



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
SEDE MORONA SANTIAGO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

**IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON POTENCIAL AGUA
SUBTERRÁNEA MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN,
SIG Y PJA EN LA PARROQUIA PUNÍN, PROVINCIA DE
CHIMBORAZO**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Trabajo de Investigación

Presentado para obtener el grado académico de:

INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR: MOISES MACARIO UNUP NANDIP

DIRECTOR: Ing. MIGUEL ANGEL OSORIO RIVERA MSc.

Macas – Ecuador

2023

©2023, Moises Macario Unup Nandip

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Moises Macario Unup Nandip declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Macas, 15 de junio de 2023



Moises Macario Unup Nandip

140116053-4

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
SEDE MORONA SANTIAGO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Trabajo de Investigación, **IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON POTENCIAL AGUA SUBTERRÁNEA MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN, SIG Y PJA EN LA PARROQUIA PUNÍN, PROVINCIA DE CHIMBORAZO.**, realizado por el señor : **MOISES MACARIO UNUP NANDIP**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. William Estuardo Carrillo Barahona PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 <hr/>	2023-06-15
Ing. Miguel Ángel Osorio Rivera DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	 <hr/>	2023-06-15
Ing. Linda Noralma Aguilar Moncayo ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	 <hr/>	2023-06-15

DEDICATORIA

Con todo el amor dedico este trabajo a mi esposa Cinthya por estar apoyándome en todo momento y ser mi fuente de inspiración para cumplir mis metas, acompañándome en las buenas y en las malas, por no dejarme desmayar. Además, dedico este trabajo a mis padres por apoyarme a los inicios de mis estudios, por ser el pilar más importante y por Demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional. A mis hermanos y hermanas que con su granito de arena me ayudaron a seguir firme en este proceso.

Moises

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por llenarme de bendiciones. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Sede Morona Santiago, en especial a sus autoridades y docentes por brindarme la oportunidad de obtener una profesión. A mi director Ing. Miguel Osorio, por guiarme durante todo este proceso, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo del trabajo de integración curricular. Al miembro de mi trabajo, Ing. Linda Aguilar, por su valioso aporte y revisión en el desarrollo del trabajo. A Gracias a todos los que con su granito de arena aportaron para que hoy cumpla uno de mis grandes sueños.

Moises

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
SUMMARY/ ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1	PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.1.	Planteamiento del problema.....	3
1.2.	Limitaciones y delimitaciones.....	4
1.3.	Problema general de investigación.....	5
1.4.	Problemas específicos de la investigación.....	5
1.5.	Objetivos.....	5
1.6.	Justificación.....	5
1.6.1.	<i>Justificación teórica.....</i>	5
1.6.2.	<i>Justificación metodológica.....</i>	6
1.6.3.	<i>Justificación práctica.....</i>	6
1.7.	Hipótesis.....	7

CAPÍTULO II

2.	MARCO TEÓRICO.....	8
2.1.	Antecedentes.....	8
2.1.1.	<i>Agua.....</i>	9
2.1.2.	<i>Agua subterránea.....</i>	10
2.1.2.1.	<i>Aguas suspendidas.....</i>	11
2.1.2.2.	<i>Aguas freáticas.....</i>	11
2.1.2.3.	<i>Aguas confinadas.....</i>	11
2.1.2.4.	<i>Aguas artesianas.....</i>	12
2.2.	Parámetros geo ambientales.....	12
2.2.1.	<i>Características geológicas-geomorfología.....</i>	12
2.2.2.	<i>Suelo.....</i>	12

2.2.3.	<i>Densidad de drenaje</i>	13
2.2.4.	<i>Densidad de lineamientos</i>	13
2.2.5.	<i>Uso del suelo/ cobertura del suelo (LULC)</i>	13
2.2.6.	<i>Índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI)</i>	14
2.2.7.	<i>Pendiente</i>	14
2.2.8.	<i>Lluvia o precipitación media anual</i>	15
2.2.9.	<i>Índice de humedad topográfica (TIW)</i>	15
2.3.	Bases conceptuales	15
2.3.1.	<i>Acuífero</i>	15
2.3.2.	<i>Acuífugo</i>	16
2.3.3.	<i>Acuicludo</i>	16
2.3.4.	<i>Acuitardo</i>	16
2.3.5.	<i>Acuífero libre</i>	16
2.3.5.1.	<i>Mapeo de agua subterránea</i>	17
2.4.	Base legal	17
2.4.1.	<i>Constitución de la república del Ecuador, aprobada en el año 2008</i>	17
2.4.2.	<i>Ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua</i>	17
2.4.3.	<i>Reglamento de la ley orgánica del agua</i>	18

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	19
3.1.	Enfoque de la investigación	19
3.2.	Nivel de la investigación	19
3.3.	Diseño de la investigación	19
3.3.1.	<i>Con base a la manipulación de la variable independiente</i>	19
3.3.2.	<i>Según las intervenciones en el trabajo de campo</i>	19
3.4.	Tipo de estudio	20
3.4.1.	<i>Población de estudio</i>	20
3.4.2.	<i>Tamaño de la muestra</i>	20
3.5.	Localización de la zona de estudio	20
3.6.	Métodos técnicas e instrumentos de investigación	21
3.6.1.	<i>Software para el procesamiento y tratamiento de imágenes satelitales</i>	21
3.6.1.1.	<i>ArcGIS</i>	22
3.6.1.2.	<i>QGIS</i>	22
3.7.	Obtención de los parámetros geomorfológicos de la zona de estudio	22
3.7.1.	<i>Modelado de los datos empleando SIG</i>	23

3.7.2.	<i>Compendio de la data e información digital</i>	24
3.7.3.	<i>Descarga de las imágenes satelitales de la zona de estudio</i>	25
3.8.	Procesamiento y clasificación de los insumos temáticos considerados en la evaluación de aguas subterráneas	26
3.8.1.	<i>Obtención del índice NDVI</i>	26
3.8.2.	<i>Determinación de la precipitación</i>	28
3.8.3.	<i>Densidad de drenaje</i>	29
3.8.4.	<i>Pendiente o inclinación de la cuenca</i>	30
3.8.5.	<i>Uso y tipo de suelo</i>	31
3.9.	Categorización de los factores que condicionan la recarga y almacenamiento del agua subterránea	32
3.9.1.	<i>Criterios de valorización de las variables</i>	32
3.9.2.	<i>Criterios de clasificación para el parámetro NDVI</i>	32
3.9.3.	<i>Criterios de clasificación para el parámetro precipitación</i>	33
3.9.4.	<i>Criterios de clasificación para el parámetro pendientes</i>	33
3.9.5.	<i>Criterios de clasificación para el parámetro densidad de drenaje</i>	34
3.9.6.	<i>Criterios de clasificación para el parámetro uso y tipo de suelo</i>	34
3.9.7.	<i>Inclusión del análisis jerárquico para la determinación de zonas con posible presencia de agua subterránea</i>	35
3.9.7.1.	<i>Criterios de ponderación de las variables</i>	35
3.9.7.2.	<i>Elaboración de las matrices de comparación</i>	36
3.9.8.	<i>Elaboración del mapa con potenciales zonas de agua subterránea</i>	37
3.9.9.	<i>Aplicación del groundwater potential index para la determinación de zonas con potencial presencia de agua subterránea</i>	37
3.10.	Propuesta de protección de las zonas con potencial agua subterránea	38

CAPÍTULO IV

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
4.1.	Fundamentos conceptuales	39
4.1.1.	<i>Morfología de la cuenca</i>	39
4.1.2.	<i>Parámetros morfológicos</i>	39
4.1.3.	<i>Técnicas de teledetección</i>	40
4.1.3.1.	<i>Bandas satelitales empleadas para la combinación</i>	40
4.1.4.	<i>Combinación de bandas NDVI</i>	40
4.1.5.	<i>Proceso de jerarquía analítica PJA</i>	41
4.1.6.	<i>Estructuración de la jerarquía</i>	42

4.1.7.	<i>Construcción de la matriz de consistencia</i>	42
4.1.8.	<i>Verificación de consistencia</i>	42
4.1.9.	<i>Establecimiento de pesos relativos</i>	42
4.1.10.	<i>GWPI</i>	43
4.2.	Características morfométricas del área de estudio	43
4.2.1.1.	<i>Determinación de la curva hipsométrica</i>	45
4.3.	Frecuencia de áreas parciales	46
4.3.1.	<i>Resultados insumo índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)</i>	47
4.3.2.	<i>Resultados insumo precipitación media anual parroquia Punin</i>	49
4.3.3.	<i>Resultados insumo uso y tipo de suelo de la parroquia Punin</i>	50
4.3.4.	<i>Resultados insumo pendientes de la parroquia Punin</i>	51
4.3.5.	<i>Resultados insumo densidad de drenaje de la parroquia Punin</i>	52
4.4.	Resultados de la metodología PJA para la estimación de áreas potenciales de albergue de aguas subterráneas	53
4.4.1.	<i>Asignación de los pesos normalizados para cada capa temática</i>	54
4.4.2.	<i>Validación de la matriz PJA</i>	54
4.4.3.	<i>Identificación de las zonas con potencial agua subterránea</i>	55

CAPÍTULO V

5.	MARCO PROPOSITIVO	57
4.5.	Propuesta de protección de zonas con potencial agua subterránea	57
4.5.1.1.	<i>Antecedentes</i>	57
4.5.1.2.	<i>Generalidades</i>	58
4.5.2.	<i>Consejos técnicos y prácticos para mejorar la recarga hídrica</i>	58
4.5.3.	<i>Factores que afectan la recarga hídrica</i>	58
4.5.4.	<i>Acciones colectivas para la protección de zonas de recarga de agua</i>	59
4.6.	Plan de acción para la gestión sostenible de las aguas subterráneas presentes en la parroquia Punin	60
4.6.1.	<i>Monitoreo y control de la contaminación</i>	60
4.6.2.	<i>Consumo eficiente y responsable del recurso hídrico</i>	60
4.6.3.	<i>Protección de las zonas de recarga hídrica</i>	62
	CONCLUSIONES	63
	RECOMENDACIONES	64

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1:	Metodología de obtención de la morfología de la cuenca	23
Tabla 3-2:	Datos generales imágenes satelitales.....	25
Tabla 3-3:	Procedimiento para la generación del insumo NDVI.....	26
Tabla 3-4:	Procedimiento para la determinación del insumo precipitación.....	28
Tabla 3-5:	Procedimiento para la determinación del insumo densidad de drenaje	29
Tabla 3-6:	Procedimiento para la determinación del insumo pendiente	30
Tabla 3-7:	Procedimiento para la determinación del insumo uso de suelo.....	31
Tabla 3-8:	Reclasificación de los insumos en los intervalos de clase.....	32
Tabla 3-9:	Criterios de asignación de pesos para NDVI.....	32
Tabla 3-10:	Criterios de asignación de pesos para precipitación	33
Tabla 3-11:	Criterios de asignación de pesos para pendientes.....	33
Tabla 3-12:	Criterios de asignación de pesos para densidad de drenaje	34
Tabla 3-13:	Criterios de asignación de pesos para uso y tipo de suelo.....	34
Tabla 3-14:	Escala de medición por Saaty.....	36
Tabla 4-1:	Resultados morfometría de la zona de estudio	43
Tabla 4-2:	Codificación insumos manejados dentro del estudio	53
Tabla 4-3:	Matriz de asignación de pesos equivalentes según la metodología PJA	54
Tabla 4-4:	Matriz de validación de los datos según PJA	54
Tabla 5-1:	Acciones correctivas para las zonas de recarga hídrica.....	59
Tabla 5-2:	Monitoreos para el control de la contaminación	60
Tabla 5-3:	Consumo responsable de los recursos hídricos	60
Tabla 5-4:	Protección de las zonas de recarga hídrica	62

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1:	Distribución agua a nivel global	10
Ilustración 3-1:	Mapa de delimitación parroquia Punin	21
Ilustración 3-2:	Metodología para la obtención de aguas subterráneas.....	24
Ilustración 3-3:	Estructura PJA para la determinación de aguas subterráneas	36
Ilustración 4-1:	Mapa morfometría de la zona de estudio	45
Ilustración 4-2:	Curva hipsométrica de la cuenca de estudio	46
Ilustración 4-3:	Polígono de frecuencia de áreas parciales.....	47
Ilustración 4-4:	Mapa ráster reclasificado NDVI	47
Ilustración 4-5:	Mapa ráster precipitación.....	49
Ilustración 4-6:	Mapa ráster uso y tipo de suelo.....	50
Ilustración 4-7:	Mapa ráster de pendientes.....	51
Ilustración 4-8:	Mapa ráster densidad de drenaje.....	53
Ilustración 4-9:	Mapa de las zonas potenciales para la presencia de aguas subterráneas.....	56

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: INFORME DE VALORES ÚNICOS PARA LA CAPA RÁSTER GWPI

RESUMEN

El objetivo primordial de esta investigación fue la identificación de áreas con posible presencia de aguas subterráneas en la parroquia Punin del Cantón Riobamba, se empleó la combinación de procesos de Jerarquía Analítica (PJA) y sistemas de información geográfica (SIG), se empezó con la recolección de los datos espaciales ayudándonos de los geo portales del estado y los repositorios de acceso libre como (USGS Earth Explorer), mediante el empleo del software QGIS, se caracterizó morfológicamente la cuenca de estudio y se procesó cinco insumos esenciales a la hora de caracterizar la presencia o ausencia de aguas subterráneas: Pendiente, Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), Densidad de drenaje, uso y tipo de suelo y la precipitación, posteriormente la ponderación mediante PJA asignó los valores relativos para cada parámetro para generar el índice de potencialidad de aguas subterránea (GWPI) Los resultados arrojados fueron los siguientes; la cuenca posee un área de con 47,827 km², con un factor de forma de 0,43 que indica una cuenca hidrográfica ligeramente ensanchada, el gráfico hipsométrico mostró que la cuenca se encuentra en una etapa de equilibrio, en cuanto a las áreas de recarga hídrica las variables NDVI , precipitación y densidad de drenaje tienen mayor peso de ponderación a la hora de detectar la presencia de acuíferos, se determinó que zonas con valores NDVI mayores a 0.6 con un rango de precipitación anual de 3000 mm/año y una densidad de drenaje adecuada se convertían en áreas oportunas de encontrar aguas subterráneas, se recomienda complementar este tipo de estudios con prospecciones en el área de estudio mediante técnicas in situ.

Palabras clave: < INDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA NDVI>, < QGIS (SOFTWARE)>, < PROCESOS DE JERARQUÍA ANALÍTICA PJA>,< CUENCA HIDROGRÁFICA>, < ÍNDICE DE POTENCIALIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA (GWPI)>, < PRECIPITACIÓN>.

1216-DBRA-UPT-2023

A handwritten signature in blue ink is written over a circular official stamp. The stamp is light blue and contains text around its perimeter, including 'UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTACACHI' and 'FACULTAD DE INGENIERÍA'. The signature is cursive and appears to be 'Rafael V. J. S.'.

ABSTRACT

The main objective of the current research was to identify areas with possible presence of groundwater in the “Parroquia Punín”, located in the Riobamba County through a combination of Analytical Hierarchy Processes (AHP) and Geographic Information Systems (GIS). It started with the collection of spatial data using state geo portals, and open access repositories such as: (USGS Earth Explorer). With the QGIS software characterized morphologically the basin study, processing five essential inputs to characterize the presence or absence of groundwater: Slope, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Drainage density, soil use, type and precipitation. Subsequently, weighting using PJA assigned the relative values for each parameter in order to generate the groundwater potentiality index (GWPI). The results obtained were: the basin has an area of 47,827 km² , with a shape factor of 0.43 that indicates a slightly widened watershed, besides the hypsometric graph showed that the basin is in a stage of equilibrium. On the other hand, the water recharge areas, the NDVI, precipitation and drainage density variables have greater weighting when detecting the presence of aquifers. It was determined that areas with NDVI values greater than 0.6 with an annual precipitation range of 3000 mm/year, and an adequate drainage density became suitable areas to find groundwater. Finally, it is recommended to complement this type of studies with surveys in the study area using in situ techniques.

Keywords: NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX NDVI, QGIS (SOFTWARE), ANALYTICAL HIERARCHY PROCESSES PJA, HYDROGRAPHIC BASIN, GROUNDWATER POTENTIALITY INDEX (GWPI), PRECIPITATION.



By: Lic. Mauricio Martínez P

0602902504

INTRODUCCIÓN

Las fuentes hídricas se han considerado como pilares fundamentales para el crecimiento de la civilización humana y actualmente debido a su marcada escasez la búsqueda de una correcta gestión de estas fuentes hídricas se ha convertido en un desafío sobre todo en lugares donde la carencia de este recurso ha provocado conflictos sociales y de salud, se sabe que el agua es imprescindible para cada actividad realizada por ser humano y sirve como fuente para el suministro de alimentos, energía y salud.

Si bien cerca del 70% de la superficie del planeta está conformada por agua. La aprovechable para el consumo humano ronda el 1%, ya que el agua restante se divide en agua salobre con un 95%, un 4% destinada como agua dulce en casquetes polares y apenas un 20 a 30% se lo dispone en fuentes naturales denominadas como acuíferos (Romero, 2016, p. 12).

En referencia al agua subterránea esta ha venido siendo empleada desde que se tiene conocimiento y la búsqueda de más fuentes de estas ha llevado inclusive en la antigüedad a batallas y conflictos sociales por este recurso, si bien se sabe que la extracción de este tipo de aguas a partir de estas fuentes generalmente baratas y no requiere de técnicas de purificación elevadas es por lo que lo ha convertido en zonas de alta importancia y que los países en desarrollo han favorecido su sobreexplotación de manera acelerada impidiendo que la recarga de estos almacenamientos naturales no se respete y genere una marcada escasez de este recurso (Romero, 2016, p. 9).

La calidad y la disponibilidad de las aguas subterráneas varían significativamente entre los países y regiones de América Latina si a nuestra zona nos referimos, lo que crea diferentes desafíos para la región, ya que, al ritmo constante de sobreexplotación de estos recursos, sumados a los fenómenos de contaminación garantizar el acceso a este recurso para las generaciones venideras realmente es un desafío mayor (Botana y Fernández, 2019, p. 17).

A nivel del país la explotación de este recurso hídrico ha venido enfocado en las actividades de consumo humano y agrícolas y una parte en las actividades industriales si bien se conoce de ciertas fuentes de aguas subterráneas un mapa de prospección a nivel regional no se encuentra detallado, se sabe que en las provincias de Píchincha y Cotopaxi se han llevado a cabo este tipo de prospecciones mientras que a nivel general aún existe un marcado desconocimiento de otras zonas posibles para la presencia de aguas subterráneas quizás por influencias de los altos costos de prospección, perforación, bombeo y mantenimiento.

Sin embargo el avance tecnológico permite ahorrar varios de estos costes y enfocándonos por medio de la teledetección en zonas precisas que cumplan los requerimientos principales para la presencia de estos acuíferos para su correcto aprovechamiento, evitando escasez en su información, permitiendo conocer su uso real y potencial (Valero y Sarria, 2021, p. 6-9).

La parroquia Punin se considera como una zona con extensas zonas de terreno agrícola, no obstante, dicha zona no cuenta con fuentes de agua, que suplan la demanda actual por lo que mucha del agua empleada proviene de parte de aguas ajenas a la zona de estudio, de ahí que la búsqueda de zonas con aguas subterráneas, donde se aprovecha el agua de lluvia recolectada durante la época invernal permita tener una fuente extra de almacenamiento para satisfacer sus necesidades básicas como consumo, actividades como la ganadería y la agricultura (Valero y Sarria, 2021, p. 6-9).

La gestión justa, eficiente y sostenible del agua sigue siendo un gran desafío, por lo que la identificación de áreas con potencial de agua subterránea es de suma importancia para el uso adecuado y la conservación de este recurso crucial, para lo cual se dispone de diversas técnicas, como la perforación directa y los modelos geofísicos. Se utilizaron para identificar las características hidrológicas de las aguas subterráneas, pero su coste es elevado, por lo que se utilizaron técnicas SIG para analizar su distribución espacial. (Cifuentes y Díaz, 2021, p. 23).

Basado en este contexto, el presente trabajo de investigación pretende a través de técnicas de teledetección, sistemas de información geográfica y un proceso de jerarquización analítica identificar zonas con potencial agua subterránea en la parroquia Punín, provincia de Chimborazo, con el fin de proponer un sistema de abastecimiento de agua fácil y accesible en zonas remotas sin acceso a agua potable (Cifuentes y Díaz, 2021, p. 23).

La presente investigación se estructura en los siguientes capítulos: primero, abre el problema analizando la falta de agua, especialmente el uso y manejo de las aguas subterráneas; el segundo capítulo describe los conceptos y teorías necesarias para entender el estudio y uso de las aguas subterráneas; El tercer capítulo describe la metodología utilizada para mapear posibles acuíferos subterráneos en el área de investigación; el cuarto capítulo presenta los resultados de la investigación; y finalmente, las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el desarrollo de este estudio.

CAPÍTULO I

1 PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La escasez de agua es un problema constante debido a su mala gestión y baja disponibilidad, ha provocado una tendencia de limitación de este recurso a ocasionado que ya no solo se trate de un problema regional si no de carácter global, esto en gran medida depende de la cantidad y variabilidad de las lluvias que abastecen las aguas superficiales y recargan las aguas subterráneas, así como de la adecuada gestión y almacenamiento de los embalses así como el grado de aprovechamiento de este recurso por parte de las sociedades todo esto ha llevado a una escasez de agua en el corto plazo y conflictos en el largo plazo debido al desequilibrio entre su uso y los recursos limitados (Juárez et al., 2019, p. 17).

En América Latina, las instituciones gubernamentales han fallado en proporcionar adecuadamente agua potable y saneamiento debido a prácticas de gestión ineficientes, interferencia política, escasez de recursos humanos y financieros, y un diseño institucional inadecuado. La importancia de la asignación del agua y la prestación de servicios estatales a la ciudadanía no ha sido considerada de manera adecuada. (Castro y Rodríguez, 2022, p. 20).

En el Ecuador, los recursos económicos destinados a la conservación de fuentes de agua son escasos, lo que ha llevado a una falta de esfuerzos para prevenir la contaminación y recuperar los recursos hídricos afectados, con la mayoría de las acciones limitándose a intereses privados. La creciente población del país y la falta de agua potable disponible ejercen una presión significativa sobre el recurso hídrico, lo que ha llevado a su sobreexplotación y al deterioro de la cobertura vegetal natural en las áreas de recarga. Es esencial tomar medidas para manejar y recuperar adecuadamente las zonas de recarga, así como establecer zonas de protección hídrica (Cross et al., 2020, p. 13).

Particularmente para la parroquia Punín de la provincia de Chimborazo, además de la búsqueda de fuentes de agua subterránea se debe hacer hincapié a que el agua actualmente en disposición no cumple con los parámetros físicos como color, turbidez y sólidos totales disueltos, debido a la mala captación del agua en cada una de las vertientes, existen colonias de coliformes fecales en las vertientes de agua, tanques de reserva y domicilios, especialmente *Escherichia coli*, demostrando la deficiente calidad del agua de la parroquia, asociada a una contaminación por heces fecales animales y humanas en contacto con las fuentes de agua superficial (Vallejos y Revelo, 2021, p. 7-12).

1.2. Limitaciones y delimitaciones

- **Limitaciones**

Dentro de las limitaciones se consideró el aspecto económico debido a que si se deseaba realizar una prospección in situ se requiere de un equipo Geo-resistivímetro P.A.S.I. para validar la presencia de agua subterránea, con un valor de adquisición elevado, así mismo no se cuenta con los equipos informáticos de alta gama para procesar el volumen de datos que arrojarían dicho instrumento de medición en la parroquia Punin del Cantón Riobamba.

- **Económico**

El procedimiento de recolección de muestras para verificar la existencia de agua subterránea implica gastos significativos relacionados con la organización logística, transporte, seguimiento y análisis de datos en el área específica bajo investigación.

