



# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Ambiental

“DETERMINACIÓN DE ZONAS DE RECARGA  
HÍDRICA Y SU IMPORTANCIA EN LA CABECERA  
DE CUENCA DEL RÍO ZAÑA USANDO SENSORES  
REMOTOS-CAJAMARCA”

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Autores:

Jhon Lennin Peña Vigo  
Santos Mauro Soria Romero

Asesor:

M.Cs. Juan Carlos Flores Cerna

Cajamarca - Perú

2021

## DEDICATORIA

*A Dios, porque es él quien hizo posible mi existencia y me dio sabiduría, fortaleza e inteligencia para poder lograr mi meta trazada y culminar satisfactoriamente esta carrera profesional. A mis padres Marina Vigo Salazar y Santos Peña de la Cruz por haberme orientado con sus sabios consejos y paciencia.*

*A mi esposa Sonia Chilón Minchán, por el ánimo moral brindado y apoyo incondicional, para culminar mis estudios universitarios y que hoy comparten el éxito alcanzado.*

**Jhon Lennin**

*A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino personas maravillosas entre ellas en especial a mi esposa Aydeé Julcamoro Ocas, que ha sido mi soporte y compañía.*

*A mis hijos Adriana y Fabio por su infinita paciencia e incondicional apoyo lograr uno de nuestros objetivos.*

*A mi madre María Eleuteria por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, por sus palabras de aliento y no dejarme caer, insistiendo que siempre sea perseverante y cumpla con la meta trazada.*

**Santos Mauro**

## AGRADECIMIENTO

*A Dios, por la bendición de la vida y la salud, por permitirnos sonreír ante todos nuestros logros que son resultado de su ayuda, este trabajo de tesis ha sido una gran bendición en todo sentido, motivo por el cual se lo agradecemos sin cesar por la meta cumplida.*

*De igual manera a la Universidad Privada del norte por darnos la oportunidad de seguir otra carrera mediante el programa Working Adult, donde nos brindaron una enseñanza de calidad.*

*Asimismo, al M.Cs. Juan Carlos Flores Cerna, por el apoyo incondicional, la paciencia para mediar la investigación de este proyecto brindándonos el asesoramiento oportuno, continuo, pertinente y siempre estar dispuesto a dar su valioso tiempo.*

## TABLA DE CONTENIDOS

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <b>DEDICATORIA .....</b>              | <b>2</b>  |
| <b>AGRADECIMIENTO.....</b>            | <b>3</b>  |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>         | <b>6</b>  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>        | <b>7</b>  |
| <b>RESUMEN .....</b>                  | <b>8</b>  |
| <b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....</b> | <b>9</b>  |
| 1.1. Realidad problemática .....      | 9         |
| 1.1.1. Antecedentes.....              | 10        |
| 1.1.2. Definiciones conceptuales..... | 13        |
| 1.2. Formulación del problema.....    | 29        |
| 1.3. Objetivos.....                   | 30        |
| 1.3.1. Objetivo general .....         | 30        |
| 1.3.2. Objetivos específicos.....     | 30        |
| 1.4. Hipótesis .....                  | 30        |
| 1.4.1. Hipótesis general .....        | 30        |
| 1.4.2. Hipótesis específica .....     | 31        |
| <b>CAPÍTULO II. METODOLOGÍA .....</b> | <b>32</b> |
| 2.1. Tipo de investigación. ....      | 32        |
| 2.2. Población y muestra .....        | 32        |
| 2.2.1. Población .....                | 32        |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.2.2. Muestra .....  | 32        |
| 2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos .....     | 32        |
| 2.3.1. Técnicas.....  | 32        |
| 2.3.2. Materiales .....   | 33        |
| 2.3.3. Instrumentos .....   | 33        |
| 2.4. Procedimiento.....   | 34        |
| 2.4.1. Delimitación de la cuenca del río Zaña. ....                       | 34        |
| 2.4.2. Ubicación geográfica.....  | 36        |
| 2.4.3. Demarcación hidrográfica. ....                                     | 37        |
| 2.4.4. Demarcación política.....  | 38        |
| 2.4.5. Descarga de la imagen LANDSAT 8. ....                              | 39        |
| 2.4.6. Corrección radiométrica y atmosférica de la imagen LANDSAT 8. .... | 44        |
| 2.4.7. Recorte de la zona de estudio. ....                                | 47        |
| 2.4.8. Cálculo de parámetros superficiales.....                           | 48        |
| <b>CAPÍTULO III. RESULTADOS .....</b>                                     | <b>60</b> |
| <b>CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....</b>                        | <b>68</b> |
| <b>REFERENCIAS .....</b>  | <b>71</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>   | <b>74</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Grado de infiltración en función de la pendiente. ....    | 17 |
| Tabla 2. Bandas espectrales de LANDSAT 8 .....                     | 28 |
| Tabla 3. Coordenadas de referencia UTM.....                        | 37 |
| Tabla 4. Características de la imagen LandSat 8.....               | 43 |
| Tabla 5. Clasificación del tipo de cobertura vegetal .....         | 50 |
| Tabla 6. Ubicación del agua superficial mediante el NDWI.....      | 53 |
| Tabla 7. Grado de infiltración en función de la pendiente .....    | 58 |
| Tabla 8. Abreviaturas utilizadas en el árbol de decisiones.....    | 60 |
| Tabla 9. Zonas de recarga hídrica dentro de zona de cabecera ..... | 67 |
| Tabla 10. Matriz de consistencia .....                             | 75 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Delimitación de la cuenca del río Zaña.....                                    | 35 |
| Figura 2. Orden la cuenca del río Zaña. ....   | 36 |
| Figura 3. Demarcación hidrográfica.....  | 38 |
| Figura 4. Demarcación política.. ....  | 39 |
| Figura 5. Archivo de forma de fila de ruta descendente Landsat WRS.. ....                | 40 |
| Figura 6. PATH ROW correspondiente a la cuenca del río Zaña. ....                        | 41 |
| Figura 7. Web del Servicio Geológico De Los Estados Unidos.....                          | 42 |
| Figura 8. Descarga de la imagen satelital LandSat 8.....                                 | 42 |
| Figura 9. Conversión ND a Radiancia en el sensor Landsat 8.. ....                        | 45 |
| Figura 10. Determinación reflectancia aparente (TOA) Landsat 8.. ....                    | 47 |
| Figura 11. Recorte de la zona de estudio.....  | 48 |
| Figura 12. Obtención del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) .....     | 50 |
| Figura 13. Clasificación del tipo de cobertura vegetal mediante el análisis de NDVI..... | 51 |
| Figura 14. Agua superficial de la cuenca del río Zaña .....                              | 53 |
| Figura 15. Temperatura superficial del suelo en grados Kelvin.....                       | 55 |
| Figura 16. Temperatura del suelo en grados Celsius.....                                  | 56 |
| Figura 17. Zonas favorables en función a la temperatura superficial del suelo. ....      | 57 |
| Figura 18. Grado de infiltración según la pendiente .....                                | 59 |
| Figura 19. Clasificador dicotómico .....   | 61 |
| Figura 20. Resultado de análisis del árbol de decisiones .....                           | 62 |
| Figura 21. Zonas de recarga hídrica .....  | 63 |
| Figura 22. Drenajes y sus órdenes en la cuenca del río Zaña.....                         | 64 |
| Figura 23. Delimitación de zona de cabecera.....   | 65 |
| Figura 24. Zonas de recarga hídrica favorable en la zona de cabecera .....               | 66 |

## RESUMEN

La presente investigación plantea el uso de sensores remotos como técnicas limpias para la solución sostenible y sustentable del agua mediante el uso de las imágenes satelital de tipo LANDSAT 8, con el objetivo general de determinar las zonas de recarga hídrica y la importancia de la cabecera cuenca del río Zaña, metodológicamente la investigación es de tipo aplicada tecnológica por su finalidad, de diseño no experimental, transversal por la representatividad de la muestra, causal por la relación de sus variables y un método descriptivo analítico; dentro de los principales pasos que se siguió para el desarrollo de la investigación fueron la descarga, calibración, cálculos de parámetros superficiales, planificación del método dicotómico y obtención de las zonas de recarga hídrica y determinación de la zona de cabecera; obteniéndose como principales resultados que la zona de cabecera es de gran importancia pues allí se ubican en mayor cantidad las zonas de recarga hídrica en la cuenca del río Zaña, evidenciándose que del 100 % de las áreas, el 82 % se encuentran ubicadas en zonas de cabecera de cuenca; obteniéndose como principal conclusión que la sectorización de la zona de cabecera permite el conocimiento de su gran importancia y la amplitud del daño que conlleva el impacto de estas zonas.

**Palabras clave:** Cuenca, Recarga hídrica, NDVI, NDWI, Temperatura, Pendiente, Dicotomía.

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad problemática

Los recursos hídricos son bienes escasos y poco administrados, constituyen una necesidad creciente y en los últimos años un problema silencioso que va afectando cada vez más a la población mundial. (Díaz, 2018).

La determinación y protección de zonas de recarga hídrica permitirá el abastecimiento de agua subterránea obteniendo así el máximo provecho de un recurso que potencialmente es valioso en nuestro país. (Barreno, 2016).

Actualmente no existen estudios regionales que permitan la comprensión de las zonas de cabecera de cuenca y determinen la importancia que tienen como zonas de recarga hídrica, es por ello que se ha permitido el abuso indiscriminado de estas zonas ambientalmente de gran importancia para el equilibrio hídrico subterráneo y superficial de una cuenca.

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. (Díaz, 2018).

Las técnicas satelitales con el uso de sensores remotos representan una nueva oportunidad de técnicas limpias para la solución sostenible y sustentable del agua, pues 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. (Cusquisiban, 2019).

Es por ello que la presente tesis plantea el uso de sensores remotos como técnicas limpias para la solución sostenible y sustentable del agua mediante el uso de las

imágenes satelitales de tipo LANDSAT 8, utilizando un método de análisis dicotómico, en la cuenca del río Zaña, de este modo definir la importancia de la cabecera de cuenca como zonas de recarga hídrica subterránea, zonas que los serán determinadas mediante el uso de parámetros superficiales como: El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), pendiente y temperatura. Esta investigación pretende reflejar una metodología para la generación de información que permita preservar las zonas de enriquecimiento hídrico subterráneo en zonas de cabecera de cuenca, y permitir el manejo sostenible de este recurso indispensable y escaso.

### **1.1.1. Antecedentes**

#### **1.1.1.1. Internacionales:**

Ospina (2016). En su investigación titulada: Análisis de la información proveniente del satélite Grace para el monitoreo de la acumulación de agua subterránea: caso ejemplo provincia hidrogeológica de los llanos orientales-Colombia.

Analiza las series de tiempo de precipitación, TWS, SM y GWS, para la provincia hidrogeológica de los Llanos Orientales en el período comprendido entre el 2003 y 2014, usando información proveniente de GRACE, el sistema GLDAS y de las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM, permiten identificar que las variaciones temporales en las anomalías de acumulación de agua terrestre, humedad del suelo y agua subterránea, corresponden con los períodos secos y lluviosos de la región. Algunos períodos presentan contrastes que pueden estar asociados a los fenómenos del Niño y la Niña.

Coy (2015). En su estudio sobre la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en las subcuencas de río Tzunutz. Cuyo objetivo principal fue identificar las zonas potenciales de recarga hídrica en la subcuenca del río Tzunutz, la cual es drenada por el río del mismo nombre. Para lograr los objetivos planteados se utilizó un modelo metodológico para identificar el potencial de recarga hídrica, basado en un análisis de evaluación multivariable en los que se incluyen las pendientes, tipo de suelo, cobertura vegetal, uso del suelo, estructuras geológicas, depresiones kársticas, corrientes superficiales y precipitación local. Con el uso de sistemas de información geográfica se realizó una estimación cuantitativa del potencial de recarga presente en el área de la subcuenca. Utilizando álgebra de mapas y la utilización de imágenes Ráster de cada una de las variables definidas, se obtuvo un mapa en el que se identifican las áreas potenciales de recarga. Los resultados muestran una categoría para cada potencial de recarga, este mapa obtenido se denominó “zonas potenciales de recarga hídrica, en la Subcuenca del río Tzunutz”. Las categorías son: muy bajo (11.54 %), bajo (23.85 %), moderado (28.96 %), alto (23.02 %), muy alto (12.62 %).

#### **1.1.1.2. Nacionales:**

Díaz (2018). En su investigación titulada “Análisis multiespectral mediante imágenes satelitales para identificar zonas de recarga hídrica subterránea en la cuenca Jequetepeque”, tuvo como objetivo principal el uso de las imágenes satelitales de tipo LANDSAT 8 y ÁSTER GDEM en un área de 3 956 km<sup>2</sup> correspondiente a la cuenca

Jequetepeque, para ubicar las zonas de recarga hídrica subterránea, para lo cual se utilizaron los parámetros como son: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), Temperatura y pendientes; los cuales fueron analizados y procesados mediante el uso del clasificador en árbol; teniendo como resultado la ubicación de zonas de recarga hídrica subterránea con una certeza promedio de 94 %, en función de los pozos inventariados existentes en la zona de estudio.

### **1.1.1.3. Locales:**

Cusquisiban (2019). Realizó un estudio titulado: 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. Teniendo como objetivo principal 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 km<sup>2</sup> 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, teniendo como resultado 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.

Vásquez (2011). En su investigación titulada: Estudio hidrológico de la región 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 hidrometeorológica 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.

### **1.1.2. Definiciones conceptuales.**

#### **1.1.2.1 Recarga.**

Nombre que se le da al proceso que permite que el agua alimente un acuífero. Este proceso ocurre de manera natural cuando la lluvia se filtra hacia un acuífero a través del suelo o roca. (Benfelt, 2000)

#### **1.1.2.2 Área o zona de recarga hídrica.**

Es el proceso que implica un incremento de agua en el nivel de las aguas subterráneas. Es decir que es la cantidad de agua adicionada o absorbida a un acuífero. El acuífero se refiere a una unidad geológica saturada capaz de suministrar agua a pozos o manantiales, los que a su vez sirven de fuentes de abastecimiento de agua (Barreno, 2016).

La recarga hídrica depende del régimen de la esorrentía superficial y del caudal de los ríos, así como de la temperatura.

También la pendiente de la superficie constituye un factor importante, puesto que los terrenos muy inclinados favorecen la escorrentía superficial; por el contrario, los terrenos con poca pendiente retienen por más tiempo el agua, lo que favorece la infiltración (Matus et al, 2009).

Las zonas potenciales de recarga hídrica se podrán identificar evaluando básicamente los siguientes parámetros superficiales:

#### **A. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI):**

El Índice de Diferencia de Vegetación Normalizado, también conocido como NDVI, por sus siglas en inglés. 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 (Rouse et al., 1974).

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.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Donde:

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

NIR: Reflectancia de la banda Infrarrojo cercano.

RED: Reflectancia de la banda roja.

Utilizando la fórmula en las imágenes Landsat 8:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{Banda5} - \text{Banda4}}{\text{Banda5} + \text{Banda4}} \quad (2)$$

### **B. Índice de Diferencia Normalizada Agua (NDWI):**

Es un indicador numérico, derivada de imágenes satelitales, 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.

NDWI es útil en muchas aplicaciones de teledetección. Vigilancia de los cultivos de la salud, la cartografía del agua superficial, 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.

$$\text{NDWI} = \frac{\text{GREEN} - \text{NIR}}{\text{GREEN} + \text{NIR}} \quad (3)$$

Donde:

NIR: Reflectancia de la banda infrarrojo cercano.

GREEN: Reflectancia de la banda verde.

Utilizando la fórmula en las imágenes Landsat 8:

$$\text{NDWI} = \frac{\text{Banda3} - \text{Banda5}}{\text{Banda3} + \text{Banda5}} \quad (4)$$

### C. Temperatura:

El proceso para el cálculo de temperatura se inicia con los ND (número digital) detectados por el sensor. Al igual que en el espectro óptico, estos valores codifican un valor de radiancia en este caso correspondiente a las dos bandas del infrarrojo térmico. (Meijerink, 2007)

Aquí el objetivo no es encontrar la relación entre el flujo incidente en el suelo y el reflejo al sensor sino entre el flujo emitido desde el suelo y el recibido por el sensor. Entre ambas magnitudes vuelven a interponerse los componentes de la atmósfera y emiten su propia energía distorsionando la radiancia recibida por el sensor. (Meijerink, 2007)

Las bandas obtenidas por el sensor TIRS pueden ser convertidas en radiancia espectral a temperatura de brillo en grados kelvin (k), usando para ello la constante térmica suministrada en el archivo de metadatos, (Chuvieco, 2002):

$$T=K_2/(\ln(K_1/L\lambda+1)) \quad (5)$$

Donde:

T = Temperatura de brillo aparente

$L\lambda$  = Corresponde a la reflectancia en el techo de la atmósfera TOA

$K_1$  = Es la constante de conversión  $K_1$  específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato ( $K_1\_CONSTANT\_BAND\_x$ , x es el número de la banda, 10 o 11)

$K_2$  = Es la constante de conversión  $K_2$  específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato ( $K_2\_CONSTANT\_BAND\_x$ , x es el número de la banda, 10 o 11).

#### D. Pendiente:

Para cada celda, la herramienta Pendiente calcula la tasa máxima de cambio del valor de esa celda a sus vecinas. Básicamente, el cambio máximo en la elevación sobre la distancia entre la celda y sus ocho vecinas identifica el descenso cuesta abajo más empinado desde la celda. (Meijerink, 2007)

Conceptualmente, la herramienta ajusta un plano a los valores z (elevación) de una vecindad de celdas de 3 x 3 alrededor de la celda de procesamiento o central. El valor de pendiente de este plano se calcula mediante la técnica de promedio máximo. La dirección a la que apunta el plano es la orientación para la celda de procesamiento. Mientras menor sea el valor de la pendiente, más plano será el terreno; mientras más alto sea el valor de la pendiente, más empinado será el terreno. (Meijerink, 2007).

Tabla 1

*Grado de infiltración en función de la pendiente.*

| <b>PENDIENTES</b>     |                   |                              |
|-----------------------|-------------------|------------------------------|
| <b>Porcentaje (%)</b> | <b>Grados (°)</b> | <b>Grado de infiltración</b> |
| 0 – 15 %              | 0° - 13.5°        | Favorable                    |
| 15 % - 30 %           | 13.5° - 27°       | Moderadamente                |
| Mayores a 30 %        | Mayores a 27°     | Desfavorable                 |

Fuente: Schosinsky (2006)

### 1.1.2.3 Cabecera de cuenca

Según la Autoridad Nacional del Agua, (ANA, 2020); define a la cabecera de cuenca como las zonas que tienen como inicio el perímetro de una cuenca, donde nacen los cursos de agua de orden 1.

El orden de cauces consiste en definir primero la red total de segmentos de cauces y segundo señalar en cada uno de ellos un valor numérico entero. La clasificación de orden de cauces fue diseñada de manera pionera por Horton. Inicia señalando a todos los cauces que no tienen contribuyentes a los que les atribuye el valor de 1 (siendo el orden 1). La jerarquización continúa considerando que a partir del punto de confluencia de dos cauces de primer orden se origina a un cauce de orden 2. De esta manera la confluencia de dos cauces de orden 2 determinan uno de orden 3. Igualmente, la confluencia de dos cauces de tercer orden señala el inicio de un cauce de orden 4, así sucesivamente. En el caso que confluyan dos cauces de diferente orden, continua el orden de mayor valor. El orden de mayor valor es el número de orden que le corresponde a la cuenca (ANA, 2020).

