



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica aplicando sistemas de información geográfica en la microcuenca San Agustín**

**CEVALLOS CISNEROS KARELYS MICHELLE  
INGENIERA AMBIENTAL**

**LOAIZA MALDONADO ROBERT ALEXANDER  
INGENIERO AMBIENTAL**

**MACHALA  
2023**



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica aplicando  
sistemas de información geográfica en la microcuenca San Agustín**

**CEVALLOS CISNEROS KARELYS MICHELLE  
INGENIERA AMBIENTAL**

**LOAIZA MALDONADO ROBERT ALEXANDER  
INGENIERO AMBIENTAL**

**MACHALA  
2023**



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN**

**Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica aplicando sistemas de información geográfica en la microcuenca San Agustín**

**CEVALLOS CISNEROS KARELYS MICHELLE  
INGENIERA AMBIENTAL**

**LOAIZA MALDONADO ROBERT ALEXANDER  
INGENIERO AMBIENTAL**

**VARGAS COLLAGUAZO LUIS ANGEL**

**MACHALA  
2023**

# ZONAS POTENCIALES DE RECARGA SAN AGUSTIN

*por Karelys-robert Cevallos-loayza*

---

**Fecha de entrega:** 22-feb-2024 02:42p.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2301815212

**Nombre del archivo:** TURNITIN.docx (94.37K)

**Total de palabras:** 11333

**Total de caracteres:** 61268

# ZONAS POTENCIALES DE RECARGA SAN AGUSTIN

## INFORME DE ORIGINALIDAD

4%

INDICE DE SIMILITUD

5%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1

[docplayer.es](http://docplayer.es)

Fuente de Internet

2%

2

Submitted to CONACYT

Trabajo del estudiante

1%

3

[aprenderly.com](http://aprenderly.com)

Fuente de Internet

<1%

4

[qdoc.tips](http://qdoc.tips)

Fuente de Internet

<1%

5

[marcabeli.gob.ec](http://marcabeli.gob.ec)

Fuente de Internet

<1%

6

Submitted to ITESM: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Trabajo del estudiante

<1%

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 40 words

Excluir bibliografía

Apagado

## CLAUSULA DE CESION DE DERECHOS DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Los que suscriben, CEVALLOS CISNEROS KARELYS MICHELLE y LOAIZA MALDONADO ROBERT ALEXANDER, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado IDENTIFICACION DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HIDRICA APLICANDO SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA EN LA MICROCUENCA SAN AGUSTIN, otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Los autores declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

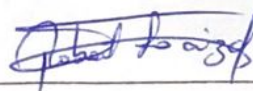
Los autores como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma declaran que la Universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico



CEVALLOS CISNEROS KARELYS MICHELLE

0705615243



LOAIZA MALDONADO ROBERT ALEXANDER

0705923985



**UNIVERSIDAD TECNICA DE MACHALA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL**

**Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica aplicando sistemas de información geográfica en la microcuenca San Agustín**

**CEVALLOS CISNEROS KARELYS MICHELLE  
INGENIERA AMBIENTAL**

**LOAIZA MALDONADO ROBERT ALEXANDER  
INGENIERO AMBIENTAL**

**MACHALA**

**2024**



**UNIVERSIDAD TECNICA DE MACHALA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL**

**Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica aplicando sistemas de información geográfica en la microcuenca San Agustín**

**CEVALLOS CISNEROS KARELYS MICHELLE  
INGENIERA AMBIENTAL**

**LOAIZA MALDONADO ROBERT ALEXANDER  
INGENIERO AMBIENTAL**

**MACHALA**

**2024**





**UNIVERSIDAD TECNICA DE MACHALA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL**

**Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica aplicando sistemas de información geográfica en la microcuenca San Agustín**

**CEVALLOS CISNEROS KARELYS MICHELLE  
INGENIERA AMBIENTAL**

**LOAIZA MALDONADO ROBERT ALEXANDER  
INGENIERO AMBIENTAL**

**VARGAS COLLAGUAZO LUIS ANGEL**

**MACHALA**

**2024**

## DEDICATORIA

A mis amados abuelitos y a Don Gerardo, su apoyo incondicional es mi fuente de inspiración, no están físicamente pero cada logro lo celebro con gratitud en vuestra memoria. A mi querida mami, mi roca y guía, este logro es tuyo tanto como mío. A ñaña Janeth, Fernanda, Kike y Simon, cómplices en mi travesía académica, su respaldo fue clave en mi éxito. A mi sobrinito, fuente de alegría y amor puro. Este logro es también para ti, mi gordito precioso. A mis queridos amigos Robert y Ginger, su amistad y apoyo han sido mi mayor impulso. Este trabajo está dedicado con amor y gratitud a todos ustedes.

