



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 EL CANTÓN GUAMOTE, PROVINCIA DE
CHIMBORAZO**

Trabajo de Integración Curricular:

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para obtener el grado académico de:

INGENIERA AMBIENTAL

AUTORA: YADIRA BETSABETH COBOS AYUY

DIRECTOR: ING. MIGUEL ÁNGEL OSORIO RIVERA

Macas – Ecuador

2022

©2022, Yadira Betsabeth Cobos Ayuy

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, Yadira Betsabeth Cobos Ayuy, 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 autora 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, 21 de diciembre de 2022



Yadira Betsabeth Cobos Ayuy

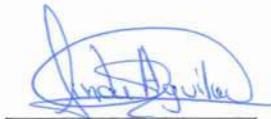
140106855-4

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; tipo: Proyecto de Investigación, **IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON POTENCIAL AGUA SUBTERRÁNEA MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN, SIG Y PJA EN EL CANTÓN GUAMOTE, PROVINCIA DE CHIMBORAZO**, realizado por la señorita: **YADIRA BETSABETH COBOS AYUY**, 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. Jessica Paola Arcos Logroño PRESIDENTA DEL TRIBUNAL		2022-12-21
Ing. Miguel Ángel Osorio Rivera DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2022-12-21
Ing. Linda Noralma Aguilar Moncayo ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2022-12-21

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE 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 investigación.....	5
1.5. Objetivos.....	5
1.5.1. <i>Objetivo general</i>	5
1.5.2. <i>Objetivos específicos</i>	6
1.6. Justificación.....	6
1.6.1. <i>Justificación teórica</i>	6
1.6.2. <i>Justificación metodológica</i>	6
1.6.3. <i>Justificación práctica</i>	7
1.7. Hipótesis.....	7

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Antecedentes.....	9
2.2. Agua.....	10
2.2.1. <i>Agua dulce</i>	10
2.2.1.1. <i>Superficial</i>	11
2.2.1.2. <i>Subterránea</i>	11
2.2.1.3. <i>Acuíferos</i>	12
2.3. Balance hidrológico de aguas subterráneas.....	13
2.3.1. <i>Recarga</i>	14

2.3.1.1.	<i>Densidad de lineamientos</i>	14
2.3.2.	Drenaje	14
2.3.2.1.	<i>Densidad de drenaje</i>	15
2.3.3.	Almacenamiento	15
2.3.3.1.	<i>Clima</i>	15
2.3.3.2.	<i>Elevación o relieve</i>	15
2.3.3.3.	<i>Curvatura topográfica</i>	16
2.3.3.4.	<i>Índice de humedad topográfica (TIW)</i>	16
2.3.3.5.	<i>Rugosidad de la superficie</i>	16
2.3.3.6.	<i>Suelo</i>	16
2.3.3.7.	<i>Temperatura</i>	16
2.3.3.8.	<i>Precipitación</i>	17
2.3.3.9.	<i>Pendiente</i>	17
2.4.	Teledetección geográfica y ambiental	17
2.4.1.	<i>Características del uso de imágenes satelitales</i>	18
2.5.	Sistemas de teledetección	19
2.5.1.	Teledetectores activos	19
2.5.1.1.	<i>Aplicaciones de la teledetección activa</i>	19
2.5.2.	Teledetectores pasivos	20
2.5.2.1.	<i>Aplicaciones de la teledetección pasiva</i>	20
2.5.3.	Componentes de un sistema de teledetección	21
2.5.3.1.	<i>Magnitudes físicas componentes de la teledetección</i>	21
2.5.3.2.	<i>Espectro electromagnético</i>	21
2.5.3.3.	<i>Bandas espectrales</i>	22
2.6.	Parámetros para la prospección de aguas subterráneas	23
2.6.1.	<i>Características geológicas</i>	23
2.6.2.	<i>Geomorfología</i>	23
2.6.3.	<i>Depósitos fluviales</i>	23
2.6.4.	<i>Tipo y cobertura del suelo (LULC)</i>	23
2.7.	Proceso de análisis jerárquico (PJA)	24
2.7.1.	<i>Estructuración de la jerarquía</i>	25
2.7.2.	<i>Construcción de la matriz de consistencia</i>	25
2.7.2.1.	<i>Verificación de consistencia</i>	25
2.7.3.	<i>Establecimiento de pesos relativos</i>	25
2.8.	Bases Conceptuales	25
2.8.1.	<i>Agua subterránea</i>	25
2.8.2.	<i>Balance hidrológico</i>	26

2.8.3.	<i>Técnicas de teledetección</i>	26
2.8.4.	<i>Bandas satelitales</i>	26
2.8.5.	<i>SIG</i>	26
2.8.6.	<i>Proceso de jerarquía analítica (PJA)</i>	26

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	28
3.1.	Enfoque de investigación	28
3.2.	Nivel de investigación	28
3.3.	Diseño de investigación	28
3.3.1.	<i>Según la manipulación o no de la variable independiente</i>	29
3.3.2.	<i>Según las intervenciones en el trabajo de campo</i>	29
3.4.	Tipo de estudio	29
3.5.	Población de estudio	29
3.5.1.	<i>Tamaño de la muestra</i>	29
3.5.2.	<i>Localización de estudio</i>	29
3.6.	Métodos técnicas e instrumentos de investigación	30
3.6.1.	<i>Software de análisis y procesamiento de imágenes satelitales</i>	30
3.6.1.1.	<i>ArcGIS</i>	31
3.6.2.	<i>Obtención de los parámetros geomorfológicos de la zona de estudio</i>	31
3.7.	Modelamiento de los datos empleando software SIG	32
3.7.1.	<i>Recolección de la información digital</i>	33
3.7.1.1.	<i>Recolección de imágenes satelitales</i>	33
3.7.2.	<i>Generación de las capas e insumos temáticos para la investigación</i>	34
3.7.2.1.	<i>NDVI</i>	34
3.7.2.2.	<i>Precipitación</i>	36
3.7.2.3.	<i>Densidad de drenaje</i>	36
3.7.2.4.	<i>Pendiente</i>	37
3.7.2.5.	<i>Uso de suelo</i>	38
3.8.	Valoración de los factores que condicionan la recarga y almacenamiento del agua subterránea	39
3.8.1.	<i>Valores de reclasificación para NDVI</i>	39
3.8.2.	<i>Valores de reclasificación para precipitación</i>	40
3.8.3.	<i>Valores de reclasificación para densidad de drenaje</i>	40
3.8.4.	<i>Valores de reclasificación para pendiente</i>	40
3.8.5.	<i>Valores de reclasificación para uso de suelo</i>	41

3.8.6.	<i>Metodología de análisis jerárquico aplicado a la prospección de aguas freáticas</i> ...	41
3.8.6.1.	<i>Formulación del problema</i>	41
3.8.6.2.	<i>Valoración de los elementos o variables.</i>	42
3.8.6.3.	<i>Generación de las matrices de comparación</i>	42
3.8.7.	<i>Generación del mapa de zonas potenciales de agua subterránea</i>	43
3.8.7.1.	<i>Identificación de zonas con potencial agua subterránea</i>	43
3.9.	Propuesta de protección de las zonas con potencial agua subterránea	44

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	45
4.1.	Descripción geomorfológica de la zona de estudio	45
4.2.	Resultados Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	47
4.3.	Resultados precipitación para el Cantón Guamote	49
4.4.	Resultados densidad de drenaje para el Cantón Guamote	50
4.5.	Resultados de las pendientes para el Cantón Guamote	51
4.6.	Resultados uso y cobertura del suelo Cantón Guamote	53
4.7.	Codificación en el árbol de decisiones	54
4.8.	Determinación de los pesos normalizados para cada capa temática	54
4.9.	Identificación de zonas con potencial de agua subterránea	55

CAPÍTULO V

5.	MARCO PROPOSITIVO	58
5.1.	Propuesta de protección de zonas con potencial agua subterránea	58

CONCLUSIONES	61
---------------------------	----

RECOMENDACIONES	62
------------------------------	----

GLOSARIO	63
-----------------------	----

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-3:	Obtención de la morfología de la cuenca Guamote.....	32
Tabla 2-3:	Características de las imágenes satelitales Landsat 8 OLI	34
Tabla 3-3:	Procedimiento para la generación y clasificación del índice NDVI.....	34
Tabla 4-3:	Procedimiento para la rasterización y clasificación de la capa precipitación.....	36
Tabla 5-3:	Procedimiento para la rasterización y clasificación de la capa densidad de drenaje	37
Tabla 6-3:	Procedimiento para la rasterización y clasificación de la capa pendientes.....	38
Tabla 7-3:	Procedimiento para la rasterización y clasificación de la capa uso de suelo	38
Tabla 8-3:	Criterios de valoración para la asignación de pesos de las variables	39
Tabla 9-3:	Criterio de asignación de pesos para NDVI	39
Tabla 10-3:	Criterio de asignación de pesos para precipitación.....	40
Tabla 11-3:	Criterio de asignación de pesos para densidad de drenaje.....	40
Tabla 12-3:	Criterio de asignación de pesos para pendiente	40
Tabla 13-3:	Criterio de asignación de pesos para uso suelo	41
Tabla 14-3:	Escala de Medidas de Saaty	42
Tabla 1-4:	Resumen morfológico de la Cuenca del Río Guamote.....	45
Tabla 1-5:	Monitoreo y control de la contaminación.....	59
Tabla 2-5:	Consumo eficiente del agua.....	59
Tabla 3-5:	Protección de las zonas de recarga hídrica	60

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-2:	Espectro electromagnético.....	22
Ilustración 1-3:	Delimitación geopolítica del Cantón Guamote (Zona de estudio).....	30
Ilustración 2-3:	Metodología para la determinación de las zonas potenciales de agua subterránea	33
Ilustración-3-3:	Estructura PJA para la determinación de zonas potenciales de agua subterránea	42
Ilustración 1-4:	Curva hipsométrica de la cuenca del Río Guamote	46
Ilustración 2-4:	Ráster reclasificado para NDVI.....	47
Ilustración 3-4:	Ráster reclasificado para volumen de precipitación	49
Ilustración 4-4:	Ráster reclasificado para volumen de precipitación	50
Ilustración 5-4:	Ráster reclasificado para pendiente en grados	51
Ilustración 6-4:	Ráster reclasificado para uso y cobertura de suelo	53
Ilustración 7-4:	Ráster final zonas potenciales de agua subterránea	55

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: CR	43
Ecuación 2: CI	43
Ecuación 3: GWPI	44
Ecuación 4: GWPI	44

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** MATRIZ DE PONDERACIÓN DE LAS VARIABLES EN ARCGIS
- ANEXO B:** ÁREA EN KM2 PARA DENSIDAD DE DRENAJE
- ANEXO C:** ÁREA EN KM2 PARA USO Y COBERTURA
- ANEXO D:** ÁREA EN KM2 PARA NDVI
- ANEXO E:** ÁREA EN KM2 PARA PENDIENTES
- ANEXO F:** ÁREA EN KM2 ZONAS POTENCIALES DE AGUA SUBTERRÁNEA

RESUMEN

El presente trabajo de investigación consistió en la identificación de zonas con potencial presencia de agua subterránea, en la cuenca hidrográfica del cantón Guamote, aplicando el Proceso de Jerarquía Analítica (PJA) y Sistemas de Información Geográfica (SIG), a partir de la información geoespacial. Se recolectó información geoespacial a partir de los repositorios de teledetección EartData, United States Geological Survey (USGS Earth Explorer) y Sigtieras, fue procesada mediante el Software ArcGis, para delimitar el área y los parámetros geomorfológicos de la cuenca, correspondieron al índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), la pendiente, la densidad de drenajes, el tipo y uso de suelo y la precipitación. Los parámetros morfológicos fueron ponderados y clasificados mediante análisis PJA, asignando valores relativos a cada parámetro, convirtiéndolos en insumos para el índice de potencialidad de aguas subterráneas (GWPI), el modelado y la elaboración de los mapas temáticos de zonas con potencial agua subterránea. Se determinó que la cuenca del río Cebadas perteneciente al cantón Guamote, tiene un área de 1220,31 km², un cauce principal de 50,89 km, una pendiente del 9 % y una densidad de drenajes baja (0,14), se trata de una cuenca ensanchada, de forma entre oval oblonga a oblonga rectangular, una curva hipsométrica asociada a ríos maduros. En cuanto a la dinamina de los acuíferos potenciales, se encontró una mayor incidencia en la parte occidental de la cuenca, la cual presento valores altos de NDVI (0,6 a 0,8) característicos de una vegetación saludable, precipitaciones de hasta 3000 mm/año, y zonas mayormente planas con una alta densidad de drenajes. Se concluye que fue factible identificar zonas potenciales de agua subterránea, mediante PJA y SIG, las cuales ocupan aproximadamente un 20 % y se ubican en la parte baja de la cuenca. Por lo cual, se recomienda realizar estudios avanzados de prospección y conservación.

Palabras clave: <CANTÓN GUAMOTE>, <POTENCIAL AGUA SUBTERRÁNEA>, <TELEDETECCIÓN>, <SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)>, <PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (PJA)>, <PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS>, <ÍNDICE DE POTENCIALIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA (GWPI)>.

0045-DBRA-UPT-2023



ABSTRACT

The present research work consisted in identifying areas with potential presence of groundwater in the watershed of County Guamote, applying the Analytical Hierarchy Process (AHP) and Geographic Information Systems (GIS), based on geospatial information. The geospatial information was collected from remote sensing repositories EartData, United States Geological Survey (USGS Earth Explorer), "Sigtierras", and processed using ArcGis software to delimit the area and the geomorphological parameters of the watershed, corresponding to the normalized difference vegetation index (NDVI), slope, drainage density, soil type and use, and precipitation. The morphological parameters were weighted and classified by PJA analysis assigning relative values to each parameter which was converted into inputs for the groundwater potentiality index (GWPI), modeling and the elaboration of thematic maps of areas with groundwater potential. It was determined that the Cebadas river basin belonging to the Guamote County, has an area of 1220.31 km², a main channel of 50.89 km, a slope of 9% and a low drainage density (0.14), it is a widened basin, between oblong oval to rectangular oblong, a hypsometric curve associated with mature rivers. Regarding the dynamics of potential aquifers, a greater incidence was found in the western part of the basin, which presented high NDVI values (0.6 to 0.8) characteristic of healthy vegetation, rainfall of up to 3000 mm/year, and mostly flat areas with a high density of drainage. It concluded that it was feasible to identify potential groundwater zones, by means of PJA and GIS, which occupy approximately 20%, and are located in the lower part of the basin. Therefore, it recommended carrying out advanced prospecting and conservation studies.

Keywords: <GUAMOTE (COUNTY)>, <GROUNDWATER POTENTIAL>, <TELEDETECTION>, <GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS (GIS)>, <PHOTOGRAPHIC GEOMORPHOLOGICAL PARAMETERS>, <GRAPHIC ANALYSIS PROCESS (AHP)>, <GREENWATER POTENTIALITY INDEX (GWPI)>.

By: Mauricio Martínez P.

0602902504

INTRODUCCIÓN

La investigación plantea que el uso de la metodología de proceso de análisis jerárquico (PJA) incrementaría la sensibilidad de los sistemas de información geográfica al momento de identificar zonas con presencia potencial de agua subterránea. La metodología PJA fue desarrollada por Thomas Saaty en los años setenta, para facilitar la toma de decisiones del departamento de defensa de los Estados Unidos, al igual que otros métodos de análisis multicriterio, se fundamenta en el juicio de expertos, es decir que puede adaptarse a un sinnúmero de ambientes o contextos.

Por su parte los sistemas de información geográfica permiten manejar una enorme cantidad de datos espaciales, sin embargo, la fiabilidad de esta información depende de varios factores, empezando por la robustez de los satélites y la sensibilidad de sus sensores, así como por las condiciones climatológicas, y el correcto almacenamiento y depuración de la información en los servidores de las agencias de teledetección; aunado a ello, el ser humano tiene la capacidad de proyectar los resultados, y así seleccionar la información más adecuada para el trabajo.

La combinación de técnicas de teledetección, modelamiento geoespacial y análisis PJA ha sido aplicada en varios estudios de prospección de agua subterránea, consolidando una base para estudios futuros, además proporciona los insumos y lineamientos para la aplicación del método. Los insumos son los parámetros geomorfológicos de la cuenca, por lo que los más comunes son la pendiente, el índice de precipitaciones, índice de vegetación de diferencia normalizada, temperatura superficial y la red de drenajes.

La presente investigación guarda mucha relación con otros estudios ejecutados en el País, debido a la similitud de condiciones geográficas y la disponibilidad de las mismas bases de datos geoespaciales, con apenas mejoras mínimas en alguno de los parámetros. De manera que se contempló seis etapas, que consistieron en obtención de información, limpieza de los datos, establecimiento del PJA, selección de los insumos (NDVI, pendiente, red de drenajes, precipitaciones y tipo y uso de suelos), generación de mapas temáticos, identificación de las zonas potenciales de agua subterránea y diseño de una propuesta de medidas de conservación de la cuenca hidrográfica.

La metodología permitió obtener un mapa temático que demarca la posible distribución de depósitos de agua subterránea en la cuenca, en donde se visualizó una alta aptitud para prospección de acuíferos en la parte occidental, sin embargo, debe ser comprobado mediante estudios y monitores de campo, bajo una metodología e instrumentación certificada. Por otro lado, el mapa puede servir de referencia para el manejo sostenible de la cuenca, evitando afectar las zonas de recarga hídrica y reduciendo la posibilidad de contaminación.

Finalmente, con este estudio se buscó beneficiar a la población del sector de Guamote, población que como pilar económico se basa en las labores de agricultura y ganadería, todas estas actividades demandan de un uso constante de agua, por lo que garantizar el acceso a este recurso

mediante la exploración de nuevas fuentes de agua subterránea es primordial para el desarrollo sustentable y sostenible del cantón, el empleo y manejo de técnicas de teledetección nos permitirá hacer un balance de las condiciones hídricas del sector, se proporcionará un mapa detallado de las zonas potenciales de aguas subterráneas, que en un futuro pueden ser aprovechadas para su explotación o bien sea su conservación.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad es inevitable no ligar la importancia que tiene el recurso agua, para el desarrollo y supervivencia de las especies vivas en los diferentes ecosistemas del planeta, es de conocimiento general que si bien la tierra es su gran mayoría posee grandes reservas de agua en los océanos, mares, ríos etc., tan solo una pequeña fracción de toda esta agua, es adecuada para el consumo humano e inclusive, de ciertas especies animales y vegetales (Fernández Cirelli, 2012, p. 143). Las fuentes de agua dulce en el planeta son puntos vitales para el desarrollo de la vida y progreso de la sociedad, sin embargo, a medida que dichas fuentes han venido escaseando ha surgido la necesidad de buscar nuevas fuentes de abastecimiento de este recurso, lo que ha desembocado en la búsqueda e implementación de nuevas técnicas y metodologías de prospección, para determinar zonas con presencia de agua subterránea, entre estas técnicas se tiene las denominadas, técnicas de teledetección las cuales emplean imágenes satelitales y procesamiento en SIG, con la finalidad de determinar las zonas más óptimas para la explotación de este recurso, así mismo, dicha metodología busca maneras por las cuales se evalúe si la recarga hídrica generada en los ecosistemas se mantiene constante o presenta un déficit marcado (Cossío Klüver, 2019, p. 138). Las fuentes de agua subterránea tienen la particularidad de originarse producto de los procesos naturales de precipitación, escorrentía e infiltración, una parte de esta lluvia pasa a distribuirse superficialmente y otra parte en menor cantidad percola a través de los horizontes del suelo hasta almacenarse en estructuras geológicas propias del planeta, denominados como acuíferos.

Otro de los puntos característicos de estos acuíferos es el grado de calidad y pureza del agua contenida, puesto que al momento de infiltrarse por medio de suelo este actúa como una serie de filtros que eliminan restos de impurezas y contaminantes, por lo que se puede considerar que estas fuentes de agua dulce son de alta calidad, aptas sobre todo para consumo humano. En cuanto al volumen de agua subterránea presente en el planeta según datos del Centro Internacional de Evaluación de Recursos de Aguas Subterráneas (IGRAC), la superficie terrestre alberga aproximadamente 1,390 millones de kilómetros cúbicos de agua, es decir un 70% del planeta está cubierto de agua, de estos 1.390 millones de km³ de agua, un 96,5% es agua salada representada por océanos y mares (Barbazza et al., 2011, p. 19).

Por otro lado la cantidad de agua dulce apta para el consumo humano tan solo representa un 3.5% del total con una tendencia marcada a la baja, resaltado que de este porcentaje de agua dulce un 90% se halla en las formaciones congeladas de la Antártida y tan solo un 0,5% se lo encuentra en depósitos subterráneos de ahí la importancia de que los procesos de prospección y búsqueda de

estas fuentes de agua sean lo más certeras posibles y que por sobre todo del hecho marcado de una posible explotación de estos acuíferos se mantenga el de su conservación y no contaminación por agentes externos o procesos antropogénicos (Fernández, 2012, p. 12).

Conforme al crecimiento poblacional, la búsqueda de fuentes de agua dulce se ha vuelto imprescindible y necesaria, actualmente la técnicas de prospección e identificación de este recurso que en un principio se lo hacía netamente en campo se lo puede complementar con un proceso tecnológico denominado teledetección, mediante el procesamiento e interpretación de imágenes satélites y posterior análisis por medio de un software GIS, permiten un reconocimiento previo de las posibles zonas que cumplan con los parámetros adecuados para albergar agua y que se conviertan en futuros candidatos a ser puntos de monitoreos en campo para su total determinación y en su futuro una explotación de estos acuíferos. El uso de imágenes satelitales y software Gis provee muchas ventajas para la obtención de áreas de prospección, el uso de las propiedades tales como permeabilidad, pendiente, tipo de suelo, índice NDVI, etc., información contenida en las bandas ráster de dichos archivos suponen una ventaja económica y de cierta manera certera antes de inclinarse por el muestreo in situ sin el conocimiento previo de la zona de estudio (Pech May et al., 2021, p. 44).

1.2. Limitaciones y delimitaciones

- Limitaciones

En cuanto a las limitaciones encontradas para el desarrollo de esta investigación es preciso resaltar que, recaen sobre todo en la parte económica y de accesibilidad a la zona de estudio, si bien inicialmente se planteó complementar los resultados arrojados por el software GIS con un muestreo en campo, este supuso varios inconvenientes que se presentaron a continuación.

- Económico

El proceso de muestreo para corroborar la presencia de agua subterránea supone una inversión elevada tanto para el traslado hasta la zona de estudio, la estadía y el equipo necesario, para este tipo de investigaciones se requiere de equipo especializado basado en un sondeo eléctrico.

- Accesibilidad a la zona de estudio

La zona de estudio se localiza en un sector rural de la provincia de Chimborazo y llegar a los puntos de monitoreo previamente elegidos podrán llevar varias horas de camino o incluso ubicarse en los lugares más agrestes de la cuenca de estudio.

- Operacional

Adicionalmente durante el desarrollo del trabajo, las limitaciones más importantes que se han podido presentar fueron el manejo avanzando del software GIS y el grado de investigación por parte del investigador, para definir las mejores variables y parámetros a evaluar dentro del tema que se está desarrollando, igualmente se hace mención a que este tipo de estudios no han sido tan

investigados dentro de la comunidad científica Ecuatoriana, por lo cual tratar de comparar los resultados obtenidos frente a la carente información propia del país, no permite tomar una referencia de un estudio previo para comprar los resultados nuestros con la información guía, razón por la cual se ha optado en valorar con tesis de otros países sin embargo es de resaltar que dichos estudios en las zonas aplicadas no contienen las mismas cualidades químicas ni morfológicas del suelo.