Para poder identificar la cabecera de una cuenca se debe tener en cuenta el criterio de clasificación de orden de cauces, como se explicó anteriormente este método tiene como insumo el orden de cauces, posteriormente se procede a delimitar las subcuencas de drenaje desde los de primer orden hasta el de mayor valor que representa el número de orden de la unidad hidrográfica (cuenca). Dependiendo de la naturaleza de la cuenca se pueden preparar mapas con subcuencas de tercer, cuarto

a mayor orden y de esta manera se puede identificar con relativa facilidad la cabecera de cuenca (ANA, 2020).

### **Importancia de la recarga hídrica**

El agua subterránea es sin duda el componente que constituye alrededor de dos terceras partes de los recursos de agua dulce en todo el mundo; además como alimentan a lagos, pantanos, embalses y ríos representan el 3.5 % y la humedad del suelo sólo el 1.5 % del agua dulce (Chilton, 2001).

La importancia de dichas zonas empieza por el hecho de que constituyen parte del ciclo del agua, además de su aprovechamiento dentro del ámbito social y el mantenimiento del equilibrio ecológico, por lo anterior, es necesario proteger y mantener su calidad y cantidad del recurso hídrico, ya que, repercute en el bienestar de todo ser vivo (Longwood University, 2003). Además, que los inventarios de aguas subterráneas y el uso de aguas superficiales revelan la importancia mundial que representan las aguas subterráneas y las razones incluyen: la disponibilidad de agua a largo plazo, calidad natural para suministro de agua potable y un servicio a bajo costo que favorece a regiones con ausencia de sistemas de abastecimiento de agua (Chilton, 2001).

#### **1.1.2.4 Percepción Remota**

es la técnica para obtener información de un objeto o un proceso, por análisis de datos obtenidos mediante un instrumento que no está en contacto físico con los objetos. El tipo de datos susceptibles de ser obtenidos por percepción remota puede originarse en la distribución o

cambios de diferentes fuerzas (gravedad, magnetismo), de ondas acústicas o de energía electromagnética (Meijerink, 2007).

Todo cuerpo sometido a temperaturas superiores a  $0^{\circ}$  Kelvin ( $-273^{\circ}\text{C}$ ), emite energía electromagnética. La intensidad de la energía emitida depende de las características del material que predomina en su superficie. El coeficiente de emisividad es una característica de la materia y ante una misma temperatura ambiente, dos cuerpos diferentes emiten distinta intensidad de energía (Meijerink, 2007).

La radiación electromagnética se presenta como una distribución continua de frecuencias que conocemos con el nombre de espectro electromagnético. Dicho espectro suele estar estructurado en una serie de bandas espectrales donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. No todas las bandas presentan igual interés desde el punto de vista en el sensoramiento remoto. (Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio, NASA, 2011).

Las regiones espectrales utilizadas para la observación remota de la tierra son (NASA, 2011):

**Espectro visible (0.4 - 0.7  $\mu\text{m}$ ):** Rango de frecuencias del ojo humano. Máxima radiación solar. Subdividido en tres bandas: Rojo (0.6 - 0.7  $\mu\text{m}$ ), Verde (0.5 - 0.6  $\mu\text{m}$ ) y Azul (0.4 - 0.5  $\mu\text{m}$ ).

**Infrarrojo cercano (0.7 - 1.1  $\mu\text{m}$ ):** Denominado IR fotográfico o reflejado. Energía solar que reflejan los cuerpos. Comportamiento similar al espectro visible.

**Infrarrojo medio (1.1 – 8  $\mu\text{m}$ ):** Se entremezclan radiación solar y emisión. La atmósfera afecta sensiblemente: aprovechado para medir concentraciones de vapor de agua, ozono, aerosoles, etc.

**Infrarrojo térmico (8 - 14  $\mu\text{m}$ ):** Radiaciones emitidas por los propios cuerpos. Se puede determinar la Temperatura de un cuerpo (IR térmico). Se puede disponer de imágenes a cualquier hora del día.

**Microondas (1mm-1m):** Interés creciente de los sensores remotos en esta banda. Las perturbaciones atmosféricas son menores y es transparente a las nubes.

El sensoramiento remoto se basa en la interacción del espectro electromagnético y la cubierta terrestre. Cuando realizamos un gráfico en el que representamos la cantidad la radiación reflejada por una superficie y la relacionamos con la longitud de onda de la onda electromagnética, obtenemos lo que se denomina firma espectral. (NASA, 2011).

Todos los materiales de la Tierra reflejan o emiten energía electromagnética. Los sensores miden la intensidad de la radiación electromagnética emitida por un objeto y estudian sus propiedades físicas a partir de su variación con la frecuencia (García, s.f).

#### **A. Elementos de los sensores remotos:**

Según Chuvieco, (2002), todo sistema de sensores remotos incluye los siguientes elementos:

**Fuente de Energía:** Es originado de la radiación electromagnética que el sensor va a captar. Puede tratarse de una fuente pasiva como

la luz solar o activa cuando es emitida por el sensor que luego capta el reflejo (como el radar). (Meijering, 2007).

**Cubierta terrestre:** Son los rasgos naturales o realizados por el hombre (vegetación, suelo, rocas, construcción, etc.) que refleja la señal hacia el sensor. Chuvieco, (2002),

**Sistema sensor:** Compuesto por el sensor propiamente dicho (cámaras, radar, etc.) y la plataforma que lo alberga (satélite, avión, globo). Tiene la misión de captar la energía proveniente de la cubierta terrestre y almacenarla o enviarla directamente al sistema de recepción. (Meijering, 2007).

**Sistema de recepción-comercialización:** Es el que recibe la información del sistema sensor, la guarda en formato apropiado y la distribuye a los usuarios. Chuvieco, (2002),

**Interprete:** quien convierte los datos en información temática de interés (agricultura, forestal, geografía, catastro, medio ambiente, militar, etc.) ya sea mediante procedimientos y técnicas visuales o digitales. (Meijering, 2007).

**Usuario final:** Es el beneficiario del documento fruto de la interpretación, así como de decidir sobre las consecuencias que de él deriven. (Meijering, 2007).

Para que los sensores remotos puedan llevarse a cabo, es necesario contar con instrumentos capaces de registrar la radiación procedente de la tierra (sensores) y de transformarla en una señal susceptible de ser manejada de forma análoga (productos fotográficos) o de forma digital

(cintas magnéticas compatibles con ordenador, CCTs, CD Rom, etc.)

(Meijering, 2007).

## **B. Sensor**

Los sensores pueden definirse como instrumentos susceptibles de detectar la señal electromagnética (radiación reflejada o emitida) que les llega de la tierra y la atmósfera, en un determinado intervalo de longitud de onda, y convertirla en una magnitud física que pueda ser tratada y grabada (señal analógica o digital) (Meijering, 2007).

Un “sensor o captador”, no es más que un dispositivo diseñado para recibir información de una magnitud del exterior y transformarla en otra magnitud, normalmente eléctrica, que seamos capaces de cuantificar y manipular. Se trata de un dispositivo capaz de detectar diferentes tipos de materiales y parámetros, con el objetivo de mandar una señal, y permitir así que continúe un proceso controlado, o bien detectar anomalías respecto a un sistema previamente configurado (Organización de las Naciones Unidas, ONU, 2016).

Entre las variadas formas de clasificar los sensores remotos, una de las más habitual es considerar su procedimiento de recibir la energía procedente de las distintas cubiertas. En este sentido, se puede hablar de dos tipos de sensores: pasivos, cuando se limitan a recibir la energía proveniente de un foco exterior a ellos, y activos, cuando son capaces de emitir su propio haz de energía (García, s.f).

### C. Características de los sensores.

Las características espaciales del sensor hacen referencia a la porción de la superficie terrestre de la cual obtiene información y se determinan por magnitudes tales como (López y Caselles, 1991):

**Campo de visión instantánea (IFOV)**, que depende de la apertura del dispositivo óptico del sensor y determina las dimensiones máximas de la superficie terrestre que puede observarse en cada instante desde el sensor. Se expresa en radianes, aunque se suele usar la longitud que sobre la superficie terrestre corresponde a ese ángulo, lo que coincide con las menciones de píxel.

**Campo total de observación:** se define para los sensores de barrido y depende del ángulo de oscilación o de rotación de espejo y de la duración de la pasada. En función de la altitud del satélite, se obtiene la longitud de la línea de barrido, que se expresa en m o km.

**Píxel (contracción del término anglosajón picture element):** Es la unidad mínima que determina el tamaño de la muestra. La señal de salida del detector sufre un muestreo a una frecuencia que depende del sistema de adquisición de los datos.

Entre las cualidades de un sistema de sensor, hay que destacar la resolución, que es una medida de capacidad de un sistema óptico para distinguir señales que están espacialmente cercanas o que son espectralmente similares, (Chuvieco, 2002).

Las dimensiones del píxel definen la aptitud de un sensor para distinguir los objetos en el plano espacial, y es lo que nos da la resolución espacial del sensor. Sin embargo, esta resolución no

depende exclusivamente del tamaño del píxel, sino que puede estar influida por el contenido de la imagen y por otros factores como geometría y contraste del objeto, resolución radiométrica, iluminación, claridad de la atmósfera o el efecto de los píxeles vecinos, (Chuvieco, 2002).

La capacidad para registrar la radiación electromagnética está referida a su capacidad espectral, la cual está determinada por la resolución espectral; magnitud que expresa su aptitud para separar señales de longitudes de ondas diferentes. Depende del dispositivo de filtro óptico que separa la radiación incidente en bandas espectrales más o menos amplias, (Barreno, 2016).

Las características en Bits de información del sensor determinan la resolución radiométrica, que expresa su capacidad en una banda espectral considerada, para distinguir señales electromagnéticas de energía diferente. La resolución radiométrica está condicionada por los intervalos de digitalización de la señal. En el dominio del infrarrojo térmico, esta resolución se traduce en medidas de temperatura diferente (NEdT), mientras que, en el visible, determina los valores reflectividad, (Barreno, 2016).

Finalmente, si nos referimos a la periodicidad en la adquisición de las imágenes, definimos la resolución temporal que alude a la frecuencia de cobertura proporcionada por el sensor. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales del satélite, así como de las cualidades del sensor (ángulo de observación y de abertura) (Meijering, 2007).

Los sensores pueden ser instalados en distintas plataformas o medios de observación, teniendo cada uno de ellos características propias. Ordenando aquellos más importantes de menor a mayor distancia a la tierra, tenemos: el propio suelo, globos, aviones, cohetes y satélites artificiales, (Chuvienco, 2002).

Para la obtención de una visión global de regiones de gran extensión, las plataformas más adecuadas son los sensores remotos satelitales. Se trata de Aero transportadores espaciales que orbitan en el espacio alrededor de la tierra, siguiendo una órbita específica, y diferenciándose de los cohetes en que pueden permanecer en órbita, facilitando una visión constante del planeta, (Barreno, 2016).

#### **D. Resolución de un sensor**

Podemos definir la resolución de un sistema sensor como su habilidad para registrar, discriminándola, información detalla. El concepto de resolución implica al menos cuatro manifestaciones: temporal, espacial, espectral y radiométrica. (Meijerink, 2007):

**Resolución Temporal:** Es la frecuencia de observaciones del sensor sobre un objeto. No depende del sensor sino de la plataforma.

**Resolución Espacial:** Es el mínimo detalle espacial (pixel) que registra un sensor. Depende del sistema óptico del sensor y de la altitud de la plataforma.

**Resolución Espectral:** Es la cantidad de bandas y sus respectivos rangos espectrales con que se capta la energía electromagnética.

**Resolución Radiométrica:** Es la capacidad de un sensor para registrar pequeños cambios de energía. Se mide en cantidad de niveles de grises o de cuentas digitales.

#### **1.1.2.5 Programa Landsat**

El programa Landsat son una serie de misiones encargadas de recopilar información de la Tierra por satélite administrado conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de los estados unidos, USGS (USGS, 2019).

En 1972, el lanzamiento de ERTS-1 (Tierra Recursos Tecnología por Satélite, más tarde renombrado Landsat 1) comenzó la era de la una serie de satélites que tienen desde que adquirida forma continua de tierras datos obtenidos por detección remota basados en el espacio (Ariza, 2013).

La última misión Landsat, se puso en órbita el 11 de febrero de 2013. este satélite recibe el nombre de Landsat 8, el cual presenta un rango espectral en 3 subsistemas de VNIR; SWIR y térmico. (USGS, 2019).

Imagen operacional de la Tierra (OLI) y el sensor térmico infrarrojo (TIRS) – LandSat 8. Este tipo de sensor presenta el satélite de LandSat 8 y las imágenes se componen de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros de Bandas 1 a 7 y 9. La banda ultra azul 1 es útil para estudios costeros y aerosoles. Banda 9 es útil para la detección de nubes cirrus. La resolución de la banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas de la superficie más precisa y se recogen a 100 metros. El

tamaño aproximado es de 170 km escena de norte a sur por 183 km de este a oeste (Ariza, 2013).

Tabla 2.

*Bandas espectrales de LANDSAT 8*

| <b>Bandas</b>                            | <b>Longitud de onda<br/>(micrómetros)</b> | <b>Resolución<br/>(metros)</b> |
|--|---|--------------------------------|
| Banda 1 - Aerosol costero                | 0.43-0.45                                 | 30                             |
| Banda 2 – Azul (BLUE)                    | 0.45-0.51                                 | 30                             |
| Banda 3 – Verde (GREEN)                  | 0.53-0.59                                 | 30                             |
| Banda 4 – Rojo (RED)                     | 0.64-0.67                                 | 30                             |
| Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)       | 0.85-0.88                                 | 30                             |
| Banda 6 - SWIR 1                         | 1.57-1.65                                 | 30                             |
| Banda 7 - SWIR 2                         | 2.11-2.29                                 | 30                             |
| Banda 8 - Pancromático                   | 0.50-0.68                                 | 15                             |
| Banda 9 – Cirrus                         | 1.36-1.38                                 | 30                             |
| Banda 10 - Infrarrojos térmicos (TIRS) 1 | 10.6-11.19                                | 100                            |
| Banda 11 - Infrarrojos térmicos (TIRS) 2 | 11.50-12.51                               | 100                            |

Fuente:[https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?qt-news\\_science\\_products=0#qt-news\\_science\\_products](https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products)

### 1.1.2.6 Software Envi.

Envi, es el mejor software para obtener información de imágenes satelitales de manera fácil, rápida y precisa. Por sus herramientas fáciles de usar, su funcionalidad comprobada y resultados rápidos su demanda se incrementa notoriamente en estos últimos años. (Samaniego, s.f)

Obtener información crítica a partir de imágenes satelitales, es cada vez más importante dada la creciente utilización de éstas como fuente de información. Por la misma razón, las herramientas y procesos son esenciales ya que deben extraer la información fácil y en forma precisa sin importar el tipo de aplicación que necesita, ya sea para propósitos de inteligencia, científicos o de planeación. (Samaniego, s.f)

ENVI nos provee de herramientas automatizadas de procesamiento que permiten preparar fácil y rápidamente sus imágenes para visualización y para análisis adicionales. Con ENVI podremos (Samaniego, s.f):

- Calibrar imágenes
- Corregir las distorsiones atmosféricas en las imágenes
- Crear y sobreponer capas vectoriales
- Identificar Regiones de Interés (ROIs)
- Crear Modelos Digitales de Elevación (DEMs)
- Generar imágenes de alta resolución espectral y espacial.
- Recortar y rotar imágenes

## 1.2. Formulación del problema

¿Cuáles son las zonas de recarga hídrica y su importancia en la cabecera de cuenca del río Zaña utilizando sensores remotos?

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. Objetivo general

Determinar las zonas de recarga hídrica y su importancia en la cabecera cuenca del río Zaña utilizando sensores remotos.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

Determinar los índices de vegetación y agua que favorezcan la recarga hídrica de agua subterránea en la cabecera de cuenca del río Zaña usando sensores remotos.

Determinar los parámetros de temperatura y pendiente que favorecen la recarga hídrica de agua subterránea en la cabecera de cuenca del río Zaña usando sensores remotos.

Realizar el análisis multiespectral de la cabecera de cuenca del río Zaña, mediante el clasificador dicotómico.

Sectorizar la zona de cabecera de cuenca del río Zaña.

### 1.4. Hipótesis

#### 1.4.1. Hipótesis general

La zona de cabecera es de gran importancia pues allí se ubica el mayor porcentaje de zonas de recarga hídrica de la cuenca del río Zaña.

#### **1.4.2. Hipótesis específica**

Los índices de vegetación y agua serán indicadores que faciliten la ubicación de zonas de recarga hídrica de agua subterránea en la cabecera de cuenca del río Zaña usando sensores remotos.

Los índices de temperatura y pendiente serán indicadores que faciliten la ubicación de zonas que favorecen la recarga hídrica de agua subterránea en la cabecera de cuenca del río Zaña usando sensores remotos.

El clasificador dicotómico permitirá combinar cada uno de los parámetros y así definir la ubicación de zonas de recarga hídrica de la cuenca del río Zaña.

La sectorización de la zona de cabecera de cuenca permitirá determinar la importancia como zonas de recarga hídrica para abastecimiento subterráneo en la cuenca del río Zaña.

## **CAPÍTULO II. METODOLOGÍA**

### **2.1. Tipo de investigación.**

La investigación será del tipo aplicada tecnológica por su finalidad, de diseño no experimental – por la toma de muestra será de carácter transversal – causal por el control y relación de sus variables y usará un método descriptivo analítico.

### **2.2. Población y muestra**

#### **2.2.1. Población**

Los pixeles que conforma la imagen Landsat que contenga la cuenca del río Zaña con un área de 274.53 km<sup>2</sup>.

#### **2.2.2. Muestra**

Firmas espectrales de pixeles de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), temperatura y pendiente.

### **2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos**

#### **2.3.1. Técnicas.**

Las técnicas utilizadas son la observación, descripción y el análisis espectral de las imágenes satelitales que viene a ser la descomposición de dicha señal en sus diversas componentes dentro de un dominio frecuencial que a la vez es una técnica ampliamente utilizada para discriminar diferentes tipos de materiales y generar procesamiento de datos usando instrumentos de recolección de datos como el satélite Landsat 8, el software Envi 5.3 para el análisis espectral y el software ArcGIS para el procesamiento.

### **2.3.1.1. Árbol de decisiones.**

La idea de fondo consiste en discriminar secuencialmente cada una de las categorías, basándose bien en valores espectrales de la imagen, bien en variables texturales, temporales o en información auxiliar (suelos, MDE, etc.). Para cada clase se establecen unas reglas dicotómicas de información, que permiten concentrar la discriminación de cada clase a partir de las variables en que mejor se discrimina, en lugar de utilizar. Por ejemplo, puede reconocer las láminas de agua por un número digital (ND) inferior a un cierto umbral en la banda del infrarrojo cercano (IRC), o la vegetación por una combinación de cierto umbral en el visible e infrarrojo cercano. En su origen, estos criterios están basados exclusivamente sobre los datos espectrales de la imagen, pero en los últimos años se ha promovido el empleo de este tipo de criterios de decisión considerando igualmente variables auxiliares, como mapas de suelos o modelos digitales de elevación. (Chuvieco, 2002)

### **2.3.2. Materiales**

Libreta de apuntes.

