

FACULTAD DE INGENIERÍA



Carrera de Ingeniería de Minas

“ANÁLISIS MULTIESPECTRAL MEDIANTE PARAMETROS SUPERFICIALES CON LA PLATAFORMA LANDSAT 8 PARA IDENTIFICAR AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CUENCA DEL RÍO MASHCÓN - CAJAMARCA”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniera de minas

Autoras:

Yesenia Lisbeth, Barboza Colorado
Roxana Isamar, Cortez Valera

Asesor:

Ing. Víctor Eduardo Álvarez León

Cajamarca - Perú

2018

ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS

El asesor Ing. Víctor Eduardo Álvarez León, docente de la Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, Carrera profesional de INGENIERÍA DE MINAS, ha realizado el seguimiento del proceso de formulación y desarrollo de la tesis de los estudiantes:

- Bach. Yesenia Lisbeth, Barboza Colorado
- Bach. Roxana Isamar, Cortez Valera

Por cuanto, **CONSIDERA** que la tesis titulada: “Análisis multiespectral mediante parámetros superficiales con la plataforma Landsat 8 para identificar agua subterránea en la cuenca del río Mashcón” para aspirar al título profesional de: Ingeniero De Minas por la Universidad Privada del Norte, reúne las condiciones adecuadas, por lo cual, **AUTORIZA** al o a los interesados para su presentación.

Ing. Víctor Eduardo Álvarez León
Asesor

ACTA DE APROBACIÓN DE LA TESIS

Los miembros del jurado evaluador asignados han procedido a realizar la evaluación de la tesis de los estudiantes: Bach. Bach. Yesenia Lisbeth, Barboza Colorado; Roxana Isamar, Cortez Valera para aspirar al título profesional con la tesis denominada: “Análisis multiespectral mediante parámetros superficiales con la plataforma Landsat 8 para identificar agua subterránea en la cuenca del río Mashcón”

Luego de la revisión del trabajo, en forma y contenido, los miembros del jurado concuerdan:

Aprobación por unanimidad

Aprobación por mayoría

Calificativo:

Excelente [20 - 18]

Sobresaliente [17 - 15]

Bueno [14 - 13]

Calificativo:

Excelente [20 - 18]

Sobresaliente [17 - 15]

Bueno [14 - 13]

Desaprobado

Firman en señal de conformidad:

Ing. Rafael Napoleón Ocas Boñon
Jurado
Presidente

Ing. Alex Patricio Marinovic Pulido
Jurado

Ing. Oscar Arturo Vásquez
Mendoza
Jurado

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios, ya que con el todo es posible, a mis padres por su apoyo incondicional, por sus consejos, por el valor mostrado para salir adelante, a mi tía Yola por brindarme su apoyo y motivación para seguir adelante, a mis hermanas por estar siempre conmigo apoyándome en cada momento.

Yesenia Lisbeth Barboza Colorado

La presente tesis la dedico a toda mi familia, principalmente a mis padres que han sido los promotores fundamentales en mi formación personal y profesional, por brindarme la confianza y creer en mí y en mis expectativas, por darme la oportunidad para lograrlo, gracias a mis hermanos por estar siempre en esos momentos difíciles brindándome su apoyo incondicional

Roxana Isamar Cortez Valera

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradecer a Dios, por habernos guiado a lo largo de nuestra carrera y permitirnos seguir cumpliendo nuestras metas.

A nuestros padres, por su apoyo incondicional y permitirnos estudiar una carrera profesional, brindarnos sus consejos para la realización de la presente tesis.

Queremos agradecer a los colaboradores de la Autoridad del Agua por brindarnos la información necesaria.

Finalmente, agradecer a nuestro asesor Ing. Víctor Eduardo Álvarez León quien agradecemos por todo su tiempo brindado y sus consejos.

TABLA DE CONTENIDOS

ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS.....	2
ACTA DE APROBACIÓN DE LA TESIS	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO.....	5
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ABREVIATURAS	11
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	15
1.1. Realidad problemática.....	15
1.2. Formulación del problema	17
1.3. Objetivos	18
1.3.1. Objetivo general.....	18
1.3.2. Objetivos específicos.....	18
1.4. Hipótesis	18
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	19
2.1. Tipo de investigación.....	19
2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)	19
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos.....	19
2.3.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....	19
2.3.2. Índice de Diferencia Normalizada Agua (NDWI).	20
2.3.3. Conversión a temperatura de brillo y de superficie.	21
2.3.4. Árbol de decisiones.	22
2.3.5. Satélite LANDSAT	23
2.3.6. Aspectos Generales.....	27

2.3.7. Clima, Vegetación, Unidades Hidrográficas.	29
2.4. Procedimiento	33
2.4.1. Delimitación de la cuenca del rio Mashcón.	33
2.4.2. Descarga de imágenes LANDSAT 8.	34
2.4.3. Corrección de la imagen satelital.	40
2.4.4. Análisis y obtención de los parámetros superficiales para identificar agua subterránea.	44
CAPÍTULO III. RESULTADOS	66
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	67
5.1. Discusión	67
5.2. Conclusiones	69
REFERENCIAS	71
ANEXOS	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Constantes de calibración de la banda térmica del satélite Landsat.	22
Tabla N° 2: Coordenadas de referencia UTM.	27
Tabla N° 3: Parámetros fisiográficos de las subcuencas del Río Mashcón, (ANA, 2017). 32	
Tabla N° 4: Características de descarga de la imagen satelital. (Página web USGS, 2018)39	
Tabla N° 5: Constantes de calibración de la banda térmica del satélite Landsat 8.	52
Tabla N° 6: Constantes de calibración de la banda térmica del satélite Landsat 8.	53
Tabla N° 7: Grado de infiltración en función de la pendiente.....	57
Tabla N° 8: Agua subterránea tipo 1, 2018.	62
Tabla N° 9: Agua subterránea tipo 2, 2018.	63
Tabla N° 10: Agua superficial tipo 1, 2018.....	63
Tabla N° 11: Agua superficial tipo 2, 2018.....	63
Tabla N° 12: Afloramiento rocoso tipo 1, 2018.....	63
Tabla N° 13: Afloramiento rocoso tipo 2, 2018.....	64
Tabla N° 14: Afloramiento rocoso tipo 3, 2018.....	64
Tabla N° 15: Cubierta artificial tipo 1, 2018.....	64
Tabla N° 16: Cubierta artificial tipo 2, 2018.....	64
Tabla N° 17: Depósito cuaternario, 2018.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Cronología del satélite LANDSAT, (USGS, 2017).....	25
Figura 2: Bandas espectrales de LANDSAT 8 (OLI - TIRS), (USGS, 2017).....	26
Figura 3: Resolución espacial – Comparación de tamaño de pixel, (USGS, 2017).	26
Figura 4: Hidrografía de la Cuenca Rio Mashcón, 2018.	28
Figura 5: Demarcación política, 2018.	29
Figura 6: Delimitación de la cuenca del rio Mashcón, 2018.	34
Figura 7: Página web de la USGS para descarga de imágenes satelitales. (Página web USGS, 2018).....	35
Figura 8: Página web de la USGS – Path/ Row. (Página web USGS, 2018).	35
Figura 9: Path/ Row para Landsat 8 a nivel nacional. (MINEDU, 2018).	36
Figura 10: Página web de la USGS – selección de fecha. (Página web USGS, 2018).	37
Figura 11: Página web de la USGS – selección del tipo de imagen. (Página web USGS, 2018).....	37
Figura 12: Página web de la USGS – selección de imagen. (Página web USGS, 2018). ...	38
Figura 13: Imagen en crudo Landsat 8 – zona de trabajo. (Satélite Landsat, 2018).	42
Figura 14: Corrección de la imagen Landsat 8 – zona de trabajo, 2018.	43
Figura 15: Obtención de NDVI de la zona de estudio, 2018.....	46
Figura 16: Análisis de NDVI de la zona de estudio, 2018.	47
Figura 17: Obtención de NDWI de la zona de estudio, 2018.....	50
Figura 18: Análisis de NDVI de la zona de estudio, 2018.	51
Figura 19: Obtención de temperaturas de la zona de estudio, 2018.....	54
Figura 20: Análisis de temperaturas de la zona de estudio, 2018.....	55
Figura 21: Obtención de pendientes de la zona de estudio, 2018.....	58
Figura 22: Análisis de pendientes de la zona de estudio, 2018.	59

Figura 23: Árbol de decisiones de la zona de estudio, 2018.	61
Figura 24: Resultado del árbol de decisiones de la zona de estudio, 2018.....	66
Figura 25: Contrastación de zonas con presencia de agua subterránea y pozos del ANA 2018	68

ABREVIATURAS

ANA:	Autoridad Nacional del Agua.
A.R - 1:	Afloramiento Rocoso tipo 1.
A.R - 2:	Afloramiento Rocoso tipo 2.
A.R - 3:	Afloramiento Rocoso tipo 3.
A. Sub - 1:	Agua Subterránea tipo 1.
A. Sub - 2:	Agua Subterránea tipo 2.
A. Sup - 1:	Agua Superficial tipo 1.
A. Sup - 2:	Agua Superficial tipo 2.
C.A - 1:	Cubierta Artificial tipo 1.
C.A - 2:	Cubierta Artificial tipo 2.
D.C:	Depósito Cuaternario.
DEM:	Modelo Digital De Elevaciones
ENVI:	Entorno para la visualización de imágenes.
GDEM:	Modelo Digital De Elevación Global
LANDSAT:	Satélite Tierra
NASA:	Administración Nacional De La Aeronáutica Y Del Espacio
ND:	Numero Digital
NDVI:	Índice De Vegetación De Diferencia Normalizada
NDWI:	Índice De Agua De Diferencia Normalizada
NIR:	Infrarrojo Cercano
OLI:	Sensor Operacional De Imágenes De Tierra
PATH-ROW:	Latitud – Longitud
PEN:	Pendiente
RGB:	Rojo, Verde, Azul
SIG:	Sistema De Información Geográfica
SWIR:	Infrarrojo De Onda Corta
TIRS:	Infrarrojo Térmico

TS:	Temperatura Superficial
USGS:	Servicio Geológico De Los Estados Unidos
UTM:	Sistema De Coordenadas Transversal De Marcador
WGS 84:	Sistema geodésico mundial 1984
C°:	Grados centígrados
T°:	Temperatura

RESUMEN

Las plataformas satelitales representan nueva tecnología limpia para el control sostenible y sustentable de agua subterránea en cualquier parte de la tierra y con aplicación en 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 tuvo como objetivo identificar agua subterránea usando la plataforma LANDSAT 8, mediante el uso de parámetros superficiales en la cuenca del río Mashcón.

En una población de estudio de 307.49 Km² correspondiente a la cuenca Mashcón, con el diseño de investigación del tipo No experimental, transversal, y 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.

Palabras clave: Agua subterránea, Imágenes Landsat 8, Teledetección, Multiespectral

ABSTRACT

The satellite platforms represent new clean technology for the sustainable and sustainable control of groundwater in any part of the earth and with application in all branches of knowledge, it allows the monitoring of accumulation changes in a detailed way and in real time. The objective of this study was to identify groundwater using the LANDSAT 8 platform, by using surface parameters in the Mashcón river basin.

In a study population of 307.49 Km² corresponding to the Mashcón basin, with the research design of the type Non-experimental, transversal, and uses spectral techniques to determine different types of materials, supported by data collection instruments, such as the Aster satellite, the Geoimagen software and the SNAP software for the spectral analysis, obtaining as the main result the identification of the water recharge zones.

The result of the research shows that of the 96 groundwater wells registered by ANA (2018), 76 represent the class, groundwater, which provides a 79% reliability in the identification of groundwater zones. It is concluded that the reliability of this study is based on the underground wells mapped in the field by ANA (2018), which will allow a better use of this water resource, and have a clearer baseline for mining and design remediation; It will also open the doors to the use of remote sensing as a complementary tool to studies in all branches of knowledge.

Keywords: Groundwater, Landsat 8 Images, Remote Sensing, Multispectral

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

La escasez del recurso hídrico superficial a nivel mundial genera que el ser humano busque nuevas fuentes hídricas como son las aguas subterráneas, por lo cual su gestión en operaciones mineras y conservación es una necesidad cada vez más creciente y en el siglo XXI constituye un problema silencioso que va afectando cada vez más al país; generando problemas sociales y medio ambientales en zonas mineras donde no se tiene información detallada de este recurso vital. Este recurso subterráneo tiene características favorables frente al grado actual de contaminación mundial pues es un recurso que entre sus ventajas tiene la cualidad de uniformidad en la calidad, mejor distribución espacial y un menor grado de contaminación con respecto a las aguas superficiales, pero en labores mineras constituye un parámetro de riesgo y dificultad en el desarrollo minero, es por ello que es necesario un monitoreo específico y recurrente de este recurso que favorecerá no solo al desarrollo minero y social sino también al equilibrio ambiental. Por lo cual la presente investigación plantea métodos multiespectrales de técnicas limpias de monitoreo para la solución sostenible y sustentable del agua subterránea mediante el uso de la plataforma LANDSAT 8, en la cuenca Mashcón para ubicar las zonas con presencia de agua subterránea a partir del uso de parámetros superficiales como: El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), Índice de Diferencia Normalizada Agua (NDWI), pendiente y temperatura. Esta investigación pretende reflejar una metodología para la generación de información que permita monitorear y preservar las zonas de enriquecimiento hídrico subterráneo en zonas cercanas a labores mineras, de este modo permitir el manejo sostenible de este recurso hídrico desde la exploración al cierre de minas pues el uso de plataformas satelitales representa una nueva solución sostenible y sustentable

que permite el monitoreo de los cambios de acumulación de manera detallada y en tiempo real, eliminando limitaciones espacio temporales que existen hoy en día, permitiendo obtener medidas completas y confiables en grandes regiones geográficas.

Hernández M. (2010) en su investigación sobre la Metodología para la prospección de agua subterránea utilizando información satelital y datos obtenidos en forma tradicional, Ecuador; el autor desarrolló una metodología para utilizar distintas capas vectoriales de información espacial, utilizar criterios hidrológicos y realizar consultas en bases de datos geo-referenciados para revelar sitios con mayor posibilidad de presentar cisternas naturales, con la consiguiente probabilidad de presencia de agua subterránea. Se planteó la posibilidad de usar los resultados de este trabajo preliminar de investigación en la estructuración de proyectos piloto para la prospección de acuíferos en zonas áridas y semi-áridas del territorio ecuatoriano. Resultados alcanzados: i) Metodología prospectiva que usa SIG para obtener probabilidad de presencia de agua subterránea usando información obtenida por sensores remotos y métodos tradicionales. ii) Perfil de proyecto para aplicación de la mencionada metodología.

Mendoza, J y Rojas J. (2013) en su investigación acerca de la Clasificación de imágenes ETM+ y ÁSTER GDEM por el método árbol de decisiones para la detección de agua subterránea en Perú. Caso de estudio: Lambayeque; el autor se basa en la complementación de técnicas geofísicas para la detección de acuíferos libres de agua subterránea, se estimó los valores de la red de drenaje, con los datos de imágenes ÁSTER GDEM se determinó el modelo de pendiente del área de estudio, finalmente de un árbol de decisiones, basado en NDVI, Temperatura superficial y modelo de

pendiente se caracterizan las zonas potencialmente con agua subterránea de acuíferos libres, concluyéndose así que es posible la detección de agua subterránea mediante el método de árbol de decisiones, usando parámetros superficiales de clasificación.

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.

1.2. Formulación del problema

¿Es posible identificar agua subterránea usando la plataforma LANDSAT 8 mediante el uso de parámetros superficiales en la cuenca del río Mashcón?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Ubicar agua subterránea usando la plataforma LANDSAT 8 mediante el uso de parámetros superficiales en la cuenca del río Mashcón.

1.3.2. Objetivos específicos

Determinar los índices de vegetación y agua que favorezcan la recarga hídrica subterránea.

Determinar los parámetros de temperatura y pendiente que favorecen la recarga hídrica subterránea.