- **Accesibilidad a la zona de estudio**

La zona de estudio se localiza en un sector rural de la provincia de Chimborazo y la accesibilidad a la zona de estudio es difícil y obligatoriamente se requiere de un guía especializado.

- **Operacional**

En cuanto a las limitaciones en la operación, se puede mencionar el uso avanzado de la plataforma SIG QGIS y el nivel de precisión que se busca alcanzar en este proyecto. Se indica que, para lograr este tipo de evaluaciones, es importante considerar tanto la calidad de las fuentes de datos como los análisis e interpretaciones realizados. Como no hay una base previa de investigación oficial en esta área en Ecuador, los datos no estarán sujetos a proyecciones. Sin embargo, para mitigar este problema, se compararán con datos de investigaciones similares realizadas en otros países con características similares a la zona de estudio propuesta en este proyecto.

- **Delimitaciones**

En cuanto a las delimitaciones investigativas, estas se relacionan principalmente con la falta de información disponible sobre el área de estudio. Debido a esta limitación, es importante hacer un uso cuidadoso de las variables que se consideren críticas para la presencia o ausencia de aguas subterráneas, como la geomorfología del suelo, el tipo de precipitación y el uso del suelo, entre otros. Para compensar esta delimitación, se recopilará información bibliográfica y se utilizará el Anuario de Prospección de Agua Subterránea de los años 80, que se generó para todo el Ecuador. Se espera que esta estrategia reduzca al mínimo cualquier posible sesgo en los resultados e información.

1.3. Problema general de investigación

¿Cuáles son las zonas con potencial agua subterránea identificadas mediante técnicas de teledetección, sistemas de información geográfica y procesos de jerarquía analítica en la parroquia Punín, provincia de Chimborazo?

1.4. Problemas específicos de la investigación

¿Qué bases teóricas permitan realizar el mapeo de zonas con potencial aguas subterráneas?

¿Cuáles son las herramientas cartográficas para generar mapas temáticos que permitan describir las características de la zona de estudio?

¿Qué proceso analítico se puede aplicar para identificar zonas con potencial de agua subterránea utilizando mapas temáticos?

1.5. Objetivos

Objetivo general

- Identificar zonas con potencial agua subterránea mediante técnicas de teledetección, sistemas de información geográfica y procesos de jerarquía analítica en la parroquia Punín, provincia de Chimborazo.

Objetivos específicos

- Definir las bases teóricas para la realización del mapeo de zonas con potencial agua subterránea.
- Generar mapas temáticos que permitan describir las características de la zona de estudio.
- Generar procesos de jerarquía analítica utilizando mapas temáticos para identificar zonas con potencial de agua subterránea.

1.6. Justificación

1.6.1. Justificación teórica

La investigación pretende dar solución a una necesidad que tiene la parroquia Punín, como es la de no tener acceso a los recursos hídricos para satisfacer sus necesidades básicas que es un derecho disponer de agua suficiente para uso personal y doméstico (Hernández et al., 2019, p. 27).

En la actualidad, los recursos del agua subterránea se ven afectados por la contaminación, falta de infiltración y el crecimiento poblacional, que ha agotado los recursos gradualmente, tanto en la calidad y cantidad a nivel mundial, además, la investigación proporciona información que ayude a tener una planificación y uso adecuado del recurso hídrico en la parroquia Punín.

1.6.2. Justificación metodológica

La teledetección es una técnica que combina sensores remotos y el medio ambiente para proporcionar una gran cantidad de información valiosa, ofrece la posibilidad de obtener datos de amplias áreas en un corto período de tiempo, lo que permite muestrear extensas regiones completas en pocos días (Cross et al., 2020, p. 15).

Por otro lado, los SIG son tecnologías que ayudan en la gestión y análisis de información espacial. Solo los sistemas de información geográfica permiten almacenar y manipular datos usando la geografía, analizando relaciones, patrones y tendencias para tomar decisiones informadas.

Las herramientas SIG integradas se están utilizando de manera efectiva para el mapeo de zonas con potencial de agua subterránea en todo el mundo. Estas técnicas proporcionan una visión completa del área de estudio, lo que facilita la evaluación, desarrollo y gestión rápida de los recursos hídricos (Buzai y Galbán, 2021, p. 21).

Adicionalmente, el proceso de jerarquía analítica es un método de clasificación que permite resolver problemas complejos en la toma de decisiones multicriterio. Con los datos existentes, la técnica de procesos de jerarquía analítica se utiliza para incorporar múltiples parámetros que permiten cuantificar la disponibilidad de agua subterránea en zonas específicas (Varela, 2005, p. 16).

1.6.3. Justificación práctica

La identificación de zonas con potencial agua subterránea en la parroquia de Punín en la provincia de Chimborazo mediante técnicas de teledetección, sistemas de información geográfica y procesos de jerarquización analítica, permitirá conocer posibles fuentes de agua aptas para consumo humano de manera fácil y eficaz contribuyendo a la dotación de líquido vital a las comunidades, apoyando a la generación de actividades como la agricultura y ganadería, conjuntamente de evitar la proliferación de enfermedades en la zona.

Los resultados que se obtengan permitirán delimitar zonas con potencial agua subterránea, además que servirán como línea base para posteriores estudios, ya que, en la actualidad, en Ecuador, no existe una metodología establecida para identificar zonas de agua subterránea. Por lo tanto, contribuirá al aprovechamiento del recurso hídrico a la población de Punín y poder solventar las necesidades que actualmente está atravesando este sector del país.

1.7. Hipótesis

Hipótesis nula (H_0)

No es posible identificar zonas con potencial agua subterránea utilizando teledetección, Sistemas de Información Geográfica y procesos de jerarquización analítica en la parroquia Punin, provincia de Chimborazo.

Hipótesis alternativa (H_1)

Es posible identificar zonas con potencial agua subterránea utilizando teledetección, Sistemas de Información Geográfica y procesos de jerarquización analítica en la parroquia Punin, provincia de Chimborazo.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

El uso, aprovechamiento y conservación del recurso hídrico ha llevado a que varios organismos e instituciones formulen y planteen estrategias que busquen conservar las carentes fuentes de agua dulce que aun el planeta conserva de ahí que las Naciones Unidas han declarado los periodos entre el 2005 y 2015 como un rango para la acción de protección del agua para la vida, haciendo referencia a que esta deberá estar disponible para cada persona a nivel global y que su acceso sea a una agua de calidad, así mismo se plantea estrategias de conservación de estas fuentes de agua indicando el papel preponderante que tienen en la conservación aquellos países desarrollados e industrializados (Varela, 2005, p. 11).

Como parte de estas estrategias se plantea el uso de nuevas técnicas que faciliten la cobertura de grandes áreas de terreno para determinar un problema previamente planteado, de ahí surge el término teledetección la cual es una herramienta muy poderosa a la hora de evaluar la calidad y proporcionalidad de los recursos hídricos, actualmente estas técnicas han ocupado otros campos no solo el hídrico y por sus relativas ventajas y bajos costes además de una accesibilidad de los datos de forma libre en su mayoría ha permitido que mayor gente sume esfuerzos a la hora de identificar la presencia de aguas subterráneas en ciertas zonas del planeta (Torres et al., 2009, p. 13). Mediante la aplicación de la teledetección se ha podido generar una metodología adecuada para determinar las zonas potenciales con presencia de aguas subterráneas y estas recaen en el cálculo del índice de potencialidad de aguas subterráneas, que sustenta su base en la combinación tanto de los criterios del investigador como de herramientas SIG para identificar las zonas, ubicación de pozos excavados y perforados y zonas de extracción de agua para uso doméstico, de riego entre otros, una vez determinada las posibles zonas candidatas se puede proceder con el análisis in situ de las características observables del suelo hasta la corroboración de que la zona contiene o no la presencia de este recurso.

A nivel global la aplicación de estas técnicas de teledetección han brindado resultados muy elevados por lo que cada vez es más frecuente que grupos de investigación confíen sus estudios iniciales mediante la aplicación de técnicas de teledetección, es así que en zonas como la India Y Asia donde la carencia de este recurso es marcado, buscar de forma frecuente acuíferos han generado metodologías y procesos mucho más exactos que pueden ser aplicados a nivel del Ecuador (Alcivar y Gil, 2021a, p. 18).

A nivel local la aplicación de estas técnicas de teledetección ha sido un proceso que recién está tomando impulso, antiguamente las zonas con presencia de agua subterránea han sido determinados por constantes monitores en campo lo que requiera largas jornadas laborales y un suministro económico elevado, las investigaciones que se tienen conocimiento aplicado SIG para determinación de aguas subterráneas se puede mencionar las aguas subterráneas en Puyango Putumayo, y la de la zona de Portoviejo basados en SIG (Juárez et al., 2020, p. 65).

Por su parte para la zona de la sierra se tienen acuíferos la Carbonera, Yuyucocha, Santa Clara y Guaraczapas en las zonas urbanas de Ibarra, mientras que en la provincia de Chimborazo se ha realizado un estudio de la zona con potencial agua subterránea investigaron las zonas potenciales de descargar y recarga en la subcuenca del río Chambo.

Finalmente, es preciso mencionar que dentro de la zona de estudio de esta investigación en la parroquia Punin no se ha realizado este tipo de estudio o similares por lo que aprovechar estas grandes herramientas no solo aportarán un beneficio para el sector académico, sino que dichos resultados puedan ser empleados para futuros estudios de prospección y aprovechamiento responsable de este recurso vital para el ser humano (Chamorro y Castillo, 2016, p. 33).

2.1.1. Agua

El agua constituye la principal fuente de vida, mediante esta se desencadenan diversas reacciones que dan origen y permanencia a la vida como tal, desde nivel micro hasta macroscópico el agua siempre ha estado presente como una molécula formadora de la vida, esta está compuestas por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno y es de los pocos compuestos que pueden presentarse en los tres estados de la materia, sólido, líquido y gaseoso vital en todas sus formas para la formación de la vida (Cruz y Martínez, 2015, p. 45), establecen que: El agua es un componente esencial de la naturaleza y un factor crucial en la integridad de los ecosistemas naturales, ya que su relevancia radica en la supervivencia y mantenimiento de la vida, debido a que resulta imprescindible en la ejecución de los procesos biológicos.

Según (Solanes, 1998, p. 198), El agua es esencial para la vida en nuestro planeta. Es un recurso natural precioso que sustenta la mayoría de los ecosistemas terrestres y acuáticos, y es vital para la supervivencia de todas las formas de vida, incluyendo los seres humanos. El agua no solo es necesaria para beber y mantenernos hidratados, sino que también se utiliza para la agricultura, la producción de energía, la industria y la limpieza.

Además, el agua juega un papel importante en la regulación del clima y la temperatura de la Tierra. A pesar de su importancia, el agua dulce disponible para el consumo humano es limitada, lo que significa que es esencial que cuidemos y protejamos este recurso valioso para las generaciones futuras (Castro et al., 2007, p. 78).

Se ha estimado que el volumen de agua a nivel global alcanza los de 1370 millones de Km³ conformando las dos terceras partes de la superficie del planeta, la mayoría establecida en océanos y mares y una pequeña parte en ríos y lagos, la principal fuente de recarga de estos sistemas se sustenta en los fenómenos de precipitación y sus diversas reacciones químicas permite el desarrollo de energía especial para el metabolismo de la vida. A nivel de salud el agua forma parte esencial de gran parte de órganos y tejidos a nivel celular y como mecanismo de mejoramiento de la calidad de la vida, el agua participa en casi todos los procesos de manufactura u obtención de alimentos como lo es mediante las técnicas de labrado de suelo y ganadería (Muñoz, 2015, p. 56).

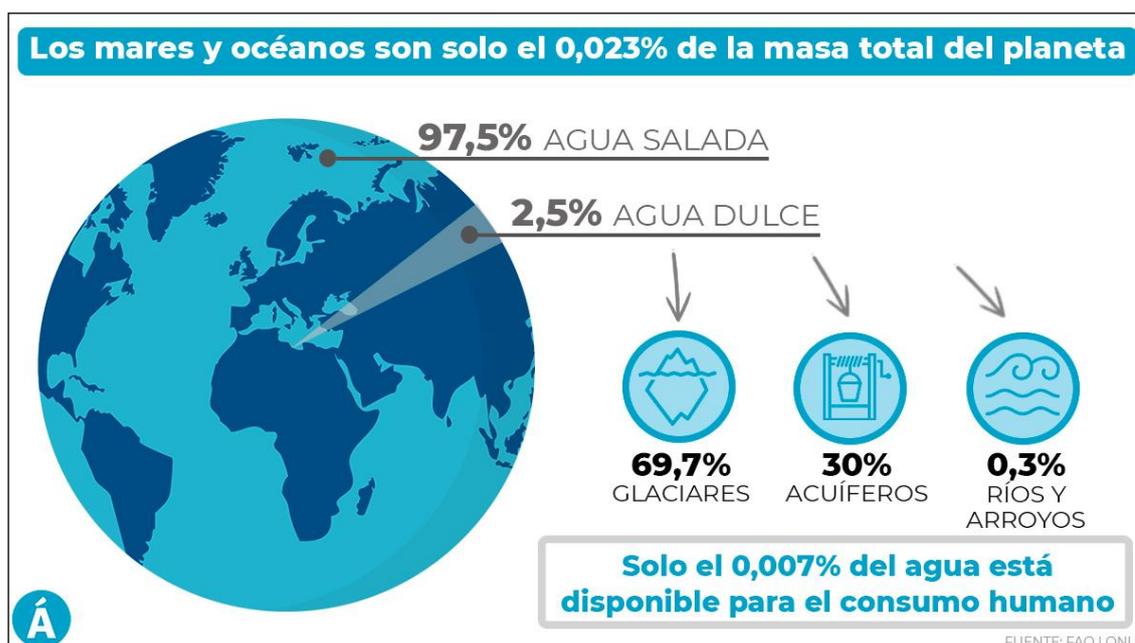


Ilustración 2-1: Distribución agua a nivel global

Fuente: (Alcivar y Gil, 2021a, p. 12)

2.1.2. Agua subterránea

Las aguas subterráneas son aquellas que resultan de la filtración de las aguas de lluvia a través de terrenos que permiten el paso de líquidos. Estas aguas se desplazan lentamente, impulsadas por la gravedad, hasta topar con una capa de suelo impermeable que las detiene.

Esta agua subterránea es una fracción de la precipitación que atraviesa el suelo y se aloja en estratos porosos, moviéndose a veces en dirección a niveles más bajos, siguiendo trayectorias inclinadas.

En general, las aguas subterráneas tienden a tener una calidad mejor que las aguas superficiales, ya que el suelo y las rocas actúan como filtros naturales que eliminan muchas impurezas. Sin embargo, la calidad del agua subterránea puede variar dependiendo de la geología local y de la posible contaminación causada por actividades humanas. (Tóth, 2000, p. 19).

Se sabe que de los factores con mayor influencia tienen dentro de estos procesos de precipitación tenemos en primer lugar a la gravedad, la cual actúa como una fuerza que lleva toda sustancia objeto o material hacia el centro de la tierra, como segundo punto tenemos al tipo de terrenos y a su estructura geomorfológica, es así que en lugares que en su suelo mantengan un nivel de porosidad de roca elevado mayor permeabilidad se generará por ende una mayor facilidad de infiltración del agua proveniente de la lluvia (Bravo, 2015, p. 16-19).

2.1.2.1. Aguas suspendidas

Las aguas suspendidas corresponden áreas cercanas a la superficie del suelo, y suelen estar ubicadas encima de una zona impermeable y otra permeable que permite el flujo de grandes volúmenes de agua y dependiendo de la geomorfología del terreno habrá zonas con una mayor tendencia a la presencia de estas aguas y otras por lo contrario serán zonas que favorezcan los procesos de escorrentía, de ahí que durante los procesos de explotación de estas zonas de almacenamiento es crucial no perforar más allá de la capa impermeable para evitar la desecación del acuífero (Merino et al., 2014, p. 29).

2.1.2.2. Aguas freáticas

También conocidas como aguas subterráneas libres, son aquellas que se encuentran en los espacios porosos de los suelos y las rocas debajo de la superficie terrestre. Estas aguas son recargadas por la precipitación, y su nivel fluctúa según las condiciones climáticas y la extracción de agua. Las aguas freáticas pueden ser explotadas a través de pozos, y en muchos casos son utilizadas como fuente de abastecimiento de agua para consumo humano y riego agrícola. Además, estas aguas subterráneas desempeñan un papel importante en la alimentación de ríos y lagos (Ávila y Sansores, 2003, p. 14).

2.1.2.3. Aguas confinadas

También son denominados acuíferos confinados o artesianos, estas se encuentran debajo de una capa de roca o suelo impermeable la cual actúa como una especie de barrera o tapón que limita la recarga y movimiento del flujo de agua, actúa como un sello esta ejerce ejerciendo una presión sobre el agua que se encuentra en el acuífero, lo que permite que el agua subterránea salga a la superficie a través de pozos artesianos sin necesidad de utilizar bombas, las características de las aguas subterráneas pueden variar en diferentes regiones y acuíferos, dependiendo de las condiciones geológicas y del uso humano. (Velazquez et al., 2022, p. 25-29).

2.1.2.4. *Aguas artesianas*

Este tipo de aguas subterráneas también se encuentra bajo una capa de roca o suelo impermeable que limita su movimiento y recarga, sabiendo que la presión hidrostática es la fuerza que ejerce el agua sobre el acuífero este fenómeno permite que el agua subterránea fluye naturalmente hacia la superficie a través de pozos artesianos. Estas aguas se caracterizan por su pureza y su temperatura constante, lo que las hace ideales para el consumo humano y para la irrigación de cultivos (Velazquez et al., 2022, p. 25-29).

2.2. **Parámetros geo ambientales**

2.2.1. *Características geológicas-geomorfología*

La delimitación del potencial de las aguas subterráneas está estrechamente relacionada con los accidentes geográficos y la geomorfología del terreno. Estas características tienen un impacto significativo en el movimiento subterráneo del agua y en la formación de acuíferos, lo que permite caracterizar el potencial de las aguas subterráneas según su forma y estructura, además que los parámetros morfológicos de la cuenca también influirán en la presencia o ausencia de condiciones que favorezcan la recarga de este tipo de acuíferos, los procesos geomorfológicos, como la erosión, la deposición, la meteorización y la compactación, juegan un papel crucial en la formación y evolución del suelo. Estos procesos pueden ser impulsados por factores climáticos, geológicos y antropogénicos (Mero et al., 2022, p. 8-13).

2.2.2. *Suelo*

El suelo y las aguas subterráneas están estrechamente relacionados y son fundamentales para el ciclo hidrológico, se sabe que el suelo actúa como una esponja que retiene y filtra el agua de lluvia, permitiendo que se infiltre lentamente hacia los estratos porosos del subsuelo, dicha agua al infiltrarse y posteriormente almacenarse vienen a llamarse acuíferos y sus vías de recarga pueden ser por medio de la lluvia o infiltración de una fracción del agua de ríos y lagos, el tipo de suelo es importante pues implica la primera barrera para que los fenómenos de infiltración se puedan dar además que a través de este sustrato los procesos de capilaridad y percolación, las raíces de las plantas pueden acceder a la humedad y los nutrientes que se encuentran en el subsuelo (Rossini, 2022, p. 34).

2.2.3. Densidad de drenaje

Se refiere a la cantidad de agua que se mueve a través de una unidad de superficie en un determinado período de tiempo, dicha medida es esencial a la hora de comprender la dinámica del agua en un territorio y su relación con el suelo y la vegetación.

La densidad de drenaje también es un indicador importante de la disponibilidad de agua en una región, ya que áreas con alta densidad de drenaje suelen tener una mayor capacidad de retener y almacenar agua subterránea, mientras que áreas con baja densidad de drenaje pueden ser más propensas a ser zonas con bajo contenido de agua, secas o desérticas (Martinez y Ascuña, 2022, p. 21).

2.2.4. Densidad de lineamientos

Este parámetro indica la cantidad de fracturas o pliegues que se encuentran en un área por unidad de superficie determinada, de ahí que estos lineamientos pueden afectar la circulación y la recarga del agua sobre todo en las épocas con mayor cantidad de precipitación, ocasionado que estos pliegues actúen como barreras que controlan el movimiento del agua

La densidad de lineamientos puede proporcionar información importante sobre la estructura geológica de una región y su potencial tectónico. Por ejemplo, una alta densidad de lineamientos puede indicar una zona tectónicamente activa, donde las fuerzas tectónicas han causado la formación de numerosas fracturas y fallas. Por otro lado, una baja densidad de lineamientos puede indicar una región geológicamente más estable (Achá et al., 2022, p. 7).

2.2.5. Uso del suelo/ cobertura del suelo (LULC)

Se considera a este parámetro como resultado de la presencia de un volumen de agua adecuado lo que permite a su vez la formación de distintas clases de cobertura, que a la par han permitido aprovechar como sustentos para el crecimiento normal como sociedad tal es el caso de las actividades de agricultura, ganadería, etc. Se sabe que según los patrones de cobertura de suelo y la presencia de un tipo en específico de vegetación se puede extraer la idea que la zona posee una cantidad de agua aprovechable óptima tal es el caso de vegetación como el páramo, arbustiva, de cultivo entre otros, durante los procesos de teledetección de aguas subterráneas este parámetro es esencial sobre todo durante el proceso de ponderación de la capa pues quedará a criterio del investigador dotar el grado de importancia de esta variable frente a las otras que involucran los procesos de recarga hídrica (Gaur y Singh, 2023, p. 27).

2.2.6. *Índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI)*

Se describe como el índice de vegetación normalizado el cual basa su cálculo en el nivel de refracción de la radiación de las especies vegetales captada por el sensor satelital, es así que se consideran que zonas con una vegetación sana y vigorosa los valores NDVI serán mayores a 0.8, por ende en zonas con baja presencia de cultivos o zonas cuyas especies vegetales carezcan de recursos hídricos o minerales reflejaran una menor radiación inferior a 0.3 , con dicho principio se puede deducir que el cálculo de NDVI como parámetro para detectar aguas subterráneas es importante ya que se podrá determinar que zonas con un valor cercano a +1 de NDVI son zonas que albergan un suministro adecuado de este tipo de recurso.

El NDVI se calcula usando la ecuación:

$$v = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Ecuación 1: Formula para el cálculo de NDVI

En la ecuación 1, V representa los valores de NDVI, NIR correspondiente a la banda de infrarrojo cercano, por su parte R hace referencia a la banda roja asignada para el satélite Landsat, los valores de NDVI como se han mencionado varían en un rango de -1 a +1.

Un valor de NDVI de cero indica la presencia de vegetación enferma o no presencia de vegetación y por su parte valores cercanos a +1 indican la presencia de vegetación sana y en grandes cantidades (Zaitunah et al., 2018, p. 12).

2.2.7. *Pendiente*

La pendiente se refiere a la inclinación de una superficie o terreno y se considera como uno de los parámetros más importantes al momento de evaluar las zonas con potencial presencia de aguas subterráneas. Debido a que la pendiente indica el grado de inclinación del terreno, este se asocia con cuanta lluvia puede escurrir e infiltrarse a través del terreno, además hay que considerar que mientras mayor pendiente se tenga mayor volumen de lluvia se llevará hasta las partes más bajas de la cuenca, de igual manera este parámetro se considera importante porque los fenómenos de arrastre no solo implica con la lluvia sino también en el transporte de contaminantes (Gutiérrez et al., 2019, p. 3-6).

2.2.8. *Lluvia o precipitación media anual*

La precipitación o coloquialmente llamado como lluvia es el principal factor de recarga hídrica de los acuíferos, dependiendo de la zona de estudio y de las condiciones climatológicas existirá lugares donde la precipitación anual sea mayor y por ende la probabilidad de encontrar áreas con presencia de aguas subterráneas aumentará, por su contra parte en zonas con una escasa precipitación y baja intensidad de lluvia, los procesos de recarga de estos acuíferos se dificultará a la par que se reflejará que en estas zonas la cantidad de vegetación y el nivel ecosistémico es menor (Rivadeneira y Marrero de León, 2017, p. 8).