- **Delimitaciones**

En cuanto a las delimitaciones se puede mencionar que la principal delimitación recae en el bajo nivel de información de este tipo de estudios dentro del país y de la zona de estudio, si bien algunos trabajos toman en consideración las variables ambientales y geomorfológicas del suelo, estos no presentan un resultado final que nos indiquen las zonas con posible presencia de agua subterránea, así mismo el único documento guía se encuentra datado a finales de los años 80 por lo que dicha información no ha sido actualizada y los resultados que se obtengan en este estudio pueden o no tener un sesgo de error elevado.

1.3. Problema general de investigación

¿Cuáles son los procedimientos y técnicas que permitirán la identificación de zonas con potencial agua subterránea en el cantón Guamote, provincia de Chimborazo?

1.4. Problemas específicos de investigación

¿Con que herramientas cartográficas se puede describir la geomorfología de la zona de estudio?

¿Qué proceso analítico se puede aplicar para la identificación de zonas con potencial agua subterránea mediante el uso de mapas temáticos y teledetección?

¿Cómo se podría elaborar una estrategia de conservación para las zonas con potencial presencia de agua subterránea establecidas?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

- Identificar las zonas con potencial agua subterránea mediante técnicas de teledetección, SIG y PJA en el cantón Guamote, provincia de Chimborazo

1.5.2. Objetivos específicos

- Describir la geomorfología de la zona de estudio mediante mapas temáticos.
- Identificar zonas con potencial de agua subterránea mediante procesos de jerarquía analítica utilizando mapas temáticos y teledetección.
- Proponer mecanismos de protección en las zonas con posible presencia de agua subterránea.

1.6. Justificación

1.6.1. Justificación teórica

El cantón Guamote perteneciente a la provincia de Chimborazo, constituye el segundo cantón más extenso de la Provincia con 1.223,3 km². Guamote posee un clima “oceánico”, una temperatura media y una precipitación promedio de 544,5 mm a 680,2 mm factores que han favorecido para que esta zona sea un referente agrícola y ganadero del sector. Pese a que es una zona altamente fértil detrás de ello ha surgido un problema que en los últimos años ha mermado la tasa de producción anual de productos agrícolas, siendo esto el constante descenso en la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos tanto para el consumo humano como el destinado para las labores del campo, según el PDOT del cantón actualizado 2019-2022 (PDOT, 2019).

Las fuentes de agua del sector han escaseado o han sido contaminadas por actividades humanas tales como la fertilización, o el uso ineficiente de este recurso, además se ha observado que los fenómenos de erosión y deforestación de las cuencas hídricas conformantes del cantón han afectado el balance y renovación de los sistemas de aguas subterráneas, por lo cual, la búsqueda de nuevas zonas candidatas a almacenar agua dulce es imprescindible para garantizar el constante desarrollo agrícola y social de la población de Guamote, sin perder de vista que a la par de la búsqueda, prospección y futura explotación de estos acuíferos debe primar la razón de conservación de este recurso.

1.6.2. Justificación metodológica

La aplicación de un proceso de jerarquía analítica, por sus siglas PJA, permite dividir los elementos más importantes que forman parte de una investigación, la aplicación de esta metodología en teledetección permitirá a su vez diferenciar los insumos, datos satelitales, fenómenos climáticos, variables morfológicas entre otras, que a su vez se ajusten a un orden concreto y detallado, brindando las variables y parámetros de evaluación para la determinar las zonas con mayor potencialidad de almacenamiento de agua subterránea en el cantón Guamote de la provincia de Chimborazo.

Los beneficios de la teledetección usando imágenes satelitales radica en que cada una de estas imágenes poseen información y datos específicos, como pueden ser temperatura, índices de calidad agrícola, análisis de vegetación saludable, permite evaluar usos de suelo, determinar fenómenos de escorrentía entre otros que brindan una brecha muy alta de conocimiento e información para el investigador (Alcivar y Pacheco, 2021, p. 14).

1.6.3. Justificación práctica

Es sabido que gran parte de las fuentes hídricas actuales de la zona son de conocimiento de los moradores del sector y que en años anteriores prácticamente no era necesario la búsqueda adicional de fuentes de agua subterránea, caso muy aparte en los años actuales donde el déficit de este recurso a obligado a buscar técnicas y métodos mucho más precisos que minimicen tiempos de exploración, sean más efectivos, abarquen superficies de terreno más grandes con un bajo costo, antiguamente las técnicas de prospección acuífera requerían un conocimiento en campo de la zona casi en su totalidad, y que los procesos de monitoreo podían llevar meses puesto que la búsqueda de zonas aptas con presencia de agua se dificultaba de manera progresiva por razones de accesibilidad del lugar, climatología etc., (Catanha et al., 2016, p. 76).

El avance tecnológico sobre todo en lo espacial ha marcado un punto de inflexión en el estudio de los fenómenos del planeta, esto complementado con procesos científicos y analíticos ha permitido generar metodologías de evaluación de un sin número de variables y problemas, siendo una de ellas la prospección de aguas subterráneas, que por medio de imágenes satelitales y su posterior procesamiento en un software SIG han ido de a poco reemplazando las antiguas formas de identificación de acuíferos, las cuales se basaban netamente en el muestreo en campo, metodología que a su vez demandaba un mayor esfuerzo investigativo, de operación y por supuesto, también económico (Pérez y Rodríguez, 2006, p. 11).

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 el cantón Guamote, provincia de Chimborazo

Hipótesis alternativa (H₁)

Es posible identificar zonas con potencial agua subterránea utilizando teledetección, Sistemas de Información Geográfica y procesos de jerarquización analítica en el cantón Guamote, provincia de Chimborazo

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

El agua constituye el 71 % de la superficie del planeta y se estima que el 96,5% del agua se ubica en mares y océanos como agua no disponible para consumo humano; por otro lado, el 1,7 % se fija en glaciares y los casquetes de hielo en los círculos árticos y antárticos; un 0,30% en los ríos y lagunas y un 1.5 % se encuentra de forma subterránea denominados como acuíferos, particularmente, en el Cantón Guamote con base a lo descrito en el PDOT, el agua de consumo humano y de labores agrícolas que es dirigida a la población es captada de cinco fuentes, siendo estas una combinación de fuentes superficiales y subterráneas, agrupadas por dos sistemas de captación, dentro de las fuentes de agua superficial se tienen: Chacaza Matipanga y Chipó Sacaguan, por otro lado las fuentes de agua subterránea corresponden a: Santa Rosa, Chipó Chico y Ambato Pogio. La característica principal de todas estas fuentes de agua radica en la reducción de su caudal, lo que está originando problemas en la distribución adecuada de este recurso para las necesidades generales del cantón (PDOT, 2019).

En el Ecuador, el primer estudio de prospección de los recursos hídricos del país se remonta al año de 1982, con la publicación del primer mapa Hidrológico del Ecuador, bajo el patrocinio del Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), sin embargo la información recabada para la realización de este estudio partió por publicaciones escritas en los años 1977-1978 publicado por el Instituto Geográfico Militar (IGM) en el marco de un informe titulado "II Elementos básicos para la planificación de los recursos hídricos en el Ecuador" - 1979, como parte de los estudios programados en el Convenio MAG-ORSTDM, entre el programa Nacional de Regionalización Agraria (PRONAREG) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y el Centro de Investigación Científica y Técnica de Ultramar (DRSTDM) de Francia. Cabe resaltar que estos estudios se basaban netamente en la prospección georreferenciación y determinación de los diferentes parámetros morfológicos in situ, lo que dio como resultado el sustento de las bases hídricas y fuentes de agua del país que inclusive hoy en día aún siguen siendo explotadas para los diferentes usos sea agrícolas, ganaderos o de consumo humano (Burbano et al., 2015).

Finalmente si bien Ecuador es una región favorecida en cuanto a la cantidad de fuentes de agua natural, en la actualidad la demanda de este recurso cada vez es mayor y esto sumado a factores como el cambio climático, contaminación antropogénica entre otros a limitado el acceso de este recurso al 100% de la población, de ahí la importancia de realizar nuevas investigaciones

ayudados por técnicas mucho más modernas como la teledetección, para la búsqueda de zonas que sean propensas a ser fuentes de agua explotables en un futuro próximo.

2.2. Agua

El agua es una sustancia química compuesta por hidrógeno y oxígeno en una proporción 2:1, cuyas moléculas tienen naturaleza covalente polar, que se encuentra distribuida alrededor de todo el planeta, mayormente percibida como una sustancia líquida que se presenta conformando océanos, lagos, ríos; no obstante, está presente incluso en estado sólido en glaciares y nevados, y por supuesto, en forma de gas, conformando parte de la composición del aire, el vapor de agua tiende a elevarse, agrupándose y conformando las nubes (Fundación Aquae, 2022, párr. 1-2).

Se encuentra recubriendo el 70 % de la superficie terrestre, del total de agua del planeta, el 97.5 % es agua salada, almacenada en los océanos, el 2.5 % restante es agua dulce, de esta, el 80 % está retenida en los glaciares y casquetes polares, el 19 % se encuentra en depósitos subterráneos, como agua freática, y solo el 1 % del agua dulce, corresponde a agua superficial accesible para ser aprovechada por el ser humano. El agua superficial a su vez se distribuye en 52 % en lagos, 38 % en humedales, y el 10 % restante en lagos y vapor de agua (Fernández Cirelli, 2012, p. 148).

El valor intrínseco del agua se fundamenta propiedades como solvente universal, medio de desarrollo de procesos metabólicos, lo que ha posibilitado el desarrollo de la vida, gran capacidad calorífica. Se trata de un recurso poco renovable, vital para el desarrollo humano y de los seres vivos en general, que se recicla, siguiendo el denominado ciclo hidrológico, impulsado por la radiación solar, donde el agua oceánica y superficial se evapora, y es arrastrada por las corrientes de aire hacia territorio continental, donde se condensa y precipita, de acuerdo a las temporadas del año y a las condiciones climatológicas; este proceso, hace posible la recarga hídrica continental (Fernández Cirelli, 2012, pp. 148-149).

2.2.1. Agua dulce

Una de las teorías del origen de la vida plantea, que esta dio su primer paso en el medio acuático, es posible que a esto se deba la intrincada dependencia que mantienen todos los seres vivos con respecto a esta sustancia, tanto es así, que se puede decir que el agua, tanto marina como continental, ha sido el medio de sustento y desarrollo de microorganismos y de organismos superiores, como: plantas, animales y a su vez de la especie humana (Organización Meteorológica Mundial, 1997, p. 7).

El agua dulce interviene en el desarrollo integral del ser humano, puesto se emplea en la alimentación, la salud, la higiene, el transporte, la producción de alimentos, y el desarrollo económico y social de la población. En palabras de Baron et al. (2003, p. 1) “La sociedad se vio

siempre fuertemente atraída por los ríos, lagos, humedales y acuíferos subterráneos para abastecerse de agua para beber, regar los cultivos y hacer funcionar los procesos industriales”. Por otro lado, el agua también representa riesgos al ser humano, los cuales son provocados por desastres naturales, como ocurre con: las inundaciones y aluviones, además de riesgos a la salud, debido a la contaminación o la mala calidad del agua de consumo. Desde el punto de vista de la Organización Meteorológica Mundial (1997, p. 7) “el agua contaminada transmite enfermedades y provoca la muerte a quién la bebe y mata aves, peces y criaturas que la necesitan para sobrevivir”

2.2.1.1. Superficial

Se integran por todas las masas de agua depositadas (lagos, lagunas y humedales) o en circulación (ríos y riachuelos) sobre la superficie continental. Su volumen y/o caudal es alimentado por la escorrentía producto de las precipitaciones (MITECO, 2020, párr. 1), y por las corrientes subterráneas que emergen, conformando las vertientes o nacientes (Induanalisis, 2021, párr. 1). El curso que siguen estas aguas estará determinado por la geografía y relieve del terreno, por lo tanto, pueden ser corrientosas o quietas, como ríos y lagos, respectivamente.

La dinámica de drenaje y recarga de aguas superficiales depende principalmente de las precipitaciones, por lo que, en épocas de estiaje, el caudal hidrológico es alimentado únicamente por depósitos subterráneos, lo que reduce la cantidad de sedimentos y sólidos suspendidos que se asocian a eventos de gran escorrentía, en épocas de invierno. En consecuencia, la calidad de las aguas superficiales varía de estación a estación (Induanalisis, 2021, párr. 2).

Formalmente, las aguas superficiales desde el punto de vista dinámico se clasifican en: lóxicas y lénticas, mientras que por su estado pueden ser naturales o modificadas (Carcauca, 2016, párr. 2-4).

2.2.1.2. Subterránea

Las aguas subterráneas al igual que las superficiales, deben su origen a la existencia del ciclo hidrológico, que transporta grandes masas de vapor de agua hacia territorio continental, causando precipitaciones, que retornan a los océanos por efecto de la escorrentía, no obstante, una buena parte del agua logra infiltrarse a gran profundidad, a través de las porosidades del terreno, hasta que alcanzan estratos geológicos impermeables, donde el agua es almacenada, saturando los poros del suelo y dando lugar a la formación de acuíferos (Fuentes Yagüe, 1993, p. 16).

El aporte de los depósitos subterráneos al caudal base varía en función de las propiedades climáticas y geológicas del suelo, en ocasiones el aporte hidrológico a la cuenca puede ser nulo, y en otros, llega a ser del 100 %, para el caso de los Estados Unidos se ha determinado un aporte aproximado del 40 %, mientras que en España se ha estimado un aporte medio del 30 %. A nivel ambiental, el agua freática debido a su capacidad disolvente interviene en la difusión de

contaminantes, en el control de intrusiones salinas y en otra serie de procesos geológicos complejos (Herráiz, 2009, p. 98).

De la misma forma que las aguas superficiales, estas también pueden ser explotadas para ser potabilizadas, o valoradas para algún otro uso industrial; en cuanto a su estudio, aunque necesariamente implica mayor dificultad por su acceso, existen modelos compatibles con el estudio de aguas superficiales, lo que facilita su prospección, conservación y aprovechamiento, como respaldo de ello, es oportuno citar el gran número de artículos científicos publicados en los últimos años, respecto a la prospección y caracterización de acuíferos (Herráiz, 2009, pp. 98-99).

2.2.1.3. Acuíferos

Son masas de agua subterránea retenidas en estratos rocosos, suficientemente permeables para permitir un flujo de ingreso o salida de agua, lo que se traduce en su potencial de recarga y de abastecimiento, respectivamente (López-Geta et al., 2009, p. 17). Por ende, su capacidad de almacenamientos está determinada por la porosidad, fisuración y volumen de cada uno de estos depósitos (Fuentes Yagüe, 1993, p. 6).

Para que un depósito de agua subterránea sea catalogado como un acuífero, debe ser capaz de almacenar y aportar agua, para que pueda ser explotada eficientemente, bajo esta consideración, las aguas que están depositadas en formaciones arcillosas son retenidas, al ser difícil su explotación no son considerados acuíferos (Fuentes Yagüe, 1993, p. 6).

Se clasifican de acuerdo con su estructura y de acuerdo con la porosidad que presentan las capas que forman el depósito.

- *Acuíferos según su estructura*

Acuíferos libres (no confinados o freáticos): presentan piso impermeable, con una presión en el techo equivalente a una atmosfera, su volumen se recarga de forma directa, son relativamente profundos por lo que su volumen depende mucho de las variaciones a nivel freático (Collazo y Montaña, 2012, p. 20).

Acuíferos confinados (cautivos o a presión): tienen un límite superior poco permeable, los techos de estos registran presión mayores a una atmosfera, por lo cual, la recarga se da de forma lateral, cuando se perforan pozos el agua puede subir rápidamente hasta alcanzar la superficie (Collazo y Montaña, 2012, p. 20).

Acuíferos semiconfinados (semicautivos): su presencia es bastante frecuente, y se caracterizan porque el techo y el piso, o al menos uno de estos, presenta muy poca permeabilidad, presentando un circulación vertical lenta (Collazo y Montaña, 2012, p. 21).

- *Acuíferos según su porosidad*

Acuíferos de porosidad primaria (porosos o sedimentarios): Emergen en depósitos sedimentarios de gravas y arenas con diferente granulometría, a su vez, estos materiales pueden presentarse sueltos a formando consolidados (Collazo y Montaña, 2012, p. 22).

Acuíferos de porosidad secundaria (fisurados o fracturados): Se presentan en formación rocosas de origen ígneo o metamórfico, donde su porosidad está determinada por zonas de alteración, fisuras, fallas o diaclasas, por lo tanto, el agua puede circular siempre y cuando estén estructuras se encuentre interconectadas (Collazo y Montaña, 2012, p. 22).

Acuíferos por disolución (químicos o kársticos): Se encuentran en depósitos de rocas carbonatadas como calizas, el agua actúa disolviendo las rocas, dando origen a una serie de huecos o galerías, por donde el agua puede circular libremente a mayor velocidad (Collazo y Montaña, 2012, p. 22).

2.3. Balance hidrológico de aguas subterráneas

El volumen de agua subterránea que contiene una zona se puede cuantificar, mediante la aplicación de un balance de masas, partiendo de una caracterización hidrogeológica inicial del entorno, dicha caracterización va dirigida a determinación la composición y el volumen de los depósitos.

La composición química de las aguas subterráneas depende principalmente de la composición mineral y de características geológicas del acuífero, estas últimas, determinan el grado en la que las actividades antropogénicas intervienen en la composición y/o calidad del agua subterránea (Madrigal-Solís et al., 2017, p. 115).

Las propiedades hidro geoquímicas varían en función del tipo de acuífero, de su litología, el índice de recarga, el nivel de confinamiento y la vulnerabilidad asociada al uso del suelo superficial (Madrigal-Solís et al., 2017, p. 116). Por otro lado, el caudal depende de la capacidad de almacenamiento y drenaje o transmisibilidad del acuífero (Foster et al., 2007, p. 1).

Para estimar el balance hidrológico, se adopta las siguientes consideraciones, donde: el caudal de saturación representa el almacenamiento, el drenaje la descarga, y la alimentación la recarga del sistema. Por cuestiones prácticas, la estimación se realiza a nivel de las cuencas hidrográficas, puesto que, es necesario cuantificar la escorrentía superficial y la infiltración del lugar, al considerarse como la entrada del sistema. Sin embargo, a diferencia del parteaguas superficial, donde todas las contribuciones, confluyen a la misma corriente principal; el parteaguas subterráneo puede tomar direcciones opuestas al relieve, lo cual es importante a tener en cuenta a la hora de realizar el balance hídrico de los acuíferos (Aguilar González, 2013, p. 27).

Los balances pueden ser totales, cuando se incluye aguas superficiales y freáticas, o bien parciales, solo con superficiales, subterráneas, o uno o más acuíferos en particular, etc. (Aguilar González, 2013, p. 27).

2.3.1. Recarga

La recarga de aguas subterráneas es un proceso natural del ciclo hidrológico, por el cual, las aguas superficiales logran infiltrarse en el subsuelo, depositándose en los diferentes tipos de acuíferos (Cruz Falcón et al., 2013, p. 88). La recarga puede ser natural o artificial, donde la natural está asociada principalmente a las precipitaciones (Gómez et al., 2019, p. 20), mientras que, la artificial se asocia con obras civiles de captación, conducción o recirculación de las aguas (Aguilar González, 2013, p. 34). Las recargas pueden ser también, verticales si su aporte proviene únicamente de la infiltración de las lluvias que precipitan directamente sobre la superficie de los acuíferos (Aguilar González, 2013, p. 33), u horizontales cuando el aporte natural (lluvias y ríos) o artificial (riego o canales) es captado en las elevaciones cercanas y conducidas lateralmente a los acuíferos por difusión simple (Cruz Falcón et al., 2013, p. 88).

2.3.1.1. Densidad de lineamientos

Los lineamientos actúan como vías para transferir la escorrentía a los acuíferos subterráneos. Estas son las características lineales o curvilíneas que se manifiestan en la superficie como la expresión de la estructura geológica del subsuelo, como pliegues, fracturas o fallas. El lineamiento se considera un indicador directo del potencial de agua subterránea y, debido a la porosidad secundaria, los lineamientos actúan como un acuífero (Mira Carrión et al., 2016, pp. 486-491).

2.3.2. Drenaje

El drenaje de las aguas subterráneas representa las salidas del sistema, y al igual que las entradas, las descargas pueden ser naturales cuando las aguas afloran libremente (Cruz Falcón et al., 2013, p. 89), o artificiales cuando afloran o son bombeadas a la superficie por medio de pozos o perforaciones (Peñuela Arévalo y Carrillo Rivera, 2013, p. 19).

La descarga representa la etapa final de la dinámica del agua subterránea, sin embargo, en su trayecto por el suelo, desde la infiltración, almacenamiento y descarga, el agua ha participado en varios procesos hidrogeológicos, que han provocado cambios sustanciales en su salinidad, pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto, carga microbiana, entre otros parámetros que determinan su composición y por ende su calidad para su posible aprovechamiento (Peñuela Arévalo y Carrillo Rivera, 2013, p. 24).

Las descargas pueden ser de tres tipos:

- *Descarga a sistemas de agua dulce:* que contribuye con el suministro de agua o los ecosistemas fluviales aguas abajo (Foster et al., 2007, p. 4).
- *Descarga por medio de vegetación natural:* vegetación en general y aquella que sustenta los humedales de agua dulce y lagunas de agua salobre (Foster et al., 2007, p. 4).
- *Descarga a zonas salinas:* principalmente cuando la descarga se da en aguas costeras, y en menor medida hacia lagos salinos y suelos endurecidos producto de la evaporación directa (Foster et al., 2007, p. 4).

2.3.2.1. Densidad de drenaje

La densidad de drenaje es un factor vital para considerar, y tiene una relación inversa con la permeabilidad. El área de baja densidad de drenaje indica que una mayor tasa de infiltración da como resultado una buena potencialidad de las aguas subterráneas (CRUZ SANJULIÁN y TAMES URDIAIN, 1983, p. 105).

2.3.3. Almacenamiento

A diferencia de las aguas superficiales, las aguas subterráneas se caracterizan por su lenta circulación, por ende, tienden a almacenarse, conformando enormes masas de agua (acuíferos) que presentan un régimen natural de descarga estable, asegurando el suministro de agua por periodos que van desde décadas hasta siglos (Foster et al., 2007, p. 2). Debido a los intensos regímenes de recarga, las entradas superan las salidas, dando lugar al almacenamiento (Aguilar González, 2013, p. 27). Entre los factores determinantes que controlan el almacenamiento de las aguas subterráneas encontramos:

2.3.3.1. Clima

El clima puede ser definido como el conjunto de factores atmosféricos como: lluvias, humedad, temperatura, vientos, entre otros, y la frecuencia en que estos se presentan a lo largo de las diferentes épocas del año, en relación con los acuíferos, el clima determina el índice de precipitaciones que alimentan a los acuíferos (UNESCO, 2015, párr. 1).

2.3.3.2. Elevación o relieve

El mapa de elevación tiene un papel importante en la identificación de la zona potencial de agua subterránea. El área de menor elevación tiende a retener el agua por mucho tiempo e induce una

alta tasa de infiltración para la recarga de aguas subterráneas. Las áreas elevadas empinadas están asociadas con una gran cantidad de escorrentía superficial y una tasa de infiltración de bajo nivel (Godebo, 2005).

2.3.3.3. Curvatura topográfica

La curvatura se utiliza para calcular la naturaleza del perfil de la superficie, que puede ser un perfil convexo hacia arriba o cóncavo hacia abajo. Se considera que las áreas de perfil convexo favorecen la desaceleración del agua, que se representa con un valor negativo, y, en consecuencia, el agua tiende a acumularse en un perfil cóncavo, que se representa con un valor positivo (Florinski, 2000).

2.3.3.4. Índice de humedad topográfica (TIW)

El valor TWI se puede usar para comprender los impactos topográficos en el proceso hidrológico, como la tasa de humedad del suelo, la escorrentía, la permeabilidad, la infiltración y la productividad de la tierra, etc. (Gis&Beers, 2018, párr. 1-2).