Realizar el análisis multiespectral mediante el clasificador en árbol para combinar cada una de las variables correspondientes. Realizar la zonificación de las áreas con presencia de agua subterránea en zonas cercanas a minería.

1.4. Hipótesis

Mediante el análisis de variables como: el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), Índice de Diferencia Normalizada Agua (NDWI), temperatura y pendientes obtenidas de la plataforma Landsat 8 esta investigación será capaz de Identificar zonas con presencia subterránea en la cuenca del río Mashcón.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

La investigación es del tipo Aplicada, No experimental – transversal, usando un método descriptivo analítico.

2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)

Población

La población de estudio está definida en un área de 307.49 Km² correspondiente a la cuenca Mashcón.

Muestra

Firmas multiespectrales correspondientes al índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), componente principal del agua, temperatura, pendiente. Con unidad mínima de análisis de 15 x 15 m pixel

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

Las técnicas utilizadas para la recolección de datos fueron la observación y el análisis espectral de los parámetros superficiales. También se utilizó lo siguiente:

2.3.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

El Índice de Diferencia de Vegetación Normalizado, también conocido como NDVI (ROUSE et al., 1974) por sus siglas en inglés. Es un índice usado para medir la diferencia normalizada entre la reflectancia del rojo y del infrarrojo cercano, proporcionando una medida sobre la cantidad, calidad y desarrollo de la cobertura vegetal y vigorosidad en áreas extensas.

El NDVI (ROUSE et al. 1974) es el índice de vegetación más utilizado para todo tipo de aplicaciones. La razón fundamental es su sencillez de cálculo, y

disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y $+1$), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes, etc.

$$NDVI = \frac{(pS_{NIR} - pS_{RED})}{(pS_{NIR} + pS_{RED})}$$

Donde:

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

pS_{NIR} : Reflectancia de la banda Infrarrojo cercano – NIR.

pS_{RED} : Reflectancia de la banda Infrarrojo cercano – NIR.

2.3.2. Índice de Diferencia Normalizada Agua (NDWI).

Es un indicador numérico, derivada de imágenes satelitales ópticas, usando las ondas de infrarrojo cercano y corta las bandas espectrales del infrarrojo. Esta última banda espectral está muy asociada con cambios en el contenido de agua de vegetación y la estructura de mesófilo esponjoso en las cubiertas vegetales. La respuesta del infrarrojo cercano banda espectral se correlaciona con la estructura interna de la hoja y la hoja de materia seca, excluyendo el contenido de agua.

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

$$NDWI = \frac{(pS_{GRE} - pS_{NIR})}{(pS_{GRE} + pS_{NIR})}$$

Donde:

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

pS_{NIR} : Reflectancia de la banda Infrarrojo cercano (NIR).

p_{SGRE} : Reflectancia de la banda verde (GRE).

2.3.3. Conversión a temperatura de brillo y de superficie.

A partir de los valores de radiancia, utilizando las bandas térmicas fácilmente se puede derivar la temperatura a la altura del sensor. Las bandas del TIRS se pueden convertir a temperatura de brillo utilizando las constantes que están en el archivo de metadatos.

$$T_b = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L\lambda} + 1\right)}$$

Donde:

T_b : Temperatura de brillo aparente en grados.

$L\lambda$: Radiancia espectral en el sensor (Radiancia en el satélite), unidad de medida (vatios/ (metro cuadrado * ster * μm))

K_1 : Es la constante de conversión térmica específica para cada banda termal, que lo encontramos en el metadato ($K1_CONSTANT_BAND_X$), unidad de medida (en vatios /metro cuadrado * ster * μm)

K_2 : Es la constante de conversión térmica específica para cada banda termal, que lo encontramos en el metadato ($K2_CONSTANT_BAND_X$), unidad de medida (en grados kelvin).

Las constantes K_1 y K_2 para sensores Landsat son proporcionadas en el siguiente cuadro.

Tabla N° 1: Constantes de calibración de la banda térmica del satélite Landsat.

Satélite	Bandas	K1 W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹	k2 Kelvin
Landsat 4	6	671.62	1284.3
Landsat 5	6	607.76	1260.56
Landsat 7	6	666.09	1282.71
Landsat 8	10	774.89	1321.08
	11	480.89	1201.14

Fuente: Landsat 4, 5 - Chander y Markhan (2003); LandSat 7 - NASA (2011); LandSat 8 - (Alexander, 2013).

2.3.4. Pendiente.

La pendiente es un parámetro importante en la infiltración de agua subterránea pues a mayor pendiente menor volumen de aguas infiltradas.

Este fenómeno se traduce en que cuando el relieve es abrupto la pendiente aumenta la velocidad, y las aguas tienden a descender superficialmente hacia las zonas bajas. Mientras que relieves suaves, las aguas de precipitación se remansan y permanecen más tiempo en contacto con los poros y fisuras de los materiales superficiales, lo que favorece la infiltración.

2.3.5. Árbol de decisiones.

ENVI (Environment for Visualizing Images) es un poderoso software de la compañía ITT Visual Information Solutions (USA) que se ha especializado por décadas al procesamiento de imágenes de todo tipo, RGB, Multiespectrales, Hiperespectrales, Radar, etc. Siendo una de sus principales fortalezas el análisis espectral y las técnicas de clasificación. La clasificación

por árboles de decisión apareció disponible en el software del año 2004, y aunque tiene cualidades poderosas y está ideado para cierto tipo de análisis, se pueden aprovechar estas herramientas de un modo diferente para clasificar píxeles que cumplan ciertas condiciones de la curva espectral y así evitar clasificar por metodologías relativas donde se manejan parámetros de probabilidad y no siempre con real certeza. Si bien, no podemos descartar ni negar la utilidad que nos otorgan los algoritmos matemáticos en la generación de targets de interés, nuestra intención es evidenciar una herramienta que permita, en ciertos casos, un análisis más preciso de los elementos mapeados. “El clasificador de árboles de decisión” realiza clasificaciones de varias etapas utilizando una serie de decisiones binarias para colocar píxeles en clases. Cada decisión divide los píxeles de un conjunto de imágenes en dos clases basadas en una expresión. Puede dividir cada nueva clase en dos clases más basada en otra expresión. Puede definir tantos nodos de decisión, según sea necesario. Los resultados de las decisiones son clases. De este modo se puede utilizar los datos de diferentes fuentes y archivos para hacer un clasificador de árbol de decisión individual, (Peguero, 2016).

2.3.6. Satélite LANDSAT

Se constituye en una serie de misiones de observación de la tierra por satélite gestionadas conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). El programa Landsat ha revolucionado la forma de ver y estudiar nuestro planeta. Landsat ha sido el único sistema de satélite diseñado y operado para observar repetidas veces la cubierta de la tierra con una

resolución moderada; de manera general cada pixel en su imagen tiene un tamaño con el que se podría cubrir un campo de béisbol.

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

Este sistema está compuesto de dos grandes segmentos:

- El observatorio; el cual consta de una plataforma con capacidad de carga de dos de sensores de observación terrestre, el primero de ellos denominado Operational Land Imager (OLI) y el sensor térmico infrarrojo Thermal Infrared Sensor (TIRS). OLI y TIRS recogerán los datos de forma conjunta para proporcionar imágenes coincidentes de la superficie terrestre, incluyendo las regiones costeras, hielo polar, las islas y las zonas continentales. El OLI es un instrumento construido por la empresa Ball Aerospace & Technologies Corporation en Boulder, Colorado y el TIRS es un instrumento que fue construido por la NASA en el centro de vuelo espacial Goddard en Greenbelt, Md.

El satélite almacena los datos del sensor OLI y TIRS en una grabadora de estado sólido incluida a bordo y transmite los datos a estaciones receptoras terrestres.

- El segundo segmento es el sistema terrestre, el cual proporciona la capacidad necesaria para la planificación y programación de las operaciones del LDCM y todas aquellas necesarias para administrar y distribuir los datos.

La plataforma LDCM, fue construida por la empresa Orbital Sciences Corporation en Gilbert, Arizona, tiene una vida útil de 5 años, pero lleva suficiente combustible para 10 años de operaciones. La nave orbitará de norte a al sur durante el día, cruzando el ecuador a las 10 a.m., hora local, con una órbita aproximada de unas 438 millas (705 kilómetros) por encima de la Tierra (USGS. 2013).

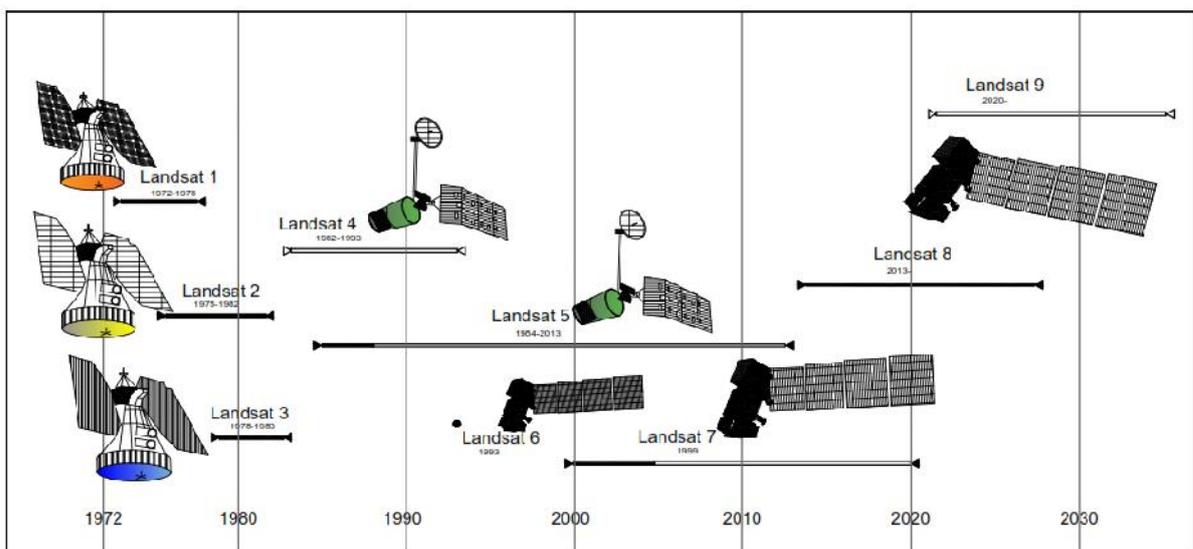


Figura 1: Cronología del satélite LANDSAT, (USGS, 2017).

Resolución espectral

Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Entre mayor sea esta resolución se tendrá información del comportamiento de una misma cobertura en diferentes bandas espectrales.

La resolución espectral indica el número y anchura de las bandas en las que el sensor puede captar radiación electromagnética. En principio cuantas más bandas incluya un sensor mejor, ya que cada banda constituye una variable para caracterizar la superficie captada. Por otro lado, es preferible que estas

bandas sean estrechas para que su poder discriminante se incremente, (Peguero, 2016).

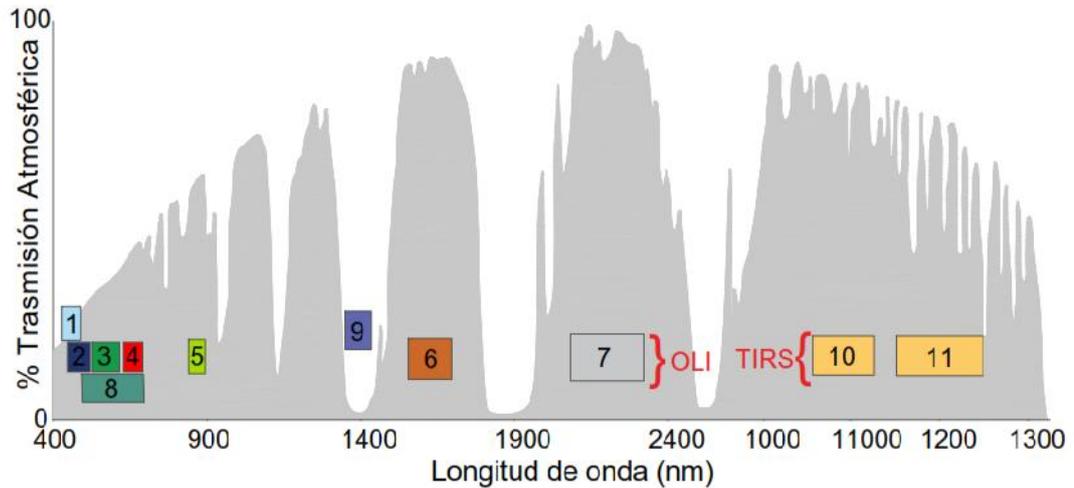


Figura 2: Bandas espectrales de LANDSAT 8 (OLI - TIRS), (USGS, 2017).

Resolución espacial

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

Este concepto designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen en un sistema determinado. Se mide en unidades de longitud (mm sobre la foto o metros sobre el terreno), (Peguero, 2016).

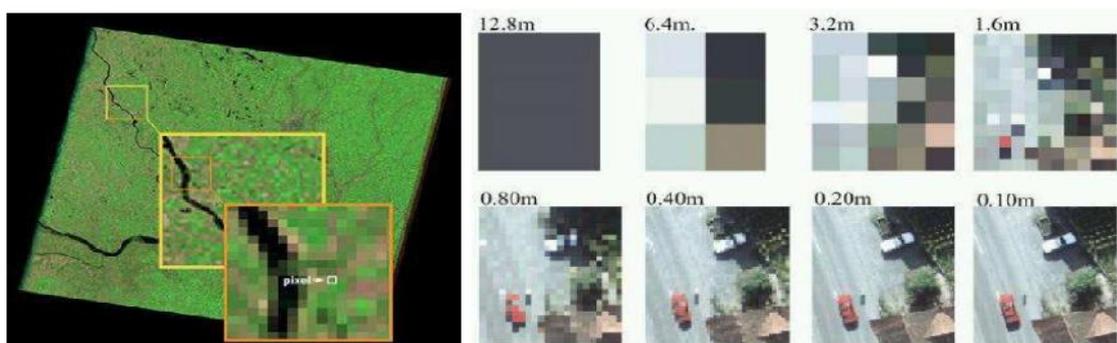


Figura 3: Resolución espacial – Comparación de tamaño de píxel, (USGS, 2017).

2.3.7. Aspectos Generales.

Ubicación Geográfica.

La cuenca del río Mashcón tiene una extensión de 307.49 km², se ubica al nororiente del territorio peruano, departamento de Cajamarca, correspondiente a la zona 17S con Datum WGS 84, comprendida entre las siguientes coordenadas de referencia. (Ver tabla 2

Tabla N° 2: Coordenadas de referencia UTM.

Vértices	Latitud	Longitud
1	9201000	762000
2	9228000	762000
3	9228000	780000
4	9201000	780000

Fuente: ANA, 2017.

Demarcación Hidrográfica.

La cuenca del río Mashcón pertenece sucesivamente a la Región Hidrográfica del Amazonas, a la intercuenca del Alto Amazonas, a la cuenca del Río Marañón, a la intercuenca Alto y a la cuenca del Río Crisnejas.