*Cevallos Cisneros Karelys Michelle*

Desde el fondo de mi corazón dedico con mucho amor y gratitud a Dios, dueño de nuestras vidas, a mi abuelito que no se encuentra presente, pero sé que donde está, está feliz por mis logros, a mis padres pilares fundamentales con su apoyo incondicional e inquebrantable y finalmente a mi abuelita María Elena, con quien comparto muchos momentos.

Todo mis logros y mi esfuerzo son para ustedes, hacerlos sentir orgullosos me llena el alma y espero tenerlos por mucho tiempo más.

*Loaiza Maldonado Robert Alexander*

## AGRADECIMIENTO

A Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza en cada etapa de este camino. A mi tutor de tesis, ING. Luis Vargas Collaguazo, por su inestimable orientación. A los docentes de Ingeniería Ambiental, por su inspiración. A mi amigo, Robert Loaiza, por su apoyo constante. A mi familia y seres queridos, por su amor incondicional. Su presencia ha sido el mayor regalo en este viaje académico.

*Cevallos Cisneros Karelys Michelle*

Agradezco primeramente a Dios, con su amor incondicional me ha guiado en tiempos difíciles, me ha mostrado el camino a seguir y por supuesto me ha iluminado en días grises.

A mi familia, especialmente a mis padres, hermanos y mis abuelitos que durante todo este tiempo fueron testigos del proceso universitario que tuve que seguir.

Finalmente deseo expresar mis más sentidos agradecimientos al Ing. Amb. Luis Vargas Collaguazo, quien ha desempeñado un rol fundamental como tutor de este trabajo, con su sabiduría impartida ha logrado guiarnos durante todo el proceso de manera correcta, así mismo por su dedicación, paciencia y valiosos consejos durante el desarrollo de mi trabajo académico

*Loaiza Maldonado Robert Alexander*

## **TABLA DE CONTENIDO**

<b>RESUMEN</b> .....	13
<b>ABSTRACT</b> .....	14
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	15
<b>I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	17
A. Formulación del problema .....	17
B. Antecedentes.....	17
C. Declaratoria del problema.....	19
<b>III. JUSTIFICACIÓN</b> .....	20
<b>IV. OBJETIVOS</b> .....	21
A. Objetivo general.....	21
B. Objetivos específicos .....	21
<b>V. HIPOTESIS</b> .....	22
<b>VI. MARCO TEÓRICO</b> .....	23
A. Zonas potenciales de recarga hídrica .....	23
1. Acuíferos .....	23
2. Recarga hídrica.....	24
3. Relación entre escurrimiento superficial y escurrimiento subterráneo .....	24
4. Importancia de la recarga hídrica en el ciclo hidrológico .....	25
B. Variables Físicas .....	26
1. Litología .....	26
2. Pendiente y microrelieve.....	26
3. Tipo de suelo .....	27
4. Cobertura vegetal .....	27
5. Uso del suelo .....	27
C. Seguridad hídrica .....	28
1. Ordenamiento territorial en la gestión hídrica.....	28

2.	Seguridad hídrica.....	28
3.	El rol de los sensores remotos en la seguridad hídrica.....	29
4.	Seguridad alimentaria.....	30
D.	Sistemas de información geográfica .....	31
1.	SIG .....	31
2.	Teledetección .....	31
3.	SIG en la identificación de zonas potenciales de recarga .....	32
4.	Método Pfafstetter en la delimitación de cuencas hidrográficas.....	32
5.	Clasificación supervisada en la zonificación de áreas de cobertura vegetal.....	32
E.	Ecuaciones lineales .....	33
1.	Ecuación lineal .....	33
2.	Ecuación lineal de Matus 2007 .....	33
<b>VII.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>35</b>
A.	Descripción del Área de Estudio.....	35
B.	Materiales.....	36
C.	Equipos .....	36
D.	Métodos.....	37
1.	Caracterización de las variables en la zona de estudio.....	38
a)	Pendiente y microrelieve.....	38
b)	Litología.....	38
c)	Tipo de suelo.....	39
d)	Cobertura vegetal permanente .....	39
e)	Uso del suelo.....	43
2.	Cálculo e identificación de zonas potenciales de recarga hídrica .....	44
3.	Descripción de las zonas potenciales de recarga alta y muy alta .....	45
<b>VIII.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>46</b>
A.	Caracterización de las variables en la zona de estudio .....	46