2.2.9. *Índice de humedad topográfica (TIW)*

El índice de humedad topográfica es una medida de la humedad del suelo, es decir mide la capacidad que tiene el terreno para retener agua por un periodo de tiempo determinado, así podemos detallar que las áreas con un índice de humedad topográfica alto tienen un suelo más húmedo y son propensas a la acumulación de agua, mientras que las áreas con un índice de humedad topográfica más bajo son más secas y tienen menos capacidad de retener agua. El IHT se calcula utilizando datos topográficos, como la elevación y la pendiente del terreno. A través de algoritmos y modelos, se estima la acumulación y redistribución del agua en función de estas características topográficas (Delgado et al., 2020, p. 23).

2.3. Bases conceptuales

2.3.1. *Acuífero*

Un acuífero no es más que una formación geológica natural la cual tiene la capacidad de almacenar agua por debajo de la superficie terrestre, su modo de recarga procede en su gran mayoría por los fenómenos de precipitación e infiltración de esta agua a través del terreno, actualmente muchos de estas fuentes de agua han sido destinadas para uso y consumo humano y una parte para labores agrícolas, hoy en día el agotamiento de estas formaciones y la contaminación de las pocas que aún existen ha llevado a plantearse la idea de buscar mecanismos que mejorar su identificación y cuidado ambiental (Álvarez et al., 2011, p. 11).

2.3.2. *Acuífugo*

Se determina como una formación geológica que solo sirve de puente para el paso del agua a través del suelo, es decir un acuífugo ni capta, almacena ni transmite el agua generalmente está asociada a una baja porosidad y permeabilidad (Álvarez et al., 2011, p. 11).

2.3.3. *Acuicludo*

Se define como una estructura subterránea que se forma cuando un acuífero se encuentra con una capa de roca impermeable, en este punto el agua que fluye a través del acuífero se acumula en el acuicludo y puede ser una fuente importante de agua subterránea, estos a su vez suelen estar conformados por rocas sedimentarias o ígneas (Álvarez et al., 2011, p. 14).

2.3.4. *Acuitardo*

Se caracteriza por ser una formación que posee una tendencia para almacenar agua en volúmenes elevados de agua, se caracteriza porque estas unidades distribuyen el agua de manera pausada y lenta dependiendo de la estación climatológica que se encuentra, sus características morfológicas indican que están constituidas por rocas con elevada porosidad y una baja permeabilidad, a diferencia de un acuífero, que es una formación geológica capaz de almacenar y transmitir agua subterránea, un acuitardo tiene una permeabilidad mucho más baja. Esto se debe a su composición geológica, que generalmente incluye arcillas, limos, lutitas o rocas compactas es importante considerar la presencia de acuitardos al estudiar y gestionar los recursos hídricos subterráneos, ya que pueden afectar la disponibilidad y calidad del agua. La identificación y comprensión de las características de los acuitardos son fundamentales para el desarrollo sostenible y la protección de los recursos hídricos subterráneos (Díaz et al., 2019, p. 23-27).

2.3.5. *Acuífero libre*

Corresponde aquella formación geológica que se caracteriza porque una parte de esta tiene contacto con la superficie terrestre, es decir que se sitúa por encima del nivel freático, generalmente estos se ubican cercanos a ríos y arroyos y poseen una susceptibilidad elevada a fenómenos de contaminación los acuíferos libres son importantes fuentes de agua para abastecimiento doméstico, agrícola e industrial, y su gestión adecuada es fundamental para garantizar su sostenibilidad y conservación. Los estudios hidrogeológicos y la monitorización regular son necesarios para comprender la dinámica y las características de los acuíferos libres y tomar decisiones informadas sobre su uso y protección (Díaz et al., 2019, p. 23-27).

2.3.5.1. Mapeo de agua subterránea

El mapeo de agua subterránea es un proceso importante que implica la identificación y análisis de los recursos hídricos subterráneos en una determinada zona, actualmente la metodología planteada involucra la combinación de técnicas estadísticas y manejo de SIG para considerar las variables más apropiadas ligadas con la búsqueda de las zonas propicias que almacenen agua, en referencia al uso de técnicas SIG se emplean datos satelitales y en campo que serán procesados y tratados de forma adecuada para ajustar dentro de una zona de estudio, las áreas que mayor cumplimiento de los requisitos planteados se tenga, el mapeo de agua subterránea a su vez no solo implica un avance en los procesos de prospección sino que hace hincapié en los mecanismos de protección y cuidado de la sobreexplotación de los mismos (Díaz et al., 2019, p. 23-27).

2.4. Base legal

2.4.1. Constitución de la república del Ecuador, aprobada en el año 2008

Artículo 12: El derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable, agua constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida.

Artículo 14: Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, el "sumak kawsay" (en lengua quechua, nativa del Ecuador).

Artículo 15: El Estado promoverá en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria ni afectará el derecho al agua (CONSTITUCION DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR, 2008).

2.4.2. Ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua

Título II Recursos Hídricos

El artículo 8 de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua menciona que la única autoridad del agua (Secretaría del Agua) es la que se encargará de la delimitación de las cuencas hidrográficas que servirá para el conocimiento de la unidad territorial. La cuenca hidrográfica estará delimitada por la línea divisora y dentro de esta delimitación se abarcarán aspectos de infraestructura, áreas de conservación, protección y zonas productivas para que exista una gestión integral de los recursos hídricos. Esta zonificación será el eje transversal del sistema nacional descentralizado de planificación participativa para el desarrollo.

El artículo 28 se refiere a la Planificación de los recursos hídricos y cita la responsabilidad que tiene la autoridad del agua de realizar una planificación hídrica en base a un Plan Nacional de Recursos Hídricos al cual, el Estado y los Gobiernos Autónomos Descentralizados deben ajustarse. De igual manera, los planes de gestión integral de los recursos hídricos por cuenca deben vincularse a las entidades correspondientes que presten servicios relacionados con el agua (LEY ORGANICA DE RECURSOS HIDRICOS USOS Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA, 2014).

2.4.3. *Reglamento de la ley orgánica del agua*

Primer suplemento del Registro Oficial N.º 483

El artículo 7 se refiere a la cuenca hidrográfica y al principio de unidad de cuenca en la gestión de las Demarcaciones Hidrográficas reforzando lo indicado en el artículo N.º 8 de la Ley Orgánica de Recursos Hídrico, Usos y Aprovechamiento del Agua. Distingue una autoridad única en temas de aprobación de delimitación de cuencas y considerando que la Demarcación Hidrográfica se compone de las zonas terrestre y marinas asociadas a una o varias cuencas hidrográficas vecinas y que las Software de análisis y procesamiento de imágenes satelitales subterráneas y costeras asociadas a dichas cuencas deben gestionarse de forma conjunta (LEY ORGANICA DE RECURSOS HIDRICOS USOS Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA, 2014).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Enfoque de la investigación

En cuanto al enfoque de la investigación esta recae a una de tipo mixta ya que abarca una serie de hipótesis que han seguido producto de la investigación y que se desea sean solventadas, esto tomando en cuenta los juicios y criterios de valor propio como investigador y autor de este trabajo de titulación, adicionalmente se incluiría un meto estadístico para corroborar que las hipótesis solventadas guarden un grado de correlación aceptable.

3.2. Nivel de la investigación

En vista que no han existido estudios previos en la zona de estudio el nivel de la investigación recae en una de tipo exploratorio, por el análisis de datos y adaptarlos a la zona de estudio pertinente.

3.3. Diseño de la investigación

3.3.1. *Con base a la manipulación de la variable independiente*

De acuerdo con la manipulación de variables, la investigación tiene un enfoque experimental, ya que su objetivo primordial es la identificación de las variables y condiciones más adecuadas para la determinación de aguas subterráneas. La gestión y medición de estas variables dependen en gran medida de la opinión y criterio del investigador, que a su vez serán ejemplificadas durante las ponderaciones asignadas durante el análisis jerárquico o JAP.

3.3.2. *Según las intervenciones en el trabajo de campo*

Su enfoque es transversal por que busca abordar la presencia o ausencia de aguas subterráneas como una problemática con un intervalo de tiempo y área específica, lo que a la final se busca es que a partir de esta investigación se basen nuevos criterios que complementen o refuten los resultados obtenidos.

3.4. Tipo de estudio

El estudio recae en una investigación de campo ya que se hace una recolección previa de información se procesa en este caso por medio de software SIG y los resultados son el reflejo de lo que sucede en el área de estudio referente a las características morfológicas del terreno y a la presencia o ausencia de aguas subterráneas.

3.4.1. Población de estudio

La población de estudio conforma los habitantes de la parroquia Punin, lo que esto incluye sus unidades hidrográficas y superficie total de la parroquia en cuestión.

3.4.2. Tamaño de la muestra

Se estudiarán los 55,82 km² de superficie de la parroquia Punín, provincia de Chimborazo como el tamaño de la muestra.

3.5. Localización de la zona de estudio

La presente investigación se llevó a cabo en la parroquia Punin, que forma parte de la división política y administrativa de la provincia de Chimborazo Cantón Riobamba, sus parámetros geomorfológicos generales demuestran que esta se encuentra en un rango de altitud que va desde los 2800-3000 msnm, posee una alta riqueza ecosistémica y la mayoría de la población rural basa sus ingresos económicos en las actividades agrícolas y ganaderas, su ubicación cartográfica corresponde a: Sistema de Proyección Geográfica WGS8 - UTM - ZONA-17S, donde -78.67691 (longitud); -1.75631 (latitud).

Sus límites son: Al sur la parroquia Flores, para el norte el sector de San Luis, al Este la parroquia Licto y finalmente para el Oeste, el Cantón Colta.

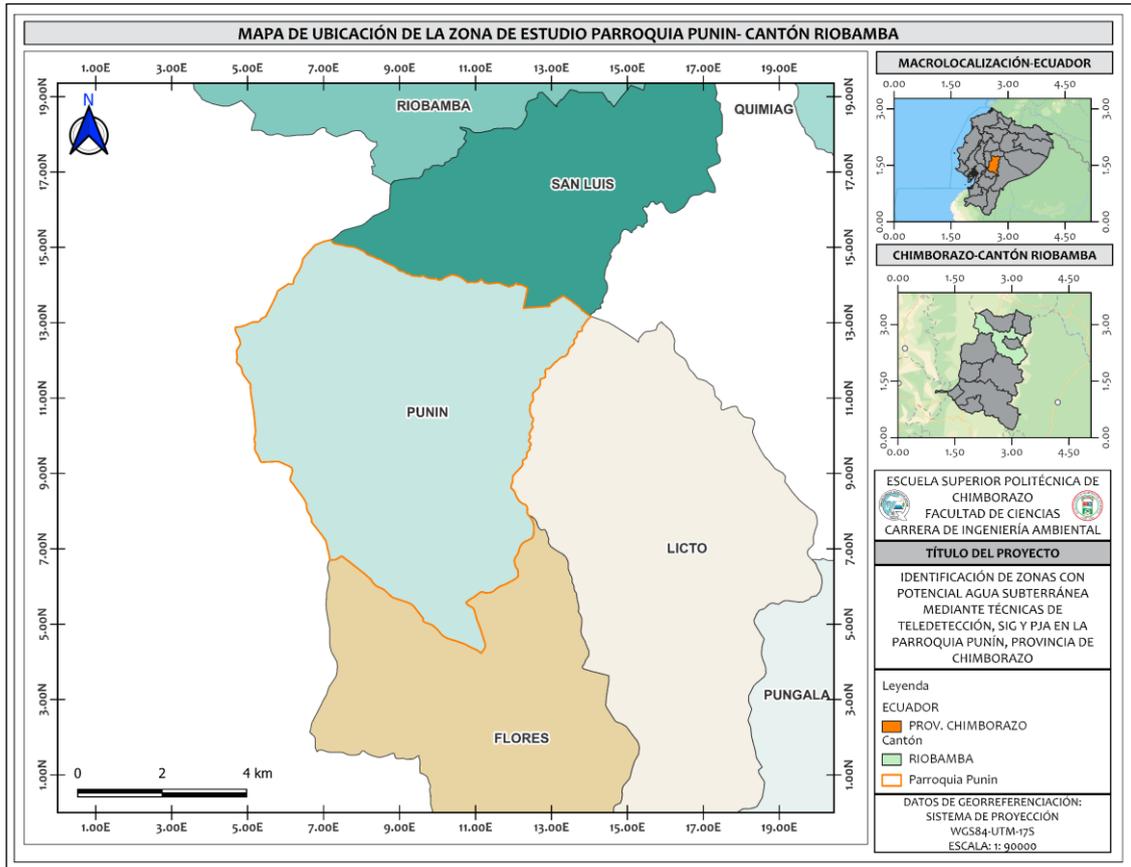


Ilustración 3-1: Mapa de delimitación parroquia Punin

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

3.6. Métodos técnicas e instrumentos de investigación

3.6.1. *Software para el procesamiento y tratamiento de imágenes satelitales*

Durante este trabajo la información cartográfica y satelitales se lo recopiló de plataformas libres de acceso como el IGM, World Cover-Data, Earth Data y similares las cuales brindaron en conjunto las bases fundamentales para aplicar los procesos de teledetección, es correcto precisar que dicha información descargada se la obtiene en estado crudo y es necesario depurarla y reclasificarla para obtener los parámetros deseados previo a su análisis final, durante la descarga de las imágenes satelitales del área de estudio estas no deben contener elevadas cantidades de interferencia como nubes o píxeles dañados ya que en función a la calidad de esta información y su nivel de preprocesamiento son factores clave que influyen en la precisión y relevancia de los resultados obtenidos, el software de análisis y procesamiento empleado en este caso fue ArcGIS y QGIS sin embargo indistintamente del programa todo aquel que maneje procesos multicriterio será un herramienta digital válida para este tipo de procesos (Botana y Fernández, 2019, p. 22).

3.6.1.1. *ArcGIS*

Dentro de este mundo de la teledetección y manejo de aplicaciones geográficas ArcGIS quizás sea el programa con mayor conocimiento por parte de los investigadores, actualmente en el mercado lleva en uso cerca de 15 años y cada vez posee herramientas mucho más potentes que permiten realizar un sin número de investigaciones y simulaciones con este tipo de información, en su versión más actual los procesos de análisis multicriterio permiten unir muchas más variables e incluir más condiciones o fenómenos ambientales que suceden de forma natural, el modo de representación de sus resultados se lo hace por medio de la generación de mapas cartográficos ,tablas y gráficos e inclusive la posibilidad de generar simulación en 2D y 3D, basta con la búsqueda de la aplicación de este software en las ciencias ambientales lo que determinar que es empleado en campos tales como la agricultura, seguridad, riesgos, movimiento de masas entre otros (Baxendale y Buzai, 2011, p. 3-8).

3.6.1.2. *QGIS*

Por su parte Qgis, es una plataforma de código libre muy potente que en los últimos años ha venido ganando más espacio entre la comunidad científica, por sus herramientas y potencia de procesamiento, se destaca porque es posible combinar esquemas de programación por Python para disminuir el tiempo de los procesos, Actualmente, tanto ArcGIS como Qgis son herramientas muy potentes para gestionar y analizar datos geográficos, durante este trabajo dichas herramientas nos darán la pauta a seguir sobre el tratamiento de las variables tomadas como partícipes dentro de la evaluación de zonas con agua subterránea con la condición de que estos insumos cumplan con los requisitos necesarios de calidad y precisión (Baxendale y Buzai, 2011, p. 3-8).

3.7. **Obtención de los parámetros geomorfológicos de la zona de estudio**

Inicialmente se empezó con la recolección de las bases de datos digitales e insumos requeridos para la evaluación de la presencia de aguas subterráneas, para la determinación de las características morfológicas y de pendiente de la cuenca se utilizó un modelo digital de elevación de la zona de interés. Para definir el área de estudio se utilizó un archivo en formato shapefile de los límites administrativos del cantón Riobamba a nivel parroquia, en tanto que los parámetros precipitación, NDVI, densidad de drenaje y uso de suelos fueron procesados y tratados dentro del software SIG correspondiente.

Tabla 3-1: Metodología de obtención de la morfología de la cuenca

Herramienta	Función	Archivo de entrada	Archivo de salida
Reproyectar	Se estableció el sistema de coordenadas referentes a la zona de investigación (WGS84-UTM-17S)	MED “modelo de elevación digital”	MED reproyectado
r. neighbors	Asigna valores a las celdas que vacías o sin fomraion tomando cuenta la interpolacion de las celtas vacías del MED	MED reproyectado	MED corregido (relleno de pixeles vacíos)
Algoritmos de GRASS r. watershed	Se realizó el cálculo de los aspectos hidrológicos y morfológicos de la cuenca, y se estableció el tamaño mínimo de cada cuenca utilizando el número predeterminado de píxeles de nuestro MED como punto de referencia. Se asignarán los parámetros: accumulation; drainage; basins streams	MED previamente cortado a la zona de estudio.	Capas de Salida La capa de acumulación incluye el valor numérico positivo de cada celda, el cual representa la cantidad de flujo de superficie que pasa a través de la cuenca. La capa de salida de las cuencas contiene las cuencas que surgen en la región geográfica, y se distinguen por medio de una etiqueta exclusiva o única. Los tramos de los cursos de agua generados se encuentran en la capa de salida de los escurrimientos (streams), y sus valores corresponden a los de las cuencas.
r.to.vect. area	Se procede a traducir los archivos raster a vectores, en este caso a polígonos.	Ráster: accumulation; drainage; basins streams	Archivos en formato shp de la cuenca delimitada.

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

3.7.1. Modelado de los datos empleando SIG

La metodología empleada se distribuyó en cinco etapas principales cada una con sus características esenciales y que estrictamente deben ser llevadas en orden jerárquico, para la primera etapa se recopilaron los datos geo espaciales de las principales páginas de acceso a cartografía presentes en la web, para la segunda etapa se emplearon las imágenes satelitales Landsat 8, las cuales fueron sujetas a un tratamiento previo en los que se elimina restos de información de píxeles con información inadecuada para su posterior reclasificación.

En cuanto a la zona de estudio se empleó un shape de la parroquia Punin de la cual sirvió de máscara para el corte de las imágenes Landsat 8 previamente reclasificadas, similar situación se empleó para la determinación del resto de insumos NDVI, precipitación, Densidad de drenaje, Uso y tipo de suelo, para la tercera etapa se incluyó el análisis multicriterio o jerárquico AHP, mediante el cual se asignó un peso absoluto a cada variable que afecta la presencia o ausencia de agua subterránea tomando en consideración que el criterio de los pesos añadidos para cada insumo dependió del nivel de información disponible y del criterio del investigador.

Para la cuarta etapa se tomó los insumos calculados y definidos y se elaboraron los correspondientes con el fin de mejorar los resultados y presentarlos de una forma visual que tenga mayor comprensión para el lector. Finalmente, en la quinta etapa se interpretaron los resultados y se propusieron medidas o mecanismos para proteger las zonas con potencial de agua subterránea, es importante destacar que la calidad y el tratamiento de los parámetros obtenidos influyen en la exactitud y validez tanto del software SIG utilizado como de la metodología de análisis multicriterio o jerárquico aplicado.

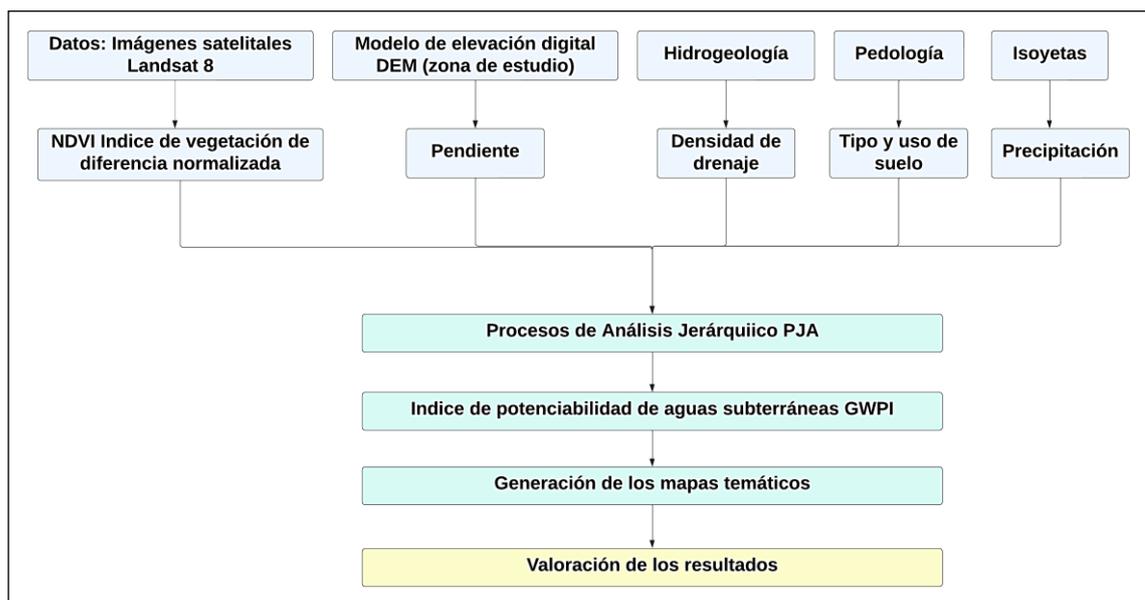


Ilustración 3-2: Metodología para la obtención de aguas subterráneas

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

3.7.2. Compendio de la data e información digital

Se obtuvieron los datos necesarios para definir el área de estudio de fuentes públicas, incluyendo los geos portales del MAE, IGM, en cuanto a las variables de geomorfología y precipitación, se descargaron datos digitales de los anuarios de precipitación del INAMHI, para el mapa de uso de suelo se emplearon los datos colgados en el geo visor del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, en cuanto a las imágenes LANDSAT se descargaron del portal USGS Earth Explorer.

3.7.3. Descarga de las imágenes satelitales de la zona de estudio

La descarga de las imágenes satelitales Landsat se lo realizó mediante la localización de 4 puntos que abarcan la zona de estudio dentro del visor geográfico del USGS Earth Explorer, posteriormente se selecciona el tipo de satélite y el nivel de cobertura de nubes, es preciso mencionar que para un correcto estudio y definición de los datos la imagen deberá contener un mínimo porcentaje de nubes con la finalidad de las nubes no interfieran con los análisis realizados por el software SIG, mediante la descarga y adecuación de estas imágenes se pudo obtener el NDVI que resulta de la combinación de las bandas (banda 5-banda 4) / (banda 5+ banda 4) en la siguiente matriz se detalla de mejor manera las características principales de las imágenes satelitales descargadas:

Tabla 3-2: Datos generales imágenes satelitales

DATOS GENERALES	LANDSAT 7		LANDSAT 8	
	FECHA DE ADQUISICIÓN	09/11/2021		20/07/2022
SENSOR	ETM+		ETM+	
WRS PATH	10		10	
WRS ROW	61		61	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud
	-1.01805	-78.84172	-1.01156	-78.82611
	-1.14783	-78.84094	-1.01667	-78.83723
	-1.14842	-78.84182	-1.14675	-78.84338
SISTEMA DE PROYECCIÓN	UTM	UTM		
	UNIDADES DE PROYECCIÓN	Metros	Metros	
ZONA UTM	17S	17S		
SISTEMA DE REFERENCIA	WGS84	WGS84		
COBERTURA NUBOSA	10%	5%		
RESOLUCIÓN (METROS)	30	30		
COMBINACIÓN DE BANDAS EMPLEADAS EN EL ESTUDIO	Azul: 0.44-0.51 μm Verde: 0.52-0.59 μm Rojo: 0.63-0.685 μm		Azul: 0.43-0.55 μm Verde: 0.50-0.62 μm Rojo: 0.50-0.62 μm	

Fuente: (EarthExplorer, 2023)

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

3.8. Procesamiento y clasificación de los insumos temáticos considerados en la evaluación de aguas subterráneas

3.8.1. Obtención del índice NDVI

La obtención del índice NDVI se realizó mediante la combinación de las bandas contenidas en el espectro del satélite Landsat, estas surgen de la agrupación de las bandas (banda 5-banda 4) / (banda 5+ banda 4), proceso llevado a cabo por medio de QGIS, es preciso mencionar que este parámetro mide la calidad vegetativa de una zona con referencia al nivel de radiación electromagnética que es emitida por la vegetación y captada por el sensor. El modelo indica que las zonas sanas con presencia de recursos hídricos y minerales generaran áreas con una cobertura vegetal saludable traducido a nivel numérico los valores ráster se acercarán a +1, en su contraparte las zonas carentes de aguas y recursos minerales favorecen una cantidad baja de especies vegetales y visualmente se representaran en zonas con un color blanco o marrón que a nivel numérico son píxeles con valores cercanos a -1, la importancia de este parámetro para la detección de aguas subterráneas radica principalmente en la relación de la disponibilidad de agua y la presencia de zonas con vegetación sana.