Por el Norte: Cuenca del río Llaucano y cuenca del río Jequetepeque

Por el Este: Cuenca del río Jequetepeque

Por el Sur: Cuenca del río Cajamarquino y cuenca del río Jequetepeque

Por el Oeste: Cuenca del río Chonta

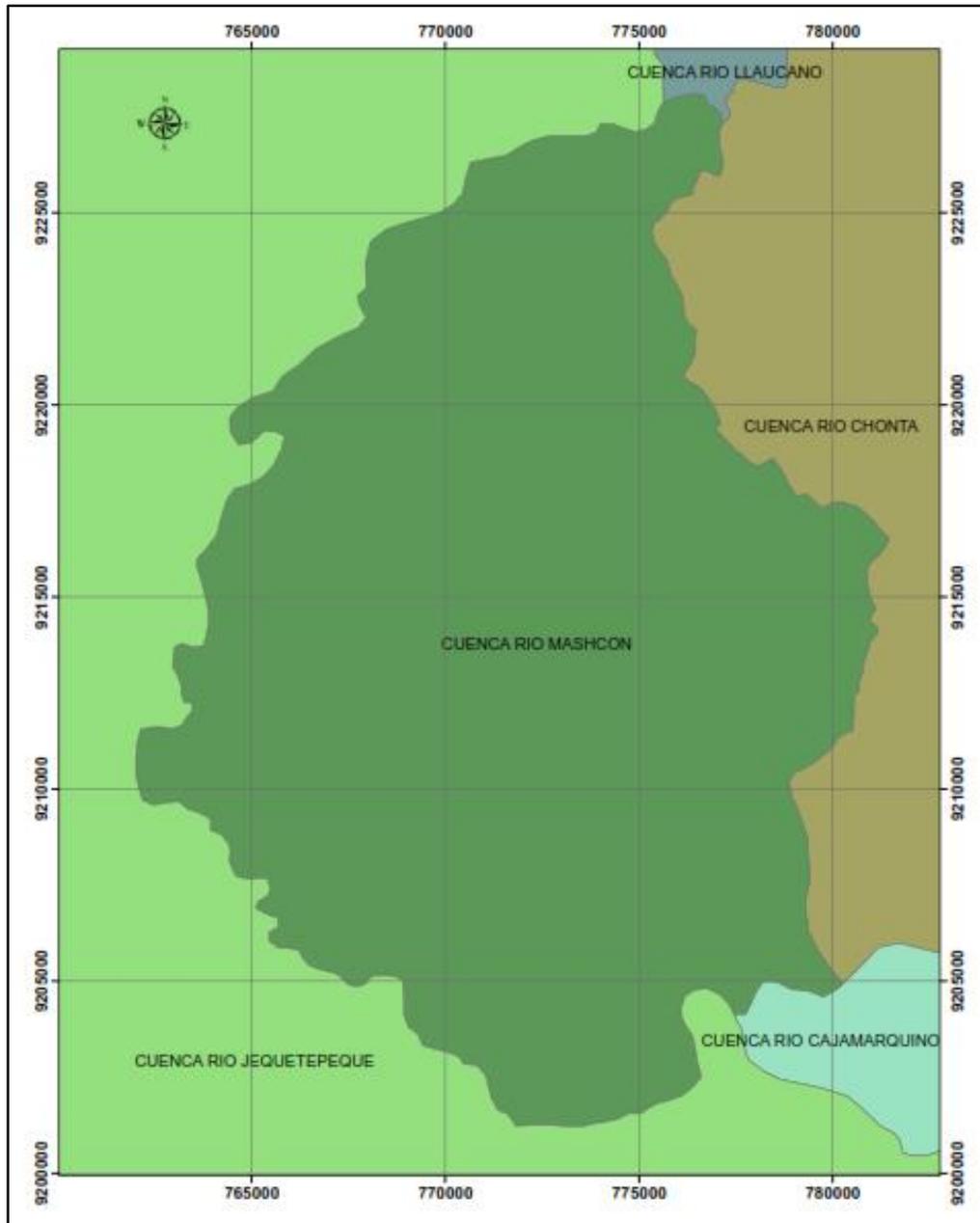


Figura 4: Hidrografía de la Cuenca Río Mashcón, 2018.

Fuente: Elaboración propia.

Demarcación Política.

La cuenca del río Mashcón está localizada en la zona norte este del Perú, políticamente pertenece al departamento de Cajamarca específicamente abarca la provincia de Cajamarca, distritos de Cajamarca y Baños del inca.

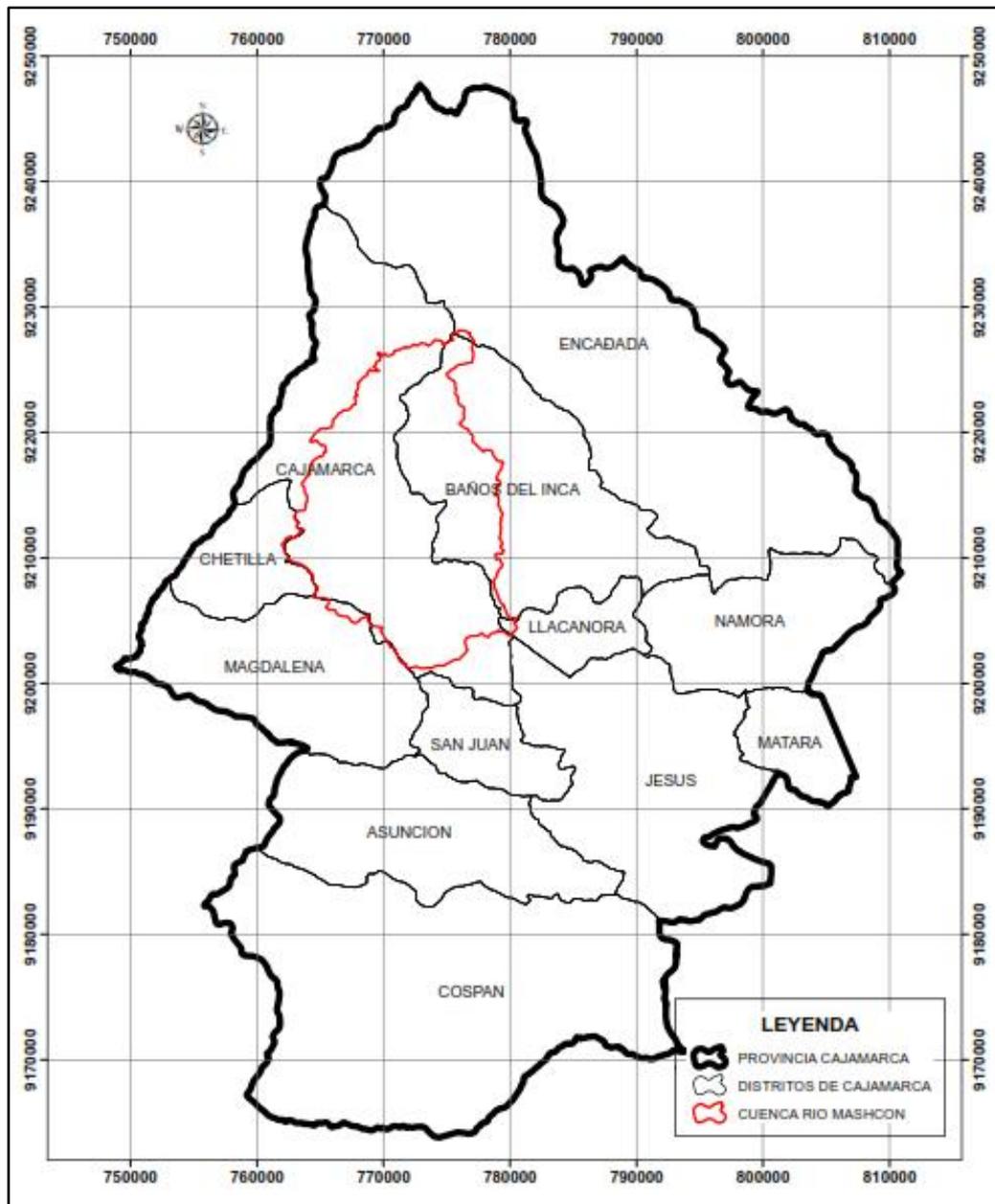


Figura 5: Demarcación política, 2018.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.8. Clima, Vegetación, Unidades Hidrográficas.

Clima.

Precipitación pluvial.

La precipitación promedio total anual varía entre 1,250 mm en las partes altas hasta 600 mm en las bajas; en todas las altitudes, el régimen de lluvias

a lo largo del año presenta un periodo lluvioso de octubre a abril con un decaimiento leve en noviembre y diciembre y otro, de escasa precipitación entre los meses de mayo a septiembre, que alcanza sus niveles más bajos de junio a agosto, donde se registran valores inferiores a 10 mm/mes, (ANA, 2017).

Temperatura.

En las partes altas, la temperatura máxima media mensual oscila entre 15.7°C y 19.3°C, valores que corresponden a los meses de marzo y enero, respectivamente, mientras que la temperatura mínima media mensual, se encuentran entre -1.2°C y 1.6°C, para los meses de agosto y marzo, respectivamente; en las partes bajas, la temperatura máxima media mensual oscila entre 20.9°C y 21.9°C, valores que corresponden a los meses de marzo y setiembre, respectivamente, mientras que la temperatura mínima media mensual se encuentran entre 4.6°C y 9.3°C, para los meses de julio y febrero, respectivamente, (ANA, 2017).

Humedad relativa.

En las zonas altas de las cuencas, la humedad relativa varía entre un máximo de 85.8% registrado en el mes de marzo, hasta un mínimo de 63% medido en el mes de julio, mientras que, en las partes bajas, este parámetro meteorológico varía entre 74.6% y ocurre en marzo, mientras el menor valor ocurre en el mes julio, cuando los instrumentos han registrado una humedad de 62.7%, (ANA, 2017).

Horas de sol.

De esta variable meteorológica, solo se tiene información referida a la parte baja de las cuencas y del valle del Cajamarquino, donde se reporta que a

nivel total mensual el menor valor medido es de 4.7 hrs y ocurre en el mes de marzo, mientras que el mayor valor ocurre en el mes de julio y es de 7.4 horas, (ANA, 2017).

Radiación solar

En relación a esta variable, solo se cuenta con información tomada en las partes bajas de la cuenca y el valle del Cajamarquino, donde a nivel total mensual, se reporta un menor valor de 16.4 (MJ/m²/d) medido en el mes de mayo, mientras que el mayor valor es de 19.0 (MJ/m²/d), ocurrido en el mes de noviembre, (ANA, 2017).

Vegetación.

El uso actual de la tierra está caracterizada por la presencia de Cultivos alimenticios (principalmente trigo, cebada, papa y maíz) que ocupan 19,778.27 ha (27.12% del area), Pastos naturales en 28,396.52 ha (38.93% del area), 5,133.40 ha (7.04%) que estan cubiertas por Pastos cultivados (principalmente Rye gras y trebol), Forestales en 1,549.17 ha (2.12%), Vegetacion arbustiva en 3,716.97 ha (5.10 %), 11,697.16 ha (16.04 % del area) son tierras improductivas, 24 lagunas naturales con una extension de 138.55 ha (0.19% del area), una represa de aproximadamente 4 ha (0.01%), Centros Urbanos (Cajamarca, Banos del Inca, Puyllucana, Combayo, Llacanora y Jesus) que ocupan aproximadamente 1,146.54 ha (1.57% del area), Minera Yanacocha en 1,044.92 ha (1.43%) y Otros usos (aeropuerto, lecho de rio y bofedales) en 332.60 ha (0.46% del area), (ANA, 2017).

Unidades Hidrográficas.

La cuenca del Rio Mashcón está dividida en nueve Unidades Hidrográficas (UH) menores, que en forma conjunta cubren un área de 315 km²: (1) Rio

Grande - UH 4,989,888, (2) Río Porcon – UH 4,989,889, (3) Río Tres Ríos - UH 4,989,882, (4) Río Paccha - UH 4,989,884, (5) Río Sambar – UH 4,989,886 (6) UH 4,989,881, (7) UH 4,989,887, (8) UH 4,989,883 y (9) UH 4,989,885; sus principales parámetros fisiográficos se presentan en la siguiente tabla, (ANA, 2017)

Tabla N° 3: Parámetros fisiográficos de las subcuencas del Río Mashcón, (ANA, 2017).

Subcuenca	Parámetros fisiográficos							
	Área cuenca (km ²)	Perímetro (km)	Índice de compacidad	Factor de forma	Pendiente (m/m)	Altura media (msnm)	Grado de ramificación	Densidad drenaje (Km/Km ²)
Río Grande	73.87	45.97	1.5	0.37	40.33	3240.58	5	0.85
Río Porcón	73.23	43.16	1.41	0.61	40.23	3359.86	5	0.98
Río Tres Ríos	69.41	48.67	1.64	0.24	36.36	3348.64	3	0.65
Río Paccha	30.11	25.44	1.3	0.35	26.76	3015.9	4	1.29
Río Sambar	18.09	27.58	1.82	0.16	27.64	3091.09	2	1.06
UH 4989881	28.95	32.1	1.67	2.76	68.1	2987.96	1	0.13
UH 4989883	13.75	18.25	1.38	0.43	32.2	2840.57	2	0.61
UH 4989885	6.34	15.3	1.7	1.48	1.5	2680.92	1	0.43
UH 4989887	1.06	6.17	1.68	0.72	0.5	2687.27	1	1.13

2.4. Procedimiento

2.4.1. Delimitación de la cuenca del río Mashcón.

Tradicionalmente la delimitación de cuencas se ha realizado mediante la interpretación de los mapas cartográficos. Este proceso, ha ido evolucionando con la tecnología. Hoy en día los sistemas de información geográfica SIG proporcionan una gama amplia de aplicaciones y procesos que, con entender los conceptos y teoría, se puede realizar de una forma más sencilla y rápida el análisis y delimitación de una cuenca.

Delimitar cuencas manualmente suele resultar un trabajo muy laborioso, sin embargo, ArcGIS cuenta con un potente conjunto de herramientas hidrológicas que permiten modelar el flujo de agua a través de una superficie de un Modelo de Elevación Digital (DEM), que ayudan a tomar decisiones en procesos de planificación. Para delimitar automáticamente una cuenca hidrográfica y construir la red hídrica a partir de un DEM.

Ingresamos a la página web de la USGS. <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

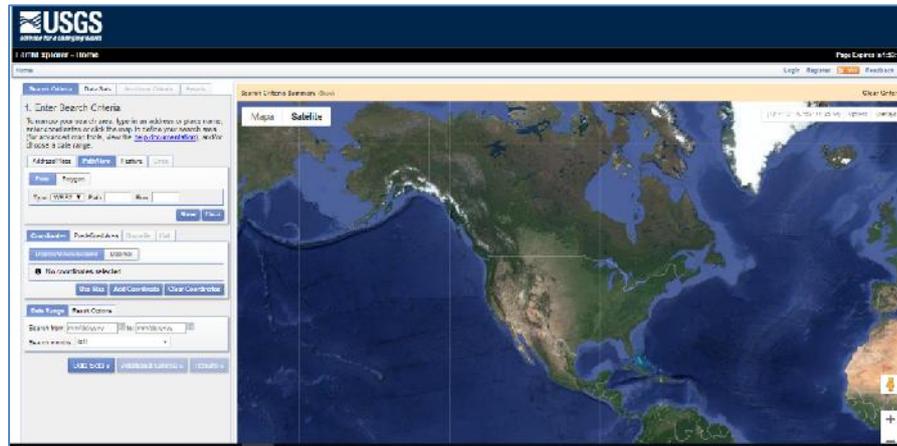


Figura 7: Página web de la USGS para descarga de imágenes satelitales. (Página web USGS, 2018).

Ingresamos un criterio de búsqueda, el cual fue definido por el Path/Row (9/65) ver figura N° 8, además del tipo de Worldwide reference system (sistema de referencia mundial) que fue definido como WRS-2 (usado para Landsat 7 y 8).

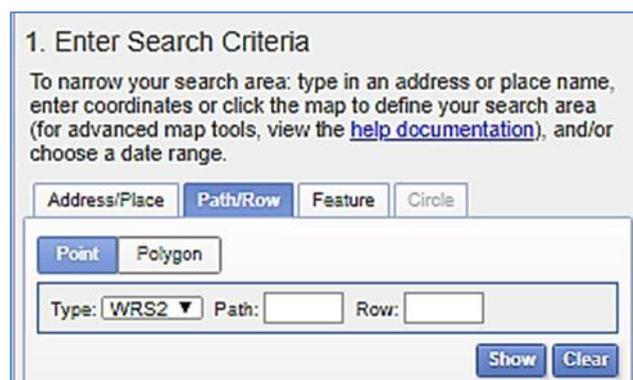


Figura 8: Página web de la USGS – Path/ Row. (Página web USGS, 2018).