Lápiz.

Papel bond.

Imágenes satelitales Áster.

### **2.3.3. Instrumentos**

Plataformas satelitales.

Programas de procesamiento digital y espectral (Envi).

Programa de cartografiado (ArcGIS).

## 2.4. Procedimiento.

La presente investigación se realizó mediante el análisis de imágenes satelitales multiespectrales de tipo Landsat, teniendo en cuenta el siguiente procedimiento para localizar así las zonas de recarga hídrica en la cuenca Zaña

Como primer paso se procedió a identificar el área de estudio y delimitarla en coordenadas UTM utilizando el programa ArcGIS, con el uso de la topografía se realizó el cálculo y delimitación la cuenca del río Zaña, se calculó la zona de cabecera en la cuenca del río Zaña, y los diferentes parámetros como los órdenes hídricos y parámetros morfométricos que permitan la correcta interpretación de la cuenca, posteriormente se realizó la adquisición de la imagen multiespectral que abarque la cuenca del río Zaña, que contenga una información multicanal y tenga buenas condiciones atmosféricas.

Consecuentemente se procedió a realizar las calibraciones necesarias para un procesamiento exitoso, consecuentemente se realizó una corrección radiométrica, atmosférica para obtener un producto listo para el cálculo de parámetros.

Posteriormente se realizó el recorte específico de la zona de estudio y se generó una base de datos en función de los parámetros Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Diferencia Normalizada Agua (NDWI), temperatura y pendiente.

### 2.4.1. Delimitación de la cuenca del río Zaña.

Existen diferentes maneras de delimitar o delinear cuencas hidrográficas. Maneras que van desde las realizadas manualmente hasta las que se realizan digitalmente de forma semiautomática con las herramientas de los SIG (Sistemas de Información Geográfica). Todas ellas conducen al mismo objetivo, sin embargo, la diferencia radica en la precisión; y es allí donde el método que se

utilice y la información base determinarán la calidad del trabajo final. (Dolores y Gabriel, 2018)

La delimitación de una cuenca hidrográfica consiste en definir la línea de divortium aquarum (divisoria de aguas), la cual es una línea curva definida por las altitudes y que tiene su punto de cierre en la zona más baja de la cuenca. La longitud de la línea divisoria es el perímetro de la cuenca y la superficie que encierra dicha curva es el área. (Dolores y Gabriel, 2018)

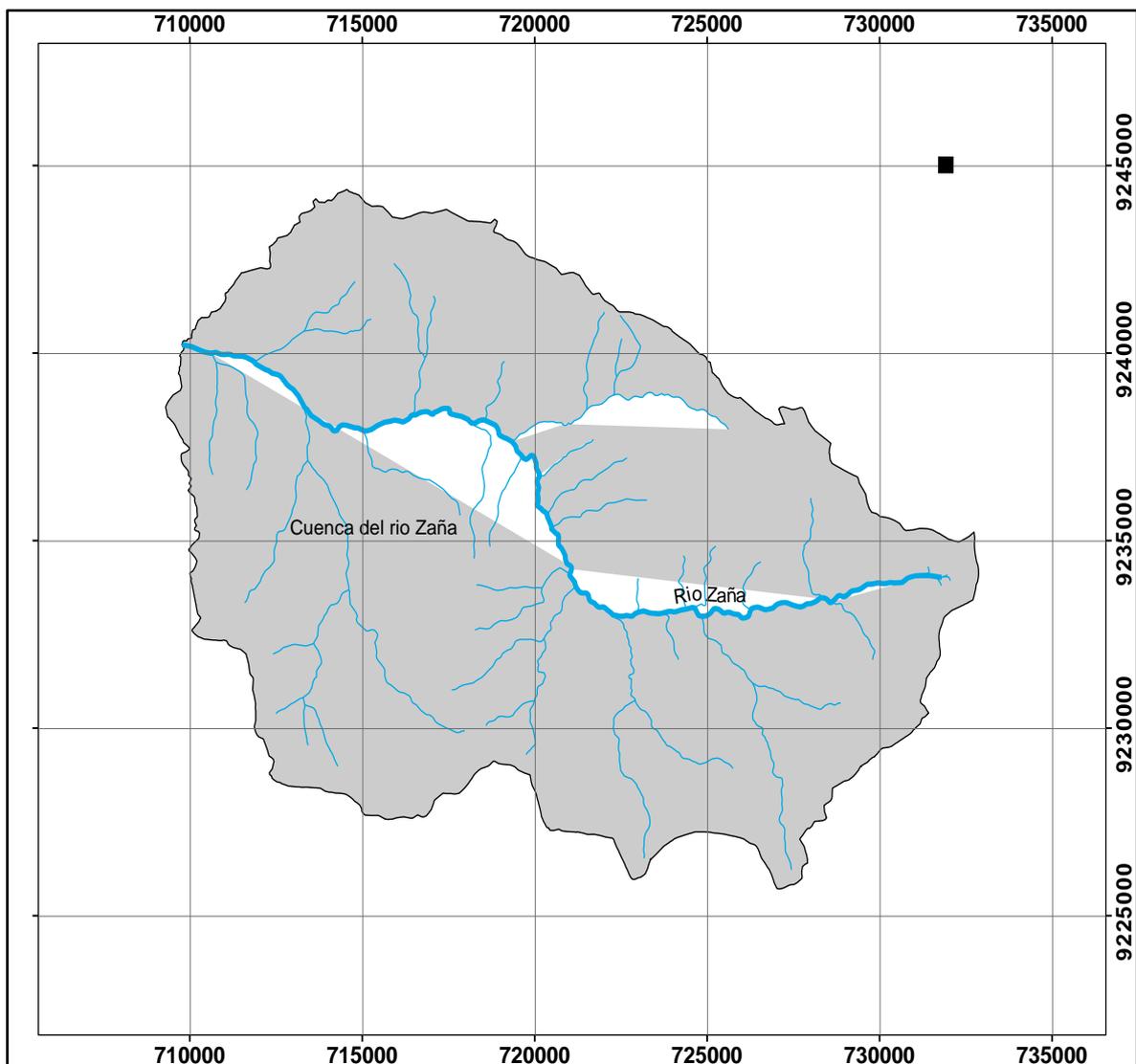


Figura 1. Delimitación de la cuenca del río Zaña.

Fuente: Modificado de INGEMMET (2021).

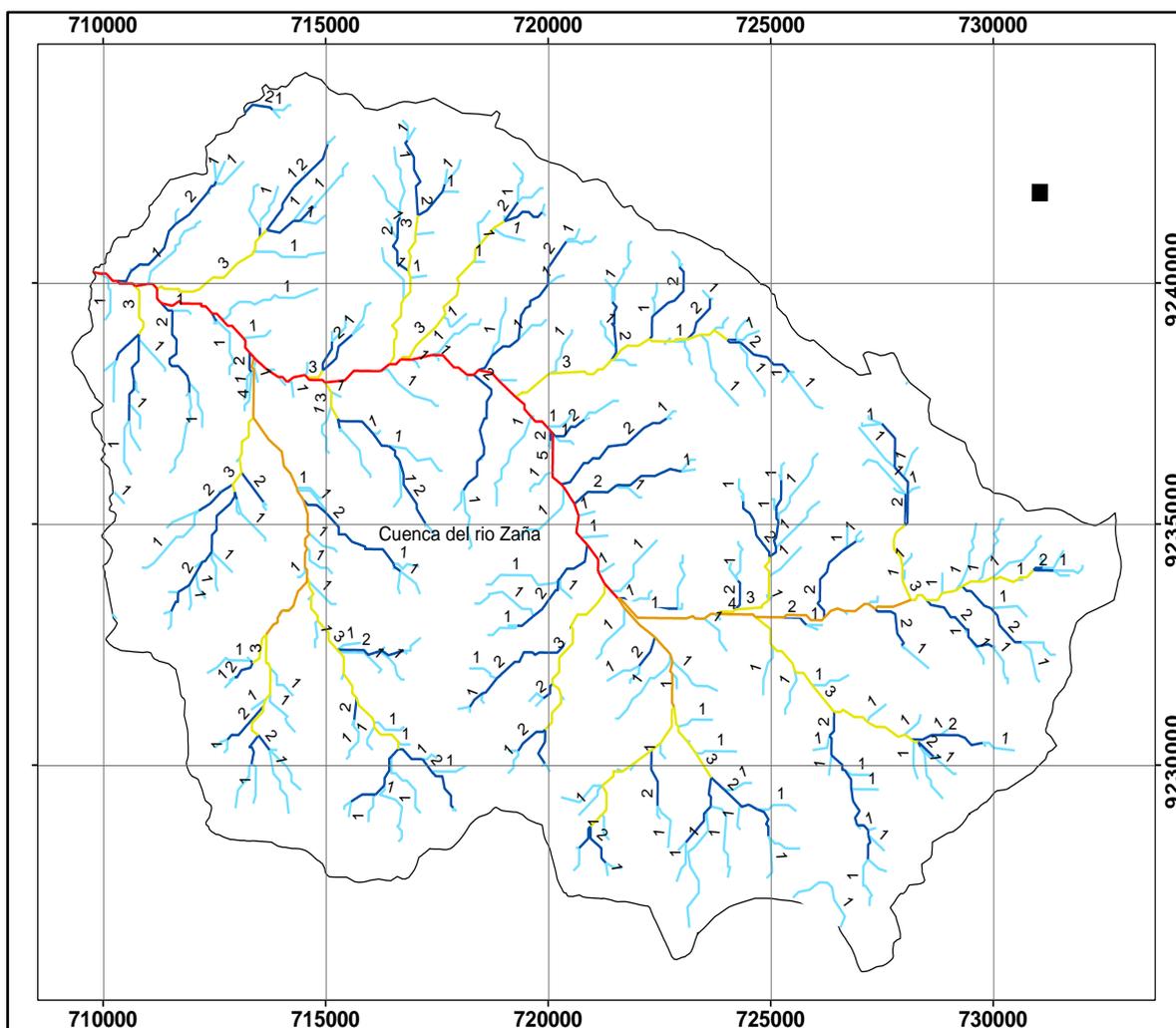


Figura 2. Orden la cuenca del río Zaña.

Fuente: Modificado de INGEMMET (2021).

#### 2.4.2. Ubicación geográfica.

La cuenca del río Zaña tiene una extensión de 274.53 km<sup>2</sup>, se ubica en la costa norte del territorio peruano, principalmente en las provincias de San Miguel y Santa Cruz, departamento de Cajamarca, correspondiente a la zona 17 S con Datum WGS 84, comprendida entre las siguientes coordenadas de referencia:

Tabla 3

*Coordenadas de referencia UTM.*

| <b>Vértices</b> | <b>Latitud</b> | <b>Longitud</b> |
|-----------------|----------------|-----------------|
| 1               | 9225900        | 709292          |
| 2               | 9244382        | 709292          |
| 3               | 9244382        | 732847          |
| 4               | 9225900        | 732847          |

#### 2.4.3. Demarcación hidrográfica.

La cuenca del río Zaña pertenece a la Vertiente del Pacífico, limita con las cuencas:

Por el Norte: Cuenca La Cárcel.

Por el Este: Medio Alto Chancay-Lambayeque y Cuenca San Miguel.

Por el Sur: Cuenca Pallac.

Por el Oeste: Medio Alto Zaña y Cuenca Nanchoc.

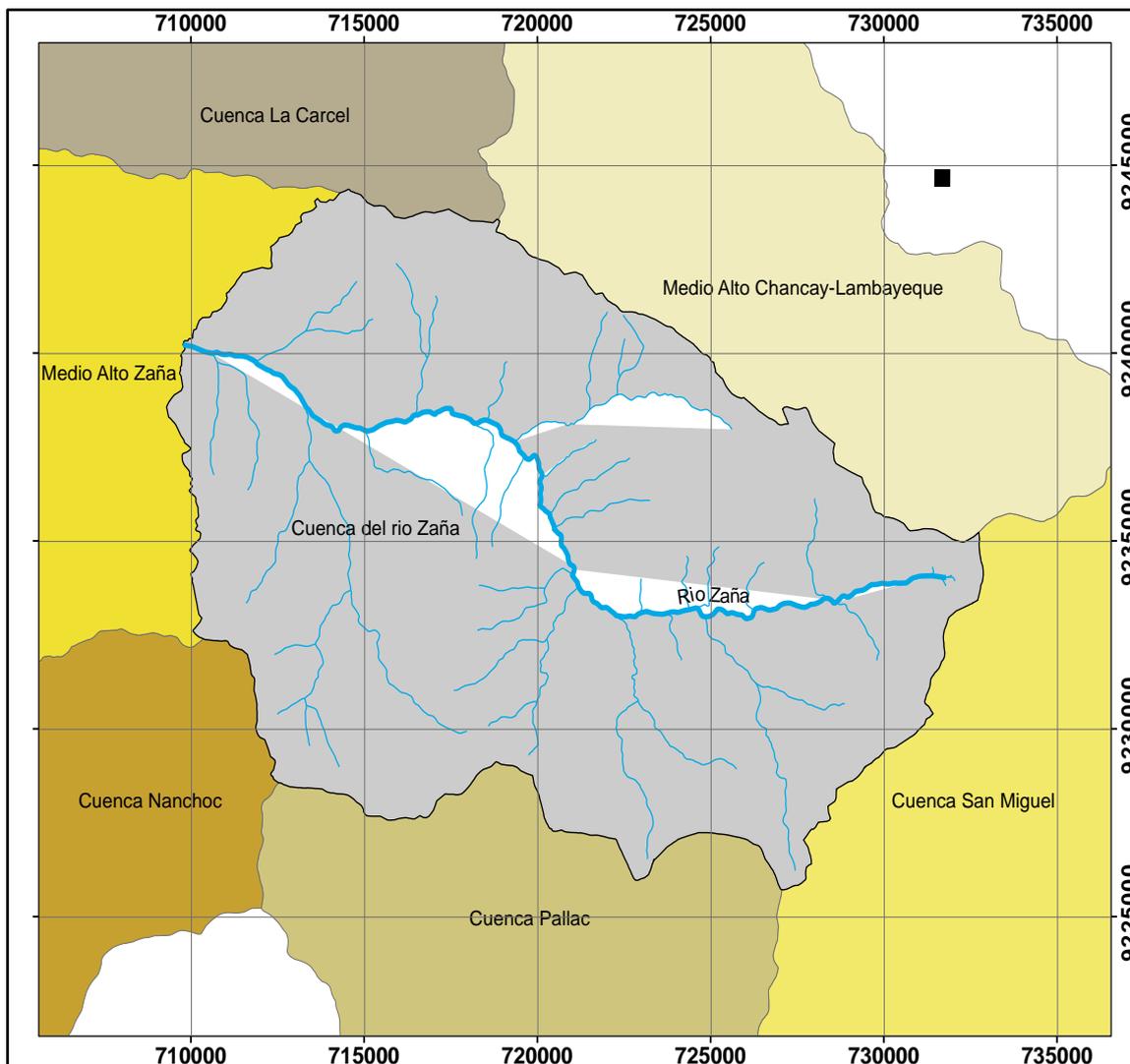


Figura 3. *Demarcación hidrográfica.*

Fuente: Modificado de INGEMMET (2021).

#### 2.4.4. Demarcación política.

El río Zaña es un corto río de la vertiente del Pacífico, localizado en la costa norte del Perú, ubicado políticamente entre los departamentos de Cajamarca específicamente abarca las provincias de San Miguel y Santa Cruz. Con una longitud de 27.917034 km, de dirección este-oeste, y desemboca en el océano Pacífico.

