

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA GEOLÓGICA**

“PROSPECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS
USANDO IMÁGENES LANDSAT Y ÁSTER, EN EL
CASERÍO AYAVIRI, DISTRITO TUMBADEN, SAN
PABLO, CAJAMARCA 2021”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniera Geóloga

Autoras:

Jhanys Tatiana Gonzales Acuña

Keiko Elizabeth Ortiz Ventura

Asesor:

Ing. Mg. Miguel Ricardo Portilla Castañeda

<https://orcid.org/0000-0002-3676-7137>

Cajamarca - Perú

DEDICATORIA

El principal agradecimiento a Dios quién me ha guiado y dado la fuerza para seguir adelante. A mi madre Angélica que ha sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores lo cual me ha ayudado a seguir adelante en momentos difíciles.

A mi esposo Henry, en el camino encuentras personas que iluminan tu vida, que con su apoyo hacen alcanzar de mejor manera tus metas.

A mi familia y amigos (as) por su comprensión y estímulo constante, quienes han creído en mí siempre dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificio; enseñándome a valorar todo lo que tengo. A todos ellos dedico todo el trabajo para la realización de esta tesis.

Jhanys Gonzales.

El esfuerzo realizado dentro de este trabajo de investigación va principalmente dedicado a mis padres, por el apoyo a mi educación y por ser los que siempre estuvieron conmigo.

A mi hermano Gerson, por ser mi principal cimiento para la construcción de mi vida profesional, Sembró en mi las bases de la responsabilidad y deseos de superación, tengo el espejo en el cual me quiero reflejar puesto que sus virtudes infinitas y su gran corazón me llevan admirarlo cada día más.

Keiko Ortiz.

AGRADECIMIENTO

Nuestro agradecimiento se dirige a quien ha forjado nuestro camino y nos ha dirigido por el sendero correcto, a Dios, el que en todo momento está con nosotros ayudándonos a aprender de nuestros errores y no volver a cometerlos. A nuestros padres quienes con su esfuerzo nos han permitido a llegar al cumplimiento de esta meta.

Agradecemos a nuestros docentes de la Facultad de Ingeniería Geológica de la Universidad Privada del Norte, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de nuestra carrera profesional, de manera especial a nuestro tutor, Mg. Ing. Miguel Portilla Castañeda, por su paciencia, y conocimientos brindados durante el desarrollo de nuestra investigación y a nuestro director de carrera Ing. Shonel Cáceres, por sus importantes sugerencias y aportes durante la realización de esta tesis.

Tabla de contenido

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
TABLA DE CONTENIDO	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
RESUMEN	8
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	9
1.1. Realidad problemática	9
1.2. Formulación del problema	16
1.3. Objetivos	16
1.4. Hipótesis	17
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	17
2.1. Tipo De Investigación	17
2.2. Población y Muestra	18
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos	18
2.4. Procedimiento	20
CAPÍTULO III: RESULTADOS	63
3.1. Aspectos Generales	63

3.2. Construcción del árbol de decisiones para la determinación de las áreas potenciales de recarga de aguas subterráneas	82
3.3. determinación del estrés hídrico en la zona de estudio	87
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	92
4.1. Discusión	92
4.2. Conclusiones	94
REFERENCIAS	97
ANEXOS	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Base de datos para la investigación	21
Tabla 2 Parámetros del satélite landsat-8	27
Tabla 3 Bandas de Landsat-8	27
Tabla 4 Características de la imagen Aster	34
Tabla 5 Conversión de nomenclatura de datos	39
Tabla 6 Valores de clasificación NDWI	50
Tabla 7 Valores de clasificación del NDVI.....	54
Tabla 8 Constantes de calibración de las bandas térmicas de las imágenes Landsat-8.....	56
Tabla 9 Formas de relieve en función al grado de pendiente.....	61
Tabla 10 Coordenadas de la zona de estudio.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i> Pantalla principal de la USGS	30
<i>Figura 2</i> Código Path/Row	31
<i>Figura 3</i> Selección de imagen landsat-8.....	32
<i>Figura 4</i> Imagen landsat-8 sin tratamiento.....	33
<i>Figura 5</i> Mapa de cobertura del Perú	36
<i>Figura 6</i> Imagen Landsat 8 en color real.....	38
<i>Figura 7</i> Datos de la imagen Landsat-8.....	39
<i>Figura 8</i> Radiancia original de las bandas.....	41
<i>Figura 9</i> Coeficiente de las bandas.....	41
<i>Figura 10</i> Calibración a radiancia y su firma espectral	42
<i>Figura 11</i> Coeficiente de reflectancia	44
<i>Figura 12</i> Imagen Landsat 8 en color real con calibración a reflectancia TOA	45
<i>Figura 13</i> Metadata-coeficientes de las bandas 10 y 11.....	46
<i>Figura 14</i> Valores del NDWI.....	49
<i>Figura 15</i> Valores del NDVI.....	53
<i>Figura 16</i> Dispersograma del NDVI vs TS	58
<i>Figura 17</i> Distribución de los valores de la temperatura superficial	59
<i>Figura 18</i> Distribución de los valores de la pendiente.....	62
<i>Figura 19</i> Plano de ubicación de la zona de estudio	64
<i>Figura 20</i> Plano de la accesibilidad a la zona de estudio	66
<i>Figura 21</i> Temperatura anual de Ayaviri-Tumbaden	68
<i>Figura 22</i> Temperatura máxima y mínima promedio de Ayaviri-Tumbaden	69
<i>Figura 23</i> Precipitación mensual	70
<i>Figura 24</i> Precipitación promedio mensual de la lluvia.....	71
<i>Figura 25</i> Fruto silvestre propio del Caserío Ayaviri	¡Error! Marcador no definido.
<i>Figura 26</i> Fauna de la zona de estudio.....	72
<i>Figura 27</i> Plano Geológico	73
<i>Figura 28</i> Depósito fluvio-glaciar.....	74
<i>Figura 29</i> Muestra de mano con textura porfírica.....	75
<i>Figura 30</i> Muestra de caliza	76
<i>Figura 31</i> Humedales encontrados en el área de estudio	79
<i>Figura 32</i> Humedal representativo de la exportación de la biomasa.....	79
<i>Figura 33</i> Lagunas encontradas en el área de estudio.....	80
<i>Figura 34</i> Pajonales presentes en el área de estudio	81
<i>Figura 35</i> Árbol de decisiones.....	83
<i>Figura 36</i> Mapa de la clasificación hidrológica	¡Error! Marcador no definido.
<i>Figura 37</i> Espacio del NDVI	87
<i>Figura 38</i> Dispersograma del NDVI	88
<i>Figura 39</i> Mapa de estrés-hídrico	90

RESUMEN

La teledetección ha sido utilizada como valiosa herramienta y determinante a la hora de establecer indicadores de degradación y conservación de los recursos naturales, de manera especial en evaluar dinámicas en los cambios de usos de suelos, coberturas vegetales y para el control sostenible y sustentable de agua subterránea en cualquier parte de la tierra y con aplicación de todas las ramas del conocimiento, permite el monitoreo de los cambios de acumulación de manera detallada y en tiempo real, es por ello que el presente estudio tiene como objeto identificar agua subterránea usando imágenes Landsat y Aster. La investigación es de enfoque cuantitativo-cualitativo, tipo de investigación aplicada alcance transversal y de diseño no experimental. Las técnicas utilizadas para la recolección de datos fueron la observación y el análisis espectral de los parámetros de superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor, genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información de la tierra.

A la vez se utilizará los algoritmos de árbol de decisión que permiten la resolución de problemas de mapeo cuando existen muchas fuentes de información que sirven como insumos para la clasificación de coberturas del suelo y fuentes de agua.

PALABRAS CLAVES: Imágenes Landast y Aster, Aguas subterráneas, multiespectral, árbol de decisiones.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

Dentro de los recursos de agua explotable que existe en la tierra, el agua subterránea constituye casi el 98% de total. El agua subterránea es utilizada para el abastecimiento de agua potable, tanto en viviendas individuales, como en aglomeraciones urbanas, proyectos agropecuarios para riego y para uso animal; igualmente muchas industrias consumidoras de grandes cantidades de agua hacen uso de este recurso. (Hernández Sánchez, R. I. 2016)

La utilización de agua subterránea se ha venido incrementando en el mundo desde tiempos atrás y cada día gana en importancia debido al agotamiento o no existencias de fuentes superficiales. Se estima que más de la mitad de la población mundial depende de agua subterránea como fuente de agua potable. Grandes ciudades como Bangkok, Montana, Colombia, Buenos Aires, Miami, Guatemala, Calcuta entre otras usan agua subterránea para el abastecimiento de su población. (Lopez Escobar, K., & Navarrete Cuesta, E. (2009).

En las inmediaciones de la localidad de Medanos (provincia de Buenos Aires). Hernandez.C. (2019), estableció áreas de mayor factibilidad de prospección de hidrogeología (zonas de captación y de almacenamiento de agua), y teniendo presente que los cauces fluviales por lo común contienen materiales más permeables respecto del entorno de la llanura de inundación, se trata de identificar mediante técnicas de tratamiento digital de imágenes satelitales, rasgos morfológicos asociados a paleocanales que geológicamente habrían estado vinculados con la evolución del paleo delta de río Colorado.

Folguera. (2015), con el propósito de llevar adelante las tareas correspondientes al tratamiento digital de las imágenes raster, se operó fundamentalmente con dos sistemas de información geográfica (SIG): Idrisi Selva (Clark Labs y Global Mapper 13, 2011) (Blue Marble Geographigs, 2010). Para los análisis e interpretación a escala regional se emplearon imágenes Landsat 7 captadas por el sensor ETM+, multitemporal, Path 227 Row 87 con resolución espacial de 30m y una banda 8 pancromática de 15m de resolución espacial. En particular los tonos más claros generados por la emisividad de los cultivos en el infrarrojo cercano y los oscuros, asociados fundamentalmente a los depósitos arenosos debido a la mayor absorción de esta longitud de onda por su mayor contenido de humedad, permitieron delimitar parte de esos lóbulos deltaicos

Castany (1975). Según las técnicas satelitales representan una nueva oportunidad para monitorear cambios en la acumulación de recurso hídrico desde el espacio, dadas las limitaciones que existen hoy en día para obtener medidas completas y confiables de los niveles de agua subterránea en grandes regiones geográficas.

El estudio de cuerpos de agua se ha convertido en un aspecto muy importante, ya que el monitoreo de agua juega un papel importante en la gestión de los recursos hídricos. Avdan, (2017), utilizaron un método que combina un índice basado en píxeles (clasificación supervisada y no supervisada) y un método basado en objetos en una imagen de satélite Sentinel-2 con una resolución de 10 m para el estudio de cuerpos de agua presentes en una región montañosa y urbana, ubicados en Macedonia. Concluyeron que con estas técnicas los datos son más exactos comparados con datos de campo y se pueden usar para zonas montañosas y otros tipos de áreas difíciles.

Se han realizado, además, investigaciones como las de Aliaga et al. (2016), quienes usaron imágenes satelitales de distintas resoluciones espaciales para interpretar la dinámica lagunar en la Región Pampeña Argentina. Se utilizó el Índice Estandarizado de Precipitación (IEP) para la determinación de años húmedos, secos y normales. Este análisis mostro que las lagunas pampeanas no se comportan de la misma manera ante los eventos pluviométricos. Su origen, utilización socioeconómica y régimen pluviométrico condicionan su variación espaciotemporal y morfométrica.

En Chile, Briceño (2018). Con el uso de la teledetección (imágenes satelitales del sensor OLI de Landsat8), realizaron el estudio de la distribución espacial y dinámica de los parámetros de calidad de agua del lago Vichuquén- Chile durante el año 2016. Hicieron recolecciones de muestras de campo y mediciones in situ, análisis en laboratorios y procesamiento de imágenes satelitales. Concluyeron que los procedimientos sirvieron para conocer la variabilidad espacial de los parámetros de calidad de agua medidos con los datos satelitales, así como la influencia en el aumento de la eutrofización del lago, lo cual se debe por un lado a la estacionalidad, y por otro a los diferentes usos de suelo tales como la reforestación de pino y eucalipto, actividades agrícolas y áreas urbanas cercanas.

Mientras que en el Perú la cordillera Blanca es una de las áreas más importantes en las montañas de los Andes peruanos, donde los glaciares han experimentado disminuciones.

Durán- Alarcón (2015), estudiaron el retroceso de estos glaciares desde 1975 hasta 2010 utilizando imágenes de Mapper Temático (TM) Lansat-5. La extensión del

hielo limpio de los glaciares se estimó utilizando los umbrales del Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI). Se aplicó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y Temperatura de la Superficie de la Tierra (LST). Las estimaciones del área derivadas de las imágenes del Landsat se compararon con los datos sobre el terreno del glaciar en 1975 y 2010. Los resultados muestran una tendencia decreciente a una velocidad de 4.5 km² por década en 1975 a 2010, con una pérdida total de 22.5 km² (58%).

Mendoza & Rojas Acuña (2018). Clasificación de imágenes ETM+ y ASTER GDEM por el método árbol de decisiones para la detección de agua subterránea en Perú. Caso Estudio: Lambayeque. Resumen, con el propósito de complementar las diferentes técnicas de prospección geofísica aplicada a la exploración del agua subterránea de acuíferos libres se propone el uso de imágenes satelitales ETM+ y ASTER. El área de estudio es la Región Lambayeque que está ubicada en la costa norte del Perú, entre las coordenadas geográficas 5° 28' 36" y 7° 14' 37" de latitud Sur y 79° 41' 30" y 80° 37' 23" de longitud Oeste. Los datos utilizados son las imágenes registradas por el sensor ETM+ del satélite Landsat-7, ortorectificadas del 31-10- 2000 y las imágenes del modelo de elevación digital ASTER GDEM. Con los datos imágenes ETM+ se calculan los componentes principales con las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 y con el componente principal tres (CP3) se estiman los valores que corresponden a la red de drenajes de la Región Lambayeque. Adicionalmente con las bandas 3 y 4 se calcula el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) y con la banda 6 se estima la temperatura del suelo (TS). Con los datos imágenes ASTER GDEM se determina el modelo de pendiente (PEN) del área de estudio. Finalmente, mediante un árbol de decisiones, basados en los valores de CP3, NDVI, TS y PEN se caracterizan

las zonas potencialmente con agua subterránea de acuíferos libres. Para medir la confiabilidad de la metodología se verificó que 153 pozos de agua subterránea inventariados cuyas coordenadas se conocen 112 (73,2%) pertenecen a las zonas clasificadas como potencialmente con agua subterránea.

Vasquez Peralta & Gobierno Regional Cajamarca (2011). Estudio hidrológico de la región cajamarca. El presente estudio hidrológico a nivel exploratorio del departamento de Cajamarca, contiene el análisis básico del potencial de recursos hídricos que se produce en nuestras cuencas hidrográficas y sus limitaciones para atender la demanda de agua de miles de hectáreas que cuentan con aptitud para el riego; elaborado en base a la poca información hidrometeorológicos con que se cuenta, sobre todo por la carencia de registros históricos de descargas de ríos, ya que no se cuenta con una red de estaciones hidrométricas que cubran la información histórica de toda la región. No obstante, los métodos hidrológicos convencionales nos permiten estimar las descargas de los ríos a partir de datos de precipitación con un registro no menor de 20 años. Específicamente para conocer el comportamiento hidrológico de las cuencas se han analizado los parámetros meteorológicos (precipitación y temperatura), los parámetros geomorfológicos (área de cuenca, longitud y pendiente) y las características ecológicas como cobertura vegetal, altitud, clima, etc. Con los cuales se ha estimado el rendimiento hídrico de las cuencas, empleando modelos matemáticos convencionales (formula de Becerril para determinar el aporte medio anual de una cuenca).

Barboza Colorado & Cortez Valera (2018). Análisis multiespectral mediante parametros superficiales con la plataforma landsat 8 para identificar agua subterránea

en la cuenca del río mashcón – cajamarca. Describe que utiliza técnicas espectrales para determinar diferentes tipos de materiales, apoyada en instrumentos de recolección de datos, como el satélite Áster, el software Geoimagen y el software SNAP para el análisis espectral, obteniéndose como principal resultado la identificación de las zonas de recarga hídrica. El resultado de la investigación muestra que de los 96 pozos de agua subterránea registrados por ANA (2018), 76 representan la clase, agua subterránea, con lo cual brinda una confiabilidad de 79% en la identificación de zonas de agua subterránea. Se concluye así que la confiabilidad de este estudio está en función de los pozos subterráneos mapeados en campo por ANA (2018), por lo cual permitirá un mejor aprovechamiento de este recurso hídrico, y tener más claro la línea base para remediación minería y diseño; además abrirá las puertas al uso de la teledetección como herramienta complementaria a estudios en todas las ramas del conocimiento.

Cusquisiban Quispe (2019). En su tesis: Ubicación de zonas de recarga hídrica usando imágenes landsat 8 mediante el método de árbol de decisiones en la cuenca del río chamán, cajamarca y la libertad-perú. El presente estudio tuvo como objetivo ubicar las zonas de recarga hídrica usando imágenes LANDSAT 8 mediante el método de árbol de decisiones en una población de estudio de 1.569 km² correspondiente a la cuenca Chamán, con un diseño de investigación del tipo no experimental, transversal, causal, usando técnicas espectrales para discriminar diferentes tipos de materiales apoyada en instrumentos de recolección de datos como el satélite Áster, el software ArcGIS 10.5 y software Envi 5.4 para el análisis espectral, obteniéndose como principal resultado la identificación de las zonas de recarga hídrica; el resultado muestra que de los 1 021 pozos de agua subterránea registrados por (INGEMMET,

2015), 805 representan la clase recarga hídrica favorable, con lo cual brinda una certeza de 78.8 % en la identificación de zonas de recarga hídrica subterránea. Concluyéndose así que la certeza de este estudio en función de los pozos subterráneos mapeados en campo por INGEMMET es elevada y permitirá un mejor aprovechamiento de este recurso hídrico, así como su protección, además que abrirá las puertas al uso de teledetección como herramienta complementaria a estudios en todas las ramas del conocimiento.

Ingemmet, (2015) en el Boletín Serie H: Hidrogeología, Hidrogeología de las cuencas de los ríos Jequetepeque (13774) y Chamán (137752) Regiones Cajamarca, La libertad y Lambayeque; este documento es el resultado de estudios Hidrogeológicos regionales tomando como unidad de análisis las cuencas hidrográficas del territorio peruano. El boletín muestra diagnósticos temáticos muy importantes como el inventario de fuentes, que se realizó con el objetivo de tener una evaluación completa de los lugares en donde surgen las aguas subterráneas a la superficie; sin embargo, solamente se pudieron inventariar los manantiales principales y constantes (incluyendo los captados), los pozos, los sondeos y algunas bofedales. Se logró desarrollar propuestas de intervención en captación y recarga de acuíferos con técnicas novedosas que lleven de la mano el cuidado del medio ambiente. A esto le sumamos la identificación de zonas para ser declaradas como parques naturales, pues involucran humedales que dependen del agua subterránea y el desarrollo de la balneología en la zona de Yumagual, donde aflora una fuente termal de 50.5 °C de temperatura.

La zona de estudio se encuentra a una altitud entre los entre los 3,500 y 4,000 m.s.n.m a una distancia de 47 km y 1 hora 40 minutos aproximadamente de la ciudad

de Cajamarca, el área está ubicada en la ecorregión Jalca. Con una extensión de 9,720 km², enmarcada en la zona 17S con Datum WGS84. En el Caserío de Ayaviri, Distrito de Tumbaden, San Pablo, Cajamarca.

1.2. Formulación del problema

¿Es posible prospectar aguas subterráneas usando imágenes Landsat y Áster, en el Caserío Ayaviri, Distrito Tumbaden, San Pablo, Cajamarca 2021?

1.3. Objetivos

1.3.1, Objetivo general

Realizar la prospección aguas subterráneas usando imágenes Landsat y Áster, en el Caserío Ayaviri, Distrito Tumbaden, San Pablo, Cajamarca 2021 .

1.3.2. Objettivos específicos

- Analizar e interpretar las diferentes radiaciones de las firmas espectrales para determinar cuerpos de agua subterránea.
- Determinar los parámetros de temperatura y pendientes que favorecen la recarga hídrica subterránea.
- Identificar las zonas de recarga hídrica subterránea usando imágenes Landsat y Áster, en el Caserío Ayaviri
- Realizar el análisis multiespectral mediante el clasificador del árbol de decisiones que combina cada variable que estableciera la precensia de cuerpos de aguas.

1.4. Hipótesis

- Usando imágenes Landsat y Áster, en el Caserío Ayaviri, se puede identificar áreas prospectables de recarga hídrica mediante el método de árbol de decisiones.
- Mediante el análisis de las variables como índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de aguas de diferencia normalizada (NDWI) se puede prospectar aguas subterráneas en el Caserío Ayaviri.
- Mediante el análisis de las variables de los parámetros tales como la temperatura y pendientes se puede prospectar agua subterránea en el Caserío Ayaviri.
- Mediante el análisis multiespectral del clasificador del árbol de decisiones que combina cada variable para identificar áreas prospectables de agua subterránea en el Caserío Ayaviri.
- Se sitúa zonas con mayor filtración hídrica modelada en planos temáticos.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1. Tipo De Investigación

La investigación será de un enfoque cualitativo/cuantitativo, cualitativo dado que explica a base de teoría obteniendo un mayor conocimiento del área de estudio a través de la obtención de datos. Y cuantitativo explica y predice y/o controlar fenómenos a través de un enfoque de obtención de datos numéricos. (Pelekais, 2000)

El tipo de investigación es aplicada dado que los resultados tienen como propósito de resolver el problema de investigación. De carácter trasversal porque se

recopiló datos en un momento único, con un diseño no experimental dado que se limita a observar los acontecimientos sin intervenir en los mismos. Con estudios explicativos donde pretendemos conducir a un sentido de comprensión o entendimiento de un fenómeno que apuntan a las causas de los eventos físicos. (Grajales, 2000)

De acuerdo a lo mencionado se tomaran datos satelitales del área de estudio, se hará un análisis y descripción de las variables de la investigación. De igual forma los resultados que se obtendrán a partir de la teledetección servirá para determinar la presencia de zonas de recarga hídrica subterránea en el Caserío Ayaviri.