PATH - ROW LANDSAT - PERU

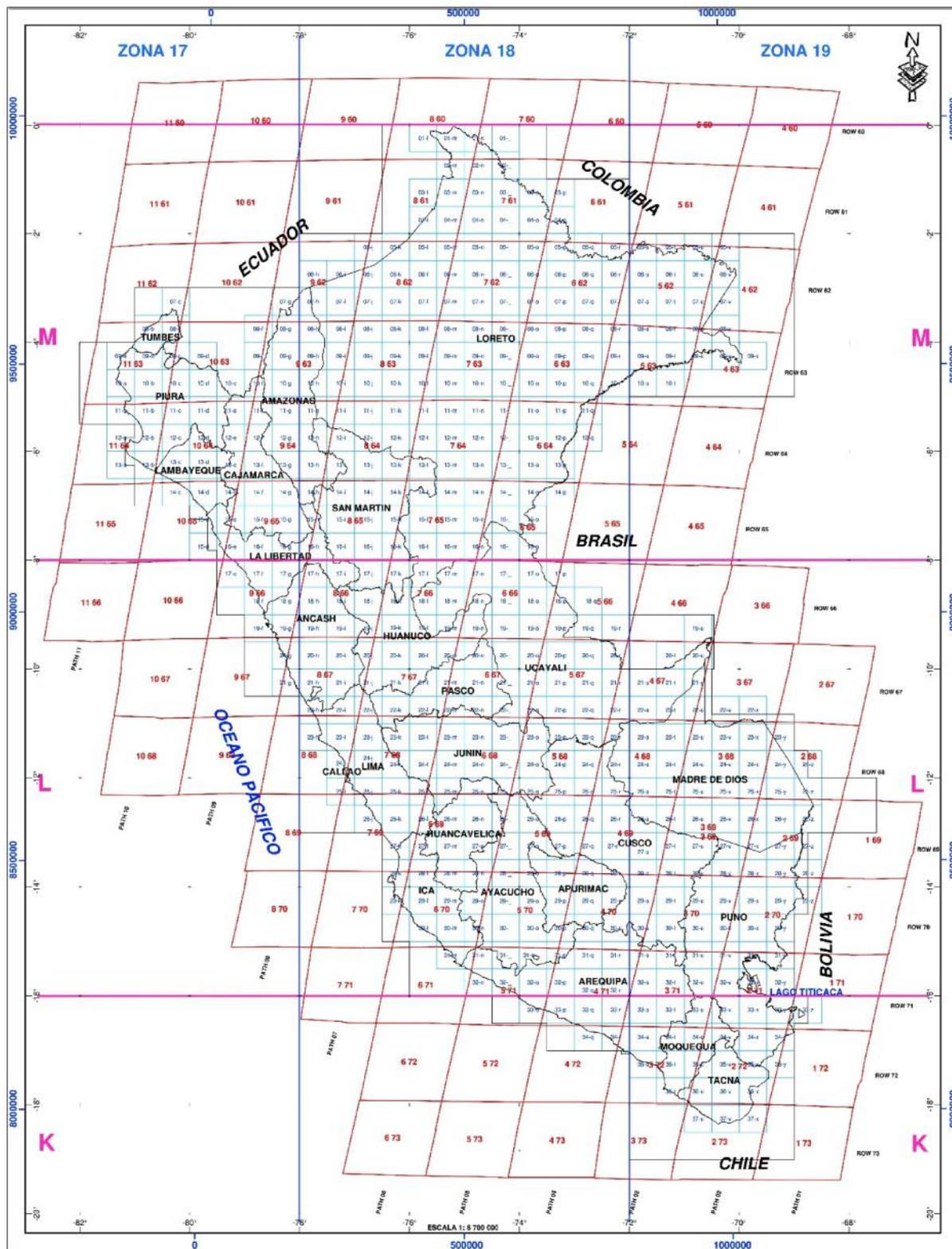


Figura 9: Path/ Row para Landsat 8 a nivel nacional. (MINEDU, 2018).

Posteriormente se señala la fecha de adquisición en la cual se eligió una fecha de estiaje que permita no tener inconvenientes atmosféricos.

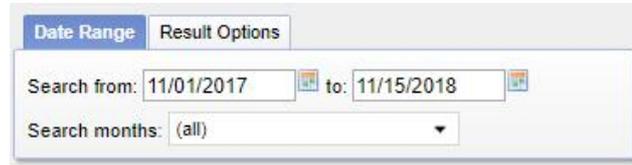


Figura 10: Página web de la USGS – selección de fecha. (Página web USGS, 2018).

Se elige el tipo de imagen que se desea trabajar, mediante la opción data sets, para lo cual se eligió imágenes Landsat 8.

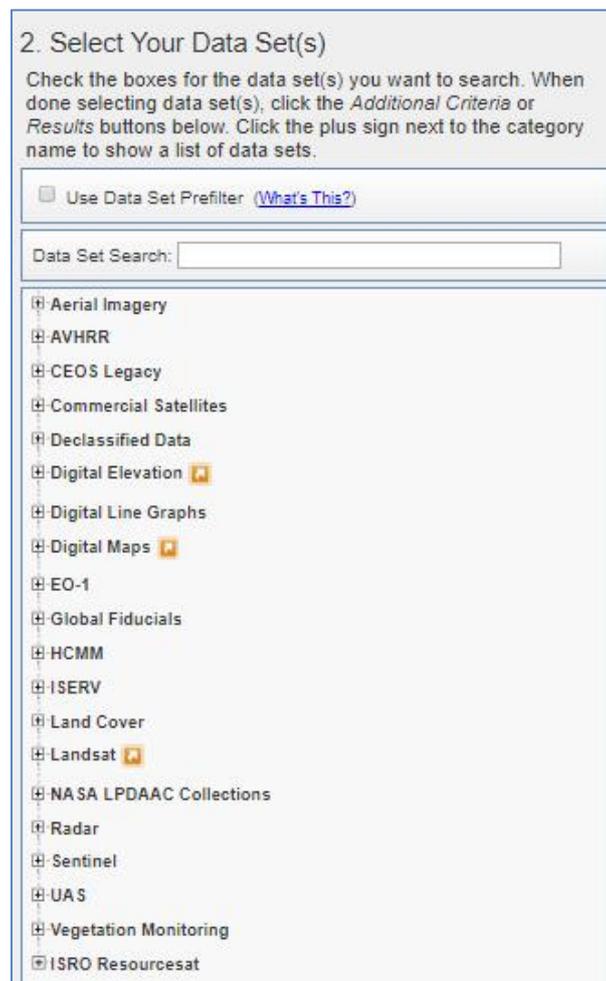


Figura 11: Página web de la USGS – selección del tipo de imagen. (Página web USGS, 2018).

Finalmente se elige la imagen deseada y se realiza la orden a la USGS:



Figura 12: Página web de la USGS – selección de imagen. (Página web USGS, 2018).

La imagen descargada corresponde a una imagen tipo Landsat 8 OLI TIRS del 25 de junio del 2018, con características especificadas a continuación.

Tabla N° 4: Características de descarga de la imagen satelital. (Página web USGS, 2018)

FICHA DE ADQUISICIÓN DE IMAGEN 9/65		
Satélite	TERRA	
Sensor	LANDSAT 8	
Fuente	USGS	
ID	LC 80090652018176LEN00	
PATH/ROW	09	65
Fecha de adquisición	25/06/2018	
Área de cobertura	60 km x 60 km	
Bandas	Longitud de onda (μm)	Resolución espacial (m)
Costal aerosol (B1)	0.43 – 0.45	30
Azul (B2)	0.45 – 0.51	30
Verde (B3)	0.53 – 0.59	30
Rojo (B4)	0.64 – 0.67	30
Infrarrojos (B5)	0.85 – 0.88	30
SWIR 1 (B6)	1.57 – 1.65	30
SWIR 2 (B7)	2.11 – 2.29	30
Pancromática (B8)	0.50 – 0.68	15
Cirrus (B9)	1.36 – 1.38	30
Infrarrojo Térmico 1 (B10)	10.6 – 11.19	100
Infrarrojo Térmico 2 (B11)	11.5 – 12.51	100



Fuente: Elaboración propia.

2.4.3. Corrección de la imagen satelital.

Una imagen de satélite está sometida a una serie de interferencias que hacen que la información que quiere obtenerse aparezca perturbada por una serie de errores:

- Fallos en los sensores, generan pixeles incorrectos (corrección radiométrica)
- Alteraciones en el movimiento del satélite y el mecanismo de captación en los sensores, generan distorsiones en la imagen global (corrección geométrica)
- Interferencia de la atmósfera, alteran de forma sistemática los valores de los pixeles (corrección atmosférica)

Corrección radiométrica

La corrección radiométrica implica por una parte la restauración de líneas o píxeles perdidos y por otra la corrección del bandeo de la imagen.

Corrección geométrica

Una imagen de satélite, al igual que las fotografías aéreas, no proporciona información georreferenciada; cada pixel se ubica en un sistema de coordenadas arbitrario de tipo fila-columna como los que manejan los programas de tratamiento digital de imágenes. El proceso de georreferenciación consiste en dar a cada pixel su localización en un sistema de coordenadas estandar (UTM, lambert, coordenadas geográficas) para poder, de este modo, combinar la imagen de satélite con otro tipo de capas en un entorno SIG. Tras la georreferenciación se obtiene una nueva capa en la que cada columna corresponde con un valor de longitud y cada fila con un valor de latitud. En caso de que la imagen no hubiese sufrido ningún tipo de distorsión, el procedimiento sería bastante sencillo, sin embargo, una imagen puede sufrir diversos tipos de distorsiones.

Corrección Atmosférica.

La corrección radiométrica trata de corregir problemas mecánicos en el sensor que generan valores erróneos en píxeles concretos y la corrección geométrica ubica los píxeles en el espacio geográfico corrigiendo las posibles distorsiones. Por su parte la corrección atmosférica trata de evaluar y eliminar las distorsiones que la atmósfera introduce en los valores de radiancia que llegan al sensor desde la superficie terrestre. Por tanto, se va a basar en modelos físicos más complejos que los modelos estadísticos utilizados anteriormente. El primer paso es convertir los Niveles Digitales (ND) almacenados por el sensor en valores de radiancia.

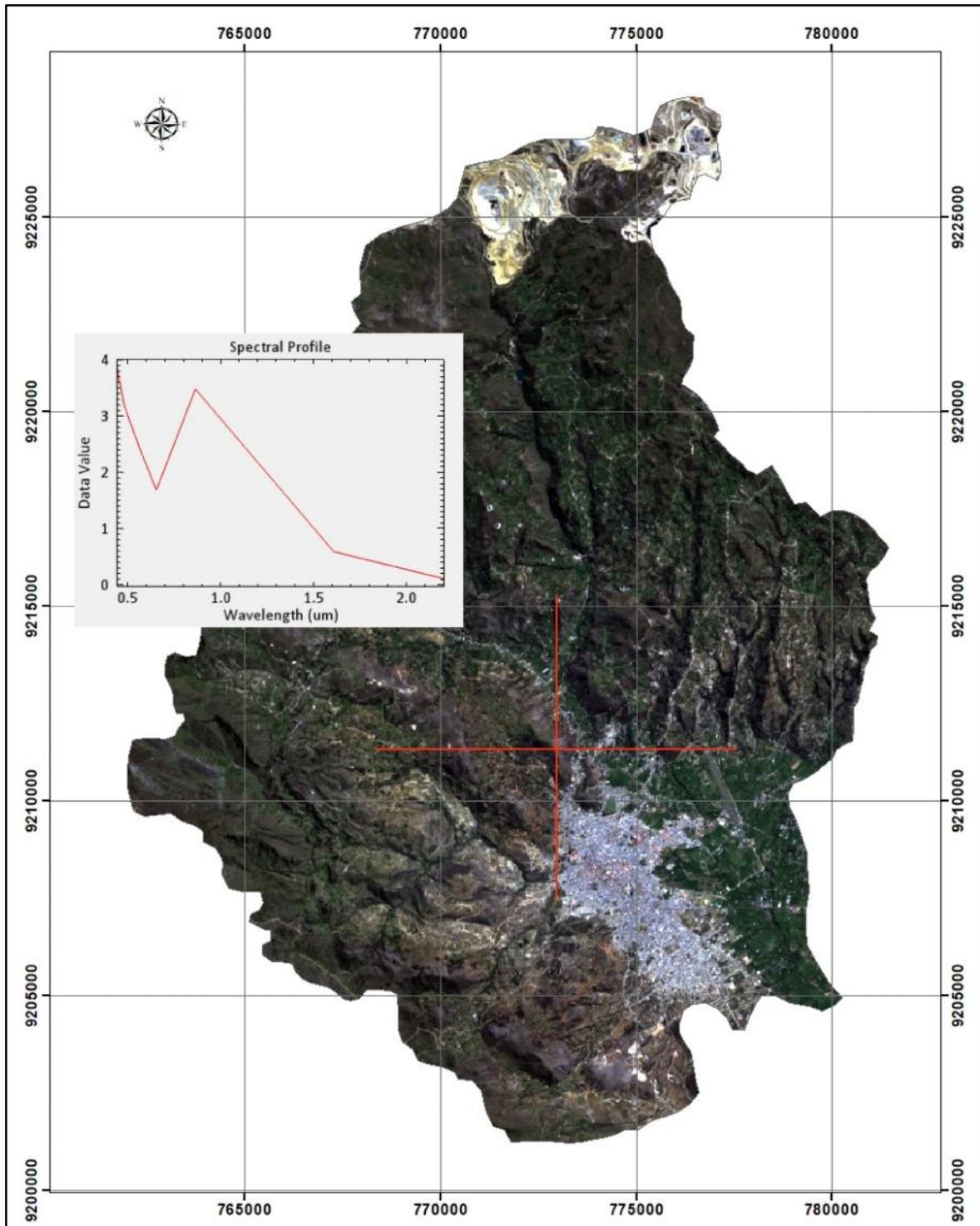


Figura 13: Imagen en crudo Landsat 8 – zona de trabajo. (Satélite Landsat, 2018).

Fuente: Elaboración propia.

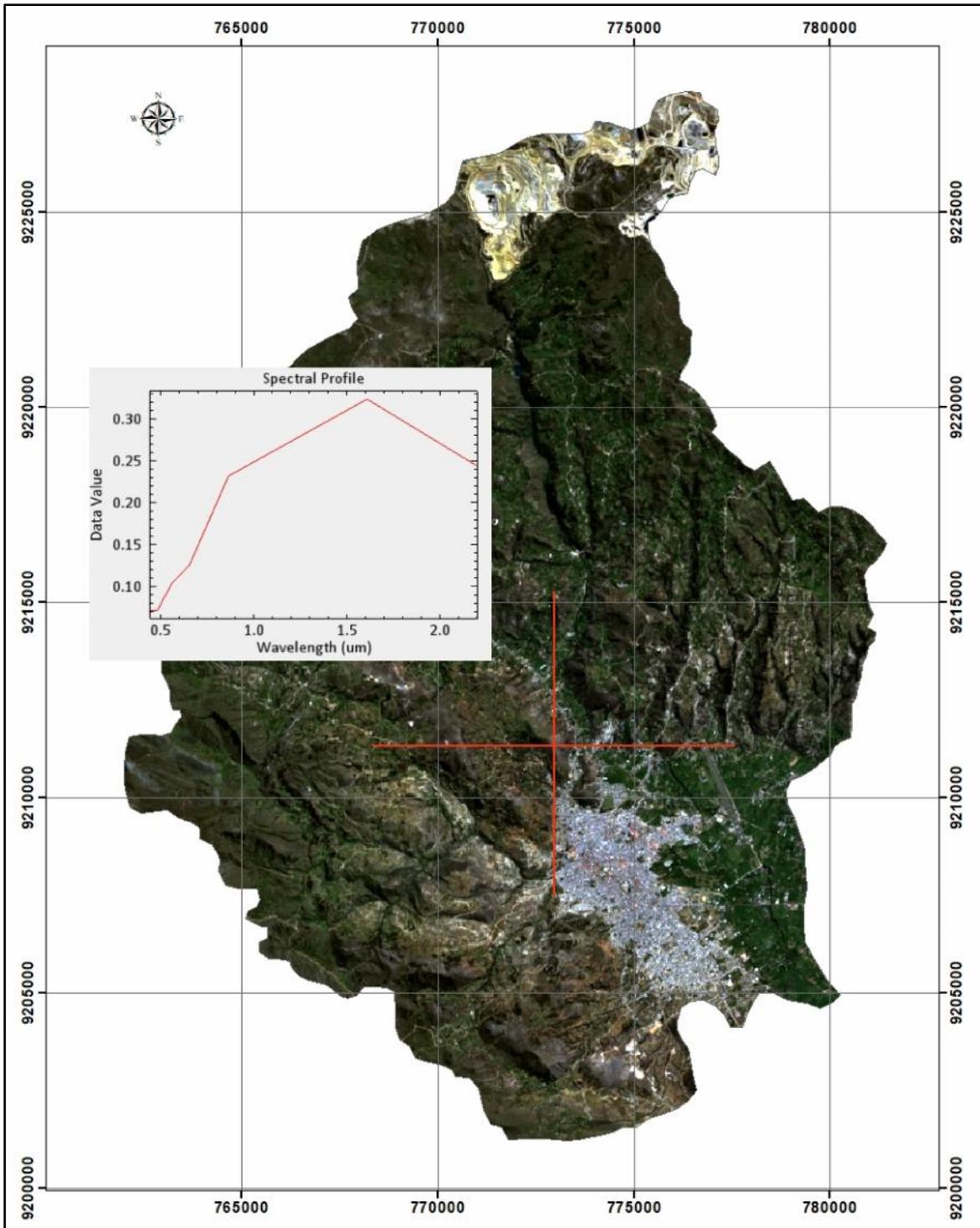


Figura 14: Corrección de la imagen Landsat 8 – zona de trabajo, 2018.

