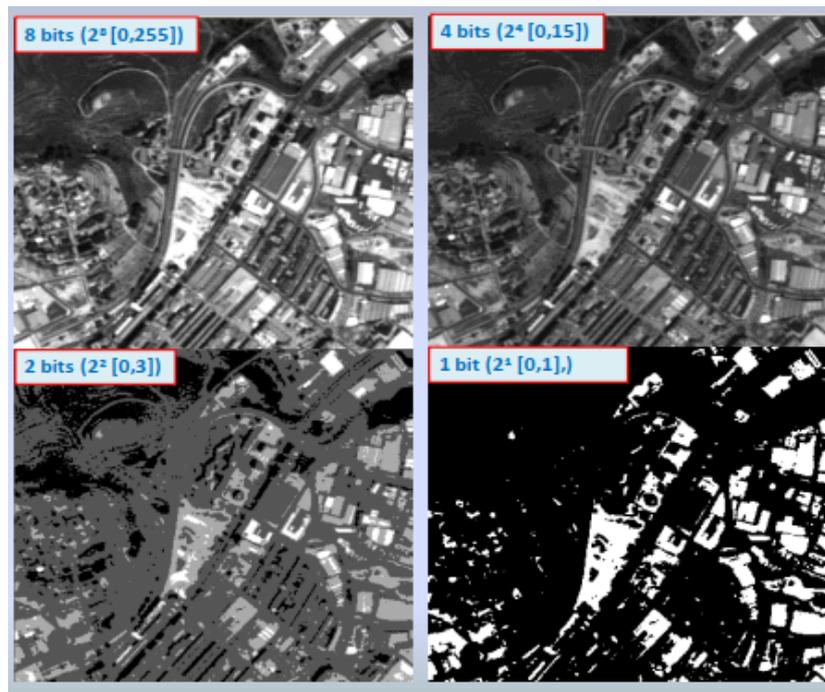


Figura Nro.12: Resolución Radiométrica de una Imagen Satelital. Fuente: Bravo (2017)

2.1.7.4. Resolución Temporal:

La resolución temporal es el ciclo de repetición, o intervalo de tiempo, entre dos adquisiciones de imágenes sucesivas de una misma porción de la superficie y depende, en gran medida, de las características orbitales del satélite. Muchas veces también se la denomina periodo de revisita. Normalmente los satélites meteorológicos tienen una frecuencia diaria (NOAA) o incluso menor (METEOSAT), mientras que la de los satélites de recursos naturales (tipo LANDSAT) es de 16 a 18 días. Sin embargo, muchos satélites actuales tienen la capacidad de reorientar el sensor, lo que les permite aumentar su frecuencia de revisita para una zona determinada, muy importante en el seguimiento de desastres naturales o para detectar procesos que tienen poca perdurabilidad en el tiempo.

La resolución temporal de un sensor depende principalmente de tres factores: capacidad de reorientación del sensor a ambos lados de la línea de paso del satélite, del ancho de barrido y de la latitud, ya que, en el caso de órbitas cuasi polares, a mayor latitud, menor periodo de revisita. (Labrador et al, 2012).

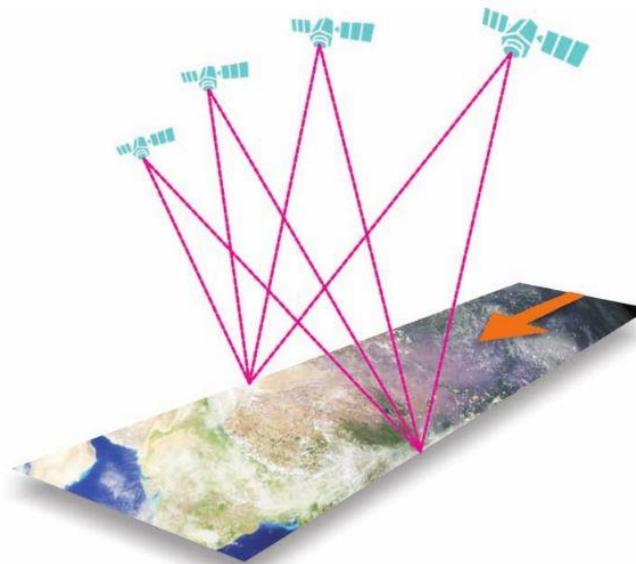


Figura Nro.13: Mayor resolución temporal gracias a la reorientación de sensores en pases consecutivos. Fuente: Labrador et al (2012)

2.1.8. Tipos de Imágenes de Teledetección:

2.1.8.1. Imagen Multiespectral (MS):

Imagen que lleva asociados varios valores numéricos a cada píxel, tantos como bandas espectrales sea capaz de detectar el sensor. A priori, es el tipo de producto más útil ya que nos proporciona, en cierto modo, la firma espectral de los distintos elementos presentes en la imagen. Cuanto mayor sea el número de bandas que proporciona el sensor, mayor será la capacidad de análisis de los elementos presentes en la imagen. Aparte de las multiespectrales también existen las denominadas imágenes hiperespectrales, menos habituales. Vienen caracterizadas por poseer información en un gran número de bandas. Se requieren para estudios de identificación y clasificación muy precisos, principalmente en mineralogía, por lo que su disponibilidad es bastante limitada. (Labrador et al, 2012).

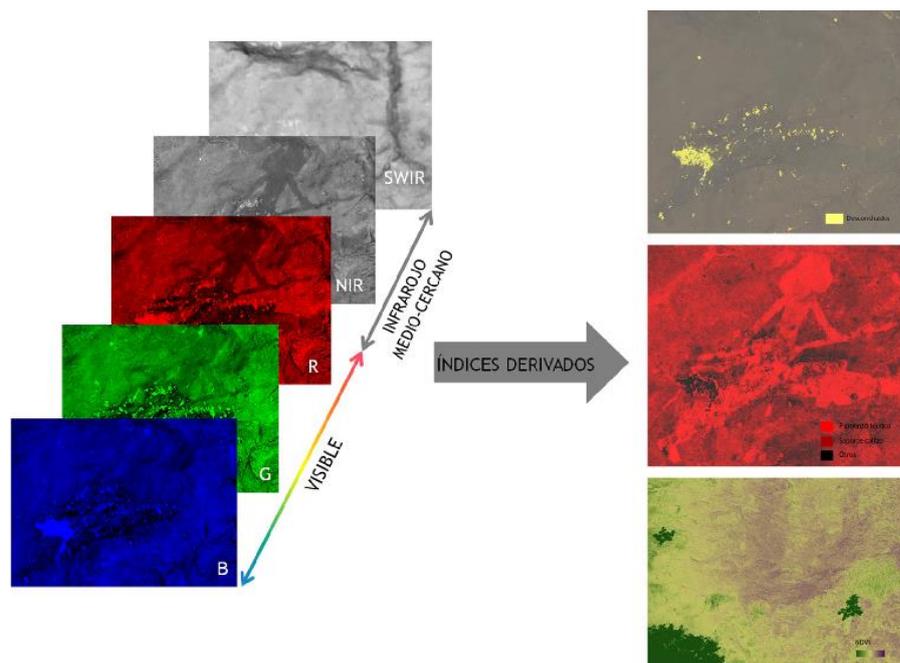


Figura Nro.14: Imagen Multiespectral R, G, B, NIR y SWIR e índices derivados.

2.1.8.2. Imagen Pancromática (PAN):

Dispone de una sola banda espectral que abarca comúnmente gran parte del visible y comienzo del infrarrojo, obteniendo como resultado una imagen que habitualmente se representa en una escala de grises (imagen en blanco y negro). En beneficio, tiene la ventaja de poseer mayor resolución espacial que las multiespectrales que proporciona el mismo satélite. (Labrador et al, 2012).

2.1.8.3. Imagen Fusionada (PS):

Este tipo de imagen se obtiene mediante la fusión de una imagen multiespectral con una pancromática. Las siglas PS provienen de pan-sharpened, su denominación en inglés. Básicamente, consiste en asignar a cada píxel de la imagen pancromática los valores procedentes de un algoritmo que combina la imagen pancromática con la multiespectral. El resultado final es una imagen multiespectral con la resolución espacial de la pancromática. El inconveniente de este tipo de imágenes es que se modifica la información espectral original captada por los sensores a través de los algoritmos usados, por lo que se suelen utilizar únicamente como herramientas de interpretación visual y no para análisis espectral. (Labrador et al, 2012).

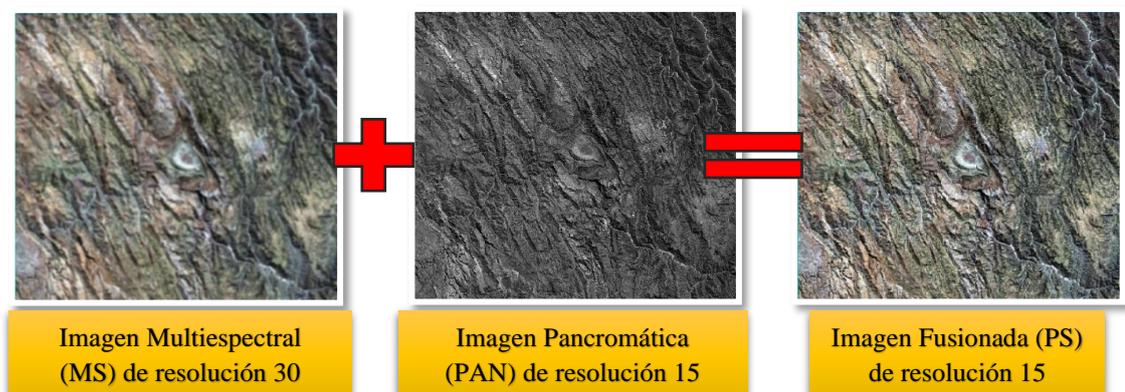


Figura Nro.15: Imagen Fusionada con resolución 15 metros. Fuente: UCGS Lansat 8 (2020).

2.1.8.4. Imagen Estéreo:

Se refiere a dos imágenes de una misma zona tomadas con ángulos de visión distintos. Muchos satélites tienen la capacidad de reorientar el sensor, lo que les permite tomar, en una o en sucesivas pasadas, este tipo de imágenes. Se suelen emplear para generar modelos de elevación del terreno. (Labrador et al, 2012).

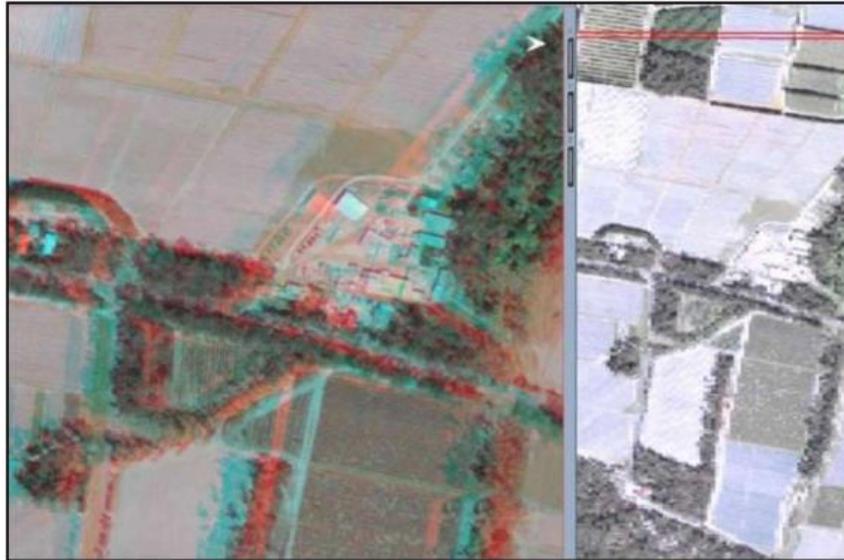


Figura Nro.16: Imagen Estéreo con distintos ángulos de visión. Fuente: Bravo (2017)

2.2. EL SATELITE LANDSAT 8:

2.2.1. El Programa LANDSAT:

Antes de 1972, la idea de utilizar datos de satélite para la vigilancia terrestre, la cartografía o la exploración era un concepto visionario. Esto se convierte en realidad con la aparición del Programa Landsat, el cual se constituye en una serie de misiones de observación de la Tierra por satélite, gestionadas conjuntamente por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). El programa Landsat ha revolucionado la forma de ver y estudiar nuestro planeta.

Es la más larga historia continúa de registro de cambios en la superficie terrestre desde el espacio. Landsat ha sido el único sistema de satélite diseñado y operado para observar repetidas veces la cubierta de la tierra con una resolución moderada. Esta serie de datos, que se inició en 1972, con el lanzamiento de ERTS-1 (Tierra Recursos Tecnología por Satélite), más tarde renombrado (Landsat 1). (Pérez, 2007).



Figura Nro.17: Satélite ERTS – 1, lanzado en 1972. Fuente: UCSG (2019)

Los satélites LANDSAT llevan a bordo diferentes instrumentos. Su evolución buscó siempre captar más información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle, de ahí las mejoras radiométricas, geométricas y espaciales que se incorporaron a los sensores pasivos; el primero, conocido como Multispectral Scanner Sensor (MSS), y el sistema Return Beam Vidicon (RBV) seguido de Thematic Mapper (TM) que tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor y por último, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que entre sus mejoras técnicas destaca una banda espectral (pancromática) con resolución de 15 metros. En la actualidad son 8 las misiones del programa LANDSAT:

Tabla Nro. 2: Evolución del programa LANDSAT.

SATÉLITE	Lanzamiento (Fin de Operación)	SENSORES	RESOLUCIÓN ESPACIAL (metros)	ALTURA km	Resolución Temporal (días)
ERTS-1	23/07/1972 (05/01/1978)	RVB/MSS	80 80	917	18
LANDSAT-2	2/01/1975 (27/07/1983)	RVB/MSS	80 80	917	18
LANDSAT-3	05/03/1978 (07/09/1983)	RVB/MSS	30 80	917	18
LANDSAT-4	16/07/1982 (agosto de 1993)	MSS/TM	80 30	705	16
LANDSAT-5	01/03/1984 (noviembre de 2011)	MSS/TM	80 30	705	16
LANDSAT-6	03/10/1993 (03/10/1993)	ETM	15(Pan) 30 (MS)	705	16
LANDSAT-7	15/04/1999 (En operación)	ETM+	15(Pan) 30 (MS)	705	16
LANDSAT-8	11/02/2013 (En operación)	OLI/TIRS	15(Pan) 30 (MS)	705	16

Fuente: Pérez, (2007)

Hoy en día el programa se encuentra en su octava versión denominada: “Landsat Data Continuity Mission” (LDCM). Este programa amplía, mejora y avanza el registro de imágenes multiespectrales, manteniendo la misma calidad de sus siete predecesores.

2.2.2. Landsat 8:

El satélite LANDSAT 8, fue lanzado el 11 de febrero de 2013, esta nueva plataforma posee una órbita descendente, es decir tiene un movimiento orbital de norte a sur sobre el lado iluminado de la superficie terrestre. Al igual que Landsat 7, esta última plataforma satelital orbita a una altitud de 705 kilómetros (438 miles), dicha configuración permite completar una órbita aproximadamente de 98,9 minutos, 14 órbitas diarias y que se traduce en una resolución temporal de 16 días. (Schomwandt, 2007).



Figura Nro.18: Satélite Landsat 8, vista desde el espacio. Fuente: UCSG (2019)

Landsat 8 lleva consigo dos instrumentos, el primero de ellos es el conocido por las siglas **OLI** (Operational Land Imager) que posee tres nuevas bandas en comparación con su antecesor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus); la banda azul profundo (0,433 - 0,453 μm) la cual está principalmente destinada a estudios costeros & aerosoles, una banda infrarroja de onda corta (1,36-1,38 μm) para la detección de cirrus y una tercera banda que evalúa la calidad de la información (Quality Assessment band). El segundo instrumento es el **TIRS** (Thermal Infrared Sensor) que proporciona dos bandas térmicas, con una resolución de 100 m y son de gran valor para medir la evapotranspiración.

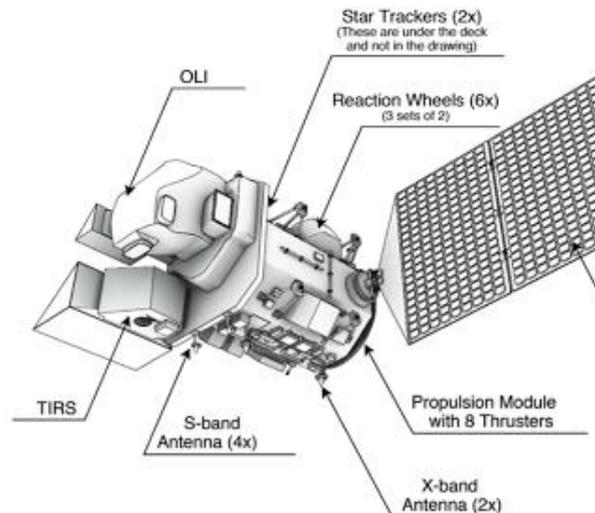


Figura Nro. 19: Sensor OLI y TIRS del satélite Landsat 8. Fuente: UCSG (2019)

Una de las características más destacables de estos nuevos sensores es la mejor relación señal – ruido, con un rango dinámico de 12 bits, lo cual se traduce en 4.096 posibles niveles de grises en una imagen. Básicamente la mejora del rendimiento de señal – ruido se puede traducir como por ejemplo en lograr una mejor diferencia y caracterizar el estado de la cubierta vegetal. Los productos finalmente se distribuyen de manera gratuita en formato geotiff metadata compuestos por un paquete de 11 bandas las cuales son re-escaladas un rango dinámico de 16 bits, que se traduce en una escala de 65.535 niveles de grises.

Una gran ventaja es que las imágenes son distribuidas de manera gratuita desde Mayo de 2013 por la USGS (en su sitio <http://earthexplorer.usgs.gov/>). Los archivos se distribuyen comprimidos y su tamaño es de aproximadamente 1 GB, considerando que cada escena es de 170 por 185 kilómetros con 9 bandas en resolución espacial de 30 metros, una banda pancromática de 15 metros y dos bandas en el infrarrojo térmico de 100 metros de tamaño de pixel. (Schomwandt, 2007).

Tabla Nro. 3: Características del satélite LANDSAT 8.

TIPO DE RESOLUCIÓN	CARACTERÍSTICAS
Espacial	Bandas OLI multiespectrales 1-7,9 : 30 metros
	Bandas OLI Pancromática 8: 15 metros
	Bandas TIRS 10 - 11: 100 metros
Radiométrica	12 bits
Espectral	11 bandas
Temporal	16 días

2.2.3. Bandas del Satélite:

Landsat 8 cuenta con un total de 11 bandas, 9 del sensor OLI y 2 del sensor TIRS, cada una de ellas con diferentes aplicaciones:

Tabla Nro. 4: Bandas del satélite LANDSAT 8.

Sensor	Número de Banda	Nombre de la Banda	Longitud de Onda (Micrometros)	Resolución (Metros)	Aplicaciones
OLI	1	Costera(Coastal)	0.43 - 0.45	30	Estudios costeros y de aerosoles
OLI	2	Azul	0.45 - 0.51	30	Cartografía batimétrica.
OLI	3	Verde	0.53 - 0.59	30	Destaca los picos de máxima vegetación, que son útiles para evaluar el vigor de las plantas.
OLI	4	Rojo	0.63 - 0.67	30	Distingue las laderas de vegetación.
OLI	5	Infrarrojo Cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30	Destaca el contenido de biomasa y las costas.
OLI	6	Infrarrojo de Onda Corta 1 (SWIR 1)	1.57 - 1.65	30	Distingue la humedad del suelo y la penetración de las nubes.
OLI	7	Infrarrojo de Onda Corta 2 (SWIR 2)	2.11 - 2.29	30	Mejora de la lectura de la humedad del suelo y la penetración de las nubes.
OLI	8	Pancromática (Pan)	0.50 - 0.68	15	Resolución de 15 metros, definición de imagen más nítida
OLI	9	Cirros (Cirrus)	1.36 - 1.38	30	Mejor detección de la contaminación en cirros.
TIRS	10	Sensor Térmico Infrarrojo 1 (TIRS 1)	10.60 - 11.19	100	Resolución de 100 metros, mapeo térmico y humedad estimada del suelo.
TIRS	11	Sensor Térmico Infrarrojo 2 (TIRS 2)	11.50 - 12.51	100	Resolución de 100 metros, mapeo térmico mejorado y humedad estimada del suelo.

2.2.4. Combinaciones de Bandas:

La combinación de bandas nos permite analizar elementos específicos de la superficie terrestre en función de su espectro de emisión. Gracias a las distintas bandas multispectrales de operación de los satélites, podemos interpretar aspectos como la vegetación, los usos del suelo o las masas de agua. Combinaciones específicas RGB nos mostrará y discriminará los elementos de las imágenes satelitales Landsat 8.

Tabla Nro. 5: Combinación de Bandas RGB del satélite LANDSAT 8.

DESCRIPCIÓN	COMBINACIÓN (RGB)		
Color natural	4	3	2
Falso color (urbano)	7	6	4
Color infrarrojo (vegetación)	5	4	3
Agricultura	6	5	2
Penetración atmosférica	7	6	5
Vegetación saludable	5	6	2
Tierra/agua	5	6	4
Infrarrojo de onda corta	7	5	4
Análisis de vegetación	6	5	4



Color natural (4,3,2)



Falso color (Urbano) (7,6,4)



Infrarrojo(vegetación) (5,4,3)



Infrarrojo de onda corta (7,5,4)



Análisis de vegetación (6,5,4)



Vegetación saludable (5,6,2)

Figura Nro. 20: Combinación de bandas RGB del satélite Lansat 8. Fuente: Gis & Beers (2017)

2.2.5. Índices Espectrales:

2.2.5.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI):

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, también conocido como NDVI por sus siglas en inglés. Son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales, usado para medir la diferencia normalizada entre las reflectancias del rojo (RED) y del infrarrojo cercano (NIR), proporcionando una medida sobre la cantidad, calidad y desarrollo de la cobertura vegetal y vigorosidad en áreas extensas. (Bravo, 2017).

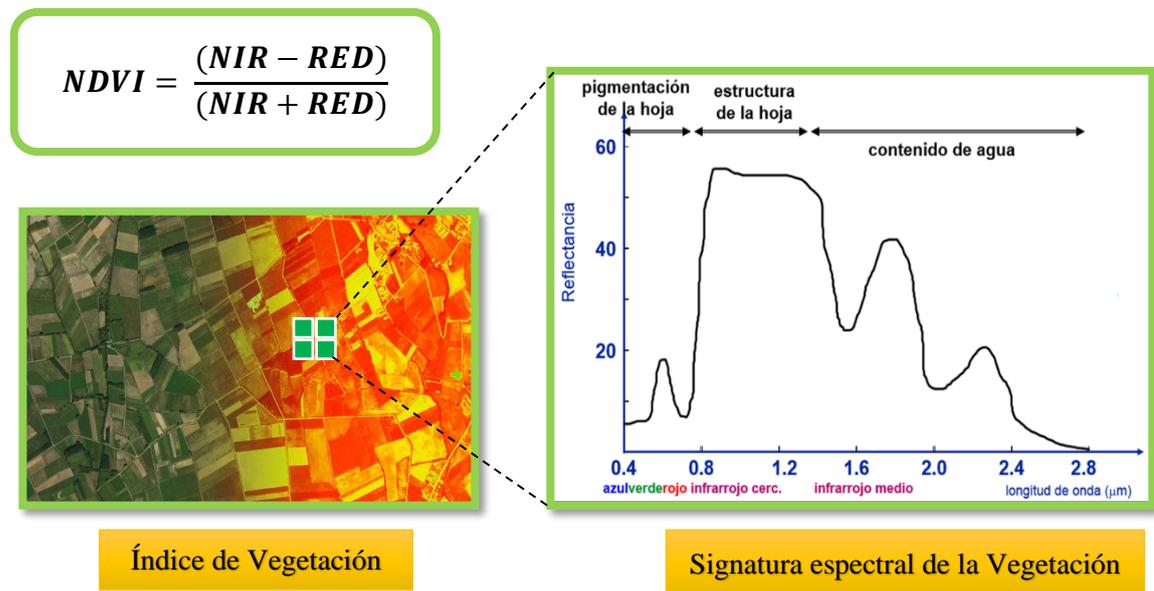


Figura Nro. 21: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

- Interpretación de Valores del NDVI.