2.2. Población y Muestra

Población: la población de estudio será las imágenes Landsat8 correspondientes al Caserío Ayaviri en un área de 972,01 hectáreas

Muestra: las firmas espectrales de las imágenes Landsat8 del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), componente principal del agua (NDWI), temperatura, pendientes, Con unidad mínima de análisis de 15 x 15 m pixel.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

Técnicas Las técnicas utilizadas para la recolección de datos fueron la observación y el análisis espectral de los parámetros de superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor, genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información de la tierra. Para que la observación remota sea posible, es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción. Donde los principales elementos de cualquier sistema de teledetección: sensor, el objeto

observado y el flujo energético que permite poner a ambos en relación. Ese flujo procede del objeto por reflexión de la luz solar. Podría también tratarse de un tipo de energía emitida por el propio objeto, o incluso por el sensor. Estas son precisamente las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión. (Chuvienco, 2002)

A la vez se utilizará los algoritmos de árbol de decisión permiten la resolución de problemas de mapeo cuando existen muchas fuentes de información que sirven como insumos para la clasificación de coberturas del suelo. Estos métodos no son muy utilizados por la comunidad científica a pesar de su capacidad. La idea subyacente consiste en discriminar secuencialmente cada una de las categorías, de acuerdo a la banda o bandas que permiten su separación del resto (Chuvienco, 2002). Evalúan tres tipos de árboles de decisión para los problemas de mapeo global de coberturas de suelo: los Árboles de Decisión Invariados, los Árboles de Decisión Multivariados y los Árboles de Decisión Híbridos. Un Árbol de Decisión Invariado (UDT) es un tipo de árbol de decisión donde los límites de cada nodo son definidos por una única característica de la cobertura analizada. Por otro lado, un Árbol de Decisión Multivariado (MDT) es semejante al UDT, pero en este, el análisis de cada nodo puede estar dado por más de una característica de la cobertura en cuestión. Por último, un Árbol de Decisión Híbrido (HDT) es un tipo de árbol de decisión donde los diferentes algoritmos de clasificación pueden ser usados en diferentes subárboles de un árbol mayor o superior. Para este trabajo se ha empleado un árbol de decisión multivariado, debido a que para identificar vegetación inundada, se ha basado en la combinación del NDVI, el MNDWI y la Banda 6 del Landsat 8, quedando definido el algoritmo de condición como:

“prospección de aguas subterráneas usando imágenes landsat y áster, en el caserío ayaviri, distrito tumbaden, san pablo, cajamarca 2021”

$$(NDVI > 0,5) \text{ Y } ((MNDWI > (-0,2)) \text{ Y } (MNDWI < 0))$$

$$\text{Y } (Banda 6 < 0,16)$$

Los instrumentos para la recolección de datos de la presente investigación son:

- ✓ se usarán la plataforma satelital (imágenes Landsat y Aster)
- ✓ programas de procesamiento digital y espectral (Envi), programa de información geográfica (ArcGIS).
- ✓ Cuaderno de campo para la toma de datos
- ✓ Brújula para la toma de datos de rumbo y buzamiento de las diferentes estructuras geológicas como: fracturas, fallas, estratos, pliegues.
- ✓ Sistemas de Posicionamiento (GPS) para la ubicación de puntos con mayor información dentro del área de estudio.

Asi, como tambien utilizamos los diferentes materiales para la investigación:

- ✓ Picota de geólogo para la extracción de muestras
- ✓ Cámara fotográfica
- ✓ Plano topográfico y geológico.

2.4. Procedimiento

El procedimiento de investigación se desarrolló mediante tres etapas, que a continuación se describe.

–Etapa preliminar de gabinete

En esta etapa se revisó la información bibliográfica relacionada al tema de investigación como la hidrología, análisis espectral de imágenes satelitales y árbol de decisiones. Además de visualizar las rutas de acceso al área de estudio mediante

imágenes satelitales del Google Earth siendo procesadas en el software ArcGIS 10.3 para la elaboración de planos que servirán en el recorrido en campo. Conjuntamente hacer uso de la plataforma GEOCATMIN para descargar los shapefiles del área de estudio para realizar los planos geológicos, topográficos, hidrológico.

Los criterios de selección para los antecedes relacionados al tema de investigación fueron uso de palabras claves como prospección de aguas subterráneas, imágenes Landsat y Aster, análisis espectral, árbol de decisiones. Estudios publicados de preferencia desde el año 2010 a excepción de libros, base de datos de Google Académico, Redalyc, Scielo, Sunedo. Teniendo en cuenta como guía la pregunta de investigación ¿Es posible prospectar aguas subterráneas usando imágenes Landsat y Áster, en el Caserío Ayaviri, Distrito Tumbaden, San Pablo, Cajamarca 2021?

En su totalidad los autores coincidieron en que el conocimiento y el uso del de un sistema de agua subterránea requieren una comprensión de los factores hidrogeológicos que controlan el almacenamiento y transporte en el subsuelo del agua subterránea.

Tabla 1

Base de datos para la investigación

Base de datos	Estudios	Autor (es)	Año	Referencia
LIBRO	PROSPECCION Y EXPLORACION DE AGHUA SUBTERRANEA	CASTA NY	1975	

				EDITORIAL OMEGA
ARTICULO DE REVISTA	APLICACIÓN DE SENSORES REMOTOS PARA EL ANALISIS DE COBERTURA VEGETAL Y CUERPOS DE AGUA	AVDAN	2017	EDITORIAL INDESI A
ARTICULO DE REVISTA	DETERMINACION DE CALIDAD DE AGUA CON IMÁGENES SATELITE LANDSAT 8, SENSOR OLI	BRICEÑO O.I.P.	2018	REVISTA DE TELEDETECCION

ARTICULO DE REVISTA	APLICACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES EN LA DINAMICA DE CUERPOS DE AGUA	DURAN Y ALARCÓN. C	2015	JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES
TESIS DE MAESTRIA	CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES ETM+ Y ASTER GDEM POR EL MÉTODO ÁRBOL DE DECISIONES	MENDOZA & ROJAS ACUÑA	2018	ALICIA
ANA	ESTUDIO HIDROLÓGICO Y EXPLORATORIO DEL DEPARTAMENTO DE CAJAMARCA	VASQUEZ PERALTA & GARCÍA	2011	GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA

	ANÁLISIS			
	MULTIESPECTR			
	AL MEDIANTE			
	PARAMETROS			
	SUPERFICIALES		BARBO	
	CON	LA	ZA	2018
	PLATAFORMA			TESIS
TESIS	LANDSAT 8		COLOR	
	PARA		ADO &	
	IDENTIFICAR		CORTE	
	AGUA		Z	
	SUBTERRÁNEA		VALER	
	RIO MASHCÓN –		A,	
	CAJAMARCA			
	: UBICACIÓN DE			
	ZONAS		DE	
	RECARGA			
	HÍDRICA			
	USANDO			
TESIS	IMÁGENES		CUSQUI	
	LANDSAT	8	SIBAN	2019
	MEDIANTE EL		TESIS	
	MÉTODO DE		QUISPE,	
			2019	

ÁRBOL DE
DECISIONES EN
LA CUENCA DEL
RÍO CHAMÁN,
CAJAMARCA

Nota. Se presentan la base de datos con temas relacionados a la prospección de aguas subterráneas, análisis espectral y árbol de decisiones.

–Etapa de campo

En esta etapa nos dirigiremos al terreno para llevar a cabo numerosas observaciones como afloramientos o indicios de la presencia de agua subterránea además de analizar la geología del área entre ellas estructurales, litológicas y climatológicas. Haciendo un mapeo detallado que posteriormente será plasmado en planos. Todo esto con ayuda de herramientas de trabajo de campo como: planos de ubicación, escalímetro y GPS para el cartografiado pertinente, brújula que será necesaria para la orientación y buzamientos, picota para la recolección de muestras que nos ayuden a determinar la litología presente, cuaderno de campo para registrar lo observado.

–Etapa de gabinete

En esta etapa procesamos los datos geológicos, litológicos y estructurales como: pliegues, fallas, discontinuidades tomadas en campo con la ayuda de software ArcGIS 10.3 y Excel para la elaboración de planos geológicos y topográficos, hidrológicos. Adicional plasmamos en imágenes lo observado que nos ayudó a una mejor interpretación de nuestro tema de estudio.

En esta etapa también procesamos las imágenes satélites en el software Envi 5.3 y ArcGIS 10.3 para la búsqueda de cuerpos de agua subterránea correspondientes a una época de sequía dado que nos permitirá hacer un estudio más eficaz, ya que en la época de sequía el agua superficial disminuye y teniendo en cuenta la presencia de una vegetación predominante en la zona de estudio sería un indicio de afloramiento de aguas subterránea. Para ello procedemos a lo siguiente:

Obtención de imágenes satelitales

Descarga de la imagen Landsat 8

Primero debemos conocer que es una imagen Landsat. El satélite LANDSAT-8, fue lanzado el 11 de febrero de 2013, es un satélite óptico de resolución media cuyo objetivo es proporcionar información para actividades relacionadas con la agricultura, la educación, los negocios, la ciencia y también en el ámbito estatal. Es un satélite más completo respecto a su antecesor, LANDSAT-7, con sus funciones mejoradas para monitorizar la calidad del agua y nubes atmosféricas altas.

Este satélite contiene dos sensores: Sensor operacional de imágenes de tierra (OLI) y un sensor Infrarrojos Térmico (TIRS).

OLI está formado por 9 bandas espectrales que van desde lo visible pasando por los infrarrojos hasta el espectro de radiación de bajas ondas. Con las imágenes de resolución espaciales, que oscilan entre los 15 y los 30m, LANDSAT-8 proporciona imágenes de satélite de calidad que podrían demostrar los diferentes usos que se le podría dar a la tierra desde el espacio.

TIRS está compuesto por dos bandas espectrales, las cuales detectan infrarrojos térmicos, una herramienta imprescindible para medir la temperatura de la superficie de la Tierra. (EARTH OBSERVING SYSTEM , 2020)

Tabla 2

Parámetros del satélite landsat-8

Parámetros	Landsat-8
Altitud de órbita	705 km
Ancho pasada	185 km
Distancia de muestreo (GSD)	15-30 km
Lanzamiento de muestreo/ expectativa de vida	2013-2018 (tiene suministros hasta 2030)
Tiempo revisita	16 días

Nota. Parámetros de LANDSAT-8 que proporcionan imágenes de satélite de calidad que podrían demostrar los diferentes usos que se le podría dar a la tierra desde el espacio. Fuente: <https://eos.com/es/landsat-8/>

Tabla 3

Bandas de Landsat-8

Sensor	Band n°	Nombre de la banda	Wavelength (µm)	Resolution (m)	Band Applications
OLI	1	Costera (Coastal)	0.43 - 0.45	30	Estudios costeros y de aerosoles
OLI	2	Azul	0.45 - 0.51	30	Cartografía batimétrica, que distingue el suelo de la vegetación y la vegetación caducifolia de la vegetación de coníferas
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	Roja	0.63 - 0.67	30	Distingue las laderas de vegetación

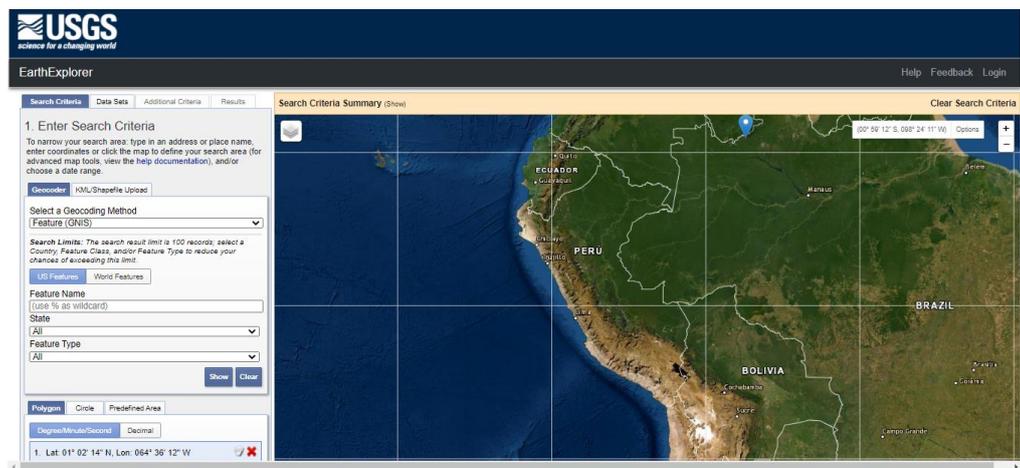
OLI	5	Infrarrojo Cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30	Destaca el contenido de biomasa y las costas
OLI	6	Infrarrojo de Onda Corta 1 (SWIR 1)	1.57 - 1.65	30	Distingue la humedad del suelo y de la vegetación; penetra a través de nubes finas
OLI	7	Infrarrojo de Onda Corta 2 (SWIR 2)	2.11 - 2.29	30	Mejora de la lectura de la humedad del suelo y la vegetación y la penetración a través de nubes finas
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	10.60 - 11.19	30 (100)	Resolución de 100 metros, mapeo

		Infrarrojo 1 (TIRS 1)			térmico y humedad estimada del suelo
TIRS	11	Sensor	11.50	- 30 (100)	Resolución de 100
		Térmico	12.51		metros, mapeo
		Infrarrojo 2 (TIRS 2)			térmico y humedad estimada del suelo

Nota. Bandas espectrales que van desde lo visible pasando por los infrarrojos hasta el espectro de radiación de bajas ondas. Con las imágenes de resolución espaciales, que oscilan entre los 15 y los 30m de distancia. Fuente: <http://geocento.es/galeria-de-satelites-para-buscar-y-adquirir-imagenes/satelite-imagenes-landsat-8/>

Para adquirir las imágenes ingresamos a la plataforma Landsat 8 desde el servidor del Servicio Geológico De Los Estados Unidos (USGS) atreves de la página web: web: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

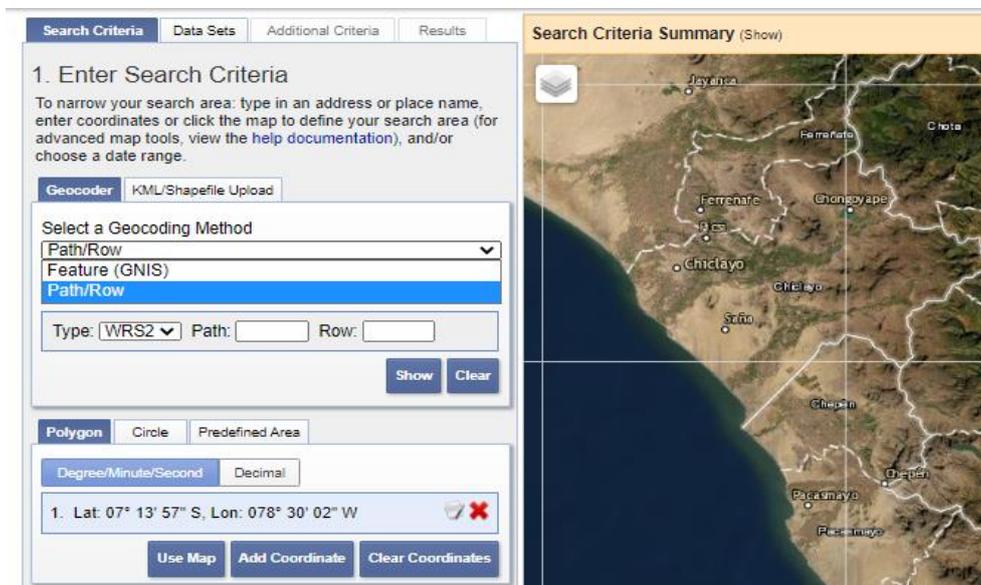
Figura 1
Pantalla principal de la USGS



Nota: Página principal del Servicio Geológico De Los Estados Unidos (USGS), 2021

En la pestaña 1 vamos a seleccionar el Path/Row (latitud/longitud) compuesto por dos números (fila/ columna) que nos ayuda a conocer con mayor exactitud la ubicación de la imagen, para ellos nos guiaremos de los Path/Row de la cobertura del Perú, visualizada en la imagen n° 2

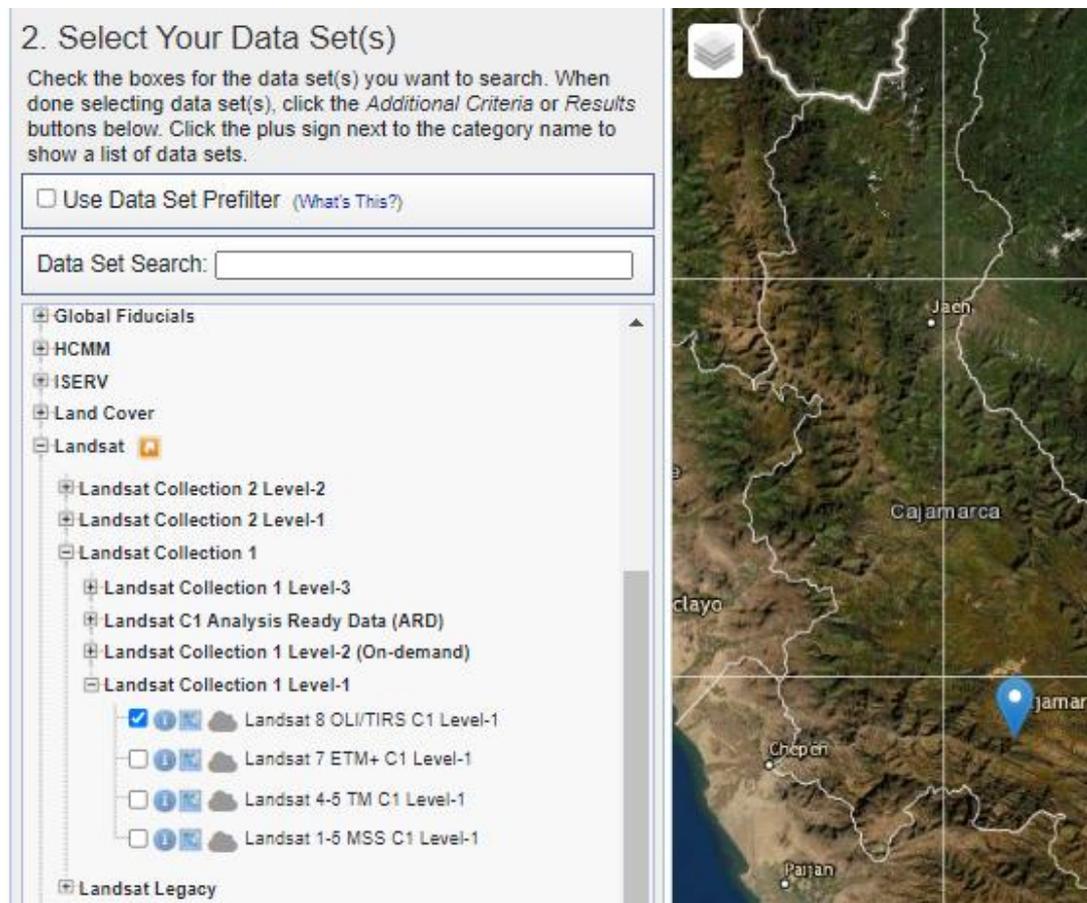
Figura 2
Código Path/Row



Nota: código Path/Row son dos sencillos parámetros numéricos que permiten identificar Rápidamente una imagen satélite Landsat de forma análoga a los valores de longitud y latitud. Fuente: Servicio Geológico De Los Estados Unidos (USGS), 2021

Siguiente señalamos la fecha de acuerdo a la época de sequía en el mes de octubre del años 2020, daremos clic en Data sets tendremos una segunda pestaña donde visualizamos diversos satélites donde elijaremos la imagen Landsat 8.

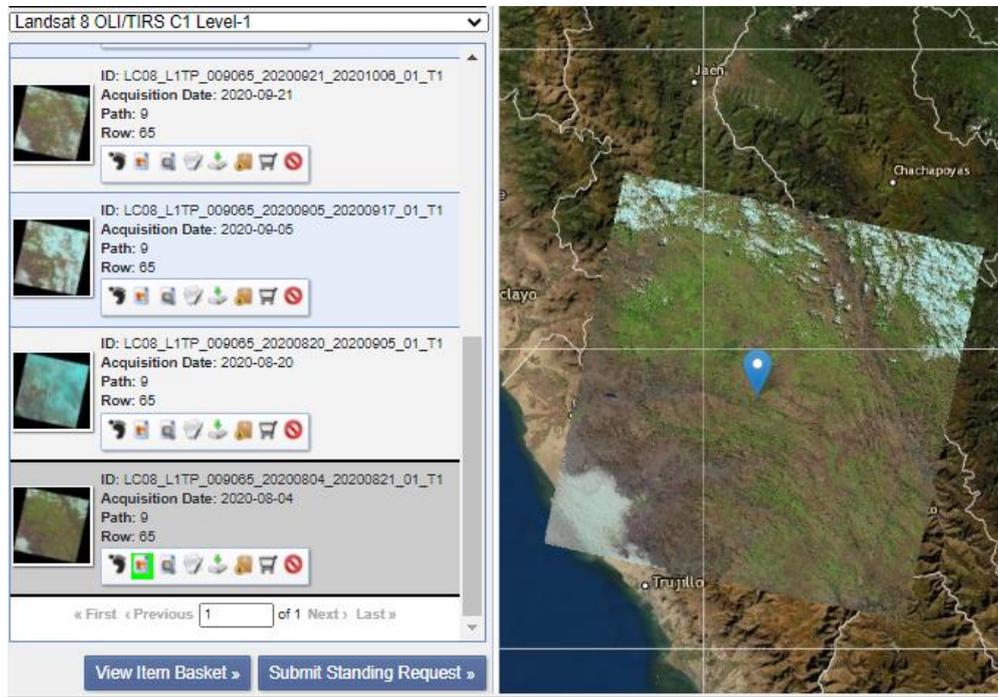
Figura 3
Selección de imagen landsat-8



Nota: Selección del tipo de imagen, Fuente: Servicio Geológico De Los Estados Unidos (USGS), 2021

Finalmente elijamos la imagen deseada más limpia es decir que no esté tan contaminada por nubes o neblina.