Fuente: Elaboración propia.

2.4.4. Análisis y obtención de los parámetros superficiales para identificar agua subterránea.

Índice de vegetación de diferencia normalizada– NDVI.

Obtención

El NDVI como parámetro superficial se puede analizar espectralmente como la influencia que tiene la clorofila con la energía electromagnética del sol, en tal sentido se puede verificar que la clorofila no absorbe toda la luz del sol uniformemente, Las moléculas de clorofila preferentemente absorben la luz roja y azul para usar en la fotosíntesis. Ellas deben absorber tanta cantidad como 70% a 90% de la luz incidente. Mucho menos cantidad de la luz verde es absorbida y más es reflejada, entonces el observador humano, que puede ver sólo el espectro visible, observa la reflexión dominante de la luz verde como vegetación viva.

Es por ello que es un índice usado para medir la diferencia normalizada entre las reflectancias del rojo y del infrarrojo cercano, proporcionando una medida sobre la cantidad, calidad y desarrollo de la cobertura vegetal y vigorosidad en áreas extensas.

Deduciendo de esta forma la siguiente fórmula para su obtención

$$NDVI = \frac{(pS_{NIR} - pS_{RED})}{(pS_{NIR} + pS_{RED})}$$

La aplicación en Imágenes de tipo Landsat 8 va de acuerdo al rango espectral multibanda es por ello que la formula quedaría expresada como:

$$NDVI = \frac{(pS_{B5} - pS_{B4})}{(pS_{B5} + pS_{B4})}$$

Donde

B5: Banda NIR con rango espectral de 0.85 – 0.88 μm

B4: Banda RED con rango espectral de 0.64 – 0.67 μm

Análisis

El comportamiento de la vegetación está supeditado por el espectro infrarrojo cercano de las imágenes Landsat 8 y, por supuesto, facilita la separación de las superficies de vegetación de las superficies sin vegetación, que son usualmente muy oscuras en el infrarrojo cercano. Además, las diferencias en la reflectancia de las especies de plantas frecuentemente son más pronunciadas en el infrarrojo cercano.

Es por ello que partiendo de la imagen obtenida (ver imagen N° a), podemos definir la vegetación muy saludable, sana y no saludable para así caracterizar las zonas con mayor cantidad de vegetación con y sin aporte hídrico superficial, además de las que son abastecidas por agua subterránea.

Es por ello que a partir de la reflectancia y absorción de las firmas espectrales de la vegetación se caracteriza de la siguiente manera:

+0.85<NDVI<+1.00 Material vegetal muy saludable.

+0.60<NDVI<+0.85 Material vegetal sano.

+0.30<NDVI<-0.60 Material vegetativo no saludable y/o suelo desnudo.

0.00<NDVI<+0.30 Cubierta artificial.

-1.00<NDVI<0.00 Agua superficial

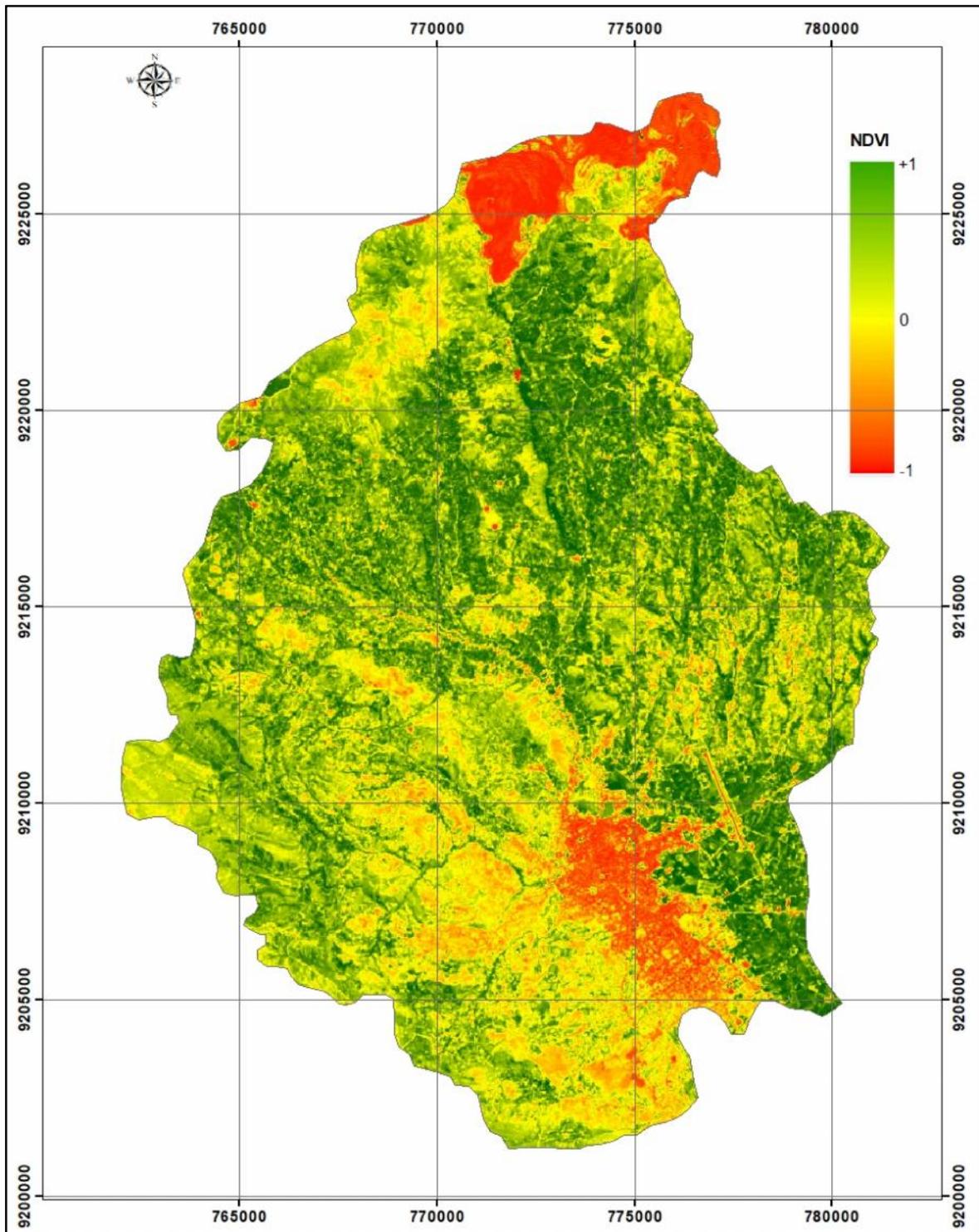


Figura 15: Obtención de NDVI de la zona de estudio, 2018.

Fuente: Elaboración propia.

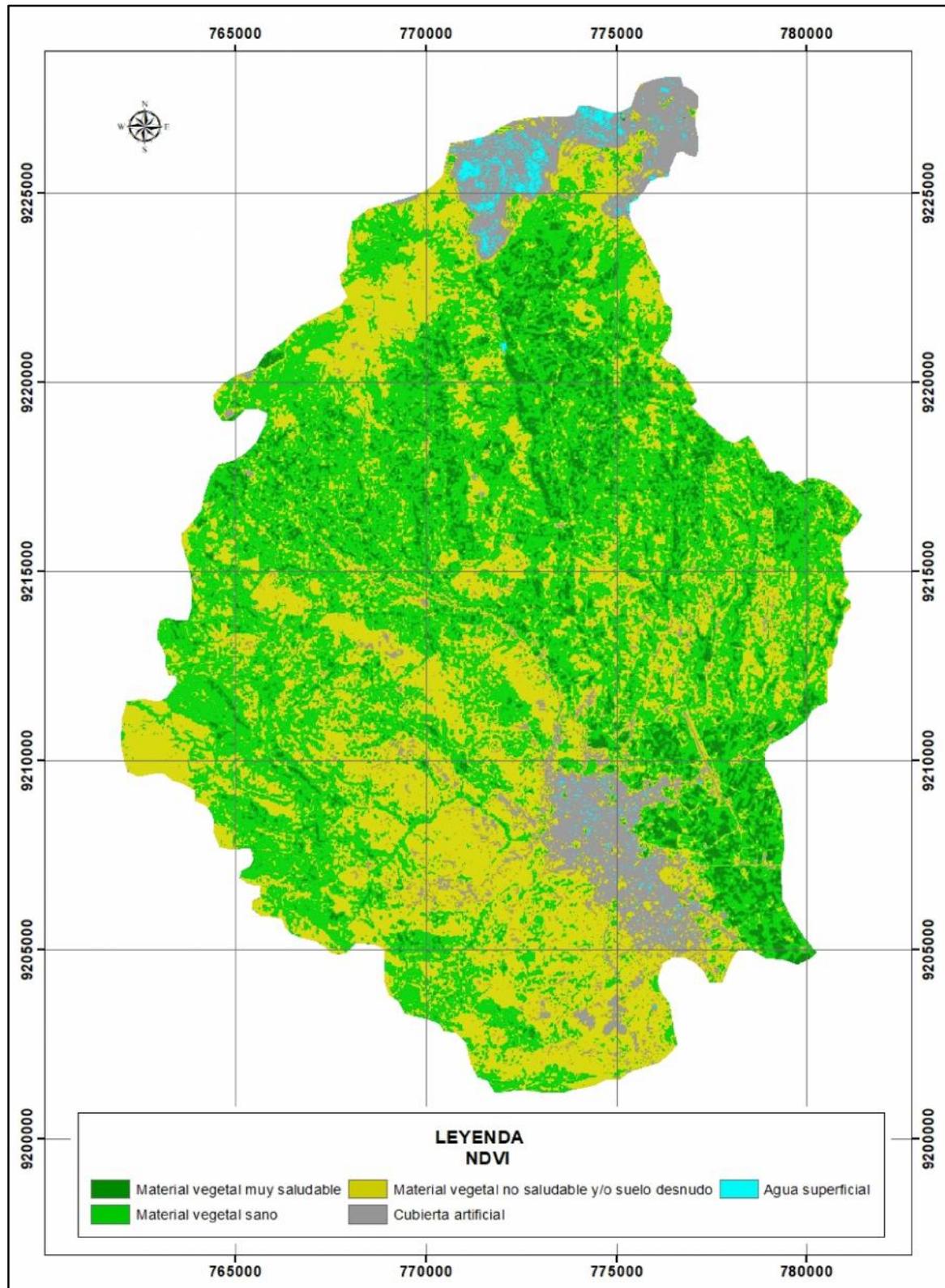


Figura 16: Análisis de NDVI de la zona de estudio, 2018.

Fuente: Elaboración propia.

Índice de diferencia normalizada agua – NDWI.

Obtención

Es un indicador numérico ya mencionado en el marco teórico, derivada de imágenes satelitales ópticas como la imagen Landsat 8, usando las ondas de infrarrojo cercano y corta las bandas espectrales del infrarrojo. Esta última banda espectral está muy asociada con cambios en el contenido de agua de vegetación y la estructura de mesófilo esponjoso en las cubiertas vegetales.

La respuesta del infrarrojo cercano, banda espectral se correlaciona con la estructura interna de la hoja y la hoja de materia seca, excluyendo el contenido de agua.

Es por ello que es considerada como una variación del NDVI y su fórmula se expresa:

$$NDWI = \frac{(pS_{GRE} - pS_{NIR})}{(pS_{GRE} + pS_{NIR})}$$

Donde la fórmula se expresa en función a las bandas espectrales de la imagen Landsat 8 como:

$$NDWI = \frac{(pS_{B3} - pS_{B4})}{(pS_{B3} + pS_{B4})}$$

Donde

B3: Banda Green con rango espectral de 0.53 a 0.59 μm

B4: Banda Red con rango espectral de 0.64 a 0.67 μm

Análisis

La mayor reflectividad del agua clara se produce en el espectro del azul (400-500 μm) reduciéndose hacia el infrarrojo próximo (700-1300 μm). Las variaciones del espectro de agua se detectan en las longitudes de onda más cortas del visible (azul, 400-500 μm y verde, 500-600 μm). Aguas con grandes cantidades de sedimentos en suspensión y plancton, producen un aumento de la reflectancia en el visible. Además, la reflectancia del agua cambia con el contenido de clorofila. Aumento en el contenido de clorofila, producen una disminución de reflectancia en el azul, y un incremento en el verde. La nieve presenta un comportamiento espectral diferente al del agua, con una reflectividad muy elevada en las bandas del visible (0.4-0.7 μm) reduciéndose hacia el infrarrojo próximo, es por ello que a partir de los rangos espectrales analizados en el agua podemos caracterizar los diferentes tipos de cubierta.

Del análisis de firmas espectrales podemos obtener la siguiente clasificación:

0.00 < NDWI < +1.00 Agua superficial.

-0.30 < NDWI < 0.00 Cubierta Artificial.

-0.60 < NDWI < -0.30 Suelo Desnudo.

-1.00 < NDWI < -0.60 Vegetación.

En el cual se aprecia la presencia de agua superficial la cual engloba todas las corrientes superficiales de agua como ríos y quebradas, cubiertas artificiales que engloba lagos, lagunas y represamientos, suelo desnudo que engloba suelo con poco contenido vegetal y material rocoso y vegetación que engloba vegetación poco vigorosa a vigorosa.