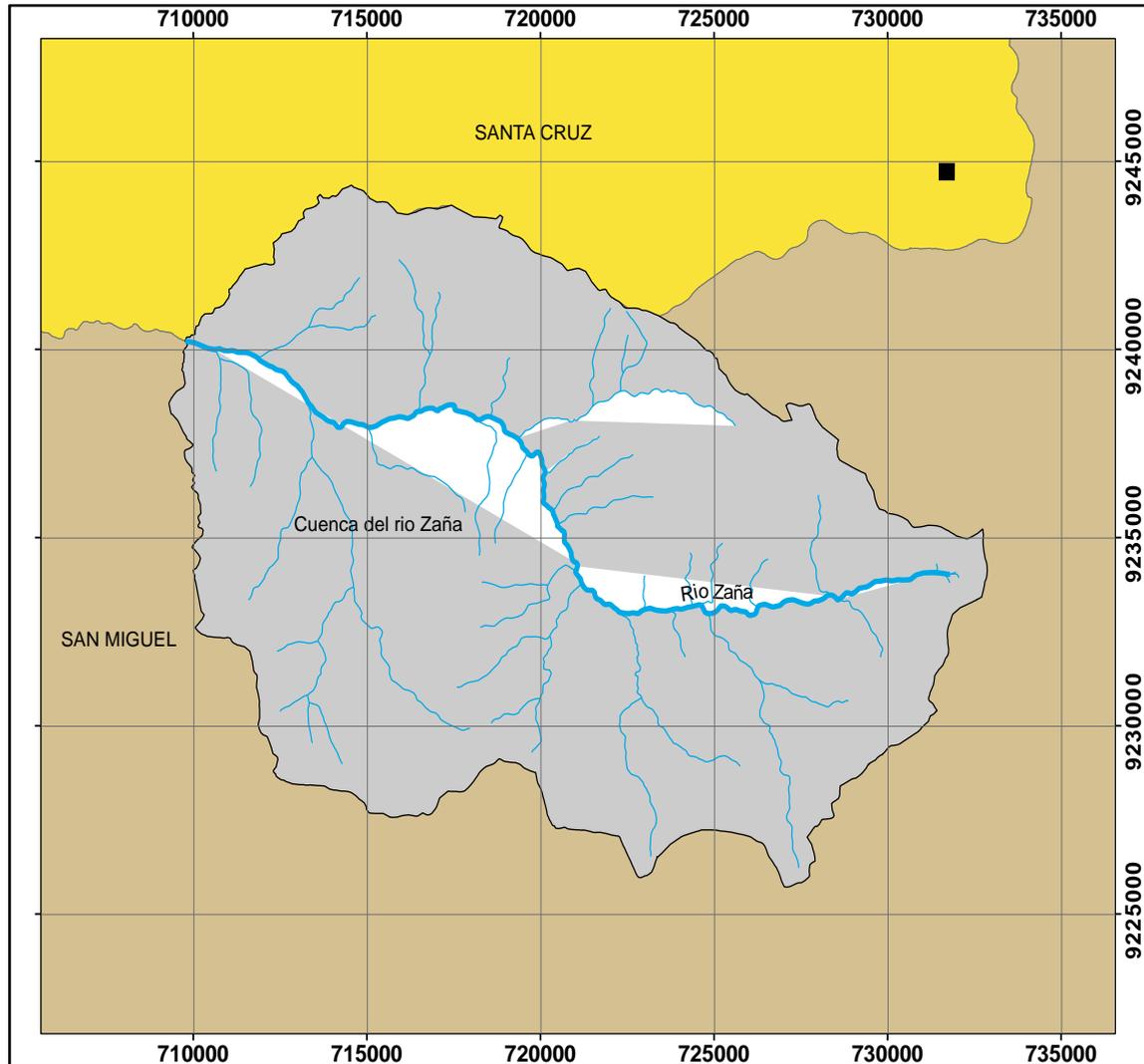


Figura 4. *Demarcación política.*

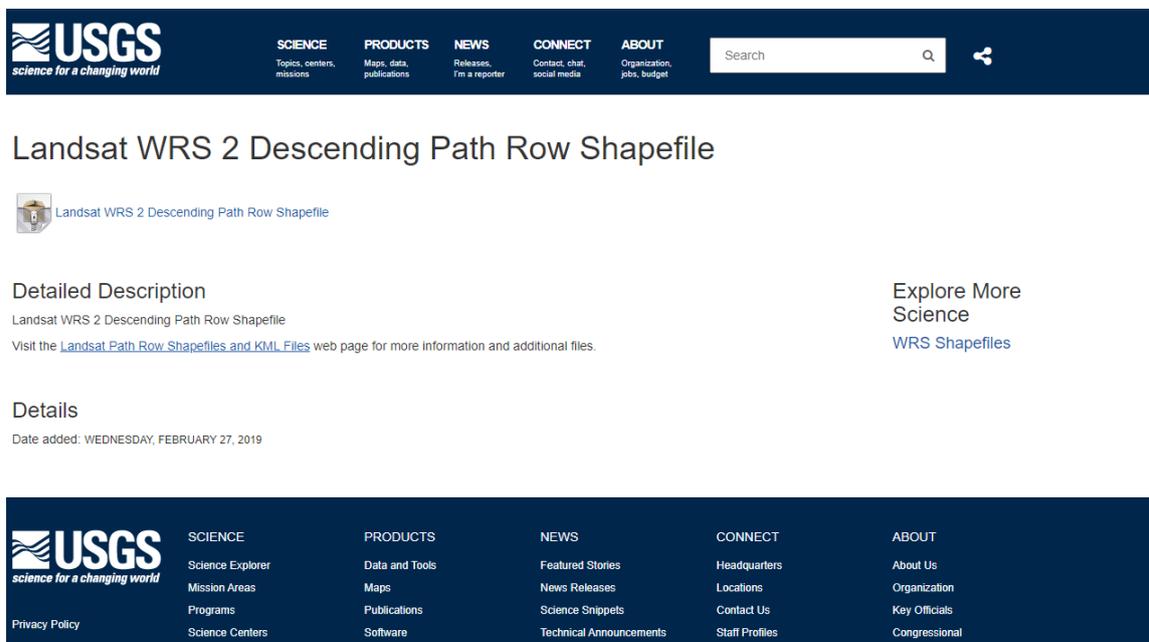
Fuente: Modificado de INGEMMET (2021).

#### 2.4.5. Descarga de la imagen LANDSAT 8.

Para la ubicación de la cuenca del río Zaña, primero se trabajó con el software ArcGIS, se añadieron archivos de información (Shapefile) de la cuenca del río Zana y los sectores WRS (Sistema de Referencia Mundial) del Perú.

Luego con la herramienta de identificación (Identify) se ubicó el cuadrángulo al que pertenece la ciudad, para poder obtener su imagen satelital. Una forma de obtenerla, es mediante el PATH y el ROW.

Paso 01: Descarga del sistema de LANDSAT WRS (PATH/ROW) nos dirigimos al siguiente enlace : <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-wrs-2-descending-path-row-shapefile>.



The screenshot shows the USGS website interface. At the top, there is a dark blue navigation bar with the USGS logo and the tagline 'science for a changing world'. Below the logo are several menu items: SCIENCE (Topics, centers, missions), PRODUCTS (Maps, data, publications), NEWS (Releases, I'm a reporter), CONNECT (Contact, chat, social media), and ABOUT (Organization, jobs, budget). A search bar is also present. The main content area features the title 'Landsat WRS 2 Descending Path Row Shapefile' and a sub-header 'Landsat WRS 2 Descending Path Row Shapefile'. Below this, there is a 'Detailed Description' section with a link to 'Landsat Path Row Shapefiles and KML Files' and a 'Details' section with the date 'WEDNESDAY, FEBRUARY 27, 2019'. On the right side, there are links for 'Explore More Science' and 'WRS Shapefiles'. At the bottom, there is another dark blue navigation bar with the USGS logo and a grid of links for SCIENCE, PRODUCTS, NEWS, CONNECT, and ABOUT.

Figura 5. Archivo de forma de fila de ruta descendente Landsat WRS.

Fuente: Servicio Geológico De Estados Unidos (USGS, 2019).

Paso 02: Cargar en el software ArcGIS los Shapefile correspondiente a la zona de estudio (cuenca del río Zaña) y el PATH/ROW de LandSat-Perú.

El PATH ROW que corresponde a nuestra zona de estudio es:

PATH: 9

ROW: 65

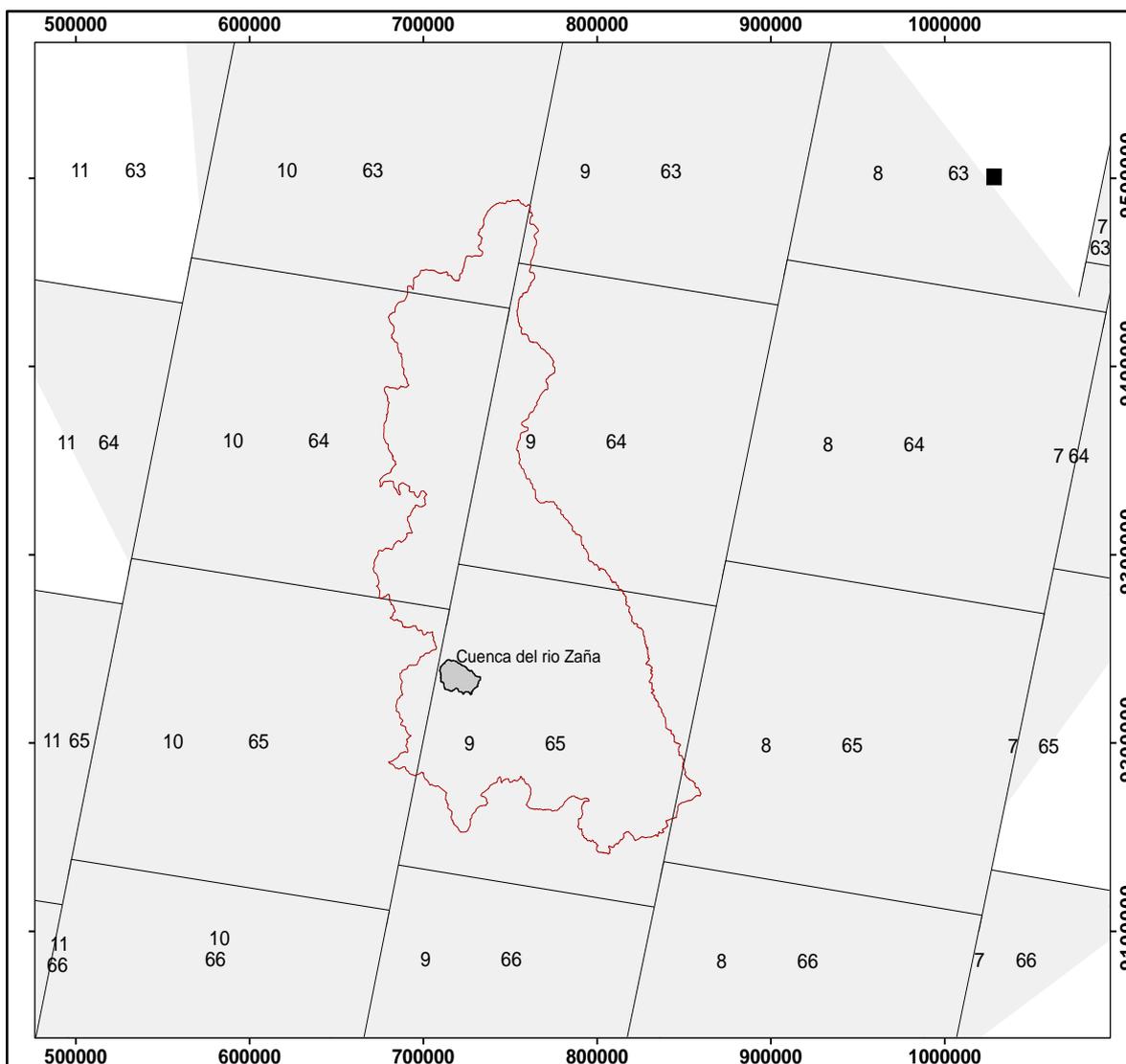


Figura 6. *PATH ROW* correspondiente a la cuenca del río Zaña.

Fuente: Modificado de INGEMMET (2021).

Paso 03: una vez obtenido el PTH ROW de nuestra zona de estudio se enlaza con la página servicio geológico de los estados unidos.

El servicio geológico de los estados unidos (USGS), proporciona imágenes satelitales gratuitas, dentro de ellos del Sensor LANDSAT 8, mediante la página web: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

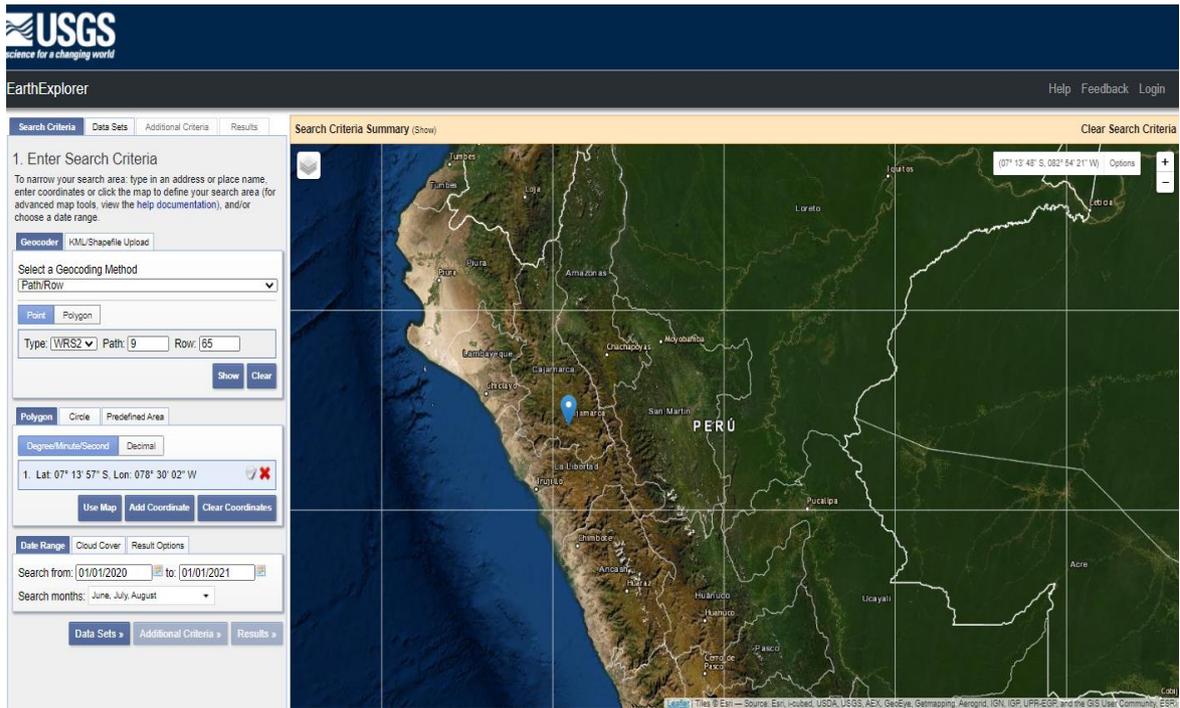


Figura 7. Web del Servicio Geológico De Los Estados Unidos.

Fuente: Servicio Geológico De Estados Unidos (USGS, 2019).

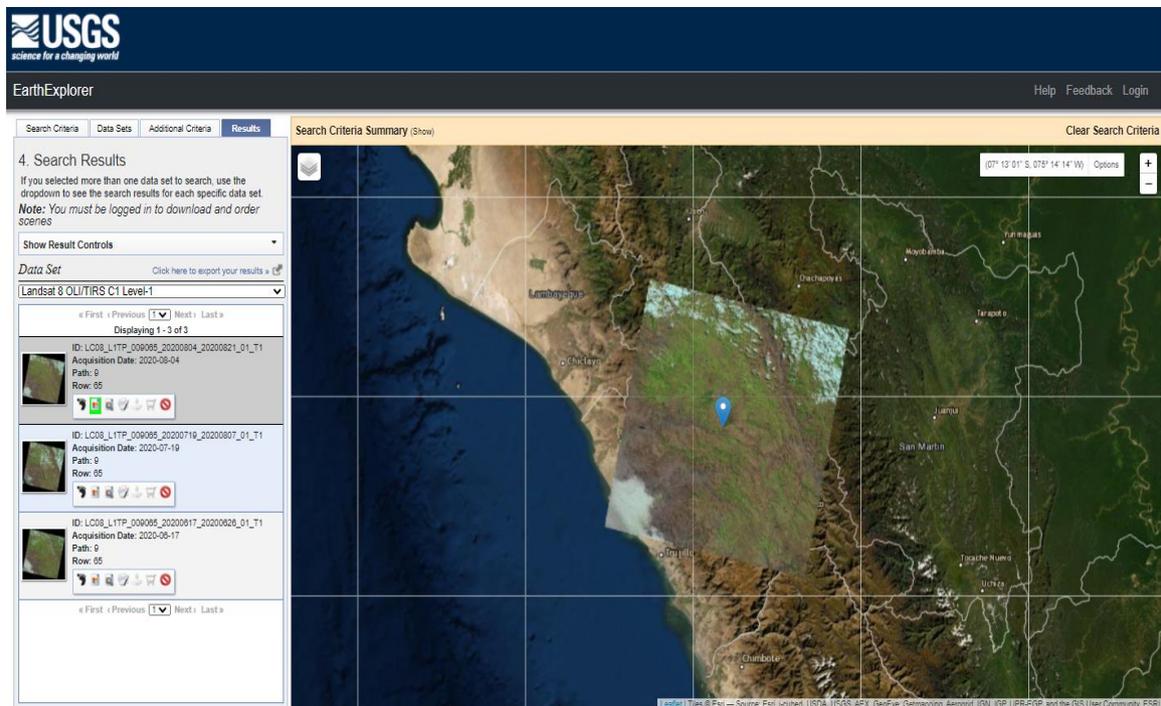


Figura 8. Descarga de la imagen satelital LandSat 8.

Fuente: Servicio Geológico De Estados Unidos (USGS, 2019).

Tabla 4.

*Características de la imagen Landsat 8*

| Atributo del conjunto de datos                | Valor de atributo                        |
|---|--|
| Identificador de producto Landsat             | LC08_L1TP_009065_20200804_20200821_01_T1 |
| Identificador de escena Landsat               | LC80090652020217LGN00                    |
| Fecha de Adquisición                          | 4/08/2020                                |
| Ruta (PATH) WRS                               | 9  |
| Fila (ROW) WRS                                | 65                                       |
| Identificador de sensor                       | OLI_TIRS                                 |
| Nivel de proyección de mapa-1                 | UTM                                      |
| Zona UTM                                      | 17                                       |
| fecha   | WGS84                                    |
| Elipsoide                                     | WGS84                                    |
| Tamaño de celda de cuadrícula<br>Pancromático | 15                                       |
| Tamaño de celda de cuadrícula<br>reflectante  | 30,00                                    |
| Tamaño de celda de rejilla Térmica            | 30,00                                    |
| Parámetro de sesgo Nombre de archivo<br>OLI   | LO8BPF20200804144959_20200804152348.02   |
| Parámetro de sesgo Nombre de archivo<br>TIRS  | LT8BPF20200804063150_20200819100527.02   |
| Archivo de parámetros de calibración          | LC08CPF_20200701_20200930_01.02          |
| Nombre de archivo RLUT                        | LC08RLUT_20150303_20431231_01_12.h5      |
| Latitud central                               | 7 ° 13'53.08 "S                          |
| Longitud del centro                           | 78 ° 27'53.82 "O                         |
| Lat de esquina UL                             | 6 ° 11'08.12 "S                          |
| Esquina UL larga                              | 79 ° 07'11.86 "O                         |
| UR esquina lat                                | 6 ° 32'43.55 "S                          |
| UR Corner Long                                | 77 ° 26'15.72 "O                         |
| LL esquina lat                                | 7 ° 55'09.66 "S                          |
| LL esquina larga                              | 79 ° 29'46.25 "O                         |
| LR esquina lat                                | 8 ° 16'58.26 "S                          |
| LR Corner Long                                | 77 ° 48'26.60 "O                         |
| Latitud central dec                           | -7.23141                                 |
| Longitud del centro dec                       | -78.46495                                |
| UL Corner Lat dec                             | -6.18559                                 |
| UL Corner Long dec                            | -79.11996                                |
| UR Corner Lat dec                             | -6.54543                                 |
| UR Corner Long dec                            | -77.4377                                 |
| LL Corner Lat dec                             | -7.91935                                 |
| LL Corner Long dec                            | -79.49618                                |
| LR Corner Lat dec                             | -8.28285                                 |
| LR Corner Long dec                            | -77.80739                                |

Fuente: Servicio Geológico De Estados Unidos (USGS, 2020).

#### 2.4.6. Corrección radiométrica y atmosférica de la imagen LANDSAT 8.

La corrección es un proceso importante ya que de ello dependerá en reducir cierto margen de error en el proceso, de este modo poder aprovechar lo máxima información contenida en la imagen. (USGS, 2019)

Los errores se pueden clasificar de una manera como: errores radiométricos (producidos por los instrumentos) y atmosféricos (producidos por la atmósfera). Cuando los datos de las imágenes son registrados por sensores embarcados en satélites estos pueden contener errores en geometría y en medida de los valores de brillo (ND) de los píxeles (radiométricos), de esta manera podemos considerar las siguientes fuentes de error: (USGS, 2019)

##### 2.4.6.1. Conversión ND a Radiancia en el sensor Landsat 8.

Las imágenes Landsat 8 consisten en una serie cuantificada y calibrada de niveles digitales que pueden ser redimensionados 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 (USGS, 2021):

$$L\lambda = ML * Q_{cal} + AL \quad (6)$$

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).



Figura 9. *Conversión ND a Radiancia en el sensor Landsat 8.*

Fuente: Imagen trabajada del Servicio Geológico De Estados Unidos (USGS, 2020).

#### 2.4.6.2. Determinación reflectancia aparente (TOA) Landsat 8.

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 (USGS, 2021):

$$\rho_{\lambda} = \frac{M\rho * Q_{cal} + A\rho}{SEN(\theta_{SE})} \quad (7)$$

$$\rho_{\lambda} = \frac{M\rho * Q_{cal} + A\rho}{SEN(\theta_{ZE})} \quad (8)$$

Donde:

$\rho_{\lambda}$ : Reflectancia TOA del sensor, con corrección del ángulo solar.