Figura 4
Imagen landsat-8 sin tratamiento



Nota: Selección y descarga de la imagen Landsat, Fuente: Servicio Geológico De Los Estados Unidos (USGS), 2021

Descarga de la imagen Aster GDEM

Las imágenes Aster cuentan con 14 bandas y sensores TIR y SWIR, además del VNIR de 15 metros y estéreo dentro de la órbita, son ideales para la generación de MDT y estudios geológicos.

Las imágenes ASTER, son captadas desde 1999 por el satélite Terra. ASTER presenta una órbita heliosincrónica a una distancia de 705 kilómetros, con un ciclo de repetición de 16 días, un ancho de barrido de 60 kilómetros y una distancia entre orbitas de 172 Km. ASTER está compuesto por 3 subsistemas, VNIR, SWIR y TIR; cada uno de cuales presenta características particulares tales como 3 bandas en la región espectral del visible e infrarrojo cercano (VNIR) con una resolución espacial

de 15 metros; 6 bandas en la región espectral del infrarrojo de onda corta (SWIR) con una resolución espacial de 30 metros y 5 bandas en el infrarrojo térmico con una resolución espacial de 90 metros (ERSDAC, 2001). ASTER también presenta un telescopio con visión hacia atrás que escanea en la región espectral de la banda 3B, lo que nos permite realizar modelos digitales de terreno (MDT) por pares estereoscópicos. (González, 2018)

Tabla 4
Características de la imagen Aster

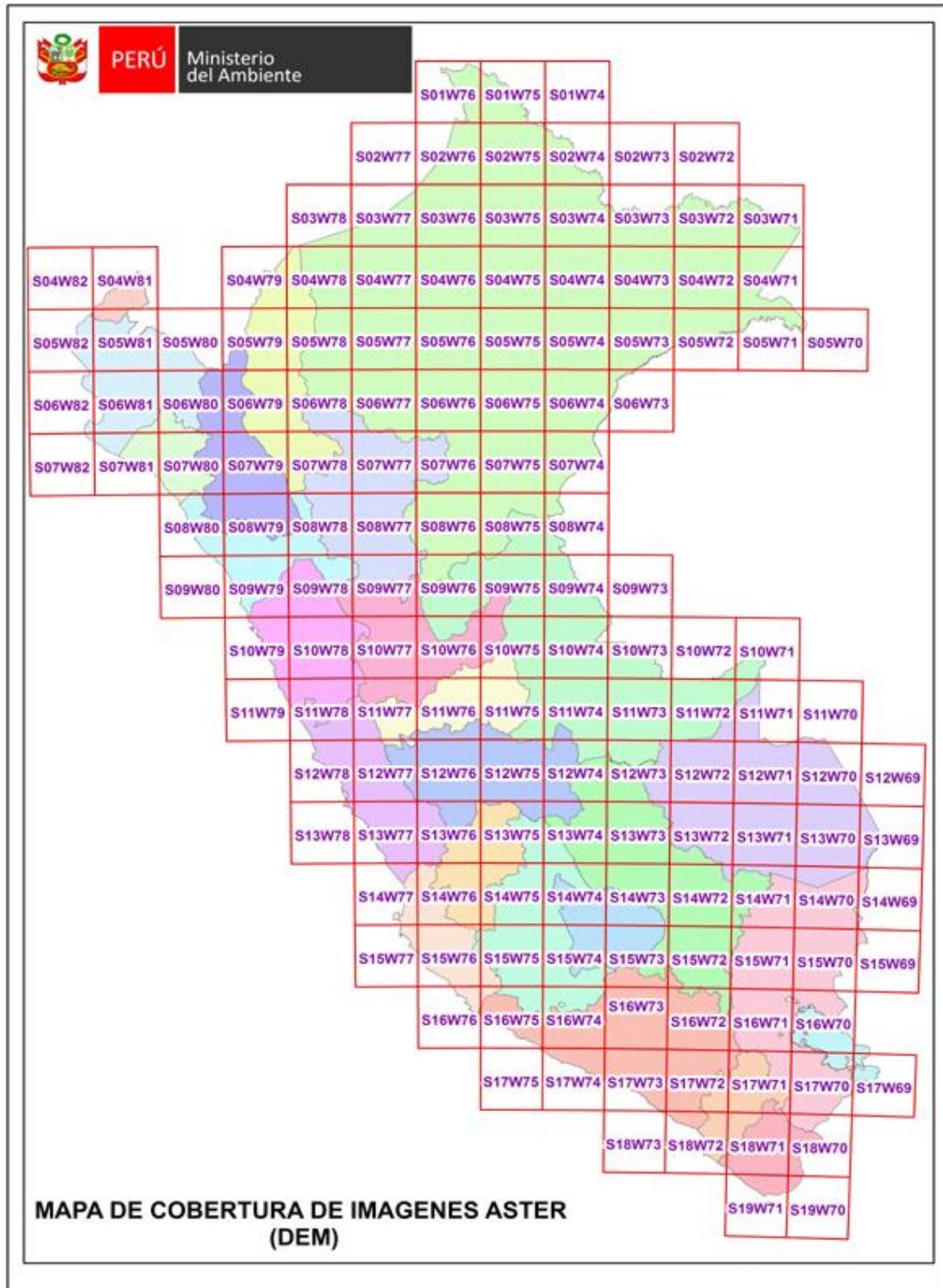
Subsistema	Banda n°	Rango Espectral	Resolución Espacial
VNIR	1	0.52-0.60 μm	15 M
	2	0.63-0.69 μm	
		0.78-0.86 μm	
	3N		
	3B	0.78-0.86 μm	
SWIR	4	1.600-1.700 μm	30 m
	5	2.145-2.185 μm	
	6	2.185-2.225 μm	
	7	2.235-2.285 μm	
	8	2.295-2.365 μm	
	9	2.360-2.430 μm	
	10	8.125-8.475 μm	90m
	11	8.475-8.825 μm	
	12	8.925-9.275 μm	

	13	10.25-10.95 μm
TIR	14	10.95-11.65

Nota. La imagen ASTER está compuesto por 3 subsistemas, VNIR, SWIR y TIR FUENTE. (González, 2018)

Para descargar la imagen Aster nos ayudaremos del servidor del MINAM esta imagen se encuentran en formato Geo TIFF con coordenadas geográficas lat/long, con resolución espacial de 30 metros y hace referencia al geoide WGS84/EGM96. Para descargar debemos conocer el código referente a la zona de estudio así como se muestra en la imagen n° 5.

Figura 5
Mapa de cobertura del Perú



Nota: Mapa de cobertura de imágenes áster (DEM) fuente: http://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/download_raster.aspxelo

Estas imágenes serán útiles para la elaboración del cálculo de pendientes para luego ser utilizadas en la elaboración del árbol de decisiones.

Corrección atmosférica y radiométrica

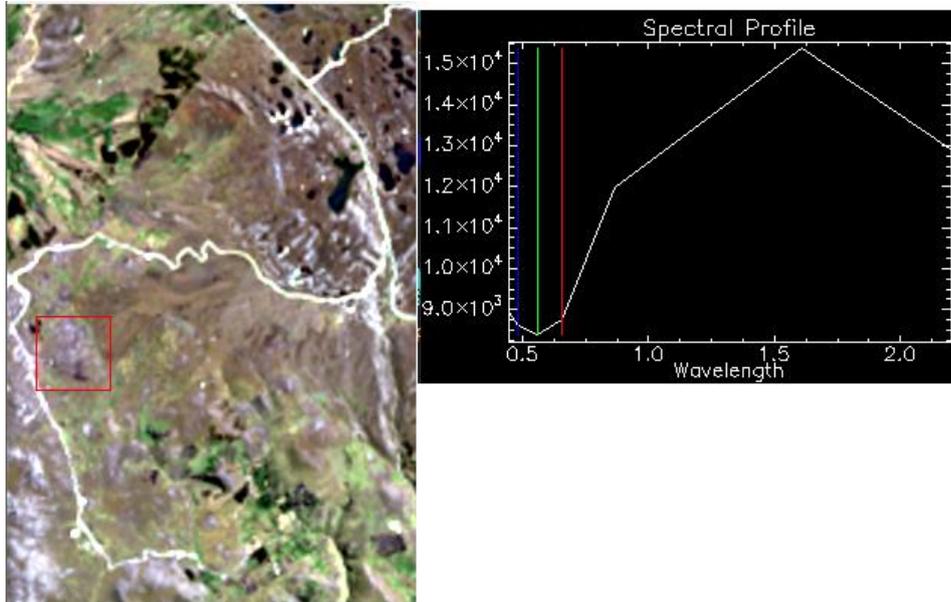
Los datos de Landsat Collections Level-1 se pueden reescalar a reflectancia y / o radiancia de la parte superior de la atmósfera (TOA) utilizando coeficientes de reescalado radiométrico proporcionados en el archivo de metadatos que se entrega con el producto Level-1. El archivo de metadatos también contiene las constantes térmicas necesarias para convertir los datos de la banda térmica a la temperatura de brillo TOA.

Los productos de datos Landsat Collections Level-1 consisten en Números Digitales (DN) escalados cuantificados y calibrados que representan los datos de imágenes multispectrales. Los datos de los productos Landsat 8 adquiridos tanto por Operational Land Imagen (OLI) como por el sensor de infrarrojos térmicos (TIRS) se entregan en formato de entero sin signo de 16 bits. Los productos Landsat 1-7 se generan a partir de datos de un solo sensor y se entregan en formato de entero sin signo de 8 bits y las Landsat 8 se entregan en formato de entero sin signo de 12 bits.

A continuación, se muestra la subescena Landsat 8 sin ningún tipo de calibración, mostrando una firma espectral en el punto (760935.00E, 9232495.00S), donde se observa en el eje “Y” los valores de los números digitales (ND) en un formato de 12 bits que está en el orden 10^4 , lo que significa 12 bits = 4096 tonos de grises.

Figura 6

Imagen Landsat 8 en color real



Nota: Subescena Landsat 8 en color real sin ningún tipo de calibración con su respectiva firma espectral.

Conversión ND A Radianza En El Sensor Landsat 8

Las imágenes Landsat 8 LDCM, consisten en una serie cuantificada y calibrada de niveles digitales que pueden ser reescalado a valores de radiancia y reflectancia usando para ello los coeficientes radiométricos provistos en el archivo de metadato (_MTL.txt), tal y como se describe a continuación:

$$L\lambda = ML * Qcal + AL$$

Donde:

- $L\lambda$: Radiancia espectral en el sensor (Radiancia en el satélite).
- ML : Factor Multiplicativo de reescalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de banda)
- AL : Factor Aditivo de reescalamiento específico de la banda, proveniente de

Los metadatos (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de banda)

- *Qcal*: Valor de pixel discretizados y calibrados del producto estándar (Valor Digitales DN).

A continuación, se muestra la estructura de archivos y datos del LDCM, cuyo formato es similar a la salida de utilidad del tipo HDF, donde los archivos, grupos, conjuntos de datos, y los datos se han reorganizado para facilitar la lectura mientras se muestra el mismo contenido (Tabla n°5). Se subraya como ejemplo los parámetros de las primeras 5 bandas para mejorar la legibilidad en el metadato.

Figura 7

Datos de la imagen Landsat-8

```

LC08_L1TP_009065_20210807_20210818_01_T1_MTL.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
GROUP = L1_METADATA_FILE
GROUP = METADATA_FILE_INFO
  ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
  REQUEST_ID = "P700y9v0q9up2_00014"
  LANDSAT_SCENE_ID = "LC80090652021219LGN00"
  LANDSAT_PRODUCT_ID = "LC08_L1TP_009065_20210807_20210818_01_T1"
  COLLECTION_NUMBER = 01
  FILE_DATE = 2021-08-18T19:04:15Z
  STATION_ID = "LGN"
  PROCESSING_SOFTWARE_VERSION = "LPGS_13.1.0"
END_GROUP = METADATA_FILE_INFO
  
```

Nota: descripción de la imagen Landsat.

Tabla 5

Conversión de nomenclatura de datos

POSICION	DESCRIPCION
L	landsat
S	sensor of: O=OLI, T=TIRS, C= Combined TIRS and OLI indicates which sensor collected data for this product
8	landsat mission number

PPP	satelite orbit location in reference to the WRS-2 path of the product
RRR	satelite orbit location in reference to the WRS-2 path of the product
YYY	acquisition year of the image
DDD	acquisition day of year
GGG	ground station ID
VV	version (vv=00-99)
_LOR	designates an LOR product package
.FT	file type, where.FT equais tar (tar" d file), _MD5 equals checksum
.EXT	file extension, where .gz equals gzip compressed, .txt equals text

Nota. Estructura de archivos y datos del LDCM, cuyo formato es similar a la salida de utilidad del tipo HDF Fuente: USGS

La imagen que va a ser utilizada para el estudio está identificada como "LC80090652021219LGN00", y el archivo metadato está identificado como "LC08_L1TP_009065_20210807_20210818_01_T1_MTL.txt", el cual contendrá los coeficientes multiplicativos (resaltados aquí en azul) para cada una de las bandas:

Figura 8

Radiancia original de las bandas

```

LC08_L1TP_009065_20210807_20210818_01_T1_MTL.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
  QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_11 = 1
  END_GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
  GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
  RADIANCE_MULT_BAND_1 = 1.2209E-02
  RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.2502E-02
  RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.1521E-02
  RADIANCE_MULT_BAND_4 = 9.7148E-03
  RADIANCE_MULT_BAND_5 = 5.9450E-03
  RADIANCE_MULT_BAND_6 = 1.4785E-03
  RADIANCE_MULT_BAND_7 = 4.9832E-04
  RADIANCE_MULT_BAND_8 = 1.0994E-02
  RADIANCE_MULT_BAND_9 = 2.3234E-03
  RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.3420E-04
  RADIANCE_MULT_BAND_11 = 3.3420E-04
  
```

Nota: descripción de las bandas de la imagen Landsat

Posteriormente aparecerán los coeficientes aditivos (resaltados nuevamente en azul en la hoja de metadatos,) para cada una de las bandas:

Figura 9

Coefficiente de las bandas

```

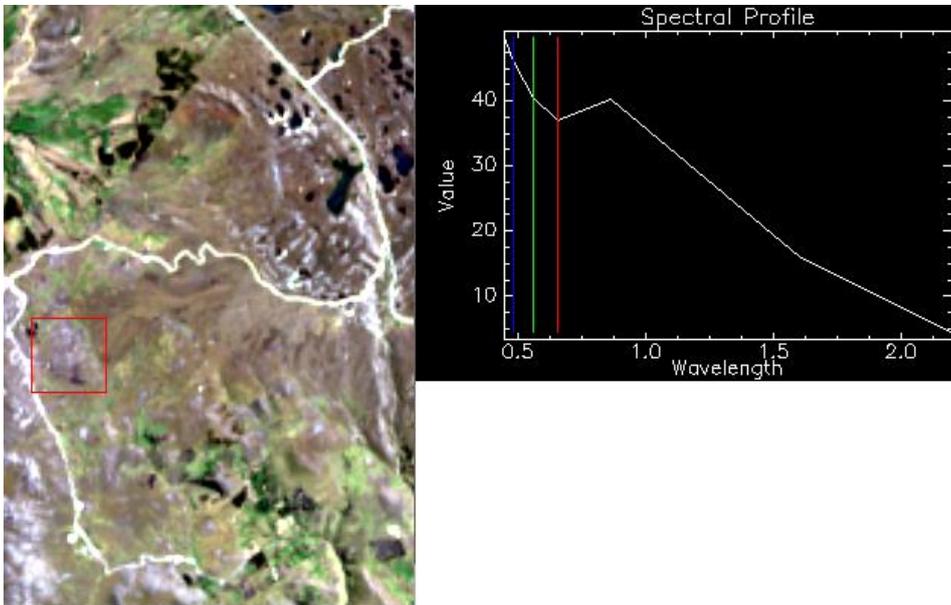
LC08_L1TP_009065_20210807_20210818_01_T1_MTL.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
  RADIANCE_MULT_BAND_7 = 4.9832E-04
  RADIANCE_MULT_BAND_8 = 1.0994E-02
  RADIANCE_MULT_BAND_9 = 2.3234E-03
  RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.3420E-04
  RADIANCE_MULT_BAND_11 = 3.3420E-04
  RADIANCE_ADD_BAND_1 = -61.04453
  RADIANCE_ADD_BAND_2 = -62.51034
  RADIANCE_ADD_BAND_3 = -57.60275
  RADIANCE_ADD_BAND_4 = -48.57388
  RADIANCE_ADD_BAND_5 = -29.72479
  RADIANCE_ADD_BAND_6 = -7.39229
  RADIANCE_ADD_BAND_7 = -2.49160
  RADIANCE_ADD_BAND_8 = -54.97227
  RADIANCE_ADD_BAND_9 = -11.61712
  RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.10000
  RADIANCE_ADD_BAND_11 = 0.10000
  
```

Nota: descripción de los coeficientes de las bandas de la imagen Landsat.

Estos coeficientes son ingresados a la ecuación que se menciona en éste apartado, y por medio del software los valores ND, son convertidos a radianza.

A continuación, se muestra la subescena Landsat 8 con la corrección radiométrica, mostrando una firma espectral en el punto (760935.00E, 9232495.00S), donde se observa en el eje “Y” los valores de radianza, que son muy distintos a los valores DN de la figura 6.

Figura 10
Calibración a radiancia y su firma espectral



Nota: Subescena Landsat 8 en color real con calibración a radiancia con su respectiva firma espectral.

Determinación De La Reflectancia Aparente (Toa) Landsat 8 Con Corrección Angular.

El cálculo de la reflectancia real de una cubierta captada por un sensor espacial está condicionado por el comportamiento de la atmósfera, así como del ángulo de observación.

Se usan los coeficientes de reflectancia suministrados en el archivo de metadatos. El siguiente algoritmo es usado para convertir los niveles digitales a valores de reflectancia:

$$\rho\lambda = \frac{Mp * Qcal + Ap}{SEN(\theta_{SE})} \qquad \rho\lambda = \frac{Mp * Qcal + Ap}{COS(\theta_{ZE})}$$

Donde:

- $\rho\lambda$: Reflectancia TOA del sensor, con corrección del ángulo solar.
- Qcal: Valores de los píxeles de productos estándar cuantifican y calibrados

(ND).

- Mp: Factor de cambio de escala multiplicativo (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de bandas).
- Ap: Banda específica aditivo reescalar el factor de los metadatos (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de bandas).
- θ_{SE} : Ángulo de elevación del sol local. El ángulo de elevación del sol centro de la escena en grados se proporciona en los metadatos (SUN_ELEVATION).
- θ_{SE} : Ángulo zenital solar en grados, el cual es equivalente a: $90^\circ - \theta$, donde

θ_{SE} es la elevación solar.

Los datos de ángulo solar y azimut entre otros, aparecerán incluidos dentro de los atributos de imagen en el archivo de metadato (resaltado en azul):

Figura

11

Coefficiente de reflectancia

```
LC08_L1TP_009065_20210807_20210818_01_T1_MTL.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
BPF_NAME_TIRS = "LT8BPF20210807113125_20210814091950.01"
RLUT_FILE_NAME = "LC08RLUT_20150303_20431231_01_12.h5"
END_GROUP = PRODUCT_METADATA
GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
CLOUD_COVER = 7.67
CLOUD_COVER_LAND = 6.97
IMAGE_QUALITY_OLI = 9
IMAGE_QUALITY_TIRS = 9
TIRS_SSM_MODEL = "FINAL"
TIRS_SSM_POSITION_STATUS = "ESTIMATED"
TIRS_STRAY_LIGHT_CORRECTION_SOURCE = "TIRS"
ROLL_ANGLE = -0.001
SUN_AZIMUTH = 50.88414604
SUN_ELEVATION = 52.65367081
EARTH_SUN_DISTANCE = 1.0141053
SATURATION_BAND_1 = "N"
SATURATION_BAND_2 = "Y"
SATURATION_BAND_3 = "Y"
SATURATION_BAND_4 = "Y"
SATURATION_BAND_5 = "Y"
SATURATION_BAND_6 = "Y"
SATURATION_BAND_7 = "Y"
SATURATION_BAND_8 = "N"
SATURATION_BAND_9 = "N"
GROUND_CONTROL_POINTS_VERSION = 4
```

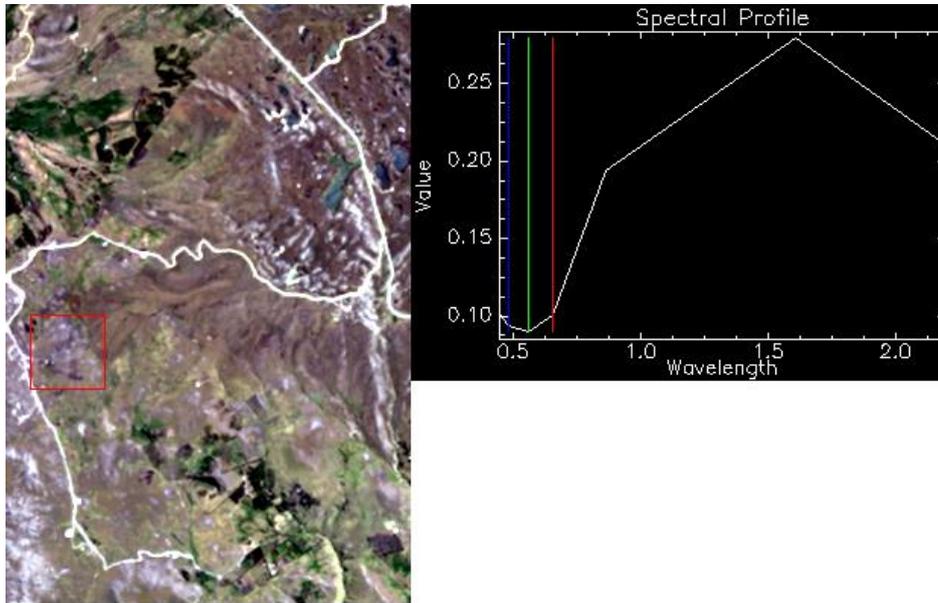
Nota: coeficientes de reflectancia suministrados en el archivo de metadatos.