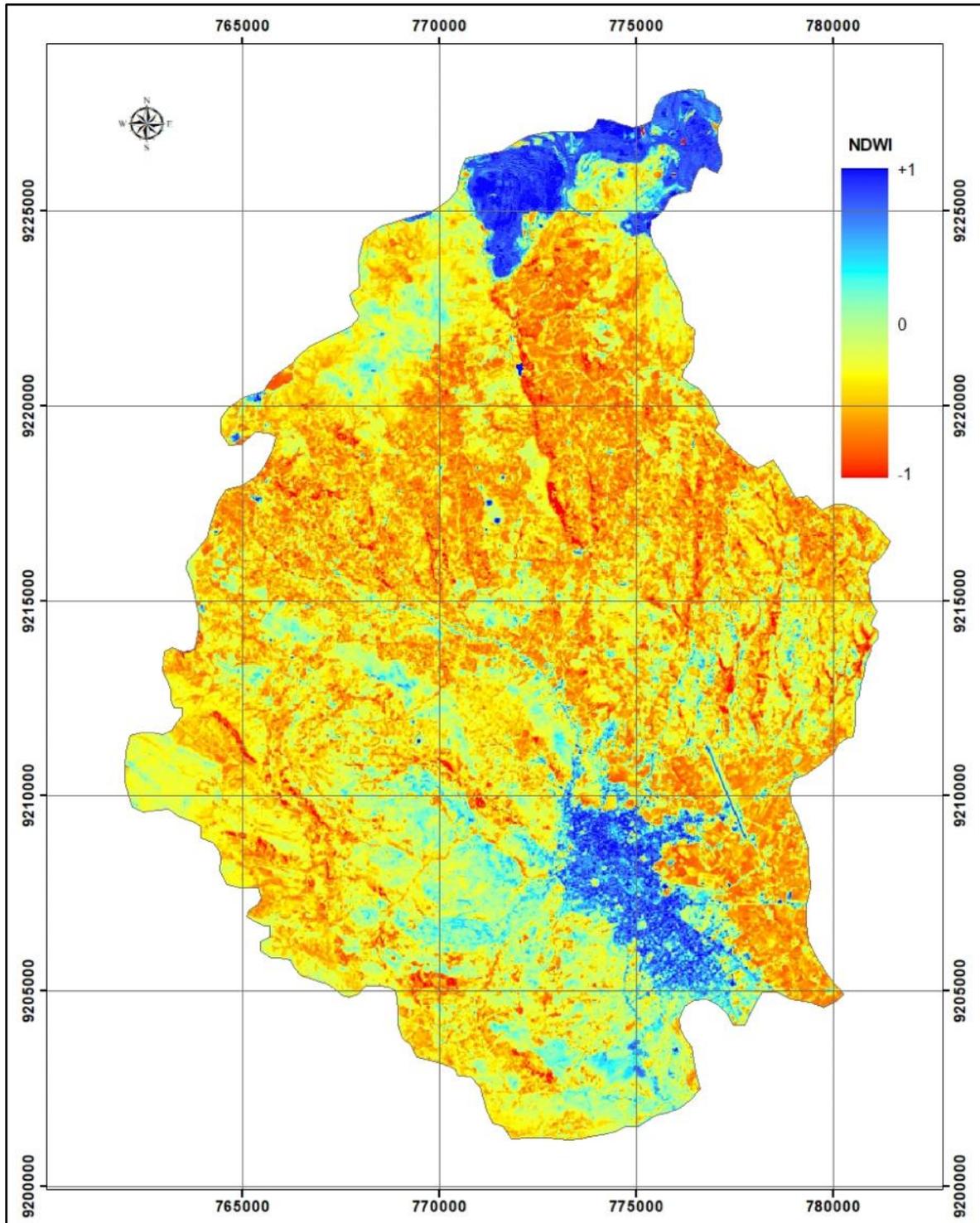


Figura 17: Obtención de NDWI de la zona de estudio, 2018.

Fuente: Elaboración propia.

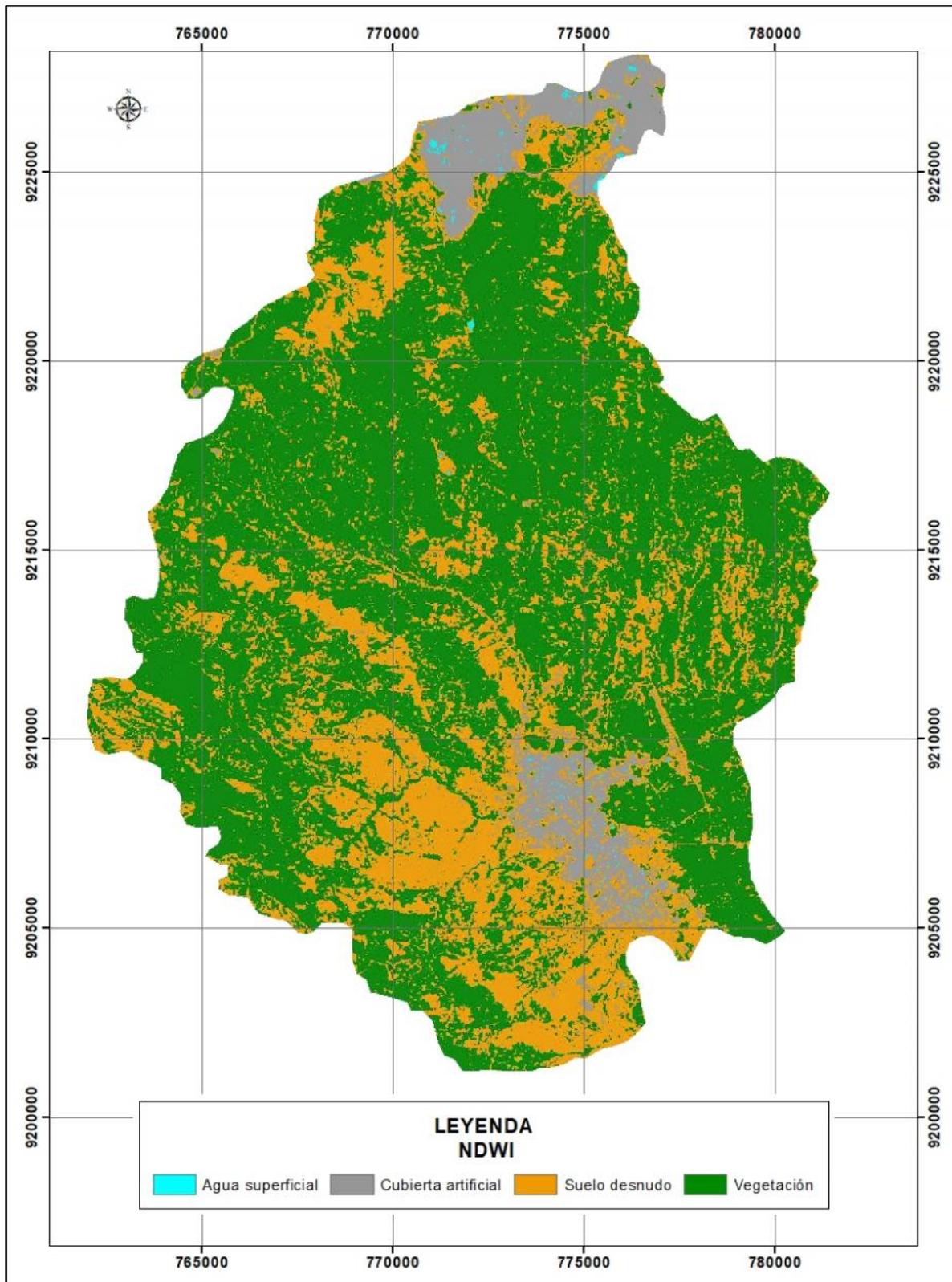


Figura 18: Análisis de NDVI de la zona de estudio, 2018.

Fuente: Elaboración propia.

Temperatura superficial.

Obtención

La termografía infrarroja permite detectar la radiación que es capaz de emitir la superficie terrestre simplemente por estar por encima del cero absoluto, no siendo necesario el contacto físico para hacer la medición, ni la estabilización de temperaturas. De esta manera, las medidas son rápidas, precisas y fiables.

Es por ello que para su cálculo es necesario tener ciertas características atmosféricas favorables, para no obtener valores fantasmas ni valores erróneos de cálculo.

Para calcular las temperaturas superficiales se hizo uso de la siguiente fórmula:

$$T_b = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L\lambda} + 1\right)}$$

En la cual se convierte a temperatura de brillo las temperaturas superficiales

Donde:

T_b: Temperatura de brillo aparente en grados.

Lλ: Radiancia espectral en el sensor (Radiancia en el satélite), unidad de medida (vatios/ (metro cuadrado * ster * μm))

K₁: Es la constante de conversión térmica específica para cada banda termal.

K₂: Es la constante de conversión térmica específica para cada banda termal

Tabla N° 5: Constantes de calibración de la banda térmica del satélite Landsat 8.

Tabla N° 6: Constantes de calibración de la banda térmica del satélite Landsat 8.

Satélite	Bandas	K1 W m- 2 sr-1 µm-1	k2 Kelvin
Landsat 8	10	774.89	1321.08
	11	480.89	1201.14

Fuente: LandSat 8 -(Alexander, 2013).

El resultado de cálculo obtenido para toda la zona de estudio por pixel sería un trabajo extremadamente extenso, pero haciendo uso del software podemos ingresar gran cantidad de información y procesar en gran escala obteniendo de esta forma la imagen N° 19, en la cual se aprecia el cálculo de temperatura de toda la cuenta del río Mashcón.

Análisis

De la imagen obtenida aún se tiene que hacer las conversiones de grados kelvin a grados centígrados ya que dentro del análisis trabajaremos con escalas de temperaturas comerciales para Perú, teniendo como referencia que $C^{\circ} = K^{\circ} - 273.15$.

Obteniéndose así temperaturas que oscilan entre $4 C^{\circ}$ a $35 C^{\circ}$ con una temperatura promedio de $21^{\circ}C$, esta temperatura se ingresará a un árbol de decisiones para generar un parámetro dicotómico de clasificación teniendo como base la evapotranspiración del agua en todas las cubiertas de la superficie terrestre, es decir se considerara favorable a la infiltración temperaturas menores a $21^{\circ}C$ y desfavorable temperaturas mayores a $21^{\circ}C$, además se tendrá en cuenta que cubiertas rocosas, de baja elevación y pobres en vegetación poseen temperaturas altas; zonas con alta elevación, presencia de vegetación y presencia de agua superficial son zonas con temperaturas generalmente bajas.

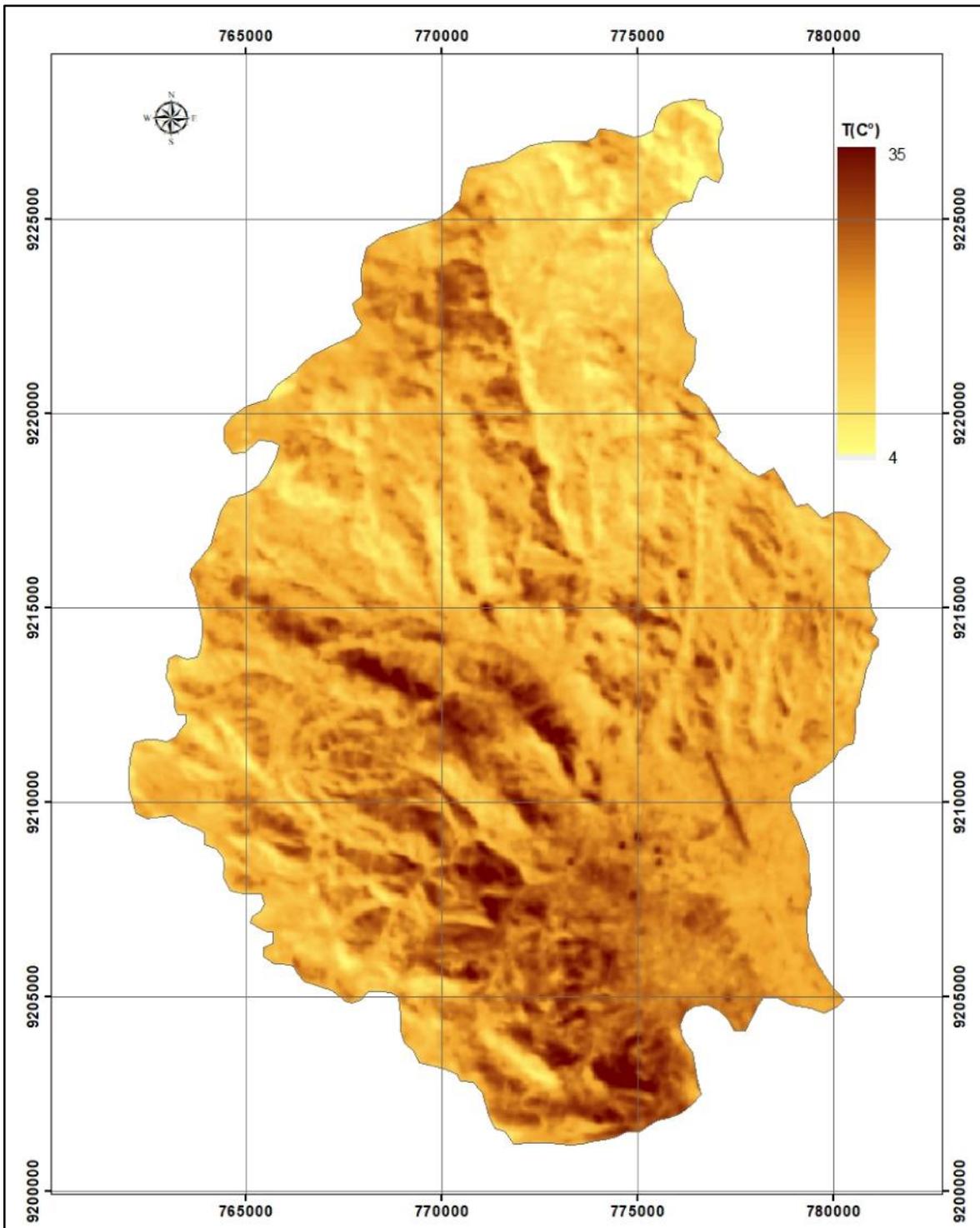


Figura 19: Obtención de temperaturas de la zona de estudio, 2018.
Fuente: Elaboración propia.

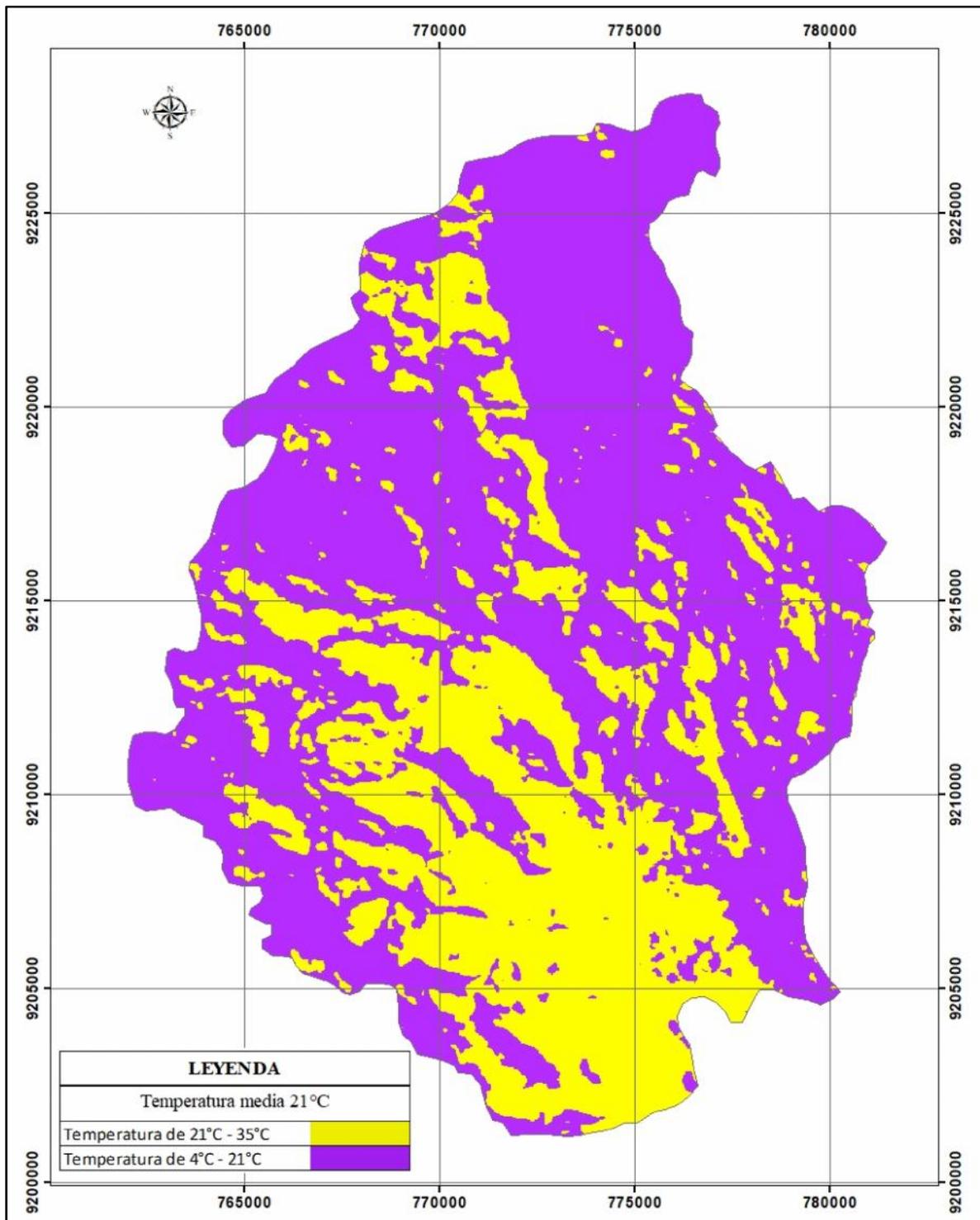


Figura 20: Análisis de temperaturas de la zona de estudio, 2018.