$Q_{cal}$ : Valores de los píxeles de productos estándar cuantifican y calibrados (ND).

$M\rho$ : Factor de cambio de escala multiplicativo (REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_x, donde x es el número de bandas).

$A\rho$ : Banda específica aditivo reescala el factor de los metadatos (REFLECTANCE\_ADD\_BAND\_x, donde x es el número de bandas).

$\theta_{SE}$ : 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).

$\theta_{ZE}$ : Ángulo zenital solar en grados, el cual es equivalente a:  $90^{\circ} - \theta_{SE}$ , donde  $\theta_{SE}$  es la elevación solar.

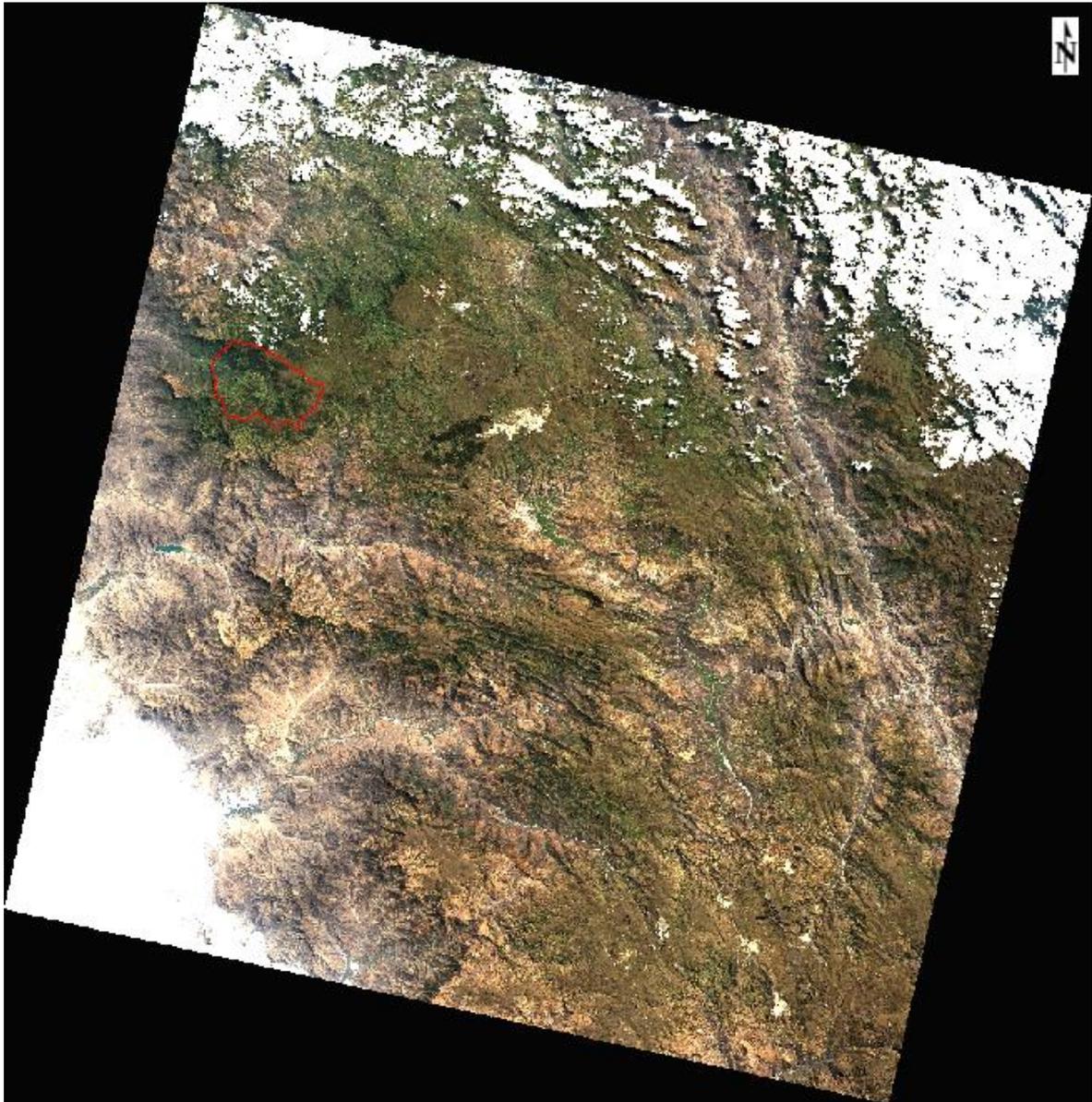


Figura 10. *Determinación reflectancia aparente (TOA) Landsat 8.*

Fuente: Imagen trabajada del Servicio Geológico De Estados Unidos (USGS, 2020).

#### 2.4.7. Recorte de la zona de estudio.

Una vez realizado las correcciones referentes a la imagen satelital LandSat 8, se procede a realizar el recorte de la zona de estudio lo cual corresponde a la cuenca del río Zaña la misma que fue delimitada anteriormente.

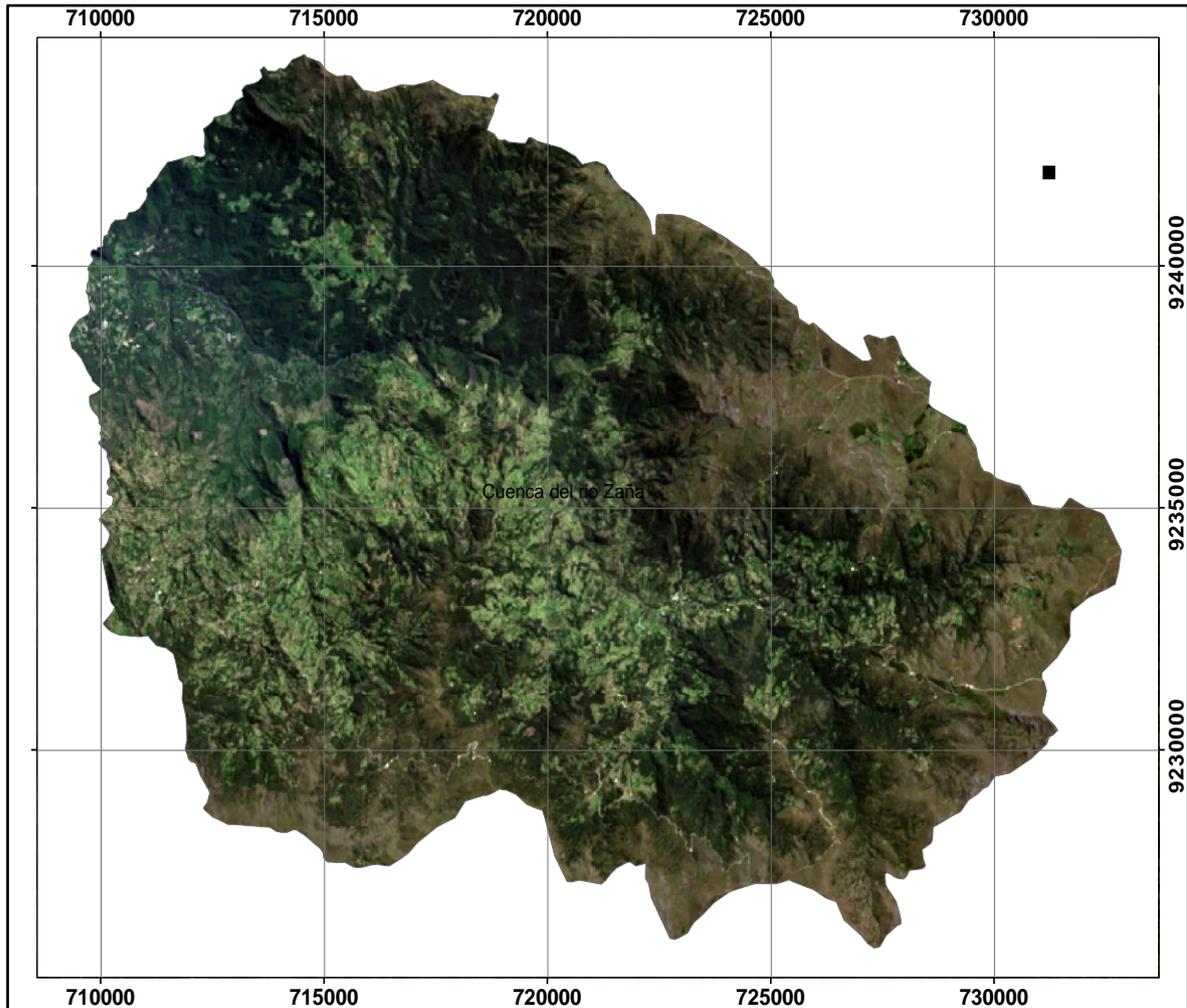


Figura 11. Recorte de la zona de estudio

Fuente: Imagen trabajada del Servicio Geológico De Estados Unidos (USGS, 2020).

#### 2.4.8. Cálculo de parámetros superficiales.

##### 2.4.8.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI):

###### **Obtención.**

El Índice de Diferencia de Vegetación Normalizado, también conocido como NDVI, por sus siglas en inglés. 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 (Rouse et al., 1974).

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.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (9)$$

Donde:

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

NIR: Reflectancia de la banda Infrarrojo cercano.

RED: Reflectancia de la banda roja.

Utilizando la fórmula en las imágenes Landsat 8:

$$NDVI = \frac{\text{Banda5} - \text{Banda4}}{\text{Banda5} + \text{Banda4}} \quad (10)$$

### **Análisis.**

La vegetación presente en la superficie es uno de los parámetros muy importantes para la recarga hídrica ya que juega un papel muy importante en el proceso de la infiltración del agua esto se debe a que disminuye la velocidad de la escorrentía, lo que permite un mayor aprovechamiento en la descarga.

Teniendo en cuenta las medidas cuantitativas, las cuales se basan en valores digitales mediante la fórmula mencionada podemos obtener la medida de la biomasa o vigor.

De esta manera poder identificar los valores que indique la calidad de vegetación las mismas que se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 5

*Clasificación del tipo de cobertura vegetal.*

| Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada |                          |
|--|--------------------------|
| Rangos de variación                            | Tipo de cobertura        |
| (0.5) - (+1.0)                                 | Vegetación Vigorosa      |
| (0.0) - (0.5)                                  | Vegetación poco Vigorosa |
| (-1.0) - (0.0)                                 | Suelo desnudo            |

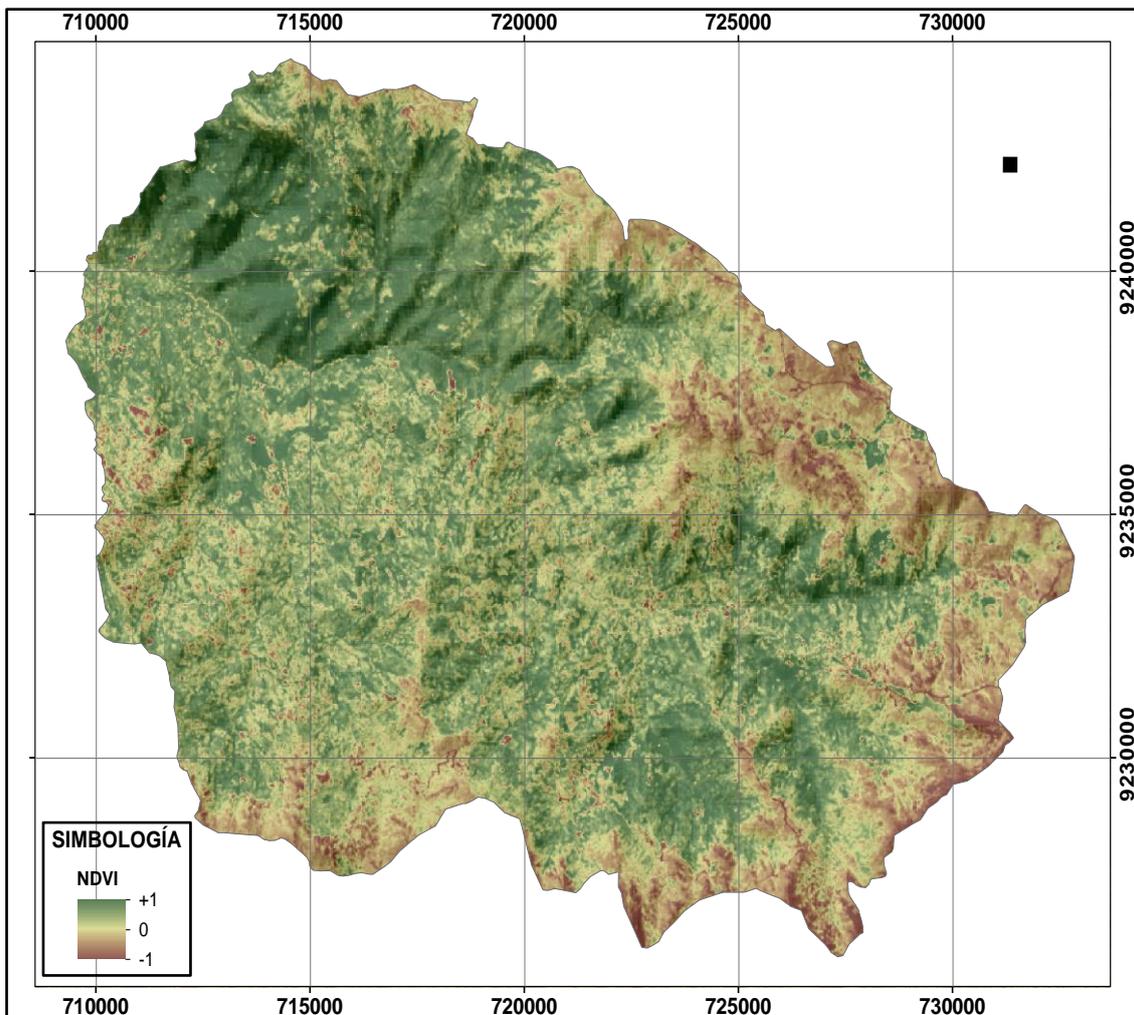


Figura 12. Obtención del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Fuente: Imagen trabajada del Servicio Geológico De Estados Unidos (USGS, 2020).

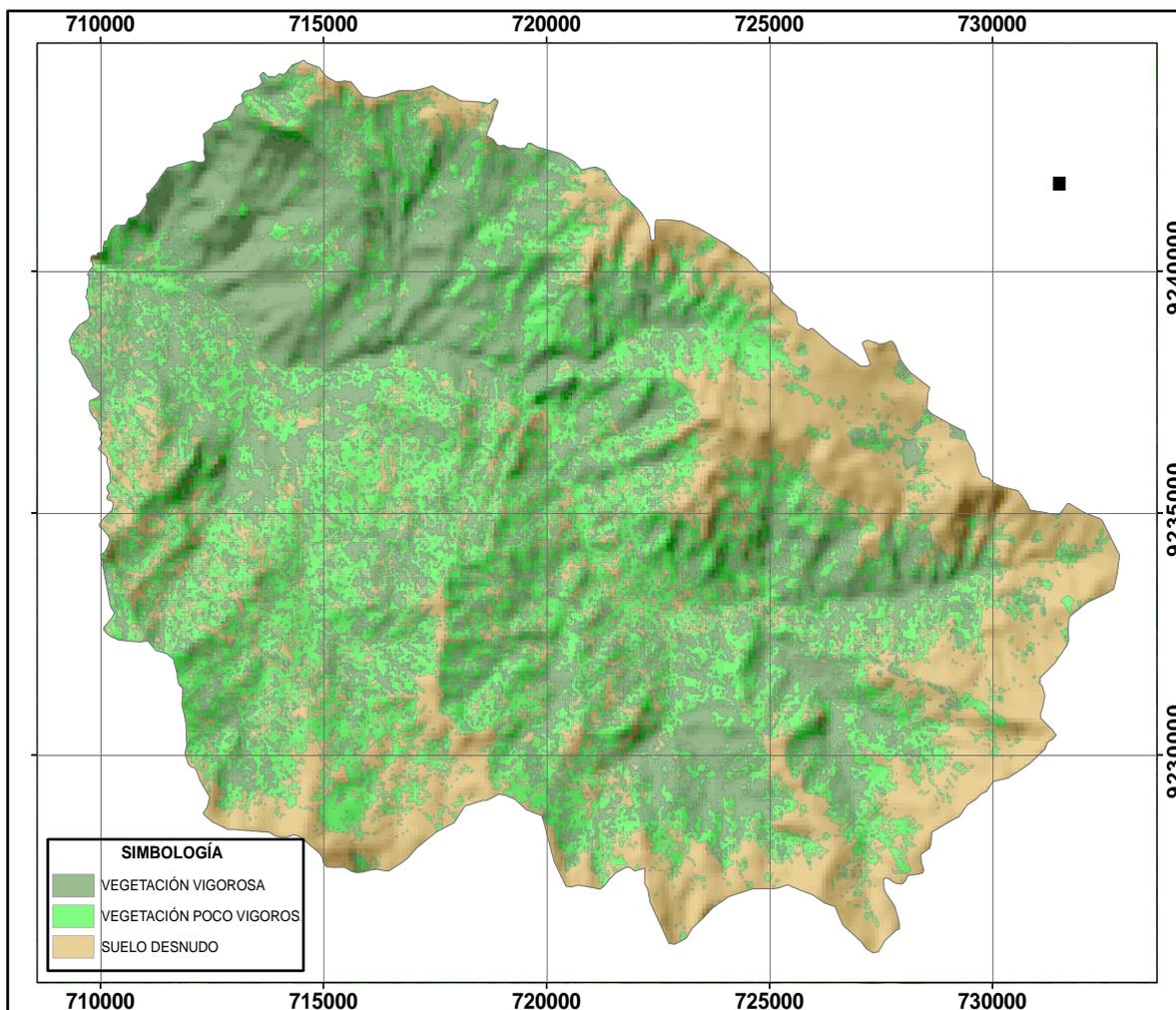


Figura 13. Clasificación del tipo de cobertura vegetal mediante el análisis de NDVI.

Fuente: Imagen trabajada del Servicio Geológico De Estados Unidos (USGS, 2020).

#### 2.4.8.2. Índice de Diferencia Normalizada Agua (NDWI):

##### Obtención.

Es un indicador numérico, derivada de imágenes satelitales, 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.

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad (11)$$

Donde:

NIR: Reflectancia de la banda infrarrojo cercano.

GREEN: Reflectancia de la banda verde.

Utilizando la fórmula en las imágenes Landsat 8:

$$NDWI = \frac{\text{Banda3} - \text{Banda5}}{\text{Banda3} + \text{Banda5}} \quad (12)$$

### **Análisis.**

Para poder determinar la presencia de agua superficial presente en cuenca del río Zaña, se realizó un proceso de adquisición de datos espectrales obtenida mediante la información contenida en los sensores remotos.

Las imágenes del satélite Landsat 8 es considerada como una fuente de información para procesos ambientales en la actualidad ya que cuenta con sensores que permiten una mejor captura de la información espectral.