Éste coeficiente es ingresado a la ecuación que se menciona en éste apartado, y por medio del software los valores de radianza son transformados a reflectancia de tope atmosférico TOA.

A continuación, se muestra la subescena Landsat 8 con la calibración de los valores de radianza a reflectancia TOA, mostrando una firma espectral en el punto (760935.00E, 9232495.00S), donde se observa en el eje “Y” los valores de reflectancia en tanto por 1, que son muy distintos a los valores DN y de radianza de las figuras 6 y 10 respectivamente.

Figura 12

Imagen Landsat 8 en color real con calibración a reflectancia TOA



Nota: Subescena Landsat 8 en color real con calibración a reflectancia TOA con su respectiva firma espectral.

Conversión A La Temperatura De Brillo Superior De La Atmósfera

Los datos de la banda térmica se pueden convertir de radiancia espectral a la temperatura de brillo superior de la atmósfera utilizando las constantes térmicas en el archivo MTL:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_6} + 1\right)}$$

Dónde:

- T = Temperatura de brillo superior de la atmósfera (K) donde:
- L 6 = Radiancia espectral TOA (Watts / (m² * srad * μm))

- K 1 = Constante de conversión térmica específica de banda de los metadatos
(K1_CONSTANT_BAND_x, donde x es la banda térmica número)
- K 2 = constante de conversión térmica específica de la banda de los metadatos
(K2_CONSTANT_BAND_x, donde x es el número de la banda térmica).

Los datos de las constantes térmicas k1 y k2, aparecerán incluidos dentro de los atributos de imagen en el archivo de metadato, tal y como se puede ver resaltado en color azul a continuación para las bandas 10 y 11:

Figura 13

Metadata-coeficientes de las bandas 10 y 11

```

LC08_L1TP_009065_20210807_20210818_01_T1_MTL.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
REFLECTANCE_MULT_BAND_6 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_7 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_8 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_9 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_ADD_BAND_1 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_2 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_3 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_4 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_5 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_6 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_7 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_8 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_9 = -0.100000
END_GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
GROUP = TIRS_THERMAL_CONSTANTS
K1_CONSTANT_BAND_10 = 774.8853
K2_CONSTANT_BAND_10 = 1321.0789
K1_CONSTANT_BAND_11 = 480.8883
K2_CONSTANT_BAND_11 = 1201.1442
END_GROUP = TIRS_THERMAL_CONSTANTS
GROUP = PROJECTION_PARAMETERS
MAP_PROJECTION = "UTM"
DATUM = "WGS84"

```

Nota: descripción de los datos de las bandas 10 y 11 sacados de las imágenes landast-8

Estos coeficientes son ingresados a la ecuación que se menciona en éste apartado, y por medio del software los valores ND de la imagen térmica son transformados a temperatura de brillo en grados kelvin.

Metodología Utilizada Para La Determinación De Las Áreas Con Potencial De Infiltración En La Zona De Estudio

La presencia de aras potenciales de recarga de aguas subterráneas relacionados con la recarga de los acuíferos por las precipitaciones están en función de los aspectos geomorfológicos de una cuenca debido a que solamente las zonas con baja pendiente y bajo relieve topográfico podrán aprovechar mayormente el agua de las precipitaciones, además las zonas donde la vegetación es sana y abundante nos da a entender que existe humedad en el suelo y este factor está en relación directa con el estrés hídrico del suelo.

Además, el estudio de la temperatura superficial es de suma importancia ya que esta nos indica la interacción energética e hídrica que existe entre la atmosfera y la superficie terrestre (Valor y Caselles, 1996; Sobrino, 2000; Rivas y Caselles, 2004), y puede estimarse mediante el uso de sensores remotos que obtengan información en el rango térmico del espectro electromagnético.

Con los datos imágenes Landsat 8, se calcula el índice de agua normalizado en la vegetación (NDWI), el índice de vegetación normalizado (NDVI) y la temperatura del suelo (TS). Los datos imágenes GDEM ASTER se usan para obtener el modelo de pendiente (PEN) del área de estudio, para el presente estudio se procedió a realizar el tratamiento digital de la subescena de la imagen Landsat 8 seleccionada para cada cuenca para lo cual se realizó el cálculo los siguientes parámetros.

Calculo Del NDWI (Índice Normalizado De Agua En La Vegetación y el Suelo).

Es un índice importante para evaluar el estrés hídrico del suelo y la vegetación y está relacionado con la cantidad de agua en la vegetación y las variaciones de la humedad de suelo que producen cambios significativos en el balance energético de la

superficie y en el vigor de la vegetación, estos se encuentran directamente relacionado con la estimación del estrés hídrico.

Las variaciones de humedad en el suelo producen cambios relevantes en el vigor de la biomasa vegetal y en el balance energético de una cuenca y están relacionados con el estrés hídrico.

La disponibilidad de agua del sistema hidrológico e hidrogeológico puede ser estimado a nivel regional por medio del uso de sensores remotos para obtener la variabilidad y la distribución del agua en la superficie de una cuenca, lo que nos va a identificar la disponibilidad hídrica entre el límite seco y el límite húmedo en una cuenca (Fensholt & Sandholt, 2003).

El NDWI es un índice que se ha empleado en diversos estudios para determinar la humedad del suelo y de la vegetación; Sánchez-Ruíz et al. (2014) demostraron que la viabilidad de los índices con la banda SWIR para desglosar observaciones humedad del suelo y vegetación es debido a los efectos de absorción de agua en la banda B5 (1.6090 micrómetros), por estas coberturas.

Este índice es calculado a partir de las bandas del infrarrojo cercano del sensor Landsat 8 (B5, 0.8646 micrómetros) y el infrarrojo medio del sensor Landsat 8 (B6, 1.6090 micrómetros m).

Este índice oscila entre -1 y 1, donde los valores mayores a 0 se relacionan con la presencia de agua en la vegetación y el suelo (Gao, 1996). La ecuación que determina el NDWI relacionando las bandas espectrales del sensor Landsat 8 es la siguiente:

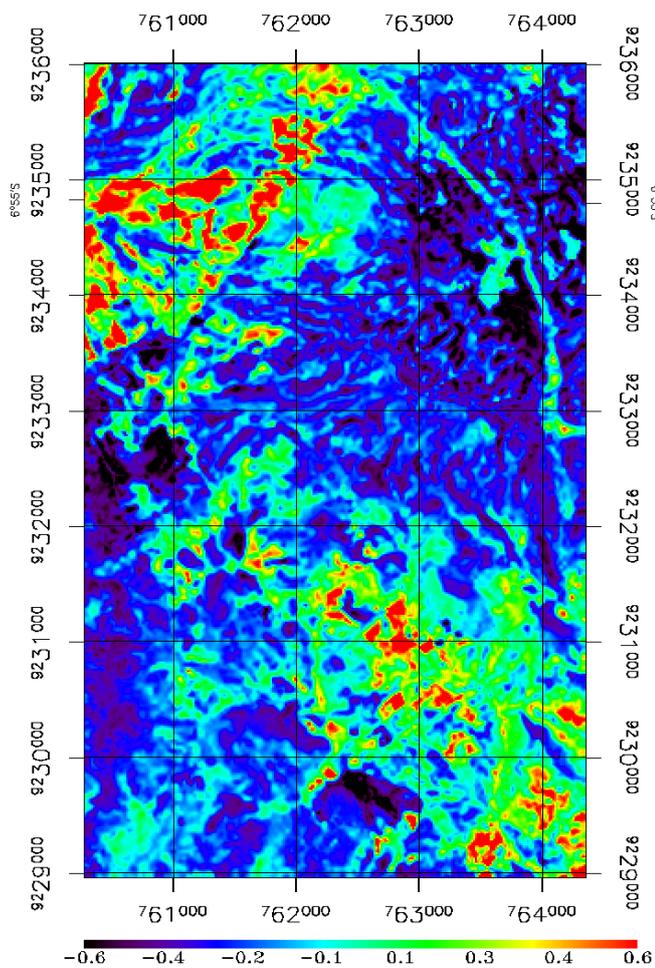
$$NDWI = (B5 - B6) / (B5 + B6)$$

Donde:

- NDWI: INDICE NORMALIZADO DE AGUA EN LA VEGETACION Y EL SUELO.
- B5: Banda 5 del satélite Landsat 8 de longitud de onda 0.8646 micrómetros.
- B6: Banda 6 del satélite Landsat 8 de longitud de onda 1.6090 micrómetros.

Figura 14

Valores del NDWI



Nota: distribución de los valores del ndwi en escala de colores donde los valores más altos de humedad en el suelo y la vegetación son mayores a 0.

Análisis del ndwi

En la figura 14, se puede observar la distribución del NDWI que va en un amplio rango de valores, desde -0.6 hasta 0.6, cuya interpretación se muestra en la tabla n° 6

Tabla 6

Valores de clasificación NDWI

VALORES	RANGOS	INTERPRETACIÓN
Muy altos	0.35 – 0.6 (amarillo – rojo)	Alta captación de humedad por parte de la vegetación saludable y el suelo.
Altos	0.1 – 0.35 (verde)	Captación de humedad por parte de la vegetación saludable y el suelo, menor cantidad de biomasa vegetal.
Medios	0 – 0.1 (cian)	Poca captación de humedad por parte de la vegetación saludable y el suelo, escasa cantidad de biomasa vegetal.
Bajos	-0.4 – 0 (azul)	Suelo con escasa captación de humedad.
Muy bajos	-0.6 a -0.4 (magenta, negro)	Suelos totalmente secos.

Nota. Distribución del NDWI que va en un amplio rango de valores, desde -0.6 hasta 0.6

Un alto valor de NDWI es consecuencia de una mayor reflectancia en la banda del infrarrojo cercano B5 (0.8646 micrómetros), que en la banda del infrarrojo medio B6 (1.6090 micrómetros), esto indica cantidades suficientes de agua en el dosel para la actividad fotosintética y, por lo tanto, vegetación verde y saludable. Por el contrario, un valor negativo indica estrés en la vegetación, vegetación seca o suelo desnudo.

A partir de la figura 14 y la tabla 6, se puede observar que las áreas con alta captación de humedad están relacionadas con suelos húmedos donde se desarrolla vegetación saludable, y están relacionados con valores del NDWI comprendidos en rangos que van desde 0.1 a los 0.6.

Cálculo Del Ndvi (Índice Normalizado De Vegetación).

El Ndvi es un parámetro que nos permite estimar el buen estado de salud y la densidad de una cubierta vegetal, el cual está altamente relacionado con el porcentaje de humedad del suelo, y es de fácil evaluación por medio de sensores remotos que detectan la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja.

Este índice puede proporcionar una mejor información sobre el estrés hídrico de la vegetación y las condiciones de humedad en el suelo (*Sandholt et al., 2002; Carlson, 2007*).

La vegetación absorbe radiación solar en la región espectral de radiación fotosintética activa, la cual es usada como fuente de energía en el proceso de fotosíntesis. Las células vegetales dispersan la radiación solar en la región espectral del infrarrojo cercano (B5 del sensor Landsat 8 de 0.86 micrómetros), por lo tanto, la

vegetación aparece brillante en el infrarrojo cercano, pero absorbe la radiación en la región del espectro visible de la banda B4 del sensor Landsat 8 (0.56 micrómetros).

Este índice es calculado a partir de las bandas del infrarrojo cercano del sensor Landsat 8 (B5, 760-900 nm) y la banda B4 del espectro visible del sensor Landsat 8 (B4, 560 nm).

Este índice oscila entre -1 y 1, donde los valores mayores a 0.3 se relacionan con la vegetación vigorosa, húmeda y sana, los índices cercanos a 0 se relacionan con los suelos desnudos provistos de vegetación pobre. La ecuación que determina el NDVI relacionando las bandas espectrales del sensor Landsat 8 es la siguiente:

$$\text{NDVI} = (\text{B5} - \text{B4}) / (\text{B5} + \text{B4})$$

Donde:

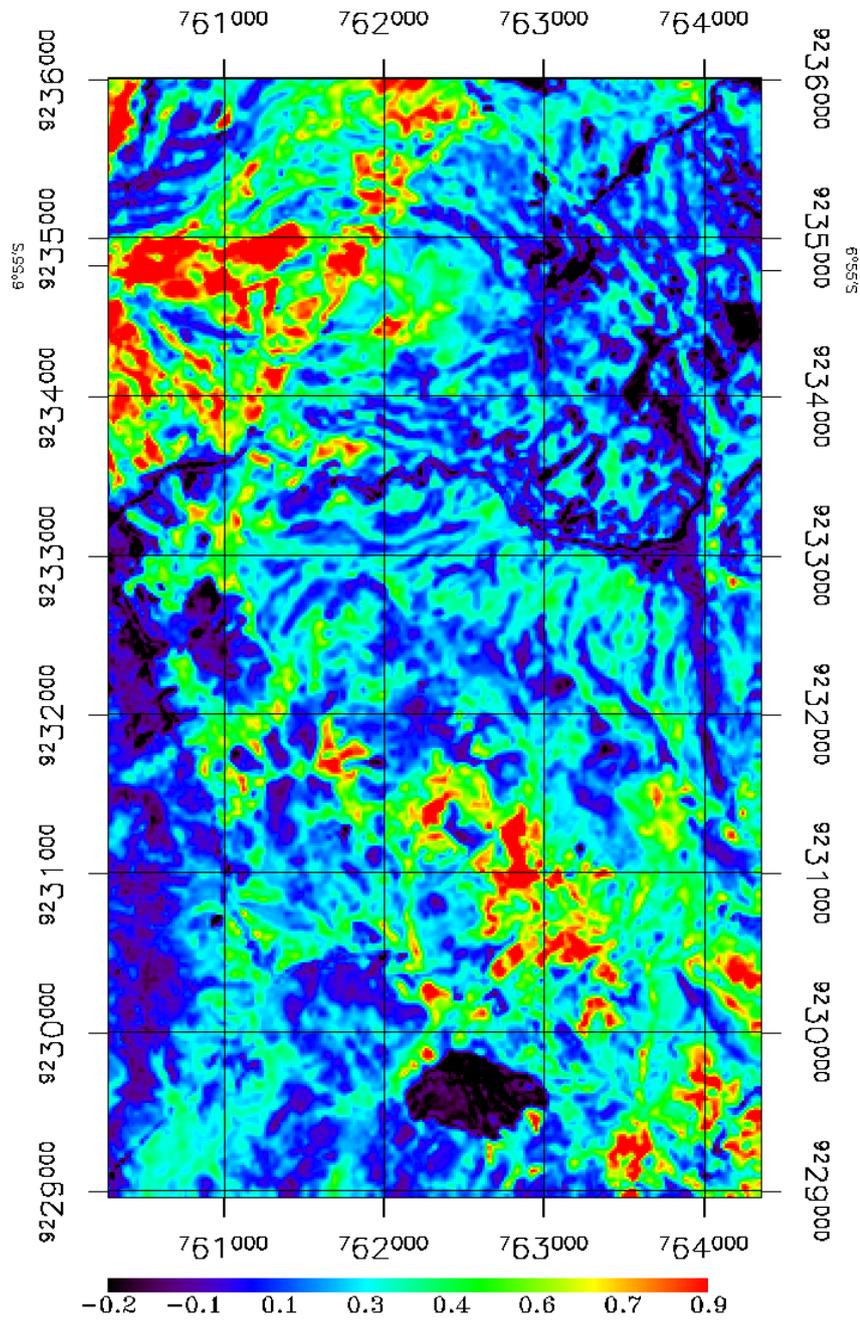
NDVI: índice normalizado de la vegetación.

B5: Banda 5 del satélite Landsat 8 de longitud de onda 0.8646 micrómetros.

B4: Banda 4 del satélite Landsat 8 de longitud de onda 0.5613 micrómetros.

Figura 15

Valores del NDVI



Nota: distribución de los valores del NDVI en escala de colores donde se muestra la vegetación abundante y vigorosa en valores mayores a 0.5.

Análisis del NDVI

En la figura 15 se puede observar la distribución del NDVI que va en un amplio rango de valores, desde -0.2 hasta 0.9, cuya interpretación se muestra en la tabla 7:

Tabla 7
Valores de clasificación del NDVI

VALORES	RANGOS	INTERPRETACIÓN
Muy altos	0.65 – 0.9 (amarillo – rojo)	Alta cobertura vegetal, vegetación vigorosa y sana.
Altos	0.35 – 0.65 (verde)	Cobertura vegetal vigorosa y sana.
Medios	0.15 – 0.35 (cian)	Poca cobertura vegetal, mayor presencia de suelos desnudos.
Bajos	0 – 0.15 (azul)	Suelos con escasa cobertura vegetal.
Muy bajos	-0.2 a 0 (magenta, negro)	Suelos, rocas sin presencia de cobertura vegetal, presencia de cuerpos de agua.

Nota. Distribución del NDVI que va en un amplio rango de valores, desde -0.2 hasta 0.9

Es básico en teledetección que la relación entre las bandas del infrarrojo cercano y el rojo constituyen un test de comprobación del vigor de la vegetación o, por el

contrario, su débil vitalidad, un alto valor de NDVI es consecuencia de una mayor reflectancia en la banda del infrarrojo cercano B5 (0.8646 micrómetros), que en la banda del rojo B4 (0.5613 micrómetros), esto indica altas densidades de biomasa vegetal verde y saludable en el suelo, por el contrario, un valor negativo indica ausencia de vegetación, vegetación seca o suelo desnudo.

A partir de la figura 15 y la tabla 3, se puede observar que las áreas con alta densidad de vegetación saludable están relacionadas con valores del NDVI comprendidos en rangos que van desde 0.35 a los 0.9, y su desarrollo está relacionado directamente con una mayor disponibilidad de agua en el suelo incluso en época seca.

3.3 CALCULO DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL SUELO.

La temperatura superficial es un importante parámetro que controla la dinámica energética e hídrica entre la atmósfera y la superficie terrestre y se define como la energía térmica de onda larga que es emitida desde la superficie terrestre (Valor y Caselles, 1996; Sobrino, 2000; Rivas y Caselles, 2004).

La temperatura superficial está en función directa con el estrés hídrico del suelo y el contenido de humedad de la vegetación y la evaluación de su distribución en la superficie nos brinda una herramienta importante para conocer las superficies con mayor contenido de humedad con relación a las superficies con mayor estrés hídrico.

Se utilizó la Banda B10 del sensor Landsat 8 (10,31 μ m – 12,36 μ m), la cual registra la radianza emitida por la superficie terrestre con una resolución de 60 m. La temperatura de brillo en función de la radiancia espectral registrada por la banda 6 del sensor Landsat 8 nos determina la temperatura superficial en el tope atmosférico de la superficie del suelo.

Teniendo en cuenta que el área de estudio está en una zona tropical, se utilizó la imagen de la banda térmica de alta ganancia (Barsi et al., 2003), posteriormente la imagen es remuestreada de 60 m a 15 m para analizarla en forma conjunta con las imágenes de las demás bandas del sensor Landsat 8.

A partir de los datos de las bandas térmicas de las imágenes satelitales Landsat 8, los niveles digitales del sensor se convirtieron a radiancia espectral usando las siguientes ecuaciones:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_6} + 1\right)}$$

Dónde:

- T = Temperatura de brillo superior de la atmósfera (K) donde:
- L 6 = Radiancia espectral TOA (Watts / (m² * srad * μm))
- K 1 = Constante de conversión térmica específica de banda de los metadatos (K1_CONSTANT_BAND_x, donde x es la banda térmica número)
- K 2 = constante de conversión térmica específica de la banda de los metadatos (K2_CONSTANT_BAND_x, donde x es el número de la banda térmica).

A continuación, se muestran las constantes de calibración de las bandas térmicas de las imágenes satelitales Landsat 8, utilizadas en el presente estudio:

Tabla 8

Constantes de calibración de las bandas térmicas de las imágenes Landsat-8

SATÉLITE	BANDAS	K1 ((W/m- 2/sr-1/μm-1)	K2 (Kelvin)
----------	--------	---------------------------	-------------

Landsat	B10	774.89	1321.08
8			
Landsat	B11	480.89	1201.14
8			

Nota. Constante de calibración en el cual se observa las diferentes temperaturas en la zona de estudio.

Los resultados del proceso de calibración fueron resueltos por el software Envi 5.3, obteniendo la imagen de la Figura 17, en el cual se observa la distribución de los diferentes niveles de temperatura en la zona de estudio para la fecha determinada.