2.3.3.5. Rugosidad de la superficie

La cantidad de diferencia de elevación entre las celdas adyacentes de un modelo de elevación digital se denomina índice de rugosidad (Riley et al., 1999). Generalmente expresa el grado de ondulación de la topografía. El proceso de meteorización y erosión tiene lugar continuamente en un área de topografía ondulada como una región montañosa y provoca una modificación continua del terreno accidentado en una superficie plana y lisa a largo plazo.

2.3.3.6. Suelo

El suelo es un componente esencial para identificar las zonas potenciales de agua subterránea. El comportamiento del suelo, como una infiltración, percolación y permeabilidad, afecta consistentemente la penetración del agua superficial en un sistema acuífero subterráneo.

2.3.3.7. Temperatura

El LST se refiere a la temperatura de la piel de la superficie del suelo y es un indicador de las condiciones climáticas predominantes de la tierra y del agua. El LST se estima utilizando la banda Landsat OLI-TIR. La influencia de la superficie terrestre sobre las aguas subterráneas es un factor

clave para explorar las zonas potenciales de aguas subterráneas. Quizás una firma de calor de la tierra tiene los efectos más prometedores en las aguas subterráneas. La gran capacidad de calor del suelo saturado que el suelo seco podría usarse para calcular el potencial de agua subterránea a través de teledetección térmica

2.3.3.8. Precipitación

La lluvia es una fuente primaria y principal para la recarga de las aguas subterráneas. El cambio espaciotemporal de las intensidades de lluvia controla la recarga de las aguas subterráneas. En comparación con las lluvias de baja intensidad, las lluvias de alta intensidad contribuyen más a la recarga de las aguas subterráneas. En particular, la cantidad de recarga en las regiones semiáridas es irregular y una recarga neta ocurre solo durante los periodos de fuertes lluvias.

2.3.3.9. Pendiente

La pendiente del terreno es un parámetro esencial en las prospecciones de aguas subterráneas, que influye en la cantidad de infiltración y retención de agua. Existe una relación inversa entre la pendiente y la tasa de infiltración

2.4. Teledetección geográfica y ambiental

Las técnicas de teledetección por medio de la interpretación de imágenes satelitales es un campo que se está abriendo paso de forma agigantada en los últimos años y que ha permitido a la comunidad científica obtener datos nuevos sobre el desarrollo y vida de nuestro planeta, si bien hace un par de décadas atrás ya se contaba con fotografías aéreas o espaciales del planeta estas aun carecían de metodologías y software especializado que permitan enfocarse en la evaluación de un problema en particular.

En la actualidad esta brecha se ha superado ya se han planteado metodologías de estudio probadas que son útiles para diferentes áreas a evaluar, entre las cuales destacan la prospección ex situ, planificación urbana, vigilancia y protección ambiental, gestión de cultivos, agricultura de precisión, prospección petrolífera e hídrica, exploración minera, localización de zonas de estudio entre otras (Cifuentes y Paz, 2021, pp. 25-28).

La teledetección sin duda se está convirtiendo en una herramienta valiosa para la obtención e interpretación de la información dirigidos a estudios en diferentes áreas, además de las ventajas mencionadas, las imágenes satelitales muestran un campo más amplio que el del ojo humano puede observar, develando datos que a simple vista estarían ocultos o fuera de nuestro alcance, por ejemplo índices de calidad en la vegetación, movimiento de masas de agua, existencia de

minerales en afloramientos rocosos o bien los fenómenos de contaminación ente otros, la metodología de interpretación de las imágenes procedentes de los satélites implica que al estar digitalizadas no requieren efectuar conversiones de datos o escaneos tan abruptos tan solo con una preparación mínima las imágenes quedan adecuadas para ser cargadas en el software correspondiente y estar listas para su total uso (Montecinos, 2019, p. 12; Cifuentes y Paz, 2021, p. 12).

2.4.1. Características del uso de imágenes satelitales

Dada la naturaleza misma de la composición digital de las imágenes satelitales lo único necesario es realzar los datos en información contenida en los píxeles que para el investigador sea relevante, además que dicha información puede ser adquirida de manera periódica a diferencia de las fotografías aéreas las cuales están sujetas a planes de vuelo que pueden verse obstruidas por el costo económico o bien de las variables climáticas de la zona (Chuvieco Salinero, 2002, pp. 123-127). Por otro lado, el uso de imágenes satelitales deja de lado los análisis tradicionales en campo como la toma de muestras durante largos periodos de monitoreo, planimetrías etc.

En el mundo actual la globalización no solo ha conllevado a un crecimiento de las sociedades, si no que con ellas se ha mejorado las técnicas y análisis aplicadas a diferentes ciencias producto de estas investigaciones hoy en día se tiene un panorama más claro de los fenómenos que suceden en nuestro planeta, en el caso específico de los estudios usando técnicas de teledetección estas han marcado un claro avance en cuanto al manejo actualizado de la información, que a la final serán importante para la toma decisiones en situaciones críticas de nuestros procesos investigativos, otras de las ventajas que suponen el uso de sistema de teledetección constan:

- Abaratamiento en los costos investigativos
- Accesibilidad de datos actualizados
- Abarca superficies de estudio más grandes que los aplicados por medio de prospección en campo
- Alta capacidad de recolección de datos a gran escala y transmitirlos a tiempo real
- Información de acceso libre para el investigador.
- Metodologías actualizadas para investigaciones de todo tipo pasando por proyectos ambientales, turísticos, geográficos etc.
- Homogeneidad en los datos contenidos en la imagen satelital.
- Información sobre regiones que dentro del aspecto visual del ojo humano no son visibles.
- Observación directa no destructiva (Nino, 2017, p. 11).

2.5. Sistemas de teledetección

Los sistemas de teledetección no son más que los componentes electrónicos esenciales para la toma, procesamiento, y distribución de los datos de la superficie terrestre a través de sensores implementados en plataformas espaciales, la conjunción electromagnética entre el terreno y el sensor producen un sin número de datos que son gestionados más adelante para obtener información asimilable para el investigador, es claro resaltar que el nivel de confiabilidad de estos datos será mayor en función a que tan elevada sea la sensibilidad del sensor, en el presente los datos e imágenes satelitales que tenemos provienen de plataformas tales como las Landsat, NOAA, IKONOS, SPOT, IRS entre otras (Nieto Masot y Cárdenas Alonso, 2018).

2.5.1. Teledetectores activos

Son los responsables de emitir la energía requerida para que se pueda hacer un barrido y escaneo de los objetos de estudio, es decir el sensor puede medir la cantidad de radiación reflejada por un objeto o superficie, los instrumentos de teledetección activa dirigen la señal de forma remota de sus sensores hacia el área u objeto a investigarse, la mayoría de estos sensores utilizan las microondas dado que este tipo de onda no posee mucha interferencia con las condiciones meteorológicas, por otro lado, el radar es un sensor que permite la identificación y localización mediante señales de radio, la particularidad de este componente es que el flujo de energía al chocar con el objeto, se dispersa, y basándose a su vez por la cantidad de dispersión y el tiempo de viaje de la onda es posible realizar el cálculo y estimación de la distancia a la que se encuentra el objetivo del satélite. El sensor Lidar por su parte determina la distancia, pero en este caso por un haz de luz, es decir que para su funcionamiento se requiere de impulsos luminosos desde el satélite hasta el objeto, finalmente estos teledetectores activos pueden llevar otros aparatos de medición como pueden ser altímetros, difusómetros, sondas meteorológicas entre otros (Fernández y Rincón, 2020, p. 34).

2.5.1.1. Aplicaciones de la teledetección activa

Se puede decir que el beneficio más importante de los sensores activos es que realizan su trabajo de forma permanente sin restricciones de tiempo o condiciones atmosféricas, dado que el flujo de energía enviado sobre el objeto parte del mismo satélite, dicha característica ha permitido a su vez que sus datos formen parte de proyectos de investigación en distintas áreas, por destacar tenemos la misión topográfica del Radar Shuttle, la cual se encargó de recoger y procesar los datos de elevación de todo el planeta permitiendo tener los denominados modelos de elevación digital o DEM muy usados en sistemas SIG. Otra de las áreas que ha venido destacando en los últimos

años es la agricultura, concretamente la denominada agricultura de precisión, la cual utiliza las imágenes de los sensores LIDAR para determinar la calidad forestal, y la vitalidad de los cultivos, así mismo se puede determinar la posible ausencia de minerales del suelo o por su contraparte adecuar las zonas más aptas para la siembra entre muchos más (Fernández y Rincón, 2020, p. 37) .

2.5.2. Teledetectores pasivos

Por otro lado, este tipo de teledetección no emana energía hacia el objeto estudiado, lee y detecta la radiación propia del objeto de estudio, en resumen la teledetección pasiva hace uso de sensores multispectrales o hiperspectrales que miden la cantidad de radiación recibida con una combinación de bandas, así mismo este tipo de Teledetectores requieren de la energía natural es decir los rayos solares que rebotan en el objetivo, por lo que en este caso las condiciones meteorológicas sí podrían afectar en la calidad de la toma de datos de ahí que es importante que el investigador haga una búsqueda previa de la información adecuada para su proyecto o estudio (Ezquerro et al., 2017a, p. 8).

2.5.2.1. Aplicaciones de la teledetección pasiva

De los sensores pasivos en detección remota más importantes podemos destacar los Sentinel y Landsat, este último considerado como el padre de la observación y teledetección del planeta puesto que sus diversas misiones han venido trabajando hace más de 40 años , proporcionando a la comunidad científica datos vitales del comportamiento y evolución de la tierra, actualmente la última misión se denominó LANDSAT 9 enviada a órbita el 27 de septiembre de 2021 desde la Base de la Fuerza Espacial Vandenberg en California. la cual ya se encuentra en funcionamiento y poseen ventajas sobre las anteriores misiones tales como una mayor capacidad de generación de imágenes que lo que permite obtener datos más valiosos al agregarse al archivo terrestre global de Landsat: alrededor de 1400 escenas por día (Ezquerro et al., 2017, p. 5; NASA, 2021).

Entre los diversos usos de estos satélites tenemos el poder obtener datos para generar mapas de cambio y uso de suelo, poder determinar el avance poblacional, los fenómenos de deforestación, en el campo de la agricultura puede emplearse para el cálculo del índice NDVI, cambio de tierras, en el campo del medio ambiente podemos observar el avance de incendios forestales, derrames petroleros, contaminación de los recursos hídricos, entre otros (Castillo Argañarás, 2014, p. 88).

Para el campo de las ciencias marinas se puede emplear para el monitoreo de las corrientes marinas, temperatura del agua, distribución de contaminantes, salinidad entre otras (Castillo Argañarás, 2014, p. 88).

2.5.3. Componentes de un sistema de teledetección

Actualmente el avance tecnológico ha crecido de forma exponencial y el número de satélites y sensores se ha triplicado, estos satélites que se encuentran en órbita tienen como función captar una variedad de imágenes del planeta durante los 365 días del año, todos estos sistemas cuentan con los siguientes componentes esenciales para su funcionamiento los cuales se detallan a continuación:

- *Sensor:* Es la parte óptica del satélite la cual capta, codifica y transmite los datos del objeto enfocado, dependiendo del tipo de sensor las imágenes resultantes tendrán menor o más información.
- *Centro de recepción:* La información pasa hasta los departamentos de procesado y decodificación, en este lugar se corrige posibles interferencias previo a su distribución.
- *Vía de distribución:* Una vez que se han procesado de manera correcta las imágenes satelitales, estas pasan a formar parte de las bases de datos de los sistemas espaciales que son de acceso libre para cualquier persona, en este punto se puede ya hacer la descarga y uso de dichas imágenes (Romero, 2006, p. 21).

2.5.3.1. Magnitudes físicas componentes de la teledetección

Como ya se ha mencionado la teledetección emplea la tasa de radiación emanada por un objeto o superficie del planeta que es indetectable a simple vista por el ojo humano, todo este proceso se fundamenta en magnitudes físicas que nos permiten a su vez con el software especializado realizar una variedad de estudios con un grado de certeza muy elevado, dentro de las magnitudes físicas que forman parte de estos procesos tenemos:

- *Emisividad:* Hace referencia a la relación entre la emitancia de una superficie u objeto y la que tendría un emisor perfecto a la misma temperatura.
- *Reflectividad:* Relación entre el flujo de radiación incidente y la reflejada por una superficie u objeto.
- *Absortividad:* Relación entre el flujo de radiación incidente y la absorbida por una superficie.
- *Transmisividad:* Relación entre el flujo de radiación incidente y la transmitida por una superficie (Galiano et al., 2010, pp. 33-36).

2.5.3.2. Espectro electromagnético

Cuando el ojo observa un objeto este registra la radiación electromagnética o mejor conocido como luz reflejada de la superficie de un objeto, interpretado en nuestro cerebro como forma, color, distancia etc., el mismo principio se aplica en la teledetección con la gran diferencia que

los sensores captan longitudes de onda que para el ser humano simplemente son imposibles de ver. la capacidad de los sensores satelitales de diferenciar varias firmas espectrales determinará la calidad de información contenida en los píxeles de la imagen digital o más conocida como Ráster , de ahí que los esfuerzos a medida que avanzan los años se centran en generar sensores cada vez más perceptibles que abarquen frecuencias espectrales más amplias y con mayor precisión, la temperatura de la superficie es un factor vital de la emisividad todos los objetos del planeta reflejan en menor o mayor proporción una longitud de onda determinada, por lo que afirmar que la relación entre la temperatura superficial y el grado de emisiones de una longitud de onda es totalmente correcta (López E., 2008, p. 27).

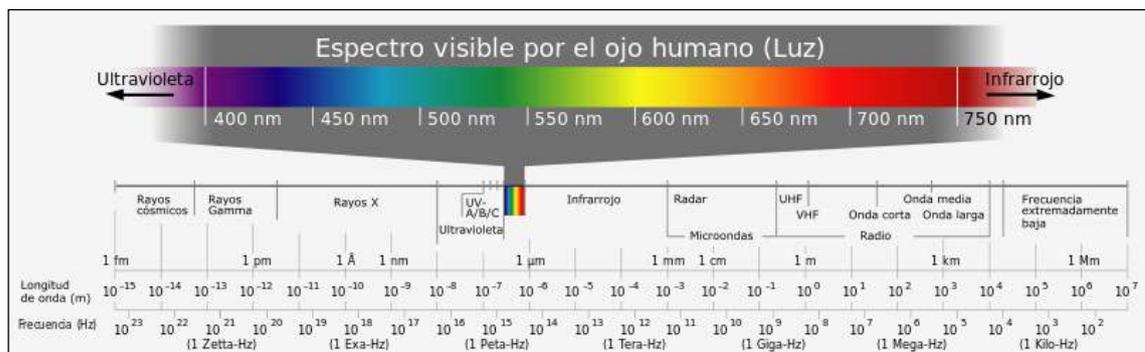


Ilustración 1-2: Espectro electromagnético

2.5.3.3. Bandas espectrales

Las bandas espectrales indican el tipo y cantidad de información que los satélites pueden comprimir para su procesamiento en un software SIG, cada una de estas bandas será diferente y representará rangos específicos del espectro electromagnético, las bandas más comunes empleadas en estudios de teledetección son las siguientes:

- *Espectro Visible:* posee un rango de 0.4 a 0.7 μm a su vez esta banda se subdivide en 3 rangos el azul 0.4 – 0.5 μm , verde (0.5– 0.6 μm) y rojo (0.6 – 0.7 μm).
- *Infrarrojo próximo:* con un rango de (0.7 – 1.2 μm) es muy utilizado para determinar áreas y masas vegetales.
- *Infrarrojo medio:* con rangos que van de (1.3 – 8 μm) esenciales para monitorear los procesos físicos que suceden sobre la superficie terrestre.
- *Infrarrojo lejano o térmico:* con rangos de (8 – 14 μm) incluye la porción emisiva del espectro terrestre.
- *Microondas:* rango a partir de 1nm, usado sobre todo en climatología y variables ambientales sean estas precipitaciones, temperatura u otras (Zavala y Zavala, 2002, p. 35).

2.6. Parámetros para la prospección de aguas subterráneas

2.6.1. Características geológicas

La naturaleza de formación de los acuíferos se ven sujetos por tres parámetros principales, la litología, estratigrafía, y la estructura de los depósitos y formaciones geológicas, empezando por la litología esta hace referencia al componente físico es decir la composición mineral, tamaño y distribución de los sedimentos y como estos se relacionan con otro tipo de rocas para la formación de los sistemas geológicos, luego tenemos a la estratigrafía la cual describe las relaciones entre los sistemas geológicos, además determinan su origen edad distribución y caracterización, finalmente tenemos a las características estructurales, parámetro vital ya que describe la formación propia de los acuíferos detallando sus sistemas geomorfológicos internos, fisuras, pliegues, lugares de deposición y cristalización, todos estos parámetros se evalúan al momento de buscar candidatos posibles de convertirse en un acuífero o acuitardo (Rojas Palacios et al., 2004, p. 38).

2.6.2. Geomorfología

Una de las características esenciales que comparten la mayoría de los acuíferos que hoy en día conocemos es que estos geológicamente se encuentran formados por materiales sueltos tales como arenas, gravas y limos, es sabido que gran parte de los acuíferos existentes se distribuyen en zonas con rocas de naturaleza carbonatada, rocas ígneas, granitos y rocas afines y metamórficas, todas estas variables juegan un papel preponderante en la demarcación de zonas afines a tener aguas subterráneas(Gutiérrez et al., 2004, p. 25).

2.6.3. Depósitos fluviales

Los depósitos fluviales son los materiales establecidos por procesos físicos en canales fluviales o en planicies de inundación, están conformados por sedimentos que se acumulan por acción del arrastre de una corriente hídrica, por lo general la zona donde existe depósitos fluviales tiene una alta posibilidad de albergar agua subterránea la cual puede estar almacenada en acuíferos sean estos dendríticos, fisurados y/o kársticos o mixtos(Gutiérrez et al., 2004, p. 25).

2.6.4. Tipo y cobertura del suelo (LULC)

Otro de los componentes importantes durante la evaluación de zonas predispuestas a tener agua subterránea es el tipo de suelo, lugares con presencia de acuíferos poseen suelos con una favorable

a sufrir fenómenos de infiltración, percolación y permeabilidad, dichos fenómenos implican el paso del agua hacia las capas freáticas del planeta, agua que generalmente viene de la precipitación y escorrentía, el tipo de cobertura del suelo a su vez denota que zonas poseen una buena hidratación reflejándose en tasas elevadas de fertilidad y presencia abundante de vegetación en conclusión tierras con un grado de fertilidad alto suponen que son zonas con buena recarga hídrica mientras que tierras baldías indican una escasa capacidad de retención de agua (Schosinsky N., 2006).

2.7. Proceso de análisis jerárquico (PJA)

El ser humano siempre se ha visto en la necesidad de tomar decisiones, que garanticen el bienestar y la integridad tanto individual como colectiva, inicialmente, las decisiones se limitaban a situaciones particularmente sencillas, destinadas al abastecimiento de recursos, pero, en la sociedad actual, la toma de decisiones tiene una gran complejidad intrínseca, producto de la compleja organización e interacción humana.

La toma de decisiones se ha enfrentado a la escasa disponibilidad y dominio de la información, así como, a la abstracción de las variables que intervienen en un determinado proceso, en consecuencia Thomas Saaty desarrollo en 1980, la metodología de Proceso de Jerarquía Analítica, o AHP, por sus siglas en inglés, que forma parte de las metodologías de Análisis Multicriterio, y aunque inicialmente fue diseñado para facilitar la toma de decisiones dentro del Departamento de Defensa de los Estados Unidos, en la actualidad es aplicado en la gestión empresarial, económica, ambiental e incluso en áreas de investigación (Yepes Piqueras, 2018, párr. 1).

El método PJA permite identificar las prioridades que subyacen a una situación problemática, a través de, la jerarquización de criterios que definen a dicha situación. De forma práctica, consiste en realizar comparaciones pareadas entre los diferentes criterios, en palabras de Moreira-Franco y Ortega-Ordóñez (2021, p. 21) el “el AHP ayuda a capturar aspectos subjetivos y objetivos de una decisión”, con la ventaja de, facilitar la comprobación de consistencia de las evaluaciones, reduciendo a la vez, el sesgo en la gestión de procesos y toma de decisiones.

La metodología tiene con consideración cuatro axiomas:

- **Axioma 1:** La condición de reciprocidad local entre pares de elementos de la matriz ($a_{ij} = 1/a_{ji}$) (Moreira-Franco y Ortega-Ordóñez, 2021, p. 21).
- **Axioma 2:** Homogeneidad local para cada criterio (a_{ij}), para que mantengan coherencia al realizar las comparaciones pareadas (Moreira-Franco y Ortega-Ordóñez, 2021, p. 21).
- **Axioma 3:** Establecer el principio de composición jerárquica al caracterizar la dependencia entre elementos (Moreira-Franco y Ortega-Ordóñez, 2021, p. 21).
- **Axioma 4:** Para alcanzar el cumplimiento de las expectativas se debe asegurar que todos los criterios poseen una representatividad jerárquica (Moreira-Franco y Ortega-Ordóñez, 2021, p. 21).

2.7.1. 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 (Moreira-Franco y Ortega-Ordóñez, 2021, p. 22).

2.7.2. 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 (Moreira-Franco y Ortega-Ordóñez, 2021, pp. 22-26).

2.7.2.1. 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 (Moreira-Franco y Ortega-Ordóñez, 2021, pp. 22-26).

2.7.3. Establecimiento de pesos relativos

Los pesos relativos se establecen mediante una matriz de comparación N elaborada a partir de la matriz de comparación. Los elementos de la matriz de comparación se dividen entre la suma de toda su columna, cada uno, mientras que los pesos relativos se estiman promediando cada fila. Como estufa previo a la clasificación final es necesario sistematizar los resultados mediante la priorización de las posibles alternativas (Moreira-Franco y Ortega-Ordóñez, 2021, pp. 22-26).

2.8. Bases Conceptuales

2.8.1. Agua subterránea.

Se entiende como agua subterránea a toda masa de agua que se encuentra por debajo de la superficie del planeta, almacenada en formaciones rocosas denominados acuíferos, el agua

subterránea posee un ciclo de recarga sujeto a fenómenos de infiltración principalmente de agua lluvia o agua superficial de lagos y ríos (Cerón et al., 2021, p. 48).

2.8.2. Balance hidrológico

Comprende el estudio y caracterización del ciclo del agua durante todas sus fases desde la precipitación, pasando por la evapotranspiración escurrimiento e infiltración mediante la aplicación del principio de conservación de la masa en donde cualquier diferencia entre las entradas y salidas deben reflejarse en un cambio en el almacenamiento de agua (Romero, 2006, p. 13)

2.8.3. Técnicas de teledetección

Es la técnica que permite obtener información a distancia de objetos o superficies sin que exista de por medio un contacto, para lo cual se emplea sensores establecidos en plataformas espaciales los cuales generan un barrido o escaneo a tiempo real de la radiación emitida por los componentes del planeta (Peña, 2010, p. 5).

2.8.4. Bandas satelitales

Indica la franja del espectro electromagnético en la que opera el sensor del satélite, esta cantidad y tipo de energía emitida por los objetos será traducida de forma digital hasta formar una imagen que represente visualmente la información para su posterior aprovechamiento e investigación mediante el empleo de software de procesado SIG (Ezquerro et al., 2017b, p. 6).

2.8.5. SIG

Denominado sistema de información geográfica (SIG) es la integración jerárquica de hardware, software, datos geográficos y personal, diseñado para capturar, almacenar, modelar y representar en todas sus formas la información geográfica referenciada con la finalidad de aplicar metodologías que permitan resolver problemas complejos en diferentes áreas de la investigación (Pedroza y Zúñiga, 2009, p. 28).