Tabla Nro. 6: Cálculo y descripción del NDVI entre -1 a 1. Fuente: Bravo (2017)

VALOR DEL NDVI	DESCRIPCIÓN
-1 a 0	El material inanimado/muerto, por ejemplo: carreteras, edificios, el suelo o las plantas muertas
0 a 0.33	Material vegetativo no saludable.
0.33 a 0.66	Material vegetativa sano.
0.66 a 1	Material vegetal muy saludable.

2.2.5.2. Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI):

El Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) es una variación del NDVI. En la ecuación se invierten el orden del infrarrojo cercano (NIR) y cambiamos la banda roja por la verde (GREEN), el resultado será contrario al NDVI, la vegetación será suprimida y los cuerpos de agua se realzarán.

El NDWI es útil en muchas aplicaciones de teledetección. Vigilancia de los cultivos de la salud, la cartografía de la tierra / agua de embarque, delimitación de entornos húmedos, la discriminación de agua hacia el interior de los cuerpos de agua de mar abierto, son sólo algunas de las aplicaciones donde se utiliza NDWI. (Bravo, 2017).

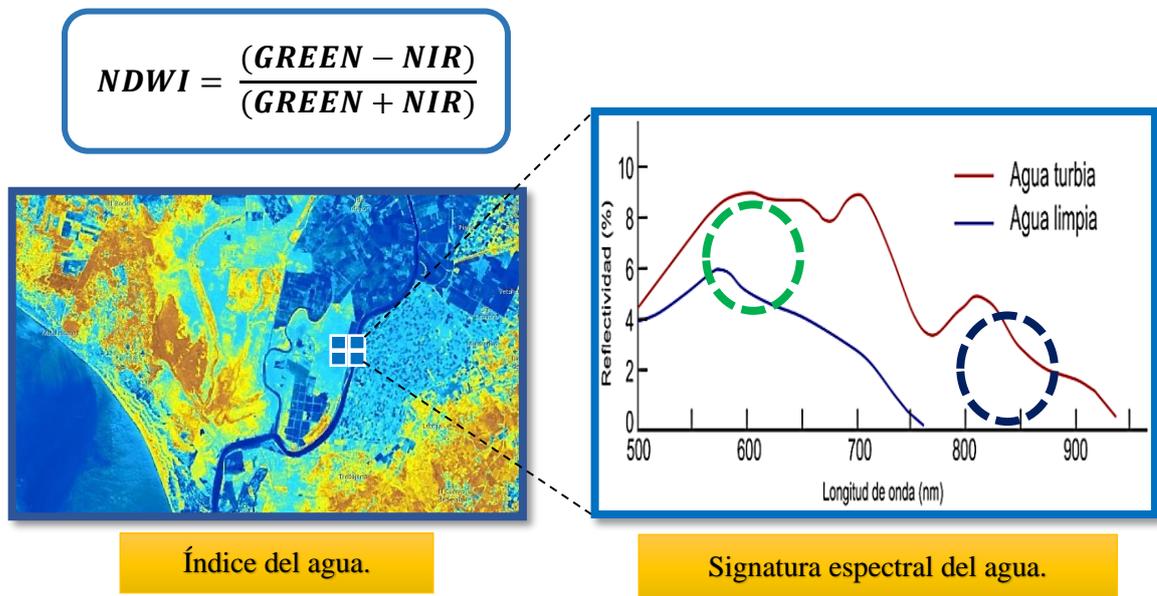


Figura Nro. 22: Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI).

2.2.5.3. Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI):

El Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI) es un indicador numérico que muestra la cobertura de nieve en áreas terrestres. Las bandas espectrales de infrarrojos verdes (GREEN) y de onda corta (SWIR) se utilizan dentro de esta fórmula para trazar el mapa de la cubierta de nieve. Dado que la nieve absorbe la mayor parte de la radiación incidente en el SWIR mientras que las nubes no lo hacen, esto permite a NDSI distinguir

la nieve de las nubes. Esta fórmula se utiliza comúnmente en la aplicación de mapas de cobertura de nieve y hielo, así como en el monitoreo de glaciares. (Bravo, 2017).

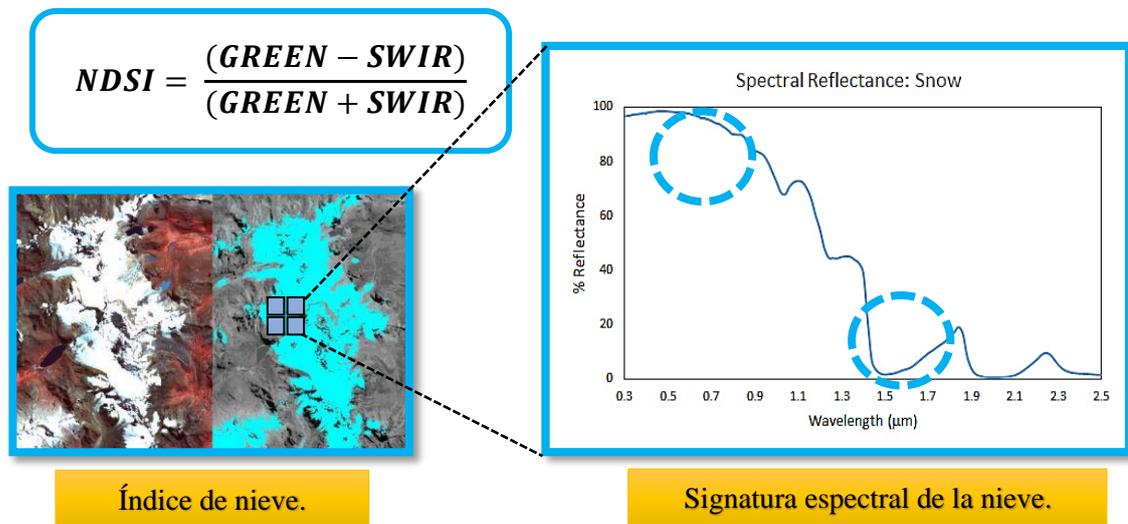


Figura Nro. 23: Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI).

2.3. TRATAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN:

2.3.1. Corrección de la Imagen:

2.3.1.1. Corrección Radiométrica:

Las distorsiones radiométricas son cambios producidos en los valores de intensidad (nivel de gris) de los píxeles que componen una imagen. Dichas distorsiones son resultado de efectos de la atmósfera sobre el Espectro Electromagnético. La atmósfera actúa de dos maneras: 1) extendiendo selectivamente la energía en relación a las varias longitudes de onda; y 2) absorbiendo la energía en determinadas longitudes de onda, debido a los gases atmosféricos. Además de la atmósfera, otro tipo de distorsión encontrada en las imágenes, son los efectos de los instrumentos que componen los sensores.

Existen varios métodos, para realizar las correcciones por efectos atmosféricos. Desde ajustes de *gain/offset*, indicados para imágenes multiespectrales, como Landsat, Spot, etc.; hasta métodos más sofisticados como ATRem y EFORT, indicados para imágenes de sensores hiperspectrales, como AVIRIS, Hydice, Hyperion EO – 1.

Todos estos métodos realizan la siguiente función en los datos de las imágenes, transforman los valores de radiancia a reflectancia, lo que produce que se pueda comparar los valores de reflectancia de los píxeles con los de reflectancia de los materiales (roca, suelo, agua, vegetación, etc.) medida en el campo o en el laboratorio. (Pérez, 2007)

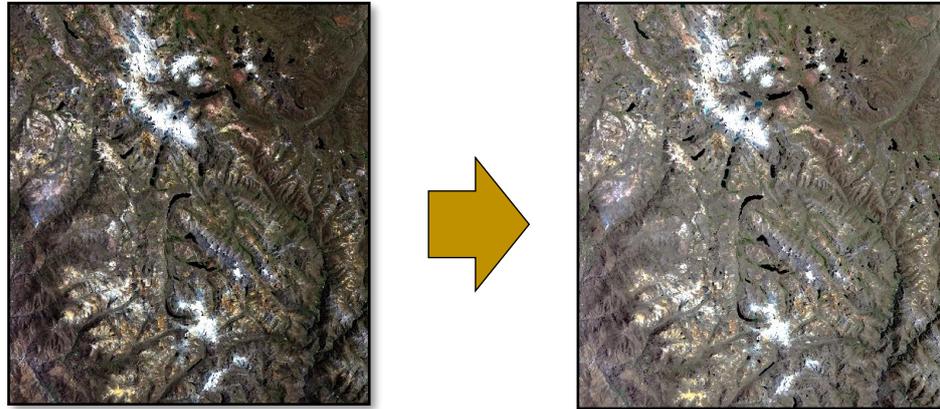


Figura Nro. 24: Imagen Landsat 8 calibrada radiométricamente.

2.3.1.2. Corrección Geométrica:

Las correcciones geométricas de la imagen incluyen cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles que la forman. Por contraposición con las correcciones radiométricas, aquí no se pretende modificar los niveles digitales de los píxeles de la imagen, sino solo su posición, sus coordenadas. Gracias a tratarse de un formato digital, esta transformación puede basarse en funciones numéricas, que permiten modificar muy flexiblemente la geometría de la imagen.

La corrección geométrica puede abordarse de acuerdo a dos procedimientos. En el primero, denominado corrección orbital, se pretende modelar aquellas fuentes de error geométrico conocidas, a partir de aplicar transformaciones inversas a las que realiza el sensor en el momento de la adquisición. Para ello es preciso disponer con bastante detalle, de las características orbitales de la plataforma y de las especificaciones del sensor. Gracias a ellas pueden corregirse errores sistemáticos, como son los derivados de la rotación o curvatura terrestre y de la inclinación de la órbita. El segundo enfoque resulta más empírico. Se trata de evaluar el error geométrico de la imagen a partir de una serie de puntos con coordenadas conocidas, que se denominan puntos de control. En este caso, el error se estima inductivamente, ya que en las funciones de transformación se incluyen simultáneamente todas las fuentes de error, asumiendo, como es lógico, que esos puntos sean suficientemente representativos de la deformación geométrica que tiene la imagen. (Chuvieco, 2002).

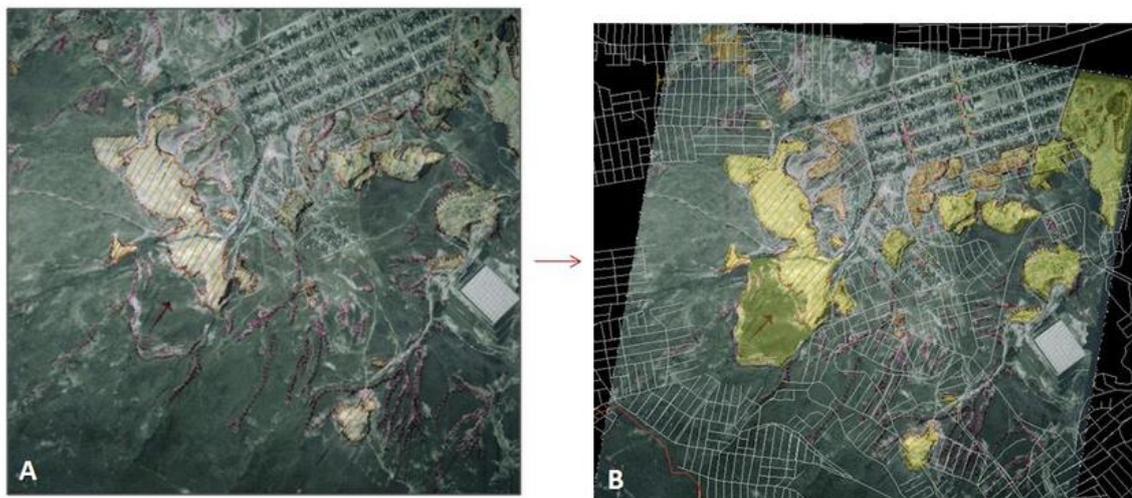


Figura Nro. 25: Imagen Landsat 8 calibrada geométricamente.

2.3.1.3. Corrección Atmosférica:

Las imágenes de la superficie terrestre, adquiridas en el espectro solar y que son tomadas por satélites de observación, se encuentran contaminadas por la luz solar dispersada hacia el sensor por las moléculas atmosféricas, los aerosoles y las nubes en

suspensión. Además, la energía solar que es reflejada desde la Tierra se encuentra atenuada por los efectos atmosféricos.

Estos efectos atmosféricos son dependientes de la longitud de onda, siendo variables en tiempo y espacio y dependientes, así mismo de la reflectividad de la superficie y su variación espacial. La corrección de estos efectos atmosféricos puede producir señales de teledetección que se encuentran mejor correlacionadas con las características de la superficie. La dispersión y la absorción molecular son, prácticamente, invariantes en tiempo y espacio. Dado que la absorción por los gases se encuentra, normalmente, minimizada eligiendo bandas en las ventanas atmosféricas, las principales variables en los efectos atmosféricos, son la dispersión y la absorción no resonante. La dispersión es la principal componente variable en superficies oscuras, mientras que la absorción es más importante para superficies más brillantes. Para la realización de correcciones atmosféricas rigurosas de datos de teledetección, deben de conocerse las características ópticas de la atmósfera. El procedimiento de corrección depende, en cierta medida, del tipo de efecto atmosférico y de la aplicación específica de los datos de teledetección. (Ormeño, 2006).

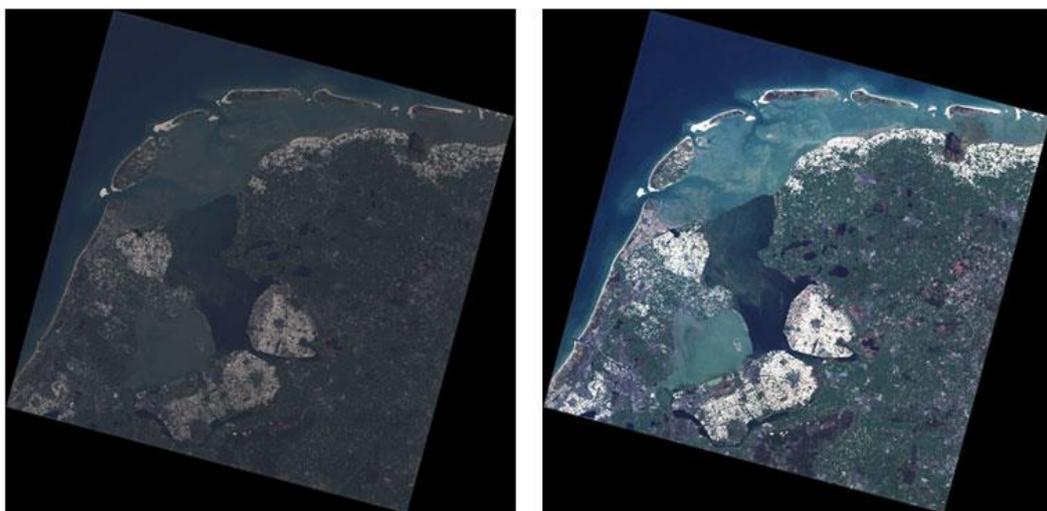


Figura Nro. 26: Imagen Landsat 8 calibrada atmosféricamente.

2.3.2. Clasificación Digital de la Imagen:

Para la mayor parte de usuarios de la teledetección, la clasificación supone la fase culminante del tratamiento digital de las imágenes, puesto que los resultados de la clasificación marcan la calidad final del proyecto desarrollado.

Este papel protagonista viene dado por la misma naturaleza de la teledetección espacial. Los ND adquiridos por el sensor no tienen sentido en sí mismos, sino en cuanto son interpretables; esto es, convertibles a categorías que supongan un mejor conocimiento del territorio. Como fruto de la clasificación digital se obtiene una cartografía e inventario de las categorías objeto de estudio. La información multispectral se condensa, en definitiva, en un documento cartográfico y en tablas estadísticas, que definen la localización y ofrecen el inventario superficial de las categorías de interés. (Chuvieco, 1995)

Suponiendo que los datos han pasado ya todo tipo de correcciones de tipo geométrico o atmosférico, existen dos métodos complementarios para afrontar la definición de clases, estos son válidos tanto en imágenes de satélite como en cualquier otro campo.

2.3.2.1. Clasificación Supervisada:

El método supervisado parte de un cierto conocimiento de la zona de estudio, adquirido por experiencia previa o por trabajos de campo. Esta mayor familiaridad con la zona, permite al intérprete delimitar sobre la imagen unas áreas piloto, que se consideran suficientemente representativas de las categorías que componen la leyenda. Estas áreas se denominan, *trainings fields* (campos de entrenamiento). El término indica que tales áreas sirven para “entrenar” al ordenador en el conocimiento de las distintas categorías. En otras palabras, a partir de ellas el ordenador calcula los ND que definen cada una de

las clases, para luego asignar el resto de los píxeles de la imagen a una de esas categorías en función de sus ND.

Acabada la delimitación de un campo de entrenamiento, pueden seleccionarse otros para la misma categoría, o bien culminar con él la definición de esa clase. En general resulta conveniente seleccionar varios campos por categoría, a fin de reflejar adecuadamente su variabilidad en la zona de estudio. (Chuvieco, 1995).

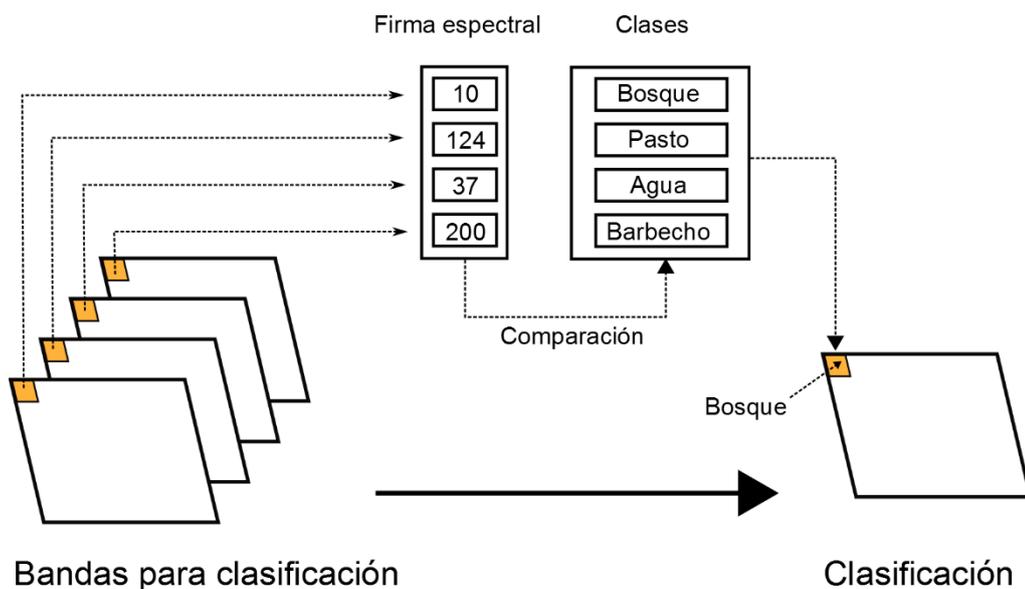


Figura Nro. 27: Clasificación Supervisada a partir de los píxeles de las áreas de entrenamiento.

2.3.2.2. Clasificación No Supervisada:

Este método se dirige a definir las clases espectrales presentes en la imagen. No implica ningún conocimiento del área de estudio, por lo que la intervención humana se centra más en la interpretación, que en la consecución de resultados.

En esta estrategia, se asume que los ND de la imagen forman una serie de agrupaciones o conglomerados (*clusters*), más o menos nítidos según los casos. Estos grupos equivaldrían a píxeles con un comportamiento espectral homogéneo y, por tanto, deberían definir clases temáticas de interés. Desgraciadamente, estas categorías



espectrales no siempre pueden equipararse a las clases informacionales que el usuario pretende deducir, por lo que resta a este “dar sentido”, interpretar, el significado temático de esas categorías espectrales. (Chuvieco, 1995).

2.4. TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

(SIG):

Para la mayor parte de los usuarios de la teledetección espacial, el fruto de los ensayos de clasificación es un mapa temático que refleje adecuadamente el estado de la variable de interés en el área de estudio.

La cartografía obtenida a partir de la teledetección constituye una variable más dentro de un sistema de información integrado, tan interesante para el mejor conocimiento del espacio que nos rodea. En pocas palabras, la teledetección constituye una técnica más de información territorial, que, unida a otros datos cartográficos o estadísticos, facilita una evaluación más certera del paisaje, necesaria para su mejor aprovechamiento o conservación. (Chuvieco, 1995).

De esta forma han nacido los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que puede definirse como una integración organizada de hardware, software, datos geográficos, recursos humanos y procedimientos, diseñados para capturar, almacenar, manipular y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada, con el fin de resolver problemas del territorio.



Figura Nro. 28: Componentes de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

2.4.1. Funciones de un SIG:

Para ilustrar con más detalle las aplicaciones de un SIG y su conexión con la teledetección espacial, conviene exponer previamente los principales componentes de este tipo de programas.

2.4.1.1. Entrada de Datos:

Para que pueda efectuarse un análisis integrado entre variables es preciso que todas ellas sean compatibles. Esto significa que se alojen en el mismo soporte (digital), con el mismo formato y sujetas a un sistema de referencia común. Por ello, la función más crucial de un SIG se encarga de la entrada y transformación de datos, para que todos ellos resulten coherentes con la base de referencia seleccionada para el proyecto.

A este respecto conviene tener presente que la información que se almacena en un SIG puede proceder de fuentes muy variables: teledetección, cartografía a diferentes escalas y/o proyecciones, datos demográficos o climáticos, modelos digitales de terreno, etc. Por esta razón un SIG debe incorporar la posibilidad de acceder a todas estas

variables, así como la de transformarlas apropiadamente para que sean mutuamente relacionables. (Chuvieco, 1995).

2.4.1.2. Almacenamiento y Organización de Datos:

Una vez convertida a formato digital, se precisa que la información se disponga de una manera coherente, de tal modo que se facilite su almacenamiento, consulta y actualización. Se distinguen dos aspectos de estructuras de almacenamiento: vectorial y raster.

- **Modelo Vectorial:**

La estructura del vector de datos es una abstracción del mundo real donde los datos de posición se representan en forma de coordenadas. En los datos vectoriales, las unidades básicas de información espacial son puntos, líneas y polígonos. Cada una de estas unidades está compuesta simplemente como una serie de uno o más puntos de coordenadas. (Skidmore, 2002).

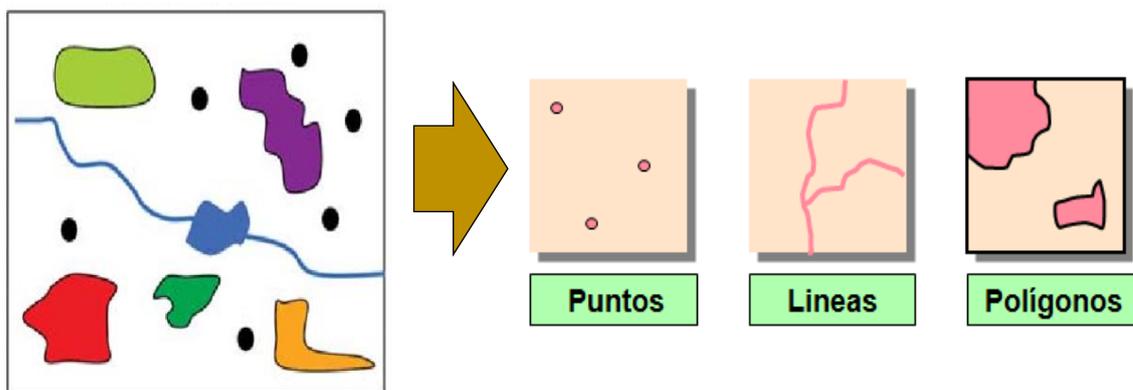


Figura Nro. 29: Modelo Vectorial (puntos, líneas y polígonos)

- **Modelo Raster:**

La estructura ráster consiste en la representación de nuestro mundo real o la representación de este en una grilla compuesta de celdas (pixel). Esta serie de datos ráster, basado en celdas, está orientado para representar fenómenos tradicionalmente geográficos

que varían continuamente en el espacio, como la elevación, inclinación o precipitación. Pero además pueden ser utilizadas para representar tipos de información menos tradicionales, tales como densidad de población, comportamiento del consumidor y otras características demográficas. (Achuy, 2006).