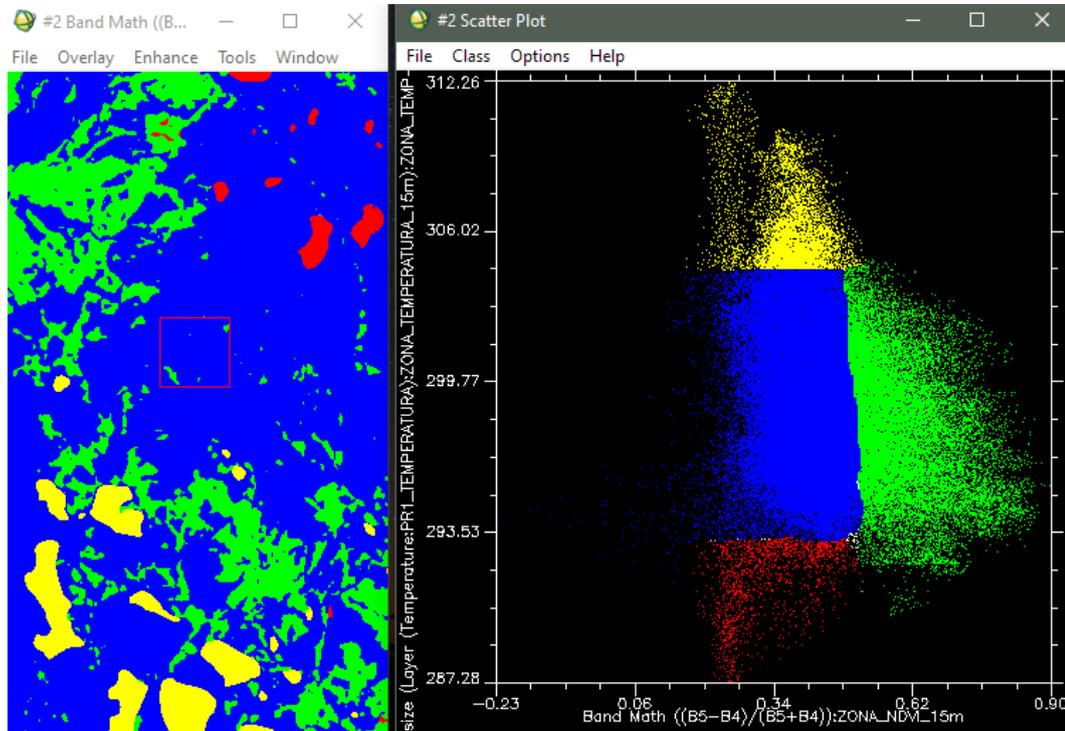
Análisis de la temperatura superficial

Para el caso en estudio se realizó un análisis de la banda térmica sobre las diferentes cubiertas, se realizó un análisis bidimensional o dispersograma entre la imagen de temperatura con respecto a la imagen del NDVI, para determinar la correlación de los diferentes pixeles que representan los valores de la temperatura superficial y los pixeles que representan los valores del NDVI, para determinar los rangos de temperatura en grados kelvin de las diferentes cubiertas ,que van a ser utilizados para la clasificación por árbol de decisiones.

A continuación, se muestra la captura de pantalla, donde se observa en la imagen de la parte derecha el dispersograma en cuyo eje “X” se muestran los valores de los pixeles que corresponden al NDVI y en el eje “Y” los valores de los pixeles que corresponden a la imagen de la temperatura superficial. En la imagen de la izquierda se observan los pixeles seleccionados en el dispersograma que corresponden a las temperaturas que tienen las diferentes cubiertas.

Figura 16

Dispersograma del NDVI vs TS

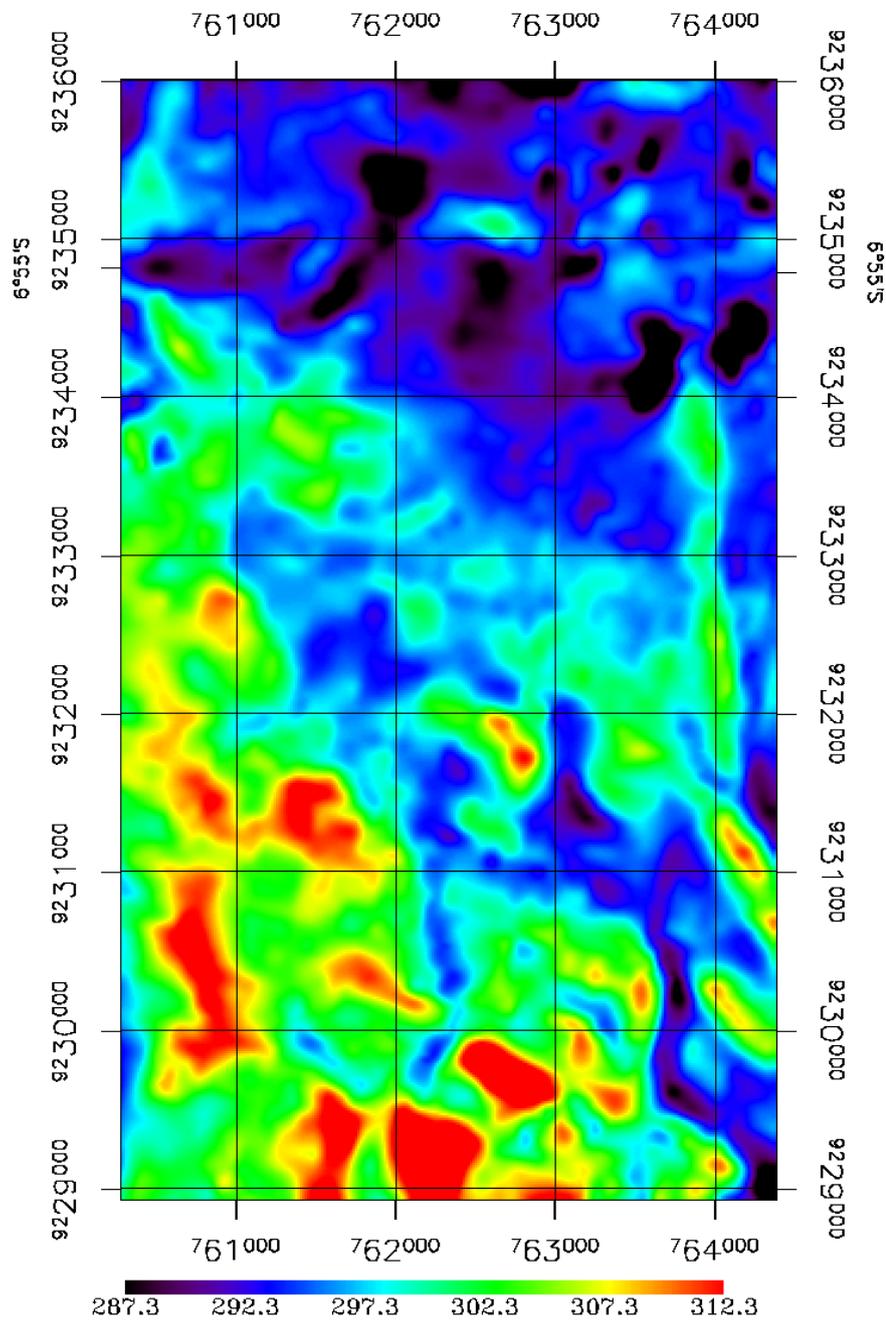


Nota: Color rojo, cuerpos de agua cuyos rangos de temperatura están entre 287 y 293 K. Color verde, vegetación cuyos rangos de temperatura están entre los 293 y 308 K. Color azul, suelo desnudo cuyos rangos de temperatura son superiores a los 298 K y menores a 308 K. Color amarillo, afloramientos rocosos cuyos rangos de temperatura son superiores a 306 K.

A continuación, se muestra la imagen térmica, donde se muestran los diferentes rangos de temperatura:

Figura 17

Distribución de los valores de la temperatura superficial



Nota: distribución de los valores de la temperatura superficial de la zona de estudio en escala de colores.

En la figura 17, se puede observar la distribución de la temperatura superficial en rangos que van desde los 287 K hasta los 312 k en la escala de colores., y se pudo observar que los afloramientos rocosos oscilan entre un rango de temperatura mayor a los 308 k (tonalidades amarillo rojizas), mientras la vegetación se muestra en rangos entre los 308 k y los 298 k (tonalidades verde y cian), mientras que las zonas más frías de la subescena están relacionados a la cercanía con los cuerpos de agua, con temperaturas que oscilan entre los 298 k y los 287 k. Las zonas de interés hidrogeológico van en los rangos de temperatura inferiores al 298 k que en la escala de colores presentan tonalidades azuladas y negras en la subescena.

3.4 CALCULO DE LAS PENDIENTES A PARTIR DEL GDEM ASTER.

Se construyó el modelo digital de elevación por medio de las Bandas 3N y 3B (estereoscópica) de una imagen satelital ASTER GDEM de la zona de estudio con una resolución espacial de 15 m, la misma resolución espacial de las imágenes del satélite Landsat 8.

El modelo digital de elevación ASTER GDEM de la de la zona de estudio utiliza las alturas con respecto al nivel del mar con una resolución espacial de 30 m, la misma resolución espacial de las imágenes mutiespectrales Landsat 8. Posteriormente con las alturas representadas en cada pixel se construyó un modelo de pendientes para cada cuenca usando el software ENVI 5.3.

La pendiente es el valor de la inclinación de la superficie con respecto a la horizontal y se mide en grados sexagesimales.

Para efectos del estudio se evaluarán únicamente las pendientes menores a 5 grados para las zonas con interés hidrogeológico, ya que estas son las que tienen una

potencialidad de retener el agua de las precipitaciones permitiendo la infiltración potencial antes que la escorrentía superficial.

Para determinar los valores de las pendientes y su relación con la geomorfología del terreno, se tomó como base los modelos fisiográficos de pendientes elaborados por el MINAM, tomados y elaborados por la empresa WALASH Perú, quien hace una clasificación de geoformas en función a la pendiente tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 9
Formas de relieve en función al grado de pendiente

FORMAS DE RELIEVE		PENDIENTE S (%)
PLANICIES DE VALLE	fondos de valle planos	0-4
	fondos de valle inclinados	4-8
	fondos de valle glaciales planos	0-4
	fondos de valle glaciales inclinados	4-8
LADERAS POCO ACCIDENTADAS	altiplanicies onduladas	8-15
	laderas montañosas ligeramente empinadas	15-25
LADERAS ACCIDENTADAS	laderas montañosas moderadamente empinadas	25-45

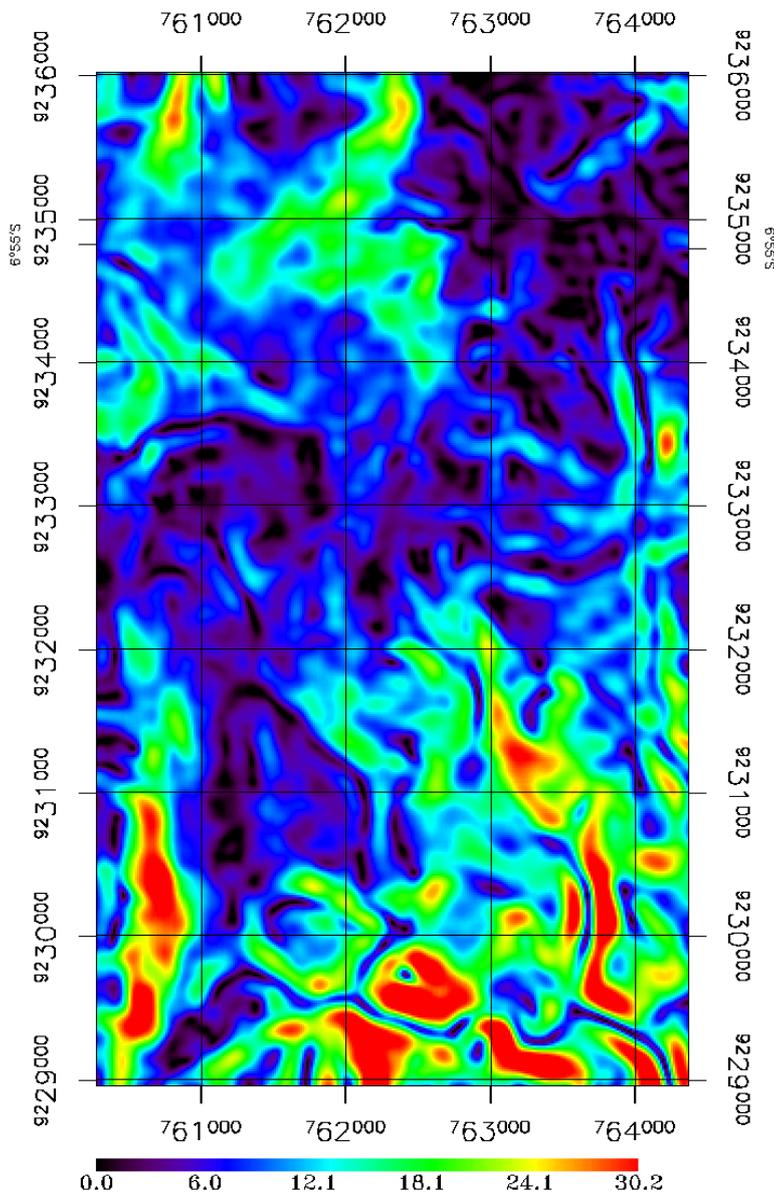
laderas montañosas >45
empinadas a escarpadas

Nota. Valores de las pendientes y su relación con la geomorfología del terreno Fuente: elaborado por Walsh Perú S.A. 2015

A continuación, se muestra el mapa de pendientes construido a partir del DEM Aster:

Figura 18

Distribución de los valores de la pendiente



Nota: distribución de los valores de la pendiente de terreno de la zona de estudio (grados sexagesimales) en escala de colores.

Análisis de las pendientes del terreno

De la figura 18, se puede observar que la distribución de las pendientes va desde los 0° sexagesimales hasta los 30° sexagesimales aproximadamente. Se realizó un análisis del mapa de pendientes con respecto a los mapas de NDVI, y se pudo observar que los afloramientos rocosos oscilan entre un rango de pendientes mayor a los 12° (tonalidades del cian al rojo en la escala de colores), la vegetación se encuentra en rangos de pendiente menores a 5° (zonas potenciales de infiltración) y en otras zonas mayores a 5° (unidades hidrogeológicas húmedas de pendiente moderada), las zonas de interés hidrogeológico son las dominadas por pendientes menores a 5° se pueden observar con tonalidades azules y oscuras en el mapa de pendientes.

Haga clic o pulse aquí para escribir texto.

3.5. Aspectos Generales

3.5.1 Ubicación Geográfica y Política

El área de estudio se encuentra ubicada en la Región Cajamarca, provincia de San Pablo, distrito de Tumbadén, Caserío Ayaviri entre los 3,500 y 4,000 m.s.n.m a una distancia de 47 km y 1 hora 40 minutos aproximadamente de la ciudad de Cajamarca, el área está ubicada en la ecorregión Jalca. Con una extensión de 9,720 km², enmarcada en la zona 17S con Datum WGS84, comprendida entre las siguientes coordenadas referenciales. (Ver tabla n°10)

Tabla 10 *Haga clic o pulse aquí para escribir texto.*
Coordenadas de la zona de estudio

Vértice	Norte	Este
1	9236000	760300

“prospección de aguas subterráneas usando imágenes landsat y áster, en el caserío ayaviri, distrito tumbaden, san pablo, cajamarca 2021”

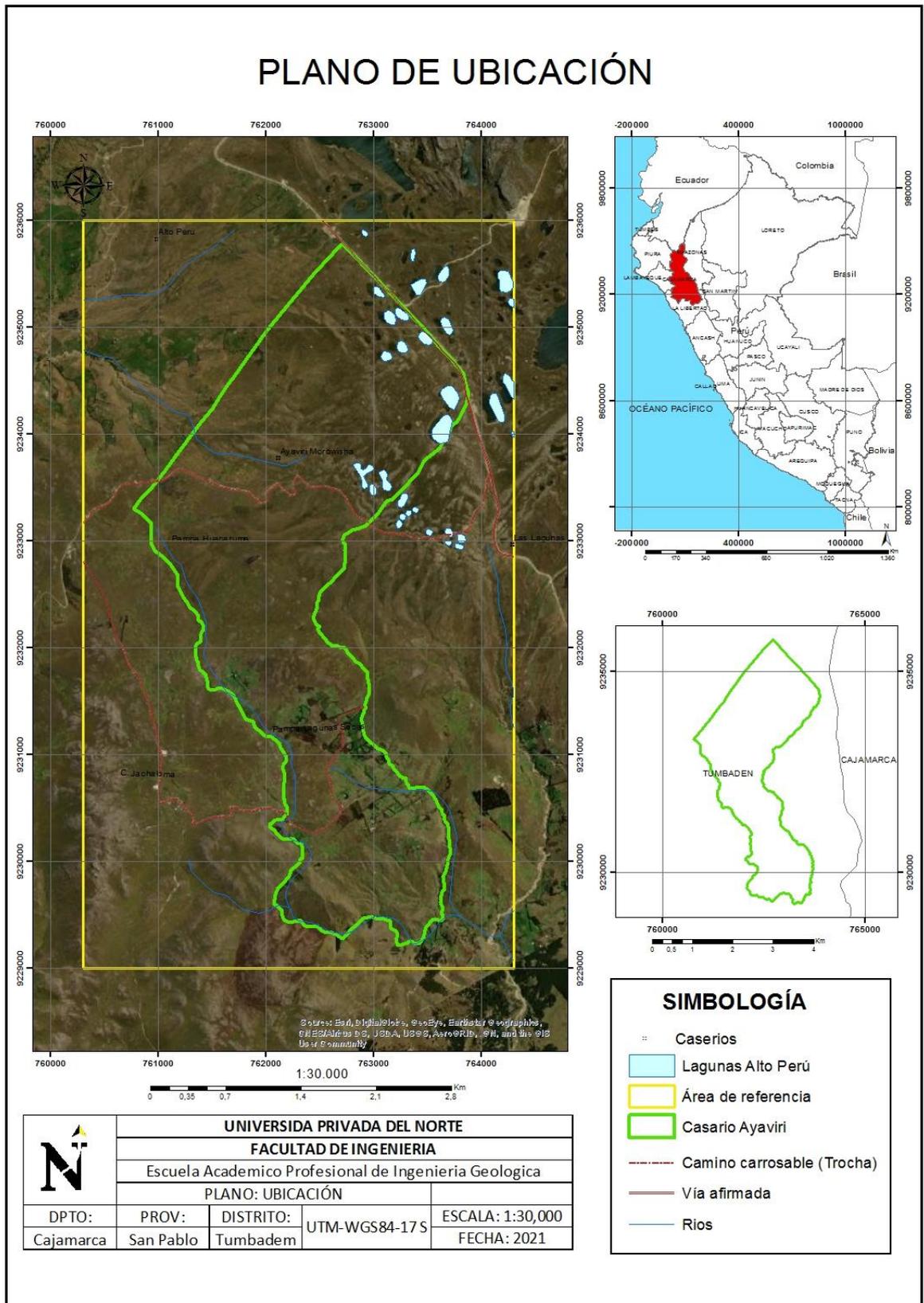
2	9236000	764300
3	9229000	760300
4	9229000	764300

Nota: Coordenadas referenciales UTM-WGS84. 17S Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 19

Plano de ubicación de la zona de estudio

PLANO DE UBICACIÓN



3.1.2 Accesibilidad

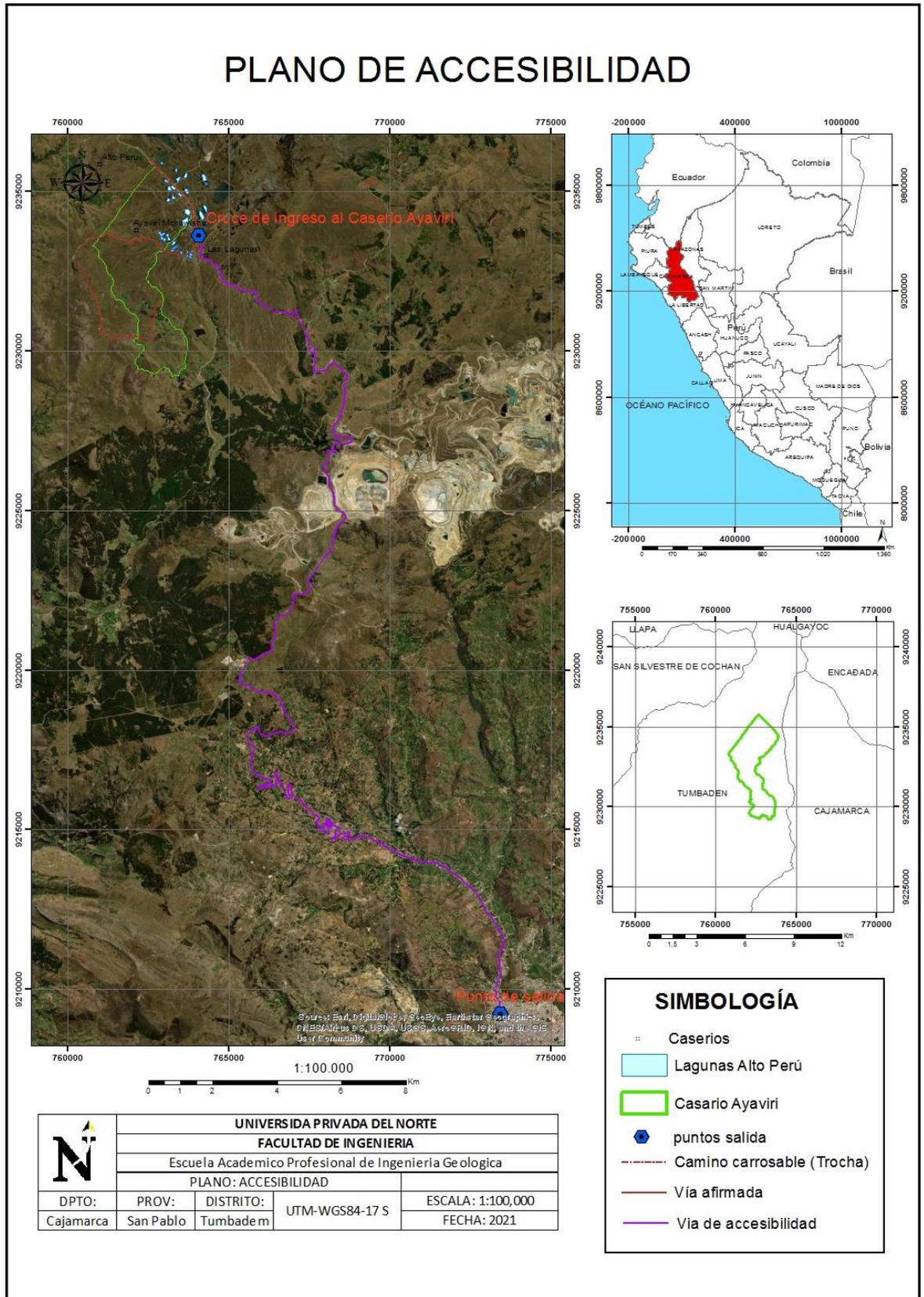
El acceso al área de estudio es mediante dos tipos de carretera afirmada y carrozable (trocha), cuenta con una sola vía de acceso.