2.8.6. Proceso de jerarquía analítica (PJA)

Es un método cuantitativo ejecutado para la toma de decisiones multicriterio que permite generar escalas de prioridades basándose en juicios de valor a través de comparaciones por pares mediante

una escala de preferencia, dichos juicios de valor estarán sujetos tanto a la metodología propuesta por Thomas L. Saaty así como el conocimiento del problema por parte del investigador (Mendoza et al., 2019, p. 349).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Enfoque de investigación

Por el enfoque se trata de una investigación mixta, ya que plantea una hipótesis de trabajo que se desea probar, hace uso de datos cuantitativos así como herramientas de enfoque semicuantitativo sustentadas en el juicio de expertos, puntualmente para el caso del proceso de análisis jerárquico cuyo sustento tiene naturaleza cualitativa, otro componente cuantitativo se refiere al uso de modelos matemáticos para el procesamiento e interpretación de los resultados, aunque es necesario explicar que los hallazgos no se pueden generalizar y deber ser corroborados (Hernández Sampieri et al., 2014, pp. 2-4).

3.2. Nivel de investigación

Según el nivel de profundización en el objeto de estudio, es de tipo relacional, debido a que se trata de identificar la relación que existe entre las variables (parámetros geohidrológicos y espaciales) y la posible existencia de agua subterránea, mediante procesamiento geoespacial.

3.3. Diseño de investigación

Consiste en un conjunto de estrategias metodológicas, útiles para desarrollar los objetivos de investigación, validar o rechazar la o las hipótesis de trabajo; a fin de, brindar una solución al problema de investigación. Para su efecto, hay que identificar el número y tipo de variables que intervienen en el fenómeno de estudio.

- *Variables independientes*

NDVI, precipitación, densidad de drenaje, pendiente y uso de suelo

- *Variables dependientes*

Potencialidad de existencia de agua subterránea

3.3.1. Según la manipulación o no de la variable independiente

Según la manipulación de variables corresponde a una investigación experimental, debido a que se busca determinar cuáles variables independientes, tienen mayor efectividad en la estimación de zonas con potencial existencia de agua subterránea, las mismas, que fueron determinadas teniendo en cuenta los pesos y ponderaciones individuales, para cada una de las cinco variables independientes.

3.3.2. Según las intervenciones en el trabajo de campo

De acuerdo con la intervención es de carácter transversal, puesto que, se piensa abordar la problemática en un tiempo y espacio determinado, y no pretende extender o repetir el estudio de forma periódica, simplemente se trata de una prospección puntual, que pueda servir de base para estudios complementarios o extensivos por parte de terceros.

3.4. Tipo de estudio

Según el tipo, se trata de una investigación de campo, puesto que recoge y procesa información procedente del campo, a partir de la información digital que se encuentra disponible en repositorios, referente a las características geomorfológicas del terreno.

3.5. Población de estudio

La población de estudio que comprende la presente investigación es todo el sistema hidrográfico del Cantón Guamote, incluido sus cuencas e inter-cuencas conformantes, abarcando la superficie total del cantón.

3.5.1. Tamaño de la muestra

El área de la cuenca o microcuenca que este delimitado políticamente por el cantón Guamote Se estudiarán los 1216 km² de superficie del cantón Guamote de la provincia de Chimborazo exceptuando zonas con obras civiles y de infraestructura.

3.5.2. Localización de estudio

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en el Cantón Guamote perteneciente a la provincia de Chimborazo, el cual presenta una extensión aproximada de 1221,8 Km², una altitud

entre los 2.600 a 4.500 m.s.n.m., una temperatura media de 12 °C y con coordenadas geográficas UTM WGS 84-17S, de 754905,380 (Longitud:) y 9786299,910 (Latitud).

Guamote se encuentra delimitado al norte por los cantones: Colta y Riobamba, al sur por el cantón Alausí, al este por la provincia de Morona Santiago y al oeste por el cantón Pallatanga.

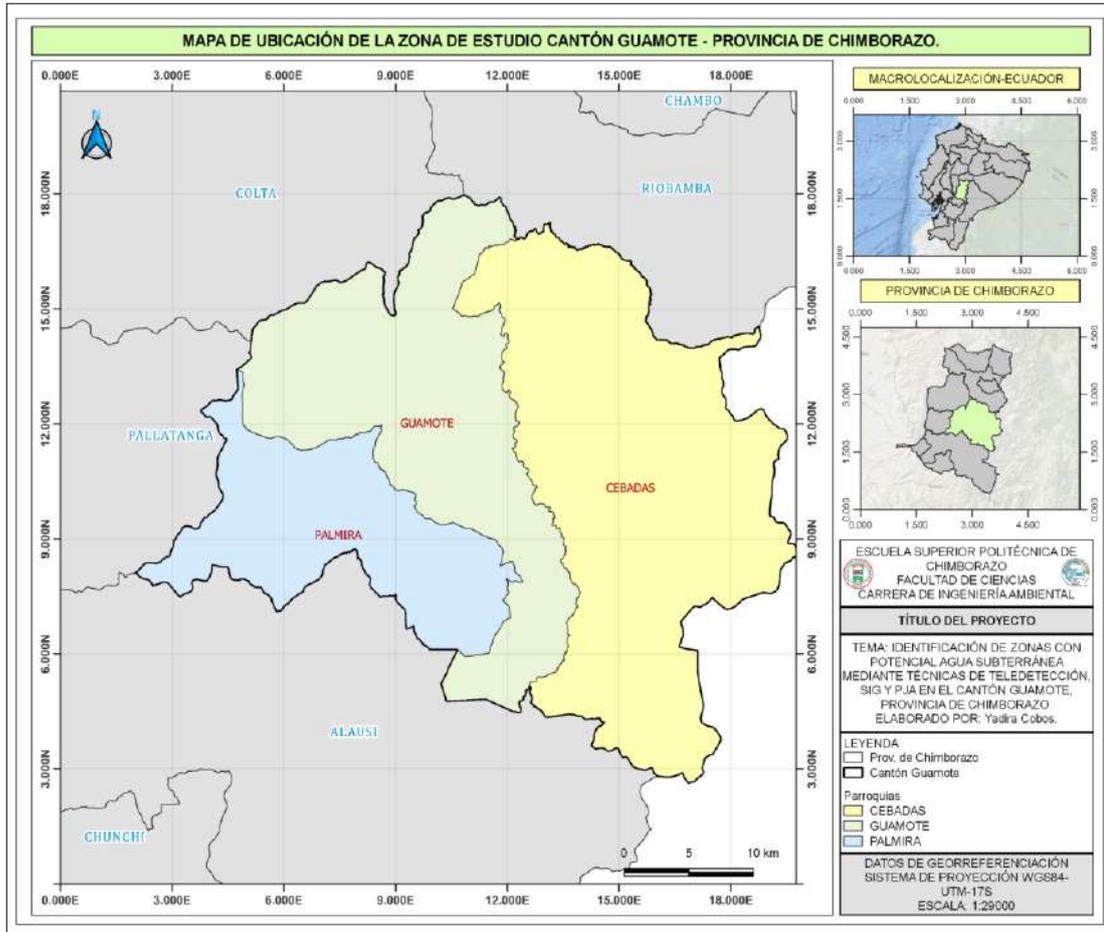


Ilustración 1-3: Delimitación geopolítica del Cantón Guamote (Zona de estudio)

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

3.6. Métodos técnicas e instrumentos de investigación

3.6.1. Software de análisis y procesamiento de imágenes satelitales

La información espacial, capturada por los satélites (teledetección) es codificada, formateada y transmitida, hacia los servidores de diferentes organizaciones, donde es depurada, almacenada en bases de datos, que pueden ser de libre acceso o restringidas; además, el tipo de información capturada, depende del tipo de sensores con los que cuentan los diferentes tipos de satélites, así como también de su sensibilidad, así que, frecuentemente se hace uso información de una misma área, o un mismo fenómeno utilizando diferentes formatos y procesamientos, respectivamente.

Para este cometido, hay una amplia gama de software de procesamiento y análisis espacial disponibles, algunos de paga, otros de uso libre, más o menos sensibles y/o robustos; entre los más difundidos: Gv-SIG, E-foto, Grass Gis, Opticks Ossim. Entre los procesadores de imagen avanzados están: Sentinel toolbox, Erdas imagine, Sopi, SAGA GIS, Whitebox GAT, entre los más populares para la corrección de imágenes y análisis multitemporal se tiene ArcGIS, Qgis (Fernández y Rincón, 2020b, p. 36).

3.6.1.1. ArcGIS

Es una aplicación de SIG robusta, distribuida como paquete de escritorio, generalmente se encuentra en constante desarrollo, aportando nuevas funciones que pueden nacer de las necesidades e ideas de toda la red de usuarios. En su versión profesional, el software permite visualizar los datos, su análisis avanzado, e incluso, el mantenimiento de información en 2D, 3D y 4D. Adicionalmente, posibilita el flujo de información entre sus diferentes productos como: ArcGIS Desktop, ArcGIS Online y ArcGIS Enterprise, además del trabajo en plataformas a través de Web GIS (ArcGIS Pro, 2020, párr. 1).

Los productos generados por ArcGIS son generalmente mapas temáticos, no obstante, detrás de los mapas hay una compleja red de procesos de análisis y modelamiento, lo que permite la trazabilidad, así como la predicción de los fenómenos estudiados

Entre las aplicaciones más usuales del programa se tiene: “la planificación y análisis, administración de activos, comprensión del funcionamiento de las operaciones, operaciones de campo como inspección móvil e implementación de respuestas, investigación de mercado, administración de recursos, logística, educación y divulgación” (¿Qué es ArcGIS?, 2012, párr. 4).

3.6.2. Obtención de los parámetros geomorfológicos de la zona de estudio.

Se partió con la recolección de los insumos digitales para la delimitación de la cuenca correspondiente a la zona de estudio, en este caso se empleó modelos de elevación digital (DEM) descargados de la plataforma EARTHDATA y el archivo shape de la delimitación política del cantón Guamate. La obtención de los parámetros morfológicos de la cuenca a su vez nos brindó información inicial de las condiciones y comportamiento que tiene la cuenca frente a los ciclos hidrológicos generados, variables como pendiente, densidad de drenaje, factor de forma entre otros, nos dieron un indicio previo sobre qué tan apta es la zona para el almacenaje de agua subterránea.

Tabla 1-3: Obtención de la morfología de la cuenca Guamote

Herramienta	Función	Archivo de entrada	Archivo de salida
Reproyectar	Asignamos el sistema de coordenadas correcto para la zona de estudio WGS84-UTM-17S	DEM “modelo de elevación digital”	DEM reproyectado
r. neighbors	Asigna valores de las celdas vecinas aquellos “espacios” que se encuentren sin datos en el DEM	DEM reproyectado	DEM corregido (relleno de pixeles vacíos)
Algoritmos de GRASS r. watershed	Calcula parámetros hidrológicos y morfológicos de la cuenca, asignamos el tamaño mínimo para cada cuenca, tomando como referencia el número de píxel que viene por defecto en nuestro DEM. Marcamos las opciones: accumulation; drainage; basins streams	DEM previamente cortado a la zona de estudio. Información de los pixeles contenidos del DEM	Capas de Salida La capa de acumulación (accumulation) contiene el valor absoluto de cada celda, que es la cantidad de flujo superficial que atraviesa la celda. La capa ráster de drenaje (drainage) contiene la dirección del drenaje indica la dirección de cada celda medida en el sentido contrario a las manecillas del reloj desde el Este. La capa de salida de cuencas (basins) contiene las cuencas que se forman dentro de la zona geográfica, y se identifican por una etiqueta única. La capa de salida de escurrimientos (streams) contiene segmentos de los escurrimientos generados. Los valores son correspondientes a los de las cuencas.
r.to. vect. area	Convertimos los archivos raster a vectores, en este caso a polígonos.	Ráster: accumulation; drainage; basins streams	Archivos en formato shp de la cuenca delimitada.

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

3.7. Modelamiento de los datos empleando software SIG

La investigación a manera general se distribuyó en seis etapas: la primera consistió en la recolección de información satelital desde los geo portales y repositorios de SIG, la segunda etapa empezó con un pretratamiento de depuración y procesamiento de la información seleccionada mediante el uso del software ArcGIS, la tercera se dedicó a ajustar el proceso de análisis jerárquico para determinar los pesos de los parámetros de evaluación, a fin de seleccionar los criterios más apropiados para la elaboración de mapas temáticos en la cuarta etapa, luego, se pasa al análisis e interpretación de los mapas, e información digital complementaria para identificar las zonas con potencial agua subterránea, en la quinta etapa, y finalmente en la sexta, o última etapa se planteó una propuesta con una serie de medidas que van dirigidas a crear mecanismos de protección de las zonas con potenciales aguas subterráneas.

Los factores que determinaron el éxito del estudio se redujeron a la calidad y disponibilidad de los insumos, y a la correcta adopción y aplicación de la metodología de análisis jerárquico.

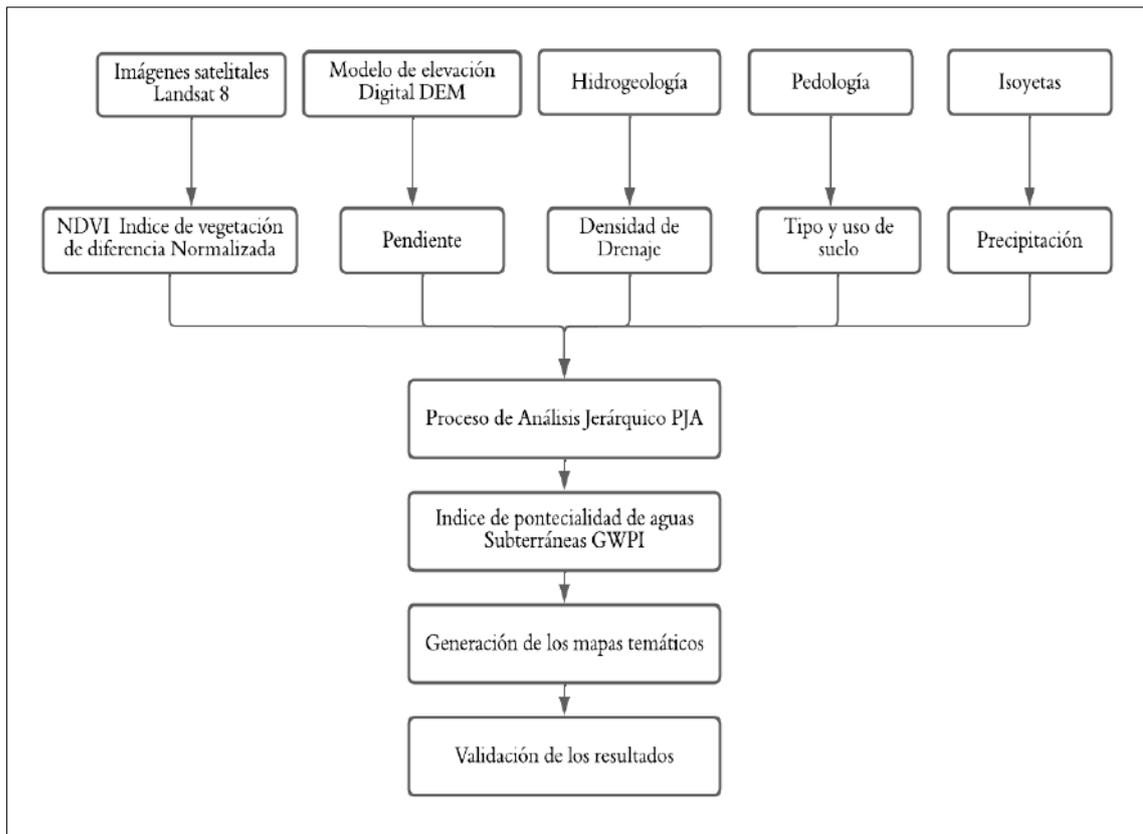


Ilustración 1-3: Metodología para la determinación de las zonas potenciales de agua subterránea

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

3.7.1. *Recolección de la información digital*

Los datos requeridos para el presente trabajo de investigación se obtuvieron tanto de los Geo portales de acceso público del Ecuador tales como Sigtierras, visor geográfico perteneciente al ministerio del Ambiente, Agua y Transición ecológica, para los insumos digitales se utilizó la plataforma página USGS Earth Explorer para la descarga de las imágenes satelitales.

3.7.1.1. *Recolección de imágenes satelitales*

Se inició con la recolección de insumos digitales en este caso las imágenes satelitales específicas de la zona de estudio, se emplearon las imágenes Landsat 8 disponibles en la página USGS Earth Explorer. En la página se seleccionó el área de interés y se descargó el conjunto de imágenes satelitales procurando que estas contengan la mínima cantidad de nubes posibles para evitar interferencias o daños en los cálculos posteriores, el conjunto de bandas Landsat 8 poseen las siguientes características.

Tabla 2-3: Características de las imágenes satelitales Landsat 8 OLI

SENSOR LANDSAT 8 OLI				
Bandas	Espectral (μm)	Espacial (m)	Temporal (días)	Radiométrica (bits)
1	0.43-0.45	30	16	12
2	0.45-0.51	30		
3	0.53-0.59	30		
4	0.64-0.67	30		
5	0.85-0.88	30		
6	1.57-1.65	30		
7	2.11-2.29	30		
8	0.50-0.68	15		
9	1.36-1.38	30		
10	10.60-11.19	100		
11	11.50-12.51	100		

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

3.7.2. Generación de las capas e insumos temáticos para la investigación

3.7.2.1. NDVI

Como uno de los insumos que se ha determinado influyente en la presencia o ausencia de aguas subterráneas tiene que ver con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, a su vez dicha variable nos permitió reconocer las áreas que mantienen una buena cobertura vegetal lo que sienta las bases para presumir que dichas áreas poseen un sistema de acceso al recurso hídrico perenne y elevado (Bhandari et al., 2012, p. 614).

Durante la elaboración de dicho insumo se puede apreciar que las zonas de color verde brillante indicaron zonas con vegetación saludable, mientras que zonas en color rosado o café indicaron zonas urbanas o bien zonas con baja o nula vegetación, la generación de esta capa se lo realizó dentro del software Qgis mediante la combinación de las bandas Landsat 8: (banda 5-banda 4)/(banda 5+ banda 4) (Bhandari et al., 2012, p. 614).

Tabla 3-3: Procedimiento para la generación y clasificación del índice NDVI

Herramienta	Función	Archivo de entrada	Archivo de salida
Reproyectar	Asignamos 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, agregamos las imágenes satelitales reproyectadas para su procesamiento como un nuevo band set 1	Imágenes Landsat reproyectadas en formato .tiff	Visualización de las bandas. En el caso de Landsat se previsualiza un número de 7 bandas

	Asignamos la longitud de onda correspondiente a los datos del satélite descargado.		para sus respectivas combinaciones.
Corrección de las Bandas satelitales	Realizamos la corrección atmosférica de las bandas satelitales cargadas, esto con la finalidad de corregir píxeles perdidos de corrección 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
Conversión a reflectancia TOA y temperatura de brillo	Reflectancia en el Techo de la Atmósfera (TOA), combinamos la reflectancia de la superficie y la reflectancia atmosférica, para reducir la variabilidad entre las bandas de imágenes a través de una normalización de la irradiancia solar. Tomar en cuenta que, en el caso de LANDSAT, los valores de t vienen dados por 0,70; 78,8; 0,85; 0,91 para las bandas 1,2,3,4 mientras que para las bandas 5 y 7 se consideran entre 2.	Bandas de las imágenes Landsat. Archivo MTL (incluido en la carpeta de las bandas descargadas)	Bandas con su consecuente archivo MTL
Pansharpening	Ejecutamos el Pansharpening para combinar las bandas pancromáticas con la finalidad de obtener una mayor resolución en la calidad de la imagen satelital.	Bandas Landsat en formato .tiff	Bandas procesadas con una mayor nitidez.
Temperatura en brillo en Celsius	Ajustamos la temperatura que por defecto en las bandas está asignado en °F, a °C para futuros cálculos.	Bandas Landsat en formato .tiff	Bandas Landsat procesadas.
Corrección atmosférica DOS1	Ejecutamos la herramienta para eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca que se introduce en el sensor y se ve reflejado en la imagen satelital.	Bandas Landsat en formato .tiff	Bandas Landsat procesadas.
Corte de las bandas a la zona de estudio.	Cargamos un archivo en formato shape de la zona de estudio en este caso del cantón Guamote. Usamos dentro del Qgis la herramienta cortar archivo ráster por capa de máscara. Cargamos el archivo ráster en este caso de cada una de las bandas ya procesadas, asignamos la capa máscara siendo esta el archivo shape del cantón Guamote y ejecutamos la función.	Bandas Landsat procesadas shape del Cantón Guamote	Bandas Landsat cortadas a la zona de estudio.
Combinación de las Bandas para el cálculo del NDVI mediante la calculadora ráster	Abrimos la calculadora ráster, verificamos que todas las bandas estén proyectadas al sistema de referencia de trabajo y procedemos a marcar en orden la función: Para Landsat 8: $(\text{banda } 5 - \text{banda } 4) / (\text{banda } 5 + \text{banda } 4)$. En caso de que se trabaje con imágenes Sentinel la combinación en la calculadora de bandas sería: $(\text{banda } 8 - \text{banda } 4) / (\text{banda } 8 + \text{banda } 4)$	Banda 5 Banda 4	Archivo en formato ráster combinado cuya característica principal es que gráficamente se aprecia una gama de colores que van desde el verde, amarillo y rojizos, cabe resaltar que las zonas con colores verdes indican vegetación saludable, por otro lado, zonas con colores rojizos indican baja calidad

			de vegetación o ausencia de esta.
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.

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

3.7.2.2. Precipitación

Según lo descrito por el PDOT del cantón los niveles de precipitación en la zona alcanzan en promedio los 1544,5mm por año , a su vez lluvias de forma cotidiana afectarán en la correcta recarga de los sistemas hídricos del sector, por su contraparte escasos niveles de lluvia pueden influir en el balance hidrológico de la cuenca del Cantón Guamote (Correa V. et al., 2006, p. 76).

Tabla 4-3: Procedimiento para la rasterización y clasificación de la capa precipitación

Herramienta	Función	Archivo de entrada	Archivo de salida
Reproyectar	Asignamos 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, que correspondiente a los promedios anuales de una serie de 25 años	Shape de isoyetas
Corte de la capa	Realizamos el corte correspondiente a la zona de estudio en este caso para el cantón Guamote	Shape isoyetas	Corte del archivo shp del área de estudio
Vec.to rast	Procedemos a 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.
Reclasificamos el archivo ráster	Nuevamente utilizamos la función reclassify de las herramientas ráster y procedemos a clasificar el archivo de isoyetas.	Archivo en formato ráster cortado a la zona de estudio.	Ráster reclasificado

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

3.7.2.3. Densidad de drenaje

Otro de los insumos influyentes en la recarga de aguas subterráneas tiene que ver con la densidad de drenaje la cual según (Cionchi et al., 2018, p. 15), nos indica de forma detallada mediante el uso de un SIG los cauces fluviales y el equilibrio dinámico existente en la cuenca acorde a sus condicionantes hidrológicas geomorfológicas y topográficas, además nos brindó un claro ejemplo de las posibles zonas de acumulación de escorrentía en épocas de invierno así como la distribución

de dichas precipitaciones a través de la cuenca a su vez el estudio previo de la morfología de la cuenca.