Tabla 3-3: Procedimiento para la generación del insumo NDVI

Herramienta	Función	Archivo de entrada	Archivo de salida
Reproyectar	Se establece el sistema de coordenadas correctas para la zona de estudio WGS84-UTM-17S en el software GIS	Imágenes Satelitales Landsat 8 o Sentinel en formato .tiff o también llamado ráster.	Imágenes satelitales reproyectadas al sistema de referencia de trabajo WGS84- UTM-17S
Complemento SCP	SCP o Semi-Automatic Classification Plugin, se añade las imágenes satelitales reproyectadas para su procesamiento como un nuevo band set 1 Se asigna la longitud de onda correspondiente a los datos del satélite descargado.	Imágenes Landsat reproyectadas en formato .tiff	Visualización de las bandas. En el caso de Landsat se previsualiza un número de 7 bandas para sus respectivas combinaciones.
Corrección de las Bandas satelitales	Se realiza la corrección atmosférica de las bandas satelitales cargadas, esto con la finalidad de corregir píxeles perdidos del bandeado de la imagen.	Bandas de las imágenes Landsat. Archivo MTL (incluido en la carpeta de las bandas descargadas)	Bandas con su consecuente archivo MTL

<p>Conversión a reflectancia TOA y temperatura de brillo</p>	<p>La Reflectancia en el Techo de la Atmósfera (TOA) es un indicador que combina la reflectancia de la superficie terrestre y la reflectancia atmosférica para normalizar la irradiancia solar y reducir la variabilidad entre las bandas de imágenes. En el caso específico de LANDSAT, los valores de t para las bandas 1, 2, 3 y 4 son de 0.70, 0.78, 0.85 y 0.91, mientras que para las bandas 5 y 7 se consideran valores entre 2.</p>	<p>Bandas de las imágenes Landsat. Archivo MTL (incluido en la carpeta de las bandas descargadas)</p>	<p>Bandas con su consecuente archivo MTL</p>
<p>Pansharpening</p>	<p>Se ejecutó el Pansharpening para combinar las bandas pancromáticas con la finalidad de obtener una mayor resolución en la calidad de la imagen satelital.</p>	<p>Bandas Landsat en formato .tiff</p>	<p>Bandas procesadas con una mayor nitidez.</p>
<p>Temperatura en brillo en Celsius</p>	<p>Se ajustó la temperatura que por defecto en las bandas está asignado en °F, a °C para futuros cálculos.</p>	<p>Bandas Landsat en formato .tiff</p>	<p>Bandas Landsat procesadas.</p>
<p>Corrección atmosférica DOS1</p>	<p>Se utilizó la herramienta para eliminar la interferencia de los aerosoles y la radiación natural que afecta al sensor y se observa en la imagen capturada por el satélite.</p>	<p>Bandas Landsat en formato .tiff</p>	<p>Bandas Landsat procesadas.</p>
<p>Corte de las bandas a la zona de estudio.</p>	<p>Se empleó el archivo de forma en forma de un shape de la parroquia de Punín como zona de estudio. Luego, se utilizó la herramienta "cortar archivo ráster por capa de máscara" dentro del software QGIS para agregar las bandas procesadas y ejecutar la función correspondiente.</p>	<p>Bandas Landsat procesadas shape de la parroquia Punin.</p>	<p>Bandas Landsat cortadas a la zona de estudio.</p>
<p>Combinación de las Bandas para el cálculo del NDVI mediante la calculadora ráster</p>	<p>Se emplea la calculadora ráster, verificando que todas las bandas estén proyectadas al sistema de referencia de trabajo, se asigna en orden la función: Para Landsat 8: $(banda\ 5 - banda\ 4) / (banda\ 5 + banda\ 4)$.</p>	<p>Banda 5 Banda 4</p>	<p>Se refiere a un archivo en formato de imagen rasterizada que muestra diferentes tonalidades de verde, amarillo y rojo para representar visualmente la vegetación. Es importante destacar que las áreas de color verde indican que la vegetación está saludable, mientras que las áreas de color rojo</p>

			indican que la calidad de la vegetación es baja o que no hay vegetación presente en esas áreas.
Clasificación del ráster NDVI / herramienta reclass	Una vez obtenido la imagen combinada referente al índice de vegetación se procede a realizar una reclasificación del ráster con valores ajustado a cinco rangos según los datos contenidos en el ráster.	Ráster NDVI	Ráster NDVI reclasificado.

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

3.8.2. Determinación de la precipitación

En relación con la variable precipitación este insumo se obtuvo en formato ráster del portal IGM, y se verificó que la zona de estudio perteneciente a la parroquia Punin la precipitación media anual se ubicó en rangos de 1500 a 1700 mm por año, se describe también mediante revisión del PDOT de la parroquia que generalmente la lluvia promedio alcanza los 1300 mm de agua por año.

Sus consecuentes meses donde la lluvia llega a ser escasa, este parámetro se incluyó importante porque a partir de este fenómeno se produce la recarga de los sistemas hídricos del área lo que favorecerá dentro del estudio la determinación de las zonas de influencia que mayores lluvias concentren.

Tabla 3-4: Procedimiento para la determinación del insumo precipitación

Herramienta	Función	Archivo de entrada	Archivo de salida
Reproyectar	Se asigna el sistema de coordenadas correcto para la zona de estudio WGS84-UTM-17S en el software GIS	Isoyetas proporcionadas por la base de datos del IGM y de las series meteorológicas del INAMHI.	Shape de isoyetas
Corte de la capa	Se realiza el corte correspondiente a la zona de estudio	Shape isoyetas	Corte del archivo shp del área de estudio
Vec.to rast	Se ejecuta el proceso de rasterizar el archivo en formato vectorial con la finalidad de tener todos los insumos en tipo ráster para la evaluación multicriterio.	Archivo shape de la zona de estudio en formato vectorial	Archivo en formato ráster de la zona de estudio.

Reclasificación del archivo ráster	Se emplea la función reclassify de las herramientas ráster clasificando el archivo de isoyetas.	Archivo en formato ráster cortado a la zona de estudio.	Ráster reclasificado
---	---	---	----------------------

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

3.8.3. Densidad de drenaje

En cuanto a la densidad de drenaje este se obtuvo a partir de la obtención de la cuenca y la red hídrica de la misma es preciso mencionar que la densidad de drenaje parte siempre de un punto de aforo o parte aguas del cual salen un sin número de ramificaciones a lo largo y ancho de la cuenca, una densidad de drenaje elevada supone que la cuenca favorecerá los procesos de escurrimiento e infiltración, por su parte una baja densidad de drenaje ocasionar que el agua producto de la lluvia se una hasta un cauce principal o tributario como un río, acequia, lago o riachuelo mediante procesos de escorrentía, a continuación se detallan los pasos necesarios para obtener este insumo.

Tabla 3-5: Procedimiento para la determinación del insumo densidad de drenaje

Herramienta	Función	Archivo de entrada	Archivo de salida
Reproyectar	Se asigna el sistema de coordenadas correcto para la zona de estudio WGS84-UTM-17S	Se añade el MED, modelo de elevación digital	MED proyectado con las coordenadas de estudio
r. neighbors	Toma los valores de celdas cercanas existentes y las asigna a las celdas con valores inexistentes en el MED	MED reproyectado	MED corregido.
Algoritmos de GRASS r. watershed	Calcula parámetros hidrológicos y morfológicos de la cuenca Asignamos las opciones: accumulation; drainage; basins streams	MED previamente cortado a la zona de estudio.	Las Capas de Salida incluyen la capa de acumulación, que muestra los valores de flujo superficial en cada celda o píxel de la capa; la capa ráster de drenaje, que indica la dirección y distribución del drenaje en la cuenca; y la capa de cuencas, que representa las unidades hidrográficas de la zona de estudio y permite la determinación de los parámetros morfológicos de la cuenca.
Rasterizar	Los datos generados por el Sistema de Información Geográfica (SIG) son en formato vectorial, por lo que es imprescindible convertirlos a formato ráster para poder	Capas de salida en formato vectorial	Capas de salida en formato ráster.

	realizar el análisis multicriterio de los diferentes parámetros establecidos.		
Reclasificación del archivo ráster	Los datos obtenidos ya en formato ráster se reclasifican en rangos determinados.	Archivo ráster	Archivo ráster reclasificado.

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

3.8.4. *Pendiente o inclinación de la cuenca*

La variable de pendiente se determinó utilizando el archivo DEM, el cual se encuentra en formato ráster, se clasificó en diferentes rangos de elevación encontrándose que esta variable es importante en los procesos de escurrimiento e infiltración del agua de lluvia, lo que significa que áreas con pendientes más pronunciadas y condiciones favorables de terreno permitirán una mayor frecuencia de almacenamiento de aguas subterráneas. Por otro lado, en las zonas de la cuenca donde la pendiente no sea tan pronunciada, se favorecerá los procesos de escurrimiento, lo que significa que el agua de lluvia no se infiltrará y se dirigirá hacia un tributario mayor, como un río o una quebrada.

Tabla 3-6: Procedimiento para la determinación del insumo pendiente

Herramienta	Función	Archivo de entrada	Archivo de salida
Reproyectar	Se ajusta el archivo MED al sistema geográfico de estudio	MED original.	MED reproyectado.
Corte de la capa	Con ayuda de la herramienta corte por capa de máscara, se realiza el corte del MED reproyectado a la zona de estudio.	MED reproyectado.	MED cortado.
Pendiente	Se utilizó la herramienta "pendiente" dentro de la caja de herramientas. Este algoritmo calcula el ángulo de inclinación del terreno a partir de una capa ráster de entrada. La pendiente se expresa en grados.	MED cortado	Capa con las pendientes generadas a lo largo de la zona de estudio.
Rasterizar	La capa de pendientes que se encuentra en formato	Capas de pendientes en formato vectorial.	Capa de pendientes en formato ráster.

	vectorial se convirtió a formato ráster.		
Reclasificación el archivo ráster	Se procedió a reclasificar el archivo ráster de pendientes.	Capa de pendiente no clasificado en formato ráster.	Capa clasificada en formato ráster.

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

3.8.5. *Uso y tipo de suelo*

En cuanto a la variable uso y tipo de suelo la información se obtuvo del geo portal del sistema nacional de información de tierras rurales en formato shape para todo el territorio ecuatoriano, por lo que fue necesario hacer un corte a la zona de estudio en cuestión, mediante QGIS se aplicó la simbología adecuada permitiendo determinar que dentro de esta área predomina el suelo agrícola una parte de páramos y vegetación herbácea, así mismo se observó las fracciones constituyentes a zonas antrópicas, poblados y suelo expuesto, toda esta información actualizada para el periodo 2020, la aplicación de esta variable consiste en que mediante SIG se propuso que zonas donde exista la presencia de vegetación nativa supone que exista el suministro de agua requerido para el desarrollo y producción de las especies vegetales

Tabla 3-7: Procedimiento para la determinación del insumo uso de suelo

Herramienta	Función	Archivo de entrada	Archivo de salida
Reproyectar	El archivo correspondiente al uso y tipo de suelo del año 2020 fue obtenido del Geo portal Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales.	Shape uso y tipo de suelo del año 2019-2020 obtenido del portal Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales.	Shape de uso y tipo de suelo reproyectado.
Corte de la capa	La capa vectorial de uso de suelo se corta en base a la zona de estudio.	Capa de uso y tipo de suelo	Capa de uso y tipo de suelo cortada.
Rasterizar	La capa en formato ráster será reclasificada de nuevo, lo que significa que se agruparán los valores de píxeles en conjuntos para representar tipos específicos de suelo.	Capa de uso y tipo de suelo cortada en formato vectorial.	Capa de uso y tipo de suelo cortada en formato ráster.
Clasificación de las capas de uso de suelo	La capa en formato ráster será objeto de una nueva reclasificación, es decir, se agruparán los conjuntos de valores de los píxeles para representar un tipo específico de suelo.	Capa de uso y tipo de suelo cortada en formato ráster.	Capa nueva clasificada.

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

3.9. Categorización de los factores que condicionan la recarga y almacenamiento del agua subterránea

Ya con los insumos preparados se procedió a la reclasificación ráster en intervalos de clases similares con 3 rangos en función a la probabilidad de encontrar aguas subterráneas conforme las tablas descritas dentro de la metodología de esta investigación los rangos fueron (Alto, Medio, Bajo), las 5 variables que conformar este estudio se sujetaron a este proceso paso previo ya al proceso de jerarquía analítica (PJA)

3.9.1. Criterios de valorización de las variables

Se utilizó el software Qgis para categorizar los cinco insumos considerados como importantes para determinar la presencia de aguas subterráneas, obteniendo tres intervalos de clase: Alto, que corresponde a zonas con altas probabilidades de recarga y almacenamiento de aguas subterráneas; Medio, que comprende factores que intervienen parcialmente en la recarga y almacenamiento de aguas subterráneas; y Bajo, que se refiere a factores que inhiben la recarga y almacenamiento de agua subterráneas.

Tabla 3-8: Reclasificación de los insumos en los intervalos de clase

Intervalo de clase	Valor Asignado	Justificación
ALTO	3	Los factores presentes tienen una influencia positiva completa en la recarga y almacenamiento de aguas subterráneas.
MEDIO	2	Los factores que intervienen favorecen parcialmente la recarga y almacenamiento de aguas subterráneas.
BAJO	1	Los factores que intervienen obstaculizan la recarga y el almacenamiento de aguas subterráneas.

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

3.9.2. Criterios de clasificación para el parámetro NDVI

Tabla 3-9: Criterios de asignación de pesos para NDVI

NDVI	Probabilidad de encontrar aguas subterráneas	Valor de reclasificación	Justificación
Valores grandes (de 0,61 a 0,81) indican vegetación sana, arbustiva, bosques templados etc.	ALTO	3	Zonas con vegetación sana.

Valores de píxel moderados (de 0,21 a 0,31) representan arbustos y praderas	MEDIO	2	Zonas de vegetación con presencia de suelo expuesto
Valores de píxel pequeños (0,1 o menos) de la función NDVI corresponden a áreas con rocas o área	BAJO	1	Zonas con escasa o nula vegetación

Fuente: (Rosales, 2017, p. 23)

Realizado por: Unup Nandip, Moisés,2023

3.9.3. Criterios de clasificación para el parámetro precipitación

Tabla 3-10: Criterios de asignación de pesos para precipitación

Precipitación-rangos	Probabilidad de encontrar aguas subterráneas	Valor de reclasificación	Justificación
2001 a 3000 mm de lluvia/año	ALTO	3	Alto ingreso de agua al sistema
1501 a 2000 mm de lluvia /año	MEDIO	2	Ingreso medio de agua al sistema
1000 a 1500 mm de lluvia / año	BAJO	1	Bajo ingreso de agua al sistema

Fuente: (Rosales, 2017, p. 23)

Realizado por: Unup Nandip, Moisés,2023

3.9.4. Criterios de clasificación para el parámetro pendientes

Tabla 3-11: Criterios de asignación de pesos para pendientes

Pendiente	Probabilidad de encontrar aguas subterráneas	Valor de reclasificación	Justificación
Paisaje plano Pendiente entre 0 y 20 grados	ALTO	3	Alto ingreso de agua al sistema
Paisaje ondulado Pendiente entre 21 y 30 grados	MEDIO	2	Ingreso medio de agua al sistema
Paisaje montañoso Pendiente entre 31 y mayores a 60 grados	BAJO	1	Bajo ingreso de agua al sistema

Fuente: (Rosales, 2017, p. 23)

Realizado por: Unup Nandip, Moisés,2023

3.9.5. Criterios de clasificación para el parámetro densidad de drenaje

Tabla 3-12: Criterios de asignación de pesos para densidad de drenaje

Densidad de drenaje	Probabilidad de encontrar aguas subterráneas	Valor de reclasificación	Justificación
0,5 y a 1,5 km/km ² - cuencas con drenaje pobre.	ALTO	3	Zonas con elevada infiltración, el agua no discurre por la superficie.
1,51 a 2,5 km/km ² cuencas con drenaje normal.	MEDIO	2	Zona de infiltración media
2,51 y a 3,5 km/km ² - cuencas con alto densidad de drenaje.	BAJO	1	Infiltración reducida, superficies impermeables, sectores de la cuenca con escasas opciones para captar y retener aguas subterráneas.

Fuente: (Rosales, 2017, p. 23)

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

3.9.6. Criterios de clasificación para el parámetro uso y tipo de suelo

Tabla 3-13: Criterios de asignación de pesos para uso y tipo de suelo

Cobertura del suelo/tipo	Probabilidad de encontrar aguas subterráneas	Valor de reclasificación	Justificación
Bosques, vegetación herbácea etc.	ALTO	3	Intercepción baja: Los cultivos perenes y ciertas hortalizas tienen una baja tasa de intercepción de agua, ya que crecen en condiciones cambiantes en cuanto a sus necesidades de agua y no dependen de un suministro constante. Estas especies vegetales pueden sobrevivir durante largos períodos de tiempo sin agua.
Cultivos perenes cierto tipo de hortalizas, pastos arbolados, bosques intervenidos o fragmentados.	MEDIO	2	Intercepción media: La vegetación predominante en la zona son pastos, tanto naturales como cultivados, que tienen una capacidad moderada para retener agua. El suelo en el que se desarrollan estas especies vegetales suele presentar un grado de infiltración intermedio.
Tipo de vegetación que guarda relación con una alta intercepción de agua de precipitación, incluye bosques, vegetación	BAJO	1	Intercepción alta: Áreas con una amplia diversidad de vegetación, donde predominan plantas herbáceas saludables y en buen estado, las cuales requieren un suministro de agua constante.

endémica, plantaciones forestales etc.			
--	--	--	--

Fuente: (Rosales, 2017, p. 23)

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

3.9.7. *Inclusión del análisis jerárquico para la determinación de zonas con posible presencia de agua subterránea*

Inicialmente, se sustentó este proceso con la metodología desarrollada por el físico y matemático Thomas L. Saaty, dicha metodología es aplicada para la toma de decisiones cuando hay un número de variables elevados o bien cuando los insumos a evaluarse requieren de criterios variables tanto físicas, químicas y juicios de valor, mediante la construcción de la matriz es posible discernir las variables que mayor influencia tienen dentro de la hipótesis que se quiere comprobar, la matriz consiste en la asignación de pesos equivalentes con base a una escala de relevancia, que a su vez permita mejorar la toma de decisiones. En nuestro caso, las cinco variables tomadas en cuenta como importantes al momento de determinar áreas con presencia de aguas subterráneas fueron sujetas a esta metodología y los pesos asignados se muestran en las tablas subsecuentes (Maldonado, 2020, p. 15).

3.9.7.1. *Criterios de ponderación de las variables*

Se determinaron los criterios de formulación de variables a través de la revisión bibliográfica exhaustiva de trabajos de investigación similares, se seleccionaron los proyectos de investigación que presentaban parámetros y áreas de estudio similares a los de la investigación en cuestión, así mismo se consideró el grado de participación de cada variable durante el ciclo del ecosistema, sus relaciones con otras variables, su papel activo en el ciclo del agua y su presencia en zonas del mundo donde se ha confirmado la existencia de agua subterránea. Los parámetros evaluados, tales como el NDVI, la pendiente, la densidad de drenaje, la precipitación y el uso del suelo, cumplen con los criterios de potencialidad para la presencia de agua subterránea, lo que justifica el uso de la metodología de análisis jerárquico JAP para ponderar o establecer la equivalencia entre ellos.

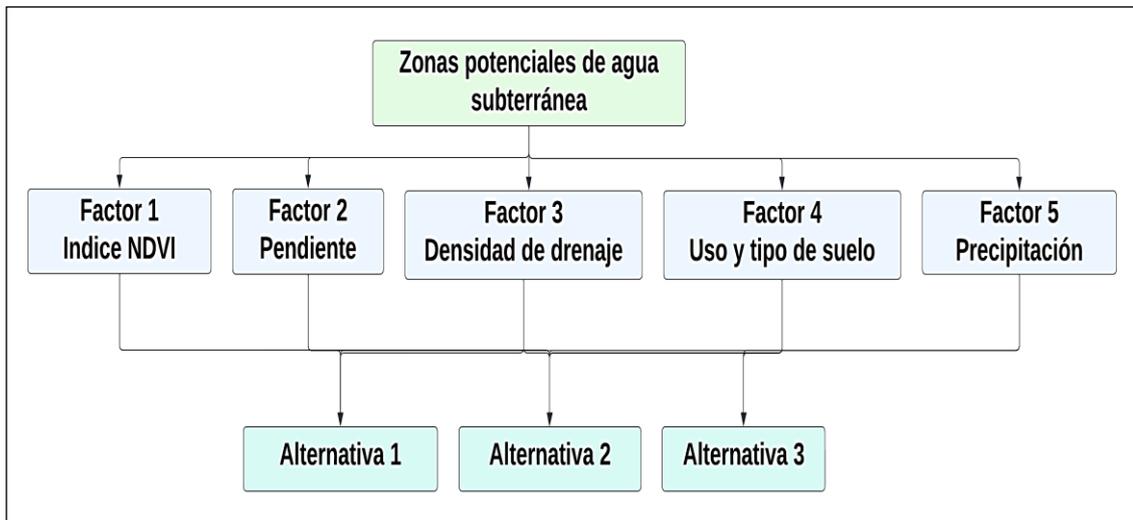


Ilustración 3-3: Estructura PJA para la determinación de aguas subterráneas

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

3.9.7.2. Elaboración de las matrices de comparación

Se elaboró las matrices Saaty de comparación cruzada de las variables en cuestión, en este punto se revisó por bibliografía aquellas con mayor influencia tienen durante los fenómenos de infiltración del agua para la creación de zonas con potencial presencia de aguas subterráneas, los criterios de valor se eligieron dentro de un rango de 1 a 7 según la escala de preferencia numérica descrita en la tabla correspondiente:

Tabla 3-14: Escala de medición por Saaty

JUICIO SOBRE LA PREFERENCIA TASA NUMÉRICA		Descripción
1	Igual importancia	A y B tienen la misma importancia
3	Importancia Moderada	A es ligeramente más importante que B
5	Importancia Grande	A es más importante que B
7	Importancia muy grande	A es mucho más importante que B
9	Importancia extrema	A es extremadamente importante que B

Fuente: (Lapperre et al., 2022, p. 16)

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

La escala propuesta por Saaty puede ser sujeta a modificaciones, en nuestro caso la escala se determinó en 7 rangos de importancias dada la cantidad de variables tomadas en juego, una vez realizada la escala y jerarquización de los pesos se transporta al software SIG correspondiente para que dichos valores se reflejen en los insumos de las capas ráster generados lo que se conoce a su vez como análisis multicriterio en SIG.

3.9.8. *Elaboración del mapa con potenciales zonas de agua subterránea*

El mapa de zonas potencias de aguas subterráneas surgió de la combinación de todos los insumo dentro de la calculadora ráster con los pesos equivalentes determinados mediante PJA, los pesos normalizados a cada variable se basaron a los criterios justificados dentro de esta investigación, la matriz de comparaciones sirvió para aplicar los pesos normalizados para cada variable es así que dentro de la fórmula correspondiente (W) representa el peso normalizado y surge de la división del valor de cada celda por la suma de sus columnas, seguidamente se estableció el valor medio para cada fila y se verificó la validez de la metodología. Por último, se determinó la relación de consistencia (CR) utilizando la ecuación correspondiente.