Este acceso es a través de la carretera a Bambamarca a una distancia de 47 km con un tiempo de y 1 hora 40 minutos aproximadamente de la ciudad de Cajamarca (grifo continental). Luego se continua por la trochas de la carretera a Tumbaden.

Figura 20

Plano de la accesibilidad a la zona de estudio

PLANO DE ACCESIBILIDAD



3.1.3 Clima

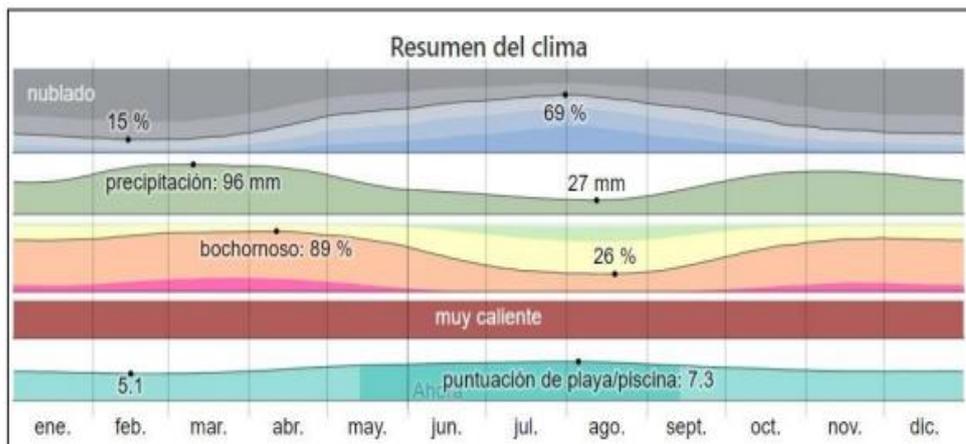
Temperatura

En el distrito de Tumbadén, provincia de San Pablo los veranos son cortos, muy calientes, húmedo y parcialmente nublados y los inviernos son calientes, mojados y mayormente nublados. Durante el transcurso de todo el año, la temperatura generalmente varía de 21 C° a 35 C° y rara vez baja a menos de 20 C° o sube a más de 37C.

Desde mediados de mayo hasta mediados de setiembre la zona de estudio presenta un clima de intensas lluvias y la presencia de vegetación en casi su totalidad, presenta una altura máxima de 3400 m.s.n.m y mínima de 3100 m.s.n.m.

Figura 21

Temperatura anual de Ayaviri-Tumbaden



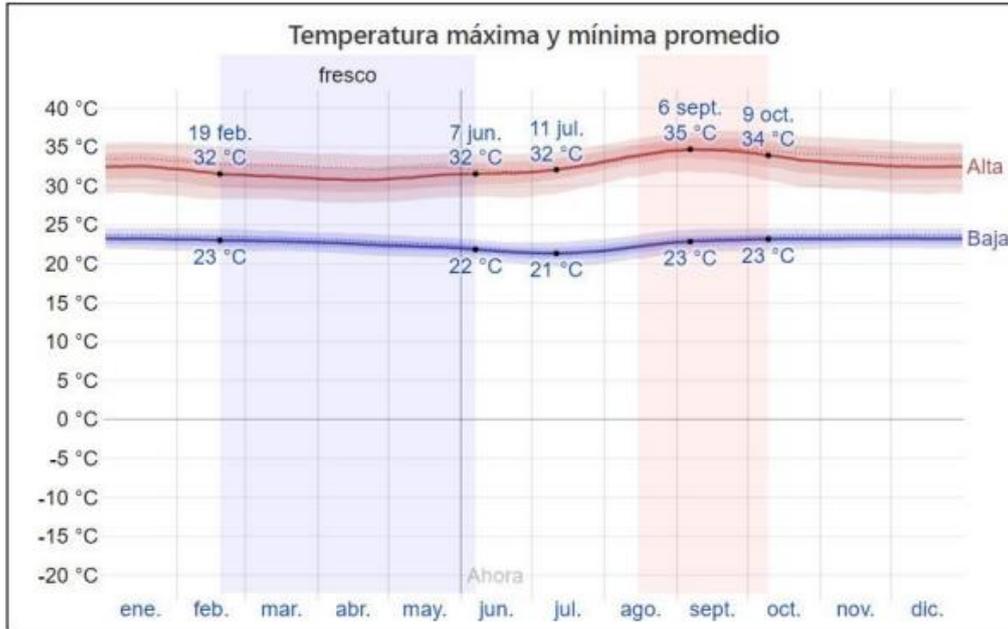
Nota: Temperatura Tumbaden – San Pablo. Fuente: SENAMHI, 2021

La temporada calurosa dura 1,8 meses, de 15 de agosto al 9 de octubre, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 34 C°. La temporada fresca dura 3 a 6 meses, de febrero a junio y la temperatura máxima promedio diaria es menos de 32 C°.

Los días más fríos y lluviosos es en el mes de julio con una temperatura mínima de 21 C°.

Figura 22

Temperatura máxima y mínima promedio de Ayaviri-Tumbaden



Nota: Temperatura, Tumbaden San Pablo. Fuente: SENAMHI, 2016

Precipitación

Un día mojado es un día por con lo menos 1 milímetro de líquido o precipitación equivalente a líquido. La probabilidad de días mojados en San Pablo varía durante el año. La temporada más mojada dura 7,5 meses de setiembre a mayo, con una probabilidad de más del 28% de que cierto día será un día mojado. La probabilidad máxima de un día mojado es del 42% en marzo. La temporada más seca dura 4 a 5 meses de mayo a setiembre donde la probabilidad minina de un día mojado es del 14% en la segunda semana de agosto. Entre los días mojados, distinguimos entre los que tienen solamente lluvia, solamente nieve o una combinación de las dos. En base a esta

categorización el tipo más común de precipitación durante el año es solo lluvia con una probabilidad máxima de 42% en el mes de marzo.

Figura 23

Precipitación mensual



Nota: Precipitaciones mensuales, Tumbaden San Pablo. Fuente: SENAMHI, 2016

Lluvia

Para mostrar la variación durante un mes y no solamente los totales mensuales, mostramos la precipitación de lluvia acumulada durante un periodo de 31 días centrado alrededor de cada día del año. Tumbaden tiene una variación considerable de lluvias mensuales por estaciones. Lluvia durante todo el año, pero los meses de más lluvia es en el mes de marzo, con una acumulación total promedio de 96 milímetros. La fecha aproximada con la menor cantidad

De lluvia es en el mes agosto, con una acumulación total promedio de 27 milímetros.

Figura 24

Precipitación promedio mensual de la lluvia



Nota: Lluvias mensuales, Tumbaden, San Pablo. Fuente: SENAMHI, 2016

3.1.4 Flora y Fauna

El área de estudio presenta una vegetación variada: ichu, quinuales, pinos entre otros. La vegetación herbácea es la predominante y junto a los suelos andosoles típicos de este espacio aportan servicios ambientales importantes. En las partes altas, asociados a roquedales, se encuentran estratos de plantas inferiores como musgos y helechos. El uso de la tierra se desarrolla una agricultura temporal (en época de lluvia), en donde se encuentra también el sembrío de papas, ollucos, ocas, mashua, etc.

Fauna

El Caserío de Ayaviri en muy diverso es el hábitat de una variedad de animales silvestres como aves (en la actualidad existes variedad de aves que han migrado, el 70% está representado por aves), entre las cuales destacan las especies *Zonotrichia capensis* (gorrión americano), *Catamenia anales* (semillerito colifajeado) y *Thraupis bonariensis* (Tangara azulamarillo), águilas, colibrí negro, patos de la puna, truchas arcoíris, sapos, pájaro carpintero andino, venados, zorros, roedores entre otros.

Figura 25

Fauna de la zona de estudio

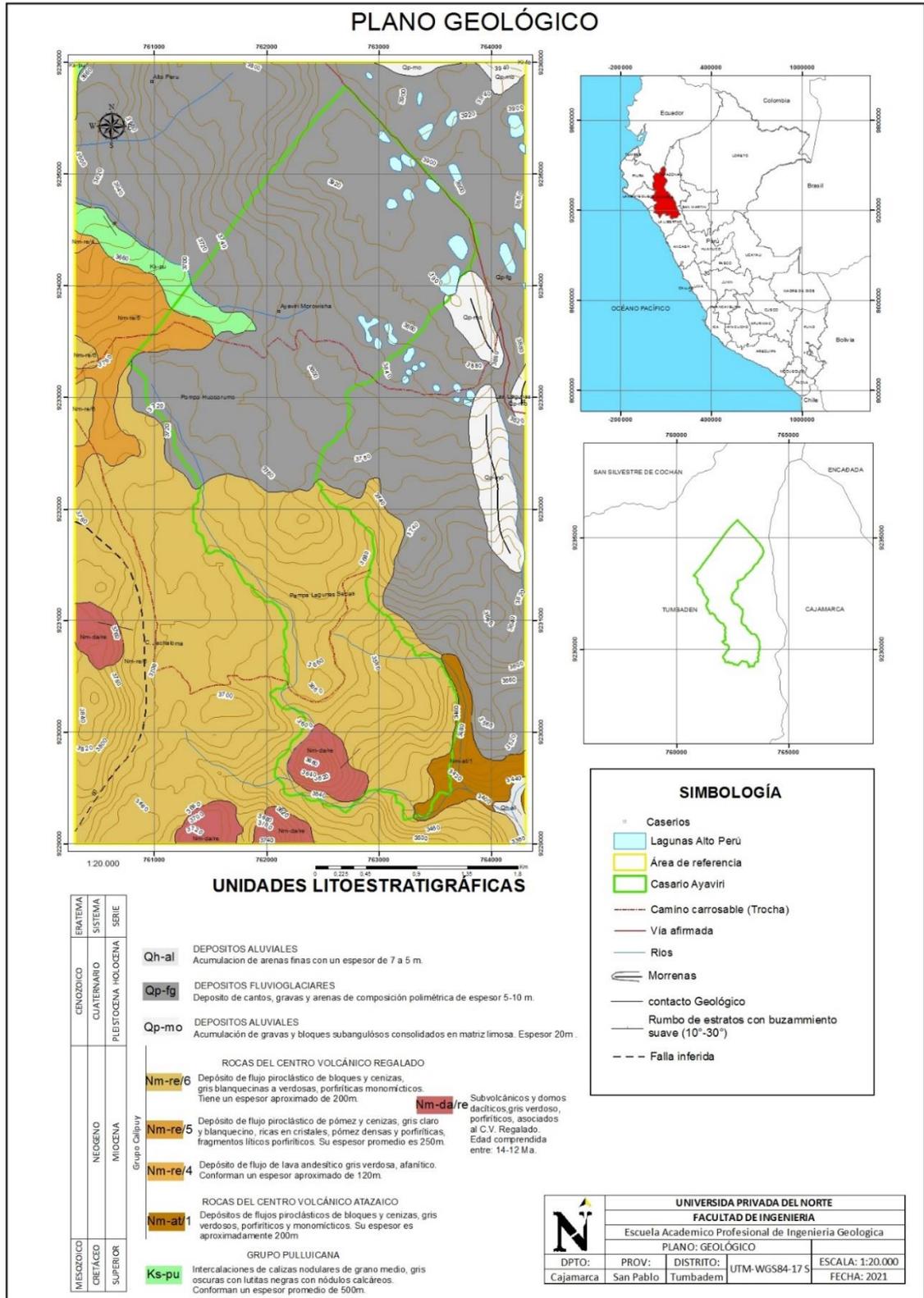


Nota: la fauna de la zona de estudio es diversa entre ellas está el pato de la puna de ello deriva y toma el nombre una de las 284 lagunas, conocida como la “laguna los patos”.

3.1.5 Geología

La zona de estudio está emplazado dentro de volcánicos terciarios del Grupo Calipuy. Se encuentra dentro de los complejos de pilas volcánicas e intrusivas del Cenozoico y rocas sedimentarias del Mesozoico de la fosa tectónica occidental peruana. Una secuencia delgada de lavas andesitas muy viscosas cubren principalmente las zonas de depresiones y sobreyacen a las rocas del Complejo Volcánico Yanacocha (Está constituido por rocas piroclásticos y flujo de lavas de composición andesítica). Estos flujos de probable origen fisural son correlacionados con los Volcánicos Regalado

Figura 26
Plano Geológico



Depósitos Aluviales (Qh-al)

Acumulación de arenas finas con un espesor de 7.5m.

Depósitos fluvioglaciares (Qp-fg)

Depósitos de cantos, gravas y arenas de composición polimétrica de espesor 5-10m.

Figura 27

Depósito fluvioglacial



Nota: Depósitos morrénicos y abanicos fluvio-glaciares. Vista panorámica de bloques con superficies planas formadas por la erosión glacial y Bloque con muchas estrías labradas por la erosión glacial

Depósitos aluviales

Acumulación de gravas y bloques subangulosos consolidados en matriz limosa, espesor de 20m.

Grupo Calipuy

Rocas de centro volcánico regalado

Nm -re/6: depósitos de flujo piroclásticos de bloques y cenizas, gris blanquecinas a verdosas, porfirítica monolíticos, tienen un espesor aproximado de 200m.

Nm-re/5: depósitos de flujo piroclásticos de pómez y cenizas, gris claro y blanquecino, ricas en cristales, pómez densas y porfirítica, fragmentos líticos porfirítica. Su espesor promedio es 250m.

Nm-re/4: depósitos de flujo de lava andesítica gris verdosa, afanítico. Conforman un espesor aproximando de 120m.

Nm-da/re: Subvolcánicos y domos dacíticos, gris verdoso, porfirítica, asociados al C.V Regalado. Edad comprendida entre: 14-12 Ma.

Figura 28

Muestra de mano con textura porfirítica



Nota: Roca de textura porfirítica- Molde preexistente de plagioclasas

Rocas del centro volcánico atazaico

Nm-at/1: depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, gris, verdosos, porfiríticos y monomícticos. Su espesor aproximando 200m.

Grupo Pulluicana

Ks-pu: intercalaciones de cenizas nodulares de grano medio, gris oscuras con lutitas negras con nódulos calcáreos. Conforman un espesor de 500m.

Figura 29

Muestra de caliza



Nota: caliza con presencia con betillas de calcita, con contenido de micrita y esparita.

3.1.6. Hidrogeología

En el área de estudio está determinado por ríos, quebradas, lagunas y manantiales, bofedales. La parte alta del Caserío Ayaviri conforma parte de las lagunas de Alto Perú conocida como Jalca por ser una zona ecológica más alta por su vegetación típica, textura, relieve y calidad de suelos cumple la función de captación y almacenamiento de aguas ya sea de lluvia, granizo y neblina.

Cuenta con un ecosistema preciado constituido un complejo de 284 lagunas permanentes y 784 cuerpos de agua en temporada de lluvia. Este complejo es el nacimiento de la cabecera de cuenta del río Llaucano, Marañón cajamarquino y del Jequetepeque.

La captación y almacenamiento de agua se logra a través de grandes superficies de humedales, los cuales vienen a ser sistemas con gran capacidad biogénica y muy esenciales para la dinámica de las microcuencas, que vierten sus aguas hacia las partes bajas, donde un gran número de pobladores de los diferentes caseríos dependen del recurso hídrico, para desarrollar sus actividades agrícolas, pecuarias, acuícolas, hidroenergéticas y de autoconsumo. El ecosistema del área brinda importantes servicios de provisión de agua, de allí la presencia de importantes lagunas que forman un complejo de humedales únicos y vegetación característica que permiten almacenar el agua de lluvia y a la vez regular los flujos y la calidad del mismo, como también la prevención de la erosión.

Humedales

Cada humedal está conformado por una serie de componentes físicos, biológicos o químicos, tales como agua, flora, fauna y nutrientes. Estos componentes permite que los humedales desempeñen funciones como:

- Recargas de acuíferos: cuando el agua desciende desde el humedal hacia los acuíferos subterráneos, el agua llega usualmente más limpia que cuando comenzó a filtrarse desde el humedal. La recarga de un humedal está ligado a la descarga de otro.
- Descarga de acuíferos: el agua que ha sido almacenada bajo tierra asciende hacia el humedal y se transforma en agua superficial.
- Control de inundaciones: mediante el almacenamiento de las precipitaciones y la liberación de la escorrentía, los humedales pueden disminuir la embestida destructiva de a crecida de ríos.
- Controla la erosión: la vegetación del humedal puede estabilizar y prevenir la erosión dado que las raíces de las plantas sostienen a los sedimentos.
- Exportación de biomasa: los humedales sostienen la vida de densas poblaciones de peces y vida silvestre, que se alimenta de sus aguas ricas en nutrientes. Los nutrientes que se almacenan en las plantas del humedal, son liberados cuando el agua se enfría y estas mueren en el invierno.
- Estabilización de los microclimas: los ciclos hidrológicos, de nutrientes y de materia, y los flujos de energía de los humedales, pueden estabilizar las condiciones climáticas locales, en particular las precipitaciones y las T°.

Figura 30

Humedales encontrados en el área de estudio



Nota: humedales presentes en la zona actuando como agente controlador de la erosión.

Figura 31

Humedal representativo de la exportación de la biomasa



Nota: humedal que representa la transición entre los ecosistemas terrestres y los ecosistemas acuáticos y poseen una baja profundidad.

Lagunas

En la zona de estudio forma parte y dentro de su área la presencia de lagunas las cuales comprende dentro de las 284 lagunas de alto peru. La presencia de agua en la laguna se debe a la lluvia que cae directamente sobre ella, a la escorrentía superficial procedente de las aportaciones de los manantiales que drenan los acuíferos carbonaticos de su entorno y que llegan al humedal a raves de los arroyos que convergen en ella, y de la escorrentía subterránea que proviene de los acuíferos colindantes o de los subyacentes al mismo.

Figura 32

Lagunas encontradas en el área de estudio



Nota: complejo de lagunas donde nace la cabecera de cuenta del río Llaucano, Marañón cajamarquino y del Jequetepeque.

Pajonales

Los pajonales captan el agua de la lluvia y el ambiente, lo filtran y lo sueltan constantemente hacia las tierras bajas. Para los pobladores del caserío Ayaviri los pajonales considerado un mejor forraje para el ganado es que luego de ser quemados, vuelven a crecer con rebrotes más tiernos. La población dice que al quemar estas zonas se atraerán lluvias para los cultivos, despejará las nubes y se podrá recolectar leña. Esta idea carece de sustento científico, lo único que se ha comprobado es que quemar pajonales afecta los acuíferos, que son nuestras reservas de agua.

Figura 33

Pajonales presentes en el área de estudio



Nota: pajonales propios del lugar, captadores y almacenadores de agua de lluvia que nutren a los acuíferos.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Construcción del árbol de decisiones para la determinación de las áreas potenciales de recarga de aguas subterráneas

Los árboles de decisión son una poderosa herramienta para generar clasificaciones de distintos tipos, y el provecho que se le puede sacar depende de la imaginación del usuario para crear un árbol que se ajuste a sus necesidades. La herramienta se basa en la lógica básica, todos los datos entran en un nodo el cual tiene una condición lógica, si los datos la cumplen pasan a un “hijo” y si no a otro, los hijos pueden convertirse a su vez en otros nodos que pongan alguna condición para los datos que entran en él.

Se tomó como base para este proyecto el modelo del estudio: “Clasificación de imágenes ETM+ y ASTER GDEM por el método árbol de decisiones para la detección de agua subterránea en Perú. Caso Estudio: Lambayeque”, de Juan Neil Mendoza Nolorbe y Joel Rojas Acuña presentado en el Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013.

Se realizó un análisis visual de la imagen y se utilizó el método de clasificación mediante la elaboración de un árbol de decisiones usando las imágenes de Temperatura del suelo (TS), modelo de pendiente (PEND), NDWI (NDWI) y NDVI (NDVI).