Tabla 5-3: Procedimiento para la rasterización y clasificación de la capa densidad de drenaje

Herramienta	Función	Archivo de entrada	Archivo de salida
Reproyectar	Asignamos el sistema de coordenadas correcto para la zona de estudio WGS84-UTM-17S	Añadimos el DEM, modelo de elevación digital	DEM 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 DEM	DEM reproyectado	DEM corregido.
Algoritmos de GRASS r. watershed	Calcula parámetros hidrológicos y morfológicos de la cuenca Marcamos las opciones: accumulation; drainage; basins streams	DEM previamente cortado a la zona de estudio.	Capas de Salida La capa de acumulación: Contiene los valores de flujo superficial reflejados en cada una de las celdas o pixeles de la capa. La capa ráster de drenaje: Contiene la dirección del drenaje y su distribución a través de la cuenca. La capa de cuencas: Representa las unidades hidrográficas de la zona de estudio, nos permite a su vez determinar los parámetros morfológicos de la cuenca. La capa de salida de escurrimientos: contiene segmentos de los escurrimientos generados a lo largo de la cuenca.
Rasterizar	Los insumos arrojados por el SIG son de tipo vectorial, por lo que es necesario pasarlo a ráster, requisito necesario para el análisis multicriterio de todos los parámetros establecidos.	Capas de salida en formato vectorial	Capas de salida en formato ráster.
Reclasificamos el archivo ráster	Los datos obtenidos ya en formato ráster se reclasifican en rangos determinados.	Archivo ráster	Archivo ráster reclasificado.

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

3.7.2.4. Pendiente

Se determinó la variable de la pendiente puesto que está íntimamente relacionada con los fenómenos de escurrimiento e infiltración es decir nos presentó una idea del aporte de los cauces circundantes de la cuenca en la recarga del agua subterránea de ahí la importancia en este estudio del manejo de dicha variable puesto que determinarán los factores físicos que controlan el tiempo del flujo de agua sobre el terreno (Cionchi et al., 2018, p. 12).

Tabla 6-3: Procedimiento para la rasterización y clasificación de la capa pendientes

Herramienta	Función	Archivo de entrada	Archivo de salida
Reproyectar	Ajustamos el archivo DEM al sistema geográfico de estudio	DEM original.	DEM reproyectado.
Corte de la capa	Con ayuda de la herramienta corte por capa de máscara, cortamos el DEM reproyectado a la zona de estudio.	DEM reproyectado.	DEM cortado.
Pendiente	En la caja de herramientas buscamos la herramienta pendiente: Este algoritmo calcula el ángulo de inclinación del terreno desde una capa ráster de entrada. La pendiente es expresada en grados.	DEM cortado	Capa con las pendientes generadas a lo largo de la zona de estudio.
Rasterizar	La capa de pendientes que se encuentra en formato vectorial lo transformamos a formato ráster.	Capas de pendientes en formato vectorial.	Capa de pendientes en formato ráster.
Reclasificamos el archivo ráster	Procedemos a reclasificar el archivo ráster de pendientes.	Capa de pendiente no clasificado en formato ráster.	Capa clasificada en formato ráster.

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

3.7.2.5. Uso de suelo

Finalmente se consideró como última variable el tipo de suelo predominante del sector, en base a la capa vectorial proporcionada por el geo portal SIGTIERRAS, se apreció la distribución del suelo y las áreas preponderantes correspondientes a la zona de estudio, en este caso se determinó si la presencia o ausencia de vegetación puede ser indicador de cuan bien drenada hídricamente es la cuenca así mismo nos brindará una idea de que a una mayor área de vegetación nativa y de cultivo habrá el suministro requerido para el desarrollo y producción de las especies vegetales (Villegas, 2004, p. 70).

Tabla 7-3: Procedimiento para la rasterización y clasificación de la capa uso de suelo

Herramienta	Función	Archivo de entrada	Archivo de salida
Reproyectar	Obtenemos el archivo de uso y tipo de suelo del Geo portal Sigtierras, correspondiente al año 2019-2020	Shape uso y tipo de suelo del año 2019-2020 obtenido del portal Sigtierras.	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	Con la herramienta rasterizar, procedemos a convertir el archivo vectorial en un archivo en formato ráster.	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 se reclasificará nuevamente, es decir cada conjunto de valores de píxeles representaran un tipo de suelo en particular.	Capa de uso y tipo de suelo cortada en formato ráster.	Capa nueva clasificada.

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

3.8. Valoración de los factores que condicionan la recarga y almacenamiento del agua subterránea.

Para facilitar la comprensión de los factores participantes en la recarga de aguas subterráneas, a cada una de las variables se los distribuyó en tres intervalos de clases, alto, medio, bajo; dicha clasificación se presenta en las tablas correspondientes donde se relaciona los intervalos de clase, los valores asignados y la justificación de la valoración.

Tabla 8-3: Criterios de valoración para la asignación de pesos de las variables

Intervalo de clase	Valor Asignado	Justificación
ALTO	3	Los factores que intervienen favorecen totalmente 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 inhiben la recarga y almacenamiento de aguas subterráneas.

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

Una vez definido los valores para cada uno de los parámetros, posteriormente se usó la herramienta de análisis espacial contenido en el Software ArcGIS para asignar los valores mencionados a cada capa ráster que conforma dicho estudio.

3.8.1. Valores de reclasificación para NDVI

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

NDVI	Probabilidad de encontrar aguas subterráneas	Valor de reclasificación	Justificación
Valores grandes (de 0,6 a 0,8) indican vegetación sana, arbustiva, bosques templados etc.	ALTO	3	Zonas con áreas amplias de vegetación sana.

Valores de píxel moderados (de 0,2 a 0,3) representan arbustos y praderas	MEDIO	2	Zonas de vegetación con presencia de suelo expuesto o rocas.
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 presencia de vegetación

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

3.8.2. Valores de reclasificación para precipitación

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

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

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

3.8.3. Valores de reclasificación para densidad de drenaje

Tabla 11-3: Criterio 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	Baja infiltración, pareas impermeables, zonas de la cuenca con pocas posibilidades de captación y almacenaje de aguas subterráneas.

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

3.8.4. Valores de reclasificación para pendiente

Tabla 12-3: Criterio de asignación de pesos para pendiente

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 36 y 90 grados	BAJO	1	Bajo ingreso de agua al sistema

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

3.8.5. Valores de reclasificación para uso de suelo

Tabla 13-3: Criterio de asignación de pesos para uso suelo

Cobertura del suelo/tipo	Probabilidad de encontrar aguas subterráneas	Valor de reclasificación	Justificación
Bosques, vegetación herbácea etc.	ALTO	3	Intercepción baja, este tipo de cultivos crecen en condiciones alternadas en cuanto al requerimiento de agua, no requieren un suministro constante de agua, generalmente dichas especies vegetales suelen sobrevivir largos periodos de tiempo sin contacto con agua.
Cultivos perenes cierto tipo de hortalizas, pastos arbolados, bosques intervenidos o fragmentados.	MEDIO	2	Intercepción media: Tipo de vegetación predominante pastos naturales o cultivados, tienen una moderada retención de agua, y generalmente el suelo donde se asientan dichas especies vegetales tiene un grado de infiltración media.
Tipo de vegetación que guarda relación con una alta intercepción de agua de precipitación, incluye bosques, vegetación endémica, plantaciones forestales etc.	BAJO	1	Intercepción alta: zonas con alta variabilidad de vegetación, generalmente en buen estado y sano, este tipo de plantas herbáceas que gozan con un suministro constante de agua.

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

3.8.6. Metodología de análisis jerárquico aplicado a la prospección de aguas freáticas

El proceso jerárquico analítico JAP o AHP por sus siglas en inglés, fue desarrollado por el matemático Thomas L. Saaty, el cual consiste en la generación de un modelo que permita de forma eficiente y gráfica organizar la información y variables presentes en una investigación. Dicha metodología se ha convertido en la base principal para poder resolver problemas complejos desglosando las variables del problema y solucionándolas individualmente antes de generar su correspondiente conclusión por parte del investigador, en nuestro caso y en base la metodología planteada se propone seguir los siguientes pasos.

3.8.6.1. Formulación del problema

En esta etapa analizamos el problema principal y deducimos los componentes más importantes que engloba el problema, proponemos variables, criterios y alternativas que mantengan relación con el problema propuesto en este caso la determinación de posibles zonas con presencia de agua subterránea.

3.8.6.2. Valoración de los elementos o variables.

Se realizó una revisión bibliográfica con la finalidad de determinar los elementos que más participan en la ausencia o presencia de agua subterránea teniendo como resultados las variables correspondientes a NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, pendiente, densidad de drenaje, precipitación y uso de suelo.

3.8.6.3. Generación de las matrices de comparación

En este punto relacionamos cada una de las variables y se asignó un peso específico de acuerdo con el análisis teórico y del investigador, el objetivo de esta etapa fue determinar la prioridad de cada elemento y el grado de participación de dicha variable en el problema planteado, para el desarrollo de la matriz se tendrá en consideración los juicios sobre la preferencia – Tasa numérica propuestos por Saaty (Saaty, 1990).

Tabla 14-3: Escala de Medidas de 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: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

Debemos resaltar que si bien la escala de medida propuesta por Saaty de (1-9) esta puede exponerse a ciertas modificaciones por parte del investigador y adaptarla a las condiciones y variables que se esté manejando, se tomó muy en cuenta la información generada dentro del software Gis, durante el análisis multicriterio de los insumos ráster elegidos como variables influyentes en el apareamiento de agua subterránea.

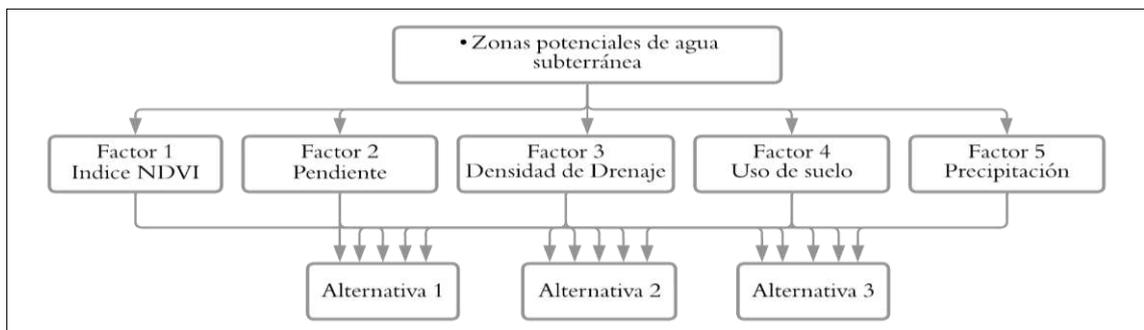


Ilustración 3-2: Estructura PJA para la determinación de zonas potenciales de agua subterránea

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

3.8.7. Generación del mapa de zonas potenciales de agua subterránea

Para la determinación de las zonas potenciales de agua subterránea se utilizó el método de análisis multicriterio dentro del software SIG además de la metodología PJA para la asignación de los pesos normalizados para cada capa o insumo elegido. El nivel jerárquico de cada capa se obtuvo mediante la escala (1-9) establecida por Saaty (Saaty, 1990).

Una vez obtenido la matriz de comparaciones pareadas de cada una de las variables, se procedió al cálculo del peso normalizado (W) para cada capa, para lo cual se dividió el valor de cada celda para la sumatoria de las columnas, luego se procedió a calcular el valor medio de cada fila.

Para verificar la validez de la metodología implementada se determinó la relación de consistencia (CR) en base a la ecuación.

Ec. 1

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

Donde:

RI es un índice aleatorio de consistencia que depende del orden de la matriz, en este caso para el orden $n=5$,

$RI=1,12$ (Saaty, 1990) , y CI es el índice de consistencia el cual puede ser expresado utilizando la

Ec. 2

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

Donde:

n es el orden de la matriz, en este caso $n=5$, y λ_{max} es el mayor valor propio de la matriz. El valor de CR deberá ser menor que 0,10; para que los pesos normalizados sean consistentes

3.8.7.1. Identificación de zonas con potencial agua subterránea

En base a lo descrito por (Espinosa y Escobar, 2018, p. 100), el GWPI es una magnitud adimensional producto de la suma de los pesos relativos, W y WF es decir de las variables que como investigadores hemos propuesto que afectan al indicio de aguas subterráneas en un lugar determinado, para lo cual se realizó una jerarquización de las variables para calcular su peso normalizado, este coeficiente se obtuvo calculando los criterios que consideramos esenciales para la formación de aguas subterráneas mediante análisis multicriterio baso en PJA y SIG

El GWPI a su vez se determinó mediante una combinación de tipo lineal ponderada en base a la siguiente ecuación:

$$GWPI = \sum \sum (W_i X_j)$$

Donde:

W_i es el peso normalizado de la capa temática j , X_j es el valor de rango de cada clase con respecto a la capa j , m es el número total de capas temáticas, y n es el número total de clases en una capa temática.

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

Donde:

Us: Uso de suelo

Pr: Precipitación

Dd: Densidad de drenaje

Pt: Pendiente

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

Los factores W corresponden al peso normalizado obtenido para cada capa temática, y wf es el peso normalizado para cada categoría en cada capa temática.

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

La propuesta consistió en identificar y categorizar jerárquicamente, las zonas de presunta agua subterránea con mayor potencial de vulnerabilidad, ante la posible contaminación y/o degradación por actividades antropogénicas.

Haciendo uso de la capa de uso de suelo, y la capa de los acuíferos se generaron puntos críticos con potencial de degradación.

Se identificaron los factores de riesgo, y se presentó una serie de medidas para prevenir y/o atenuar su afectación.

Se planteó una corroboración geotécnica en estudios futuros, con el fin de establecer programas y planes de manejo y conservación de los sistemas de agua subterránea del cantón Guamate.

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Descripción geomorfológica de la zona de estudio

Tabla 1-4: Resumen morfológico de la Cuenca del Río Guamote

Parámetros morfométricos generales		
Parámetro / unidades	Símbolo	Valor
Perímetro (km)	P	217,71
Área (km ²)	A	1220,31
Longitud máxima o Longitud Axial(km)	LM	40,49
Longitud cauce Principal (km)	LCP	50,89
Ancho de la Cuenca (km)	AC	30,138
Desnivel Altitudinal (m)	DA	4337
Parámetros morfométricos asociados a la forma de la cuenca		
Parámetro / unidades	Símbolo	Valor
Factor Forma	FF	0,74
Coefficiente de Compacidad	KC	1,75
Coefficiente de Circularidad	CC	0,32
Parámetros morfométricos asociados a la forma del relieve		
PARÁMETRO / UNIDADES	SÍMBOLO	VALOR
Cota máxima (msnm)	cmax	4587
Cota mínima (msnm)	cmin	2850
Altitud media (msnm)	Am	3626,78
Altitud más frecuente (msnm)	Af	110,1
Pendiente promedio de la Cuenca (%)	Smed	9 %
Altitud mayor del Cauce	Amc	4521,20
Altitud menor del Cauce	Amec	2323,10
Parámetros morfométricos asociados a la red de drenajes		
PARÁMETRO / UNIDADES	SÍMBOLO	VALOR
Longitud total drenajes (km)	Lt	171,05
Densidad de Drenaje	D	0,140
Frecuencia de Drenajes	F	0,015
# Drenajes orden 1	Nº D	22
Coefficiente de torrencialidad	Ct	0,018
Pendiente del Cauce (%)	PC	4%
Orden de la Cuenca	OC	2

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

La geomorfología de la cuenca del río Guamote fue evaluada a través del procesamiento de información geoespacial, obteniendo que la cuenca posee un área de 1220,31 km², acompañada de un perímetro de 217,71 km, cuyo cauce principal tuvo una longitud de 50,89 km. En cuanto a los resultados de los parámetros asociados a la forma de la cuenca, se determinó un factor de forma de 0,74 característico de una cuenca ensanchada, poco susceptible a las avenidas, una

compacidad o índice de Gravelius de 1,75, que al ser mayor a 1,5 sugiere una forma entre oval oblonga a rectangular oblonga, y una circularidad de 0,32 que también corresponde a una cuenca ensanchada (Cruz Romero et al., 2015, p. 32).

De los parámetros que se asocian a la forma del relieve, quizás el más importante correspondió a la pendiente media de la cuenca, que este caso fue del 9 % lo que indicó que estamos frente a una cuenca medianamente accidentada, también se determinó una diferencia de cotas de aproximadamente 4300 metros, y altura de 2198 metros, para el relieve y el cauce, como corresponde. Mientras que, a partir de los parámetros vinculados a la red de drenajes se destacó, en primer lugar, los 171,05 km de longitud total del drenaje, con una densidad de 0,14 que conforme a lo enunciado por Cruz Romero et al. (2015, p. 32) son valores de una cuenca con drenaje limitado o deficiente, además, su coeficiente de torrencialidad tuvo un valor de 0,018, lo que se asocia con una baja susceptibilidad a la erosión y un alto riesgo a sufrir inundaciones, para concluir con este apartado, se puede indicar que la cuenca es segundo orden, compuesta por 22 drenajes de primer orden, con una pendiente del cauce de 4 %.

A través del modelamiento espacial de la cuenca del río Guamote, se obtuvieron una serie de parámetros que permiten analizar la dinámica hidrológica de la cuenca, lo cual es importante, para tener una mejor idea de la capacidad de recarga y almacenamiento de agua subterránea que puede tener dicha cuenca (GaspariVagaríaet al., 2012, p. 144).

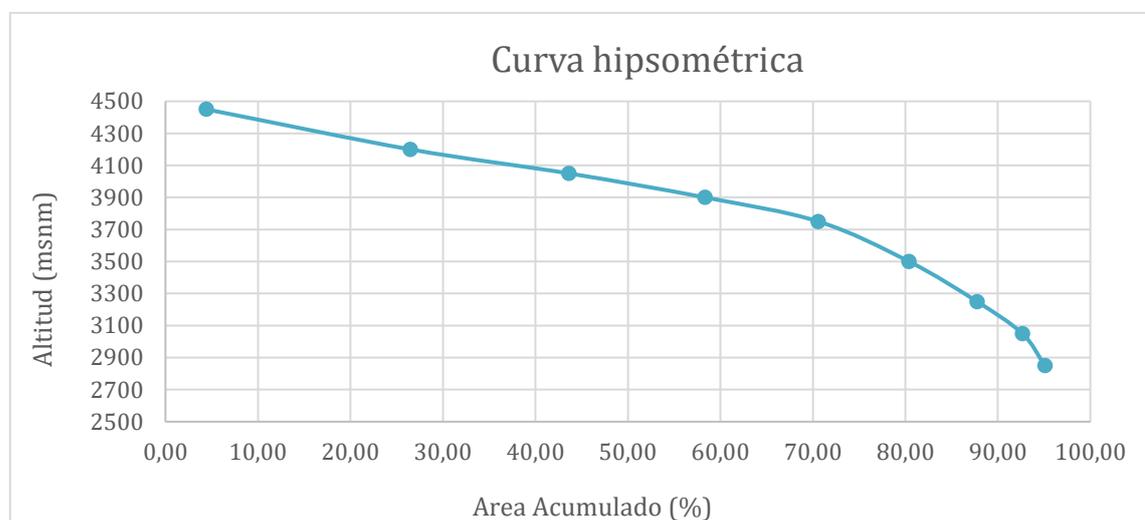


Ilustración 1-4: Curva hipsométrica de la cuenca del Río Guamote

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

La curva hipsométrica representó la distribución del área total de una cuenca, con respecto a su altitud, cuyas cotas estuvieron comprendidas entre los 4587 a 2850 msnm, además, su forma corresponde a un río maduro.

De acuerdo con Hernández-Juárez et al. (2020, p. 10) entre las variables de la cuenca que determinan el potencial de recarga hídrica de los depósitos subterráneos se encontraron: la litología, el suelo, la forma de cuenca y su pendiente, aunque en ocasiones también se considera a la vegetación, debido a la influencia que tiene sobre la condensación y precipitación del vapor de agua del aire. La pendiente media de la cuenca del Río Guamote de 9 %, se encuentra en el intervalo de 5 a 15% de pendientes medianamente inclinadas, asociado a una alta posibilidad de recarga (Hernández-JuárezMartínez RiveraPeñuela-Arévalo y Rivera-Reyes, 2020, p. 11). Así mismo en el estudio de (Chamorro y Rosales, 2021, p. 7) se determinó que la pendiente del acuífero Yuyococha se encontraba entre el 5 al 12 %.

4.2. Resultados Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

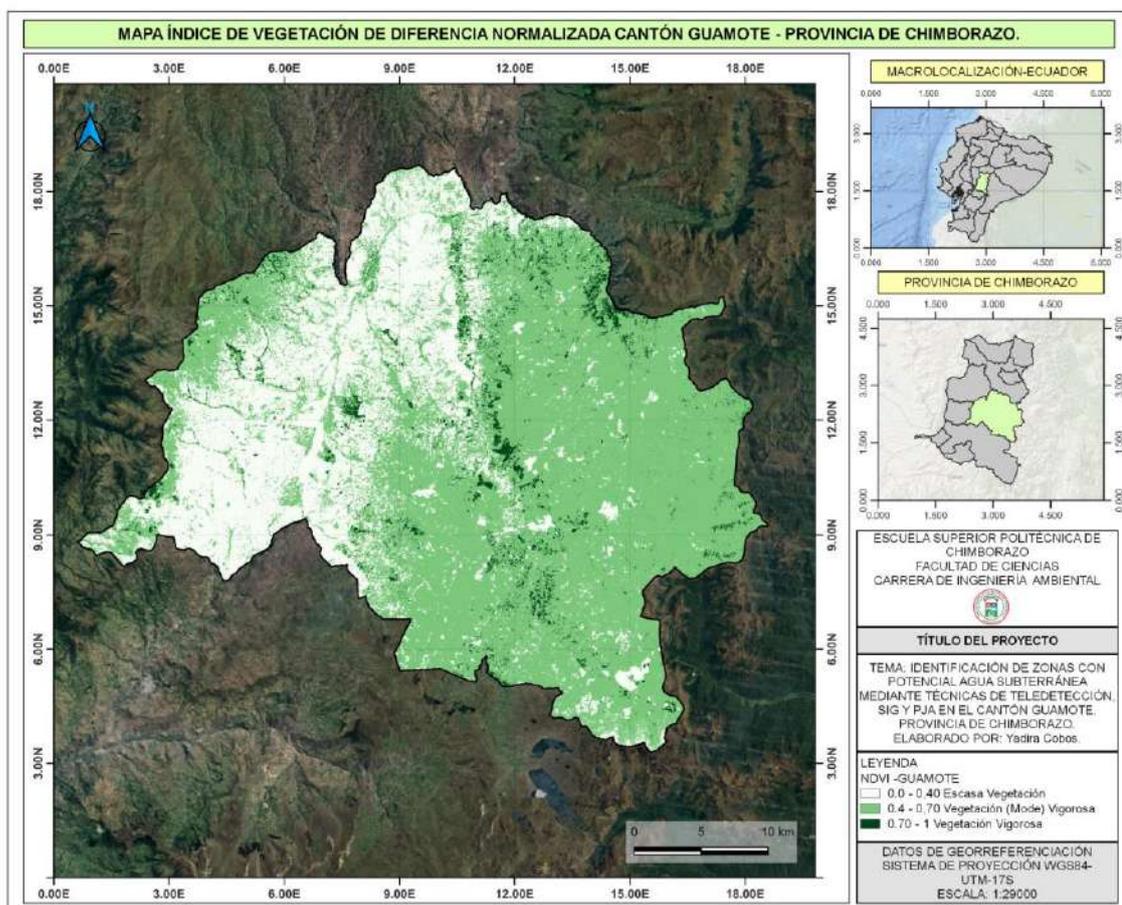


Ilustración 2-4: Ráster reclasificado para NDVI

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), reclasificado mostró una predominancia de la zona con vegetación moderadamente vigorosa en gran parte del cantón, las estadísticas zonales del ráster se dividieron en función de la probabilidad de encontrar agua

subterránea presente en la zona de estudio, arrojando 3 clases (Alto, Medio, Bajo), es decir las zonas que presentaron valores NDVI cercanos a 1 fueron áreas que reunieron mejores condiciones para albergar fuentes de agua subterránea.