Fuente: Elaboración propia.

Pendientes

Obtención

Para la obtención de un plano de pendientes, se debe generar un DEM que es una representación digital de la topografía basada en una sola elevación que representa toda el área de la zona de estudio.

Para la generación del DEM se utilizó:

- Datos de ráster (datos de cuadrícula uniformemente espaciados)
- Las celdas contienen valores para la altura de una entidad o sitio referenciado a un datum vertical común, el cual corresponde al datum WGS 84 zona 17s
- La resolución se refiere al tamaño de los píxeles de los datos, la cual se consideró una resolución de 15 m.

Posteriormente se realiza un conjunto de triángulos adyacentes, no superpuestos, calculados a partir de puntos espaciados de forma irregular, con coordenadas horizontales X, Y y elevaciones verticales Z, estos datos servirán para general modelos de pendientes el cual se utilizará para definir las zonas favorables a la infiltración y almacenamiento de agua subterránea.

El plano de pendientes se trabajó en grados sexagesimales de inclinación teniendo como referencia la clasificación de Schosinsky (2001), en la cual hace una clasificación del grado de infiltración en función del porcentaje de inclinación, lo que favorecerá para caracterizar la zona de trabajo en su totalidad y obtener como parámetro las zonas más favorables a la infiltración (Ver figura N° 21).

Análisis

Se obtuvo a partir del procesamiento de la imagen DEM pendientes de 0° a 41 ° y teniendo como referencia la clasificación de Schosinsky (2001), se define que en la zona de estudio existen pendientes favorables, moderada y desfavorables a la infiltración, pero en mayor proporción pendientes favorables a la infiltración.

Tabla N° 7: Grado de infiltración en función de la pendiente.

PENDIENTES		
Porcentaje (%)	Grados (°)	Grado de infiltración
0 - 15%	0° - 13.5°	Favorable
15 % - 30%	13.5° - 27°	Moderadamente
Mayores a 30%	Mayores a 27°	Desfavorable

Fuente: Schosinsky (2001)

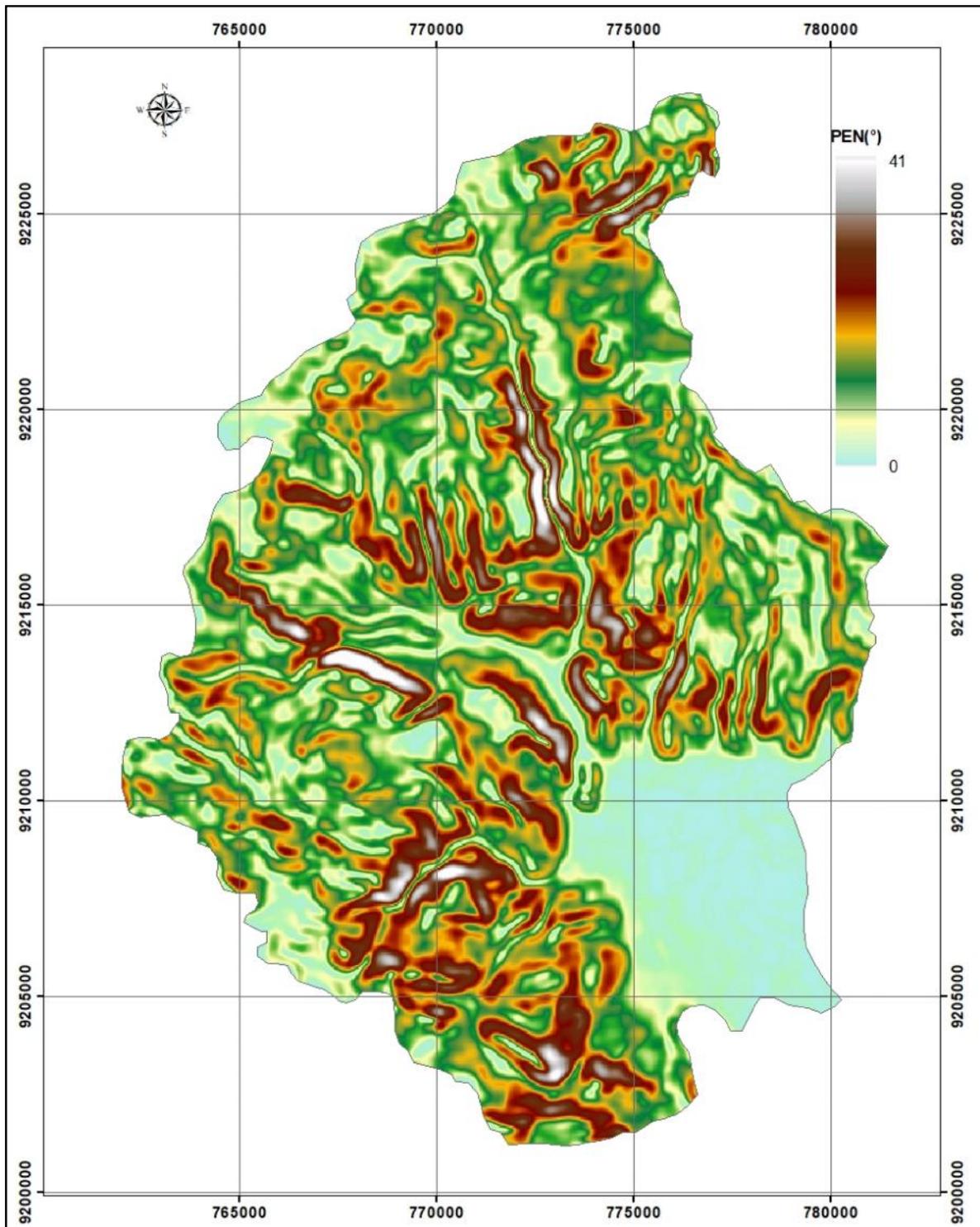


Figura 21: Obtención de pendientes de la zona de estudio, 2018.
Fuente: Elaboración propia.

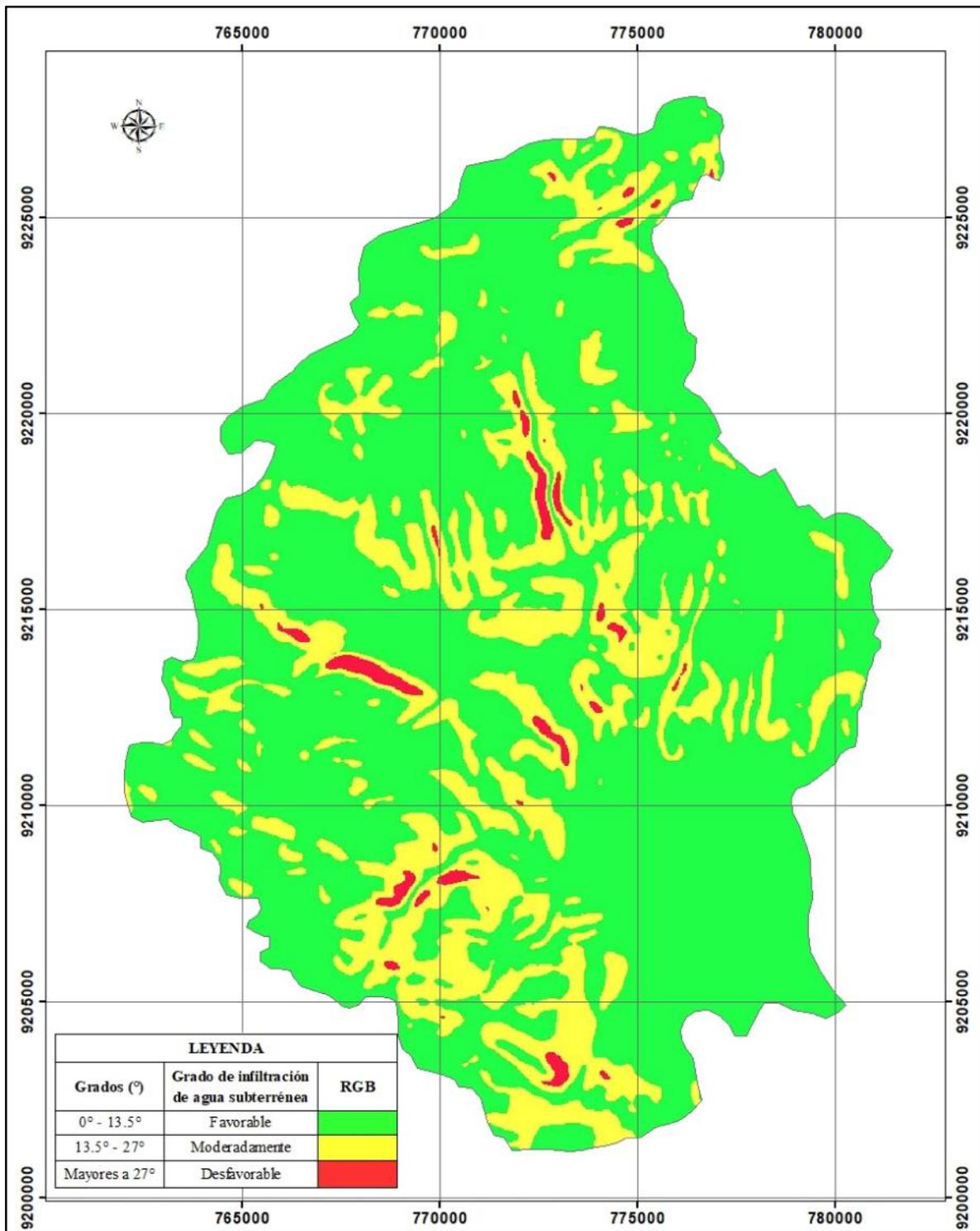


Figura 22: Análisis de pendientes de la zona de estudio, 2018.

Fuente: Elaboración propia.

Árbol de decisiones.

El árbol de decisiones permite realizar clasificaciones de varias etapas utilizando una serie de decisiones binarias para colocar píxeles en clases. Cada decisión divide los píxeles de un conjunto de imágenes en dos clases basadas en una expresión. Puede dividir cada nueva clase en dos clases más basada en otra expresión. Puede definir tantos nodos de decisión, según sea necesario.

Los resultados de las decisiones son clases. De este modo se puede utilizar los datos de diferentes fuentes y archivos para hacer un clasificador de árbol de decisión individual. Es por ello que el árbol de decisiones es una herramienta dicotómica de gran ayuda en la clasificación de materiales pues permite ingresar tantos parámetros como complejidad se requiera en la clasificación para lo cual en la presente investigación se utilizó parámetros como:

Pendiente, Temperatura superficial, NDVI Y NDWI ya mencionados en capítulos anteriores y los cuales permitirán la obtención de zonas favorables a la infiltración de agua subterránea.

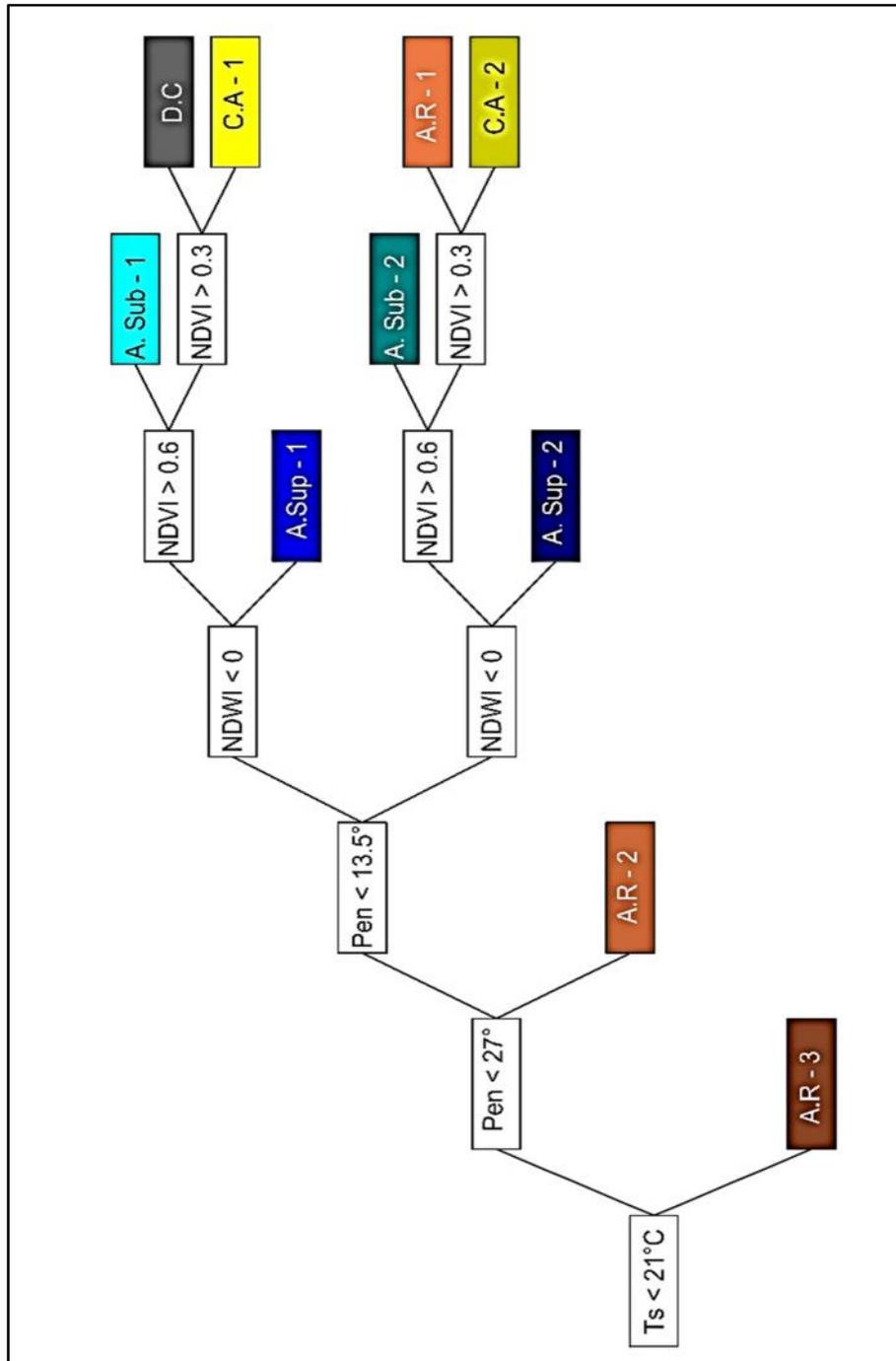


Figura 23: Árbol de decisiones de la zona de estudio, 2018.

Fuente: Elaboración propia.

Donde

TS: Temperatura superficial

PEN: Pendientes

NDWI: Índice de Diferencia Normalizada Agua

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

A. Sub - 1: Agua Subterránea tipo 1.

A. Sub - 2: Agua Subterránea tipo 2.

A. Sup - 1: Agua Superficial tipo 1.

A. Sup - 2: Agua Superficial tipo 2.

A.R - 1: Afloramiento Rocoso tipo 1.