Las clases consideradas para la zona de estudio son:

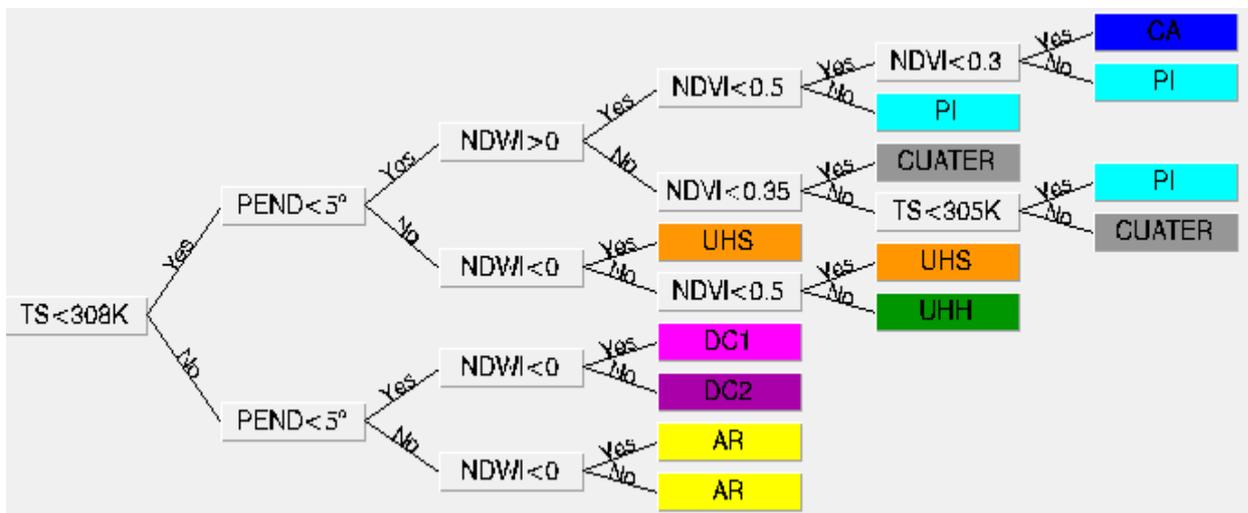
- AR como afloramientos rocosos.
- DC1 y DC2 para depósitos cuaternarios secos.
- UHS, unidad hidrogeológica seca de alta pendiente.
- UHH, unidad hidrogeológica húmeda de alta pendiente.

“prospección de aguas subterráneas usando imágenes landsat y áster, en el caserío ayaviri, distrito tumbaden, san pablo, cajamarca 2021”

- CUATER, depósitos cuaternarios.
- CA, cuerpos de agua.
- PI, zonas con potencial de infiltración y de contener agua subterránea.

A continuación, se muestra el diseño del árbol de decisiones para clasificar las zonas con potencial hidrogeológico:

Figura 34
Árbol de decisiones



Nota: árbol de decisiones para la clasificación de zonas con interés hidrogeológico.

El árbol de decisiones mostrado en la figura 35, considera en el primer nivel los valores de temperatura mayores o menores que 308 K; en el segundo nivel los valores de la pendiente mayores o menores que 5°, en el tercer nivel los valores del NDWI mayores o menores que 0, por último, en el cuarto nivel consideramos valores de NDVI comprendidos entre 0.5 y 1.

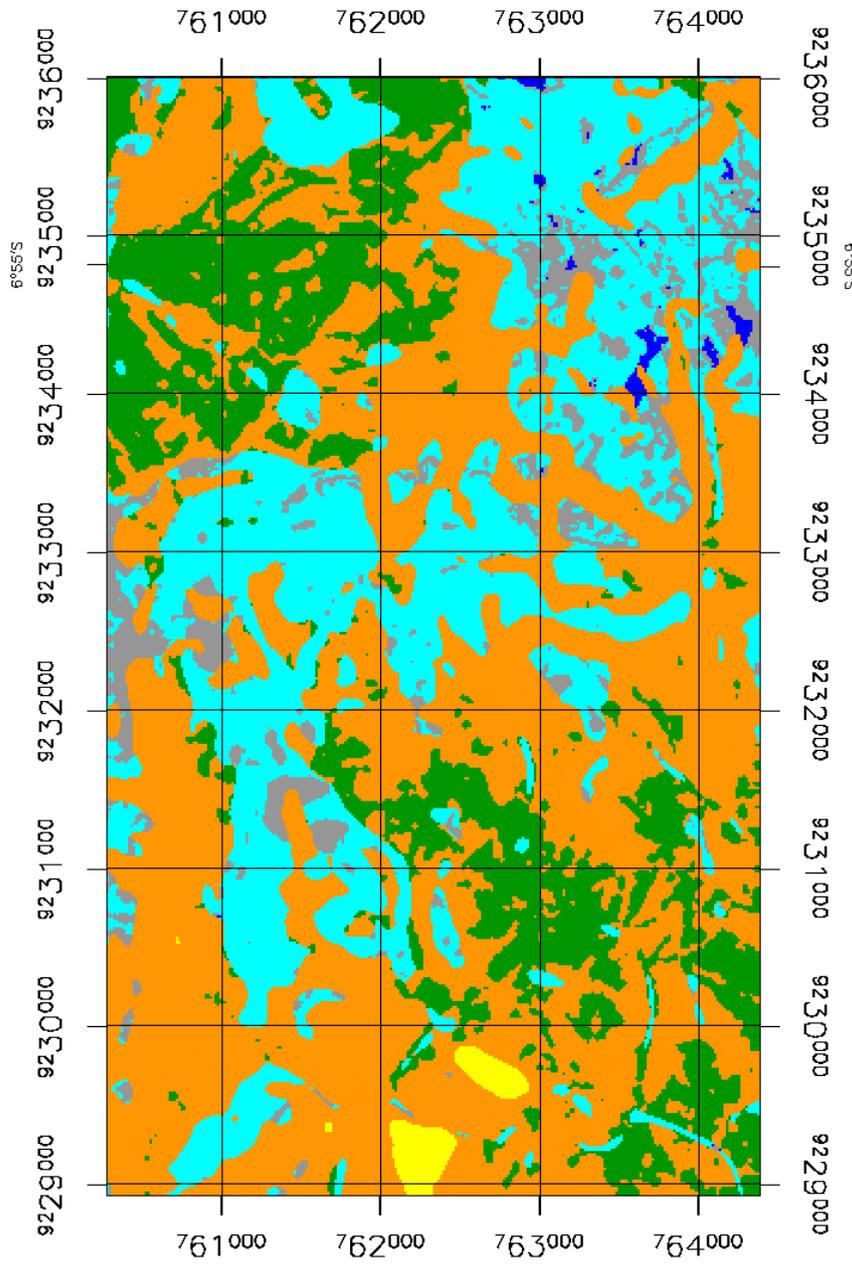
- TS<308K: se tomó en cuenta el análisis del NDVI y la temperatura superficial, se determinó que la vegetación y los cuerpos de agua se encuentran en rangos de temperatura menores a 308 K.

- $PEND < 5^\circ$: se tomó en cuenta el análisis de las pendientes de terreno generadas a partir del DEM, se determinó que los depósitos cuaternarios capaces de retener el agua de lluvia y permitir la infiltración potencial presentan pendientes menores a 5° .
- $NDWI < 0$: se tomó en cuenta el análisis del NDWI, se determinó que los cuerpos de agua y la vegetación se encuentran con valores de éste parámetros mayores que 0.
- $NDVI < 0.5$: se tomó en cuenta el análisis del NDVI, se determinó que la vegetación presenta valores de éste parámetros mayores que 0.5.
- $NDVI < 0.3$: se tomó en cuenta el análisis del NDVI, se determinó que los cuerpos de agua presentan valores de éste parámetro menores que 0.3.

El resultado se presenta en la Figura 36, la cual muestra las zonas potenciales en agua subterránea a una escala 1:50000, como se muestra a continuación:

Figura 35

Mapa de la clasificación hidrológica



Nota: Mapa de clasificación de las zonas con potencial hidrogeológico y las unidades hidrogeológicas de la área de estudio.

- PI (color cian): zonas con potencial de infiltración y de contener agua subterránea, son zonas en la cual presentan valores del NDVI mayores a 0.5, con temperaturas superficiales menores a 308K, pendientes menores a 5° y valores del NDWI mayores a 0.
- UHH (color verde oscuro): unidades hidrogeológicas que se mantienen húmedas en el periodo seco, con valores del NDVI mayores a 0.5, valores del NDWI mayores a 0, temperatura superficial menor a 308K, pero con pendientes mayores a 5°.
- UHS (color anaranjado): unidades hidrogeológicas que se encuentran secas en el periodo seco, con valores del NDVI menores a 0.5, valores del NDWI menores a 0, temperatura superficial menor a 308K, pero con pendientes mayores a 5°.
- CUATER (color gris): depósitos cuaternarios, con pendientes menores a 5°, temperaturas menores a 305K, con valores del NDVI mayores a 0.3 y valores del NDWI mayores a 0, éstas zonas se encuentran con menor cantidad de masa vegetal y representan zonas con alto potencial de contener aguas subterráneas.
- DC1 y DC2 (colores magenta): zonas que representan depósitos cuaternarios secos, con temperaturas mayores a 308K y pendientes menores a 5°, en la clasificación por árbol de decisiones no aparecen clasificadas en la imagen 7, debido a que no existen zonas con éstas características en el lugar de estudio.

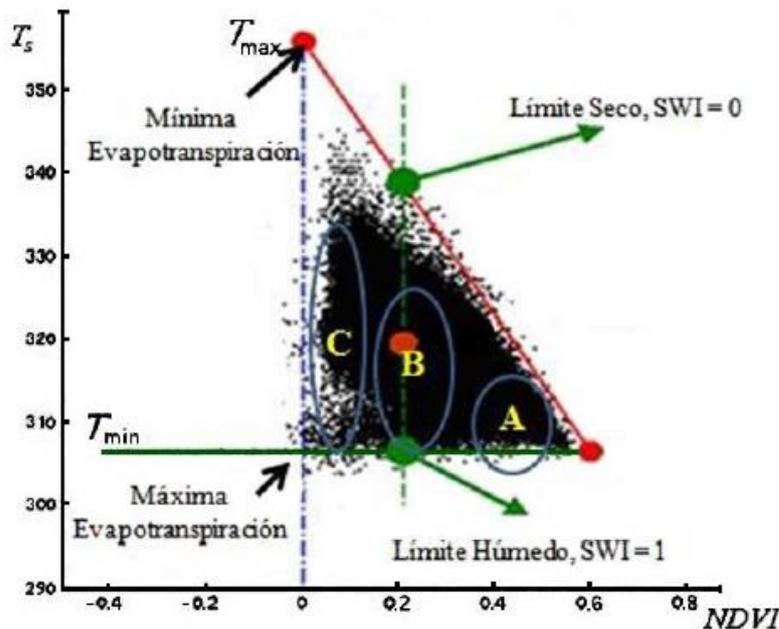
- AR (color amarillo): afloramientos rocosos con temperaturas mayores a 308K y pendientes mayores a 5°.

3.2. determinación del estrés hídrico en la zona de estudio

Para determinar el estrés hídrico se ha utilizado la correlación existente entre la temperatura superficial y el NDVI. Donde involucra la estimación de parámetros hidrológicos.

Figura 36

Espacio del NDVI



Nota: Espacio ndvi – Ts modificado de girolimetro et al. (2007).

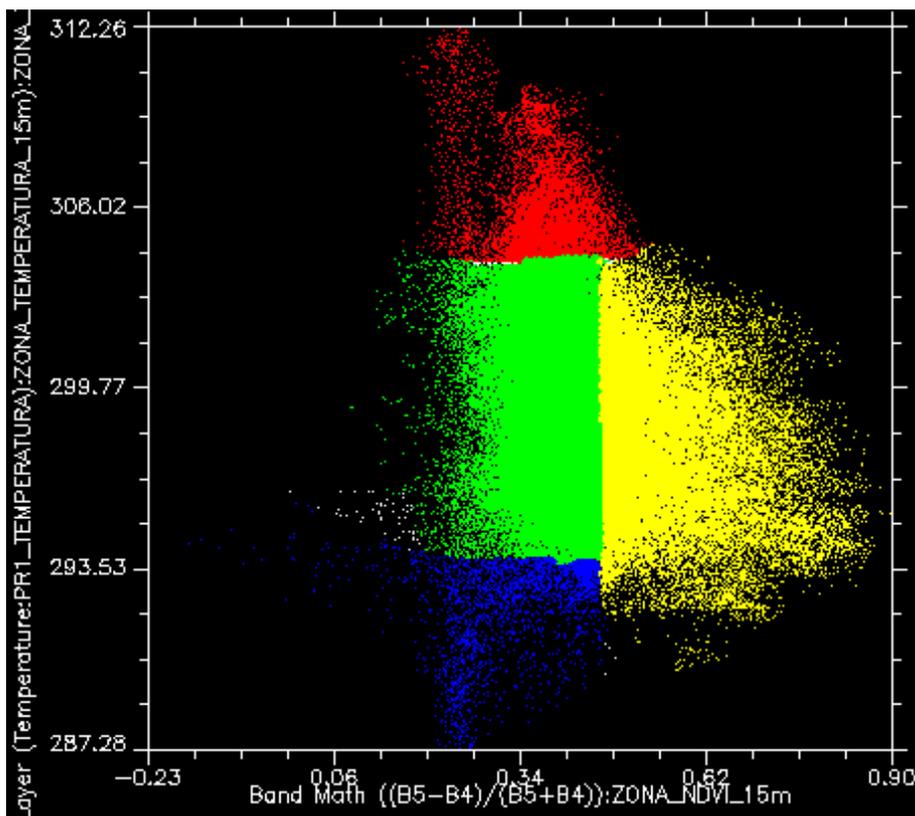
El límite seco teórico representa humedad cero y evapotranspiración cero, y la temperatura superficial alcanza el máximo físico cuando no se produce el enfriamiento por evaporación. En este contexto, ocurre el cierre estomático completo de la vegetación

A partir de lo observado en la Figura 37, es posible decir que para un valor mínimo de temperatura superficial corresponde la máxima disponibilidad de agua en el suelo (máxima evaporación y transpiración), y que para un valor máximo de temperatura superficial no existirá disponibilidad de agua en el suelo.

Para éste caso se realizó un dispersograma que muestra la correlación de las imágenes de la temperatura superficial y los valores del NDVI. En el eje X se muestran los valores del NDVI y en el eje Y se muestran los rangos de temperatura por cada valor del NDVI.

Figura 37

Dispersograma del NDVI



Nota: dispersograma ndvi (eje x) vs ts (eje y) presentes en el área de estudio

Los píxeles seleccionados en color azul son rangos de NDVI menores a 0.3 y con valores de temperaturas menores a 293 K, lo que representan cuerpos de agua.

Los píxeles seleccionados en color verde son rangos de NDVI mayores a 0.3 con valores de temperatura entre 293K y 306K, que representan suelos desnudos húmedos.

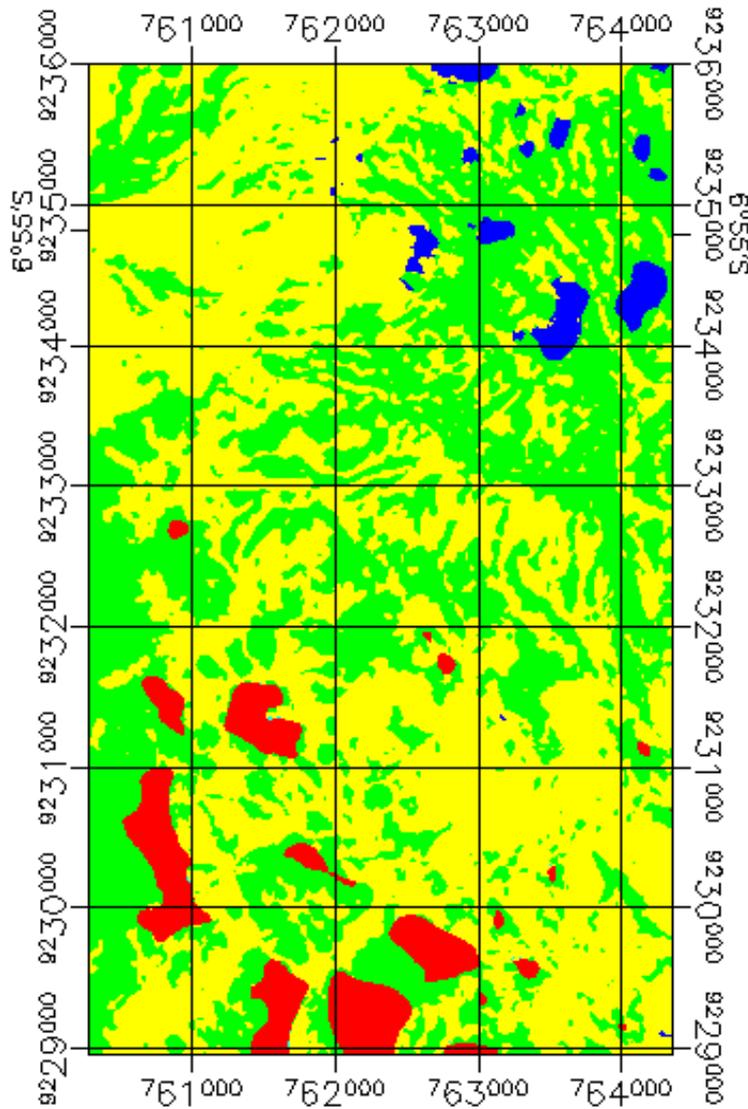
Los píxeles seleccionados en color amarillo son rangos de NDVI mayores a 0.3 con valores de temperatura entre 293K y 306K, que representan cubiertas vegetales húmedas.

Por último, los píxeles seleccionados en color rojo son rangos de NDVI en promedio a 0.3 con valores de temperatura mayores a 306 k, que representan cubiertas secas o representan el límite seco del suelo.

A continuación, se muestra el mapa de estrés hídrico de la zona de estudio:

Figura 38

Mapa de estrés-hídrico



Nota: Mapa de clasificación del estrés hídrico de la zona de estudio.

La figura 39, representa la zonificación del estrés hídrico en la zona de estudio, donde se puede observar que los pixeles representados en color rojo nos indican las zonas secas donde la evapotranspiración es prácticamente nula debido a que son zonas que presentan temperaturas superiores a los 308K y valores del NDVI inferiores a 0.3; los pixeles

representados en color azul nos indican la presencia de cuerpos de agua, donde los valores de temperatura son inferiores a 293K y con valores del NDVI inferiores a 0.3.

Los pixeles representados en color verde nos indican suelos húmedos, debido a que son zonas donde las temperaturas oscilan entre un rango de 293K - 308K y los valores del NDVI se encuentran en un rango de 0.3 y 0.5; por último, los pixeles representados en color amarillo representan la vegetación húmeda y saludable, debido a que son zonas que se encuentran entre un rango de temperatura entre los 293K – 305K y los valores del NDVI son superiores a 0.5.

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión

A partir de los resultados presentados, es de suma importancia discutir la importancia de la teledetección usando imágenes Landsat y Áster, en el Caserío Ayaviri. Donde es necesario responder al problema planteado ¿Es posible prospectar aguas subterráneas usando imágenes Landsat y Áster, en el Caserío Ayaviri, Distrito Tumbaden, San Pablo, Cajamarca 2021?

Contrastando que mediante la técnica del árbol de decisiones usando imágenes Landsat y Áster y la prospección con teledetección, fue posible determinar zonas predominantes con recarga hídrica favorables las precipitaciones están emplazadas en su mayoría en depósitos cuaternarios fluvio – glaciares en las partes de mayor altitud de la zona de estudio cuyas pendientes no superan los 5 grados, valores del NDVI superiores a 0.3, con temperaturas inferiores a los 305K y en ellas se encuentran la mayoría de cuerpos de agua. El estudio de la temperatura superficial es de suma importancia ya que esta nos indica la interacción energética e hídrica que existe entre la atmosfera y la superficie terrestre (Valor y Caselles, 1996; Sobrino, 2000; Rivas y Caselles, 2004).

Asi mismo Los valores del NDWI comprendidos en rangos que van desde 0.1 a los 0.6. Donde las áreas con alta captación de humedad están relacionadas con suelos húmedos donde se desarrolla vegetación saludable, La disponibilidad de agua del sistema hidrológico e hidrogeológico puede ser estimado a nivel regional por medio del uso de sensores remotos para obtener la variabilidad y la distribución del agua en la superficie de una cuenca, lo que nos va a identificar la disponibilidad hídrica entre el límite seco y el límite húmedo en una cuenca (Fensholt & Sandholt, 2003).

Por otro lado las pendientes del terreno juegan un papel muy importante donde las zonas de interés hidrogeológico son las dominadas por pendientes menores a 5° se pueden observar con tonalidades azules y oscuras en el mapa de pendientes (figura 18).

Mediante el método del árbol de decisiones que una poderosa herramienta basada en la lógica básica, todos los datos entran en un nodo el cual tiene una condición lógica, si los datos la cumplen pasan a un “hijo” y si no a otro, los hijos pueden convertirse a su vez en otros nodos que pongan alguna condición para los datos que entran en él. Mendoza J. & Rojas J. (2013). En la zona de estudio existen mayoritariamente condiciones de humedad en los suelos y cubiertas (colores verde y amarillo de la figura 39), que tienen potencialidad de desarrollar sistemas hidrológicos – hidrogeológicos como la formación de humedales y bofedales que propician la formación de acuíferos libres.

Por otro lado, el Caserío Ayaviri conforma una zona ecológica más alta por su vegetación típica, textura, relieve y calidad de suelos cumple la función de captación y almacenamiento de aguas ya sea de lluvia, granizo y neblina. La captación y almacenamiento de agua se logra a través de grandes superficies de humedales, los cuales vienen a ser sistemas con gran capacidad biogénica y muy esenciales para la dinámica de las microcuencas, que vierten sus aguas hacia las partes bajas, donde un gran número de pobladores de los diferentes caseríos dependen del recurso hídrico, los pajonales captan el agua de la lluvia y el ambiente, lo filtran y lo sueltan constantemente hacia las tierras bajas.