En cuanto al porcentaje de área ocupada expresada en km² para cada clase se obtuvo que dentro del rango bajo representado en el mapa con un color blanco correspondió a las zonas con escasa vegetación, suelo desnudo o erosionado con un rango de píxeles comprendidos entre 0,0 a 0,40, el área estimada fue de 395,042 km², posteriormente la siguiente clase (Media), perteneció a la vegetación medianamente vigorosa con un rango de valores comprendidos de 0,4-0,70 y una superficie de 785,41 km², finalmente las zonas con alta probabilidad de encontrar agua subterránea fueron aquellas que mantuvieron una vegetación sana representado en los colores más oscuros la vegetación vigorosa se estableció en los rangos de 0,70 a 1 con una superficie de 400,04 km².

Se observó que gran parte de la vegetación recayó en moderada y altamente vigorosa se estableció en la cara este de la cuenca, caso contrario la zona oeste de esta presentó una franja marcada en color blanco donde se presume sean las zonas con suelo erosionado, o bien parcelas carentes de una vegetación sana.

En base a lo indicado por (Ortiz et al., 2012), en su estudio “Estimación del nivel freático a partir del NDVI Landsat en La Pampa del Tamarugal”, menciona que los valores de NDVI mayores a 0,7 son indicadores de la presencia de un flujo de agua a nivel freático necesario para el sostenimiento de la calidad vegetal y herbácea de la zona, particularmente el cantón Guamote su índice de NDVI predominante estuvo entre 0,4 a 0,70 coincidentes con las zonas que mayor carga arbórea y arbustiva mantuvieron, lo que supone que la vegetación de esta zona tuvo un constate suministro de agua y minerales que favorecieron la vigorosidad de las plantas.

En cuanto a la relación del NVDI nuestros resultados demostraron que la cuenca tiene una predisposición de almacenaje de agua subterránea en la región este del cantón.

4.3. Resultados precipitación para el Cantón Guamote

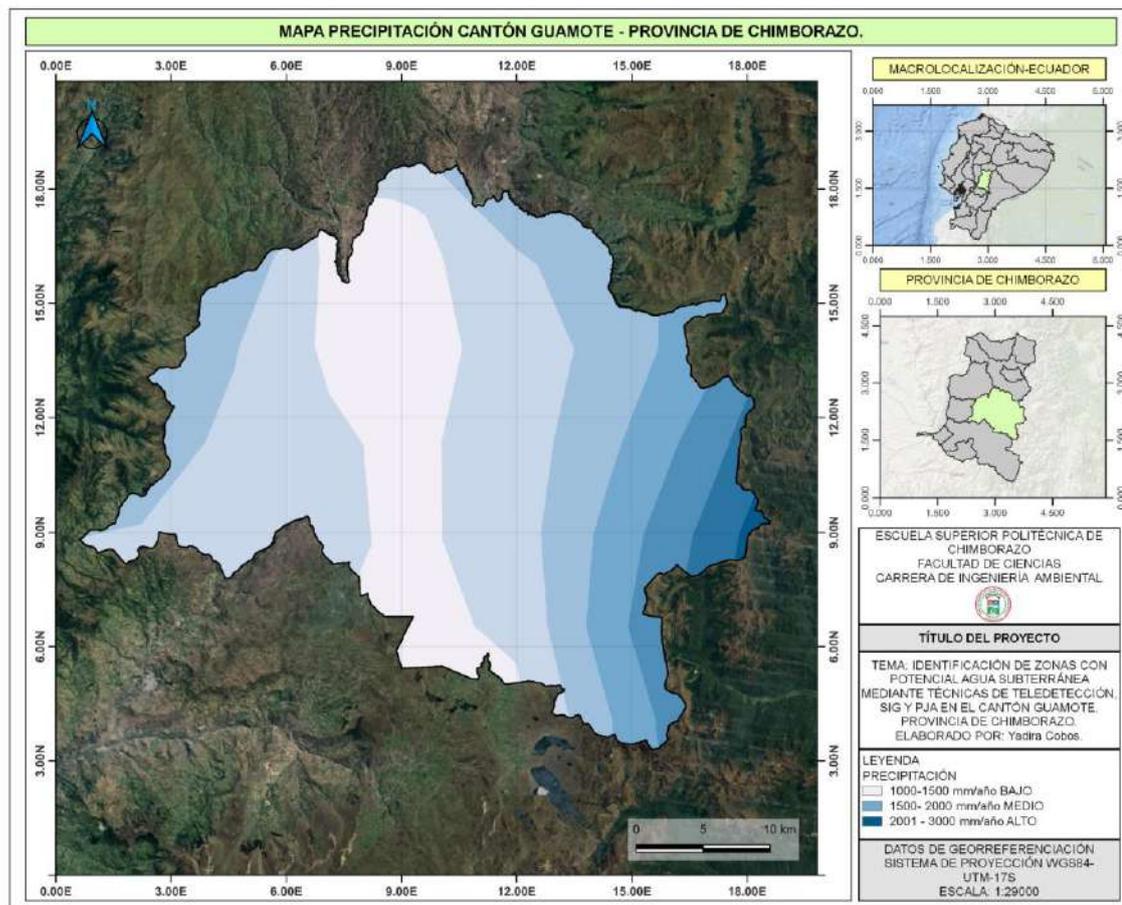


Ilustración 3-4: Ráster reclasificado para volumen de precipitación

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

Se clasificó el ráster con los datos de precipitación en 3 rangos (alto ingreso de agua al sistema, ingreso medio de agua al sistema, bajo ingreso de agua al sistema), los resultados mostraron que la franja representada en color blanco alcanzaron el menor volumen de precipitación con rangos comprendidos de 1000 a 1500 mm/año, seguidamente la zonas con un rango medio de precipitación se mostraron con franjas celestes los cuales mantuvieron regímenes de precipitación de 1500 a 2000 mm/año, finalmente los lugares que mayor volumen de lluvia se ubicaron en las bordes exteriores de la cuenca, representados con un color azul oscuro, estas zonas mantuvieron volúmenes de precipitación de 2001 a 3000 mm/año. En base a lo descrito por (Lapperre et al., 2022), en su trabajo “Temporal and spatial variability of cross-fault groundwater-level differences: the impact of fault-induced permeability reduction, precipitation and evapotranspiration” menciona que los regímenes de precipitación y periodicidad fueron fundamentales para la recarga hídrica del sistema acuífero, los resultados de su estudio mostraron que las zonas con valores mayores a 2500 mm/año de precipitación tuvieron una predisposición más favorable para albergar acuíferos, en nuestro caso la cuenca en su mayoría obtuvo un régimen

de precipitación de 2001 a 3000 mm/año variable entre cada estación del año que si bien es favorable para la recarga hídrica, esta dependerá de la estación y época del año en el que se encuentre.

4.4. Resultados densidad de drenaje para el Cantón Guamote

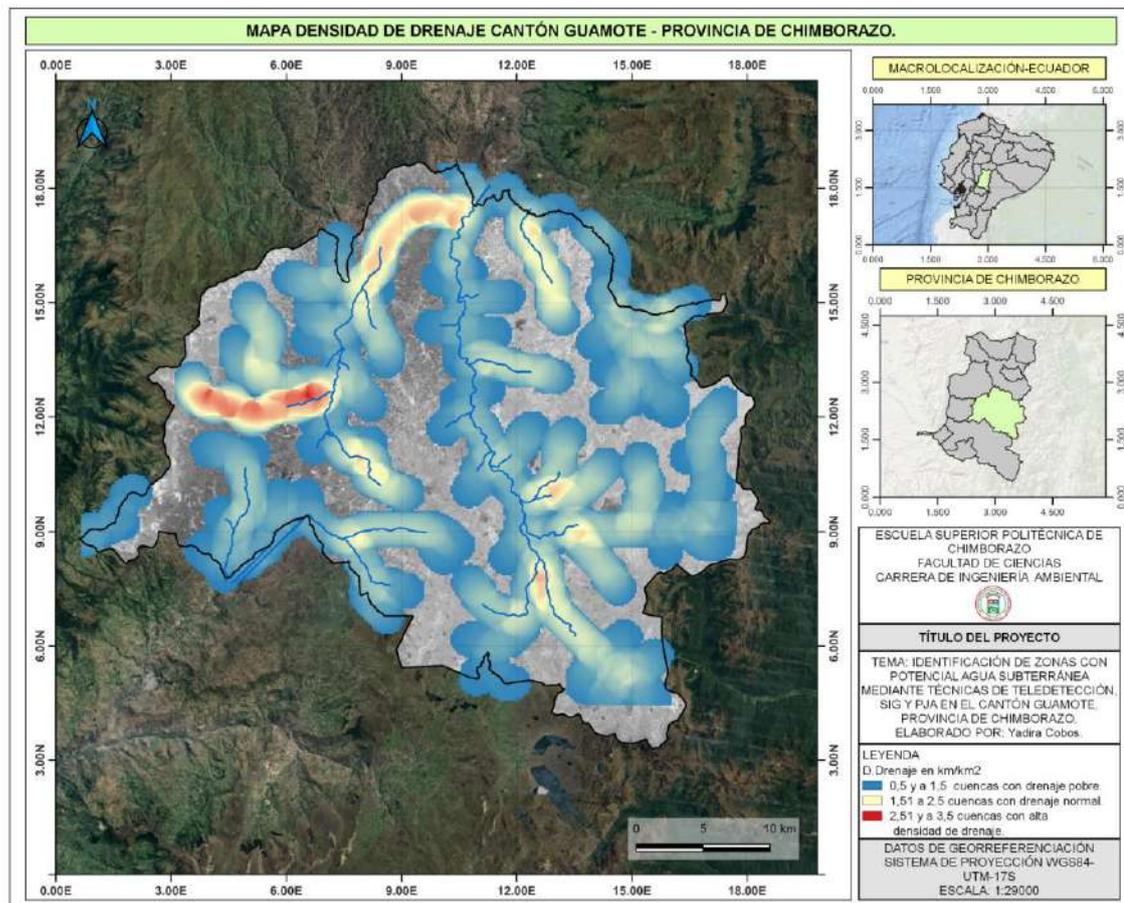


Ilustración 4-4: Ráster reclasificado para densidad de drenaje

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

Los resultados de densidad de drenaje se clasificaron en 3 grupos cuencas con un pobre drenaje, Cuencas con un drenaje normal y Cuencas con alta densidad de drenaje, es importante resaltar que en este punto las cuencas con un drenaje pobre favorecerán el almacenamiento de aguas subterráneas, a diferencias de zonas bien drenadas las cuales favorecerán los fenómenos de escorrentía e infiltración, son áreas impermeables y estas zonas de la cuenca mantuvieron bajas posibilidades de captación y almacenaje de aguas subterráneas.

Es así que la cuenca en su gran mayoría mantuvo zonas con un drenaje pobre favorable al almacenamiento de aguas subterráneas con rangos de 0,5 a 1,5 km/km² visualmente representados en zonas de un color azul, seguidamente las zonas con rangos de 1,51 a 2,5 km/km² pertenecientes

a cuencas como drenaje normal se representaron en el mapa con un color amarillo observándose una presencia de este tipo de drenaje no muy abundante y finalmente las zonas con mayor densidad de drenaje y menos aptas para la presencia de agua subterránea comprendieron las zonas en color rojo de la cuenca las cuales son muy escasas mismas que estuvieron en rangos comprendidos de 2,51 a 3,5 km/km².

En base a lo descrito por (Gaspari et al., 2012, p. 10) en su trabajo “Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina” refiere las condiciones para el balance y recarga hídrica de una cuenca, esto tuvo que ver con la cantidad de entrada y de salidas de masa a través del sistema, en tal sentido la zonas con un drenaje pobre tuvieron valores de 2,0-2,5 km/km², dicho sea de paso favorable para la recarga acuífera puesto que eran zonas con elevada infiltración y baja escorrentía, como segundo rango indicó los valores mayores a 3,0 km/km² que eran zonas con baja infiltración, generalmente donde se asientan los sistemas de cultivos, dichas zonas tendrán una menor captación y almacenaje de aguas subterráneas, en nuestra zona de estudio se apreció que es una cuenca con bajos niveles de escorrentía lo que favorecerá la creación y almacenaje de agua dentro de los posibles sistemas acuíferos que la cuenca pueda tener.

4.5. Resultados de las pendientes para el Cantón Guamote

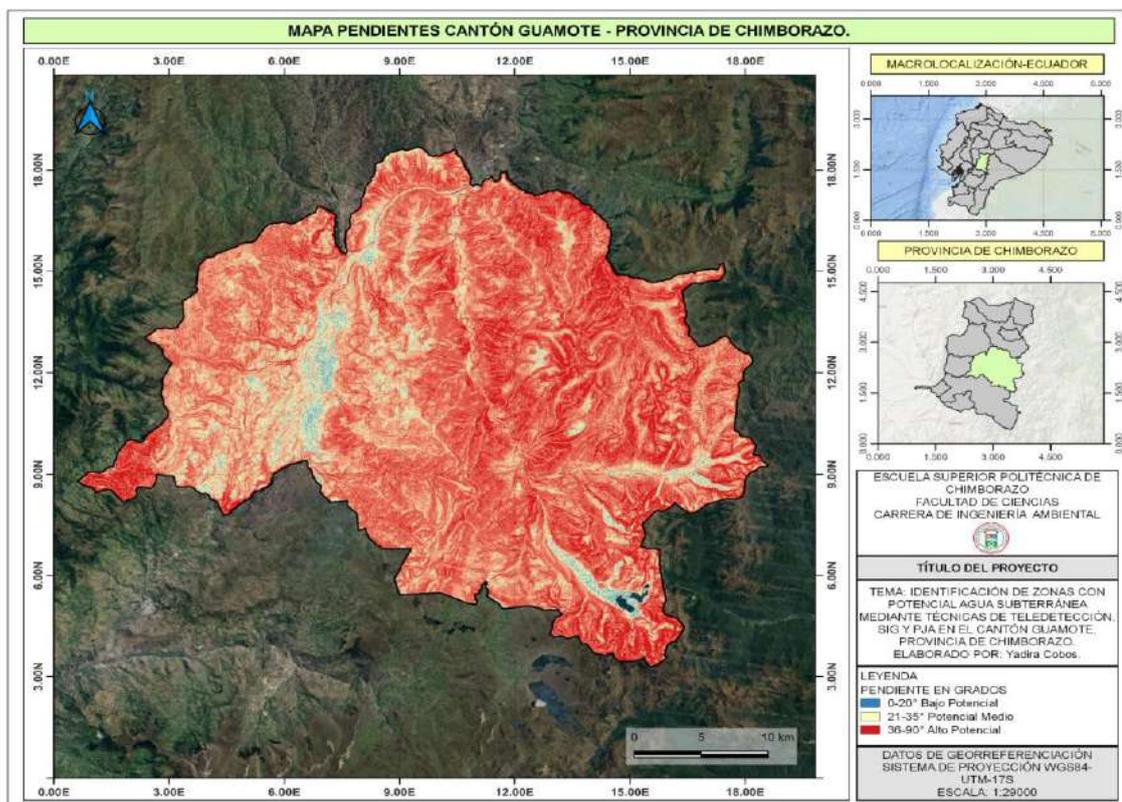


Ilustración 5-4: Ráster reclasificado para pendiente en grados

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

En cuanto al factor pendiente pudo mencionar que es uno de los factores más importantes a la hora de determinar la recarga hídrica subterránea, la pendiente a su vez se ha relacionado con el coeficiente de infiltración, erosión del suelo, vegetación entre otros puesto que a mayor infiltración mayor zona de recarga hídrica, y en una zona donde la pendiente sea menor y mayor la cobertura vegetal la velocidad de escurrimiento se retrasará provocando una mayor infiltración de agua superficial.

los resultados se dividieron en 3 clases tomando en consideración los paisajes planos con pendientes entre 0 y 20° representados en color azul dentro del mapa, seguidamente se obtuvieron valores de 21 a 30° asignados a un paisaje ondulado o escarpado con un potencial medio de almacenamiento de aguas subterráneas representados en un color amarillo, finalmente las zonas con mayor potencial correspondieron a las zonas en color rojo con pendientes entre 36 a 90° favorables para el desarrollo de aguas subterráneas, es así que tomando como referencia el estudio de (Domingo-Santos et al., 2008), “Estimación de la capacidad de retención de agua en el suelo” refiere a la pendiente como uno de los parámetros principales durante la recarga hídrica es así que los suelos con pendiente elevadas presentaron un mejor estado vegetativo, frente a los que se encontraban en zonas con poca inclinación

los suelos sobre pendientes fuertes presentaban un mejor estado de la vegetación que los que se encontraban en zonas de poca inclinación, sin embargo, es notorio resaltar que en su estudio resaltó que una pendiente elevada sin una presencia vegetal o arbustiva notable, la pendiente elevada favorecía hasta en un 28% el fenómeno de escorrentía de ahí que dependerá mucho este parámetro de las condiciones naturales y de vegetación de la zona de estudio, para la cuenca del cantón Guamote se observó que la gran mayoría de su superficie tuvo una pendiente de 36 a 90° que si bien es apta para la posible presencia de acuífero, dicha variable deberá ser considerada con otras variables para tomar una decisión acertada frente al nivel de importancia que tuvo este parámetro.

4.6. Resultados uso y cobertura del suelo Cantón Guamote

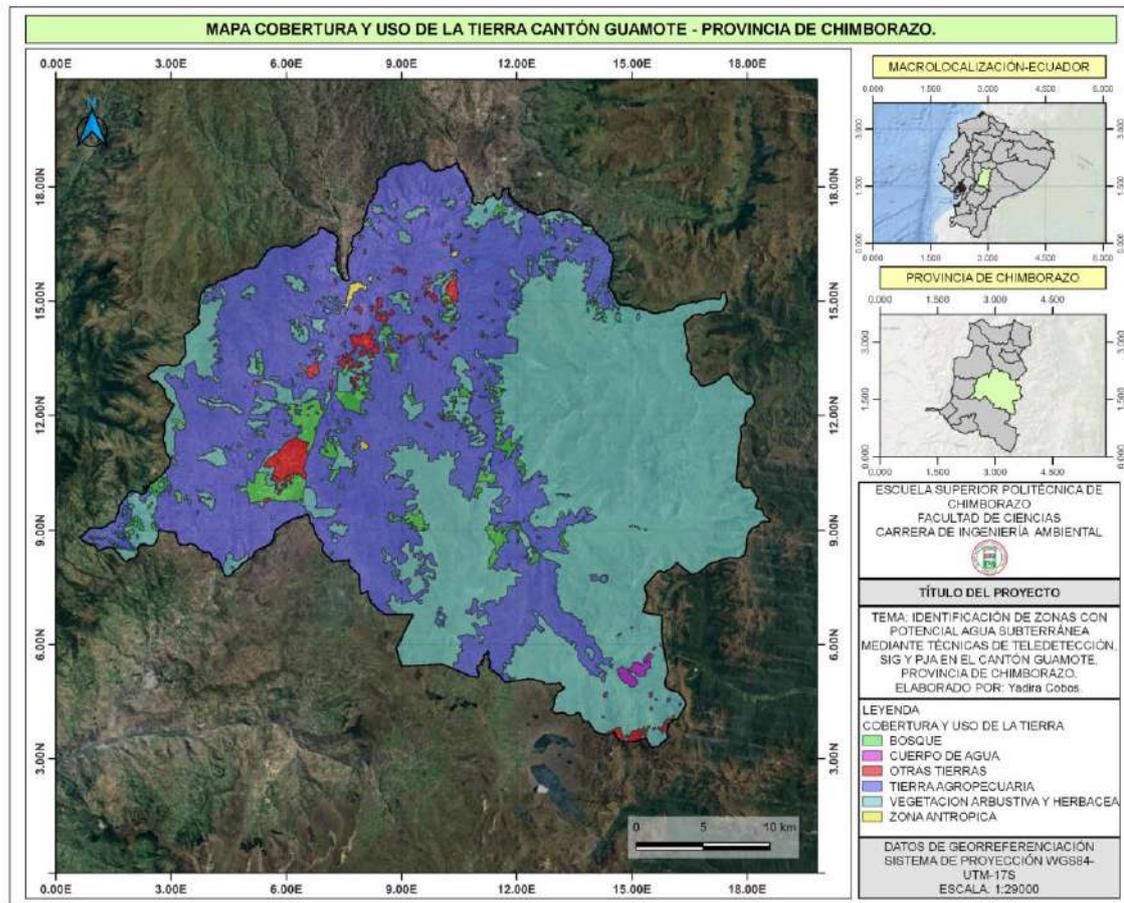


Ilustración 6-4: Ráster reclasificado para uso y cobertura de suelo

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

La cobertura y uso de la tierra en el Cantón Guamote presentó 6 subdivisiones, el cálculo de la superficie mediante SIG indicó que la cobertura bosques tuvo un área de 4131,737 m², los cuerpos de agua presentan un área de 371,547 m², para otras tierras y tierra agropecuaria la superficie fue de 1902,647 y 55660,554 m² respectivamente, finalmente la vegetación arbustiva y herbácea alcanzó un área de 59740,199 m² siendo la cobertura con mayor área del cantón y finalmente la zona antrópica con 223,829 m². Comparando el PDOT y los datos ofrecidos por el MAGAP el cantón Guamote ha sufrido una pérdida progresiva de bosque autóctono y de vegetación arbustiva, el avance de las actividades agrarias y agropecuarias ha favorecido que las zonas de cultivo estén ganando mayor espacio sobre todo en la franja Este del cantón.

4.7. Codificación en el árbol de decisiones

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

4.8. Determinación de los pesos normalizados para cada capa temática

La jerarquía de cada capa temática se presentó en la tabla correspondiente, obteniéndose luego para cada una, con la matriz de comparaciones pareadas

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

Se generó la matriz de asignación de pesos normalizados para cada variable participante en la determinación de zonas con posible presencia de agua subterránea en el cantón Guamate, los pesos se asignaron en función a la revisión bibliográfica y al juicio de valor propuesto teniendo como resultado que las variables NDVI, precipitación y densidad de drenaje fueron los parámetros más importante a la hora de definir la recarga hídrica de un sistema, mientras que la variable pendiente en este caso se ubicó en 4to lugar debido a que si bien teóricamente también es esencial en la presencia de acuíferos, está deberá ser analizada de mejor manera conociendo en campo el perfil del terreno el tipo y uso de suelo, así como el grado de vegetación predominante del sector. finalmente, la variable con menor influencia se asignó al uso y cobertura de suelo ya que este parámetro es un reflejo del grado de conjunción de las variables anteriormente descritas.

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

El resultado de la asignación de pesos normalizados para cada variable fue de 0,8 indicando que existe un nivel de correlación satisfactoria y que los pesos asignados fueron consistentes tal como lo indica (Saaty, 1990).