Para poder identificar los cuerpos de agua nos basamos en la fórmula del Índice de Diferencia Normalizada Agua el cual apoyándonos de software Envi 5.3 en el que arrojo valores de un rango de -1 a +1, cuyos resultados se detallan en la tabla siguiente:

Tabla 6

*Ubicación del agua superficial mediante el Índice de Diferencia Normalizada Agua*

| Índice de Diferencia Normalizada Agua |                   |
|---------------------------------------|-------------------|
| Rangos de variación                   | Tipo de cobertura |
| (0.0) - (+1.0)                        | Agua superficial  |

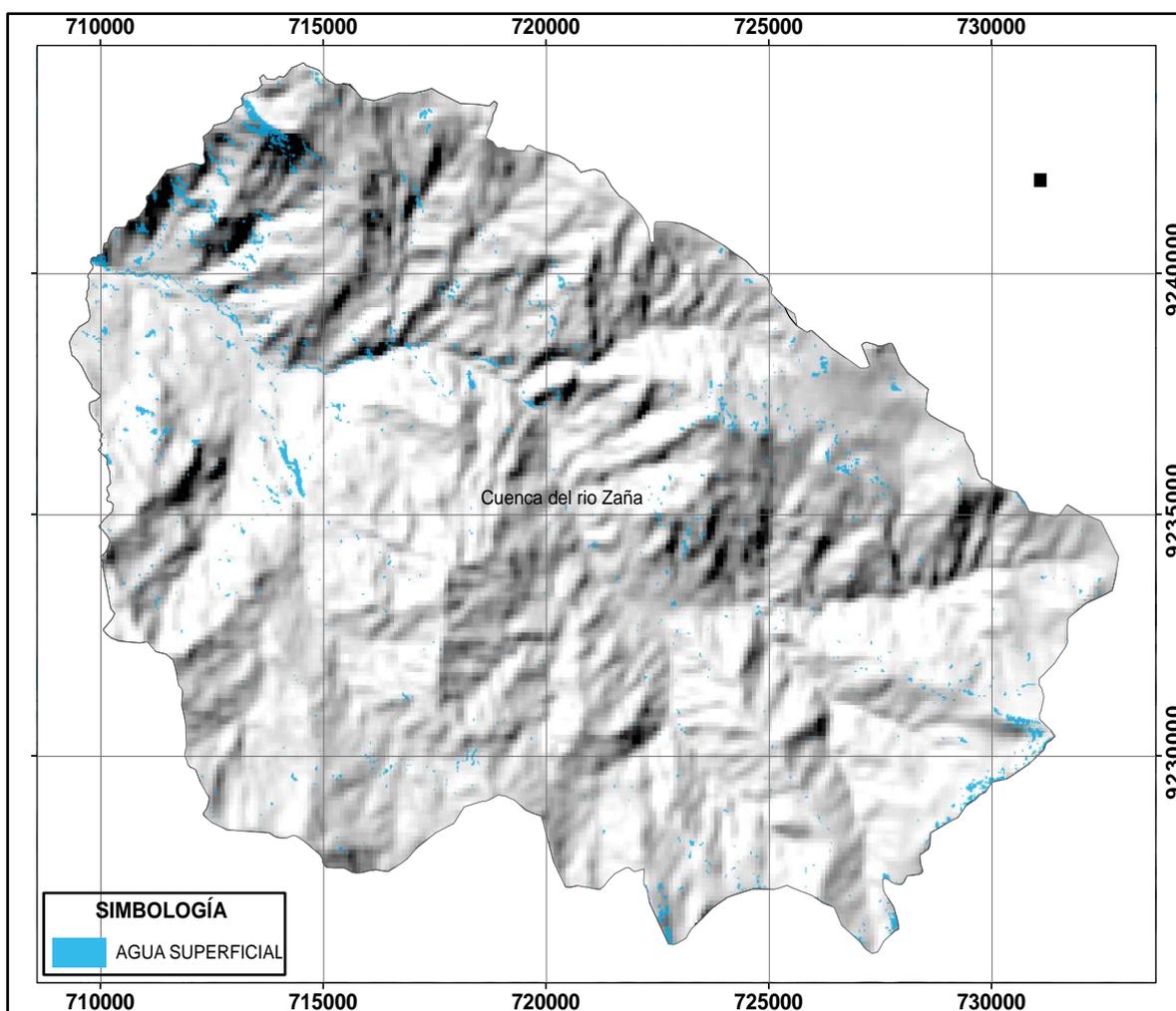


Figura 14. Agua superficial de la cuenca del río Zaña

Fuente: Imagen trabajada del Servicio Geológico De Estados Unidos (USGS, 2020).

### 2.4.8.3. Temperatura.

#### Obtención.

El proceso para el cálculo de temperatura se inicia con los ND (número digital) detectados por el sensor. Al igual que en el espectro óptico, estos valores codifican un valor de radiancia en este caso correspondiente a las dos bandas del infrarrojo térmico. (Meijerink, 2007)

Aquí el objetivo no es encontrar la relación entre el flujo incidente en el suelo y el reflejo al sensor sino entre el flujo emitido desde el suelo y el recibido por el sensor. Entre ambas magnitudes vuelven a interponerse los componentes de la atmósfera y emiten su propia energía distorsionando la radiancia recibida por el sensor. (Meijerink, 2007)

Las bandas obtenidas por el sensor TIRS pueden ser convertidas en radiancia espectral a temperatura de brillo en grados kelvin (k), usando para ello la constante térmica suministrada en el archivo de metadatos, (Chuvienco, 2002):

$$T=K2/(\ln(K1/L\lambda+1)) \quad (13)$$

Donde:

T = Temperatura de brillo aparente

$L\lambda$  = Corresponde a la reflectancia en el techo de la atmósfera TOA

K1 = Es la constante de conversión K1 específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato (K1\_CONSTANT\_BAND\_x, x es el número de la banda, 10 o 11)

K2 = Es la constante de conversión K2 específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato (K2\_CONSTANT\_BAND\_x, x es el número de la banda, 10 o 11).

**Análisis.**

De la imagen se obtuvo la temperatura superficial del suelo en grados Kelvin (K°) los cuales serán transformados a temperatura de grados Celsius (C°) comerciales para Perú, teniendo como referencia que:

$$C^{\circ} = K^{\circ} - 273.15. \quad (14)$$

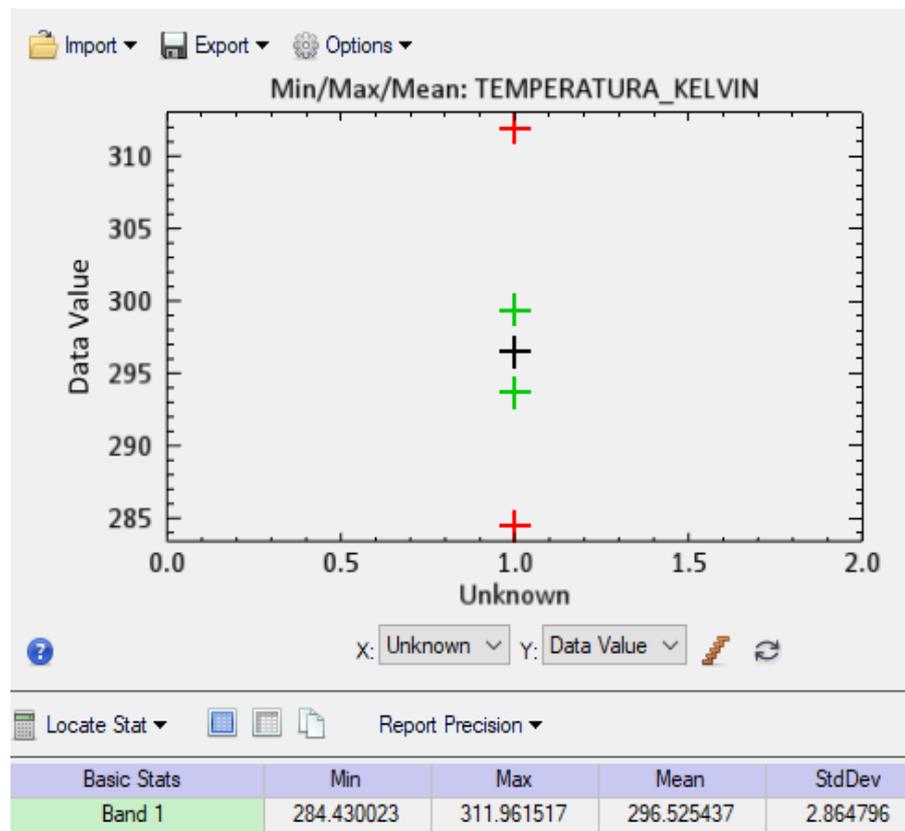


Figura 15. Temperatura superficial del suelo en grados Kelvin.

Obteniéndose así temperaturas la temperatura mínima, máxima y media en grados Celsius, las mismas que no servirán para indicar un parámetro más para la ayuda en la determinación de zonas de recarga hídrica.

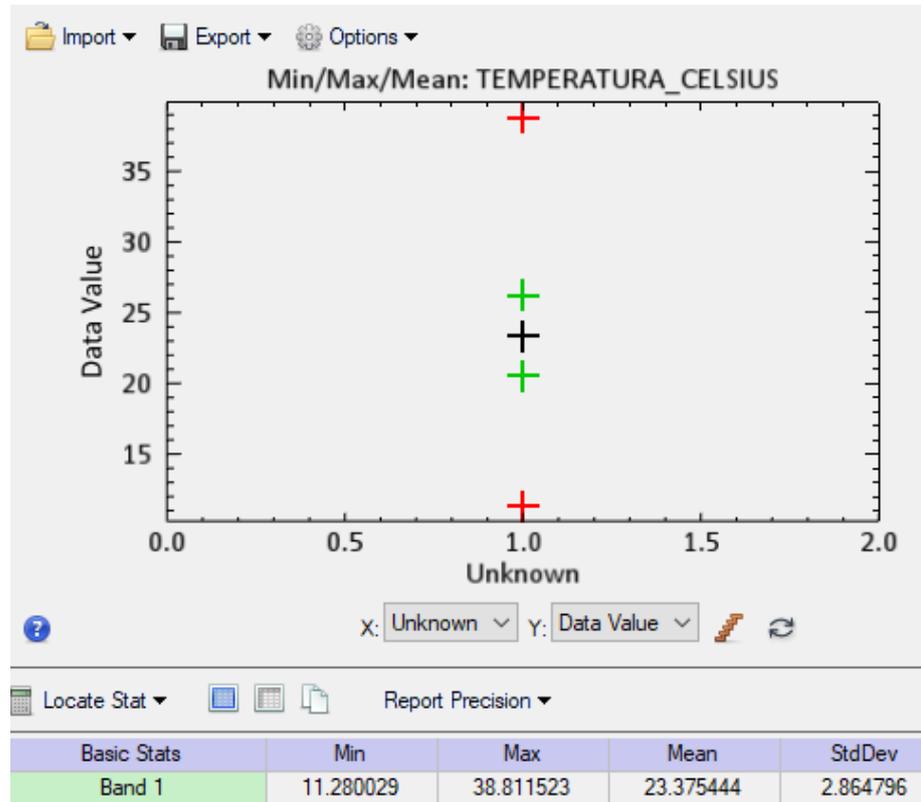


Figura 16. *Temperatura del suelo en grados Celsius.*

De esta manera podremos analizar que las zonas favorables para la recarga hídrica son aquellas menores a la temperatura media (11.28 – 23.37) las zonas no favorables para la infiltración las que se encuentran por encima de la temperatura media (23.37-38.81).

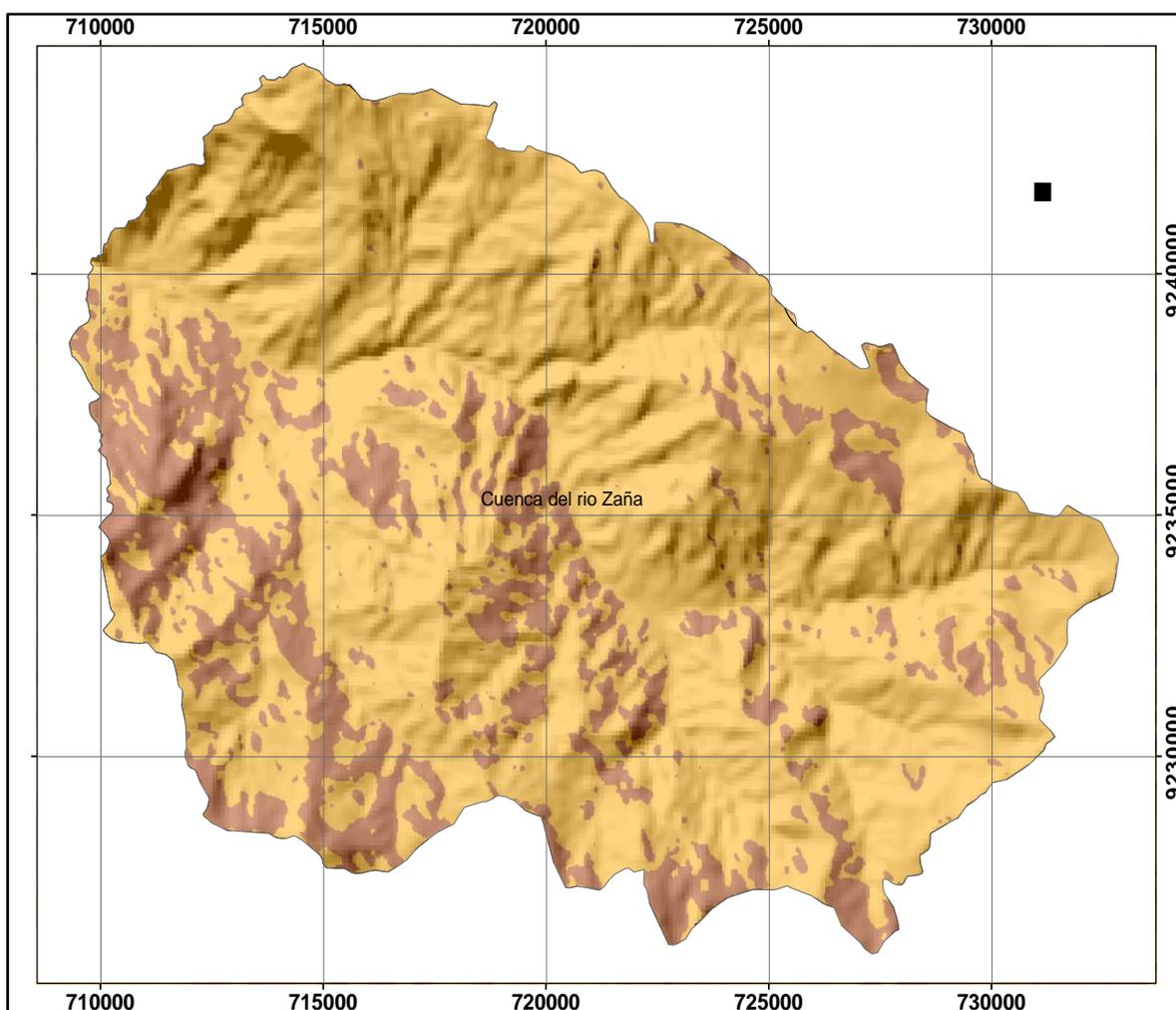


Figura 17. Zonas favorables y desfavorables en función a la temperatura superficial del suelo.

Fuente: Imagen trabajada del Servicio Geológico De Estados Unidos (USGS, 2020).

#### 2.4.8.4. Pendiente:

##### Obtención.

Para cada celda, la herramienta Pendiente calcula la tasa máxima de cambio del valor de esa celda a sus vecinas. Básicamente, el cambio máximo en la elevación sobre la distancia entre la celda y sus ocho vecinas identifica el descenso cuesta abajo más empinado desde la celda. (Meijerink, 2007)

Conceptualmente, la herramienta ajusta un plano a los valores  $z$  (elevación) de una vecindad de celdas de  $3 \times 3$  alrededor de la celda de procesamiento o central. El valor de pendiente de este plano se calcula mediante la técnica de promedio máximo. La dirección a la que apunta el plano es la orientación para la celda de procesamiento. Mientras menor sea el valor de la pendiente, más plano será el terreno; mientras más alto sea el valor de la pendiente, más empinado será el terreno. (Meijerink, 2007).

Tabla 7

*Grado de infiltración en función de la pendiente.*

| <b>PENDIENTES</b>     |                   |                              |
|-----------------------|-------------------|------------------------------|
| <b>Porcentaje (%)</b> | <b>Grados (°)</b> | <b>Grado de infiltración</b> |
| 0 – 15 %              | 0° - 13.5°        | Favorable                    |
| 15 % - 30 %           | 13.5° - 27°       | Moderadamente                |
| Mayores a 30 %        | Mayores a 27°     | Desfavorable                 |

Fuente: Schosinsky (2006)

### **Análisis.**

La pendiente es un evaluador muy importante para poder identificar las zonas de recarga hídrica, ya que está directamente relacionada con la escorrentía superficial. Esto quiere decir que en los sitios con pendientes altas aumenta la velocidad de la escorrentía, por el contrario, en pendientes bajas la velocidad de la escorrentía es lenta y permanece por más tiempo, lo que favorece el proceso de recarga hídrica.

De esta manera para el análisis del presente estudio nos regimos en los grados de infiltración determinados por Schosinsky, descrito en la tabla mencionada.