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Ecuación 2: Fórmula para el cálculo de relación de consistencia

Donde:

RI: Se trata de un índice de consistencia aleatorio que varía según el orden de la matriz, y en este caso en particular, se refiere al orden $n = 5$.

CI es el índice de consistencia el cual puede ser expresado utilizando la ecuación:

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{n - 1}$$

Ecuación 3: Fórmula para el cálculo del índice de consistencia

Donde:

En este caso, n representa el tamaño de la matriz, que en este ejemplo es de 5, mientras que λ_{\max} corresponde al valor propio más grande de la matriz. Es necesario que el valor de CR sea inferior a 0,10 para asegurar que los pesos normalizados sean coherentes.

3.9.9. *Aplicación del groundwater potential index para la determinación de zonas con potencial presencia de agua subterránea*

El groundwater potential index GWPI, nace como resultado de la distribución espacial y zonificación del territorio en rangos de aptitud hidrogeológica, para la parroquia Punin, se obtiene mediante la sumatoria de los pesos normalizados de cada variable dentro del software SIG, obteniéndose un único insumo en formato ráster el cual se diferenciará claramente las zonas con tres rangos de aptitud frente a la presencia de aguas subterráneas.

El cálculo del GWPI implica la recopilación de datos sobre varios parámetros, como la permeabilidad del suelo, la topografía, la geología, la precipitación, la vegetación y la capacidad de retención de agua del suelo. Estos datos se procesan utilizando técnicas de análisis espacial y se asignan valores a cada parámetro según su importancia relativa para el potencial de agua subterránea (Alcivar y Gil, 2021, p. 11).

$$GWPI = \sum_{i=1}^n \sum_{w=1}^m (W_i X_j)$$

Ecuación 4: Fórmula para el cálculo del índice de potencialidad de aguas subterráneas

Donde:

El peso normalizado de la capa temática j se denota como W_i . Para calcular este peso, se considera el valor de rango de cada clase con respecto a la capa j, que se representa como X_j .

$$GWPI = UsWUswf + PrWPrwf + DdWsDdwf + PtWPtwf + NDVIWNDVIwf$$

Ecuación 5: Cálculo del groundwater potential index con los pesos normalizados de cada capa

Donde:

Us: Insumo uso de suelo

Pr: Insumo Precipitación

Dd: Insumo densidad de drenaje

Pt: Insumo pendiente

NDVI: Insumo Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

3.10. Propuesta de protección de las zonas con potencial agua subterránea

Finalmente con los resultados arrojados mediante PJA y SIG, se complementó con una propuesta enfocada en la protección de las fuentes de agua subterránea en la parroquia Punin, en este sentido, se ha llevado a cabo la identificación y categorización de las zonas que presentan mayor vulnerabilidad ante posibles fenómenos de contaminación o degradación, ya sea por actividades antropogénicas como labores agrícolas, ganaderas o incluso industriales, es así que tomando en referencia lo planteado por el PDOT parroquial se hizo hincapié en las principales fuente, actores y consideraciones que se deberán llevar a cabo para la protección de estos ecosistemas y de las fuentes de agua subterráneas vitales para el desarrollo de la vida del sector.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Fundamentos conceptuales

Para dar cumplimiento al primer objetivo dentro de esta sección se sustentará los principales conceptos a tener en consideración para la interpretación de los resultados, los resultados obtenidos para cada uno de los insumos guardan una relación jerárquica que termina con la aplicación de la metodología PJA, para determinar las zonas potenciales con presencia de aguas subterráneas en la parroquia Punin, entre los conceptos claves tenemos:

4.1.1. *Morfología de la cuenca*

La morfología de una cuenca hidrográfica engloba la estructura física y la configuración geomorfológica de un sistema de drenaje de agua. Esto incluye los elementos que componen la topografía de la cuenca, como la forma de su lecho, la disposición de sus cursos fluviales y la distribución de sus afluentes y subcuencas. La morfología de una cuenca hidrográfica puede presentar una amplia diversidad, desde cuencas extensas y planas hasta cuencas estrechas y montañosas. Estas características geomorfológicas desempeñan un rol crucial en el movimiento y la distribución del agua en la cuenca, así como en la influencia de los procesos hidrológicos y los eventos climáticos en el flujo hídrico. En resumen, la morfología de una cuenca hidrográfica es un factor esencial que determina su funcionamiento y su interacción con el entorno (Padma et al., 2022, p. 59).

4.1.2. *Parámetros morfológicos*

- **Superficie de la cuenca (A):** La superficie de la cuenca se define como el espacio delimitado por los límites o bordes de la cuenca, generalmente trazados a partir de la línea de divisoria de aguas que se desea determinar. Junto con la superficie, también encontramos las curvas de nivel, que proporcionan el perfil topográfico de la cuenca. Estos perfiles son importantes para comprender si la cuenca tiende a experimentar fenómenos erosivos moderados o altos.
- **Red de drenaje:** Representa los ríos principales y secundarios que componen el sistema de drenaje de la cuenca. Una red de drenaje densa indica que la cuenca es joven o madura y que es más probable que ocurran eventos de escorrentía, a diferencia de una cuenca con una red de drenaje menos desarrollada.

- **Longitud del curso principal:** Es simplemente el cálculo de las distancias a lo largo del río o de la línea divisoria principal desde donde se origina o delimita la cuenca o subcuenca.
- **Índice de Horton:** Su cálculo nos permite describir la forma de la cuenca y cómo reacciona ante los eventos de precipitación.
- **Índice de compacidad:** Se determina en conjunto con el índice de Horton, ya que ayuda a confirmar el tipo de cuenca. Además, relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área igual a la de la cuenca.
- **Curva hipsométrica:** Nos permite evaluar el estado actual de la cuenca en relación con su edad, dividiéndola en cuencas con ríos jóvenes, maduros y antiguos. Además, el diagrama hipsométrico proporciona información sobre el porcentaje de área acumulada en función de las cotas o pendientes de la cuenca (Valencia y Rivera, 2021, p. 86).

4.1.3. Técnicas de teledetección

Se trata de una metodología que posibilita la adquisición de datos sobre objetos o superficies sin la necesidad de establecer un contacto directo, mediante el uso de sensores ubicados en plataformas espaciales. Estos sensores llevan a cabo un escaneo en tiempo real de la radiación emitida por los elementos presentes en el planeta, permitiendo así la obtención de información a distancia (Peña, 2010, p. 5).

4.1.3.1. Bandas satelitales empleadas para la combinación

Se refiere al rango del espectro electromagnético en el cual el sensor del satélite funciona. La energía emitida por los objetos en forma de radiación será captada por el sensor y luego convertida en datos digitales que se utilizarán para crear una imagen que represente visualmente la información. Esta imagen se utilizará posteriormente para su análisis y estudio utilizando software de procesamiento de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Ezquerro et al., 2017, p. 6).

4.1.4. Combinación de bandas NDVI

La combinación de bandas en el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es una técnica utilizada para evaluar la salud y la densidad de la vegetación. El NDVI se obtiene mediante la comparación de la reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) y la reflectancia en el rojo (RED) del espectro electromagnético. Al combinar estas dos bandas, se pueden identificar áreas con vegetación vigorosa y áreas con vegetación estresada o ausente.

En esta combinación de bandas, los valores del NDVI oscilan entre -1 y 1, donde los valores cercanos a 1 indican una vegetación densa y saludable, mientras que los valores cercanos a -1 señalan una falta de vegetación. Las áreas urbanas, cuerpos de agua y suelos desnudos suelen tener valores bajos de NDVI. La combinación de bandas NDVI permite obtener información precisa sobre la distribución espacial y la salud de la vegetación, lo que resulta invaluable para la monitorización de cultivos, la detección de cambios en el uso del suelo y la evaluación de la degradación ambiental. Además, esta técnica se puede aplicar en diferentes plataformas, como satélites o sensores aéreos, lo que facilita su utilización en estudios a gran escala (Castillo, 2014, p. 88).

4.1.5. *Proceso de jerarquía analítica PJA*

El ser humano siempre ha enfrentado la necesidad de tomar decisiones que aseguren el bienestar y la integridad, tanto a nivel individual como colectivo. Inicialmente, estas decisiones se limitaban a situaciones simples relacionadas con la obtención de recursos. Sin embargo, en la sociedad actual, la toma de decisiones se ha vuelto intrínsecamente compleja debido a la organización y la interacción humana.

La falta de disponibilidad y dominio de la información, así como la abstracción de las variables involucradas en un proceso determinado, han sido desafíos para la toma de decisiones. Como resultado, en 1980, Thomas Saaty desarrolló la metodología del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP, por sus siglas en inglés), como parte de las metodologías de Análisis Multicriterio. Aunque inicialmente fue diseñado para facilitar la toma de decisiones en el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, actualmente se aplica en la gestión empresarial, económica, ambiental e incluso en áreas de investigación (Franco y Ortega, 2021, p. 21).

El método AHP permite identificar las prioridades subyacentes a una situación problemática a través de la jerarquización de los criterios que la definen. En la práctica, implica realizar comparaciones pareadas entre los diferentes criterios. Según (Franco y Ortega, 2021, p. 21), el AHP ayuda a capturar los aspectos subjetivos y objetivos de una decisión, facilitando la verificación de la consistencia de las evaluaciones y reduciendo el sesgo en la gestión de procesos y toma de decisiones.

La metodología se basa en cuatro axiomas:

- **Axioma 1:** La condición de reciprocidad local entre pares de elementos de la matriz ($a_{ij} = 1/a_{ji}$)
- **Axioma 2:** Homogeneidad local para cada criterio (a_{ij}), para que mantengan coherencia al realizar las comparaciones pareadas
- **Axioma 3:** Establecer el principio de composición jerárquica al caracterizar la dependencia entre elementos

- **Axioma 4:** Para alcanzar el cumplimiento de las expectativas se debe asegurar que todos los criterios poseen una representatividad jerárquica

4.1.6. Estructuración de la jerarquía

La situación problemática debe ser desintegrada en un conjunto de ítems, o partes que se corresponderán con el objetivo general, sus factores, sus criterios, subcriterios y las posibles alternativas que pretenden dar solución al problema. Para luego, ser reorganizada siguiendo una categorización de jerarquía multinivel, que puede agruparse en tres niveles, donde el primero corresponde al objetivo, el segundo a los criterios y el tercero a las alternativas ya definidas (Maldonado, 2020, p. 15).

4.1.7. Construcción de la matriz de consistencia

El diseño de la matriz de consistencia requiere del establecimiento previo de un conjunto de juicios de expertos, en cuanto a los juicios, se los puede definir como una representación numérica, de la relación existente entre dos elementos que comparten algo en común (Collazo y Montaña, 2012, p. 22).

4.1.8. Verificación de consistencia

En esta etapa se busca identificar la consistencia y corregir las incoherencias que se pueden presentar las comparaciones pareadas, para este fin se hace uso del coeficiente Landa máximo (λ_{max}) que representa el valor máximo del valor propio (Díaz et al., 2019, p. 23-27).

4.1.9. Establecimiento de pesos relativos

Los pesos relativos se determinan utilizando una matriz de comparación N que se elabora a partir de la matriz de comparación. En la matriz de comparación, cada elemento se divide por la suma de su columna, mientras que los pesos relativos se calculan promediando cada fila. Antes de llegar a la clasificación final, es necesario sistematizar los resultados mediante la priorización de las posibles alternativas (Fernández y Rincón, 2020, p. 36).

4.1.10. GWPI

El Índice de Vulnerabilidad Global del Agua (GWPI, por sus siglas en inglés) es una herramienta utilizada para evaluar la vulnerabilidad de una región o cuenca hidrográfica en términos de disponibilidad y calidad del agua. El GWPI se calcula mediante la combinación de varios indicadores, como la escasez de agua, la variabilidad climática, la calidad del agua y la capacidad de gestión del agua.

Este índice proporciona una medida cuantitativa que permite comparar y clasificar diferentes regiones en función de su vulnerabilidad hídrica. Cuanto mayor sea el valor del GWPI, mayor será la vulnerabilidad de la región.

Los resultados del GWPI pueden utilizarse para identificar áreas prioritarias de intervención, desarrollar estrategias de gestión del agua y tomar decisiones informadas en la planificación de recursos hídricos.

El GWPI es una herramienta valiosa para los responsables de la toma de decisiones en la gestión del agua, ya que les brinda una visión integral de la vulnerabilidad de una región y les ayuda a establecer prioridades en la asignación de recursos y la implementación de medidas de adaptación al cambio climático. Además, el GWPI puede ser utilizado como una herramienta de seguimiento a largo plazo para evaluar los cambios en la vulnerabilidad del agua y guiar acciones para promover la sostenibilidad hídrica (Gómez et al., 2019, p. 20).

4.2. Características morfométricas del área de estudio

Tabla 4-1: Resultados morfometría de la zona de estudio

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS GENERALES		
Parámetro / unidades	Símbolo	Valor
Perímetro (km)	P	32,457
Área (km ²)	A	47,827
Longitud máxima o Longitud Axial(km)	LM	10,498
Longitud cauce Principal (km)	LCP	6,792
Ancho de la Cuenca (km)	AC	4,55
Desnivel Altitudinal (m)	DA	969,32
PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS ASOCIADOS A LA FORMA DE LA CUENCA		
Parámetro / unidades	Símbolo	Valor
Factor Forma	FF	0,43
Coefficiente de Compacidad	KC	1,31
Coefficiente de Circularidad	CC	0,57
PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS ASOCIADOS A LA FORMA DEL RELIEVE		
PARÁMETRO / UNIDADES	SÍMBOLO	Valor
Cota máxima (msnm)	cmax	3625,16

Cota mínima (msnm)	cmin	2655,84
Altitud media (msnm)	Am	3131,68
Altitud más frecuente (msnm)	Af	2785,1
Pendiente promedio de la Cuenca (%)	Smed	14%
Altitud mayor del Cauce	Amc	3500
Altitud menor del Cauce	Amec	2700
PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS ASOCIADOS A LA RED DE DRENAJES		
PARÁMETRO / UNIDADES	SÍMBOLO	Valor
Longitud total drenajes (km)	Lt	52,34
Densidad de Drenaje	D	1,09
Frecuencia de Drenajes	F	1,96
# Drenajes orden 1	N° D	36
Coefficiente de torrencialidad	Ct	0,73
Pendiente del Cauce (%)	PC	12%

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

Se evaluaron los parámetros morfológicos de la cuenca de la parroquia Punin, las características morfométricas se establecieron mediante la herramienta QGIS, dichos resultados muestran una visión general de las características topográficas y de la red hídrica de la cuenca en estudio es así que se puede resaltar que el área delimitada fue de 47,827 km², con un perímetro de 32,45 km, en tanto que la longitud axial que representa la distancia entre los puntos más lejanos entre la cuenca alcanzó los 6,79 km.

En cuanto a la forma de la cuenca, se calculó el factor forma de Horton, que indicó que la cuenca es ligeramente ensanchada, con un promedio de 0,43 que correlacionado con el coeficiente de Gravelius de 1,31 se verifica que estamos frente a una cuenca que va de oval redonda a oval oblonga. Se determinó los parámetros que describen la forma del relieve de la cuenca de estudio, se encontró que la altitud máxima de la cuenca es de 3625,16 msnm y la altitud mínima es de 2655,84 msnm consecuente con lo descrito en el PDOT de la parroquia Punin, dicha variable calculada muestra que el parte de aguas principal se origina en las zonas más elevadas de la cuenca, por su parte el promedio general de la pendiente para toda la cuenca alcanza un 14% sugiriendo que este valor puede favorecer los procesos de escorrentía.

En tanto que los parámetros asociados a la red de drenaje estos miden cuantos drenes posee la cuenca, y va ligado a los procesos de precipitación y escorrentía se determinó que la longitud total de la red de drenaje, incluyendo el cauce principal y los cauces secundarios, es de 72,34 km con una densidad de drenaje de toda la cuenca que resulta de la sumatoria de cada una de los flujos por los que se puede distribuir el agua de 1,51 correspondiente a una cuenca con buen drenaje, el conteo del orden de drenaje mostró que prevalece los ríos de orden 1 y 2 además, se obtuvo un coeficiente de torrencialidad de 0,73 representando que la cuenca posee un poder erosivo moderado.

Para concluir, es relevante destacar que los resultados obtenidos al calcular los parámetros morfológicos en esta sección posibilitan el análisis de la dinámica hidrológica de la cuenca, a pesar de que su superficie de la cuenca Punin no es muy amplia, esta si cuenta con una red hídrica significativa, lo que implica que hay una distribución del flujo de agua a lo largo de la cuenca apropiada más aún cuando esta está sujeta a los periodos de precipitación propios de los meses de invierno cuando mayor flujo de agua ingresa al sistema.

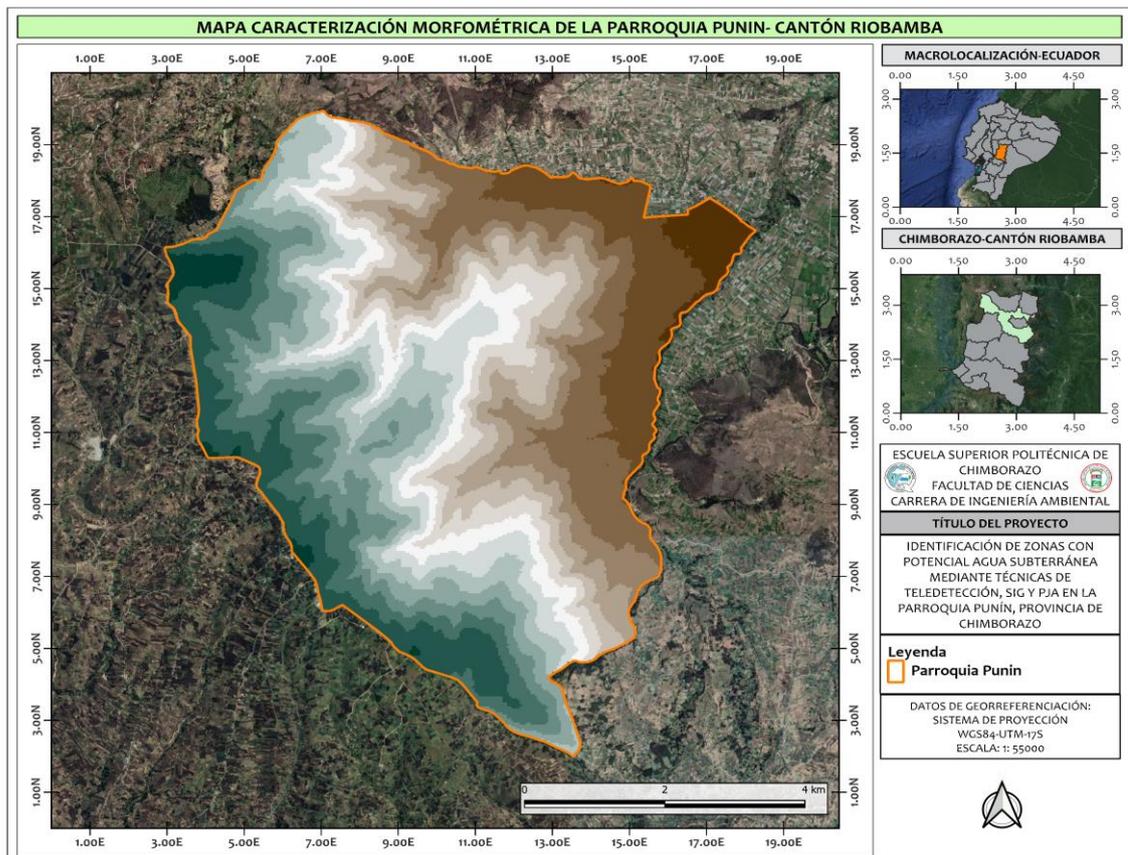


Ilustración 4-1: Mapa morfometría de la zona de estudio

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

4.2.1.1. Determinación de la curva hipsométrica

Los resultados del diagrama hipsométrico mostraron que el rango de cotas de altitud de la cuenca de estudio se ubicó como máxima los 3600 msnm y como mínima los 2600 msnm, la tendencia de la curva muestra que estamos frente a una cuenca en estado de equilibrio es decir que aun sus cauces principales no presentan erosiones muy marcadas y poseen una densidad de drenaje adecuada, es preciso mencionar que si bien la curva hipsométrica determina el estado actual de la cuenca, la mayoría de los fenómenos erosivos dependerán de otras variables como el tipo de suelo, los procesos de escorrentía e infiltración entre otros; sin embargo, se puede mencionar que al ser

una cuenca en equilibrio por lo general los procesos abrasivos o riesgo de erosión no son muy marcados ya que el flujo de agua recolectado en su mayoría llega a unirse al parte aguas principal. Con base a lo indicado por (Hernández y Manzo, 2022, p. 14), en su estudio “Hysometric curve in paleosurface mapping: quantitative approach” , menciona que el parámetro de la curva hipsométrica permite conocer la distribución de altitudes de la cuenca y cómo se relaciona con el área total de la misma, la dinámica de la cuenca estará en relación con el ciclo de agua y la topografía del terreno es una herramienta importante para entender la dinámica hidrológica de una cuenca, su edad y su estado de madurez, lo que puede tener implicaciones en la gestión y conservación de los recursos hídricos y ecosistémicos de la zona

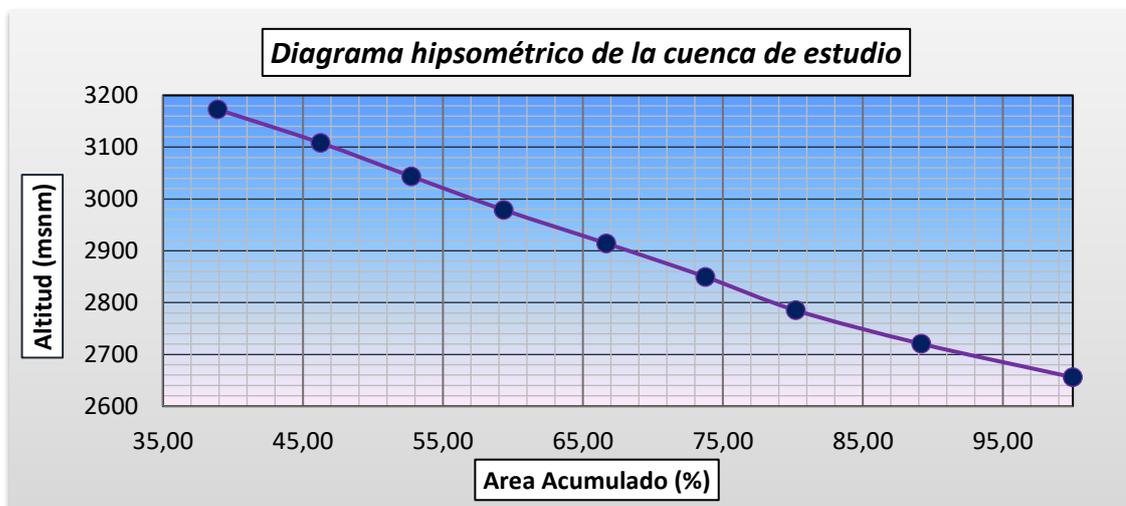


Ilustración 4-2: Curva hipsométrica de la cuenca de estudio

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

4.3. Frecuencia de áreas parciales

Los resultados de las frecuencias de áreas parciales en la cuenca de estudio mostraron que la mayor acumulación de área con un 8,96% del total, se encontró en los rangos altitudinales de los 2600 a 2700 msnm, con un 8,43% de la cuenca se ubicó la frecuencia de áreas parciales a los 2720 msnm, por otro lado, las áreas con menor acumulación se encontraron dentro de las cotas de 3600 msnm con un 1,44% y en la cota más baja con 2656 msnm se ubica un 2,40% del área parcial de acuerdo con (Díaz et al., 2019, p. 23), en su estudio “Morphometric characterization of the upper basin of the Sauce Grande River, Buenos Aires, Argentina”, se demostró que dependiendo del estado de edad de la cuenca había una mayor acumulación de área parcial, fomentados principalmente por la erosión ya que, arrastraban el material hasta las zonas más bajas de la cuenca.