1. Pendiente y microrelieve.....	46
2. Litología.....	47
3. Tipo del suelo.....	48
4. Cobertura vegetal.....	48
5. Uso de suelo.....	49
<b>B. Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica.....</b>	<b>50</b>
1. Zonas potenciales de recarga a través de la herramienta calculadora raster.....	50
2. Zonas potenciales de recarga hídrica delimitadas geográficamente.....	51
3. Extracción geográfica de zonas potenciales de recarga hídrica muy alta y alta. ....	53
<b>C. Descripción de las zonas altas y muy altas de recarga.....</b>	<b>54</b>
1. Parroquias y poblados.....	54
a) Victoria.....	55
2. Ecosistemas del Ecuador Terrestre.....	57
a) Bosque siempre verde estacional montano bajo del Catamayo-Alamor.....	57
b) Bosque siempre verde estacional piemontano del Catamayo-Alamor.....	58
3. Tipos de clima.....	60
4. Zonas de precipitación.....	61
<b>IX. DISCUSION.....</b>	<b>62</b>
<b>X. CONCLUSIONES.....</b>	<b>65</b>
<b>XI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>66</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>73</b>

## LISTA DE TABLAS

TABLA I. FIRMAS ESPECTRALES SATÉLITE SENTINEL 2A.....	36
TABLA II. CLASIFICACIÓN DE LA PONDERACIÓN SEGÚN PENDIENTE Y MICRORELIEVE DEL TERRENO.....	38
TABLA III. CLASIFICACIÓN DE LA PONDERACIÓN PARA LITOLOGÍA.....	39
TABLA IV. CLASIFICACIÓN DE LA PONDERACIÓN PARA EL TIPO DE SUELO. ....	39
TABLA V. CODIFICACIÓN DE UNIDADES HIDROGRÁFICAS DE LA MICROCUENCA SAN AGUSTÍN .....	40
TABLA VI. CLASIFICACIÓN DE LA PONDERACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL .....	43
TABLA VII. CLASIFICACIÓN DE LA PONDERACIÓN DEL USO DEL SUELO. ....	43
TABLA VIII. POTENCIAL DE RECARGA HÍDRICA SEGÚN EL MODELO PROPUESTO. ....	44
TABLA IX. POTENCIALIDAD DE RECARGA EN LA MICROCUENCA.....	53

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Infiltración de agua en el suelo .....	23
Figura 2. Flujos del agua subterránea hacia los puntos de descarga de agua superficial. ....	24
Figura 3. Flujo del nivel freático hacia los cuerpos de aguas superficiales .....	25
Figura 4 .Importancia del flujo de agua subterránea para la regulación del régimen hídrico..	26
Figura 5. Diagrama esquemático de la revisión del papel de las aplicaciones de teledetección para la seguridad hídrica. ....	30
Figura 6. Mapa de ubicación de la microcuenca San Agustín.....	35
Figura 7. Diagrama de flujo de la metodología para la obtención de zonas potenciales de recarga hídrica .....	37
Figura 8. Diagrama de flujo del proceso de delimitación de cuencas internas por el Método de Pfafstetter .....	41
Figura 9. Mapa de codificación de intercuenas Método Pfafstetter.....	41
Figura 10. Mapa de pendientes de la Microcuenca San Agustín.....	46
Figura 11. Mapa de litología de la Microcuenca San Agustín.....	47
Figura 12. Mapa de tipo de suelo de la Microcuenca San Agustín.....	48
Figura 13. Mapa de Cobertura Vegetal Nativa de la Microcuenca de San Agustín .....	49
Figura 14. Mapa de Uso de Suelo de la Microcuenca San Agustín.....	50
Figura 15. Mapa de rango porcentual de potencialidad de recarga en formato raster .....	51
Figura 16. Mapa de delimitación geográfica de zonas potenciales de recarga hídrica .....	52
Figura 17. Mapa de zonas potenciales de recarga hídrica alta y muy alta.....	54
Figura 18. Mapa de parroquias y poblados en zonas potenciales altas y muy altas .....	55
Figura 19. Áreas de producción ganadera.....	56
Figura 20. Entrada a Zonas de minería pétreo .....	56
Figura 21. Áreas de producción agrícola – Cacaotera .....	57
Figura 22. Bosque siempreverde piemontano del Catamayo-Alamor→ Ubicación Microcuenca San Agustín.....	58
Figura 23. Bosque siempre verde estacional piemontano del Catamayo-Alamor→ Microcuenca San Agustín.....	59
Figura 24. Mapa de ecosistemas terrestres del Ecuador presentes en las zonas potenciales de recarga alta y muy alta .....	59
Figura 25. Mapa de zonas climáticas presentes en las áreas identificadas según.....	60
Figura 26. Mapa de zonas de precipitación presentes en el área de estudio.....	61



## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

AHP	Técnica de Análisis Jerárquico
MDE	Modelo de Digital de Elevación
DEMNAS	Patrones de drenaje
IZPRH	Identificación de Zonas Potenciales de Recarga Hídrica
MAATE	Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica
ETDM	Enfoque de Toma de Decisiones Multicriterio
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
SNI	Sistema Nacional de Información
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SIGTIERRAS	Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica
UH	Unidad Hidrográfica
UTM	Universal Transversal Mecator
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
ZPRH	Zonas potenciales de recarga hídrica
GIRH	Gestión Integral de Recursos Hídricos

## RESUMEN

La disponibilidad de agua es fundamental para el crecimiento sostenible y el bienestar comunitario. La microcuenca tiene características geológicas, hidrológicas y ambientales que necesitan ser evaluadas para gestionar adecuadamente las fuentes de agua subterránea. La falta de información sobre esta microcuenca genera la necesidad de realizar investigaciones para obtener datos y resultados específicos que permitan formular estrategias para la gestión del agua a escala local y regional. La propuesta sugiere utilizar Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la Identificación de Zonas Potenciales de Recarga Hídrica (IZPRH) en conjunto con datos espaciales y análisis geoespaciales para estudiar e identificar ciertas variables relacionadas con la infiltración de aguas subterráneas. El uso de SIG facilitará la determinación de estas áreas mediante el análisis de topografía, geología, cobertura vegetal y otros factores. Esto permitirá proponer una adecuada planificación y Gestión de los Recursos Hídricos (GRH) en la microcuenca, de acuerdo con el artículo 314 constitución del Ecuador, que afirma la importancia de la GRH.

***Palabras clave*---Recarga hídrica, aseguramiento hídrico, variables físicas, ecuación lineal y SIG.**

## **ABSTRACT**

Water availability is fundamental for sustainable growth and community well-being. The micro-watershed has geological, hydrological, and environmental characteristics that need to be evaluated to properly manage groundwater sources. The lack of information about this micro-watershed creates the need for research to obtain specific data and results that will allow the formulation of water management strategies at the local and regional levels. The proposal suggests using Geographic Information Systems (GIS) for the Identification of Potential Water Recharge Zones (IZPRH) in conjunction with spatial data and geospatial analysis to study and identify certain variables related to groundwater infiltration. The use of GIS will facilitate the determination of these areas by analyzing topography, geology, vegetation cover, and other factors. This will allow for the proposal of adequate planning and Water Resources Management (WRM) in the micro-watershed, in accordance with Article 314 of the Ecuadorian Constitution, which affirms the importance of WRM.

***Key words*---Water recharge, water assurance, physical variables, linear equation and GIS.**

## I. INTRODUCCIÓN

Sin agua la vida en el planeta tierra sería imposible. Los acuíferos son uno de los medios naturales no renovables más utilizados para consumo humano en todas las regiones climáticas del mundo[1]. El valor de este recurso está asociada a los servicios ecosistémicos que provee. Uno de ellos es regular los caudales superficiales de los ríos y arroyos, garantizando la disponibilidad de agua en un tiempo determinado, cumpliendo un papel fundamental en el aseguramiento hídrico, contribuyendo a mejorar la calidad de vida de las personas.