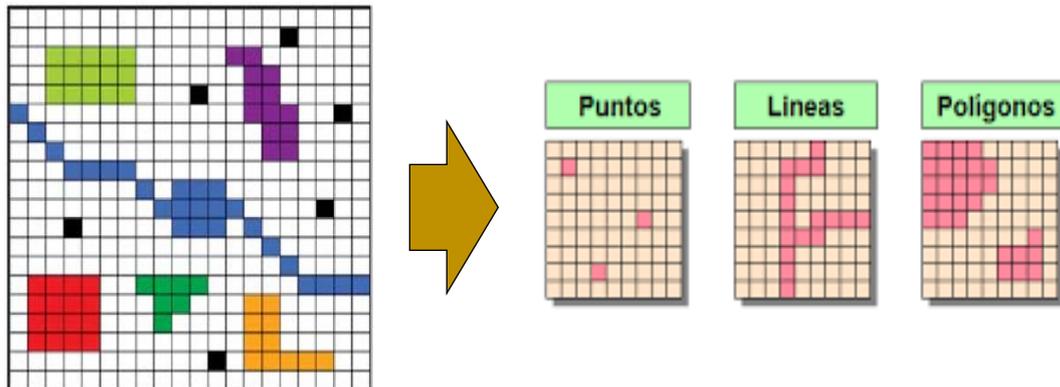


Figura Nro. 30: Modelo Raster.

Ambos sistemas ofrecen ventajas y desventajas para el almacenamiento y posterior manipulación de variables:

Tabla Nro. 7: Ventajas de un Modelo Vectorial y un Modelo Raster

VENTAJAS	
Vectorial	Raster
La estructura de los datos es compacta. Almacena los datos sólo de los elementos digitalizados por lo que requiere menos memoria para su almacenamiento y tratamiento.	La estructura de los datos es muy simple.
Codificación eficiente de la topología y las operaciones espaciales.	Las operaciones de superposición son muy sencillas.
Buena salida gráfica. Los elementos son representados como gráficos vectoriales que no pierden definición si se amplía la escala de visualización.	Formato óptimo para variaciones altas de datos.
Tienen una mayor compatibilidad con entornos de bases de datos relacionales.	Buen almacenamiento de imágenes digitales
Las operaciones de re-escalado, reproyección son más fáciles de ejecutar.	
Los datos son más fáciles de mantener y actualizar.	
En algunos aspectos permite una mayor capacidad de análisis, sobre todo en redes.	

Tabla Nro. 8: Desventajas de un Modelo Vectorial y un Modelo Raster

DESVENTAJAS	
Vectorial	Raster
La estructura de los datos es más compleja.	Mayor requerimiento de memoria de almacenamiento. Todas las celdas contienen datos.
Las operaciones de superposición son más difíciles de implementar y representar.	Las reglas topológicas son más difíciles de generar.
Eficacia reducida cuando la variación de datos es alta.	Las salidas gráficas son menos vistosas y estéticas. Dependiendo de la resolución del archivo raster, los elementos pueden tener sus límites originales más o menos definidos.
Es un formato más laborioso de mantener actualizado.	

2.4.1.3. Análisis y Transformaciones:

Incluye cualquier operación que transforme las variables originales para un objetivo determinado. Las posibilidades son muy amplias: señalar corredores en torno a un polígono o línea; trazar la ruta óptima entre varios puntos; generar modelos digitales de terreno; calcular distancias, áreas y perímetros, superponer dos o más capas (unión, intersección), realizar tablas de coincidencia espacial entre dos o más variables, etc. (Chuvienco, 1995).

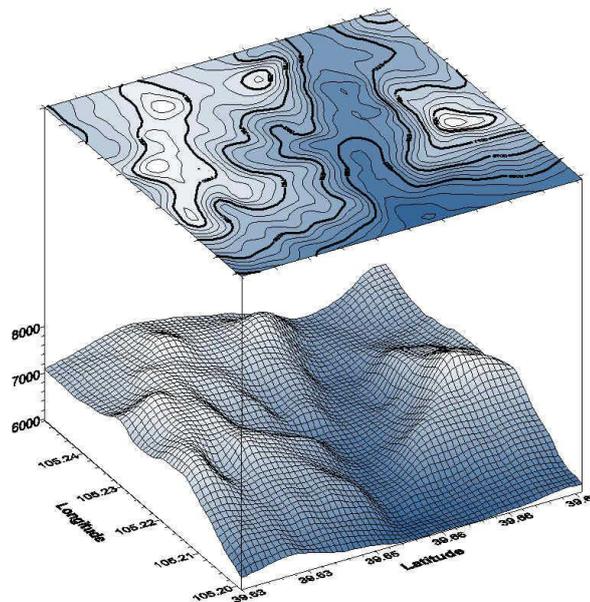


Figura Nro. 31: Análisis y transformación de Modelo de Elevación Digital (DEM).

2.4.1.4. Representación Visual:

Un SIG permite aprovechar los numerosos periféricos de representación gráfica accesibles a un ordenador, facilitando la obtención de resultados en un formato de considerable calidad. Buena parte de la calidad de estas reproducciones gráficas se debe al tipo de programas de representación que incorpora un SIG. En este terreno las posibilidades son muy amplias. Puede optarse por una cartografía de isoclasas, por representaciones en 3 dimensiones, etc. Queda a la elección del usuario el diseño del mapa: localización, leyenda, escala gráfica, rotulación, etc. (Chuvieco, 1995).

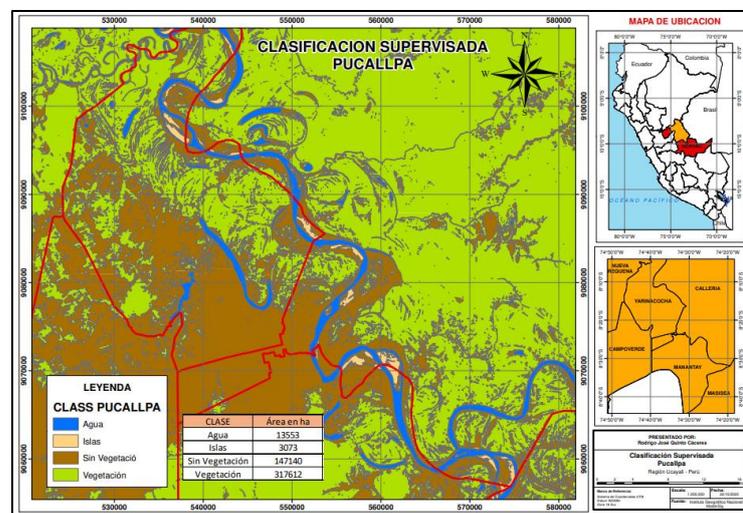


Figura Nro. 32: Representación visual de un SIG.

2.5. PASIVOS AMBIENTALES MINEROS:

2.5.1. Definición:

Son considerados pasivos ambientales aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonadas o inactivas y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad. (Art. 2º de la Ley N° 28271).

2.5.2. Tipos de Pasivos Ambientales:

Se considera 3 tipos de PAMs y más de 10 subtipos:

Tabla Nro. 9: Tipos de Pasivos Ambientales.

TIPO	SUBTIPO
LABOR MINERA	Bocaminas, trincheras, chimeneas, piques, rampa, socavón, corte, tajo, tajeos comunicados y tajos abiertos.
RESIDUO MINERO	Relaves, desmontes de mina, material de desbroce, escoria, pilas de lixiviación.
INFRAESTRUCTURA	Campamentos, oficinas, talleres, plantas de procesamiento, chancadoras y otras instalaciones relacionadas con el proyecto minero

Según (Castillo, 2017). Define algunos Subtipos de los Pasivos Ambientales Míneros:

2.5.2.1. Labor Minera:

- **Bocamina:** Entrada al espacio interior donde se realizan las actividades de una mina subterránea.
- **Trinchera:** Excavación en la superficie del terreno más o menos profunda que se realiza normalmente con fines de reconocimiento o exploración. Zanja exploratoria que se ejecuta cuando el mineral aflora
- **Chimenea:** Es una excavación vertical o inclinada construida desde un nivel inferior a una superior con la finalidad del paso del personal, para transportar material y/o para ventilar los lugares de trabajo. Las chimeneas que salen a superficie generalmente sirven para la ventilación de la mina.
- **Tajo:** Es el espacio vacío dejado por la explotación de minerales a cielo abierto, este ha quedado generalmente delimitado por caminos de acceso y plataformas de circulación de los camiones.
- **Tajeo Comunicado:** Labor minera de explotación que comunica a superficie
- **Pique:** Es una labor vertical o subvertical, muy utilizada en minería subterránea, que sirve de comunicación entre la mina subterránea y la superficie. Su finalidad es el traspaso de mineral; subir o bajar al personal, material, equipos; inyección,



extracción de aire para ventilación; abastecimiento de agua y todo lo necesario para el desarrollo de la mina.

- **Rampa:** Excavación inclinada para permitir el ingreso y salida de una labor minera subterránea.
- **Corte:** Es el área cercana a la bocamina (ingreso), que por su estructura y composición es similar a un rajo.
- **Socavón:** Es la labor horizontal de ingreso a una mina subterránea

2.5.2.2. Residuos Mineros:

- **Desmonte de Mina:** Es el área ocupada por los materiales extraídos del interior de la mina o del área de explotación de la minería superficial, que no contiene valores extraíbles.
- **Depósito de Relave:** Es un conjunto de desechos de las operaciones mineras usualmente constituido por una mezcla de rocas molidas, agua y minerales (sin valor comercial).
- **Material de Desbroce:** Material del proceso de remoción de la roca sobreyacente al depósito mineral para exponer el mineral.
- **Escoria:** Son un subproducto de la fundición (uso de altas temperaturas) de los metales.
- **Pilas de Lixiviación:** Es un método metalúrgico de extraer el mineral con la adición de reactivos químicos.

2.5.2.3. Infraestructura:

- **Edificaciones e instalaciones:** Son las construcciones tales como: planta concentradora, laboratorios, campamentos, oficinas, talleres, almacenes, suministro de energía y agua.

2.5.3. Normativa Legal:

La Ley N° 28271, Ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera, tiene por objeto regular la identificación de los pasivos ambientales de la actividad minera, la responsabilidad y el financiamiento de la remediación de las áreas afectadas por éstos, destinados a su reducción y/o eliminación, con la finalidad de mitigar sus impactos negativos a la salud de la población, al ecosistema circundante y la propiedad.

Tabla Nro. 10: Actualización del Inventario de Pasivos Ambientales.

Año	Dispositivo Legal	Sumilla
2006	R.M. N° 290-2006-MEM/DM	Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros
2007	R.M. N° 487-2007-MEM/DM	Aprueban la inclusión de pasivos ambientales mineros en la cuenca del río Llaucano- provincia de Hualgayoc - departamento de Cajamarca- presentados por el FONAM
2008	R.M. N° 591-2008-MEM/DM	Aprueban inclusión de 22 pasivos ambientales mineros ubicados en el Cerro Santa Bárbara, distrito de Yanama, provincia de Yungay, Región Ancash
2009	R.M. N° 246-2009-MEM/DM	Aprueban inclusión de pasivos ambientales mineros ubicados en la Región de Huancavelica en el Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros
2010	R.M. N° 471-2010-MEM/DM	Actualizan Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros
2011	R.M. N° 267-2011-MEM/DM	Disponen actualizar el Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros a nivel nacional
2011	R.M. N° 531-2011-MEM/DM	Actualizan Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros
2012	R.M. N° 393-2012-MEM/DM	Actualizan Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros aprobado mediante R.M. N° 290-2006-MEM/DM
2013	R.M. N° 430-2013-MEM/DM	Actualizan Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros aprobado mediante R.M. N° 290-2006-MEM/DM
2014	R.M. N° 234-2014-MEM/DM	Actualizan Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros
2015	R.M. N° 102-2015-MEM/DM	Actualizan Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros
2016	R.M. N° 535-2016-MEM/DM	Actualizan Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros aprobado mediante R.M. N° 290-2006-MEM/DM
2018	R.M. N° 224-2018-MEM/DM	Actualizan el Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros
2019	R.M. N° 408-2019-MEM/DM	Actualizan el Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros
2020	R.M. N° 238-2020-MINEM/DM	Actualizan el Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros
2021	R.M. N° 200-2021-MINEM/DM	Actualizan el Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (MINEM).



2.5.4. Pasivos Ambientales Mineros en Ananea - Puno:

De acuerdo al último inventario actualizado R.M. N° 200-2021-MINEM/DM de fecha 30/06/2021, actualmente en el país tenemos 7668 Pasivos Ambientales, de los cuáles 1154 pertenecen a la región Puno, 121 se localizan en la provincia de San Antonio de Putina y 15 se encuentran en el Distrito de Ananea.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES Y EQUIPOS:

Para realizar el proyecto de investigación, se necesitaron los siguientes materiales:

- **Materiales de Escritorio:**
 - Papel Bond A4.
 - Lapiceros.
 - USB.
 - Folder

- **Información Cartográfica y Satelital:**
 - Información Catastral.
 - Planos Geológicos regionales.
 - Modelos de Elevación Digital ALOS PALSAR.
 - Imágenes Satelitales Landsat 8.
 - Imágenes Satelitales SAS PLANET.

- **Hardware:**
 - Laptop HP i5
 - Impresora

- **Software:**
 - ArcGIS 10.5
 - ENVI 5.3
 - Microsoft Excel 2016
 - Microsoft Word 2016



3.2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN:

La investigación utilizó una metodología cuantitativa, del tipo descriptivo - transversal. Pues no se manipuló deliberadamente variables de campo, sin embargo, se utilizó información espectral del satélite Landsat 8 del año 2021. La secuencia y los métodos que se emplearon en el proceso de investigación se detallan a continuación:

3.2.1. Adquisición de información y material bibliográfico:

Se hizo una recopilación de información relacionada a los Pasivos Ambientales y Teledetección, se revisó información bibliográfica concerniente al área al de estudio del distrito de Ananea, como libros, tesis de pre-grado y post-grado de origen regional, nacional e internacional, artículos científicos, normativas legales y boletines del INGEMMET; para orientar y fundamentar la investigación.

3.2.2. Adquisición de datos:

Se descargaron imágenes ALOS PALSAR, las cuales son modelos de elevación digital que poseen una resolución de 12.5 m, estas se obtuvieron de la página web Alaska Satellite Facility – NASA, específicamente de página web: <https://search.asf.alaska.edu/#/>. En total se descargaron 03 DEMs, de manera que cubrió el área de la investigación.

Se descargaron imágenes satelitales LANDSAT 8 en formato TIFF, de la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), previa solicitud de acceso y creación de una cuenta personal. A través del link: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Las imágenes se buscaron con el más bajo porcentaje de nubosidad, para darle un procesamiento y análisis más correcto a cada una de ellas. Las especificaciones técnicas de dichas imágenes se detallan en los resultados.



Se descargó a la última actualización del Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros, según R.M. N° 200-2021-MINEM/DM, y se identificaron los que pertenecían al distrito de Ananea.

3.2.3. Procesamiento y Análisis de Datos:

Con los modelos de elevación digital ALOS PALSAR, y el uso del Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGis 10.5, se realizó el procesamiento de unión y corte, delimitando así toda el área de investigación.

La imagen LANDSAT 8 de la zona de estudio, pasó por procesamiento de corrección radiométrica, atmosférica y geométrica, con el fin de hacer un análisis más preciso, disminuyendo en el proceso los errores producidos por el sensor y la atmósfera. Para luego realizar la combinación de bandas mediante el software ArcGis 10.5, escogiendo las combinaciones que identificaban mejor los elementos de la zona de estudio.

3.2.4. Clasificación de la Imagen:

Realizada la combinación de bandas e identificados los diversos elementos del área de estudio, se procedió a definir las clases o áreas de entrenamiento, y se les asignó nombres informacionales, para así generar polígonos representativos y poder clasificarlos. Posterior a ello se aplicó un filtro mayoritario para eliminar los ruidos sobrantes en la imagen, y para realizar el análisis cuantitativo se procedió a convertir la imagen raster en un formato vectorial mediante la herramienta, obteniendo así las áreas de cada clase.



3.2.5. Análisis de Índices Espectrales:

Culminado todo el proceso de clasificación se procedió a realizar el cálculo de índices espectrales (NDVI, NDWI y NDSI), de forma que se resaltó el estado ambiental de elementos como la vegetación, suelos, ríos, lagunas y glaciares.

3.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS:

Con el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) del software ArcGis 10.5 y ENVI 5.3. se organizó y procesó toda la información, de manera que se interpretaron los resultados de los índices y firmas espectrales de cada elemento, en relación al área de impacto de los Pasivos Ambientales Mineros del distrito de Ananea, cuantificando y evaluando el área de estudio.

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. UBICACIÓN:

La zona de estudio se ubica en el distrito de Ananea, provincia de San Antonio de Putina, en el departamento de Puno, a una altitud de 4.660 msnm, en los Andes Centrales, en el flanco oriental, al sur de Perú; en los cuadrángulos 30x y 30y, del sistema de coordenadas UTM WGS84 Zona 19 Sur, con referencia en los puntos:

Tabla Nro. 11: Coordenadas UTM con referencia a la Zona de Estudio.

PUNTO	NORTE	ESTE
1	8400000	410000
2	8350000	410000
3	8400000	480000
4	8350000	480000

4.2. LÍMITES:

La zona de estudio posee los siguientes límites:

Tabla Nro. 12: Límites de la Zona de Estudio.

LÍMITES	PROVINCIALES	DISTRITALES
NORTE	Sandia	Cuyo Cuyo, Quiaca y Sina
SUR	Huancane	Quillcapuncu y Cojata
OESTE	San Antonio de Putina	Putina
ESTE	Bolivia	

4.3. EXTENSIÓN SUPERFICIAL:

La extensión superficial del Distrito de Ananea es de 96397.35 ha.

4.4. POBLACIÓN:

Según el último censo del INEI, el distrito de Ananea cuenta con un total de 20572 habitantes, y una densidad de 13.43 hab/ km².

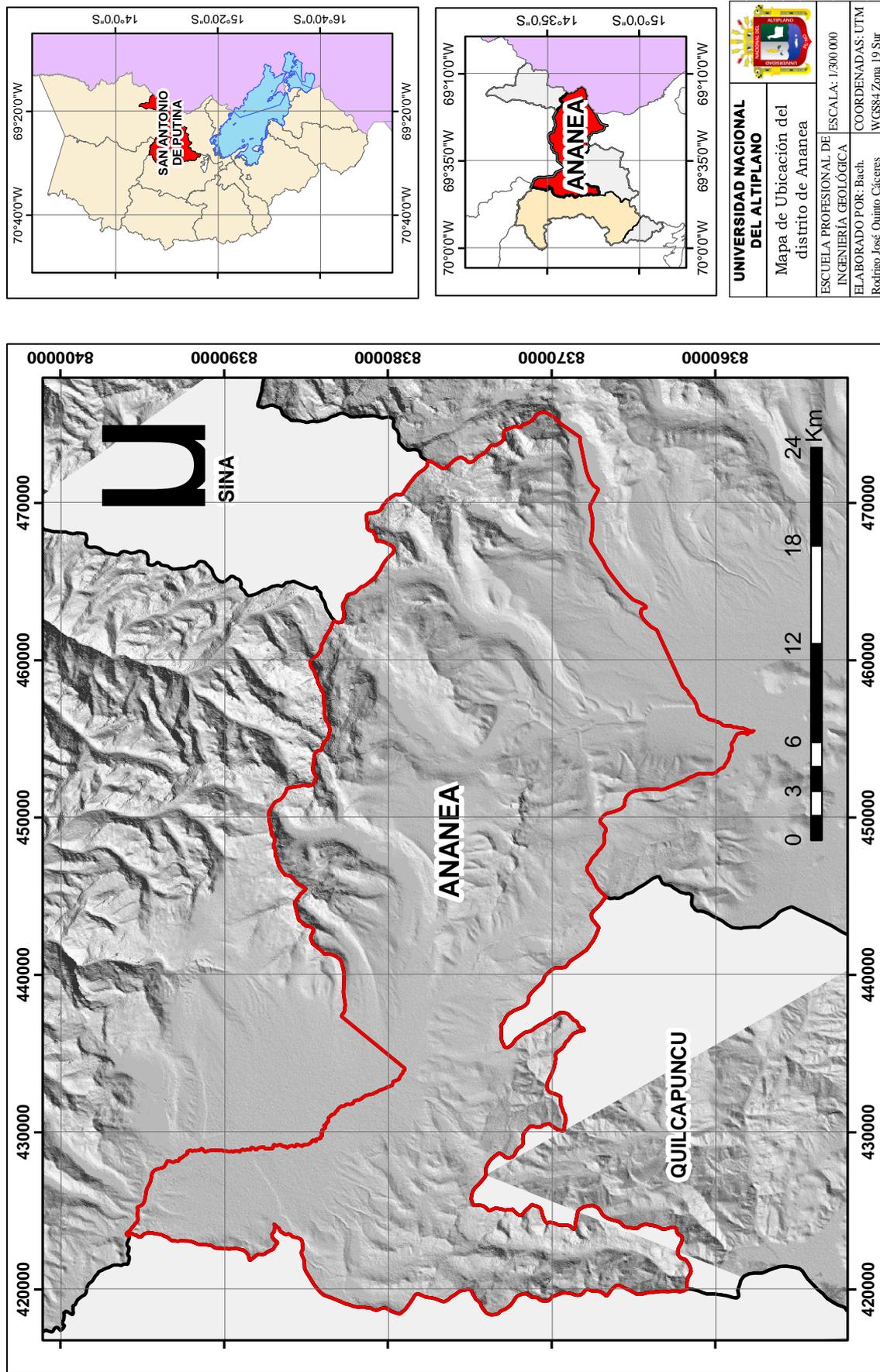


Figura Nro. 33: Mapa de Ubicación de la zona de estudio

4.5. CUENCAS HIDROGRÁFICAS:

El distrito de Ananea se encuentra en la Región Hidrográfica del Titicaca, y posee 3 cuencas principales en su área: la cuenca Azángaro, la cuenca Huancané y la cuenca Suches, y éstas a su vez, poseen subcuencas con la siguiente extensión superficial:

Tabla Nro. 13: Cuencas Hidrográficas de la zona de estudio.