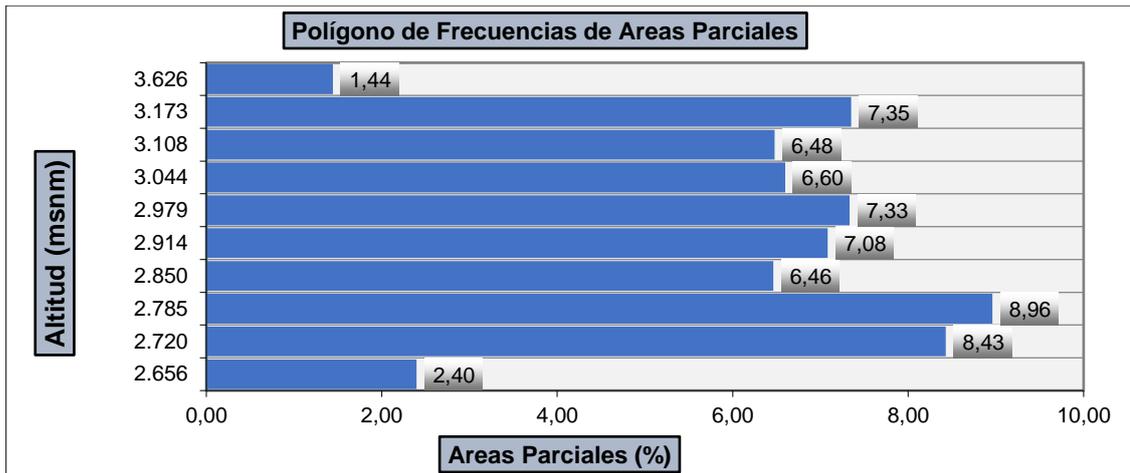


Ilustración 4-3: Polígono de frecuencia de áreas parciales

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

4.3.1. Resultados insumo índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

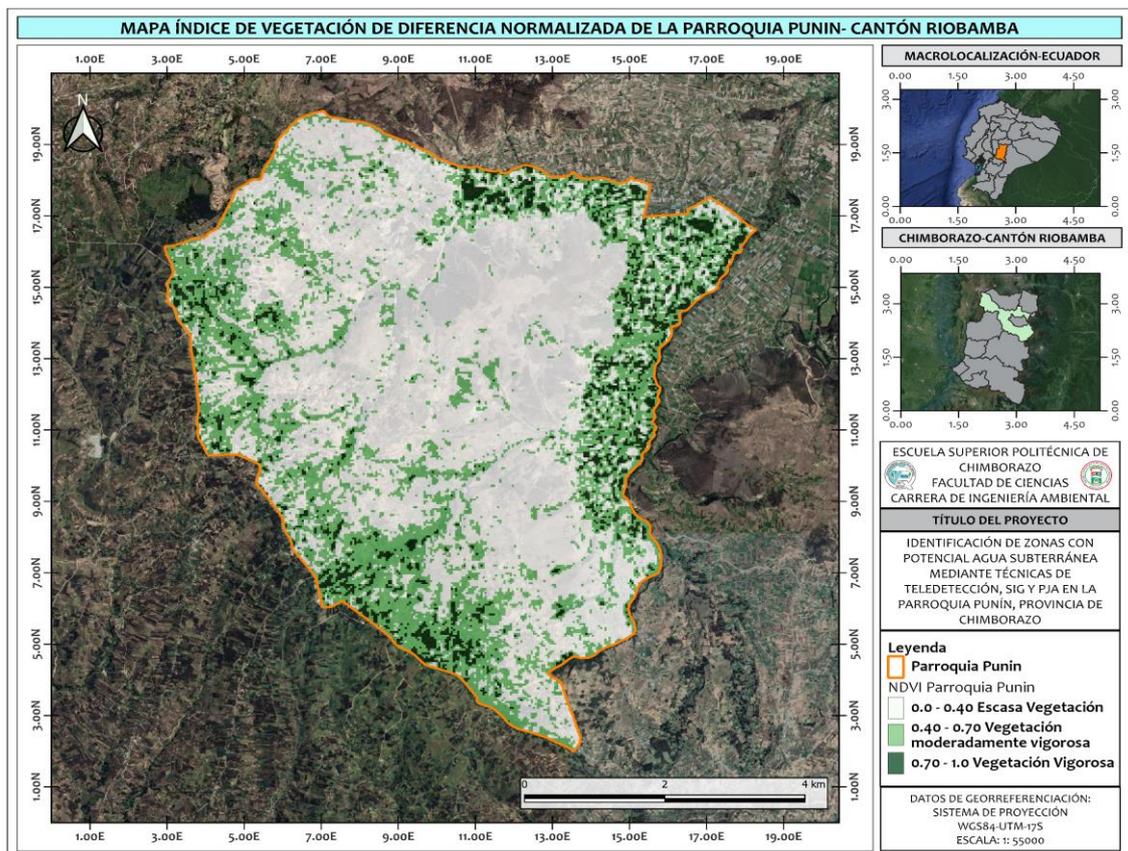


Ilustración 4-4: Mapa ráster reclasificado NDVI

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023.

Los resultados del parámetro índice de vegetación de diferencia normalizada, se refleja en la figura 2-4, se clasificó en un rango de color para cada una de las 3 categorías diferentes (Alto, Medio, Bajo), representada por un color distinto para cada grupo, recordando que el NDVI cerca de +1 representa zonas con vegetación sana mientras que valores cercanos a -1 zonas con carencia de vegetación o zonas con vegetación enferma, en tal sentido para la parroquia Punin se obtuvo que las zonas con escasa vegetación correspondieron a píxeles cuyo rango oscila entre 0,0 y 0,40 determinadas con un color blanco, en tanto que las zonas con vegetación moderadamente vigorosa, cuyos rangos oscilaron entre 0,40 y 0,70, se representaron con un color verde brillante, finalmente las zonas con vegetación más sanas decir con un valor de pixel mayor a 0,70 se representaron con un color verde oscuro.

La evaluación global del índice NDVI, que se muestra en el mapa correspondiente, indica que la mayor parte de la zona de la parroquia Punin concentra su vegetación principalmente en la parte central de la cuenca, esto concuerda con la observación visual de la zona, en la que se aprecia una superficie cubierta por zonas rocosas, suelo erosionado o parcelas sin una vegetación saludable. Respecto a la vegetación moderadamente vigorosa, se puede observar que se encuentra en las zonas periféricas o de límites de la cuenca de estudio, mientras que las zonas con vegetación vigorosa, se ubica en pequeñas áreas específicas ubicadas también en las partes limítrofes de la parroquia en estudio. Estos hallazgos sugieren que, aunque la cuenca tiene un buen drenaje, el agua de la precipitación no se infiltra adecuadamente, excepto en ciertas áreas donde el suelo favorece la infiltración y posible almacenamiento de agua subterránea.

En base a lo indicado por (Rosales, 2017, p. 23) *Analysis of the spatio-temporal evolution of the NDVI on vegetated areas and areas at risk of erosion in the Central Pyrenees*” menciona que los valores de NDVI mayores a 0,7 indican una relación entre la presencia de flujo de agua nivel freático y la calidad de vegetación de la zona sana, es decir que el aumento de la población vegetativa está influenciado porque esta obtiene tanto los recursos hídricos y minerales de manera permanente, se menciona incluso que en las zonas donde existen una fuerte presencia de aguas generalmente subterráneas con altas cargas minerales, el nivel clorofílico de las especies vegetales es elevado, lo que se refleja en la detección por parte de los satélites donde se aprecia índices de NDVI +1 con una tendencia marcada, es decir este parámetro si guarda relación con la presencia de recarga hídrica de la zona y la calidad vegetativa.

4.3.2. Resultados insumo precipitación media anual parroquia Punin

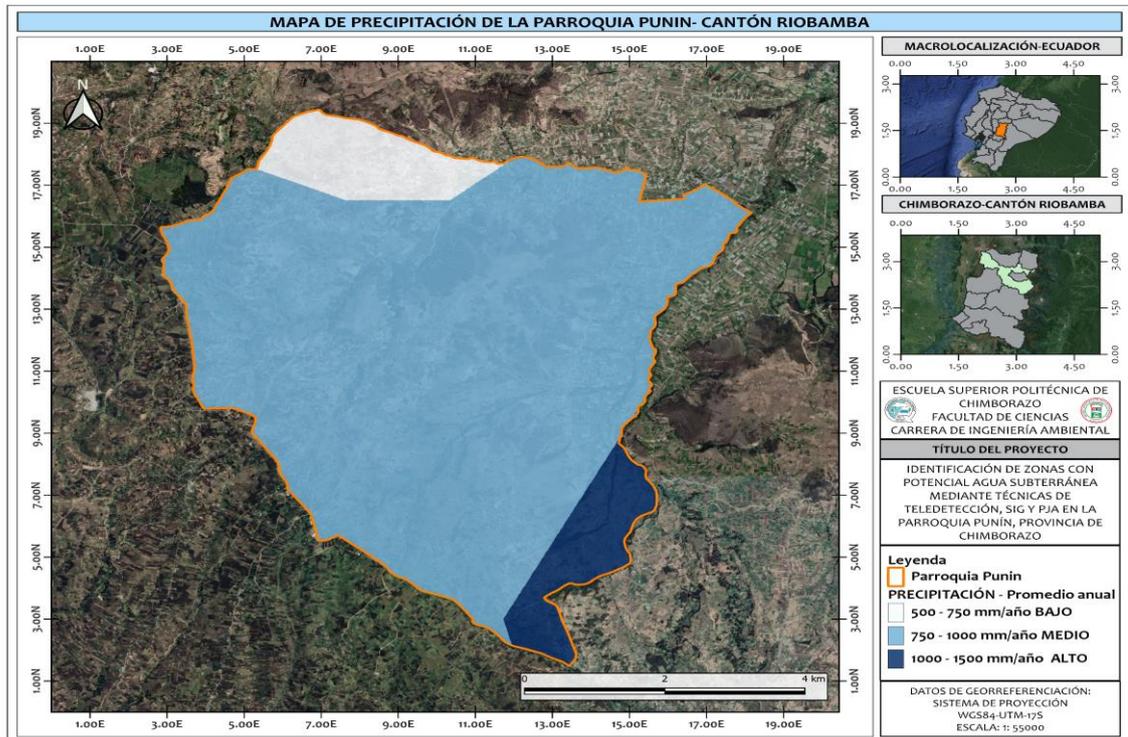


Ilustración 4-5: Mapa ráster precipitación

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023.

Se presenta en la figura 3-4 los resultados generados para precipitación de la cuenca de estudio, estos se dividieron en tres categorías en función a la capacidad de ingreso de agua al sistema (Alto, Medio, Bajo) como unidad de medida en mm/ de lluvia por año, en tal virtud se obtuvo que las que recibieron entre 500 y 750 mm/año de lluvia correspondieron a la franja en color blanco dentro del mapa, en tanto que en color celeste y ocupando la mayor superficie de la cuenca se obtuvo aquellas zonas con rangos de precipitación de entre 750 y 1000 mm/año, para finalizar las zonas consideradas de alta precipitación, con promedios mayores a 1000-1500 mm/año, se representa con una franja en color azul que claramente es una pequeña área de toda la cuenca. En base a lo descrito por (Orozco et al., 2011, p. 24), “Study of monthly precipitation trends in the upper-middle basin of the Cauca River, Colombia”, se indica que parte fundamental para la determinación de acuíferos resulta del porcentaje de precipitación anual a la cual está sujeta la cuenca y al tipo de suelo que esta posea, ya que de este dependerá la velocidad de recarga hídrica de estos sistemas, de ahí que se indica que el este parámetro quizás sea el más importante pues, en definitiva es el parámetro que aporta con mayor volumen de agua a estas formaciones geológicas, si bien dentro de nuestro estudio se obtuvo unos regímenes de precipitación adecuados se deberá en este caso corroborar con estudios más preciosos del tipo de suelo y los fenómenos de infiltración.

4.3.3. Resultados insumo uso y tipo de suelo de la parroquia Punin

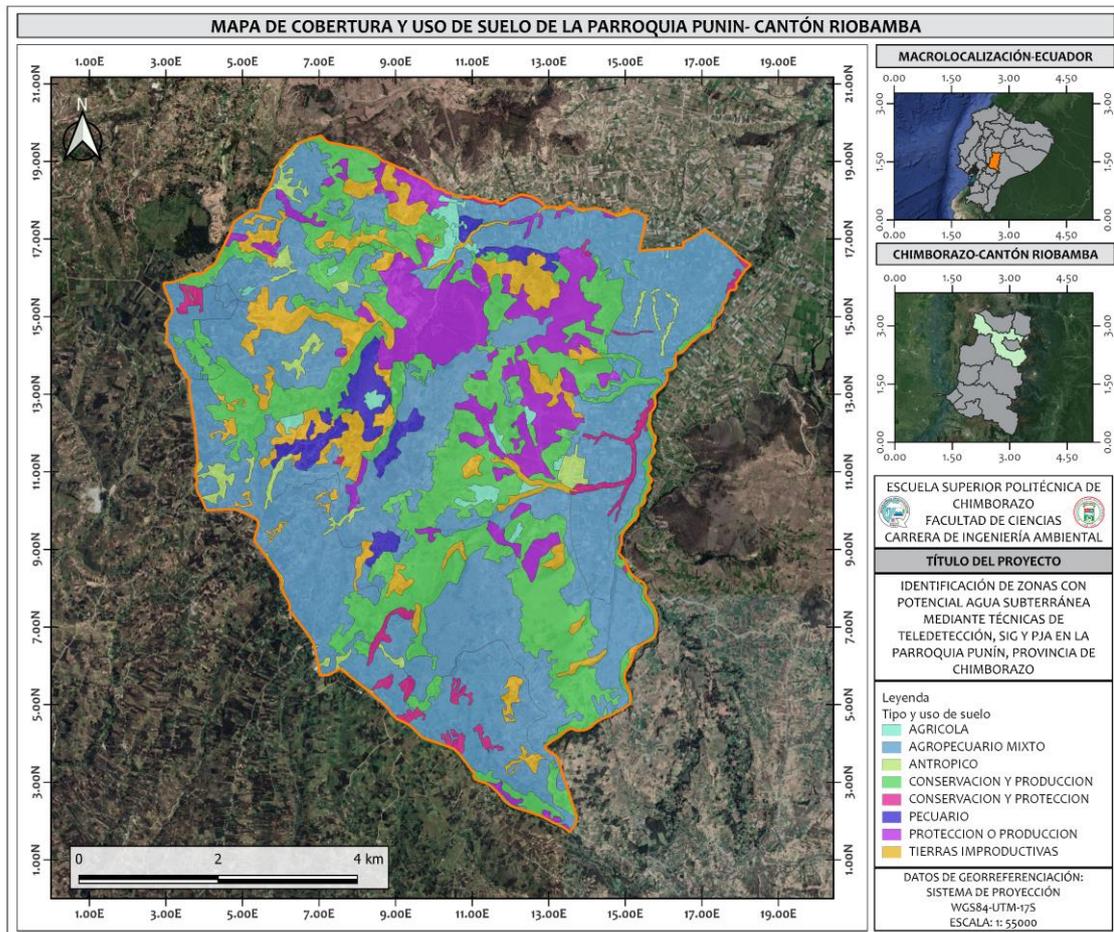


Ilustración 4-6: Mapa ráster uso y tipo de suelo

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023.

Se identificaron 8 clases que abarcan toda la superficie de la cuenca. De acuerdo con el análisis, la cobertura de tierra agrícola cubre 0,665 km², seguida por el mosaico agropecuario mixto con 23,302 km², y la zona antrópica con una superficie de 0,994 km². Para las zonas de conservación y producción se obtuvo un área de 11,618 km², mientras que para la conservación y protección se obtuvieron áreas de 0,877 km² y 1,353 km², respectivamente. La superficie correspondiente a tierras improductivas alcanzó un área de 4,100 km², (Alcivar y Gil, 2021, p. 14) en su investigación “Agua subterránea, deterioro de calidad y reserva” el tipo de uso y cobertura del suelo puede ser importante para determinar las zonas con presencia potencial de aguas subterráneas, ya que se podría considerar que las áreas con mayor capacidad agrícola están cercanas a fuentes de agua, sin embargo, hay que tomar en cuenta que estos insumos y juicios de valor estarán sujetos a la metodología de análisis multicriterio y la aplicación del JAP.

4.3.4. Resultados insumo pendientes de la parroquia Punin

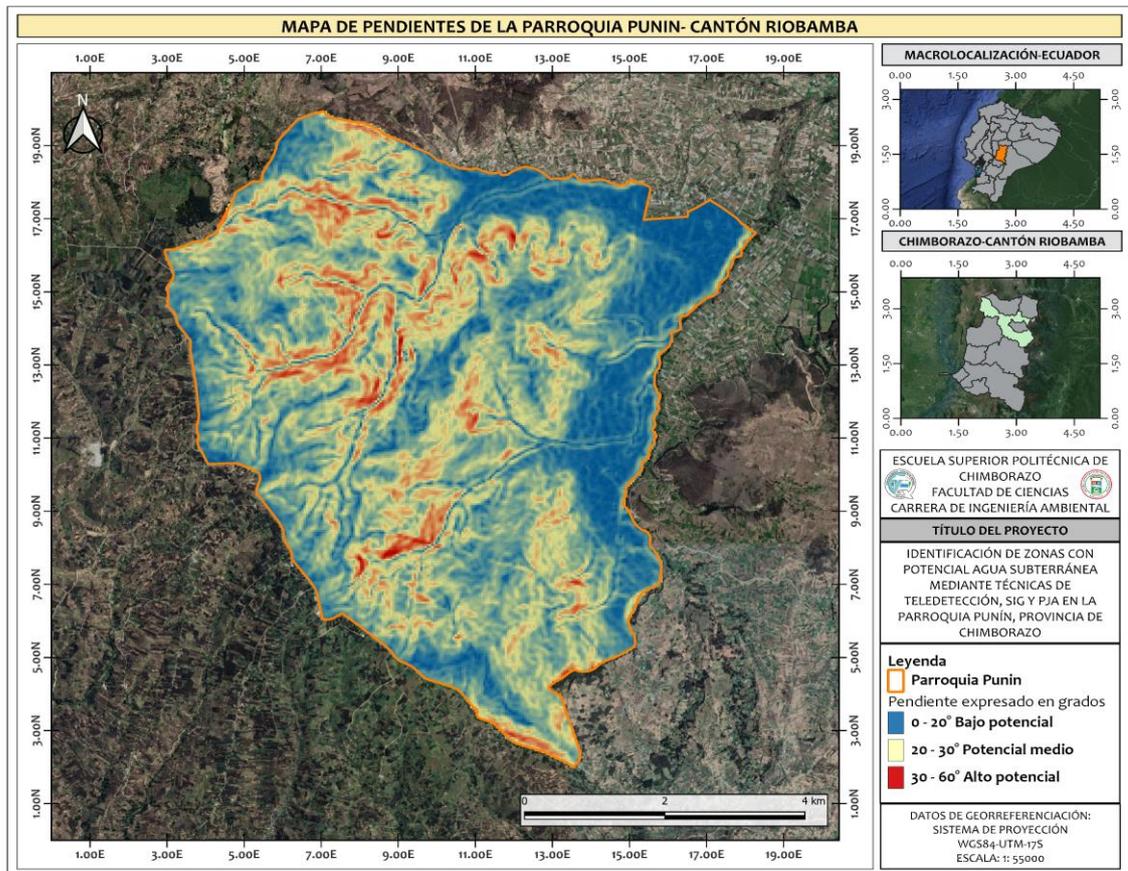


Ilustración 4-7: Mapa ráster de pendientes

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023.

Concerniente al factor pendiente se dividieron en 3 categorías, las áreas de la cuenca que presentaron rango de pendiente en grados de 0 a 20° se consideraron como zonas de bajo potencial de infiltración de agua hacia las capas interiores del suelo, representados en un color azul en el mapa correspondiente, seguidamente se obtuvo los rangos de pendiente comprendidos entre 21 a 35° los cuales se consideraron como zonas con un potencial medio de favorecer los procesos de infiltración y recarga de aguas subterráneas y comprende las zonas en color amarillo, finalmente las áreas con pendiente de 36 a 50° se consideraron como las más óptimas para la recarga hídrica indicadas con una codificación de color en rojo.

Comparando con el estudio realizado por (Castillo, 2016, p. 19) "Identificación y caracterización de las zonas de recarga hídrica mediante herramientas SIG de los acuíferos la carbonería, Guarazapas, Yuyucocha y Santa Clara para la protección de las fuentes de aprovisionamiento de agua en la zona urbana de Ibarra".

Se indica que el parámetro pendiente dentro de los fenómenos de recarga hídrica se considera esencial para determinar la presencia o ausencia de aguas subterráneas debido a que la pendiente está estrechamente relacionada con las recargas hídricas y el coeficiente de infiltración del suelo indica que las pendientes favorables para una correcta recarga hídrica podrían ir desde los 30 a 50 ° de pendiente.

4.3.5. Resultados insumo densidad de drenaje de la parroquia Punin

Los resultados referentes a la densidad de drenaje se ubicaron en 3 rangos en función al grado de drenaje dentro del área perteneciente a la parroquia Punin, la representación visual en la figura 6-4 muestra que está dividida en una simbología con tres colores cada uno con un valor en particular es así que las zonas consideradas como de pobre o insuficiente drenaje correspondieron aquellas que presentaron rangos comprendidos entre de 0,5 a 1,5 km/km² visualmente presentados en las zonas de color azul, por su parte las franjas en color amarillo corresponden a rangos de 1,51 a 2,5 km/km² los cuales son zonas con una moderada densidad de drenaje, finalmente representada en color rojo son aquellas zonas que concentran una alta deidad de drenaje con rangos comprendidos entre de 2,51 a 3,5 km/km², lo que suponen que son las áreas con mejor condición para la infiltración de agua y recarga de estos depósitos naturales.

Contrastando con los resultados obtenido por (Cross et al., 2020), en su estudio “La densidad de drenaje del Valle de la Paz el Carrizal, Baja California Sur y su relación con la recarga de los sistemas acuíferos”, se indica que dentro de su cuenca de estudio la densidad de drenaje conforma los puentes por donde el agua recorre producto de la precipitación, a una mayor densidad de drenaje mayores ingresos de agua al sistema se encontrará, esta probabilidad depende de la zonas si estas no poseen un terreno impermeable y que la capacidad de los horizontes del terreno sea porosa, se indica que una agrupación mayor a los 3,4 km² de densidad de drenaje para cuencas pequeñas suele llegar a ser indicativo de que existe un equilibrio de los procesos de balance y recarga hídrica.