El uso de este recurso ha ido en aumento recientemente, lo que ha llevado a que esta práctica sea cada vez más frecuente en comparación al uso de agua superficial. Esta situación se debe a condiciones de sobreexplotación, disponibilidad y deterioro de las fuentes de agua superficial. Además, este tipo de información disponible sobre la IZPRH el país es difusa e inexacta[2]. Es importante mencionar que en Ecuador existen pocos estudios relacionados a la vulnerabilidad de los acuíferos, estas investigaciones están enfocados en el impacto de las actividades agrícolas y petroleras[3].

Las aguas subterráneas son un componente fundamental para la gestión responsable de los recursos hídricos, representando el 30,1% del agua dulce utilizada en la Tierra. En Estados Unidos, se consumen diariamente 349 mil millones de galones de agua dulce, de los cuales 79,6 mil millones de galones (26%) provienen de los mantos freáticos. La supervivencia de la humanidad depende del control y manejo responsable de este recurso. Sin embargo, nos encontramos ante un desafío significativo debido a la falta de comprensión sobre cómo cambia la capacidad de recarga de acuíferos en distintas latitudes y a lo largo del tiempo [4].

No se ha valorado suficientemente la contribución de las aguas subterráneas al bienestar social y desarrollo económico. Con frecuencia, los funcionarios gubernamentales, los inversionistas y los productores locales subestiman la significancia del agua subterránea en la economía y su contribución al progreso económico asociados al capital natural. Esta subestimación se deriva de la suposición de que los acuíferos de los que dependen les proporcionarán un suministro ininterrumpido de agua para consumo humano [5].

La gestión sostenible del agua es un desafío global, especialmente en regiones con deficiencia hídrica. En este contexto, la identificación emerge como una herramienta valiosa para reconocer lugares propicios a la infiltración y retención de agua, lo que contribuye a una gestión más efectiva de los recursos hídricos en su conjunto [6].

La utilización de tecnologías geoespaciales como la teledetección y los SIG ha permitido identificar zonas potenciales donde converjan una serie de factores los cuales

permitan analizar la infiltración de las aguas subterráneas logrando obtener resultados más precisos. Los SIG poseen la capacidad de resolver eficazmente problemas que requieren la integración de varios datos con referencia espacial (georreferenciación). Numerosos estudios han adoptado las herramientas SIG en análisis geoespaciales enfocados en aguas subterráneas [7]. Al respecto conviene decir que la aplicación de esta técnica ofrece un ahorro significativo de tiempo y costos, especialmente en áreas extensas. Esto se debe a las ventajas que ofrece la teledetección, tecnología que actualmente se encuentra ampliamente disponible [8].

En este trabajo se identificó las Zonas Potenciales de Recarga Hídrica (ZPRH) en la microcuenca San Agustín, a través del uso de SIG. Esta metodología es útil para identificar dichas zonas y a su vez esta intrínsecamente relacionada con el mejoramiento de la gestión de los recursos hídricos [1]. La evaluación del potencial de recarga se realizó bajo la base de distintos parámetros físicos, como la pendiente, litología, cobertura, uso de suelo y tipo de suelo [9]. La combinación de estos factores permitió obtener mapas detallados y precisos sobre las zonas con mayor potencial de recarga hídrica.

## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La sobreexplotación de los acuíferos ha aumentado de manera correlacionada con la expansión urbana, posiblemente influenciada por su accesibilidad y grado de contaminación. En la microcuenca de San Agustín, la falta de información dificulta la IZPRH, lo cual es crucial para la toma de decisiones en la gestión del agua y constituye el punto de partida para la designación de áreas de protección hídrica. La escasez de recursos financieros y técnicos obstaculiza los estudios hidrológicos y geomorfológicos, lo que limita la disponibilidad de datos sobre la dinámica hídrica en la zona. La falta de coordinación entre actores involucrados en la gestión hídrica dificulta la recopilación e intercambio de información.

La falta de comprensión de las partes interesadas sobre la importancia de conservar y proteger las áreas de recarga hídrica para la gestión y el aseguramiento del agua conduce a una falta de interés y esfuerzos para identificarlas. Esta situación tiene efectos directos preocupantes, como la mayor vulnerabilidad de la microcuenca a eventos climáticos extremos, debido a la incapacidad de anticipar y planificar respuestas adecuadas. Además, la ausencia de información sobre las zonas de recarga aumenta la vulnerabilidad a la escasez de agua, afectando su disponibilidad y disminuyendo el aseguramiento hídrico en la microcuenca.