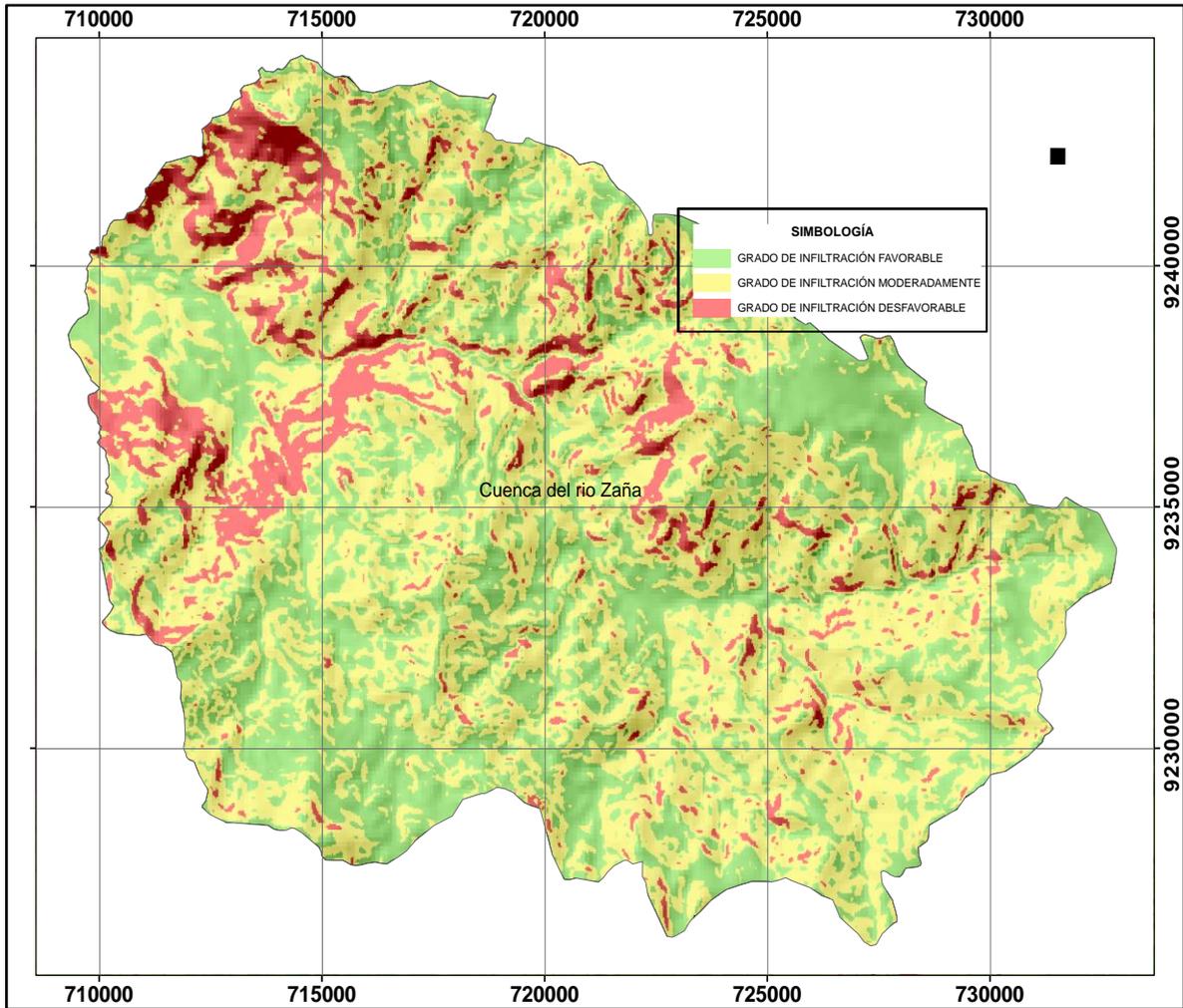


Figura 18. *Grado de infiltración según la pendiente*

Fuente: Imagen trabajada del Servicio Geológico De Estados Unidos (USGS, 2020).

### CAPÍTULO III. RESULTADOS

Una vez obtenidos los parámetros superficiales tales como:

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Índice de Diferencia Normalizada Agua (NDWI)

Temperatura superficial del suelo (TS)

Pendientes (PEN)

A partir de dichos parámetros superficiales se realizó un análisis usando un método espectral el cual lleva como nombre clasificador de árbol, el cual consiste en combinar cada uno de los parámetros superficiales de análisis, obteniendo como resultado las zonas de recarga hídrica.

Tabla 8.

*Abreviaturas utilizadas en el árbol de decisiones*

| Descripción                                     | Abreviatura |
|---|-------------|
| Zonas de recarga hídrica favorable              | ZO-RE-FA    |
| Zona de recarga hídrica moderadamente favorable | ZO-RE-MF    |
| Zona de recarga hídrica no favorable tipo 1     | ZO-RE-NF1   |
| Zona de recarga hídrica no favorable tipo 2     | ZO-RE-NF2   |
| Agua superficial tipo 1                         | AGU-SUP1    |
| Agua superficial tipo 2                         | AGU-SUP2    |
| Afloramiento rocoso tipo 1                      | AFLO-RO1    |
| Afloramiento rocoso tipo 2                      | AFLO-RO2    |

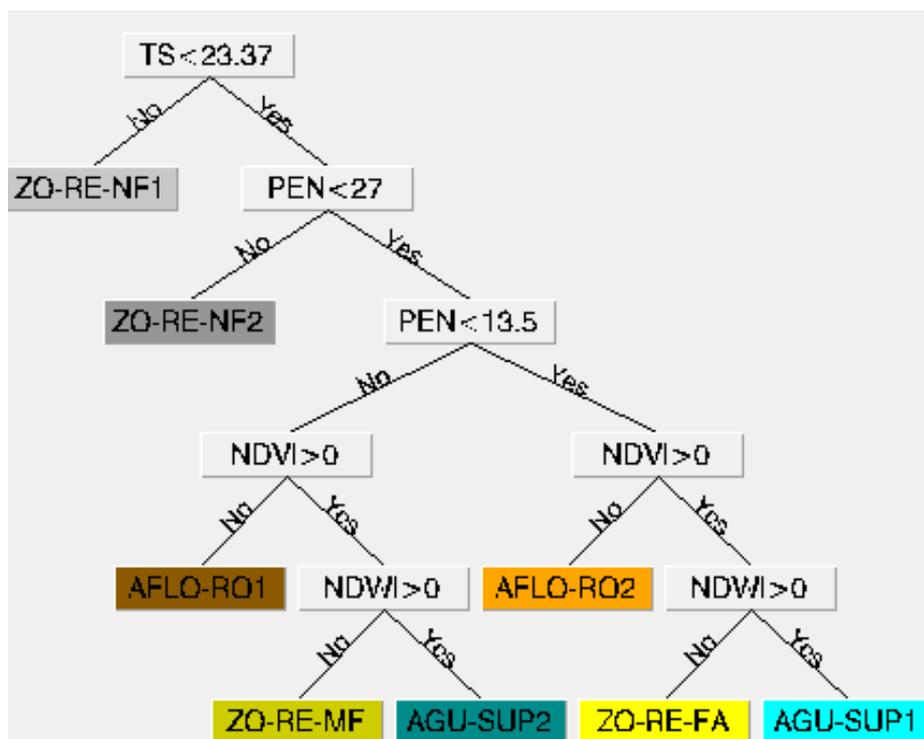


Figura 19. Clasificador dicotómico

Para la elaboración del clasificador dicotómico mostrado en la Figura 19, se tuvo en cuenta la combinación de los parámetros superficiales mencionados, para los cuales se consideró en el primer nivel la temperatura superficial (TS) mayores o menores a 23.37, en el segundo y tercer nivel pendientes (PEN) mayores o menores a 27° este criterio basado en la tabla 7, donde hace mención que pendientes mayores a 27° indican zonas de recarga hídrica no favorable, en pendientes entre 13.5° a 27° indican zonas de recarga hídrica moderadamente favorable y pendientes menores a 13.5° indican zonas de recarga hídrica favorable, en el cuarto nivel valores basados en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) cuyo criterio indica que todo valor mayor a cero indica vegetación y agua superficial, valores menores a cero indica afloramiento rocoso, en quinto nivel basados en el Índice de Diferencia Normalizada Agua (NDWI) cuyo criterio indica que todo valor mayor a cero obtenemos zonas de agua superficial y valores menores a cero zonas de recarga hídrica;

cuyos resultados serán mostrados en un mapa temático con coordenadas UTM, los cuales serán mostrados en la figura 20.

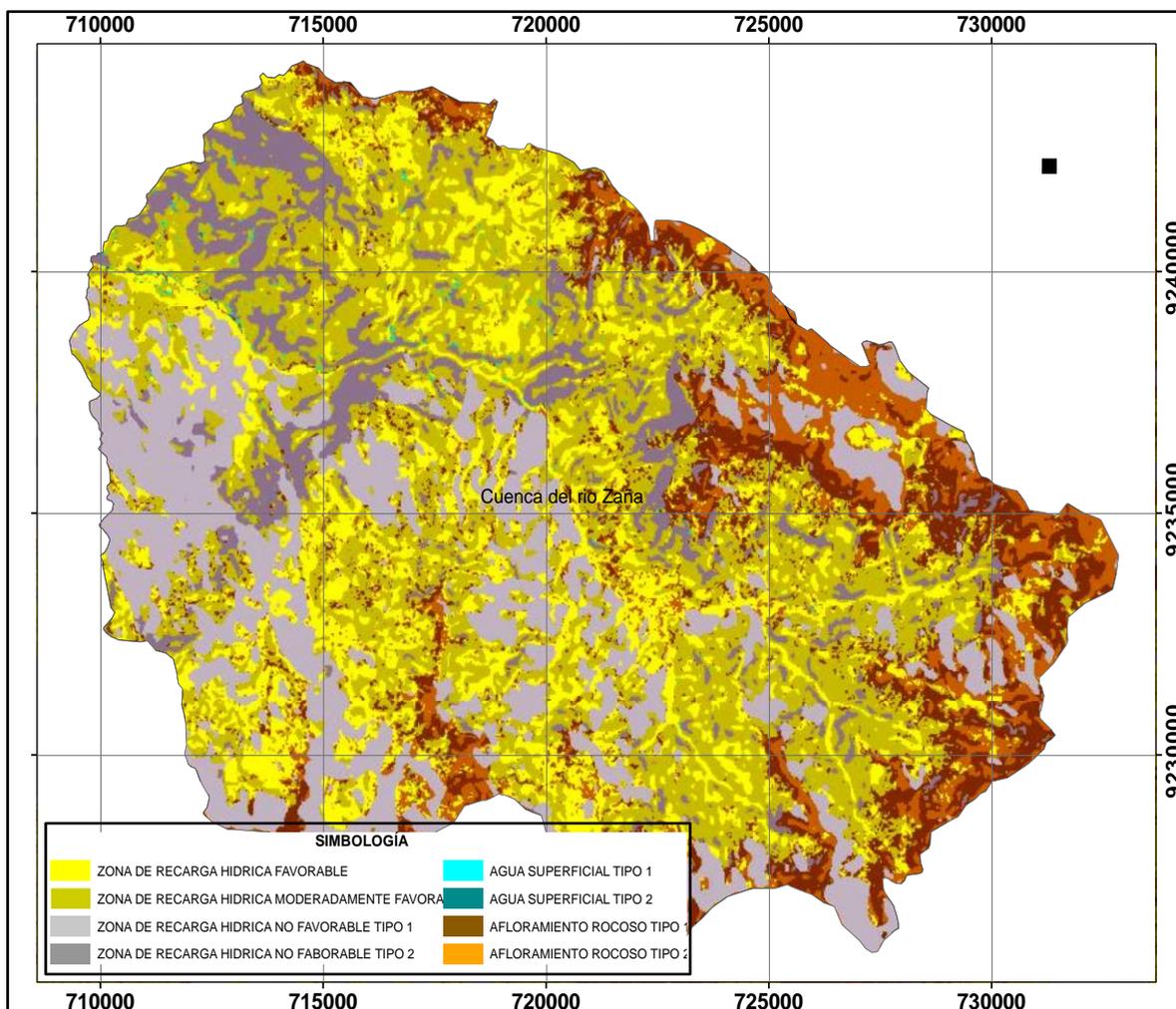


Figura 20. Resultado de análisis del árbol de decisiones

Realizando un ajuste a las condiciones de selección tenemos como resultado un mapa temático (figura 21) en donde permite la ubicación de las diferentes zonas de recarga hídrica favorable, moderadamente favorable y desfavorable, en coordenadas UTM.

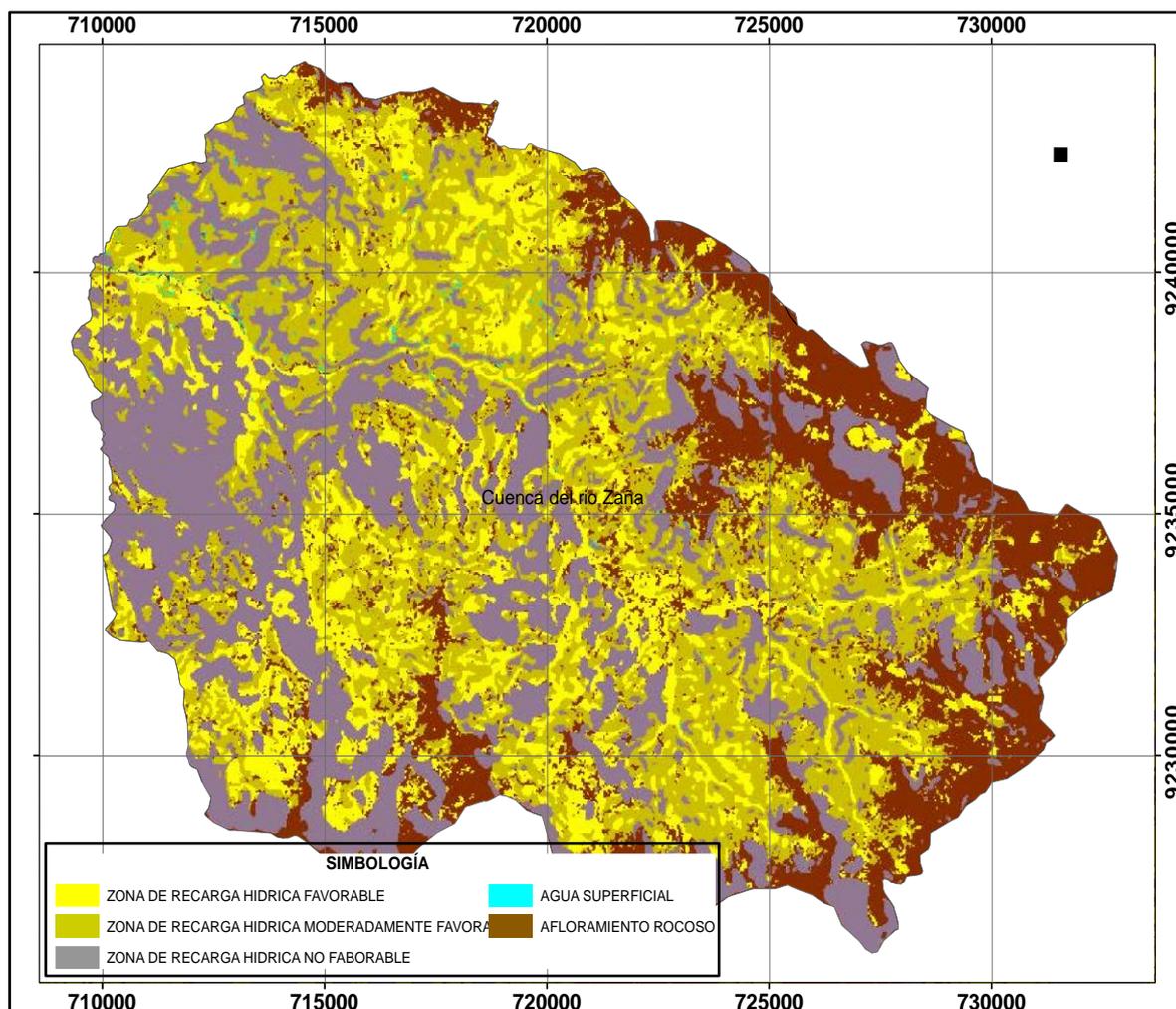


Figura 21. Zonas de recarga hídrica

Para delimitar la zona de cabecera de la cuenca del río Zaña se utilizó la Ley 30640, Criterios técnicos para la identificación, delimitación y zonificación de cabeceras de cuenca. (ANA, 2020), la cual indica que para realizar la delimitación de la zona de cabecera es necesario determinar la naciente de los cursos de agua de orden 1, para ello fue necesario el uso del programa ArcGIS, mediante la herramienta “Hidrology”; haciendo uso de esta herramienta fue posible calcular la dirección de flujo, el flujo acumulado y los causes principales que permitieron determinar los órdenes de los drenajes de la cuenca del río Zaña, como se aprecia en la figura 22.

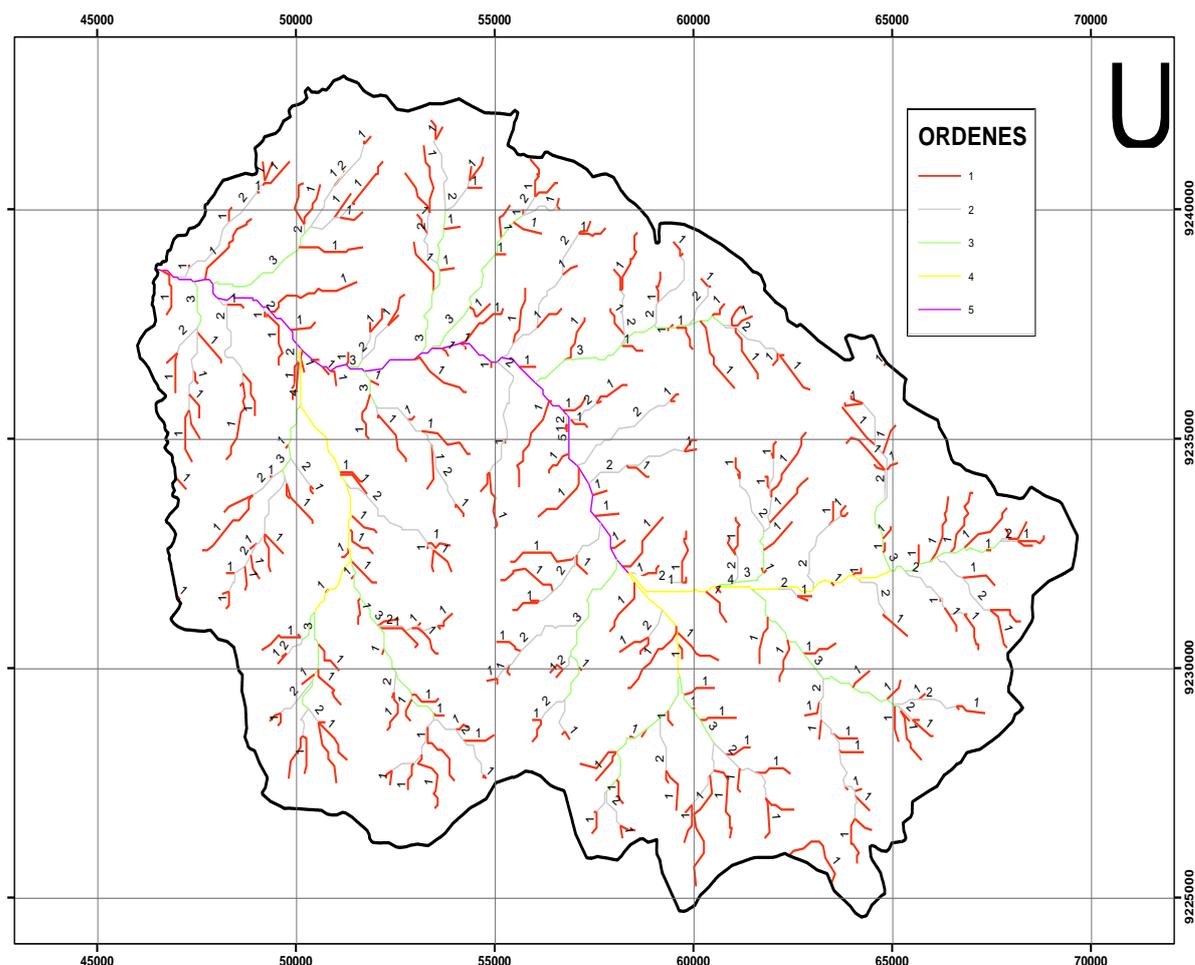


Figura 22. Drenajes y sus órdenes en la cuenca del río Zaña

En la figura 22 se aprecia también la presencia de 6 órdenes para los drenajes que componen la cuenca del río Zaña, siendo este el de orden 6, los drenajes que se aprecias en las líneas de las divisorias de agua por lo general son de orden 1 y 2, y estos son las que determinan la delimitación de las zonas de cabecera.