Región Hidrográfica	Cuencas	Subcuencas	Hectáreas (Ha)
Región Hidrográfica del Titicaca	Cuenca Huancané	Alto Huancané	9806.85
	Cuenca Azángaro	Alto Azángaro	44849.06
	Cuenca Suches	Trapiche	34295.45
		Cuenca Suches	7301.27

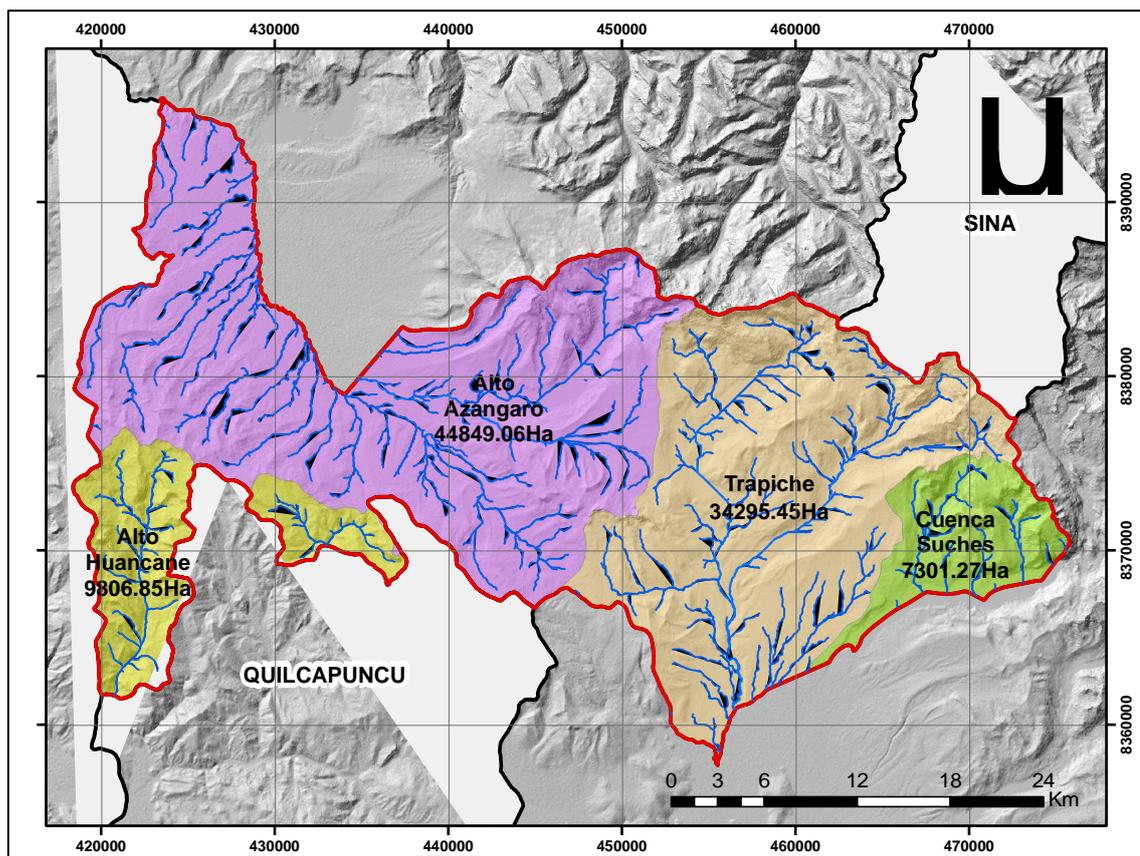


Figura Nro. 34: Mapa de Subcuencas Hidrográficas del distrito de Ananea.

4.6. GEOMORFOLOGÍA:

Para la elaboración del mapa geomorfológico del distrito de Ananea, se tomó en cuenta las pendientes del terreno y el cartografiado realizado por el INGEMMET. La identificación de las unidades geomorfológicas es indispensable para conocer las diferentes y complejas formas del terreno en el área de estudio, lo cual permite realizar un mejor análisis de la dinámica y procesos de cambio que cada elemento de la naturaleza sufrió, producto de sucesos naturales o producidos por él hombre. A continuación, se describen las unidades geomorfológicas:

Tabla Nro. 14: Unidades Geomorfológicas del distrito de Ananea.

Nro.	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA	ETIQUETA	ÁREA (Ha)
1	Altiplanicie sedimentaria	AP-s	4994.39
2	Colina en roca sedimentaria	RC-rs	15551.67
3	Colina y lomada ignimbrítica	CL-ig	752.72
4	Laguna y cuerpos de agua	Lg/ca	1298.78
5	Montaña con cobertura glaciar	RM-cgl	2379.09
6	Montaña en roca metamórfica	RM-rm	18114.46
7	Montaña en roca sedimentaria	RM-rs	5065.01
8	Morrenas	Mo	31944.79
9	Terraza aluvial	T-al	362.21
10	Terraza baja aluvial	Tb-al	1278.41
11	Valle glaciar	Vll-gl	207.45
12	Valle glaciar con laguna	Vll-gl/l	4569.94
13	Vertiente glaciar o de gelifracción	V-gl	184.98
14	Vertiente glacio-fluvial	V-gfl	2655.38
15	Vertiente o piedemonte aluvial	V-al	6862.68
16	Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial	V-cd	143.83

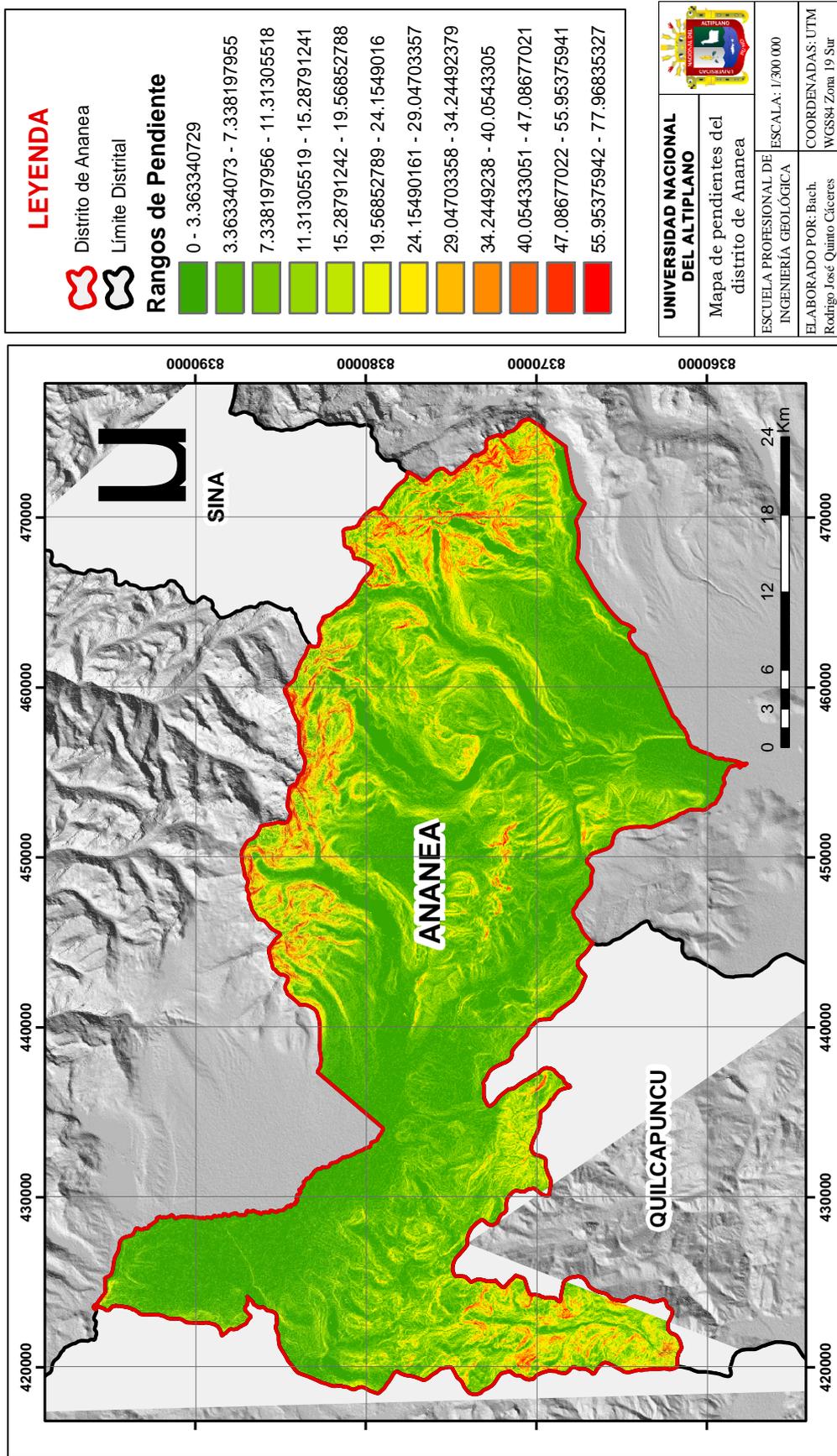


Figura Nro. 35: Mapa de Pendientes del distrito de Ananea.



4.7. LITO - ESTRATIGRAFÍA:

En el área de estudio aflora terrenos cuyas edades van del Paleozoico inferior (Ordoviciano), Paleozoico superior, Cretáceo, Paleógeno y depósitos cuaternarios.

El Paleozoico inferior compuesto por las formaciones Sandia (Ordoviciano) y Ananea (Siluro-Devoniano) afloran en la Alta Cordillera o Cordillera Oriental propiamente dicha. La Formación Sandia, fue definida inicialmente por Laubacher (1978), se compone de areniscas finas cuarzosas con intercalaciones de pizarras negras. Su grosor alcanza los 1,600 m. La Formación Ananea (500 m), es una monótona sucesión de pizarras negras en paquetes de 20 hasta 80cm.

El Paleozoico superior conforma prácticamente la pre-cordillera de Carabaya. Está conformada por el Grupo Ambo (2,000 m), distinguiéndose 4 unidades litológicas: Conglomerados y areniscas gruesas, areniscas de grano fino y medio, lutitas negras, y areniscas muy finas, finas y lutitas.

El Grupo Tarma (700 m) con 2 unidades litológicas: la inferior, compuesta por areniscas finas de marcado color verde, y la superior, de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso.

El Grupo Copacabana (720 m) con 3 unidades litológicas: la inferior, compuesta por calizas finas negras, con ligero olor fétido y algunas intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano medio con macro fauna de pelecípodos y gasterópodos. La unidad media, con gruesos paquetes de calizas bioclásticas. La unidad superior, compuesta por areniscas e intercalaciones de calizas bioclásticas.

El Cretáceo reposa en discordancia angular sobre los terrenos del Paleozoico superior. Comienza con 200 m de conglomerados (conglomerado Chupa). La Formación



Huancané (190 m) que aflora en el extremo central sur del cuadrángulo de Putina, no tiene relación directa con los conglomerados, pero estratigráficamente se sitúa por encima de ellos; está compuesta por areniscas cuarzosas con estratificación cruzada. El Grupo Moho (90-200 m) en la zona sobreyace directamente sobre los conglomerados Chupa. Es una sedimentación roja compuesta por lutitas, areniscas finas y algunos bancos de calizas; continúa hacia arriba gradacionalmente el Grupo Cotacucho (460 m), conformado por 3 unidades cuya litología contiene areniscas cuarzosas y subarcosas de grano fino, medio y grueso con algunas intercalaciones de conglomerados. La Formación Vilquechico sobreyace también en contacto gradacional al Grupo Cotacucho. Se compone de 3 unidades cuya litología es mayormente areniscas muy finas, lutitas, calizas y algunas intercalaciones de areniscas de grano medio. Gradacionalmente sobre la Formación Vilquechico, se sucede la Formación Muñani (480 m) compuesta por areniscas de grano fino, medio y grueso con intercalaciones de lutitas. Esta formación tiene un marcado color rojizo.

Discordantemente sobre los anteriores terrenos en el área de estudio, se presentan derrames de tobas e ignimbritas que completan la columna estratigráfica; depósitos cuaternarios compuestos por las formaciones Arcoja y Azángaro cuya litología consiste de lutitas verdosas, negras a veces carbonosas y conglomerados. Los depósitos cuaternarios consisten en morrenas y aluviales asociados. (Chavéz et al., 1996)

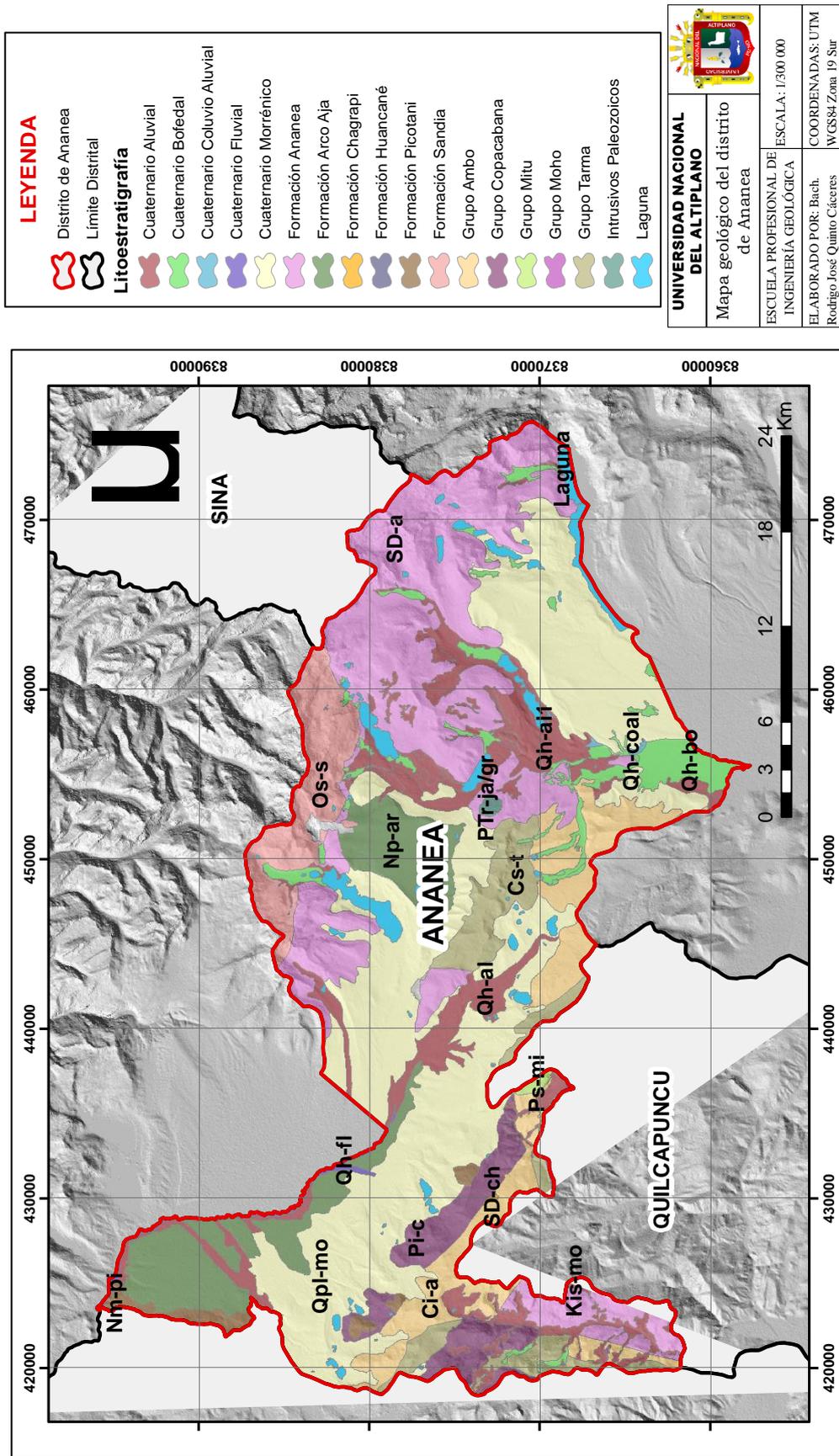


Figura Nro. 37: Mapa Geológico del distrito de Ananea. FUENTE: Geocatmin

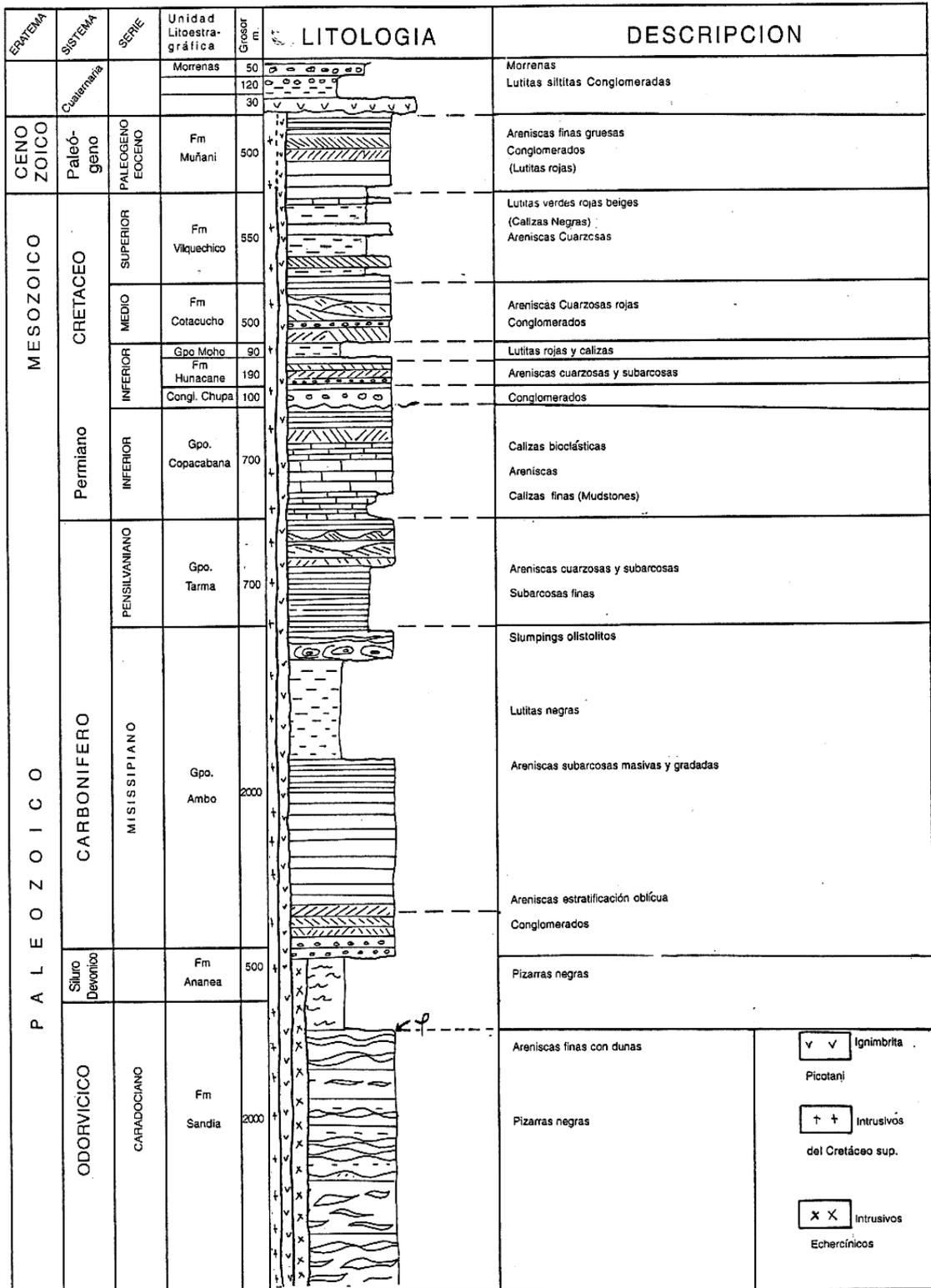


Figura Nro. 38: Columna Estratigráfica de los cuadrángulos de Putina y la Rinconada (30x – 30y) FUENTE: INGEMMET, boletín N° 66 (1996)



4.8. GEOLOGÍA ECONÓMICA:

4.8.1. Depósitos Metálicos:

- **Cordillera Oriental:**

En la hoja de La Rinconada, se ubica la Cordillera Oriental, encontrándose la mineralización emplazada en rocas de la Fm. Ananea, a manera de vetas capa tipo filoneano, mantos auríferos que se encuentran hospedados en rocas metamórficas de bajo grado (pizarras) con mineralización de cuarzo y contenido de venillas de oro. (Chavéz et al., 1996).

- **Pre-Cordillera de Carabaya:**

Se ubica en la hoja de Putina. Presenta una mineralización polimetálica de wolframio en scheelita y ferberita emplazadas en rocas del Grupo Ambo, a manera de vetas que están asociadas a intrusiones subvolcánicas correspondientes al Mioceno superior. Está compuesto además de Cu, Zn, Ag y Pb.

- **Oro diseminado en depósitos fluvioglaciares:**

a) **Ananea - Pampablanca:** Se distribuyen en las hojas de Putina y La Rinconada producto de la erosión, acarreo y depositación de materiales rocosos con oro diseminado en pepitas, charpas y en polvo, distribuidos en las morrenas frontales de Ananea.

b) **Ancoccala - Chaquimínas:** Depósitos fluvioglaciares con contenido de oro con leyes erráticas que provienen de los nevados Ñacaria y Ananea ubicándose en el cuadrángulo de Putina en las partes terminales de las morrenas o en sus confluencias en dirección al río Carabaya, donde las leyes aumentan por la

presencia de sedimentos fluvio-glaciares debido a una reconcentración por removilización. (Chavéz et al., 1996).

4.9. ADQUISICIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS (PAMs):

De acuerdo a la última actualización del Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros, según Resolución Ministerial N° 200-2021-MINEM/DM, se identificaron 15 PAMs en el distrito de Ananea, siendo estos, de los tipos: Labor Minera, Residuos Mineros e Infraestructura, los cuáles a su vez, detallan los subtipos de Pasivos Ambientales, su ubicación geográfica, el código de derecho minero y el nombre del derecho minero.

Tabla Nro. 15: Pasivos Ambientales del distrito de Ananea.

N°	EUM	TIPO	SUBTIPO	DISTRITO	ZONA UTM WGS84 19S	
					ESTE	NORTE
1	Chaquiminas	Residuo Minero	Desmorte de Mina	Ananea	451975	8375789
2	Relaves de Cianuración Rinconada	Residuo Minero	Desmorte de Mina	Ananea	452329	8381573
3	Relaves de Cianuración Rinconada	Residuo Minero	Desmorte de Mina	Ananea	451587	8382304
4	Planta de Lavado Nueva Fortuna	Residuo Minero	Relaves	Ananea	449081	8377582
5	Chaquiminas	Residuo Minero	No Identificado	Ananea	448549	8374717
6	Chaquiminas	Residuo Minero	Desmorte de Mina	Ananea	446680	8377514



7	Chaquiminas	Labor Minera	Tajo	Ananea	438091	8377328
8	Chaquiminas	Residuo Minero	Desmonte de Mina	Ananea	435623	8378014
9	Chaquiminas	Residuo Minero	Desmonte de Mina	Ananea	437487	8377594
10	Chaquiminas	Labor Minera	Tajo	Ananea	439310	8378841
11	Chaquiminas	Residuo Minero	Desmonte de Mina	Ananea	449804	8381023
12	Chaquiminas	Labor Minera	Tajo	Ananea	444337	8377010
13	Chaquiminas	Residuo Minero	Desmonte de Mina	Ananea	436297	8377903
14	Chaquiminas	Residuo Minero	Desmonte de Mina	Ananea	452128	8379878
15	Chaquiminas	Infraestructura	Campamento	Ananea	443490	8377440

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (MINEM).

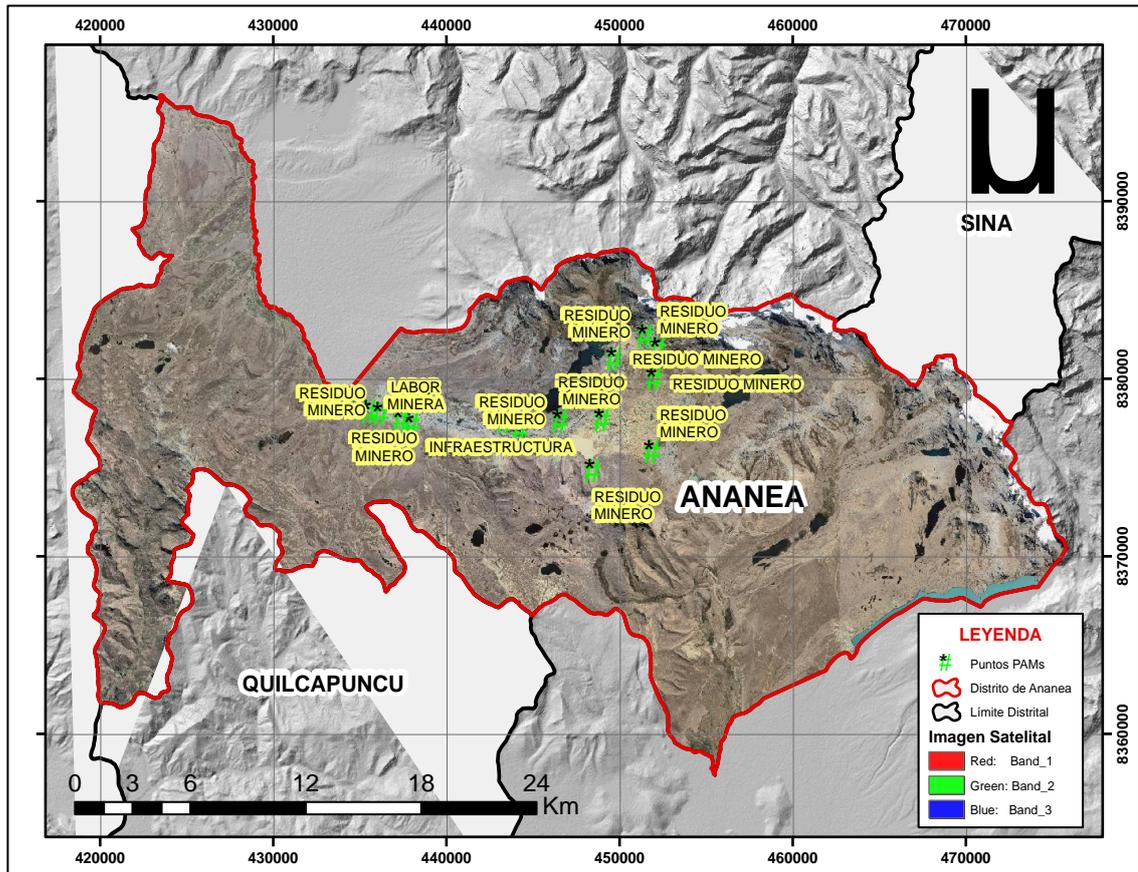


Figura Nro. 39: Mapa de ubicación de Pasivos Ambientales Mineros del distrito de Ananea.