4.9. Identificación de zonas con potencial de agua subterránea

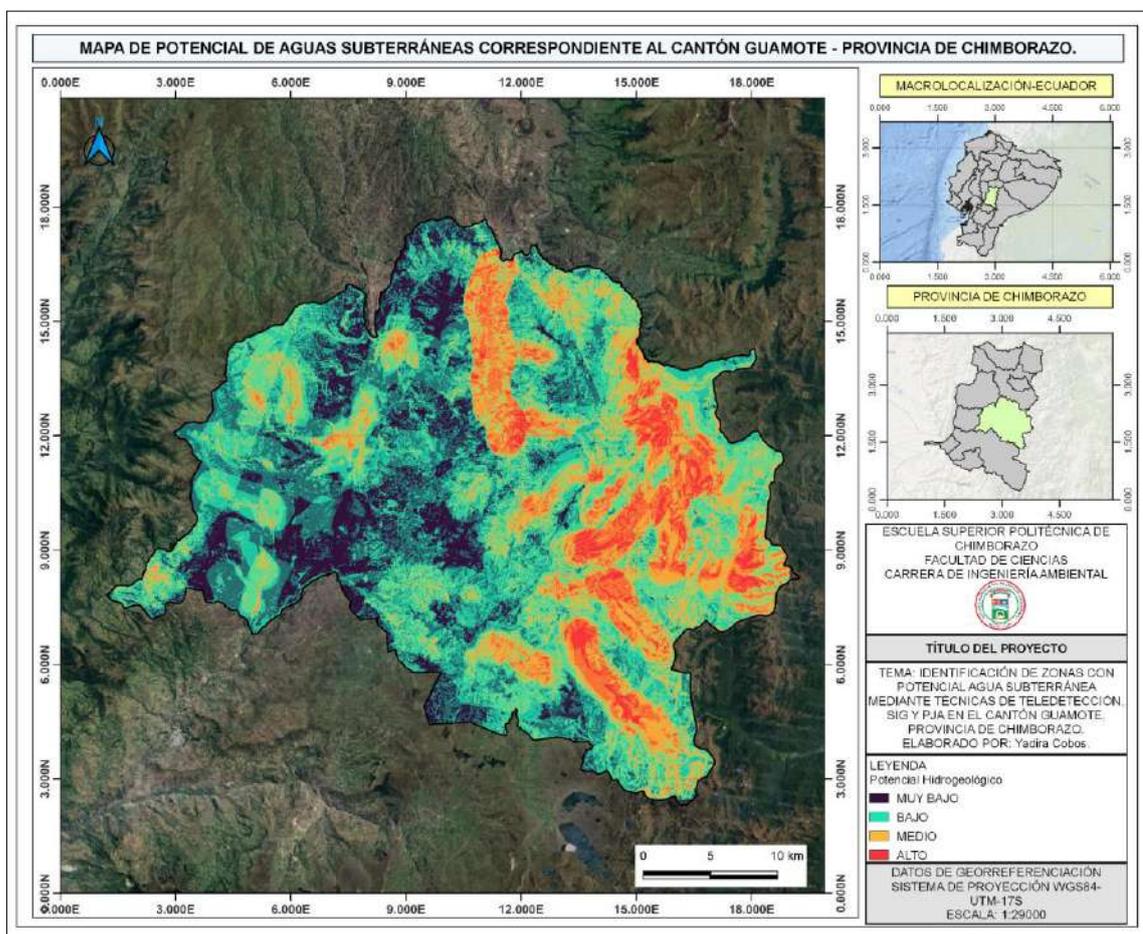


Ilustración 7-4: Ráster final zonas potenciales de agua subterránea

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

Se obtuvo el mapa con las posibles zonas potenciales de agua subterránea del área de estudio perteneciente al cantón Guamote, basado en las cinco capas temáticas que sirvieron de base para el procesamiento a través del software SIG y la aplicación de la metodología JAP, es así que se observó que las áreas con muy baja potencialidad de encontrar agua subterránea comprendieron las áreas de media y baja permeabilidad, una densidad de drenaje pobre representadas en color

negro, cabe destacar que dichas zonas por medio de la observación de las imágenes satelitales comprendieron las zonas erosionadas y escarpadas de la parte norte de la cuenca, así mismo se ubican las zonas destinadas para cultivos o poblados. Posteriormente en color verde se identificó las zonas con baja potencialidad destacándose que se establecieron en zonas cuyo índice NDVI tuvieron valores de píxel moderados de entre 0,2 a 0,3 correspondientes a zonas con vegetación arbustiva, presencia de suelo expuesto o rocas.

Las áreas con media potencialidad de ser fuentes de agua subterránea se ubicaron en la parte este de la cuenca, se representaron en un color naranja se ubicaron en zonas con una densidad de drenaje medianamente alta, a su vez la metodología JAP empleada priorizó el régimen de precipitación, obteniendo que en este lado de la cuenca se alcanzaron un promedio de 1501 a 2000 mm/año, en base a los datos de precipitación registrados por el INAMHI, de igual manera la densidad de drenaje supuso que esta zona mantuvo una zona de infiltración media con 1,51 a 2,5 km/km², la vegetación predominante fueron los pastos naturales o cultivados, posee una moderada retención de agua, en cuanto a la pendiente esta osciló entre los 21 y 30 grados lo que le otorga a esta zona de la cuenca una facilidad mayor para la infiltración del agua hacia las partes freáticas de la corteza terrestre.

Finalmente, las zonas con alta potencialidad de encontrar agua subterránea recayeron en las áreas representadas en color rojo las cuales cumplieron las siguientes características: poseen un NDVI con valores de píxel de 0,6 a 0,8 correspondientes a zonas con vegetación sana tanto natural como de cultivo, el volumen de precipitación se encontró dentro de 2001 a 3000 mm/año, lo que indica un alto ingreso de agua al sistema, destacó una densidad de drenaje alta es decir el agua no discurre con facilidad y pasa a infiltrarse, y la pendiente quizás el parámetro más importante ubicándose en zonas planas o con una ligera pendiente de entre 0 y 20 grados, que favorece el ingreso de agua al sistema.

Conforme a lo indicado por Reyes et al. (2020), en su estudio “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”, menciona que las variables más importantes dentro de su estudio comprendían el régimen de precipitación y la densidad de drenaje, se mencionó que el ingreso de agua favorable al sistema como lluvia (2500 a 4000 mm/año), abarca tan solo el 6% del área superficial de su cuenca, por lo que existe una predominancia de suelos carentes de agua, por lo que la poca lluvia que entra en contacto con la superficie o suelo de cultivo es aprovechada por la vegetación y muy poca de esta agua pasa a infiltrarse hasta los niveles freáticos del planeta. A diferencia de nuestro estudio si bien el volumen de lluvia es menor con un volumen de (2001 a 3000 mm/año), esta abarcó gran parte de la cuenca Guamote, sumado a que se mantiene una regularidad entre los eventos de riego y que la cobertura vegetal describe suelos con una permeabilidad media, se mantiene de cierta manera el proceso de recarga hídrica del sistema. Otro de los puntos mencionados es la densidad de drenaje, es así como en su estudio sus resultados

mostraron que esta variable obtuvo un rango de 0,5 a 1,5 km de drenajes por km², en cerca del 56% de su cuenca, lo que correspondía a una cuenca con drenaje pobre lo que en cierto modo favorece los fenómenos de percolación del agua, sin embargo, esta dependerá mucho del tipo y caracterización morfológica del suelo. En nuestro estudio se encontró una densidad de drenaje similar en zonas específicas de la cuenca, donde la elevada infiltración favorece que el agua no discorra por la superficie.

CAPÍTULO V

5. MARCO PROPOSITIVO

5.1. Propuesta de protección de zonas con potencial agua subterránea

Antecedentes

El agua dulce representa aproximadamente un 3,5 % del volumen total del agua del planeta, no obstante, solo un 8,57 % de ese volumen está disponible como agua superficial, el 91,43 % restante se encuentra contenido en glaciares y depósitos subterráneos. El agua superficial solía ser suficiente para abastecer la demanda de consumo del ser humano; sin embargo, ese escenario fue cambiando a medida que la población crecía y se desarrollaba, generando sistemas de agricultura y ganadería intensiva, así mismo, la demanda en el sector industrial, para explotación de combustibles y minerales ha sido cada vez más exigente.

La explotación desmedida del agua dulce ha provocado un desequilibrio del balance hidrológico, dando lugar a eventos de sequías, inundaciones, contaminación, aluviones, erosión de suelos agrícolas y afectaciones a infraestructura civil a nivel mundial. El desabastecimiento de agua para el consumo humano y para actividades de primera necesidad, ha despertado el interés por la explotación de los depósitos de agua subterránea, por otro lado, la dinámica extractivista del recurso hídrico no ha disminuido, por el contrario, crece cada vez más.

Ante la nueva tendencia de explotación de agua subterránea, surge la necesidad de crear mecanismos para la conservación y protección de los acuíferos, así como también para el cuidado de las zonas de recarga hídrica, puesto que los acuíferos cuentan con un volumen finito y a diferencia de los depósitos superficiales, pueden necesitar de siglos para recargar nuevamente su volumen.

Introducción

Los acuíferos son grandes masas de agua dulce almacenadas en depósitos subterráneos, formados por infiltración y acumulación del agua superficial, que pueden ser explotados para consumo humano, agrícola e industrial. Por lo general presentan menor susceptibilidad a la contaminación, sin embargo, cuando se contaminan son difíciles de tratar, por lo tanto, su explotación debe realizar con mayor precaución que el agua superficial, y es necesario contar con estudios sobre su estado, previo a la explotación.

Los estudios de prospección y caracterización de aguas subterráneas son útiles para elaborar inventarios y bases de datos con información que facilite la gestión, conservación, protección y/o

restauración de tales recursos hídricos. Las medidas estarán direccionadas a proveer la sobreexplotación y la contaminación de los acuíferos, mediante monitoreos de calidad, estrategias de consumo sostenible y protección de las zonas de recarga.

La estrategia para la protección de las zonas con potencial agua subterránea, identificadas en este estudio presenta dos mecanismos de protección: el primero, enfocado a la capacitación en gestión sostenible del recurso hídrico, y el segundo, enfocado en el seguimiento técnico del estado de la cuenca mediante monitoreos de control y prevención de la contaminación.

Gestión sostenible de los acuíferos

La gestión de los acuíferos guarda relación con la gestión de las fuentes de agua superficial, y se refiere al aprovechamiento o explotación del recurso, sin poner en riesgo a la biodiversidad, así como el provisionamiento de los servicios ecosistémicos vinculados al agua freática (Cross et al., 2020, p. 7).

Tabla 1-5: Monitoreo y control de la contaminación

Fundamento	Mecanismo	Responsables
		Beneficiarios
<p>El agua subterránea presenta una mayor carga mineral que el agua superficial, debido a la naturaleza geoquímica de la cuenca hidrográfica y del tipo de roca que conforma el depósito, pudiendo presentar características indeseables para el consumo, la industria y la agricultura, siendo necesario realizar estudios hidro geoquímicos, para evaluar el uso potencial de los acuíferos.</p> <p>La contaminación se asocia a las actividades agrícolas por el uso de fertilizantes, plaguicidas, por el riego de aguas residuales no tratadas, y el vertido de aguas residuales industriales con alto contenido de metales pesados o sustancias orgánicas</p>	<p>Monitoreos de calidad de agua superficial</p> <p>Estudios de contaminación de suelo</p>	<p>Gobierno provincial de Chimborazo</p> <p>Gobierno cantonal de Guamote</p>
		<p>Habitantes del cantón Guamote</p> <p>Comunidades rurales de Guamote</p>

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

Tabla 2-5: Consumo eficiente del agua

Fundamento	Mecanismo	Responsables
		Beneficiarios
<p>En la actualidad la explotación de agua subterránea ha sido bastante recurrente, de hecho, de acuerdo con Cerón et al. (2021, p. 49) una tercera parte del agua dulce consumido procede de algún depósito subterráneo, además este consumo se subdivide entre el sector agrícola,</p>		<p>Gobierno cantonal de Guamote</p>

<p>doméstico e industrial con 42, 36 y 22 %, como corresponde.</p> <p>Agricultura: El cantón Guamote posee una superficie de cultivo de aproximadamente 5566.05 ha, con un consumo elevado de las fuentes de agua dulce lo que ha provocado una reducción paulatina de los depósitos, evidenciado en una disminución del caudal hidrológico.</p> <p>Consumo humano: usada en la preparación de alimentos, limpieza de áreas, uso en actividades recreativas y principalmente relacionadas a la higiene personal.</p> <p>Industrial: su consumo se asocia a la generación de energía, refrigeración y uso como materia prima.</p>	<p>Sistema de riego por aspersión</p> <p>Sistema de riego por goteo</p>	<p>Junta Administradora del agua potable</p> <p>Dirigentes locales</p>
	<p>Uso de grifos de bajo consumo</p> <p>Reciclaje del agua lluvia</p> <p>Programas de consumo eficiente</p> <p>Tratamiento y recirculación de agua</p>	<p>Habitantes del cantón Guamote</p> <p>Sector agropecuario</p>

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

Tabla 3-5: Protección de las zonas de recarga hídrica

Fundamento	Mecanismo	Responsables
		Beneficiarios
<p>La recarga de un acuífero se da por la infiltración del agua superficial, es decir que depende en gran medida de las precipitaciones, y del riego artificial de la agricultura, el volumen y la calidad del agua subterránea esta influenciada por las condiciones en las cuales ocurre la recarga hídrica, donde la presencia de reacciones de óxido reducción, la actividad microbiana y la calidad del suelo de la zona de recarga influyen directamente en la calidad del agua.</p> <p>Guamote gran parte de su población ha tenido como principal ingreso económico el labrado del suelo y la ganadería, dichas actividades han estado carentes de tecnificación, los sistemas de regadío han favorecido el acceso al agua para plantaciones y cultivos</p>	<p>Agricultura sostenible</p> <p>Reforestación de plantas nativas</p> <p>Plan de conservación de acuíferos</p>	<p>Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica</p> <p>Ministerio de Agricultura y ganadería</p> <p>Gobierno provincial</p> <p>Dirigentes locales</p>
		<p>Habitantes del cantón Guamote</p> <p>Sector agropecuario</p> <p>Comuneros rurales de Guamote</p>

Fuente: Cobos Ayuy, Yadira, 2022.

CONCLUSIONES

- El análisis morfológico de la cuenca Guamote proporcionó información relevante frente a la dinámica y ciclo de recarga hidrológica a la cual se encuentra sujeta la cuenca del cantón Guamote. La curva hipsométrica demostró que la cuenca se encuentra en una etapa madura indicativo de que los fenómenos erosivos se han estabilizado, así mismo un drenaje limitado sumado a pendientes medianamente inclinadas que rondan el 5 al 15% muestran una capacidad favorable frente al almacenamiento de agua subterránea, finalmente cuanto al balance hídrico la morfometría de la cuenca mantiene un marcado equilibrio sin embargo condicionantes tales como la climatología regímenes de precipitación, geomorfológicas entre otras determinarán en menor o mayor proporción el apareamiento y recarga de áreas de almacenaje de agua subterránea a lo largo del cantón.
- Se establecieron 5 parámetros a ser evaluados (NDVI, densidad de drenaje, precipitación, pendiente, uso y cobertura del suelo), para la determinación de zonas con potencial presencia de agua subterránea, los resultados indicaron que estas zonas están determinadas principalmente por la densidad de drenaje, la pendiente y el régimen de precipitación. El mapa de zonas potenciales de agua subterránea de la cuenca Guamote muestra un (GWPI medio y Alto) sobre todo en la zona este de la cuenca lo que sugiere que existe una mayor posibilidad de existencia de agua subterránea en la parte baja de la cuenca. La correlación de los resultados al aplicar el JAP fue de 0,8 valore cercano a 1 lo que indica una alta congruencia entre las variables y los pesos asignados pudiendo determinar que la metodología aplicada y los parámetros evaluados es un marco efectivo a la hora de evaluar de forma temprana el potencial de las aguas subterráneas en el cantón.
- Finalmente, el presente estudio dentro de la cuenca Guamote arrojó que la presencia de aguas subterráneas abarca un 20% de la superficie total de la cuenca, teniendo que para las zonas con un rango medio de posibilidad de encontrar aguas subterráneas comprende una superficie de 278,857km² y para zonas con alto potencial 122,7 km² respectivamente, es así por lo que se requiere de un manejo integral tanto de los organismos gubernamentales y de las instituciones educativas, para la puesta en marcha de medidas investigación y prospección que permitan la conservación y el manejo adecuado del recurso hídrico, implementando sistemas de riego y cultivo tecnificado que favorezcan la recarga hídrica natural que actualmente se ve muy amenazado por la actividad agrícola y de consumo en general.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda complementar con estudios morfológicos en campo para corroborar las zonas potenciales con presencia de agua subterránea, además se deberá incluir una geodatabase actualizada donde se encuentre información de los perfiles de suelo, precipitación, humedad etc., con la finalidad de que futuras investigaciones sean aún más precisas en los objetivos planteados.
- Se recomienda realizar el presente estudio con nuevas variables y condicionantes para comparar los resultados obtenidos y determinar los parámetros más adecuados a la hora de buscar una metodología para decidir las zonas con mayor o menor potencial de albergar aguas subterráneas.
- Se recomienda mantener un registro de precipitaciones, así como los datos del balance hídrico mensual de la cuenca que permita a largo plazo obtener datos con un alto grado de confianza así mismo se requiere plantear una metodología JAP, ajustada a las condiciones y características morfológicas de la cuenca estudiada.

GLOSARIO

- **Agua subterránea:** Hace referencia aquella agua que se encuentra por debajo de las capas freáticas del planeta, esta agua se retiene en acuíferos (roca permeable y/o sedimentos que retienen agua, que son extraídos para procesos de agricultura y consumo humano).
- **AHP:** Analytic Hierarchy Process, metodología que permite ponderar una o más variables en función al objetivo buscado, permite adoptar una solución frente a una problemática planteada.
- **Balance Hidrológico:** Proceso por el cual el planeta mantiene y renueva el contenido de agua, mediante el ajuste entre las entradas y salidas de esta variable a través del sistema, importante para el desarrollo de la vida.
- **Densidad de Drenaje:** Indica la relación entre la longitud total de los cauces contenidos dentro de una cuenca y el área de la misma, se expresa en Km/Km².
- **Escurrimiento:** Fenómeno por el cual una parte del agua viaja superficialmente a través de suelo hasta llegar a una tributaria o desembocar en un río o cuerpo hídrico.
- **Geomorfología:** Es el estudio de las propiedades estructurales del suelo y como estas se desarrollan a través de los años, importante para la determinación del contenido de agua subterráneas en un determinado lugar.
- **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.
- **Permeabilidad del suelo:** Indica la capacidad que tiene el suelo para que atravesase con mayor o menor facilidad un volumen de agua hasta las regiones freáticas del planeta, donde posteriormente se almacenan dando como resultado los denominados acuíferos.
- **Ráster:** Es una imagen conformada por un conjunto de píxeles los cuales cada uno de ellos posee un fichero de datos en específico que representan los fenómenos naturales que suceden en el planeta.

BIBLIOGRAFÍA

AGUILAR GONZÁLEZ, Iván. METODOLOGÍA PARA DESARROLLAR BALANCES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS: CASO ESTUDIO ACUÍFERO ALLENDE-PIEDRAS NEGRAS COAHUILA [en línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Universidad Nacional Autónoma de México, MÉXICO: 2013. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/6104/1/Metodolog%C3%ADa%20para%20desarrollar%20balances%20de%20aguas%20subterr%C3%A1neas.pdf>.

BARBAZZA, Carla; 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.

BARON, Jill S.; et al. "Ecosistemas de Agua Dulce Sustentables". *Ecological Society of America*, 2003, no 10, pp. 1-15., ISSN 1092-8987.

BHANDARI, A. K.; et al. "Feature Extraction using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): A Case Study of Jabalpur City". *2nd International Conference on Communication, Computing & Security [ICCCS-2012]*, 2012, vol. 6, pp. 612-621., ISSN 2212-0173. DOI 10.1016/j.protcy.2012.10.074.

BURBANO, Napoléon; et al. *INTRODUCCIÓN A LA HIDROGEOLOGÍA DEL ECUADOR* [en línea]. 2015. INAMHI. Disponible en: https://www.inamhi.gob.ec/Publicaciones/Hidrologia/HIDROGEOLOGIA_2%20EDICION_2014.pdf.

CARCAUCA. *Aguas Superficiales* [en línea]. [Consulta: 30 mayo 2022]. Disponible en: <https://www.arcgis.com/sharing/rest/content/items/337de1a259ad4e1abad811c0d6188c1a>.

CASTILLO ARGAÑARÁS, Luis. "La teledetección directa por satélites y la solución de controversias". *Enlace: Revista Venezolana de Información, Tecnología y Conocimiento*, 2014, vol. 11, no 1, pp. 89-96., ISSN 1690-7515.

CATANHA, Moisés; et al. "Prospección de aguas subterráneas mediante lógica difusa en Luanda, Angola". *Minería y Geología*, 2016, vol. 32, no 3, pp. 60-77.

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, Mishell, & ROSALES, Oscar. "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" (Trabajo de Titulación) (Grado). *Universidad Técnica del Norte*, 2021, pp. 1-13.

CHONLONG ALCIVAR, Jorge Patricio, & PACHECO GIL, Henry Antonio. "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. e-ISSN 2588-0764*, 2021, vol. 6, no 1, pp. 17., ISSN 2588-0764. DOI 10.33936/rev_bas_de_la_ciencia.v6i1.2648.

CHUVIECO SALINERO, Emilio. "Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio" Ariel [en línea]. 2002, (Barcelona). ISBN 978-84-344-8047-6. Disponible en: <https://go.gale.com/ps/i.do?id=GALE%7CA242180195&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=16920074&p=IFME&sw=w&userGroupName=anon%7E718230a7>.

CIFUENTES, Lizette; & PAZ, Jean. "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.

CIONCHI, José L.; et al. "Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires". *Revista Universitaria de Geografía*, 2018, vol. 27, no 1, pp. 17., ISSN 0326-8373.

COLLAZO CARABALLO, María Paula; & MONTAÑO XAVIER, Jorge. *Manual de Agua Subterránea* [en línea]. 1ra ed. Montevideo-Uruguay: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay, 2012. [Consulta: 30 mayo 2022]. ISBN 978-9974-594-09-8. Disponible en: http://www.ose.com.uy/descargas/reclutamiento/ci_0006_16_manual_agua_subterranea.pdf.

CORREA V., Paula Lizet.; et al. "METODOLOGÍA DE BALANCE HÍDRICO Y DE SEDIMENTOS COMO HERRAMIENTA DE APOYO PARA LA GESTION INTEGRAL DEL COMPLEJO LAGUNAR DEL BAJO SINÚ". *Avances en Recursos Hidráulicos*, 2006, no 14, pp. 71-86., ISSN 0121-5701.

COSSÍO KLÜVER, Manuel Augusto de. "Un recurso natural invisible: los acuíferos transfronterizos". *Agenda Internacional*, 2019, vol. 26, no 37, pp. 137-157. ISSN 10276750, 23115718. DOI 10.18800/agenda.201901.005.

CROSS, Katharine; et al. *Acuíferos: gestión sostenible de las aguas subterráneas* [en línea]. 1ra Ed. México: IUCN, International Union for Conservation of Nature, 2020. [Consulta: 28 julio 2022]. ISBN 978-2-8317-2083-8. Disponible en: <https://portals.iucn.org/library/node/49139>.

CRUZ FALCÓN, Arturo; et al. "Estimación de la recarga y balance hidrológico del acuífero de la Paz, BCS, México". *Universidad y ciencia*, 2013, vol. 29, no 1, pp. 87-100., ISSN 0186-2979.

CRUZ ROMERO, Bartolo; et al. "Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México". *Investigación y Ciencia*, 2015, vol. 23, no 64, pp. 26-34. ISSN 1665-4412.

CRUZ SANJULLÁN, Javier; & TAMES URDIAIN, Patxi. "Análisis cuantitativo de la red de drenaje de la cuenca del río deba". *Lurralde*, 1983, no 6, pp. 95-117., ISSN 1697-3070.

ESPINOSA, V.X.; & ESCOBAR, K.F. "Potencial para la exploración de aguas subterráneas en la Demarcación Hidrográfica Puyango Catamayo, Ecuador, utilizando un proceso de análisis jerárquico basado en SIG y teledetección". *Revista de Teledetección*, 2018, no 51, pp. 135. ISSN 1988-8740, 1133-0953. DOI 10.4995/raet.2018.7592.

EZQUERRO, P.; et al. "Teledetección Nuevas Plataformas y Sensores Aplicados a la Gestión del Agua, la Agricultura y el Medio Ambiente". 2017, pp. 7. ISSN 978-84-9048-650-4.