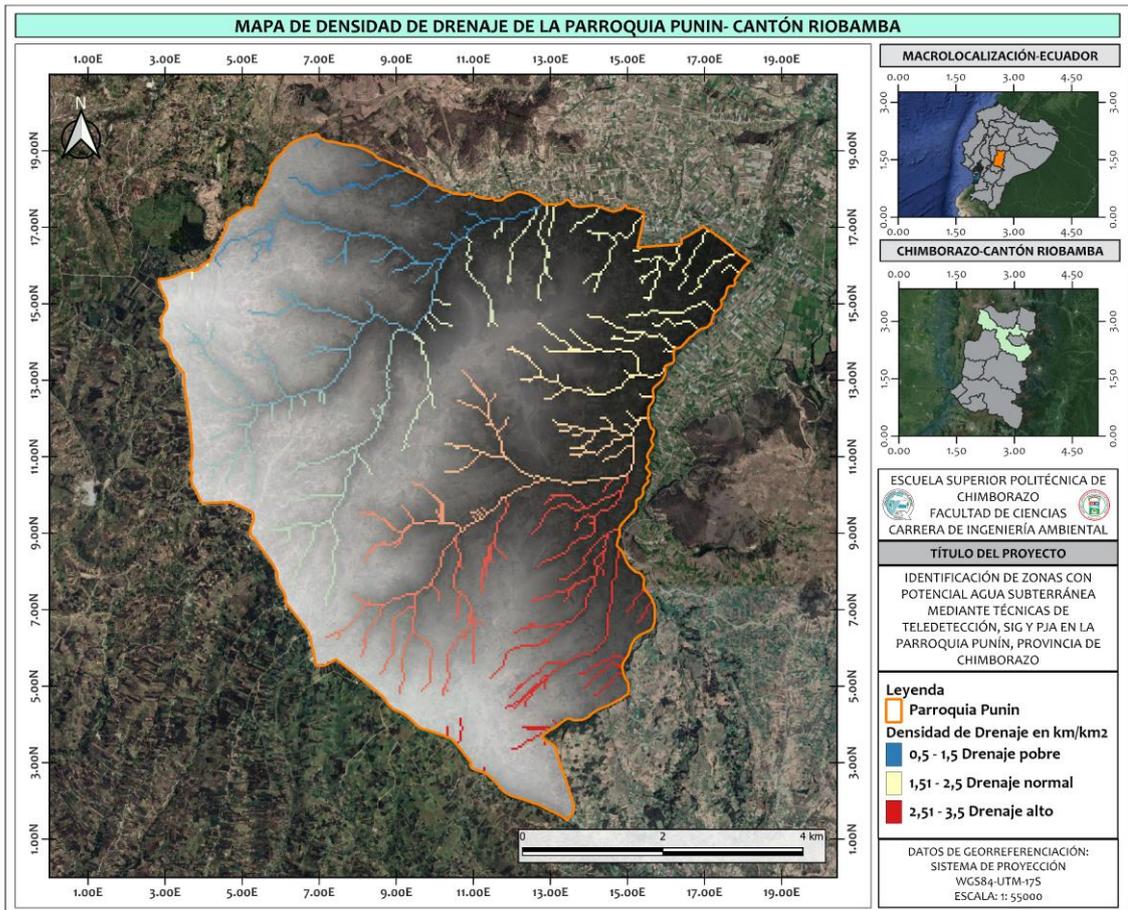


Ilustración 4-8: Mapa ráster densidad de drenaje

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023.

4.4. Resultados de la metodología PJA para la estimación de áreas potenciales de albergue de aguas subterráneas

Se procedió con la jerarquización de los datos para estructural la matriz de decisiones, la cual ajustará a los pesos asignados bajo los criterios considerados en esta investigación, es así que se escalará la valorización de los pesos en función al nivel de importancia de los 5 parámetros evaluados a la hora de determinar la presencia o ausencia de aguas subterráneas.

Tabla 4-2: Codificación insumos manejados dentro del estudio

Descripción	Código
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	NDVI
Precipitación	Prc
Densidad de drenaje	DD
Pendientes	Pen
Uso y cobertura del suelo	Ucs

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

4.4.1. Asignación de los pesos normalizados para cada capa temática

Tabla 4-3: Matriz de asignación de pesos equivalentes según la metodología PJA

INSUMO	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	Precipitación	Densidad de drenaje	Pendientes	Uso y cobertura del suelo
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	1	2	5	6	8
Precipitación	1/2	1	3	3	5
Densidad de drenaje	1/5	1/3	1	4	6
Pendientes	1/6	1/3	1/4	1	3
Uso y cobertura del suelo	1/8	1/5	1/3	1/6	1
SUMATORIA	1,99	3,87	9,42	14,33	23,00

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

Según la metodología PJA utilizada en este estudio, se asignaron los pesos equivalentes a cada uno de los insumos considerados como factores principales para evaluar las zonas con posible presencia de aguas subterráneas en la parroquia Punin del Cantón Riobamba, dichos parámetros fueron en escala jerárquica la precipitación, la densidad de drenaje, el NDVI y la pendiente si bien todos estos parámetros son importantes para definir las zonas con tendencia positiva a generar ciclos de recarga hídrica, el grado de participación que estas tienen se asignó bajo la revisión bibliográfica y juicio propio de valor, por último el parámetro de uso y tipo de suelo se consideró el factor menos influyente dentro de este proceso ya que, no participa de manera muy clara con su información dentro de esta evaluación.

4.4.2. Validación de la matriz PJA

Tabla 4-4: Matriz de validación de los datos según PJA

INSUMO	NDVI	Prc	DD	Pen	Ucs	W
NDVI	1/1,99=0,502	2/3,87=0,517	5/9,42=0,531	6/14,33=0,419	8/23,00=0,348	(0,502+0,517+0,531+0,419+0,348)/5=0,463
Prc	0,251	0,259	0,319	0,209	0,217	0,251

DD	0,100	0,086	0,106	0,279	0,261	0,167
Pen	0,084	0,086	0,027	0,070	0,130	0,079
Ucs	0,063	0,052	0,018	0,023	0,043	0,040

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

La matriz de validación PJA para cada uno de los 5 parámetros esenciales en la detección de aguas subterráneas, mostraron que el NDVI tuvo una ponderación equivalente de 0,463, mientras que la precipitación y la densidad de drenaje obtuvieron valores de 0,251 y 0,167 respectivamente, en cuanto a la variable de pendiente, su valor fue de 0,079, mientras que para el uso y tipo de suelo fue de 0,40.

4.4.3. Identificación de las zonas con potencial agua subterránea

Posterior al análisis PJA, mediante la herramienta SIG se procedió a multiplicar las cinco capas que corresponden a los insumos evaluados y se los dotó con los pesos desarrollados en la matriz de criterio de valor, es así que se generó un único resultado en formato ráster con una clasificación de pixel en tres rangos divididos en: rango bajo en probabilidades de encontrar aguas subterráneas, rango medio en encontrar aguas subterráneas y un rango alto de probabilidades de encontrar aguas subterráneas, estos rangos se asignaron con un código de color azul, amarillo y rojo respectivamente.

Los resultados del mapa GWPI mostraron que la cuenca de estudio perteneciente a la parroquia Punin en su parte central concentra píxeles en color azul que refieren a zonas con baja probabilidad de encontrar aguas subterráneas, corroborando por imágenes satelitales se puede observar que dichas zonas si bien poseen parcelas de cultivos se observa una marcada deficiencia en cuanto a calidad vegetativa por lo que puede ser un indicio de la carencia de este recurso, en mayor proporción tenemos a las zonas con una moderada probabilidad de encontrar aguas subterráneas representadas en color amarillo dentro del área de influencia, dichas zonas poseen vegetación herbácea propia del sector y que probablemente tengan fuentes de agua aprovechable para la permanencia de estas especies vegetales, finalmente las zonas marcadas en color rojo son aquellas que cumplen con los criterios más aptos para albergar fuentes de agua subterránea que si bien son áreas pequeñas estas se ubican en las zonas limítrofes de la cuenca.

Con base a lo dispuesto por (Maldonado, 2020, p. 56-69), en su trabajo “Evaluación de la probabilidad de ocurrencia de agua subterránea en la microcuenca Zaruma Urcu”, se indica que las zonas aptas para la recarga acuífera será aquellas donde exista una conexión entre el tipo de terreno y el grado de saturación del mismo, ya que ocurrido los fenómenos de precipitación una parte de esta agua será aprovechada por la vegetación pero a medida que esta agua profundiza es retenida en el suelo empezando a saturarse y drenar libremente por efecto de la gravedad

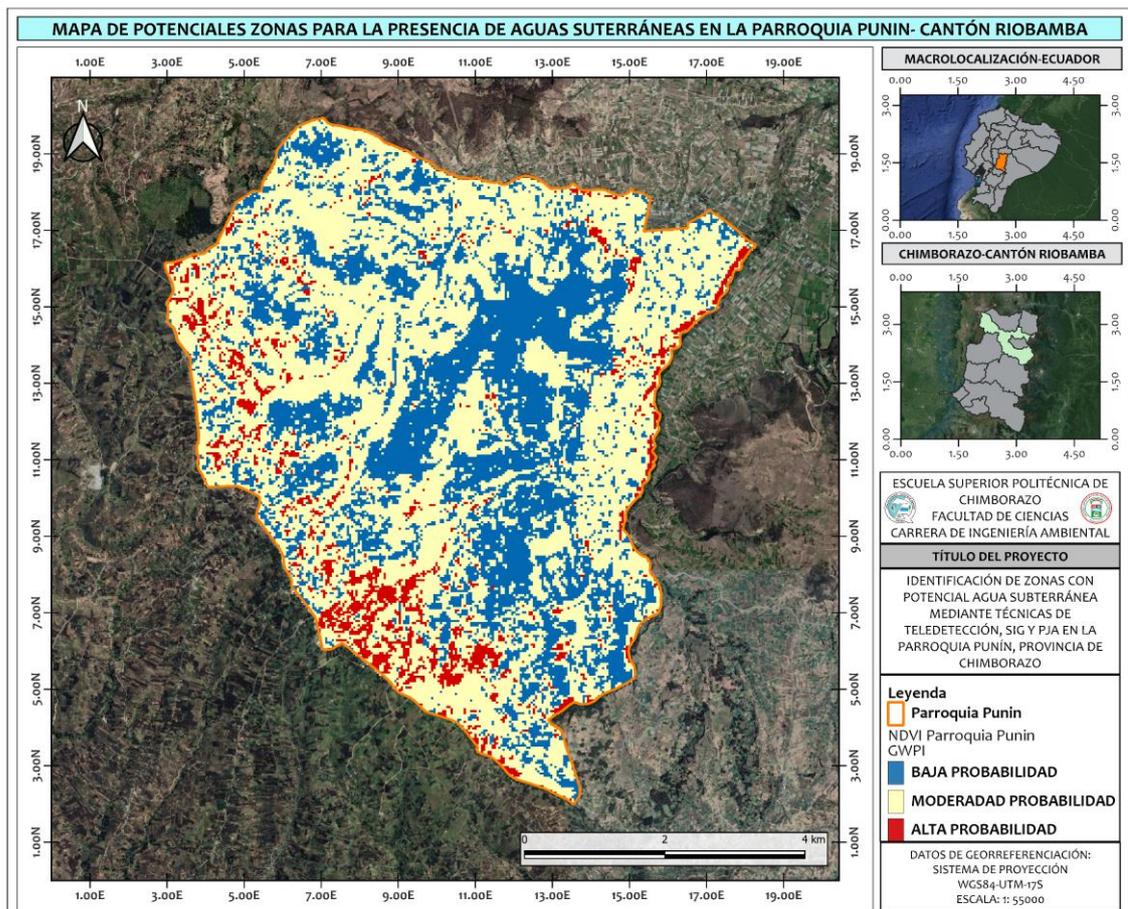


Ilustración 4-9: Mapa de las zonas potenciales para la presencia de aguas subterráneas

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023.

CAPÍTULO V

5. MARCO PROPOSITIVO

4.5. Propuesta de protección de zonas con potencial agua subterránea

4.5.1.1. Antecedentes

Es de conocimiento general que el recurso más importante para el desarrollo de la vida es el agua, este participa desde las reacciones moleculares, que en conjunto hacen parte del desarrollo de los ecosistemas, en el caso del ser humano el agua constituye alrededor del 60% del cuerpo humano, si bien conocemos la importancia de este recurso es cada vez más marcada la tendencia de un mal manejo del agua dulce que está sosteniendo un futuro problema que puede poner en jaque con el desarrollo de la civilización como la conocemos.

Si bien se puede obtener agua de diversas fuentes, las provenientes de aguas subterráneas han sido por excelencia los puntos clave donde se ha desarrollado los asentamientos humanos y población en general, donde exista un suministro constante de agua se garantizará que la zona sea apta para labores agrícolas, ganaderas y demás que eleven la calidad de vida de las personas, sin embargo como sociedad no comprendemos que son recursos limitados y que requieren de cuidados para que estas fuentes no se agoten, situaciones que se están dejando de lado ocasionado que cada vez sea más difícil encontrar zonas de aprovechamiento de agua subterránea, dado el incremento poblacional la escasez de este recurso ha planteado ya estrategias que se deben aplicar desde ya para la conservación de estos ecosistemas.

En el Ecuador la mayor parte de esta agua es aprovechada para consumo humano y agricultora, aun así según datos del MAE se espera que el declive de este recurso se empiece a notar con mayor fuerza dentro de los próximos 10 años, por lo que hay que tomar medidas que eviten la extracción desproporcionada de agua frente al tiempo de recarga natural del acuífero, así mismo los fenómenos de contaminación provocados por las actividades humanas, industria, uso de fertilizantes entre otros hace que se incluya dentro de esta agua estos contaminantes ocasionando que se convierta en un agua insalubre y no aprovechable, finalmente se hace hincapié de la protección de estos recursos que el Ecuador posee, es necesario comprender la dinámica hidrológica para cada una de las cuencas del país y con esto aplicar las medidas necesarias que mitiguen futuros problemas que pongan en jaque a la colectividad, el manejo adecuado de las cuencas hídricas hoy brindará el agua suficiente para las generaciones del mañana.

4.5.1.2. *Generalidades*

En América Latina la abundancia de recursos naturales a fomentando un falso sueño de que estos serán permanentes, durante las últimas décadas se ha visto una notable disminución del agua dulce disponible para consumo humano lo que ha puesto en alerta de los peligros para las generaciones venideras que traería la escasez de este recurso vital, desde la perspectiva de las cuencas hidrográficas se ha podido determinar que en su gran mayoría no son manejadas adecuadamente y se realiza una sobreexplotación de estos acuíferos si dejar un periodo acorde para su llenado, esto, sumado a la contaminación y deforestación persistente ha provocado que el suministro de agua subterránea escasee y en ciertos casos se sequen , según la FAO las medidas de conservación de las cuencas son primordiales para salvaguardar los ecosistemas y este propone 2 puntos relevantes primero el estudio profundo de la cuenca por parte del sector investigativo y como segundo punto la puesta en marcha de las acciones correctivas por parte de las autoridades y de la población (Guananga et al., 2022, p. 34).

4.5.2. *Consejos técnicos y prácticos para mejorar la recarga hídrica*

Se considera que los procesos de recarga hídrica son parte natural del balance ecosistémico y del ciclo de agua, y este mismo balance da paso a la variabilidad de ecosistemas que actualmente conocemos, el considerarlo como un sistema abierto este constara de entradas y salidas repartidas desde la precipitación hasta la infiltración del agua a través del suelo y su almacenamiento en acuíferos o bien escurriendo hacia ríos o tributarios similares, en cuanto a la recarga hídrica esta dependerá de varios factores sin embargo, se resaltan la porosidad del suelo, el relieve del terreno el promedio anual de lluvia así como el grado de aprovechamiento de este recurso por parte del ser humano (Orozco et al., 2011, p. 12).

4.5.3. *Factores que afectan la recarga hídrica*

- **El clima:** Factor relevante dentro de los procesos de recarga y balance hídrico, este se asocia directamente con la cantidad en volumen y frecuencia de lluvias y procesos de evapotranspiración.
- **El suelo:** El suelo actúa como la primera barrera durante la infiltración del agua se sabe que en los suelos impermeables y compactos existe una menor probabilidad de infiltración de la lluvia, por otro lado, en suelos porosos el agua puede escurrir de manera más rápida facilitando los procesos de recarga hídrica de los acuíferos.

- **La topografía:** La pendiente del terreno influye en el tiempo de contacto entre el agua y la superficie, de modo que una pendiente pronunciada puede aumentar la escorrentía superficial, disminuir el tiempo de contacto y reducir la infiltración del agua.
- **Los estratos geológicos:** Corresponden a los estratos geológicos conformados por diferentes materiales en ciertas zonas puede afectar negativamente la infiltración del agua, impidiendo su llegada a las zonas saturadas.
- **La cobertura vegetal:** Se indica que, a una mayor cantidad de vegetación, se reduce la cantidad de agua que se escurre superficialmente y se aumenta el tiempo que la lluvia permanece en contacto con el suelo, facilitando su infiltración, por el contrario, en zonas con poca cobertura vegetal, la lluvia tiende a escurrirse rápidamente hasta un tributario o drenaje secundario.

4.5.4. Acciones colectivas para la protección de zonas de recarga de agua

Tabla 5-1: Acciones correctivas para las zonas de recarga hídrica

Actividad de protección	Descripción
Planificación e identificación de las áreas de trabajo	Se requiere un conocimiento general del tipo del terreno, relieve delimitación por medio de un mapa de las zonas potenciales de recarga hídrica.
Implementación de técnicas de mejoramiento de infiltración de agua	Adecuar la zona de estudio mediante zanjas de infiltración y terrazas para mejorar el paso eficiente de nutrientes y el agua a través del suelo.
Aumentar el porcentaje de cobertura vegetal	Mejorar los procesos de reforestación de especies vegetales dentro de la cuenca de estudio, proceso que generará un beneficio no solo ecosistémico, sino que también influirá en los procesos de recargas hídricas favoreciendo la infiltración del agua proveniente de la precipitación.
Mejoramiento de los sistemas agroforestales	Instauración de cercas vivas, mejoramiento de los procesos agrícolas y de consumo adecuado de agua, así como la explotación moderada de los acuíferos presentes en la zona.
Instauración de políticas, normas o comportamientos respaldadas por leyes nacionales para el cuidado del recurso hídrico	Mejoramiento de las políticas ambientales que busquen prevenir los fenómenos de contaminación de las aguas subterráneas, así como los diversos procesos de recuperación ecosistémica así mismo de las sanciones respectivas para las personas que abusen o generen un daño ambiental.

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

4.6. Plan de acción para la gestión sostenible de las aguas subterráneas presentes en la parroquia Punin

Se han identificado ciertas zonas puntuales dentro de la parroquia, las cuales probablemente pueden ser focos de almacenamiento de aguas subterráneas, por lo cual buscar un uso sostenible o gestión adecuada tiene como objetivo garantizar el acceso a este recurso para la población circundante que tanto depende del agua para desarrollar sus actividades agrícolas, ganaderas y sociales.

4.6.1. Monitoreo y control de la contaminación

Tabla 5-2: Monitoreos para el control de la contaminación

Fundamento	Mecanismos	Responsables/Beneficiarios
Las características del agua subterránea indican que esta es rica en minerales, por naturaleza presenta niveles bajos de contaminación. Sin embargo, el mal uso, y desperdicio de este recurso ha dado lugar a la aparición de problemas de contaminación en estas fuentes de agua.	Monitoreos de la calidad de agua de forma regular con los parámetros a evaluar con base a la normativa ambiental vigente.	Gobierno Provincial de Chimborazo Gobierno parroquial de Punin
Contaminación de aguas subterráneas por presencia de plaguicidas y fertilizantes, o aguas residuales no tratadas.	Campañas de disminución del uso de fertilizantes químicos, mejorar los procesos agrícolas mediante la implementación de procesos de tecnificación.	Sector agrícola y ganadero de la parroquia Punin. Comunidades rurales de la parroquia Punin.

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

4.6.2. Consumo eficiente y responsable del recurso hídrico

Tabla 5-3: Consumo responsable de los recursos hídricos

Fundamento	Mecanismos	Responsables/Beneficiarios
En la actualidad, la explotación de agua subterránea ha sido crucial para mantener la economía de numerosas familias que habitan en la parroquia Punin. De acuerdo con el plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la parroquia Punin,	Monitoreos frecuentes del estado actual del nivel de aguas subterráneas con las que cuenta la zona de estudio.	Gobierno Provincial de Chimborazo Gobierno parroquial de Punin

<p>aproximadamente el 71,4% de la población depende de la agricultura y la ganadería como fuentes principales de ingresos, lo cual está estrechamente vinculado con el acceso al recurso hídrico en la región. Sin embargo, esta explotación ha resultado en una disminución constante de los acuíferos y zonas de almacenamiento de agua subterránea, principalmente debido a las actividades que generan procesos de contaminación.</p>		
<p>La agricultura no tecnificada es una práctica común en la actualidad, la cual implica una alta demanda de recursos hídricos y una mayor probabilidad de degradación del suelo. Esto se debe al uso excesivo de contaminantes durante los procesos de riego o precipitación, lo que a su vez provoca la contaminación de los sistemas hídricos debido al arrastre de estos compuestos.</p>	<p>Implementación de sistemas de riego parcelario con tecnología avanzada. Optimización de las prácticas agrícolas en todas sus etapas. Uso responsable y sostenible de los recursos hídricos.</p>	<p>Moradores de la parroquia Punin que realizan este tipo de actividad como fuente principal de activos económicos.</p>
<p>Consumo humano: Se refiere al agua utilizada por los seres humanos para satisfacer sus necesidades diarias, incluyendo la alimentación, la higiene personal, las actividades recreativas, entre otras. La calidad de este recurso puede verse afectada por la presencia de aguas residuales o aguas negras.</p>	<p>Utilización de dispositivos de bajo consumo de agua en los grifos. Promover la educación y conciencia en cuanto al uso responsable del agua dulce disponible. Desarrollar políticas de protección y conservación de los recursos hídricos necesarios para la supervivencia y el progreso de la vida.</p>	<p>Moradores de la parroquia Punin</p>
<p>Industrial: se refiere al agua de consumo empleada en la generación de energía y en la producción de materiales o productos. Este tipo de contaminación es especialmente peligroso y tóxico en función del tipo de industria y puede provocar desde una eutrofización leve o moderada hasta una toxicidad severa que afecta gravemente los recursos hídricos y el medio ambiente en general.</p>	<p>Promover los procesos de reciclaje de agua Mantener los sistemas de monitoreo del control de la calidad de agua de los efluentes producidos. Tratamiento y recirculación de lagua en cada uno de los procesos.</p>	<p>Sectores industriales de la parroquia Punin</p>

Realizado por: Unup Nandip, Moisés,2023

4.6.3. Protección de las zonas de recarga hídrica

Tabla 5-4: Protección de las zonas de recarga hídrica

Fundamento	Mecanismos	Responsables/Beneficiarios
La recarga de un acuífero ocurre cuando el agua se filtra a través del suelo desde la superficie y alcanza los diferentes niveles del acuífero. La frecuencia de recarga de estos sistemas depende de factores como la tasa de precipitación, las características del suelo y la actividad humana relacionada con el uso del agua.	Comprensión de los mecanismos de recargas de aguas subterráneas y los valores más importantes que participan dentro de este proceso	Gobierno Provincial de Chimborazo Gobierno parroquial de Punin Habitantes de la parroquia Punin
Procesos de reforestación: Es indispensable mantener el porcentaje de cobertura vegetal propia del sector pues garantizará el equilibrio ecosistémico y de recarga de aguas subterráneas.	Campañas de reforestación y cuidado de la cobertura vegetal endémica,	Gobierno Provincial de Chimborazo Gobierno parroquial de Punin Habitantes de la parroquia Punin
Procesos de tecnificación agrícola: Mejorar el uso del agua es esencial para los habitantes y autoridades de la parroquia Punin, ya que gran parte de la población depende de las actividades agrícolas y ganaderas que requieren este recurso para el desarrollo de sus cultivos.	Se propone la implementación de prácticas agrícolas más eficientes y sostenibles, incluyendo mejoras en los métodos de cultivo y riego, así como el reciclaje del agua de lluvia y el uso de sistemas de riego parcelario.	Autoridades del GAD Punin Moradores de la parroquia Punin
Uso eficiente de los recursos hídricos: Es necesario poner énfasis en la educación ambiental y en la concientización sobre los impactos negativos que puede traer la disminución del recurso hídrico debido a la marcada tendencia al desperdicio por parte de los habitantes de la parroquia Punin.	Adoptar medidas de consumo eficiente de agua. Mejorar los procesos de educación ambiental.	Moradores de la parroquia Punin.
Protección de los sistemas hídricos circundantes: Se deberá extender las medidas de prevención de la contaminación a los sistemas hídricos cercanos a la parroquia las cuales se conectan directamente a la red hídrica del sector.	Se propone llevar a cabo campañas y planes para proteger, conservar y utilizar los recursos hídricos de manera sostenible en la parroquia Punin, con especial énfasis en la agricultura y el consumo responsable de agua.	Moradores de la parroquia Punin.