4.10. ADQUISICIÓN DE DATOS SATELITALES:

4.10.1. Modelos de Elevación Digital (DEM):

Se descargaron imágenes ALOS PALSAR, las cuales son modelos de elevación digital (DEM) más atractivos, con una resolución nativa de 30 y 12,5 metros remuestreados a nivel mundial y de manera multitemporal, con una periodicidad de 46 días, estas se obtuvieron de la página web Alaska Satellite Facility – NASA, específicamente de la siguiente página web: <https://search.asf.alaska.edu/#/>. En total se descargaron 03 DEMs, de manera que cubrió el área de estudio.

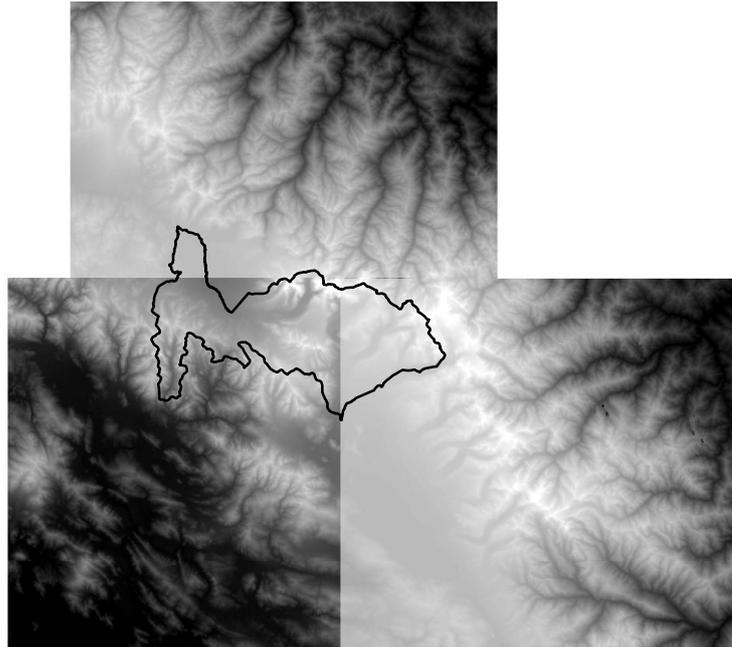


Figura Nro. 40: Modelos de Elevación Digital ALOS PALSAR con resolución 12,5 metros, para el área de estudio.

4.10.2. Imágenes Satelitales LANDSAT 8:

Se descargaron imágenes satelitales Landsat 8 en formato TIFF, de la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), previa solicitud de acceso y creación de una cuenta personal. A través del link: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Las imágenes se buscaron con el más bajo porcentaje de nubosidad, inferior al 10%, y considerando los meses de abril a junio, (época seca), para darle un procesamiento y análisis más correcto a cada una de ellas.

La imagen satelital detalla en su Metadata todas sus características, de las cuáles las más relevantes son:

Tabla Nro. 16: Características de la Imagen Satelital LANDSAT 8, elegida para la zona de estudio.

CARACTERÍSTICAS DE LA IMAGEN LANSAT 8			
SENSOR	OLI , TIRS	PATH	2
FECHA DE ADQUISICIÓN	2/05/2021	ROW	70
HORA	14:40:22	CUBIERTA DE NUBE	9.86
FORMATO	GEOTIFF	AZIMUTH SOLAR	44.17

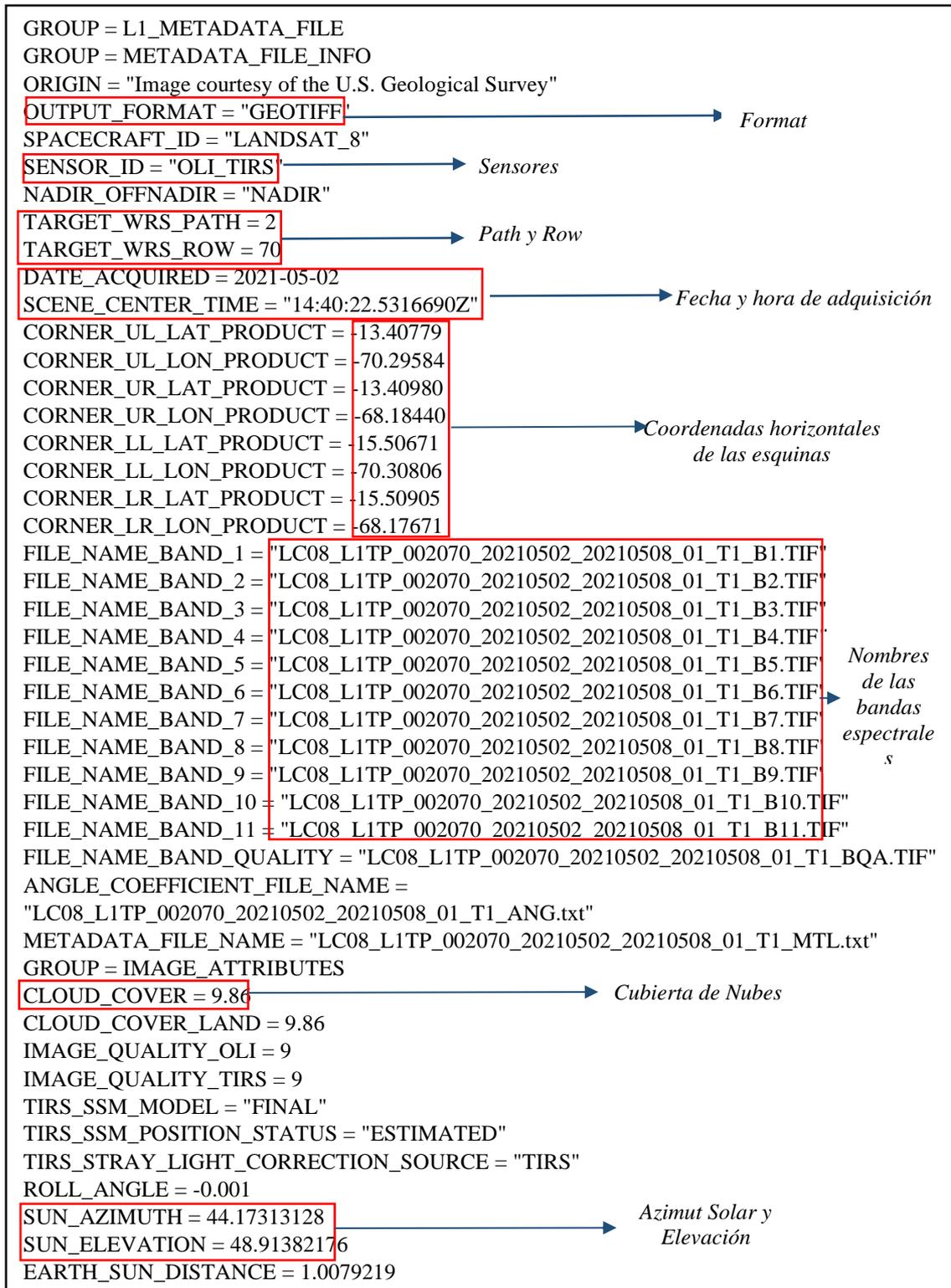


Figura Nro. 41: Metadata de la Imagen Satelital LANDSAT 8, elegida para la zona de estudio.

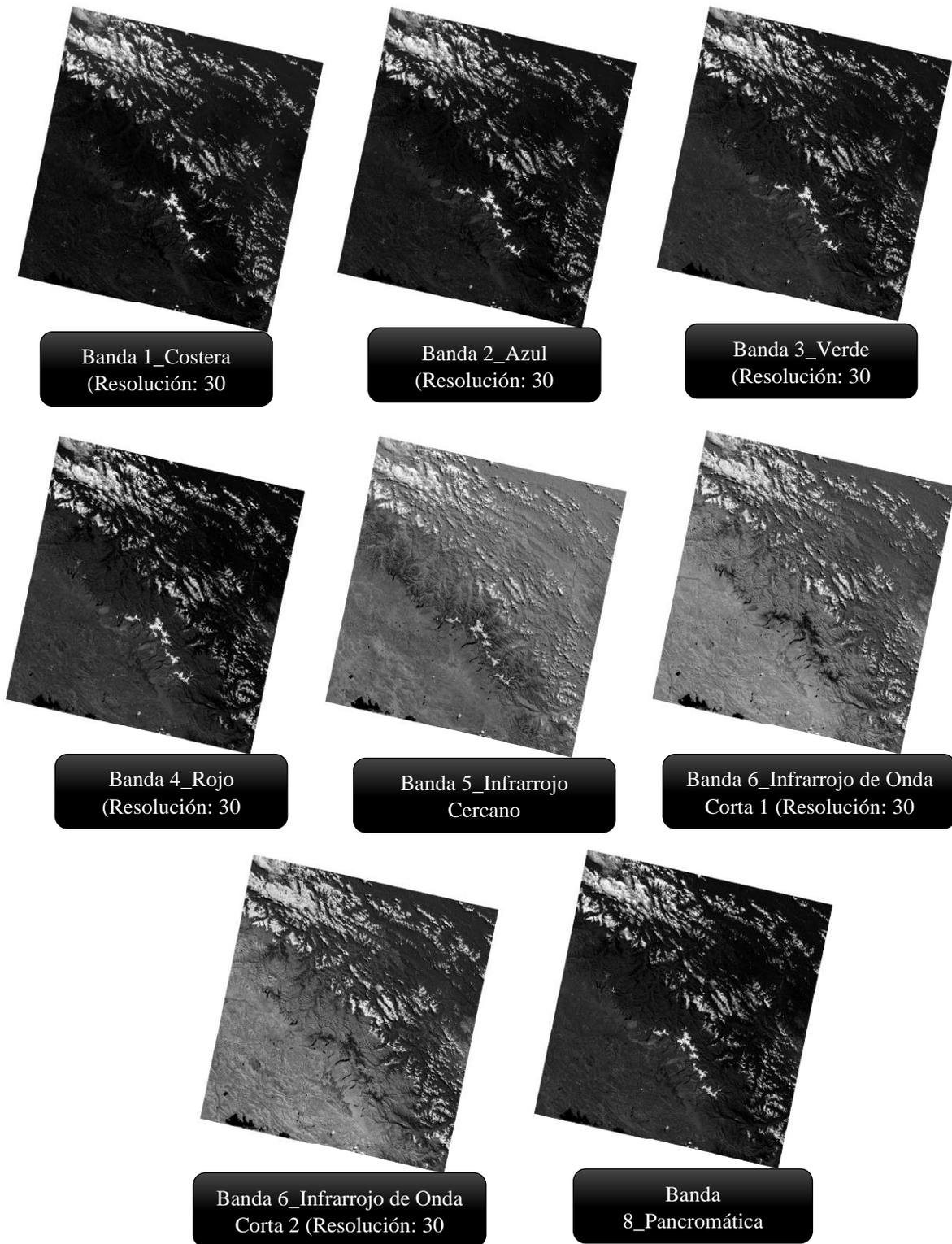


Figura Nro. 42: Bandas espectrales del sensor OLI, de la imagen satelital LC08_L1TP_002070_20210502_20210508_01_T1

4.11. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS SATELITALES:

4.11.1. Delimitación del Área de Investigación:

Con los modelos de elevación digital ALOS PALSAR, y el uso del Software ArcGis 10.5, se realizó el proceso de *Mosaic To New Raster*, con las herramientas del ArcToolbox, de manera que los 3 DEMs descargados, se vuelvan uno solo, luego se eliminó las imperfecciones del modelo de elevación digital mediante el uso de la herramienta *Fill*, y se realizó una máscara o corte mediante la herramienta *Extract by Mask*, delimitando así todo el distrito de Ananea.

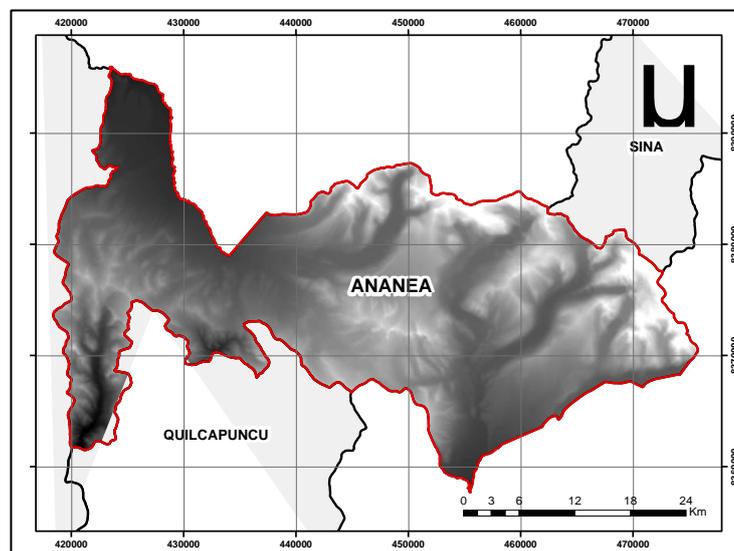


Figura Nro. 43: Modelo de Elevación Digital ALOS PALSAR (12,5m) corregido y recortado en base al área de estudio.

4.11.2. Tratamiento Digital de la Imagen LANDSAT 8:

4.11.2.1. Corrección Radiométrica:

Los mecanismos que afectan e intervienen en la medida de los valores de brillo de los píxeles, pueden ser fuentes de distorsión radiométrica, en primer lugar, la distribución del brillo en la imagen para cada una de las bandas puede ser diferente en la escena y en el terreno, en segundo lugar, el nivel digital de un píxel singular de una banda a otra, puede estar distorsionado comparado con la reflectividad espectral correspondiente a la región en el terreno, ambos tipos de errores pueden ser el resultado conjunto de la

presencia de la atmosfera, ya que la señal viaja a través de la ella, es así que la iluminación del sol, los cambios estacionales, las fallas del sensor o el ruido en el sistema afectan los valores radiométricos.

Para corregir este error y poder usar la imagen cuantitativamente, se convirtió los datos medidos por el sensor, conocido como Niveles Digitales (ND) a una magnitud con significado físico, como es la radiancia, con objeto de acercar los valores de la imagen a una recepción ideal. Para esta corrección se usó el software ENVI 5.3, se introdujo la imagen satelital LANSAT 8, y en la caja de herramientas del *Toolbox* se seleccionó *Radiometric Calibration*.

Se procedió a calcular la radiancia, aplicando *Apply FLASHH Settings*, que usa la fórmula:

$$L_{\lambda} = ML * Q_{cal}$$

Donde:

- L_{λ} = Radiancia Espectral.
- ML = Factor Multiplicativo de reescalamiento específico de la banda.
- Q_{cal} = Niveles Digitales del sensor LANSAT 8.

De esta forma, la imagen satelital LANSAT 8, que posee una unidad de radiancia en ($W * m^2 * SR * \mu m$) fue convertida a unidades correctas para *FLASHH* ($\mu W * cm^2 * SR * nm$) con un factor de re-escalamiento de 0.10:

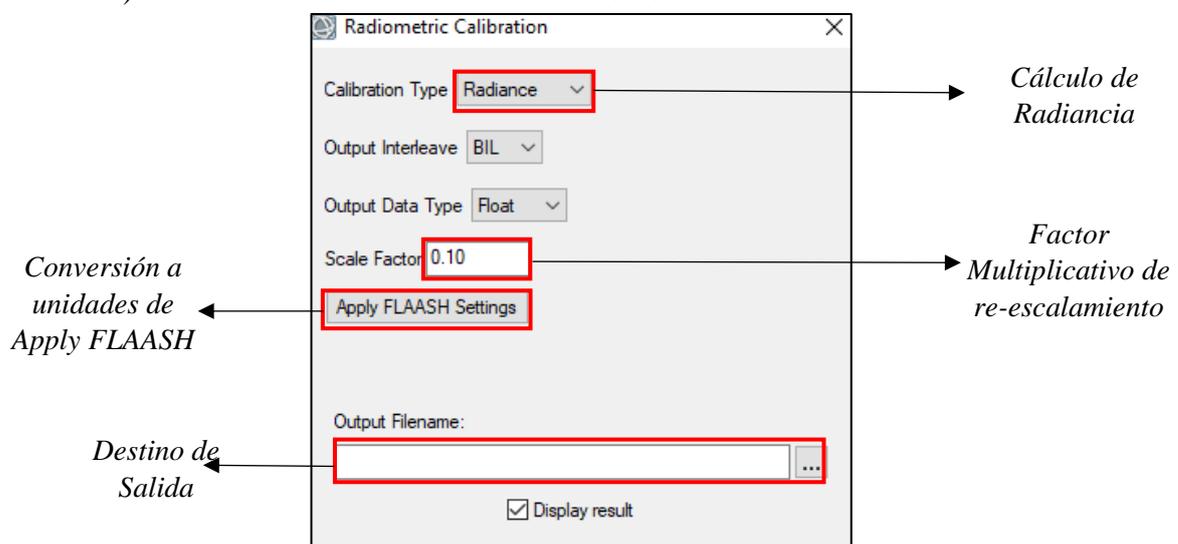


Figura Nro. 44: Cálculo de Radiancia aplicando el re-escalamiento *Apply FLASHH Settings*.

4.11.2.2. Corrección Atmosférica:

Seguidamente se efectuó la conversión de radiancia a reflectancia, buscando así minimizar el efecto de los aerosoles y el vapor de agua (nubes) presentes en la atmósfera, que generaba pérdida de información espectral. Para este proceso se utilizó la herramienta *FLAASH* (Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Hypercubes) del software ENVI 5.3.

Ya que en el anterior proceso se realizó la calibración radiométrica para crear una imagen de radiancia mediante la herramienta *FLAASH*, se tiene el valor de **1** para el campo *Factor de escala única* del cuadro de diálogo Factores de escala de radiancia. Ya que el software ENVI, ya ha aplicado el factor de escala necesario para obtener la imagen en unidades de $\mu\text{W} * \text{cm}^2 * \text{sr} * \text{nm}$.

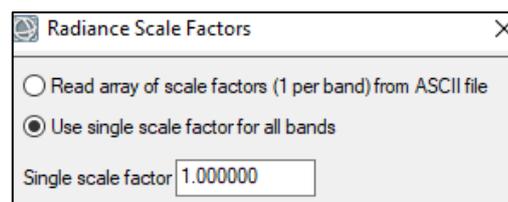


Figura Nro. 45: Factor de escala de Radiancia.

Consecuentemente, se llenó los parámetros solicitados por la herramienta *FLAASH*, los cuáles dan aproximación de la posición del sol en relación con la superficie.

1. La imagen LANDSAT 8 elegida para el desarrollo del procesamiento, poseía información de Latitud y Longitud (*Lat y Lon*), por ende, estos campos se completaron automáticamente con las coordenadas del centro de la escena.
2. En el campo Tipo de sensor (*Sensor Type*) se seleccionó el nombre del sensor que recopiló la imagen de radiancia de entrada. Eligiendo así, el sensor Multiespectral LANDSAT – 8 OLI.



3. En el campo Altitud del sensor (*Sensor Altitude - km*), se estableció la altitud de manera automática en kilómetros sobre el nivel del mar, al seleccionar el tipo de sensor LANDSAT – 8 OLI.
4. En el campo Elevación del suelo (*Ground Elevation - km*), se ingresó la elevación promedio del distrito de Ananea, la cual es de 4600 m.s.n.m.
5. En el campo Tamaño de píxel (*Pixel Size - m*), se ingresó el tamaño de píxel de la imagen en metros. En el caso de las bandas espectrales con las que se trabajó, poseen una resolución de 30 metros.
6. En la Fecha de vuelo (*Flight Date*), se completaron los campos de mes, día y año en que se recopiló la escena. Para este caso, se revisó la METADATA de la imagen satelital, de donde se obtuvo la información, que la imagen, tiene por fecha de adquisición el 5 de Mayo del 2021.
7. En los campos de la hora de vuelo *GMT* (HH: MM: SS), ingresó la hora cuando se recopiló la escena.
8. Se eligió el modelo atmosférico (*Atmosferic Model*) cuya cantidad de vapor de agua de columna estándar sea similar o algo mayor que la esperada para la escena. Las cantidades estándar de vapor de agua de la columna para cada atmósfera modelo se dan en la siguiente tabla.
- 9.

Tabla Nro. 17: Modelos de Atmósfera.

Atmósfera modelo	Vapor de agua	Temperatura del aire superficial
	(g / cm ²)	
Invierno subártico (SAW)	0,42	-16 ° C (3 ° F)
Invierno de latitud media (MLW)	0,85	-1 ° C (30 ° F)
Estándar de EE. UU. (EE. UU.)	1,42	15 ° C (59 ° F)
Verano subártico (SAS)	2,08	14 ° C (57 ° F)
Verano de latitud media (MLS)	2,92	21 ° C (70 ° F)
Tropical (T)	4.11	27 ° C (80 ° F)

Ya que el clima del distrito de Ananea en general es gélido con constantes heladas, esto debido principalmente a la altura en la que se encuentra, registra temperaturas mínimas de hasta 27° Celsius bajo cero, y por eso, se eligió el modelo atmosférico Invierno Subártico (*Sub-Arctic Winter*).

Figura Nro. 46: Parámetros de corrección atmosférica del módulo de FLAASH.

Finalmente, con todos los parámetros completados, se ejecutó la corrección atmosférica de FLAASH, y se obtuvo una nueva imagen satelital con los valores de reflectancia espectral recuperados.

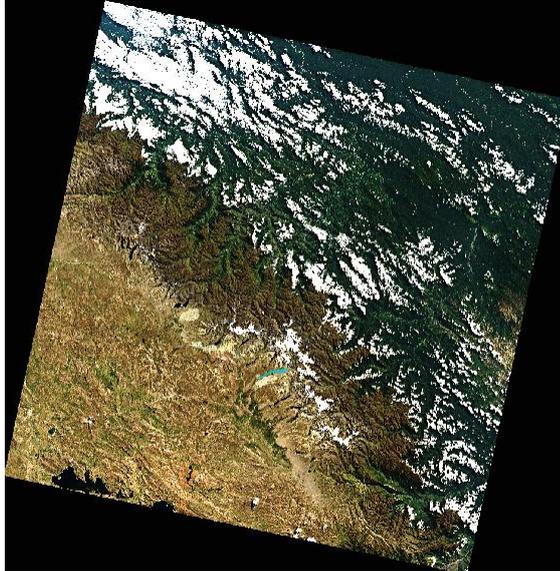


Figura Nro. 47: Corrección atmosférica de la Imagen satelital LANSAT 8.