A.R - 2: Afloramiento Rocoso tipo 2.

A.R - 3: Afloramiento Rocoso tipo 3.

C.A - 1: Cubierta Artificial tipo 1.

C.A - 2: Cubierta Artificial tipo 2.

D.C: Depósito Cuaternario.

Una vez ingresados los parámetros al clasificador podemos analizar lo siguiente:

Tabla N° 8: Agua subterránea tipo 1, 2018.

Agua Subterránea Tipo 1 (A. Sub - 1)

Ts < 21 C° Bajo nivel de evapotranspiración

Pen < 13.5 Favorable a la infiltración

NDWI < 0 Sin presencia de agua superficial

NDVI > 0.6 Presencia de vegetación sana a muy saludable

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 9: Agua subterránea tipo 2, 2018.

Agua Subterránea Tipo 2 (A. Sub - 2)	
Ts < 21 C°	Bajo nivel de evapotranspiración
13.5 < Pen < 27	Moderadamente favorable a la infiltración
NDWI < 0	Sin presencia de agua superficial
NDVI > 0.6	Presencia de vegetación sana a muy saludable

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 10: Agua superficial tipo 1, 2018.

Agua Superficial Tipo 1 (A. Sup - 1)	
Ts < 21 C°	Bajo nivel de evapotranspiración
Pen < 13.5	Favorable a la infiltración
NDWI > 0	Con presencia de agua superficial
NDVI > 0.6	Presencia de vegetación sana a muy saludable

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 11: Agua superficial tipo 2, 2018.

Agua Superficial Tipo 2 (A. Sup - 2)	
Ts < 21 C°	Bajo nivel de evapotranspiración
NDVI > 0.6	Presencia de vegetación sana a muy saludable
13.5 < Pen < 27	Moderadamente favorable a la infiltración
NDWI < 0	Sin presencia de agua superficial

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 12: Afloramiento rocoso tipo 1, 2018.

Afloramiento Rcoso Tipo 1 (A.R - 1)	
NDVI < 0	Sin presencia de agua superficial
13.5 < Pen < 27	Medianamente favorable a la infiltración
NDVI > 0.3	Diversos materiales sin agua superficial
Ts < 21 C°	Bajo nivel de evapotranspiración

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 13: Afloramiento rocoso tipo 2, 2018.

Afloramiento Rocosu Tipo 2 (A.R - 2)	
Pen > 27	Desfavorable a la infiltración
Ts < 21 C°	Bajo nivel de evapotranspiración

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 14: Afloramiento rocoso tipo 3, 2018.

Afloramiento Rocosu Tipo 3 (A.R - 3)	
Ts > 21 C°	Alto nivel de evapotranspiración

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 15: Cubierta artificial tipo 1, 2018.

Cubierta Artificial Tipo 1 (C.A. - 1)	
NDWI < 0	Sin presencia de agua superficial
NDVI > 0.3	Diversos materiales sin agua superficial
Pen < 13.5	Favorable a la infiltración
Ts < 21 C°	Bajo nivel de evapotranspiración

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 16: Cubierta artificial tipo 2, 2018.

Cubierta Artificial Tipo 2 (C.A. - 2)	
NDWI < 200	Sin presencia de agua superficial
NDVI < 0.3	Agua superficial
Pen < 27	Favorable a la infiltración
Ts < 21 C°	Bajo nivel de evapotranspiración

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 17: Depósito cuaternario, 2018.

Depósito cuaternario (D.C)	
NDWI < 200	Sin presencia de agua superficial
Pen > 27	Desfavorable a la infiltración
Ts > 21 C°	Alto nivel de evapotranspiración

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

Una vez ingresados los valores en el árbol de decisiones, es posible la ubicación espacial para definir cuáles son las zonas con presencia de agua subterránea a partir de parámetros superficiales las cuales se aprecian en la figura N° 24.

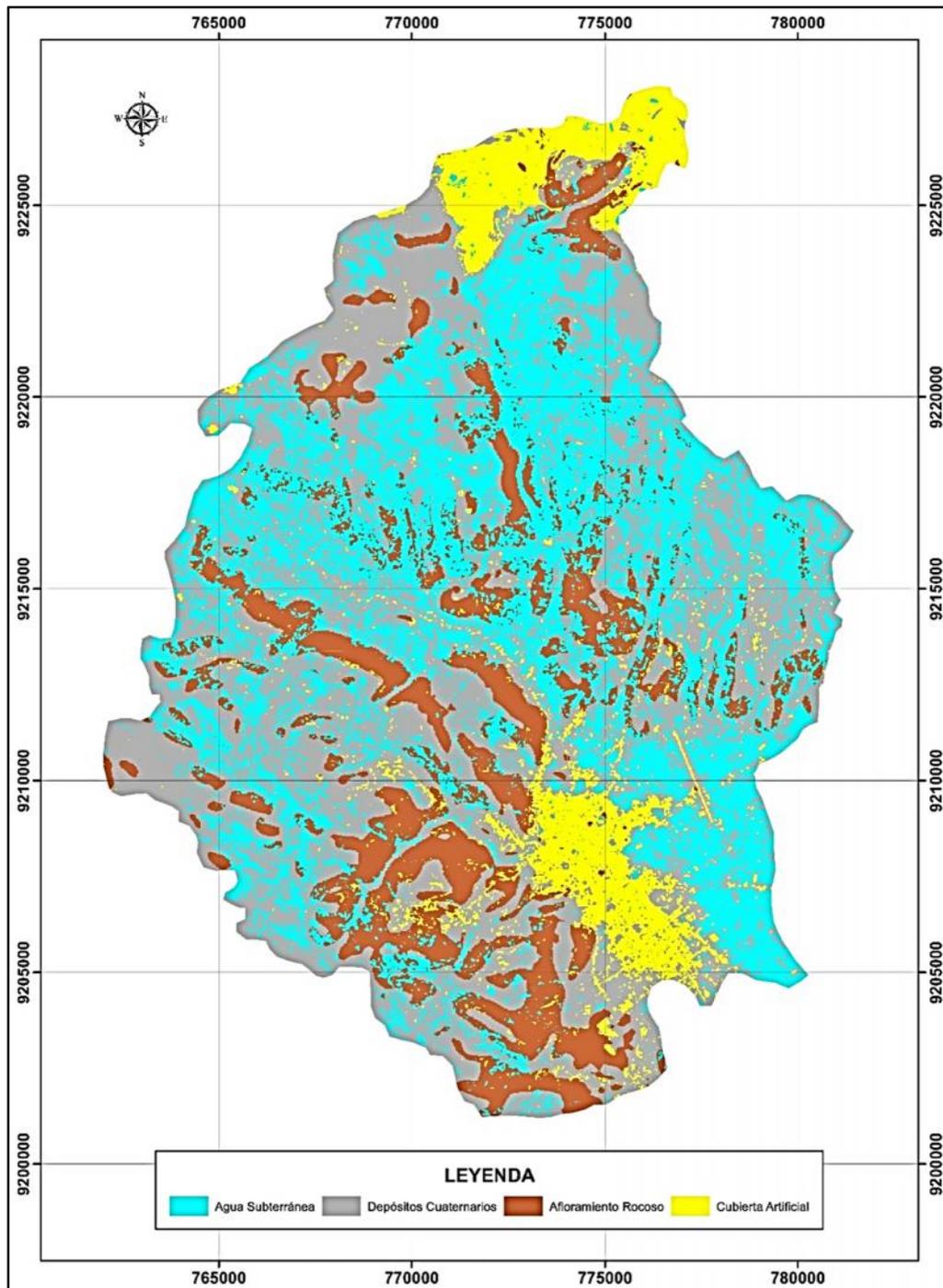


Figura 24: Resultado del árbol de decisiones de la zona de estudio, 2018.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1. Discusión

A partir de los resultados presentados podemos verificar que es posible identificar zonas con presencia de agua subterránea usando imágenes LANDSAT 8 mediante el método de árbol de decisiones en la cuenca del río Mashcón, mediante el uso de parámetros superficiales, hecho corroborado con el uso de coordenadas correspondientes a pozos de agua subterránea en la cuenca del río Mashcón, inventariados por ANA, (2018).

Mediante una estadística ejecutada en el software ArcGIS 10.5, se determinó que, de 96 pozos subterráneos inventariados por ANA, correspondiente al periodo del año 2018; 76 corresponden a las zonas de agua subterránea del presente estudio, con lo que se determinó una certeza de 79%. (ver figura 25).

A partir del estudio realizado por Mendoza J. & Rojas J. (2013). Se verifica también que el árbol de decisiones no es una herramienta fija de trabajo en función a las variables de clasificación ingresadas pues en este estudio se realizó el modelo dicotómico en diferentes condiciones, debido a su cercanía a zonas costeras.

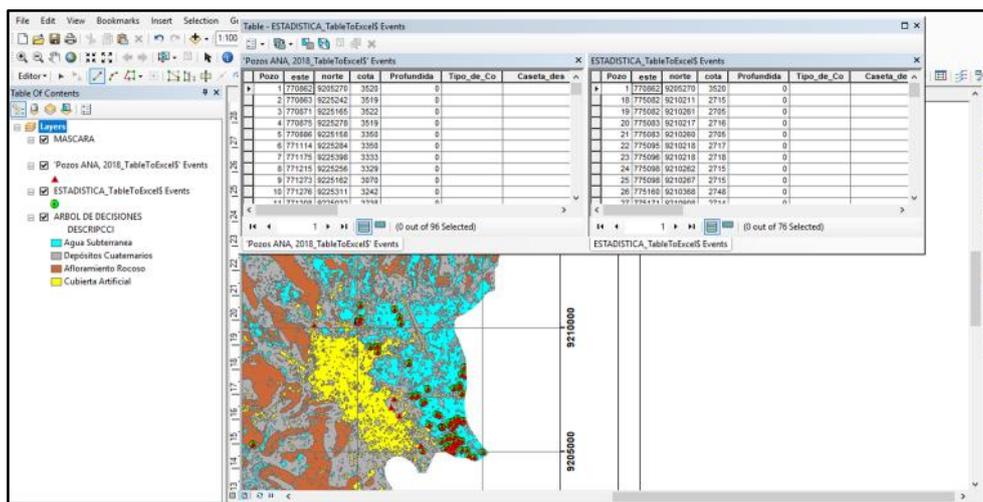


Figura 25: Estadística de zona de estudio vs pozos de agua subterránea inventariados por ANA, 2018. (ANA, 2017)

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, los acuíferos son los que recogen los flujos subterráneos y donde se almacenan la producción hídrica global de una cuenca. Sin embargo, la falta de información sobre la capacidad de almacenamiento de los mismos, información sobre su recarga y las zonas donde la recarga se produce, además de datos exactos de la explotación de los mismos por parte de los diferentes sectores sociales, es lo que no permite una planificación adecuada del uso de los recursos hídricos; visto desde el punto de vista minero genera costos elevados de producción de mineral, control estructural, hidrogeológico y de diseño en operaciones mineras, así como gastos sobredimensionados para remediar zonas afectadas en zonas de infiltración de agua subterránea.

Además, se puede verificar que en la cuenca del río Mashcón existe influencia minera en zonas con presencia de agua subterránea, es por ello que se debe tener esta información brindada para un cierre de minas exitoso sin afectación ambiental.

De allí la importancia de generar la zonificación de agua subterránea para generar el equilibrio medioambiental, minero y social.

5.2. Conclusiones

Se concluye del presente estudio que fue posible ubicar las zonas con presencia de agua subterránea usando parámetros superficiales en imágenes LANDSAT 8 mediante el método de árbol de decisiones en la cuenca del río Mashcón, con una confiabilidad de 79 % de certeza en función a los pozos inventariados por ANA, (2018).

Se concluye del análisis espectral que los índices más favorables para la recarga hídrica corresponden a vegetación sana e índices de vegetación muy saludable, con rangos multiespectrales entre 0.6 a 1, que son rasgos de vegetación característicos de zonas con abastecimiento hídrico superficial y subterráneo, se concluye también que en la identificación del NDWI se identificó corrientes de agua superficial en rangos superiores a 0

Se determinó en la investigación que la temperatura favorable según la información espectral para la infiltración sin pérdida producto de la evapotranspiración, son valores bajo 21 C° y en función de la pendiente valores por debajo de 27°.

Se concluye del clasificador en árbol, que es un método con amplio uso multifactorial para la búsqueda de agua subterránea, de gran apoyo en la combinación de variables espectrales en las cuales se usa codificación en rangos.

Se zonificó áreas de recarga hídrica de agua subterránea, que será de gran apoyo en áreas mineras como planeamiento y cierre de minas para generar nuevos

instrumentos para la elaboración de línea base y diseño, además de un mejor control medio ambiental de este recurso vital en zonas de conflicto social.

REFERENCIAS

Blatner, D.; Roth S., Real World Scanning and Halftones, ed. Peachpit Press, Berkeley, 1993.

CAMPBELL, J. B., Introduction to Remote Sensing, ed. Guilford Press, 1996.

Chao, C; et al. (2015), "Photometric correction and reflectance calculation for lunar images from the Chang'E-1 CCD stereo camera," J. Opt. Soc. Am. A 32, 2409-2422 (2015).

Chuvieco, E. (2015). Teledetección Ambiental (4ta Edición).

COURTEIX, S. et al., Droit Télédétection et Environnement, ed. SIDES, 1994.

García, M. (tesis doctoral) (1999), Normalización de la Nomenclatura Cartográfica de Cobertura/Usos del Suelo Universidad de Murcia.

Gibson, J. et al. (1998), Digital Compression for Multimedia, Principles & Standards, ed. Morgan Kaufmann.

González, C. y Woods, R. (1992), Digital Image Processing, ed. Addison-Wesley, Massachusetts.

INGEMMET, (2015). Boletín Serie H: Hidrogeología, Hidrogeología de las cuencas de los ríos Jequetepeque (13774) y Chamán (137752) Regiones Cajamarca, La libertad y Lambayeque.

Jensen, J. (1995), *Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective*, ed. Prentice Hall.

Jensen, J. (2000), *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*, ed. Prentice Hall.

Jia, X. (1999), *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*, ed. Springer Verlag.

Keeley, J. (2009). Intensidad del fuego, severidad del fuego y gravedad de la quemadura: Una breve revisión y uso sugerido. *International Journal of Wildland Fire*, 18 (1), 116 - 126.

Lillesand, M. y Kiefer, R. (1999), *Remote Sensing and Image Interpretation*, ed. John Wiley and Sons, New York.

Lliboutry, L. (1991), *Sciences Géométriques et Télédétection*, ed. Masson, París.

Marion, A. (1991), *An Introduction to Image Processing*, ed. Chapman and Hall, London.

Mendoza, J; Rojas J. (2013). Clasificación de imágenes ETM+ y ÁSTER GDEM por el método árbol de decisiones para la detección de agua subterránea en Perú. Caso de estudio: Lambayeque.

Myriam Hernández, (2010). Metodología para la prospección de agua subterránea utilizando información satelital y datos obtenidos en forma tradicional, Ecuador.

Peña Laureano, F; Carpio Fernández, J; Vargas Rodríguez, V. (2015). INGEMMET, Boletín Serie H: Hidrogeología N°4: Hidrogeología de la cuenca de los ríos Jequetepeque y Chaman, Regiones Cajamarca, La Libertad y Lambayeque.

Richards, J. y Jia, X. (2006), Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Berlin, Germany: Springer.

Rouse, J; Haas, R; Schell, J; Deering, D; Harlan, J. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. Greenbelt. Maryland, US. NASA/GSFC.

Sensing of Environment, (5), 893–903. doi: 10.1016/j.rse.2009.01.007

Sobrino, J; Raissouni, N y Li, Z. (2001). A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data. Remote Sensing of Environment, 75, 256 – 266.

“Análisis multiespectral mediante parámetros superficiales con la plataforma Landsat 8 para identificar agua subterránea en la cuenca del río Mashcón.”

ANEXOS