Realizado por: Unup Nandip, Moisés, 2023

CONCLUSIONES

- Se establecieron 5 parámetros (NDVI, densidad de drenaje, precipitación, pendiente, uso y cobertura del suelo) los cuales se consideraron como esenciales a la hora de determinar zonas con potencial presencia de aguas subterráneas, los resultados de los parámetros sujetos a evaluación mostraron que el NDVI, la densidad de drenaje, y el régimen de precipitación constituyeron los parámetros de mayor incidencia en la recarga hídrica de un acuífero, así la densidad de drenaje afecta la capacidad de almacenamiento de agua subterránea, siendo las áreas con drenaje pobre las más propicias para la acumulación de agua, mientras que las zonas con drenaje eficiente favorecen la esorrentía e infiltración, permitiendo la captación y almacenamiento de agua subterránea finalmente se considera que una precipitación anual promedio de más de 2000 mm de lluvia por año es suficiente para la recarga de estos sistemas hídricos.
- Se generaron los mapas temáticos correspondientes para describir los parámetros morfológicos de la cuenca e insumos asociados a la presencia de aguas subterráneas, se determinó que la cuenca delimitada posee un área de 47,827 km², con un perímetro de 32,45 km, el factor de forma de Horton alcanzó un promedio de 0,43 que responde a una cuenca ligeramente ensanchada, su cota máxima es de 3625,16 msnm y su cota mínima de 2655,84 msnm respectivamente, por su parte la actitud media o altitud promedio fue de 3131,68 msnm. Con respecto a la curva hipsométrica, se puede inferir que se trata de una cuenca en fase de equilibrio o madurez, debido a la presencia notoria de una red de drenaje que se extiende por toda el área de investigación. En relación con las variables NDVI, densidad de drenaje, precipitación, pendiente, uso y cobertura del suelo, se crearon mapas correspondientes que se reclasificaron en tres niveles de probabilidad (Alto, Medio, Bajo) para la detección de aguas subterráneas.
- La aplicación de los procesos de jerarquía analítica basada en las cinco capas permitió delimitar zonas con potencial agua subterránea, es así que gran parte de la zona de estudio posee una baja probabilidad de obtener o encontrar aguas subterráneas sobre todo en la región céntrica de la parroquia, las zonas marcadas en color amarillo son medianamente probables de albergar aguas subterráneas, es preciso mencionar la correlación presente entre la recarga hídrica y el índice NDVI, los mapas generados, mostraron que las áreas con alta probabilidad de encontrar agua subterránea correspondieron a superficies con alta densidad vegetativa que si bien se ubican en lugares puntuales de la cuenta, sirven para denotar que donde existe la presencia de agua habrá una mayor acumulación de especies vegetales saludables con un NDVI cercanos al +1.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda que dicho estudio se complemente con procesos de prospección en campo con los equipos y monitoreos establecidos bajo la normativa correspondiente para de esa forma corroborar la posible existencia de agua subterránea en las zonas definidas dentro del software SIG.
- Se recomienda en futuros proyectos donde se considere el uso de software SIG para este tipo de trabajos, se incluyan un número mayor de variables a considerar a la hora de determinar la presencia o ausencia de aguas subterráneas en una zona o región en particular, entre los parámetros que se podrían incluir se menciona la geomorfología, el índice de evapotranspiración, perfiles del suelo previamente corroborados en campo y un análisis más detallado del ciclo hidrológico de la cuenca de estudio.
- Se recomienda mejorar los datos correspondientes al ciclo hidrológico de la zona de estudio y el régimen de precipitación mensual que permita adaptar la metodología PJA de forma más exacta, así mismo durante el manejo del software SIG es necesario siempre contar con los datos e insumos con mayor calidad e interferencia nula para evitar sesgos en los resultados finales.

GLOSARIO

- **Agua subterránea:** Indica aquella agua la cual se encuentra presente por debajo de las capas freáticas del suelo, el volumen de agua y la frecuencia ca de recarga de estos acuíferos dependerán principalmente del ciclo del agua, la permeabilidad del terreno así como los procesos de aprovechamiento y explotación de este recurso (Cerón et al., 2021, p. 17).
- **AHP:** Analytic Hierarchy Process, hace referencia a la metodología cuyo objetivo es discernir entre un conjunto de variables o hipótesis aquellas que sean más coherentes para la resolución de un problema (Khan y Ali, 2020, p. 13).
- **Balance Hidrológico:** Proceso natural por el cual el planeta busca renovar y mantener los volúmenes de agua, mediante el ajuste apropiado de las entradas y salidas de sistema, vital para el desarrollo de la vida y la calidad ecosistémica (Asadabadi et al., 2019).
- **Densidad de Drenaje:** Indica la relación entre la longitud total de los cauces contenidos dentro de una cuenca y el área de la misma, su densidad está ligado a la predisposición que tiene una cuenca a los fenómenos de escorrentía e infiltración (Miranda et al., 2021, p. 6).
- **Escurrimiento:** Fenómeno por el cual se describe como una parte del agua viaja por medio del suelo de forma superficial hasta que alcance un dren secundario, parte aguas o cuerpo hídrico (Acuña y Martínez, 2022, p. 11).
- **Geomorfología:** Hace referencia al estudio de las propiedades físicas y químicas del suelo y como estos se vienen desarrollando a lo largo de los años, importante en este caso para determinar la presencia o ausencia de aguas subterráneas (Acuña y Martínez, 2022, p. 11).
- **NDVI:** Índice de vegetación de diferencia normalizada, permite conocer el desarrollo vegetativo y su estado en base a la región espectral de radiación fotosintética activa (Huang et al., 2021, p. 12).
- **Permeabilidad del suelo:** Hace referencia a la capacidad que tiene el suelo para dar paso un volumen independiente de agua producto de los procesos de precipitación, hasta los horizontes más bajos del planeta, alcanzando las regios denominadas como freáticas del planeta (Huang et al., 2021, p. 10).
- **Ráster:** Producto satelital el cual está conformando por un grupo de pixeles cada uno con un valor en particular, esencial a la hora de generar procesos de teledetección y análisis geográfico de las situaciones naturales que suceden dentro del planeta (Frau et al., 2008, p. 4)

BIBLIOGRAFÍA

ACHÁ, Nicolás A. et al. "MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN LA CUENCA DEL RÍO ROCHA INCORPORANDO LINEAMIENTOS DE CAUDAL ECOLÓGICO". *Investigación & Desarrollo*, 2022, vol. 22, no 1, pp. 49-62., ISSN 2518-4431. DOI 10.23881/idupbo.022.1-5i.

ALCIVAR, Jorge Patricio Chonlong. & GIL, Henry Antonio Pacheco. "Estimación de zonas potenciales de aguas subterráneas en la cuenca del río Portoviejo mediante análisis jerárquico basado en SIG y teledetección". *Revista Bases de la Ciencia*, 2021a, vol. 6, no 1, pp. 1-18., ISSN 2588-0764. DOI 10.33936/rev_bas_de_la_ciencia.v6i1.2648.

ÁLVAREZ, Amilcar. et al. "Evaluación de la contaminación de acuíferos producida por actividades de saneamiento y re-uso de efluentes en el norte de la provincia de Mendoza". *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 2011, vol. 43, no 1, pp. 19-39., ISSN 0370-4661, 1853-8665.

ANAHUI MARTINEZ, Efrain. & LOPEZ ASCUÑA, Ander. "Modelamiento hidrológico con SWAT y MIKE-SHE, para determinar el balance hídrico y el transporte de sedimentos de la cuenca del río Yaurisque, distrito de Yaurisque, provincia de Paruro, Cusco - 2021". En: Accepted: 2022-02-17T16:59:36Z [en línea], 2022, [Consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/6308>.

ASADABADI, Mehdi Rajabi. et al. "Are MCDM methods useful? A critical review of Analytic Hierarchy Process (AHP) and Analytic Network Process (ANP)". En: Z. ZHOU (ed.), *Cogent Engineering*, 2019, vol. 6, no 1, pp. 1623153., ISSN null. DOI 10.1080/23311916.2019.1623153.

ÁVILA, Julia Pacheco. & SANSORES, Armando Cabrera. "Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas". *Ingeniería*, 2003, vol. 7, no 2, pp. 47-54., ISSN 1665-529X, 2448-8364.

BAXENDALE, Claudia. & BUZAI, Gustavo. "Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica. Aportes de la Geografía para la elaboración del Diagnóstico en el Ordenamiento Territorial". *Fronteras*, 2011, vol. 10, pp. 25-38.,

BOTANA, María Inés. & FERNÁNDEZ, Silvina Edith., 2019a. "Teledetección como experiencia de aprendizaje". En: journalAbbreviation: Una mirada desde Geografía Física I, Geografía de los Espacios Marítimos y Cartografía, *XXI Jornadas de Geografía de la UNLP (La Plata, 9 al 11 de octubre de 2019)* [en línea]. S.l.: s.n., [Consulta: 16 febrero 2023]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/110172>.

BOTANA, María Inés. & FERNÁNDEZ, Silvina Edith. "Teledetección como experiencia de aprendizaje : Una mirada desde Geografía Física I, Geografía de los Espacios Marítimos y Cartografía". *XXI Jornadas de Geografía de la UNLP, 9 al 11 de octubre de 2019* [en línea], 2019b, Disponible en: https://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/trab_eventos/ev.13501/ev.13501.pdf.

BUZAI, Gustavo Daniel. & MONTES GALBÁN, Eloy José., Estadística Espacial: Fundamentos y aplicación con Sistemas de Información Geográfica [en línea]. S.l.: Universidad Nacional de Luján. Instituto de Investigaciones Geográficas,. 2021. [Consulta: 15 febrero 2023]. ISBN 978-987-48369-3-9. Disponible en: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/161048>.

CARRIÓN-MERO, Paúl. et al. "Geodiversity assessment to regional scale: Ecuador as a case study". *Environmental Science & Policy*, 2022, vol. 136, pp. 167-186., ISSN 1462-9011. DOI 10.1016/j.envsci.2022.06.009.

CASTRO, Gustavo Jesús Avilés. & RODRÍGUEZ, Reynier García. "Sobreexplotación de pozos profundos y perforación irregular en acuíferos costeros". *RECIMUNDO*, 2022, vol. 6, no 1, pp. 277-288., ISSN 2588-073X. DOI 10.26820/recimundo/6.(1).ene.2022.277-288.

CASTRO, Rolando. et al. "La gestión del recurso hídrico". *Biocenosis* [en línea], 2007, vol. 20, no 1-2, [Consulta: 15 febrero 2023]. ISSN 1659-4991. Disponible en: <https://revistas.uned.ac.cr/index.php/biocenosis/article/view/1298>.

CERÓN, Lina M. et al. "Agua subterránea: tendencias y desarrollo científico". *Información tecnológica*, 2021, vol. 32, no 1, pp. 47-56., ISSN 0718-0764. DOI 10.4067/S0718-07642021000100047.

CHAMORRO CASTILLO, Katherine Mishell., Identificación y caracterización de las zonas de recarga hídrica mediante herramientas Sig de los acuíferos la carbonería, Guaraczapas, Yuyucocha y Santa Clara para la protección de las fuentes de aprovisionamiento de agua en la

zona urbana de Ibarra. [en línea]. (bachelorThesis). s.n. S.l.: 2016. [Consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/6920>.

CONSTITUCION DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR., 2008. *CONSTITUCION DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR 2008* [en línea]. 2008. S.l.: Lexis,. Disponible en: https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf.

CORAS MERINO, Pablo Miguel. et al.
"http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-09342014000400001&lng=es&nrm=iso&tlng=es". *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2014, vol. 5, no 4, pp. 537-548., ISSN 2007-0934.

CROSS, Katharine. et al. "Acuíferos : gestión sostenible de las aguas subterráneas". [en línea], 2020, [Consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <https://policycommons.net/artifacts/1372266/acuiferos/1986439/>.

CRUZ, Ana Cecilia Padrón. & MARTÍNEZ, Pedro César Cantú. "EL RECURSO AGUA EN EL ENTORNO DE LAS CIUDADES SUSTENTABLES". *Cultura Científica y Tecnológica* [en línea], 2015, no 31, [Consulta: 15 febrero 2023]. ISSN 2007-0411. Disponible en: <http://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/341>.

DELGADO, Jhoisy Cristhel Arteaga. et al. "Determinación del Índice de Humedad Topográfica para la microcuenca «La Mina» de la costa ecuatoriana.". *Dilemas contemporáneos: Educación, Política y Valores* [en línea], 2020, [Consulta: 15 febrero 2023]. ISSN 2007-7890. DOI10.46377/dilemas.v8i1.2473. Disponible en: <https://dilemascontemporaneoseduccionpolitica yvalores.com/index.php/dilemas/article/view/2473>.

DÍAZ, Eliana Jimena. et al. "EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA PRELIMINAR DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS DE LA MESA DE LOS SANTOS, SANTANDER". , 2019, "EarthExplorer". [en línea], 2023. [Consulta: 23 febrero 2023]. Disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

ESPINOZA ACUÑA, Mariann José. & ZELAYA MARTÍNEZ, Carlos Ramón. "Aplicación del modelo hidrológico SWAT en unidades hidrográficas de Nicaragua: Simulación del escurrimiento superficial". *La Calera* [en línea], 2022, vol. 22, no 38, [Consulta: 23 febrero 2023]. ISSN 1998-8850, 1998-7846. DOI 10.5377/calera.v22i38.14116. Disponible en: <https://www.camjol.info/index.php/CALERA/article/view/14116>.

FARINANGO VALLEJOS, Gladys Andrea. & SARANSIG REVELO, Carmen Elizabeth. Análisis espacio temporal de la variación de la calidad de agua de los acuíferos del cantón de Otavalo, Ecuador [en línea]. (bachelorThesis). s.n. S.l.: 2021. [Consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11408>.

GAUR, Srishti. & SINGH, Rajendra. "A Comprehensive Review on Land Use/Land Cover (LULC) Change Modeling for Urban Development: Current Status and Future Prospects". *Sustainability*, 2023, vol. 15, no 2, pp. 903., ISSN 2071-1050. DOI 10.3390/su15020903.

GUANANGA, Nelly. et al. "Influence of geomorphology and flow on the water quality of Guano river, Ecuador". *Revista Digital Novasineria*, 2022, vol. 5, no 2, pp. 174-192., ISSN 2631-2654. DOI 10.37135/ns.01.10.10.

GUEVARA GUTIÉRREZ, Rubén Darío. et al. "Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río ayuquila, jalisco-méxico". *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 2019, no 24, pp. 9., ISSN 1578-5157.

HERNÁNDEZ, Griselda Tome. & MANZO, Luis Alberto Villarreal. "Caracterización morfométrica de la cuenca del río Huitzilac, Puebla, México". *Boletín Geográfico*, 2022, vol. 44, no 1, pp. 41-58., ISSN 2313-903X.

HERNÁNDEZ JUÁREZ, Rodrigo Alejandro. et al. "Gestión del agua subterránea en los acuíferos de la cuenca del río Ayuquila-Armería en Jalisco y Colima, México". *región y sociedad*, 2019, vol. 31, pp. e1093., ISSN 2448-4849, 1870-3925. DOI 10.22198/rys2019/31/1093.

HERNÁNDEZ MUÑOZ, Aurelio., 2015. "Abastecimiento y distribución de agua". *Biblioteca Hernán Malo González de la Universidad del Azuay* [en línea]. [Consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <https://biblioteca.uazuay.edu.ec/buscar/item/79910>.

HERNÁNDEZ-JUÁREZ, Rodrigo Alejandro. et al. "Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la cuenca del río Ayuquila-Armería mediante el uso de SIG y el análisis multicriterio". *Investigaciones geográficas* [en línea], 2020, no 101, [Consulta: 15 febrero 2023]. ISSN 0188-4611. DOI 10.14350/rig.59892. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S018846112020000100102&lng=es&nrm=iso&tlng=es.

HUANG, Sha. et al. "A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing". *Journal of Forestry Research*, 2021, vol. 32, no 1, pp. 1-6., ISSN 1993-0607. DOI 10.1007/s11676-020-01155-1.

KHAN, Amin Ullah. & ALI, Yousaf. "ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS (AHP) AND ANALYTIC NETWORK PROCESS METHODS AND THEIR APPLICATIONS: A TWENTY YEAR REVIEW FROM 2000-2019 : AHP & ANP techniques and their applications: Twenty years review from 2000 to 2019". *International Journal of the Analytic Hierarchy Process* [en línea], 2020, vol. 12, no 3, [Consulta: 23 febrero 2023]. ISSN 1936-6744. DOI 10.13033/ijahp.v12i3.822.Disponible en <https://www.ijahp.org/index.php/IJAHP/article/view/82>.

LAPPERRE, Rimbaud E. et al. "Temporal and spatial variability of cross-fault groundwater-level differences: the impact of fault-induced permeability reduction, precipitation and evapotranspiration". *Hydrogeology Journal*, 2022, vol. 30, no 4, pp. 1233-1257., ISSN 1435-0157. DOI 10.1007/s10040-022-02465-w.

LEY ORGANICA DE RECURSOS HIDRICOS USOS Y & APROVECHAMIENTO DEL AGUA, 2014. *LEY ORGANICA DE RECURSOS HIDRICOS USOS Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA* [en línea]. 2014. S.l.: Lexis,. Disponible en: <http://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/03/Ley-Org%C3%A1nica-de-Recursos-H%C3%ADricos-Usos-y-Aprovechamiento-del-Agua.pdf>.

MÁRQUEZ ROSALES, Heliodoro. "Métodos matemáticos de evaluación de factores de riesgo para el Patrimonio Arqueológico: una aplicación Gis del método de jerarquías analíticas de T. L. Saaty". En: Accepted: 2016-09-29T10:33:47Z [en línea], 2017, [Consulta: 23 febrero 2023]. ISSN 1133-4525. DOI 10.12795/spal.1999.i8.02. Disponible en: <https://idus.us.es/handle/11441/46351>.

MENA FRAU, Carlos. et al. "EXACTITUD ESPACIAL EN LA CREACIÓN DE BASES DE DATOS SIG MODELOS RÁSTER Y VECTORIAL". *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 2008, vol. 16, no 1, pp. 159-168., ISSN 0718-3305. DOI 10.4067/S0718-33052008000100005.

MIRANDA, Diego Shagui. et al. "Morphometric Analysis of the Sub-basin of the Upano Para River Flood Analysis". *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.*, 2021, pp. 1024-1032., ISSN 2789-5009. DOI 10.18502/epoch.v1i2.9528.

OROZCO, Olga L. Puertas. et al. "Estudio De Tendencias De La Precipitación Mensual En La Cuenca Alta-Media Del Río Cauca, Colombia.". *Dyna*, 2011, vol. 78, no 169, pp. 112-120., ISSN 0012-7353, 2346-2183.

PULIDO VELAZQUEZ, David. et al., 2022. "Cambio global y aguas subterráneas en un contexto de escasez y sequías". *Agua, energía y medio ambiente*, 2022, ISBN 9788413021843, págs. 293-314 [en línea]. S.l.: Universitat d'Alacant / Universidad de Alicante, pp. 293-314. [Consulta: 15 febrero 2023]. ISBN 978-84-13-02184-3. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8604071>.

RIVERA BRAVO, Daniela. "Diagnóstico jurídico de las aguas subterráneas". *Ius et Praxis*, 2015, vol. 21, no 2, pp. 225-266., ISSN 0718-0012. DOI 10.4067/S0718-00122015000200007.

ROMERO, Francisco Sacristán. "La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental". *Revista AquaTIC* [en línea], 2016, no 24, [Consulta: 15 febrero 2023]. ISSN 1578-4541. Disponible en: <http://revistaaquatic.com/ojs/index.php/aquatic/article/view/212>.

ROSSINI, Gonzalo F. Iglesias. "Conservación del suelo y el subsuelo desde una perspectiva ambiental". *Revista de Derecho*, 2022, vol. 21, no 42, pp. 41-52., ISSN 2301-1610. DOI 10.47274/DERUM/42.3.

SOLANES, Miguel. "Manejo integrado del recurso agua, con la perspectiva de los Principios de Dublín". En: Accepted: 2014-01-02T18:48:25Z [en línea], 1998, [Consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/12088>.

TELLO-CIFUENTES, Lizette. & DÍAZ-PAZ, Jean P. "Análisis de la contaminación ambiental usando técnicas de teledetección y análisis de componentes principales". *TecnoLógicas*, 2021, vol. 24, no 50, pp. e1710., ISSN 2256-5337, 0123-7799. DOI 10.22430/22565337.1710.

TORRES, Patricia. et al. "Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano: Una revisión crítica". *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 2009, vol. 8, no 15, pp. 79-94., ISSN 1692-3324.

TÓTH, J. "Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones". *Boletín geológico y minero*, 2000, vol. 111, no 4, pp. 9-26., ISSN 0366-0176.

VALERO, María Isabel Rodríguez. & SARRIA, Francisco Alonso. "OBTENCIÓN DE CARTOGRAFÍAS DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA PARA EL PERIODO 1986-2019, EMPLEANDO TELEDETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES". *Papeles de Geografía* [en línea], 2021, no 67, [Consulta: 15 febrero 2023]. ISSN 1989-4627. DOI 10.6018/geografia.472241. Disponible en: <https://revistas.um.es/geografia/article/view/472241>.

VARELA, Ramón Alberto Díaz., Aplicación de sistemas de información geográfica y teledetección a la identificación y seguimiento de hábitats en la red natura 2000 [en línea]. (<http://purl.org/dc/dcmitype/Text>). Universidade de Santiago de Compostela,. S.l.: 2005. [Consulta: 15 febrero 2023]. Disponible en: <https://investigacion.usc.gal/documentos/5d1df66c29995204f766ba95>.

VILLACÍS MALDONADO, Karen Fabiola. "Evaluación de la probabilidad de ocurrencia de agua subterránea en la microcuenca Zaruma URCU.". En: Accepted: 2020-07-20T18:57:24Z [en línea], 2020a, [Consulta: 16 febrero 2023]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/48661>.

VILLACÍS MALDONADO, Karen Fabiola. "Evaluación de la probabilidad de ocurrencia de agua subterránea en la microcuenca Zaruma URCU.". En: Accepted: 2020-07-20T18:57:24Z [en línea], 2020b, [Consulta: 16 marzo 2023]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/48661>.

VILLACIS RIVADENEIRA, Eugenio. & MARRERO DE LEÓN, Norberto. "Precipitaciones extremas en la ciudad de Quito, provincia de Pichincha- Ecuador". *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 2017, vol. 38, no 2, pp. 102-113., ISSN 1680-0338.

VILLANUEVA HERNÁNDEZ, Hipólito. et al. "Tipificación de los acuíferos del campo Mina, Nuevo León, utilizando sistemas de información geográfica". *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2019, vol. 10, no 3 (mayo-junio de 2019), pp. 96-123., ISSN 2007-2422.

ZAITUNAH, A. et al. "Normalized difference vegetation index (ndvi) analysis for land cover types using landsat 8 oli in besitang watershed, Indonesia". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 126, no 1, pp. 012112., ISSN 1755-1315. DOI 10.1088/1755-1315/126/1/012112.



ANEXOS

ANEXO A: INFORME DE VALORES ÚNICOS PARA LA CAPA RÁSTER GWPI

Archivo analizado: F:/QGIS EJERCICIOS/AGUAS SUBTERRÁNEA PUNIN/INSUMOS/WGPI.tif (banda 1)		
Extensión: 754866.547299999765307,9799574.4823000002652407 : 763293.7569000000366941,9809452.5301827844232321		
Proyección: EPSG:32717 - WGS 84 / UTM zone 17S		
Anchura en píxeles: 273 (unidades por píxel 30.8689)		
Altura en píxeles: 320 (unidades por píxel 30.8689)		
Número total de píxeles: 87360		
Número de píxeles SINDATOS: 37222		
Valor Número de píxeles Área (m²)		
1	16568	15787464.36541749
2	30213	28789634.28732247
3	3357	3198848.254146941



esPOCH

**Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje**

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL**

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 12/ 07/2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Moises Macario Unup Nandip
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Ambiental
Título a optar: Ingeniero Ambiental
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

1216-DBRA-UPT-2023