4.11.2.3. Corrección Geométrica:

La imagen LANSAT 8, no tenían el sistema de coordenadas correcto, ya que por defecto la página del USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) ubica el sistema de coordenadas en el Norte, por lo cual la imagen fue re-proyectada al sistema UTM/WGS-84/Zona 19S, con la herramienta *Project Raster* del Software ArcGis 10.5. De manera que la imagen satelital se ubicó de forma precisa con el sistema de proyección oficial de la zona de estudio.

4.11.3. Combinación de Bandas:

Calibradas las imágenes satelitales, se procedió a la combinación de bandas a través del software ArcGis 10.5. La diversa combinación de bandas permitió analizar elementos específicos de la superficie terrestre en función de su espectro de emisión y así interpretar aspectos el estado de la vegetación, la humedad, la geología, los cuerpos de agua y glaciares.

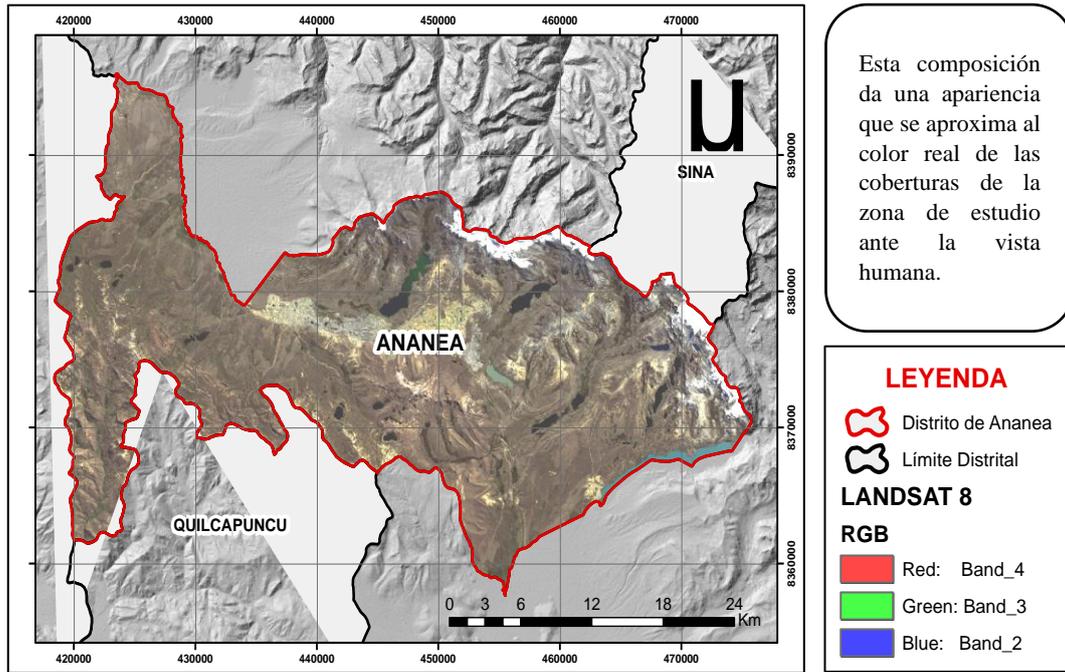


Figura Nro. 48: Combinación 4 – 3 – 2 (Color Natural)

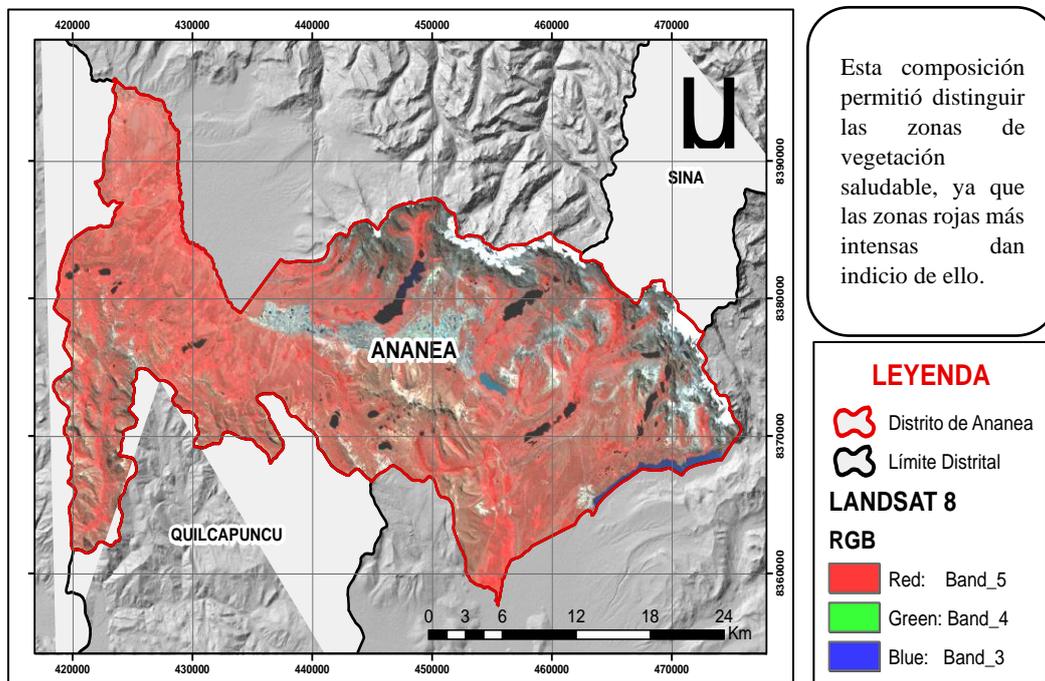


Figura Nro. 49: Combinación 5 – 4 – 3 (Color Infrarrojo)

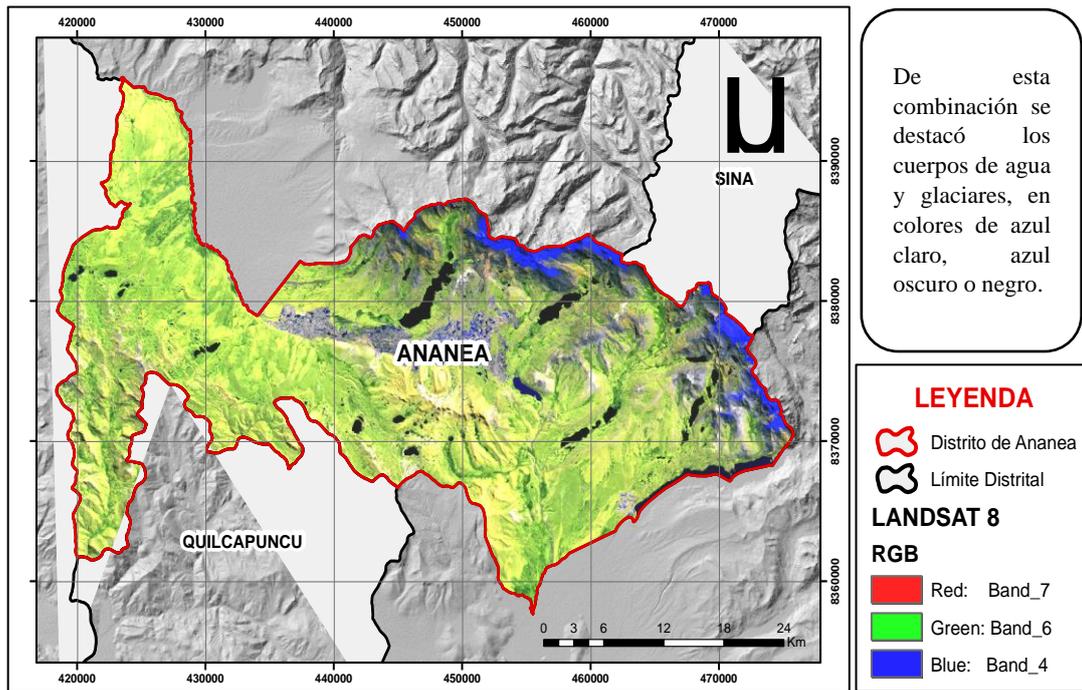


Figura Nro. 50: Combinación 7 – 6 – 4 (Falso Color)

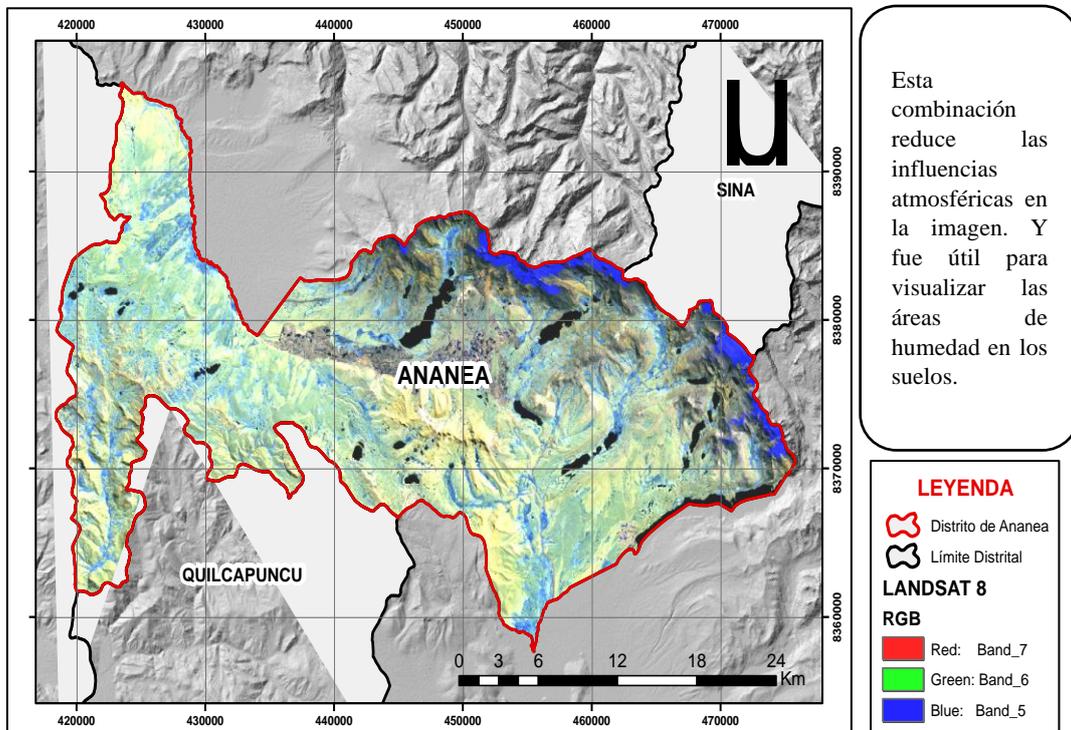


Figura Nro. 51: Combinación 7 – 6 – 5 (Penetración Atmosférica)

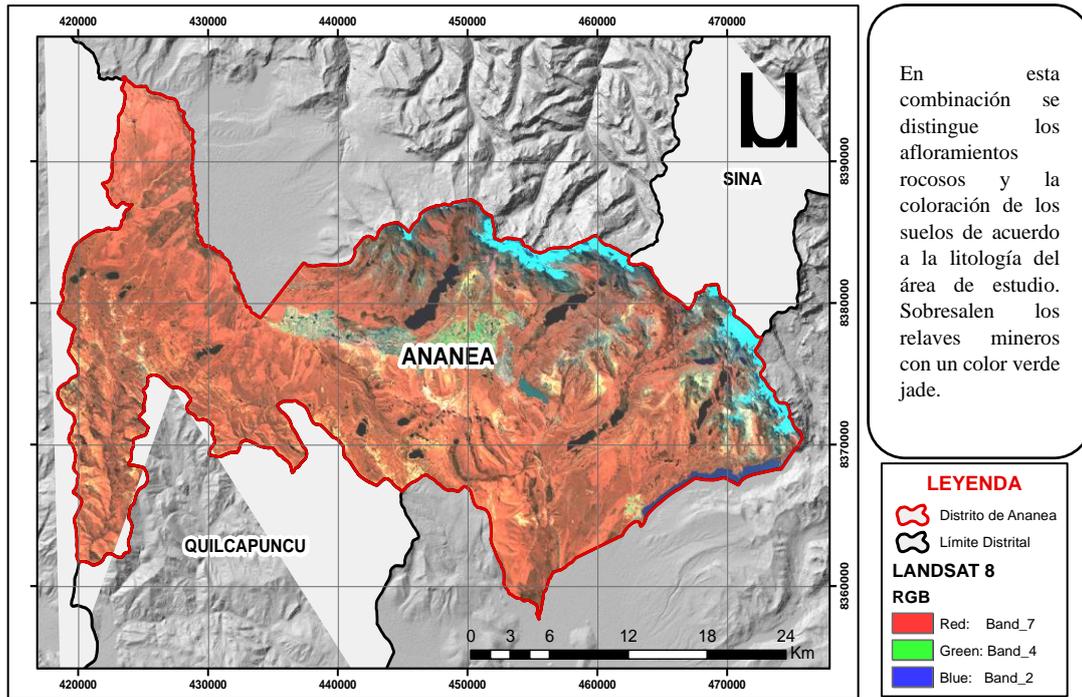
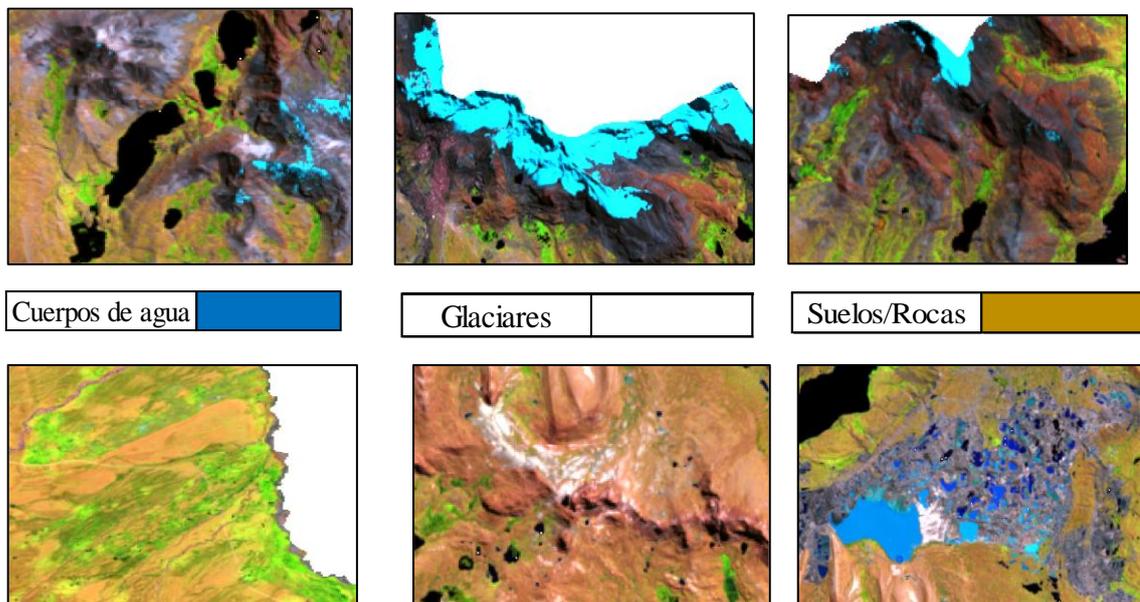


Figura Nro. 52: Combinación 7 – 4 – 2 (Geología)

4.12. CLASIFICACIÓN DE LA IMAGEN:

4.12.1. Definición de Clases:

Se identificaron 6 clases o áreas de entrenamiento en el área de estudio, y se generaron polígonos representativos de distintos colores para su clasificación; las clases identificadas fueron: Cuerpos de agua, glaciares, material inanimado (suelo o rocas), material vegetativo sano, material vegetativo no saludable y relaves.



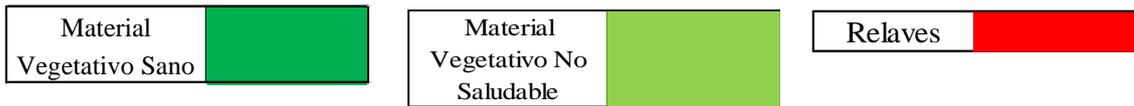


Figura Nro. 53: Definición de clases en el área de estudio.

4.12.2. Clasificación Supervisada:

Definidas las clases, se les asignó nombres informacionales, y usando la herramienta *Interactive Supervised Classification* se realizó la clasificación supervisada. Posterior a ello se aplicó un filtro mayoritario para eliminar los ruidos sobrantes en la imagen, con la herramienta *Spatial Analyst Tools > Generalization > Majority Filter*, y para realizar el análisis cuantitativo se procedió a convertir la imagen raster en un formato vectorial mediante la herramienta *Conversion Tools > From Raster > Raster to Polygon*, obteniendo así las áreas de cada clase.

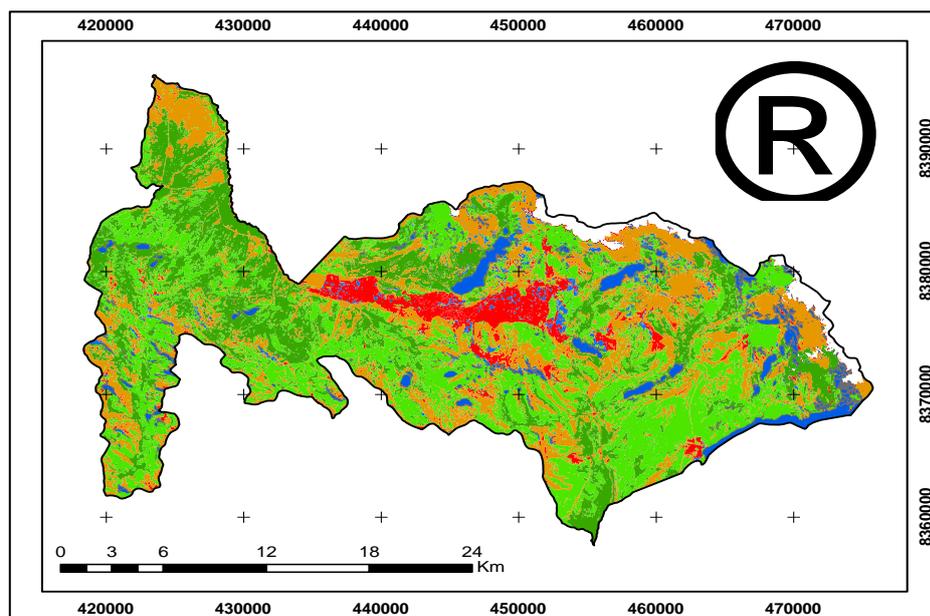
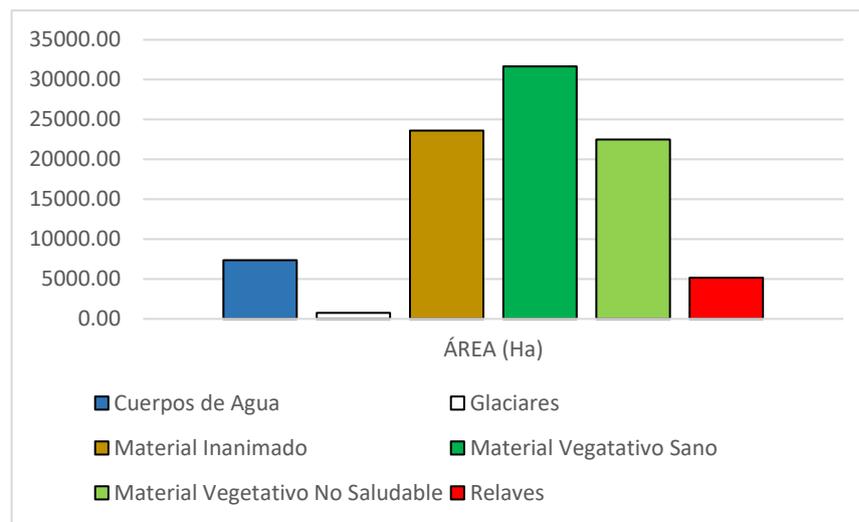


Figura Nro. 54: Clasificación Supervisada de la Imagen LANSAT 8.

Tabla Nro. 18: Áreas de Clases e Histograma de la zona de estudio.

CLASES	COLORES REPRESENTATIVOS	ÁREA (Ha)
Cuerpos de Agua	Azul	7371.06
Glaciares	Blanco	770.65
Material Inanimado (Suelos/Rocas)	Mostaza	23627.94
Material Vegetativo Sano	Verde Oscuro	31653.96
Material Vegetativo No Saludable	Verde Claro	22494.16
Relaves	Rojo	5146.45



• **Interpretación:**

La zona de estudio fue clasificada en 6 zonas de entrenamiento, los glaciares ocupan un área de 770.65 (Ha), y los cuerpos de agua un total de 7361.06 (Ha), pese a que la mayor cantidad de área lo ocupa el material vegetativo sano con 31653.96 (Ha), este se localiza en las partes más alejadas del distrito de Ananea, donde la presencia de la actividad minera no ha llegado a contaminar dichas zonas, sin embargo, el material vegetativo no saludable con un área de 22494.16 (Ha) y el material inanimado (suelos y rocas) con un área de 23627.94 (Ha) son en conjunto una mayor área, ya que en su mayoría estos si se vieron contaminados por la actividad minera, y esto se destaca en la parte central del distrito, donde además, se resalta claramente la zona de relaves con un área de 5146.45 (Ha).

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El área total del distrito de Ananea es de 96397.35 ha, sin embargo, los pasivos ambientales determinados por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) se ubican en la parte central del distrito, donde la presencia de la actividad minera ha cambiado drásticamente el paisaje. Y de acuerdo al análisis espectral previamente realizado, se consideró un área de 3km alrededor de cada pasivo ambiental, lo que dio un área de 16949.2 Ha.

Para el cálculo y análisis de los resultados se interpretaron los valores de los índices espectrales, tanto del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), y se contrastó los resultados con la firma espectral de cada elemento.

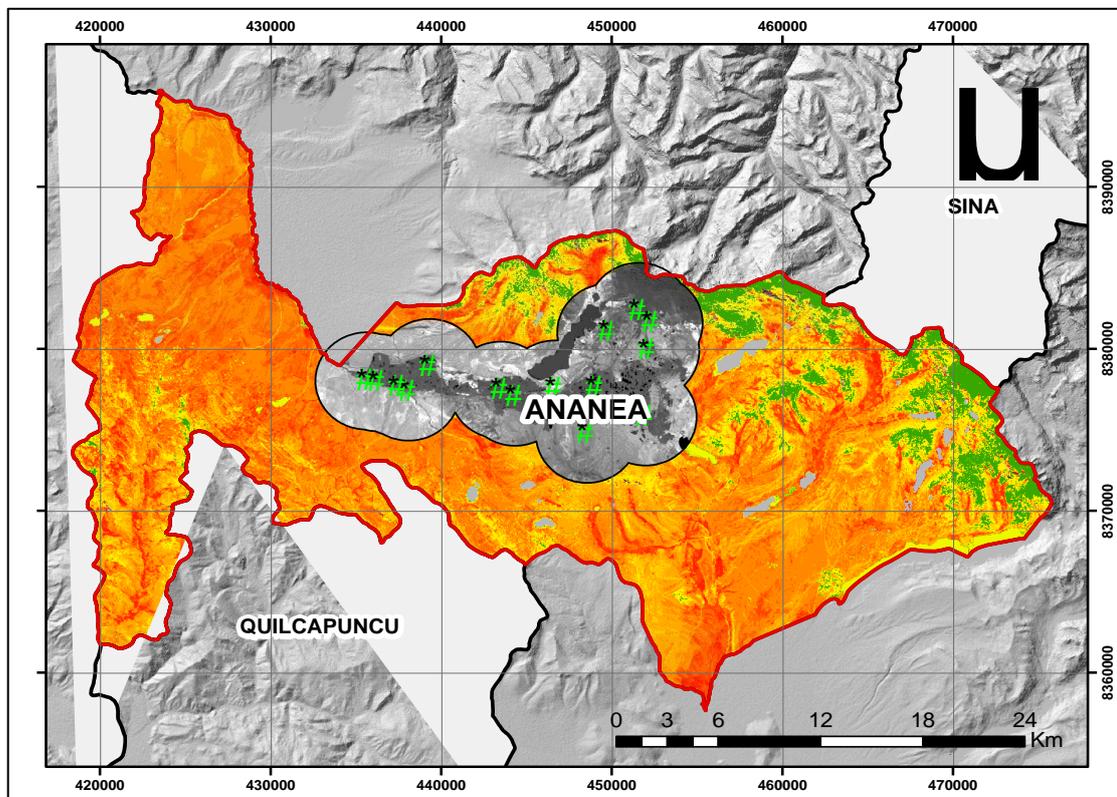


Figura Nro. 55: Áreas principales de impacto producidas por los Pasivos Ambientales Mineros.