También se tuvo como limitantes la accesibilidad y permisos de los dueños dado la coyuntura de la red salud por la que pasamos estos dos últimos años con las Covid- 19 para ingresar al área de estudio, que progresivamente ha sido resuelto con la presentación

de vacunas. Poca accesibilidad a las zonas de estudio para realizar investigación de mapeo y toma de muestras, puesto que es una zona de propiedad privada, limitante que fue resultado de la gran ayuda con el uso de la teledetección.

Finalmente se recomienda, realizar estudios complementarios como la prospección geofísica para reducir el margen de error y determinar la profundidad y capacidad del acuífero. Así mismo tener en cuenta que se debe realizar con correcciones adecuadas de las imágenes satelitales antes de ser procesadas, dado que si obviamos este paso se pierde información espacial y espectral generando un error en el cálculo del clasificador (árbol de decisiones). Por otro lado, se recomienda un estudio de evaluación temporal de al menos 10 años con imágenes satelitales para ver las variaciones de los valores de humedad de las cubiertas en la zona de estudio, realización de pruebas de infiltración de campo para analizar las tasas de infiltración en las zonas de alto potencial de acumulación de agua de las precipitaciones.

4.2. Conclusiones

La evaluación por medio de técnicas de teledetección en imágenes Landsat 8 y ASTER GDEM permite obtener información de la superficie terrestre relacionada con la presencia zonas con potencial hidrogeológico que pueden estar relacionados con acuíferos libres y superficiales, sin embargo, los resultados obtenidos no son determinantes debido a que la exploración se realiza precisamente a partir de indicadores en la superficie terrestre.

En la zona de estudio, las áreas importantes de acumulación de agua de las precipitaciones están emplazadas en su mayoría en depósitos cuaternarios fluvio – glaciares en las partes de mayor altitud de la zona de estudio cuyas pendientes no superan

los 5 grados, valores del NDVI superiores a 0.3, con temperaturas inferiores a los 305K y en ellas se encuentran la mayoría de cuerpos de agua.

La distribución del estrés hídrico mediante las firmas espectrales analizadas muestran que en la zona de estudio existen mayoritariamente condiciones de humedad en los suelos y cubiertas (colores verde y amarillo de la figura 10), que tienen potencialidad de desarrollar sistemas hidrológicos – hidrogeológicos como la formación de humedales y bofedales que propician la formación de acuíferos libres.

El estudio de la temperatura superficial es de suma importancia ya que esta nos indica la interacción energética e hídrica que existe entre la atmosfera y la superficie terrestre (Valor y Caselles, 1996; Sobrino, 2000; Rivas y Caselles, 2004).

Para el análisis del cálculo de las pendientes, se construyó el modelo digital de elevación por medio de las Bandas 3N y 3B (estereoscópica) de una imagen satelital ASTER GDEM de la zona de estudio con una resolución espacial de 15 m, la misma resolución espacial de las imágenes del satélite Landsat 8. Donde se analiza los siguientes parámetros como el índice de vegetación normalizado (NDVI) y la temperatura del suelo (TS) y los datos imágenes GDEM ASTER se usan para obtener el modelo de pendiente (PEN) del área de estudio.

Se realizó un análisis del mapa de pendientes con respecto a los mapas de NDVI, y se pudo observar que los afloramientos rocosos oscilan entre un rango de pendientes mayor a los 12° (tonalidades del cian al rojo en la escala de colores), la vegetación se encuentra en rangos de pendiente menores a 5° (zonas potenciales de infiltración) y en otras zonas mayores a 5° (unidades hidrogeológicas húmedas de pendiente moderada),

las zonas de interés hidrogeológico son las dominadas por pendientes menores a 5° se pueden observar con tonalidades azules y oscuras en el mapa de pendientes.

Se tomó como base para este proyecto el modelo del estudio: “Clasificación de imágenes ETM+ y ASTER GDEM por el método árbol de decisiones para la detección de agua subterránea en Perú. Caso Estudio: Lambayeque”, de Juan Neil Mendoza Nolorbe y Joel Rojas Acuña presentado en el Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013.

Se realizó un análisis visual de la imagen y se utilizó el método de clasificación mediante la elaboración de un árbol de decisiones usando las imágenes de Temperatura del suelo (TS), modelo de pendiente (PEND), NDWI (NDWI) y NDVI (NDVI). Estos resultados los podemos ver en las figuras 35 y 36.

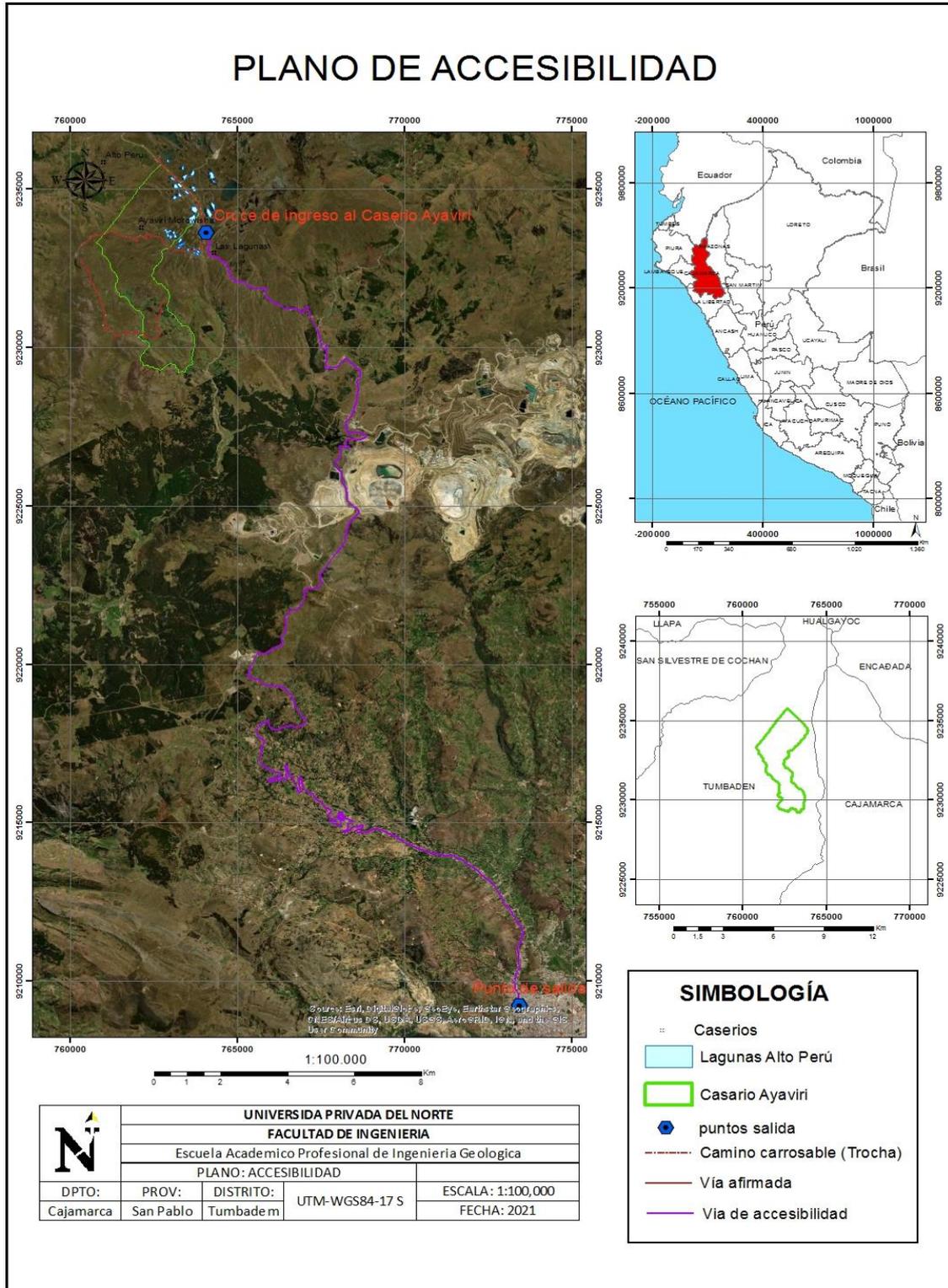
REFERENCIAS

- ArcGIS for Desktop. (23 de Marzo de 2016). *Comprender la pendiente*. Obtenido de Comprender la pendiente: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/understanding-slope.htm#:~:text=Pendiente%20identifica%20la%20pendiente%20descendente,a%20trav%C3%A9s%20de%20cada%20tri%C3%A1ngulo>.
- Avdan, K. y. (2017). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *Idesia*, 38-4.
- Barboza Colorado, Y., & Cortez Valera, R. (2018). *ANÁLISIS MULTIESPECTRAL MEDIANTE PARAMETROSSUPERFICIALES CON LA PLATAFORMA LANDSAT 8 PARAIDENTIFICAR AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CUENCA DEL RIO MASHCON-CAJAMARCA. (TESIS)*. UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE, CAJAMARCA.
- Briceño, I. P. (2018). Determinación de calidad de agua con imagenes de satélite Landsat 8, sensor OLI. *Revista de teledeteccion*, 52:67-78.
- CASTANY, G. (1975). *PROSPECCIÓN Y EXLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEA*. BARCELONA: OMEGA.
- Chuvieco, E. (2002). *FUNDAMENTOS DE LA TELEDETECCION ESPACIAL*. MADRID: Ediciones Rialp.S.A.
- Cusquisiban Quispe, G. (2019). *Ubicacion de zonas de recarga Hídrica usando Imagenes Lansat 8 ,medianteel metodo del árbol de desiciones en la cuenca del rio Chamán,Cajamarca y la Libertad-Perú. (Tesis)*. Cajamarca.
- Durán- Alarcón, C. (2015). Aplicación de imágenes satelitales en la dinámica de cuerposde agua. *Journal of South American Earth Sciences*, 19-26.
- EARTH OBSERVING SYSTEM . (12 de Octubre de 2020). *El Satélite Landsat 8: Imágenes, Descripción Y Características*. Obtenido de El Satélite Landsat 8: Imágenes, Descripción Y Características: <https://eos.com/es/landsat-8/>
- EARTH OBSERVING SYSTEM . (4 de ENERO de 2021). *NDVI*. Obtenido de NDVI : <https://eos.com/es/ndvi/>
- Earth Observing System. (4 de ENERO de 2021). *NDWI (Índice Diferencial Normalizado De Agua) Y Nivel De Humedad*. Obtenido de NDWI (Índice Diferencial Normalizado De Agua) Y Nivel De Humedad: <https://eos.com/es/ndwi/>
- Fernández, A. (2017). *CALCULO DE TEMPERATURA DE*. VALENCIA: ETS Ing. Geodésica, Cartográfica y Topográfica,.
- Folguera, A. y. (2015). Estudio de Imagenes Satelitales. *La Planicie Estructural del centro de la Provincia de Pampa*, 72-73.

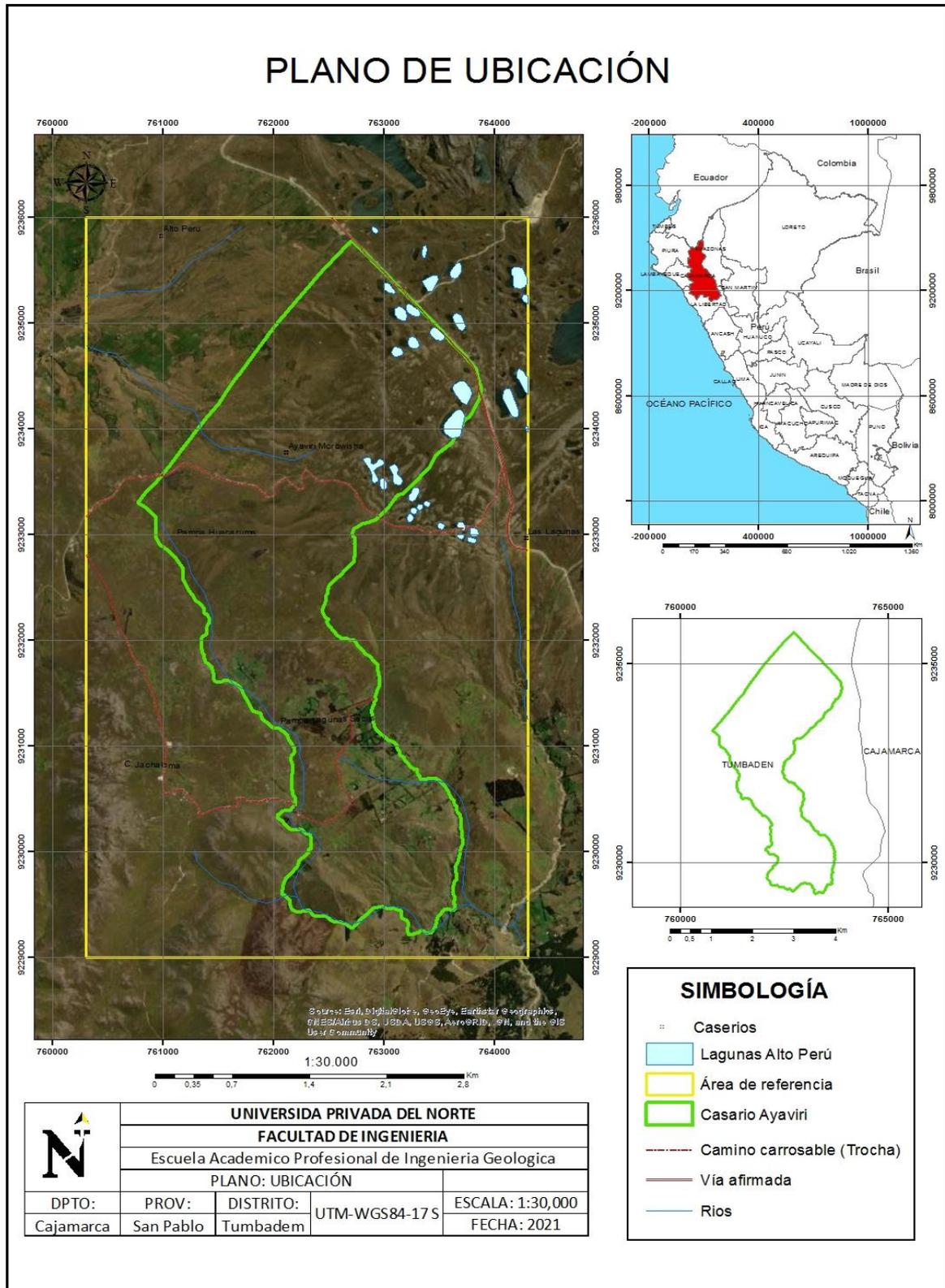
- GEOCENTO earth imaging. (16 de 12 de 2015). *Satélite de imágenes LANDSAT-8*. Obtenido de Satélite de imágenes LANDSAT-8: <http://geocento.es/galeria-de-satelites-para-buscar-y-adquirir-imagenes/satelite-imagenes-landsat-8/>
- Geta, J. L., & Azpeiti, J. M. (2009). *La geología e hidrología en la investigación de humedales*. España: Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España.
- González, C. V. (2018). *Procesamiento de Imágenes de Satélite & GIS*. Chile : Remote Sensing Geoimage SAC.
- Grajales, T. (2000). *TIPOS DE INVESTIGACION*.
- Hernández, J., & Montaner, D. (2015). *PATRONES DE RESPUESTA ESPECTRAL*. Chile: Facultad de Ciencias Forestales.
- Hernández. C, N. E. (2019). Zonas de Captacion y Almacenamiento de Agua. 20,25.
- Hernández. C, N. E. (2019). ZONAS DE CAPTACION Y DE ALMACENAMIENTO DE AGUA.
- Hernandez.C, N. E. (2019). APORTE DE LAS IMAGENES SATELITALES A LA PROSPECCION SUBTERRANEA DE AGUA. *COMISION DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS*, 1.2.4.
- Juan Mendoza Nolorbe y Joel Rojas Acuña. (2013). "*CLASIFICACION DE IMAGENES ETM+ Y ASTER GDEM POR EL METODO DEL ARBOL DE DECISIONES PARA LA DETECCION DE AGUA SUBTERRANEA EN EL PERÚ. CASO ESTUDIO: LAMBAYEQUE*". PERÚ.
- Mendoza, J. N., & Rojas Acuña, J. (2018). *Clasificación de imágenes ETM+ y ASTER GDEM por el método árbol de decisiones (Tesis de Maestría)*. Universidad Mayor de San Marcos, Lima.
- Pelekais , C. (2000). *Qualitative and Quantitative Methods:Diferences and Tendencias*. España.
- Pérez, C., & Muñoz, Á. (2006). *Teledeteccion: Nociones y Aplicaciones* . España .
- Pérez, D. (2007). *Introduccion a los Sensores Remotos- Aplicaciones en Geología* . Argentina .
- Sarría, F. A. (2006). *Sistemas de Información Geográfica*. España .
- Spalleti, L. Y. (2013). Características y evolución del delta del río Colorado. *Asociacion Argentina de Sedimentología.*, 23-37.
- Vasquez Peralta, C., & Gobierno Regional Cajamarca. (2011). *ANA*.
- Zarate, F. &. (2015). Tratamiento Digital de Imagenes Satelitales. *CEDAMAZ*, 5.

ANEXOS

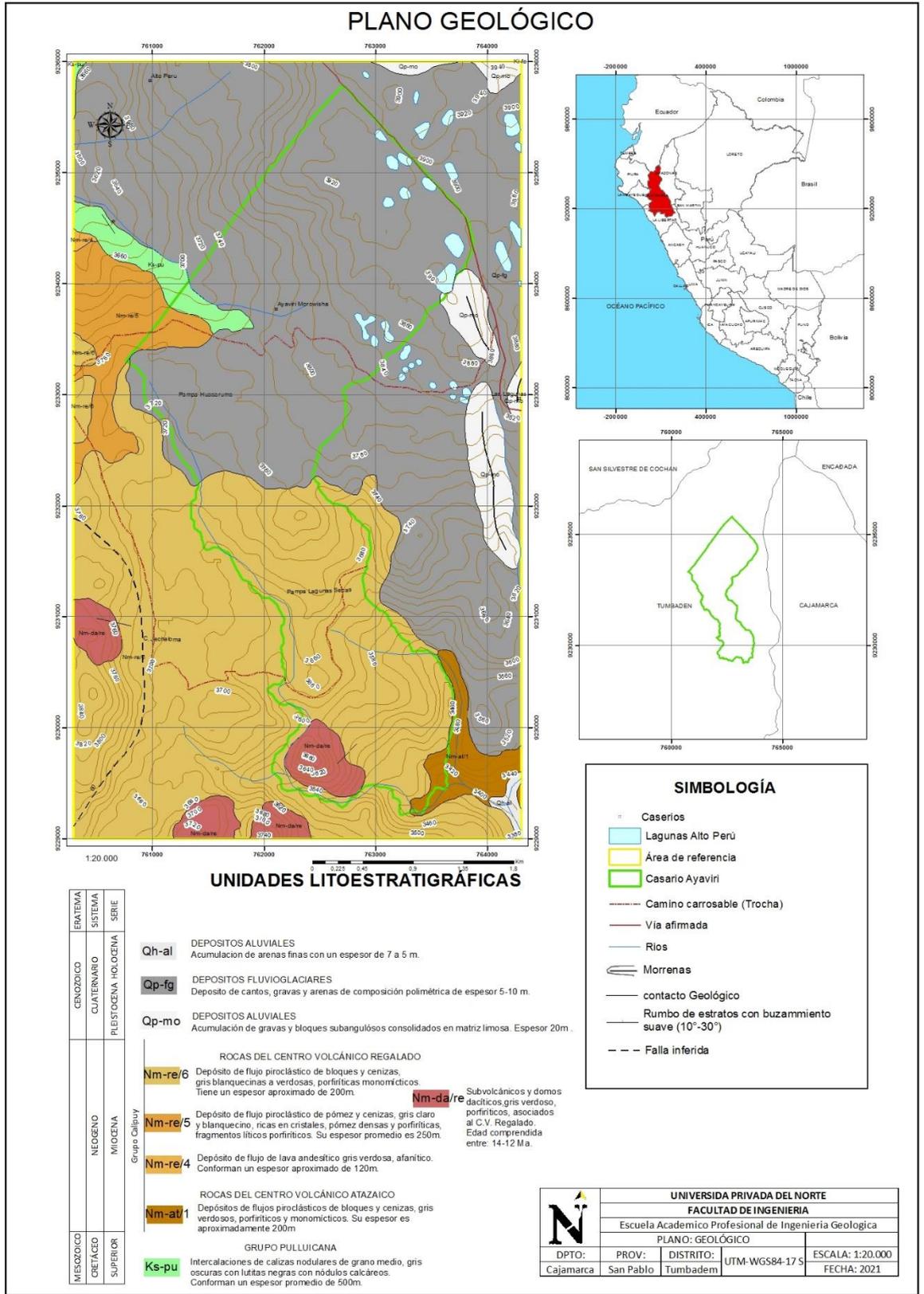
ANEXO N° 1 PLANO DE ACCESIBILIDAD



ANEXO N° 2 PLANO DE UBICACION



ANEXO N° 3 PLANO GEOLÓGICO



ANEXO N° 4 MUESTRA CON PRESENCIA DE OXIDACION



ANEXO N° 5 LAGUNA LOS PATOS



ANEXO N° 6 VISTA PANORAMICA DE LAS 284 LAGUNAS



ANEXO N° 7 HUMEDALES PRESENTES EN EL ÁREA DE ESTUDIO



ANEXO N° 8 GANADERIA ABASTESIDA POR LA FILTRACION DE AGUAS SUBTERRANEAS



ANEXO N° 9 MACIZO ROCOSO DE LA FORMACION FARRAT DE UN AMBIENTE CONTINENTAL



ANEXO N° 10 RIO NACIENTE DE LA LAGUNA TRES COMPUERTAS