FERNÁNDEZ CIRELLI, Alicia. "El agua: un recurso esencial". *Química Viva*, 2012, vol. 11, no 3, pp. 147-170. ISSN 1666-7948.

FERNÁNDEZ, Leidy Tatiana León; & RINCÓN, Laura Natalia Garavito. "Procesamiento de imágenes satelitales". *L'esprit Ingénieux*, 2020, vol. 11, no 1, pp. 33-49. ISSN 2145-9274.

FOSTER, Stephen.; et al. "Caracterización de Sistemas de Agua Subterránea conceptos clave e ideas erróneas frecuentes". *Bank Netherlands Water Partnership Program*, 2007, pp. 6.

FUENTES YAGÜE, José Luis. "AGUAS SUBTERRANEAS". *IRYDA*, 1993, no 1, pp. 1-32.

FUNDACIÓN AQUAE. *¿Qué es el agua? Tipos, composición y funciones* [en línea]. [Consulta: 29 mayo 2022]. Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/que-es-el-agua/>.

GAD GUAMOTE. *PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL* [en línea]. 2019. Disponible en: <https://www.gadguamote.gob.ec/gadmc-g/plan-de-desarrollo1/pdot-guamote-2019-2023/3843-actualizado-pdot-guamote-2019-2023/file.html>.

GALIANO, V.F.; et al. "REVISTA DE TELEDETECCIÓN". 2010, no 34, pp. 101. ISSN 1988-8740.

GASPARI, Fernanda; et al. "Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina". *AUGMDOMUS ISSN:1852-2181*, 2012, vol. 4, pp. 143-158.

GIS&BEERS. *Cálculo del Índice Topográfico de Humedad TWI* [en línea]. 2018. [Consulta: 31 mayo 2022]. Disponible en: <http://www.gisandbeers.com/calculo-del-indice-topografico-de-humedad-twi/>.

GÓMEZ, Lucía; et al. "PROCESOS DE RECARGA/DESCARGA EN ACUÍFEROS SOMEROS DE LA REGIÓN COSTERA EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES". *Investigación Joven*, 2019, vol. 6, no Especial, pp. 20., ISSN 2314-3991.

GUTIÉRREZ, María Mercedes; et al. "Discretización de unidades hidrogeológicas en modelación de acuíferos e interconexión de acuíferos: ¿una hipótesis o una realidad?". *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 2004, vol. 1, no 2, pp. 22-26. ISSN 1692-9918.

HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; et al., Metodología de la investigación. 6ta. México D.F.: McGRAW-HILL,. 2014. ISBN 978-1-4562-2396-0.

HERRÁIZ, Andrés Sahuquillo. "LA IMPORTANCIA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS". *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (España)*, 2009, vol. 102, no 1, pp. 18.

INDUANALISIS, Laboratorio, monitoreo, consultoría y equipo Bucaramanga. "Agua subterráneas y superficial | Publicaciones". *Induanalisis, Laboratorio, monitoreo, consultoría y equipo. 2021. Bucaramanga - Colombia* [en línea]. [Consulta: 30 mayo 2022]. Disponible en: https://www.induanalisis.com/publicacion/detalle/agua_subterranas_y_superficial_29.

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 1431-2174, 1435-0157. DOI 10.1007/s10040-022-02465-w.

LÓPEZ E., Heriberto. "LAS ONDAS DE RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EXTRAORDINARIA FUERZA INVISIBLE". *Revista Ciencia Unemi*, 2008, vol. 1, no 2, pp. 26-29., ISSN 2528-7737.

LÓPEZ-GETA, Juan Antonio; et al., Los caminos del agua en las Islas Baleares: acuíferos y manantiales [en línea]. 4ta. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España [u.a.],. 2009. ISBN 978-84-7840-806-1. Disponible en: http://observatoriaigua.uib.es/repositori/asoc_aguas_botin.pdf.

MADRIGAL-SOLÍS, Helga; et al. "Caracterización hidrogeoquímica de los acuíferos volcánicos Barva y Colima en el Valle Central de Costa Rica". *Tecnología y ciencias del agua*, 2017, vol. 8, no 1, pp. 115-132. ISSN 2007-2422. DOI 10.24850/j-tyca-2017-01-09.

MENDOZA, Adel; et al. "Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos". *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 2019, vol. 27, no 3, pp. 348-360. ISSN 0718-3305. DOI 10.4067/S0718-33052019000300348.

MIRA CARRIÓN, Andrés; et al. "Influencia de los lineamientos estructurales sobre el flujo del Sistema Acuífero Guaraní en la provincia de Corrientes". *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 2016, vol. 73, no 4, pp. 478-492. ISSN 0004-4822.

MITECO. "Estado y calidad de las Aguas superficiales". *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*, 2020 [en línea]. [Consulta: 30 mayo 2022]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/aguas-superficiales/>.

MONTECINOS, Cristián. "Fundamentos Básicos para la Teledetección Ambiental". 2019, no 22, pp. 12., DOI 10.13140/RG.2.2.20684.44161.

MOREIRA-FRANCO, Lenin Francisco; & ORTEGA-ORDÓÑEZ, Carlos Francisco. "Análisis jerárquico aplicado a la determinación de la fragilidad ambiental de la subcuenca del Río Carrizal". *Polo del Conocimiento*, 2021, vol. 6, no 3, pp. 15. ISSN 2550-682X. DOI 10.23857/pc.v6i3.2349.

NASA. *Landsat 9 | Landsat Science*, 2021 [en línea]. [Consulta: 30 mayo 2022]. Disponible en: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/>.

NIETO MASOT, Ana; & CÁRDENAS ALONSO, Gema. *SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN: APLICACIONES EN EL ANÁLISIS TERRITORIAL*, 2018 [en línea]. Grupo de Investigación en Desarrollo Sostenible y Planificación Territorial de la Universidad de Extremadura. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Gema-Cardenas-Alonso-2/publication/328282930_sistemas_de_informacion_geografica_y_teledeccion_on_aplicaciones_en_el_analisis_territorial/links/5bc46fa7a6fdcc2c91fc09ae/sistemas-de-informacion-geografica-y-teledeccion-aplicaciones-en-el-analisis-territorial.pdf.

NINO, Frank. *GEOMÁTICA AMBIENTAL S.R.L.* [en línea]. 2017. Disponible en: https://acolita.com/wp-content/uploads/2018/01/Teledeteccion_espacial_ArcGeek.pdf.

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL. ¿Hay suficiente agua en el mundo? [en línea]. Ginebra: UNESCO, 1997. ISBN 978-92-63-30857-3. Disponible en: http://www7.uc.cl/sw_educ/hidrologia/Capitulo_1/aguamundo.pdf.

ORTIZ, Mauricio; et al. "Estimation of water table depth from Landsat NDVI in the Pampa del Tamarugal (Chile)". *Revista de Teledeteccion*, 2012, pp. 42-50.

PECH MAY, Fernando; et al. "Análisis de zonas de cultivo y cuerpos de agua mediante el cálculo de índices radiométricos con imágenes Sentinel-2". *Lámpsakos*, 2021, no 24, pp. 48., ISSN 2145-4086. DOI 10.21501/21454086.3601.

PEDROZA, Jorge; & ZÚÑIGA, Fabiola. "Los sistemas de información geográfica y su aplicación en enlaces de comunicaciones". *Científica*, 2009, vol. 13, no 1, pp. 27-34., ISSN 1665-0654.

PEÑA, Marco A. "Propiedades del primer sistema de teledetección hiperespectral chileno". *Revista de geografía Norte Grande*, 2010, no 46, pp. 7., ISSN 0718-3402. DOI 10.4067/S0718-34022010000200011.

PEÑUELA ARÉVALO, Liliana A.; & CARRILLO RIVERA, J. Joel. "Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México". *Investigaciones geográficas*, 2013, no 81, pp. 18-32., ISSN 0188-4611.

PÉREZ GONZÁLEZ, María; & RODRÍGUEZ, Pilar. "Aplicaciones de la teledetección en hidrología". *Observatorio Medioambiental*, 2006, pp. 12. ISSN 1139-1987.

ROJAS PALACIOS, Hernán; et al. "MODELACIÓN DE ACUÍFEROS PARA EL APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DEL AGUA SUBTERRÁNEA". *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 2004, vol. I, no 1, pp. 38-49. ISSN 1692-9918.

ROMERO, Francisco. "La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental". *AquaTIC*, 2006, vol. 5, no 24, pp. 13-41. ISSN 1578-4541. DOI 10.22518/16578953.701.

SAATY, Thomas L. "THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS IN CONFLICT MANAGEMENT". *International Journal of Conflict Management*, 1990, vol. 1, no 1, pp. 47-68. ISSN 1044-4068. DOI 10.1108/eb022672.

SACRISTÁN ROMERO, Francisco. "La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental". *AquaTIC*, 2006, no 24, pp. 13-41. ISSN 1578-4541.

SCHOSINSKY, Gunther. "CÁLCULO DE LA RECARGA POTENCIAL DE ACUÍFEROS MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO DE SUELOS". *Revista Geológica de América Central*, 2006, no 34-35, pp. 13-30. ISSN 0256-7024.

UNESCO. "Adaptación a los impactos del cambio climático en los sistemas acuíferos". *La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2015* [en línea]. [Consulta: 31 mayo 2022]. Disponible en: <https://es.unesco.org/themes/garantizar-suministro-agua/hidrologia/agua-subterranee/adaptacion-impactos>.

VILLEGAS, Juan Camilo. "ANÁLISIS DEL CONOCIMIENTO EN LA RELACIÓN AGUA-SUELO-VEGETACIÓN PARA EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA". *Revista EIA*, 2004, no 1, pp. 73-79. ISSN 1794-1237.

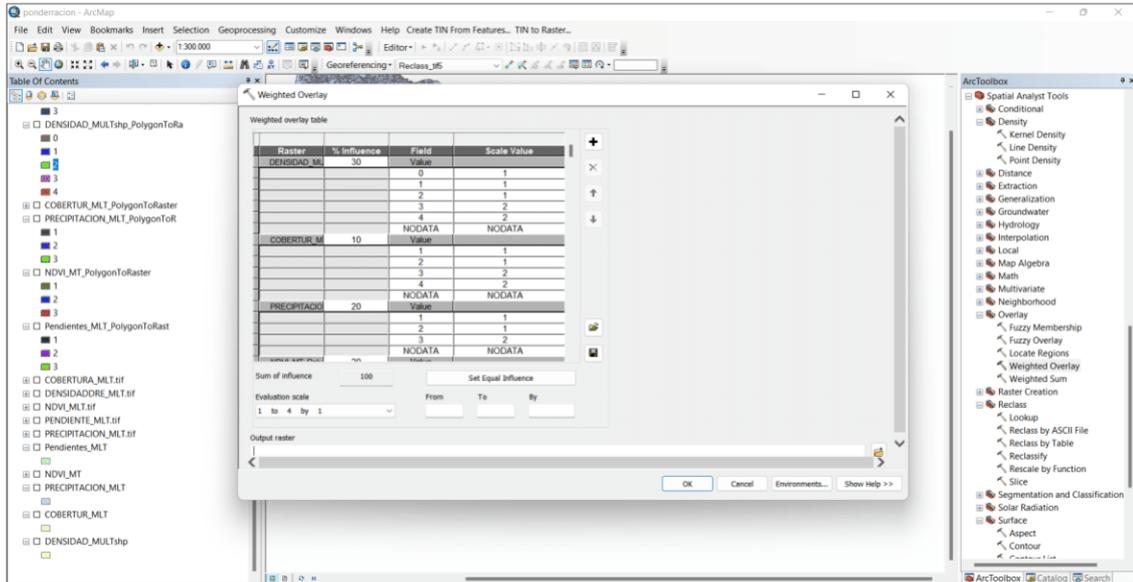
YEPES PIQUERAS, Víctor. "Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP)". *El blog de Víctor Yepes*, 2018 [en línea]. [Consulta: 31 mayo 2022]. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2018/11/27/proceso-analitico-jerarquico-ahp/>.

ZAVALA, Carlos; & ZAVALA, Patricio. "Uso de imágenes satelitales de alta resolución para generar cartografía". *Revista Facultad de Ingeniería*, 2002, no 10, pp. 35-43. ISSN 0717-1072.

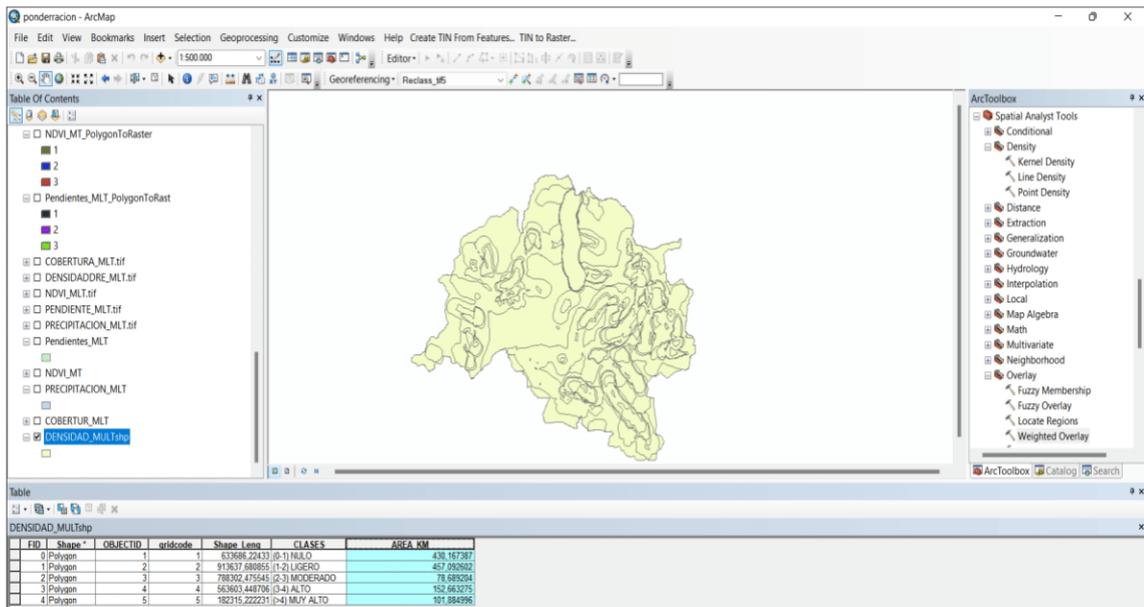


ANEXOS

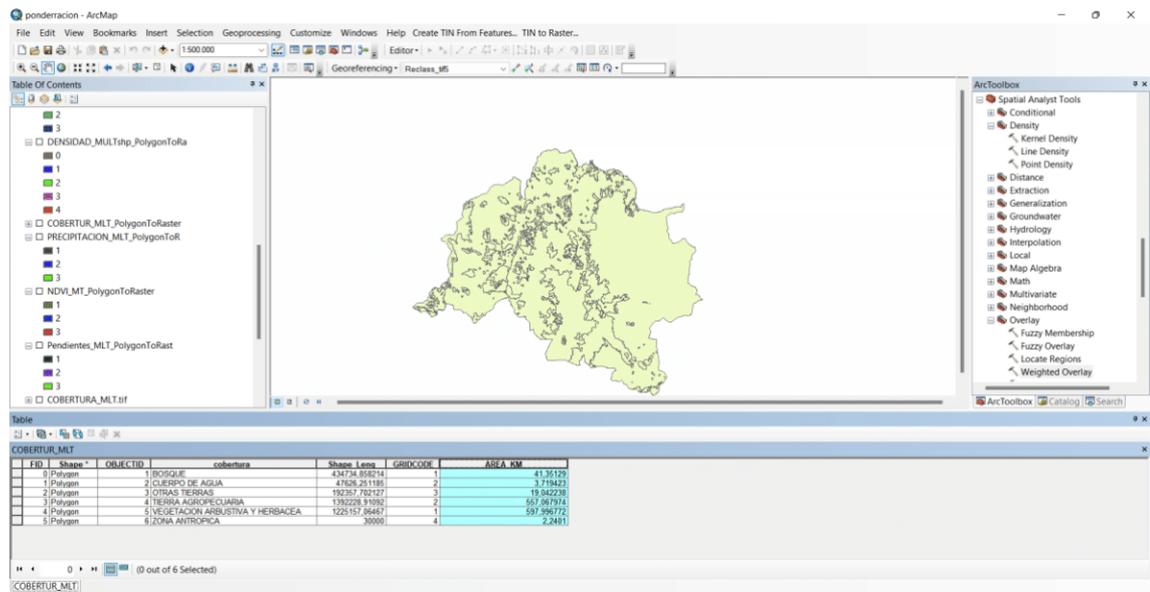
ANEXO A: MATRIZ DE PONDERACIÓN DE LAS VARIABLES EN ARCGIS



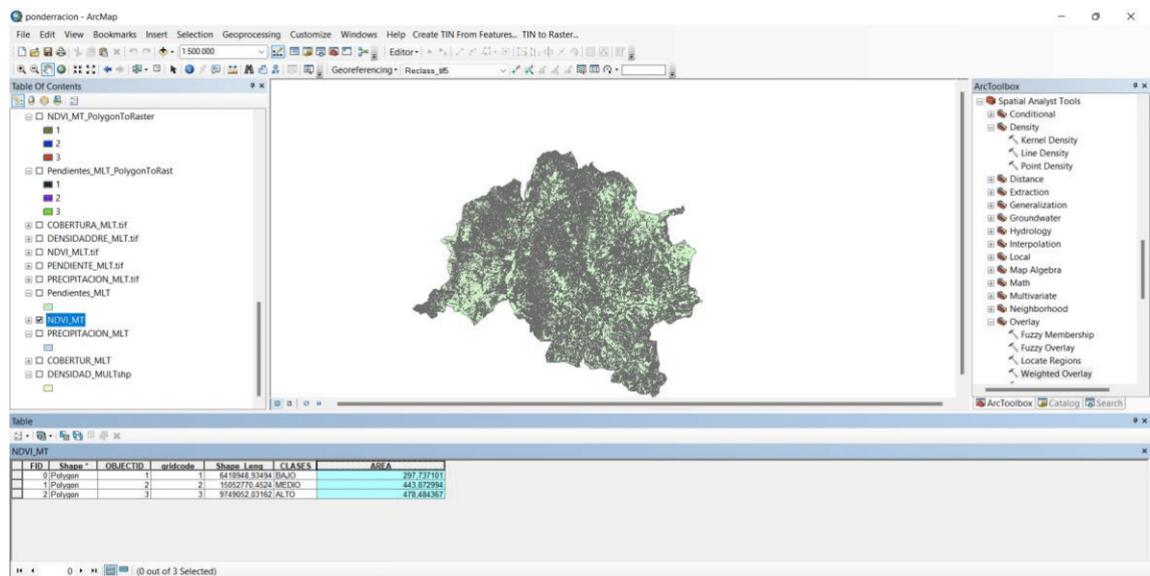
ANEXO B: ÁREA EN KM2 PARA DENSIDAD DE DRENAJE



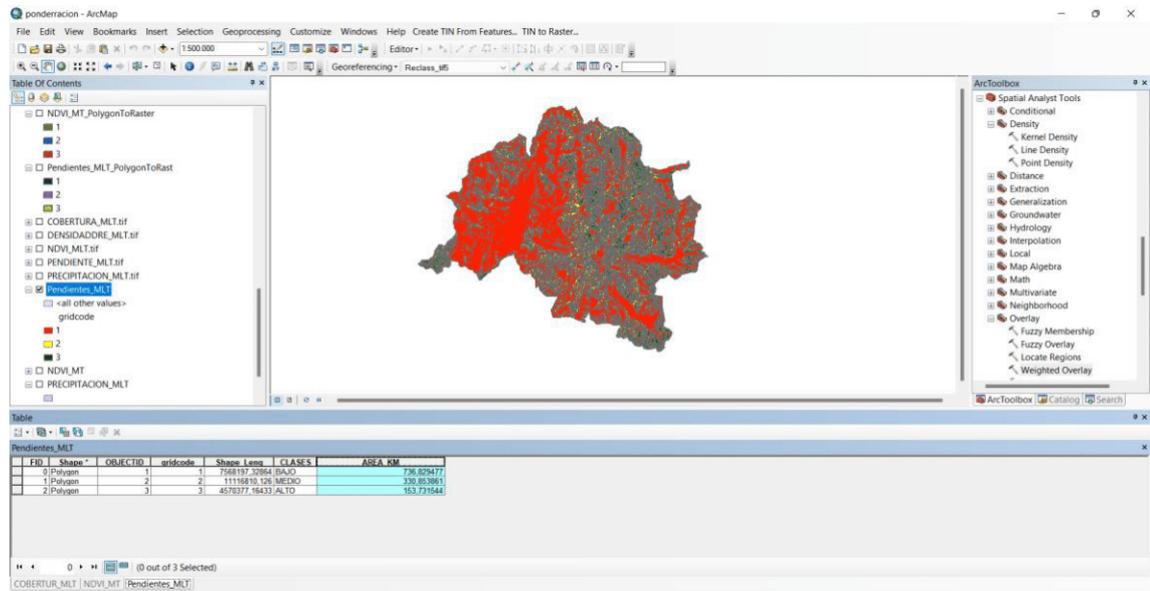
ANEXO C: ÁREA EN KM2 PARA USO Y COBERTURA



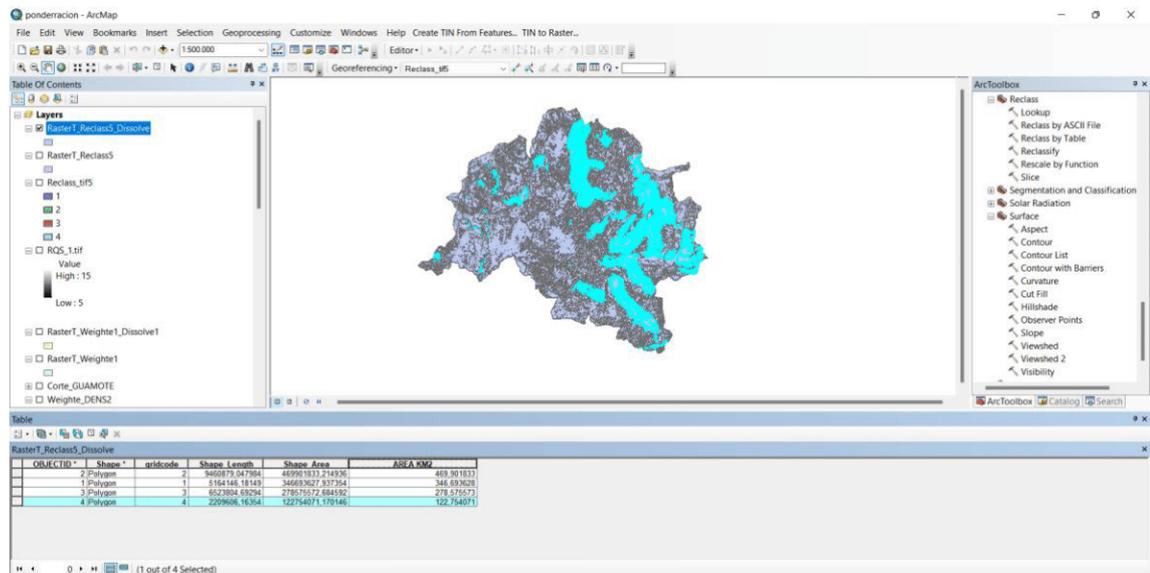
ANEXO D: ÁREA EN KM2 PARA NDVI



ANEXO E: ÁREA EN KM2 PARA PENDIENTES



ANEXO F: ÁREA EN KM2 ZONAS POTENCIALES DE AGUA SUBTERRÁNEA





epoch

**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: 20 / 01 / 2023

INFORMACIÓN DEL AUTORA
Nombres – Apellidos: Yadira Betsabeth Cobos Ayuy
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Ambiental
Título a optar: Ingeniera Ambiental
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

0045-DBRA-UPT-2023