5.1. DETERMINACIÓN DE ÁREAS AFECTADAS POR LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN CUERPOS DE AGUA SUPERFICIAL Y GLACIARES.

5.1.1. Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI):

Para realizar el cálculo del Índice de Agua de Diferencia Normalizada, se utilizó el software ArcGis 10.5, a través de la herramienta *Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator*. En la ecuación se invirtió el orden del infrarrojo cercano (NIR) y se cambió la banda roja por la verde (GREEN), y de esta forma ambas variables fueron reemplazadas por banda 5 y la banda 3 respectivamente, de la imagen LANSAT 8.

El resultado fue contrario al NDVI, la vegetación fue suprimida y se identificó las masas de agua, el estrés hídrico en vegetación y zonas de elevada saturación de humedad.

$$NDWI = \frac{(GREEN - NIR)}{(GREEN + NIR)} \quad \Rightarrow \quad NDWI = \frac{(Banda\ 3 - Banda\ 5)}{(Banda\ 3 + Banda\ 5)}$$

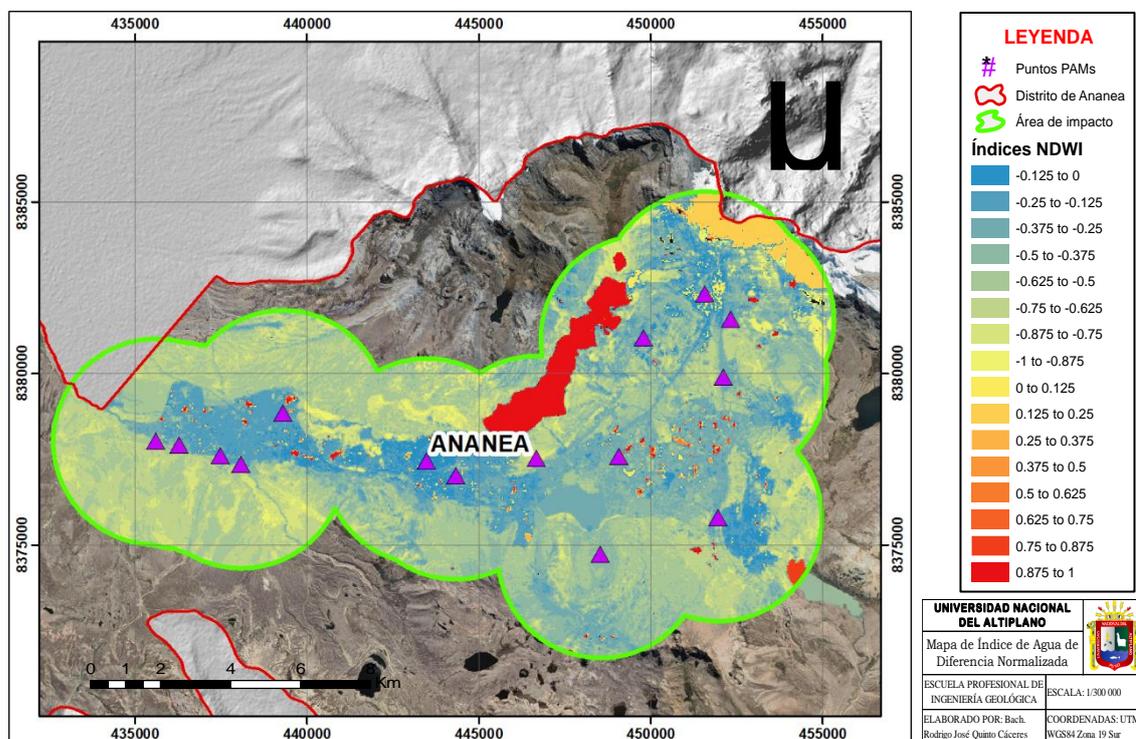
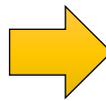


Figura Nro. 56: Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) de la zona de estudio.

5.1.2. Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI):

Para realizar el cálculo del Índice de Nieve de Diferencia Normalizada, se utilizó el software ArcGis 10.5, a través de la herramienta *Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator*. Las bandas espectrales de infrarrojos verdes (GREEN) y de onda corta (SWIR) fueron reemplazadas por la banda 3 y la banda 6 respectivamente, de la imagen LANDSAT 8. Esta fórmula se utilizó para destacar y cuantificar las cubiertas de nieve del distrito de Ananea.

$$NDSI = \frac{(GREEN - SWIR)}{(GREEN + SWIR)}$$



$$NDSI = \frac{(Banda 3 - Banda 6)}{(Banda 3 + Banda 6)}$$

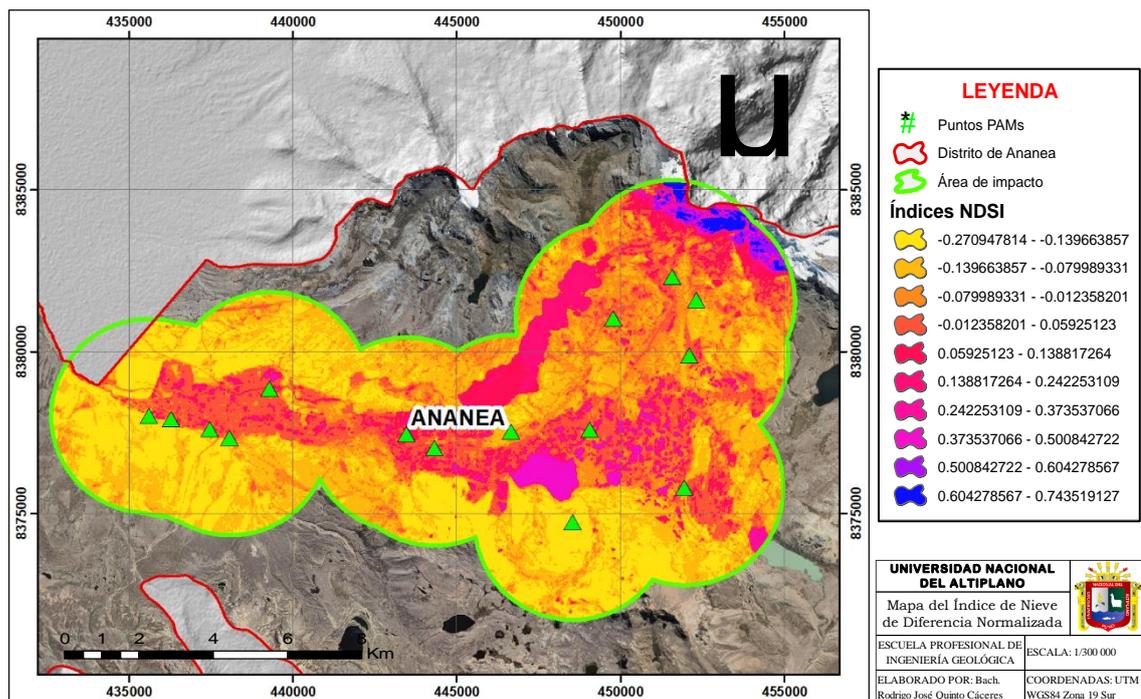


Figura Nro. 57: Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI) de la zona de estudio

5.1.3. Análisis de índices espectrales y cálculo de áreas afectadas en cuerpos de agua superficial y glaciares.

Tabla Nro. 19: Análisis de cuerpos de agua superficial y glaciares.

ÍNDICE DE AGUA DE DIFERENCIA NORMALIZADA		
VALORES	INTERPRETACIÓN	ÁREAS MAS AFECTADAS POR LOS PAMS (Ha)
0.125 to 0.25	Glaciares	261
0.25 to 0.375		46.2
0.375 to 0.5	Cuerpos de agua medianamente saludables	26.2
0.5 to 0.625		19.4
0.625 to 0.75		14.4
0.75 to 0.875	Cuerpos de agua saludables	77.9
0.875 to 1		569.7
ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA		
-0.25 to -0.125	Agua contaminadas por relaves	364.9
-0.375 to -0.25		71.3
-0.5 to -0.375		46.2
-0.625 to -0.5		37.6
-0.75 to -0.625		22.1
-0.875 to -0.75	Cuerpos de agua poco saludables	37.9
-1 to -0.875		54.3

5.1.3.1. Índices Espectrales de Glaciares:

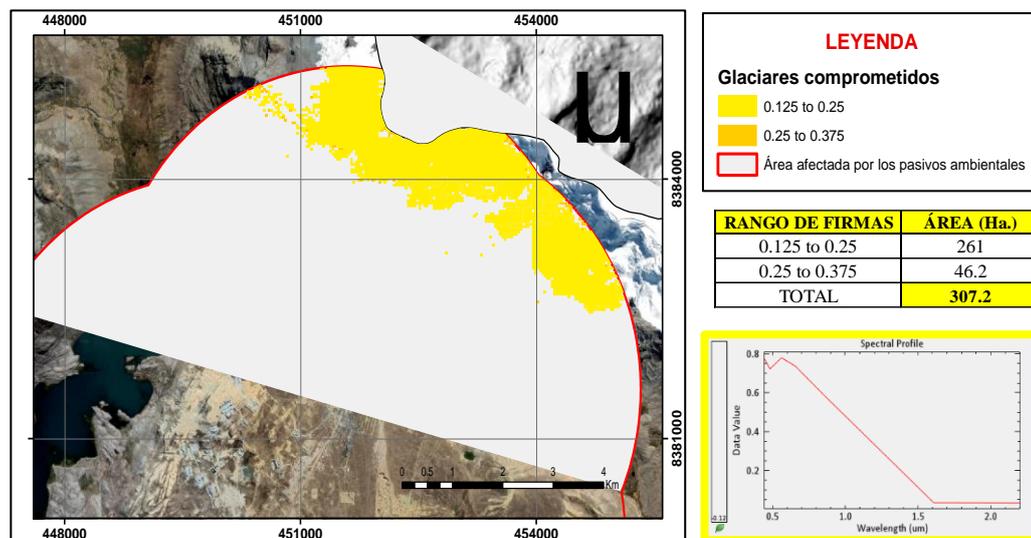


Figura Nro. 58: Rangos Espectrales de los Glaciares

De acuerdo al análisis de Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), los glaciares afectados por los pasivos ambientales mineros poseen un área de 307.2 Ha.

5.1.3.2. Índices Espectrales en Cuerpos de Agua Superficial:

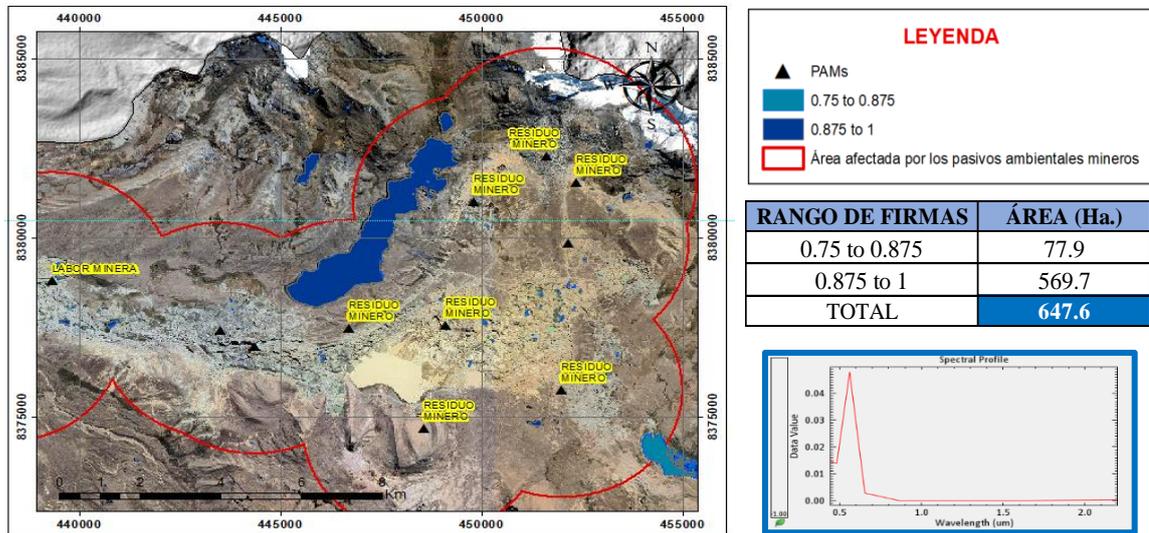


Figura Nro. 59: Rangos espectrales de cuerpos de agua saludables

De acuerdo al análisis de Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), los cuerpos de agua saludables poseen un área de 647.6 Ha, y se ubican principalmente en zonas alejadas de la actividad urbana y minera, entre los rangos espectrales de (0.75 a 1).

- Cuerpos de agua medianamente saludables:

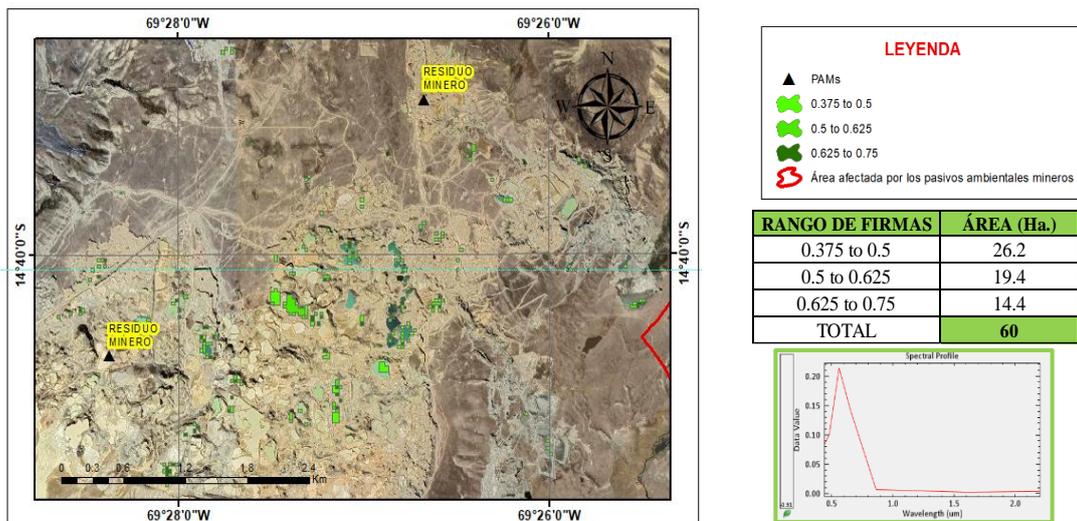


Figura Nro. 60: Rangos espectrales de cuerpos de agua medianamente saludables

De acuerdo al análisis de Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), los cuerpos de agua medianamente saludables poseen un área de 60 Ha, y se ubican principalmente en zonas de explotación minera, entre los rangos espectrales de (0.375 a 0.75).

- **Cuerpos de agua poco saludables:**

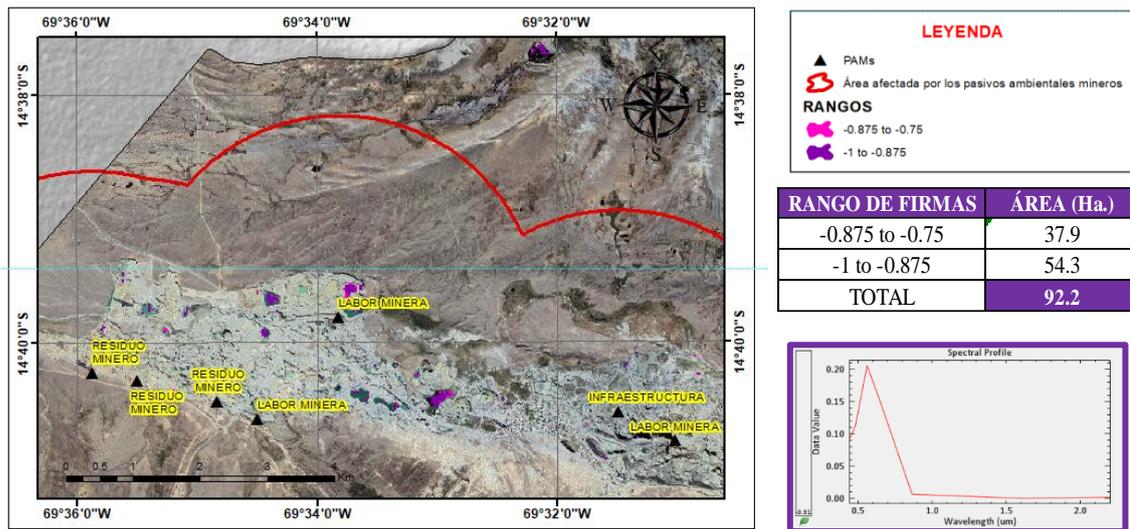


Figura Nro. 61: Rangos espectrales de cuerpos de agua poco saludables

De acuerdo al análisis de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), los cuerpos de agua poco saludables poseen un área de 92.2 Ha, y se ubican principalmente en zonas de labores minera abandonas, entre los rangos espectrales de (-0.875 a 0.875).

- **Agua contaminada por relaves:**

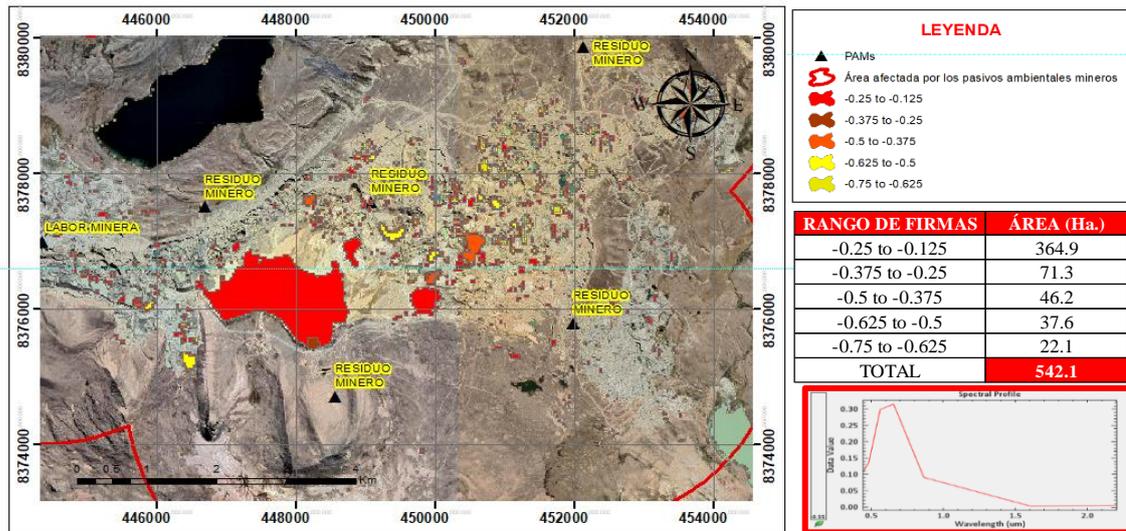


Figura Nro. 62: Rangos espectrales de aguas contaminadas por relaves.

De acuerdo al análisis de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), las aguas contaminadas por relaves poseen un área de 542.1 Ha, y se distinguen a simple vista por su color café oscuro, entre los rangos espectrales de (-0.25 a -0.625).

5.2. RECONOCIMIENTO DE ÁREAS AFECTADAS POR LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN SUELOS Y VEGETACIÓN.

5.2.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI):

Para realizar el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, se utilizó el software ArcGis 10.5, a través de la herramienta *Spacial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator*, reemplazando las variables del infrarrojo cercano (NIR) y la banda roja (RED) por la banda 5 y la banda 4 de la imagen LANDSAT 8, proporcionando así, un análisis sobre la cantidad, calidad y desarrollo de la cobertura vegetal en el área de estudio.

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad \rightarrow \quad NDVI = \frac{(Banda 5 - Banda 4)}{(Banda 5 + Banda 4)}$$

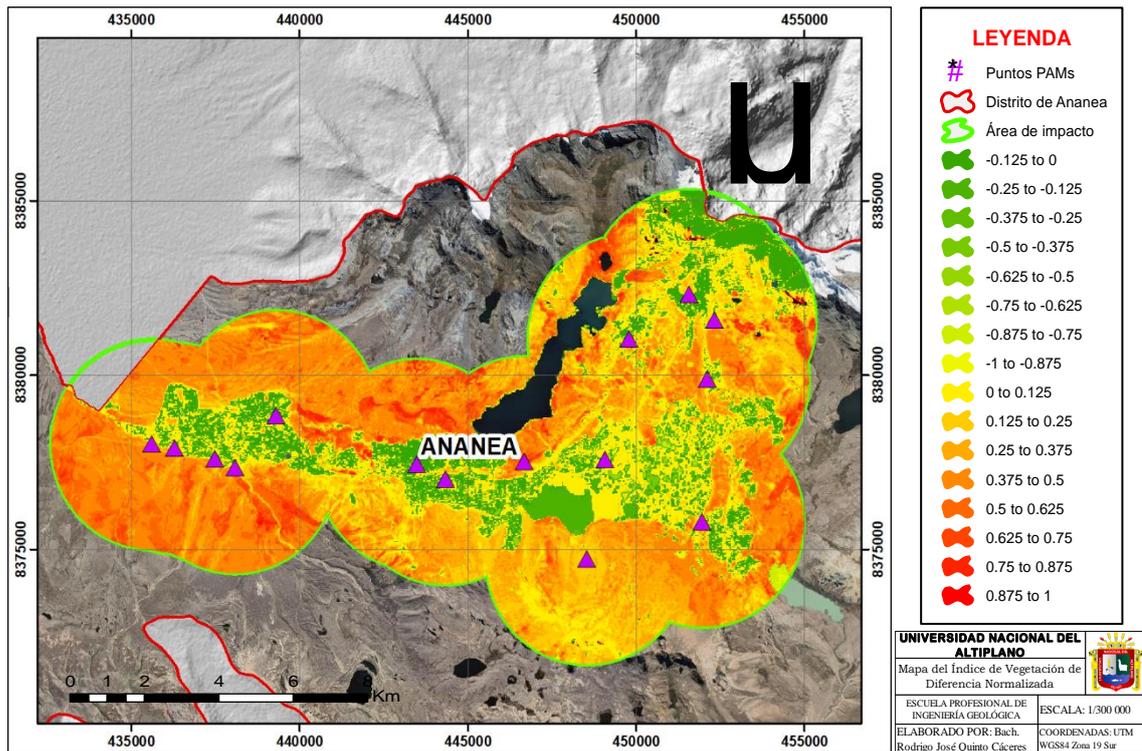


Figura Nro. 63: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) de la zona de estudio

5.2.2. Análisis de índices espectrales y cálculo de áreas afectadas en suelos y vegetación:

Tabla Nro. 20: Análisis de suelos y vegetación.

ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA		
VALORES	INTERPRETACIÓN	ÁREAS MAS AFECTADAS POR LOS PAMs (Ha) NDVI
0 to 0.125	Zonas de relave, suelos contaminados y material vegetativo no saludable.	3074.2
0.125 to 0.25		2315.5
0.25 to 0.375		2984.1
0.375 to 0.5	Material vegetativo medianamente saludable	3959.7
0.5 to 0.625		1482.6
0.625 to 0.75		580.7
0.75 to 0.875	Material vegetativo muy saludable.	136.8
0.875 to 1		15.6

5.2.2.1. Índices Espectrales en Material Vegetativo:

- Material Vegetativo muy saludable:

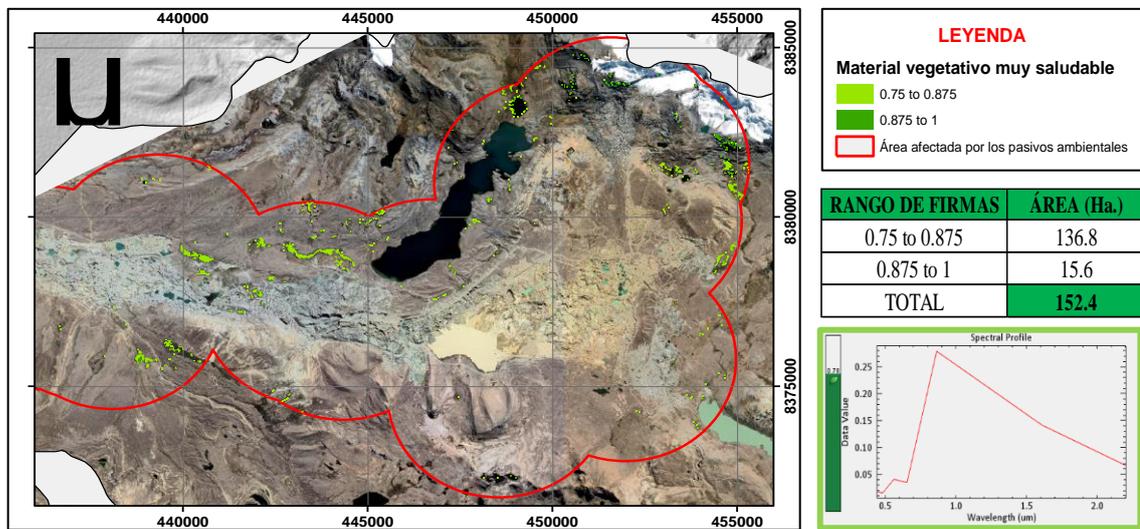


Figura Nro. 64: Rangos espectrales del material vegetativo muy saludable.

De acuerdo al análisis de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el material vegetativo sano solo representa un área de 152.4 Ha., y se encuentra en las zonas más alejadas de la actividad minera, entre los rangos espectrales de (0.75 a 1).

- Material Vegetativo medianamente saludable:

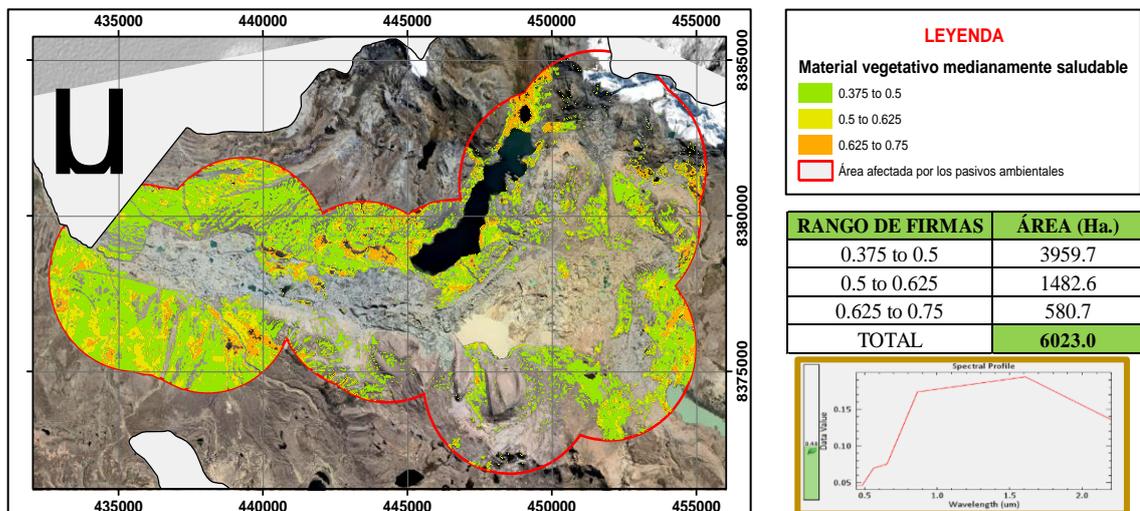


Figura Nro. 65: Rangos espectrales del material vegetativo medianamente saludable.

De acuerdo al análisis de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el material vegetativo medianamente saludable posee un área de 6023 Ha., y se encuentra en las zonas aledañas a la actividad minera, entre los rangos espectrales de (0.735 a 0.75).

5.2.2.2. Índices Espectrales en Suelos:

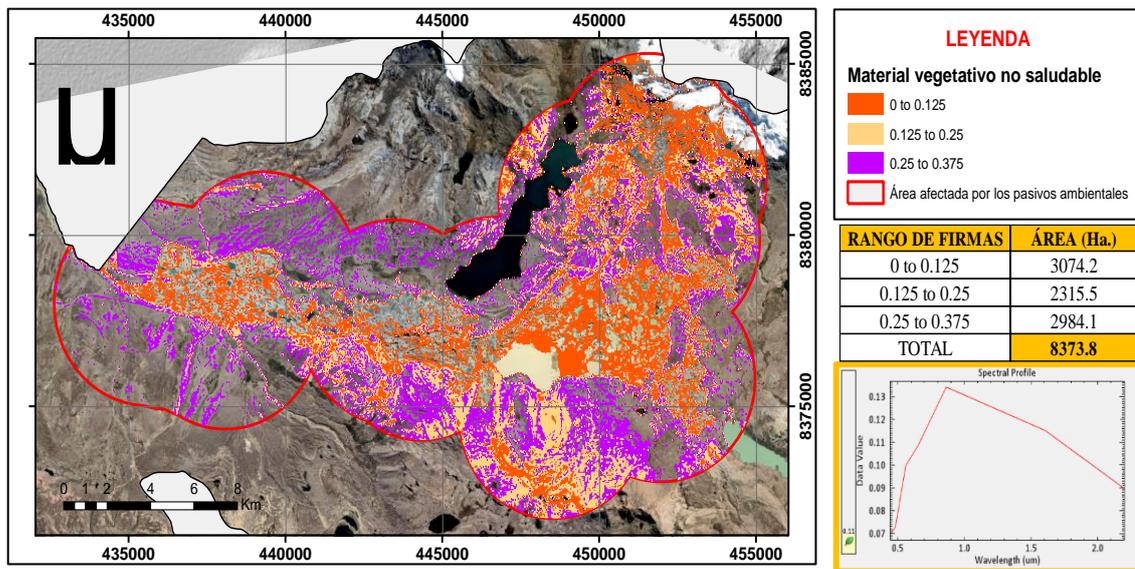


Figura Nro. 66: Rangos espectrales de suelos contaminados.

De acuerdo al análisis de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), los suelos contaminados poseen un área de 8373.8 Ha., y se encuentra entre las zonas donde se realiza la actividad minera, entre los rangos espectrales de (0 a 0.375).

5.3. IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS AFECTADAS POR LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN ZONAS URBANAS

5.3.1. Análisis de índices espectrales y cálculo de áreas afectadas en zonas urbanas:

Tabla Nro. 21: Análisis de zonas urbanas.

ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA		
VALORES	INTERPRETACIÓN	ÁREAS MAS AFECTADAS POR LOS PAMS (Ha) NDVI
-0.125 to 0	Zonas Urbanas	750.81

De acuerdo al análisis de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), las áreas urbanas se presentan en el rango de (-0.125 a 0) y poseen un área de 750.81 Ha, estas se encuentran rodeadas por zonas de explotación minera, las cuales afectaron los cuerpos de agua y la vegetación existente, perjudicando la salud y el desarrollo de sus habitantes.



VI. CONCLUSIONES

- Las áreas de cuerpos de agua afectadas por los pasivos ambientes mineros fueron determinadas con el procesamiento de la imagen satelital LANDSAT 8, y el análisis y cuantificación del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), de los cuáles se obtuvo un área total de 1649.19 Ha., los cuáles fueron clasificados de acuerdo al comportamiento de su firma espectral en: Cuerpos de agua saludables (647.6 Ha.), cuerpos de agua medianamente saludables (60 Ha.), cuerpos de agua poco saludables (92.2 Ha.) y las aguas contaminadas por relaves (542.1 Ha.). Y los glaciares que se ven comprometidos por los pasivos ambientales mineros constituyen un área de (307.29 Ha.)
- Los suelos y vegetación afectados por los pasivos ambientales mineros, fueron reconocidos con el procesamiento de la imagen satelital LANDSAT 8, y el análisis y cuantificación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), y se obtuvo un área total de 14549.2 Ha, la cual fue clasificada de acuerdo al comportamiento de la firma espectral en: Material vegetativo muy saludable (152.4 Ha.), Material vegetativo medianamente saludable (6023 Ha.) y las zonas de relave, suelos contaminados y material vegetativo no saludable (8373.8 Ha.).
- Las zonas urbanas se identificaron por presentarse en el rango más bajo (-0.125 – 0) del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, con un área de 750.81 Ha., dichas zonas se presentan muy cerca de los pasivos ambientales mineros, y se rodean de material vegetativo enfermo y cuerpos de agua contaminados, lo cual debe afectar la salud y bienestar de la población en general.



VII. RECOMENDACIONES

- Para la selección de la imagen satelital con la que se realizará este tipo de investigación, se recomienda tomar en consideración la estación del año, y buscar aquellas imágenes que posean un contenido de nubes menor del 10%, de manera que se visualicen bien todos los componentes de la superficie terrestre. Posterior a ello, la calibración de la imagen debe realizarse de manera minuciosa, ya que los mínimos errores pueden provocar datos erróneos al momento del procesamiento.
- Para un análisis más preciso, es preferible trabajar con Modelos de Elevación Digital (DEM) de mayor precisión, e imágenes multiespectrales con tamaño de pixel más reducido.
- Se sugiere utilizar la investigación realizada, como punto de partida para la remediación de las áreas más afectadas producidas por los pasivos ambientales mineros en el distrito de Ananea. Y considerar a la teledetección, como herramienta dinámica y práctica, de fácil acceso y uso, en especial en zonas con condiciones geográficas accidentadas o con conflictos sociales.



VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achuy, J. (2006). *Sistemas de Información Geográfica*. Lima, Perú: Editorial Grupo Universitario, p. 321.
- Alata, A. (2018). *Análisis Multitemporal de la explotación minera con aplicación de Percepción Remota y SIG en los distritos de Ananea y Cuyocuyo - Puno, Entre 1975 – 2017* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Bravo, N. (2017). *Teledetección Espacial LANSAT, SENTINEL 2, ASTER LIT Y MODIS*. Huánuco, Perú: GEOMATICA AMBIENTAL S.R.L.
- Buzzi, J., Costa, E., Riaza, A., Fernandez, O., Garcia-Sellés, D. y Corbera, J. (2017) Cartografía de calizas con datos hiperespectrales AISA Eagle II en una zona montañosa con vegetación: una corrección atmosférica geológicamente orientada. *Nuevas plataformas y sensores de teledetección*. pp. 235-238.
- Chavéz, A., Salas, G., Cuadros, J. y Gutiérrez, E. (1996). *Geología de los Cuadrángulos de Putina y la Rinconada*. Lima, Perú: INGEMMET, BOLETÍN N° 66.
- Choquehuanca, V. (2019). *Análisis multitemporal del crecimiento urbano de la ciudad de Puno mediante imágenes satelitales, entre los años 1980 – 2017*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Castaño, S., Ruiz, J. y Vela, A. (1994). La teledetección. Sus bases. *Sección de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica*.
- Castillo, B. (2017). *Tipos de Pasivos Ambientales en el Perú*. Lima, Perú: Ministerio de Energía y Minas.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de la Teledetección Espacial*. Madrid, España: EDICIONES RIALP, S.A.
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección Ambiental*. Barcelona, España: Ariel, S.A.



- Gamarra, S. (2017). *Análisis de la cobertura y el uso de la tierra utilizando imágenes de resolución espacial medio para el distrito de San Ramón – Chanchamayo – Junín – Perú*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú.
- Gutiérrez, Y. (2018). *Determinación de la dinámica espacial de bofedales mediante imágenes satelitales Landsat frente a escenarios del cambio climático en la cuenca del río Coata durante el período de 1984-2016*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. (2000). *Metodología de la Investigación*, México DF, México: Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana.
- Labrador, M., Évora, J. y Arbelo, M. (2012). *Sistemas de Teledetección para la Gestión del Territorio*. Gobierno de Canarias, España: Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias.
- Ley N° 28271. Ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera (6 de julio de 2004) <http://sial.segat.gob.pe/download/file/fid/55964>.
- Montaño, R. (2019). *Análisis dinámico multitemporal del Río Piura aplicando teledetección, en el distrito de Piura, provincia de Piura, departamento de Piura*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Ñaupas, H., Valdivia, M., Palacios, J. y Romero, H. (2013) *Metodología de la investigación Cuantitativa - Cualitativa y Redacción de la Tesis*. Bogotá, Colombia: DGP Editores SAS.
- Ormeño, S. (2006). *Teledetección Fundamental*. Madrid, España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía.
- Pérez, C. y Muñoz, A. (2006). *Teledetección, Nociones y Aplicaciones*. Salamanca, España: Universidad de Salamanca.

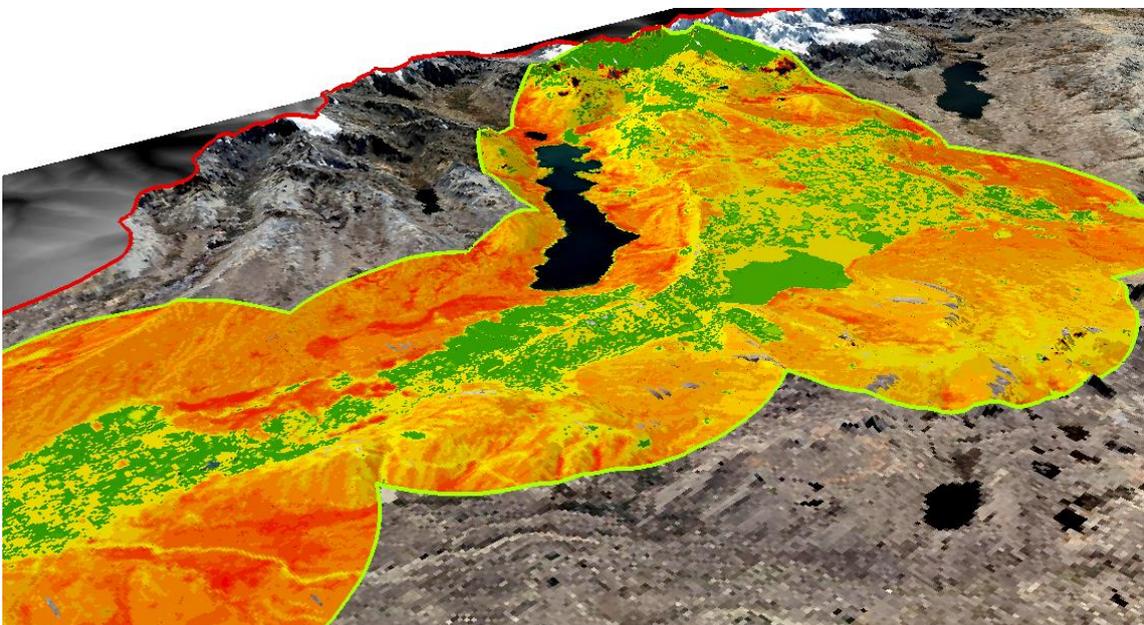
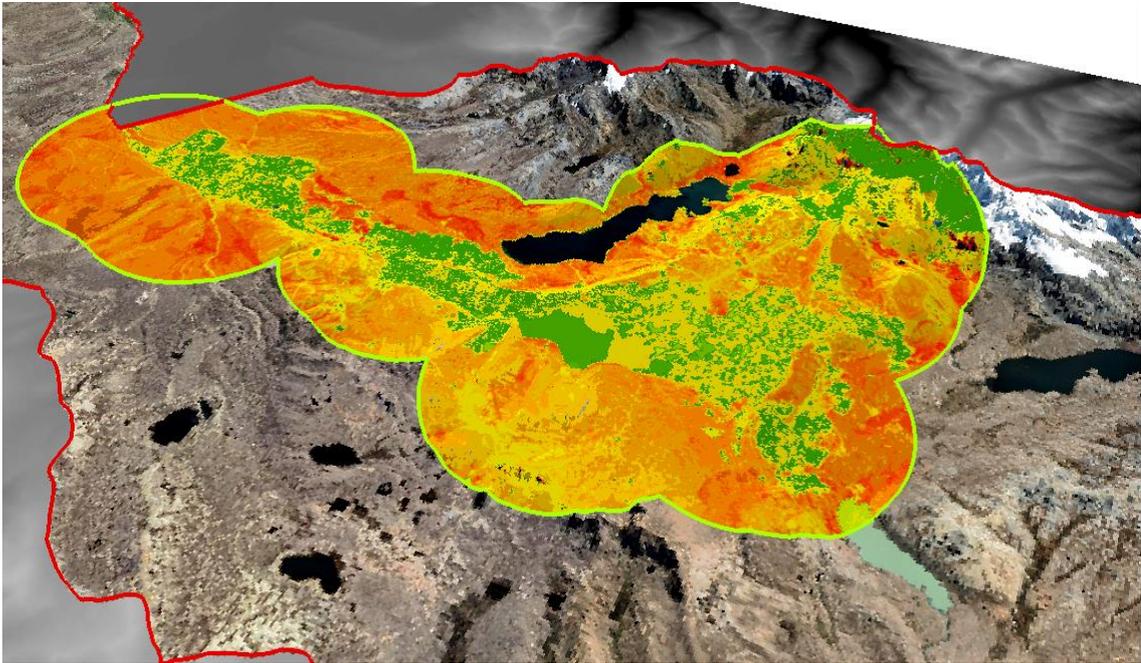


- Pérez, D. (2007). *Introducción a los sensores remotos – Aplicaciones en Geología*. Buenos Aires, Argentina: Laboratorio de Tectónica Andina.
- Ramírez, E. y Villena, E. (2017). *Teledetección de pasivos ambientales de origen químico utilizando imágenes satelitales Landsat 8 en la provincia de Hualgayoc-2017*. (Tesis de pregrado). Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú.
- Resolución Ministerial N° 200-2021-MINEM/DM. Actualizan el Inventario de Pasivos Ambientales Mineros (30 de junio de 2021). <http://www.minem.gob.pe/archivos/legislacion-839b5zy8z8y7937rz-RM200-2021-minemdm.pdf>
- Schomwandt, D. (2007). *Teledetección aplicada a las ciencias agronómicas y recursos naturales*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: Sistema Integrado de Información Agropecuaria.
- Skidmore, A. (2002) *Environmental Modelling with GIS and Remote Sensing*. Londres, Inglaterra: Taylor & Francis.
- Tello, L. & Díaz, J. (2021). Análisis de la contaminación ambiental usando técnicas de teledetección y análisis componentes principales, *TecnoLógicas*, vol. 24, nro. 50, e1710, 2021. Doi: <https://doi.org/10.22430/22565337.1710>
- Zavala, N. (2020). Caracterización geológica - geomorfológica de la subcuenca Río Zapotal del cantón Santa Elena, provincia de Santa Elena, aplicando técnicas de Teledetección. (Tesis de pregrado). Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.

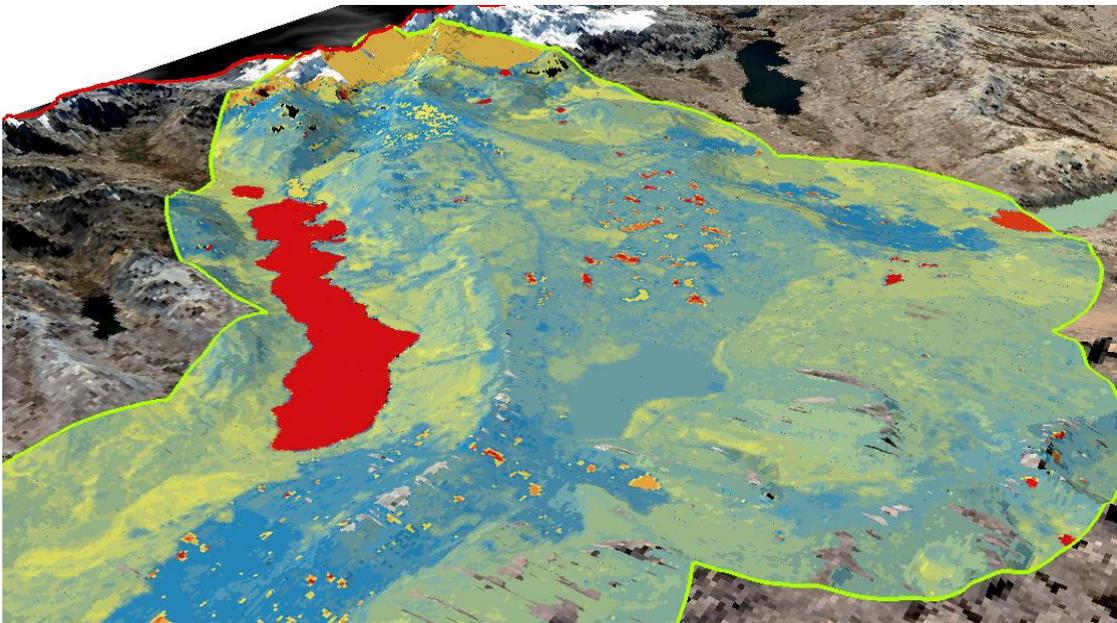
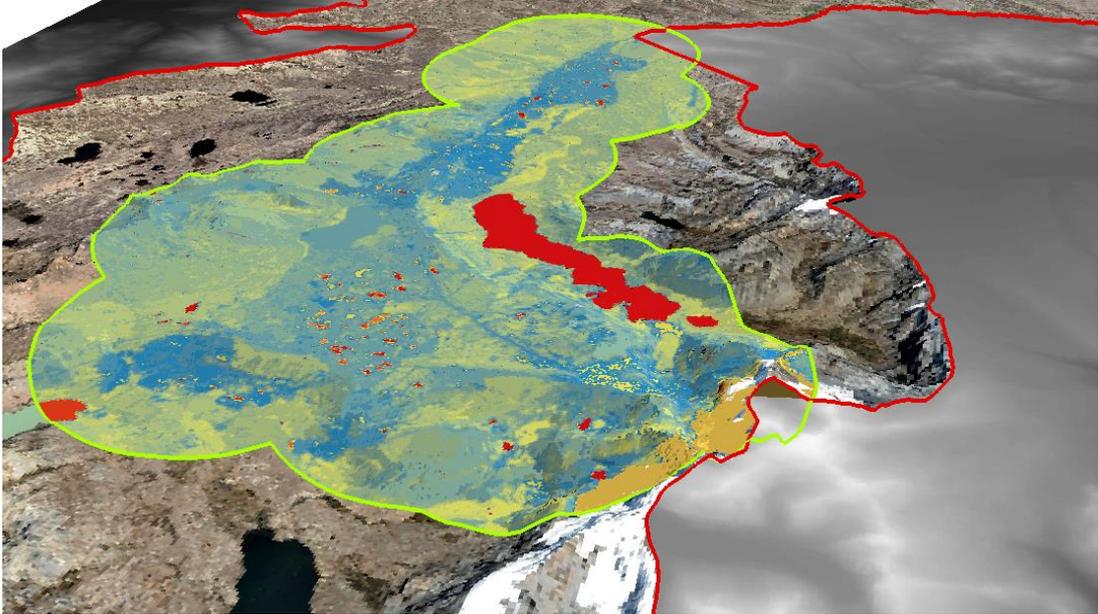


ANEXOS

VISTAS 3D DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI) EN LA ZONA DE IMPACTO DE LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS



VISTAS 3D DEL ÍNDICE DE AGUA DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDWI) EN LA ZONA DE IMPACTO DE LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS



VISTAS 3D DEL ÍNDICE DE AGUA DE NIEVE NORMALIZADA (NDSI) EN LA ZONA DE IMPACTO DE LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS