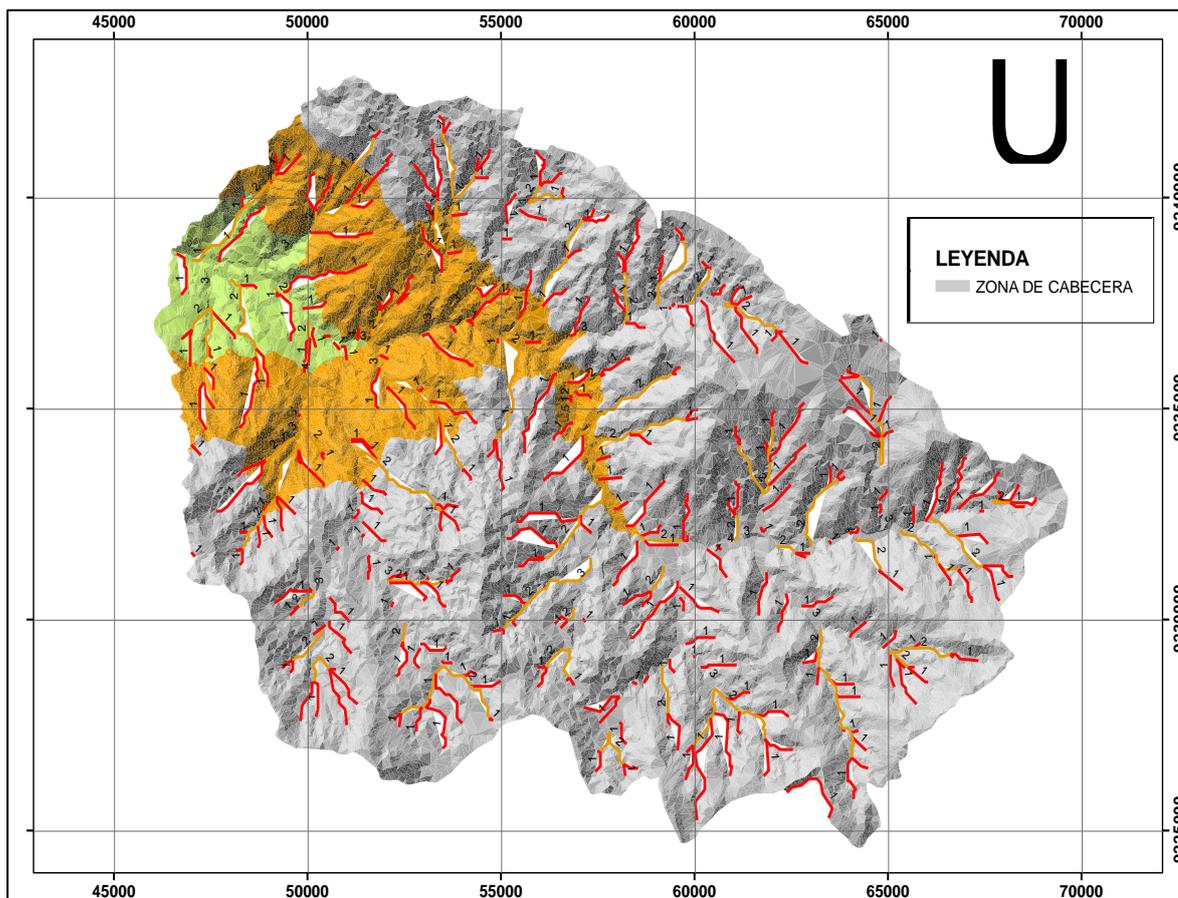


Figura 23. *Delimitación de zona de cabecera*

En la figura 23 se aprecia la zona de cabecera de la cuenca del río Zaña en color gris delimitada gracias al teorema de Strahler, en la cual se observa los órdenes de tipo 1 en color rojo a lo largo de esta zona, La zona de cabecera está comprendida entre la divisoria de aguas y la mayor confluencia de órdenes nacientes (tipo 1).

A partir de la identificación de la zona de cabecera, se realizó la contrastación de las zonas de recarga hídrica verificándose que de un 100 % de zonas de recarga hídrica 82 % corresponde a la zona de cabecera, como se observa en la figura 23 y tabla 10, en color amarillo se observa las zonas de recarga hídrica favorable y en color gris la zona de cabecera de la cuenca del río Zaña.

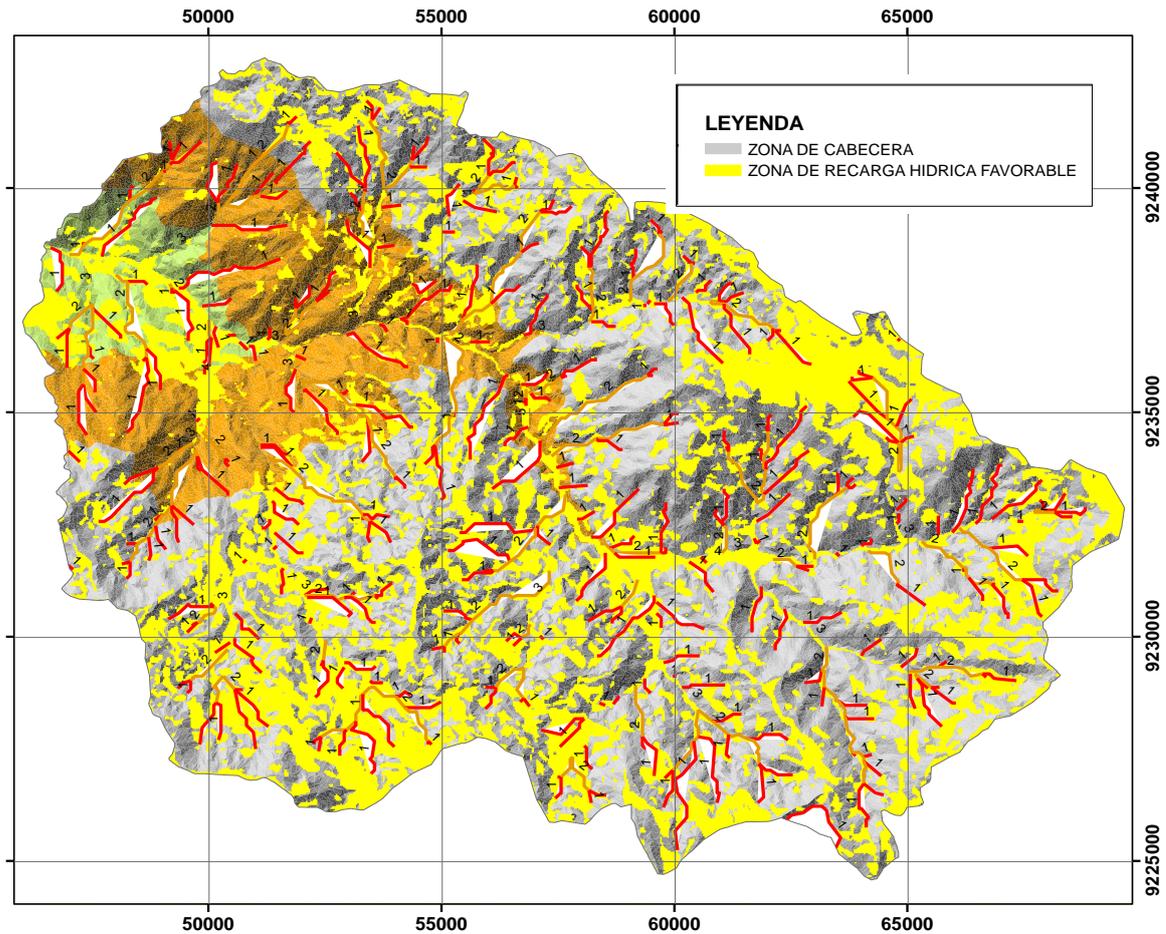


Figura 23. Zonas de recarga hídrica favorable en la zona de cabecera de cuenca del río Zaña

**Cálculo de área y porcentaje de ocurrencia:** A partir de los resultados obtenidos fue posible determinar el porcentaje total del área que abarca las zonas favorables de recarga hídrica, con ayuda del programa ArcGIS, mediante la herramienta geometría, permitió de manera exacta los cálculos de áreas que representa la zona de recarga hídrica, la zona de cabecera y la intersección de estas áreas obteniéndose lo siguiente:

Tabla 9

*Zonas de recarga hídrica dentro de zona de cabecera*

| Zona  | Área (km <sup>2</sup> ) | Porcentaje |
|---|-------------------------|------------|
| Zona de recarga hídrica                               | 260.35                  | 100%       |
| Zona de recarga hídrica dentro de la zona de cabecera | 213.49                  | 82%        |

## CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 4.1 Discusión

A partir de los resultados se verifica que la zona de cabecera es de gran importancia pues allí se ubican en mayor cantidad las zonas de recarga hídrica en la cuenca del río Zaña, evidenciándose que del 100 % de las áreas, el 82 % se encuentran ubicadas en zonas de cabecera de cuenca.

Este resultado se logró mediante el análisis dicotómico de parámetros superficiales que permitió la ubicación de áreas favorables a la recarga hídrica, concordando con Coy (2015), quien a partir de imágenes satelitales y parámetros superficiales concluye de igual modo que es posible ubicar zonas de saturación y recarga hídrica subterránea.

De los resultados obtenidos se analiza que los índices de vegetación y agua son indicadores superficiales que facilitan la ubicación de zonas de recarga hídrica de agua subterránea en la cabecera de cuenca del río Zaña, pues bajo el criterio que, en zonas con falta de agua superficial, tiempo de estiaje, y con presencia de vegetación vigorosa, debe existir aporte subterráneo que mantenga vigorosa la vegetación, concordando con Díaz (2018), que en su investigación usó parámetros como el NDVI y NDWI para discriminar vegetación y agua con valores superiores a 1 para la vegetación vigorosa y valores superiores a 0 para la identificación de cuerpo de agua, parámetros que sirvieron como indicadores superficiales de zonas de recarga hídrica. Los índices de temperatura y pendiente son indicadores que facilitan la ubicación de zonas que favorecen la recarga hídrica de agua subterránea en la cabecera de cuenca del río Zaña usando sensores remotos, pues bajo el criterio de Schosinsky (2006), la pendiente y la temperatura del material, son factores que estiman un porcentaje de infiltración de agua superficial, y sirven como abastecimiento hídrico subterráneo;

concordando con Díaz (2018) y Cusquisiban (2019), quienes consideraron para la detección de zonas de recarga hídrica pendientes menores de 13.5 como favorables a la infiltración y la temperatura media de la zona como parámetros base de evapotranspiración.

El clasificador dicotómico permitió combinar cada uno de los parámetros y así definir la ubicación de zonas de recarga hídrica de la cuenca del río Zaña, este clasificador es de gran importancia por su capacidad multivariable y adaptativa, concordando con Cusquisiban (2019), pues a partir de esta herramienta también fue capaz de ubicar zonas de recarga hídrica con la finalidad de estimar pozos de agua subterránea, difiriendo en los resultados obtenidos pues en el clasificador que se trabajó en la presente investigación se tomó como criterio obtener resultados de agua superficial, afloramiento rocoso, zonas de recarga hídrica favorable y no favorable.

A partir de los resultados obtenidos podemos verificar la gran importancia de sectorizar la zona de cabecera en cuencas hidrográficas, pues estas componen la fuente principal de zonas de recarga hídrica para abastecimiento subterráneo en la cuenca del río Zaña, estas fuentes constituyen a su vez parte importante del ciclo del agua, por su aprovechamiento dentro del ámbito social y el mantenimiento del equilibrio ecológico, por lo anterior, es necesario proteger y mantener su calidad y cantidad del recurso hídrico, ya que, repercute en el bienestar de todo ser vivo (Longwood University, 2003). Además, que los inventarios de aguas subterráneas y el uso de aguas superficiales revelan la importancia mundial que representan las aguas subterráneas y las razones incluyen: la disponibilidad de agua a largo plazo, calidad natural para suministro de agua potable y un servicio a bajo costo que favorece a regiones con ausencia de sistemas de abastecimiento de agua (Chilton, 2001).

## 4.2 Conclusiones

Se obtuvo las zonas de recarga hídrica a partir de parámetros superficiales y se concluye la gran importancia que tiene la zona de cabecera pues constituye el 82 % de las zonas favorables a la recarga hídrica en la cuenca del río Zaña.

Se determinó valores de vegetación que favorece la recarga hídrica con nivel digital de 0.5 a 1 que resalta la vegetación vigorosa y de 0 a 0.5 para vegetación poco vigorosa; además un nivel digital mayor a 0, representa la presencia de cauces y cuerpos de agua superficial y un valor menor a 0 la ausencia.

Se calculó valores de temperatura de  $23.37^{\circ}\text{C}$  que favorecen la recarga hídrica de que corresponde a la temperatura media de la cuenca del río Zaña, en función a la pendiente se consideró favorable a la recarga hídrica de  $0$  a  $13.5^{\circ}$  y moderadamente favorable a la recarga hídrica de  $13.5^{\circ}$  a  $27^{\circ}$

El análisis multiespectral por medio del clasificador dicotómico permitió conjugar cada uno de las condiciones propuestas del análisis de los parámetros superficiales obteniéndose así zonas de recarga hídrica favorable, zonas de recarga hídrica no favorable, agua superficial y afloramientos rocosos.

La sectorización de la zona de cabecera son estudios relativamente nuevos pues en el pasado no se tenía conocimiento de la gran importancia, ni la amplitud del daño que conlleva el impacto de estas zonas.

## REFERENCIAS

Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (2011). Science Data Users Handbook  
Landsat Project Science Office at NASA’s Goddard Space Flight Center in Greenbelt.

Ariza, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data  
Continuity Mission).

Autoridad Nacional del Agua (2020). Criterios para la identificación, delimitación y  
zonificación de cabeceras de cuencas “Ley 30640”.

Barreno, I. (2016). *Comparación de metodologías para identificación de zonas potenciales  
de recarga hídrica en la microcuenca del río Agua Tibia, Zona 24, Guatemala* (Tesis  
de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Antigua Guatemala,  
Guatemala.

Benfelt, F. (2000). *Sistema de recarga artificial de acuíferos para la aldea La Barreda en  
la zona 18* (Tesis de pregrado). Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Chuvieco, E. (2002). Teledetección Ambiental, la observación de la tierra desde el espacio.  
Barcelona: ARIEL.

Chilton, J. (2001) Fluoride in Drinking - water. Obtenido de [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/fluoride\\_drinking\\_water\\_full.pdf](https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/fluoride_drinking_water_full.pdf).

Dolores, D. y Gabriel, J. (2018). Delimitación Hidrográfica y Caracterización Morfométrica de la Cuenca del Río Anzulón. Argentina: INTA.

García, A. (s.f). Sistemas de Comunicación Vía Satélite: Landsat.

Longwood University. (31 de 07 de 2003). Longwood University. Recuperado el 23 de febrero de 2014, de Longwood University: <http://www.longwood.edu/cleanva/images/Sec4.groundwaterchapter.pdf>.

López, M. y Caselles, V. (1991). *Introducción a la teledetección, en la teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales*. Valencia: UNIVERSIDAD DE VALENCIA.

Matus. O., Fauistino, J. y Jiménez, F. (2009). *Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural*. Guatemala: CATIE

Meijerink, A. (2007). *Remote Sensing Applications To Groundwater*. Paris: UNESCO.

Organización de las Naciones Unidas (2016). Sensores remotos y aplicaciones en teledetección.

Rouse, J., Haas, R., Schell, J., Deering, D. Y Harían, J. (1974). Monitoring the vernal advancement andretrogadation (Greenwave effect) of natural vegetation. Greenbelt, MD. USA, NASA/GSFCT.

Saganiento, L. (s.f). Procesamiento digital de imágenes de satélite con Envi.

Servicio Geológico De Estados Unidos (USGS, 2019). Archivo de forma de fila de ruta descendente Landsat WRS. Recuperado de: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-wrs-2-descending-path-row-shapefile>

Servicio Geológico De Estados Unidos (USGS, 2021). Misión LandSat descendente Landsat WRS. Recuperado de: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product>

Schosinsky, N. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos.

## **ANEXOS**

Anexo N° 1

Tabla 10

Matriz de consistencia

**DETERMINACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA Y SU IMPORTANCIA EN LA CABECERA DE CUENCA DEL RÍO ZAÑA UTILIZANDO SENSORES REMOTOS – CAJAMARCA 2020.**

| Problema de investigación  | Objetivos  | Hipótesis   | Variables                                       | Indicadores | Dimensión                              | Materiales                   | Métodos                |
|--|--|---|---|-------------|--|------------------------------|------------------------|
| ¿Cuáles son las zonas de recarga hídrica y su importancia en la cabecera de cuenca del río Zaña utilizando sensores remotos? | General<br>Determinar las zonas de recarga hídrica y su importancia en la cabecera de cuenca del río Zaña utilizando sensores remotos. | General<br>Las zonas de recarga hídrica se ubican en mayor cantidad en la zona de cabecera de la cuenca del río Zaña. | Dependiente<br><br><br>Zonas de recarga hídrica | Pendiente   | Grados o porcentaje                    | Imágenes satélites Landsat 8 | Descarga               |
|  |  |   |   | NDVI        | Porcentaje de absorción o reflectancia | Ordenador                    | Calibración            |
|  |  |   |   | NDWI        |  | Programa Envi 5.3            | Corrección             |
|  |  |   |   | Temperatura | Grados C°                              |                              | Recorte                |
|  |  |   |   |             |  |                              | Cálculo de indicadores |
|  |  |   |   |             |  |                              | Análisis dicotómico    |

**CABECERA DE CUENCA Y SU IMPORTANCIA EN LA RECARGA HÍDRICA UTILIZANDO SENSORES REMOTOS EN LA CUENCA HIDRÓLOGICA DEL RÍO ZAÑA – CAJAMARCA 2020.**

| <b>Problema de investigación</b> | <b>Objetivos</b>   | <b>Hipótesis</b> | <b>Variables</b>   | <b>Indicadores</b>               | <b>Dimensión</b> | <b>Materiales</b>                       | <b>Métodos</b>  |
|----------------------------------|--|------------------|--|----------------------------------|------------------|---|---|
|                                  | <p><b>Objetivos específicos</b></p> <p>Determinar los índices de vegetación y agua que favorezcan la recarga hídrica subterránea.</p> <p>Determinar los parámetros de temperatura y pendiente que favorecen la recarga hídrica subterránea.</p> <p>Realizar el análisis multiespectral mediante el clasificador dicotómico</p> <p>Sectorizar la zona de cabecera de cuenca en la cuenca del río Zaña</p> <p>Corroborar las zonas de abastecimiento hídrico con información de pozos subterráneos inventariados por la Autoridad Nacional Del Agua (ANA).</p> |                  | <p><b>Independiente</b></p> <p>Cabecera de cuenca del río Zaña</p> | <p>Elevación mínima y máxima</p> | <p>Metros</p>    | <p>Programa ArcGIS</p> <p>Ordenador</p> | <p>Delimitación de la cuenca del río Zaña</p> <p>Cálculo de parámetros morfométricos</p> <p>Delimitación de la cabecera de cuenca</p> |

Anexo N° 2 - PLANOS