La inexistencia de datos precisos y el conocimiento limitado representan obstáculos significativos, ya que impide generar insumos para gestionar de manera adecuada los recursos hídricos en la microcuenca. Estas limitaciones pueden dar lugar a la implementación de medidas inadecuadas para hacer frente a los desafíos relacionados con el agua. A un nivel más amplio, todos estos efectos directos convergen y contribuyen a un impacto indirecto de mayor alcance, relacionado con la reducción de la disponibilidad del recurso hídrico utilizado como suministro de agua potable y actividades económicas. Este escenario podría poner en riesgo la seguridad hídrica de la microcuenca.

### *A. Formulación del problema*

- ¿Cuál es el nivel de información disponible en la microcuenca San Agustín en relación con la IZPRH, y cómo afecta esta carencia a la toma de decisiones integrales en la gestión y aseguramiento hídrico para beneficio de sus pobladores?

### *B. Antecedentes*

A nivel mundial el aprovechamiento y demanda de los recursos hídricos se relaciona directamente proporcional con el aumento de la población, se afirma que ha aumentado la demanda en 1% por año desde la década de los 80's. Según [10] en su informe sobre el progreso de los recursos hídricos se prevé que: "La demanda mundial de agua seguirá aumentando un 20-30 % para 2050, lo que representa una cantidad significativa sobre el nivel actual de uso".

Las acciones humanas están altamente vinculadas al uso del agua subterránea, y hay pruebas que indican que varios acuíferos se están agotando. Un estudio de la NASA en 2015 reveló que ocho acuíferos importantes en África no experimentaron recargas significativas para compensar la extracción de agua entre los años 2003 y 2013 [10].

El recurso hídrico en Ecuador se encuentra bajo una presión creciente debido al aumento del desarrollo económico. Un ejemplo es el estudio realizado por [11] en una microcuenca ubicada en Cayambe, Ecuador, reveló modificaciones en el uso del suelo y sus efectos en la disponibilidad del agua. Se observó un incremento en las plantaciones forestales y en las superficies edificadas, mientras que el páramo herbáceo experimentó una disminución. Estos cambios tuvieron un impacto en los caudales de agua, con variaciones en la oferta natural durante diferentes épocas del año. Identificaron distintos niveles de estrés hídrico en la cuenca. Los hallazgos subrayan la relevancia de tomar en cuenta las alteraciones en el uso del suelo al examinar la disponibilidad de agua en las cuencas de alta montaña.

La calidad del agua superficial y su disponibilidad ha sido afectada por la contaminación que ciertas actividades antrópicas han causado su deterioro. De acuerdo con [12] enfatiza la importancia que desempeña la vegetación y los bosques de ribera en la mejora de la calidad del agua. Se señala que la existencia de una densa vegetación en las áreas ribereñas puede retener hasta el 95% del fósforo y el 50% del nitrógeno que llega con el flujo de agua de escorrentía. Se ha demostrado que la presencia de humedales de ribera puede minimizar la contaminación del agua.

En Ecuador, la ausencia de un método para delimitar las áreas de recarga hídrica, junto con la inadecuada aplicación de normativas y la ejecución de prácticas agrícolas y pecuarias sin medidas de conservación de suelos, generan un impacto negativo en la preservación de estas áreas. Se hace indispensable la implementación de estudios que delimiten las ZPRH, con el objetivo de fortalecer la toma de decisiones frente al aumento de la demanda de agua en el país [13].

En la provincia de El Oro se han realizado estudios sobre la IZPRH. Un ejemplo es el de [14], que utiliza un método basado en análisis jerárquico con SIG y teledetección. Este método toma en cuenta diversos factores clave como la litología, la permeabilidad del suelo, la

precipitación y la densidad de la red de drenajes. Dichos factores son evaluados y ponderados mediante un enfoque de toma de decisiones multicriterio (ETDM) y la técnica de análisis jerárquico (AHP)

El resultado final es un mapa que muestra las ZPRH en la Demarcación Hidrográfica de Puyango-Catamayo. Este enfoque integral permite una gestión de los recursos hídricos subterráneos y suministra datos para las instituciones responsable de la conservación el manejo integral sostenible del agua en la provincia de El Oro.

A nivel local, se llevó a cabo un estudio en la cuenca alta del río Santa Rosa ubicada en la provincia de El Oro, Ecuador con el objetivo de caracterizarla y evaluarla. El estudio utilizó técnicas SIG para generar información sobre aspectos generales fundamentales de la cuenca, como el área, la gradiente y la densidad de la red de drenaje. También se analizó la erosión del suelo y se compararon las estimaciones de sedimentos de una estación hidrométrica en el río. Estos resultados son importantes para comprender las características físicas de la cuenca y planificar futuros estudios que permitan IZPRH [15].

En Ecuador, las reservas de agua subterránea están experimentando una mayor presión debido al incremento demográfico y el progreso económico. Las alteraciones en el uso del suelo, la contaminación y la carencia de un método para delimitar las áreas de recarga hídrica están afectando tanto la disponibilidad como la calidad del agua

Es necesario implementar acciones inmediatas para preservar y administrar de forma sustentable los recursos hídricos nacionales. Estas acciones deben fomentar prácticas agrícolas y ganaderas sostenibles, aplicar políticas de conservación del suelo y financiar investigaciones que identifiquen ZPRH.

### ***C. Declaratoria del problema***

La microcuenca de San Agustín enfrenta desafíos en la gestión del agua debido a la escasez de información sobre las ZPRH. Esto dificulta la toma de decisiones por parte de las autoridades entorno a la conservación y el uso sostenible del recurso hídrico a nivel regional. Por consiguiente, resulta imperativo llevar a cabo una investigación que utilice SIG para identificar estas áreas en la microcuenca, lo que contribuirá a una gestión más eficaz de los recursos hídricos y a la preservación del medio ambiente.



## II. JUSTIFICACIÓN

La disponibilidad de agua es un recurso fundamental para el progreso equilibrado y desarrollo de las comunidades. En la microcuenca San Agustín, ubicada en la provincia de El Oro, existe la necesidad de evaluar y comprender las ZPRH, con el fin de gestionar de manera adecuada las fuentes de agua subterránea.

La microcuenca San Agustín es un territorio geográfico delimitado que posee características geológicas, hidrológicas y ambientales. Existe poca información sobre esta microcuenca, por esta razón se genera la necesidad de realizar estudios de carácter experimental que permitan obtener datos y resultados específicos, esto permitirá promover y proponer acciones relacionadas a la gestión del agua en el ámbito de aplicación local y regional.

La utilización de SIG para la IZPRH se fundamenta en la integración de datos espaciales y análisis geoespaciales para estudiar e identificar ciertas variables relacionadas con la infiltración de agua subterránea. Fundamentalmente aplicar esta herramienta nos facilitará la determinación de estas áreas.

Es de gran importancia obtener información de calidad, precisa y con cierto rango de actualización. Con la utilización de los SIG se podrá analizar la topografía, geología y la cobertura vegetal y otros factores para determinar las áreas que presentan mayor potencial de recarga.

Esto permitirá diseñar y proponer una estrategia para gestionar de manera adecuada el recurso agua en la microcuenca, en concordancia con el artículo 314 de la constitución del Ecuador, el cual afirma que el gobierno ecuatoriano será encargado obligatoriamente de garantizar el aprovisionamiento de agua potable de calidad para el uso doméstico, con la meta del Plan de creación de oportunidades en su objetivo 13 que indica: Promover la gestión integral de los recursos hídricos (GIRH), así mismo alineados a la política 13.1 que afirma: Proteger, regenerar y conservar el recurso hídrico y sus ecosistemas asociados, por sistemas de unidades hidrográficas (UH) y por último en concordancia a la meta 13.1.1 que menciona: Incrementar el territorio nacional bajo protección hídrica de 18152,13 a 284000 hectáreas [16].

## **IV. OBJETIVOS**

### ***A. Objetivo general***

Identificar las zonas potenciales de recarga hídrica empleando SIG mediante la aplicación de la ecuación lineal de Matus 2007 integrando variables físicas (geológicas y ambientales) para la toma de decisiones entorno al aseguramiento hídrico en la microcuenca San Agustín.

### ***B. Objetivos específicos***

- Analizar las principales características de las variables en la zona de estudio.
- Aplicar la ecuación de Matus 2007 empleando SIG para identificar las áreas de recarga hídrica y definir su delimitación geográfica mediante mapas cartográficos.
- Describir cada una de las zonas potenciales de recarga alta y muy alta obtenidas

## V. HIPOTESIS

- A. **H<sub>0</sub>**. Dentro de la microcuenca San Agustín existen ZPRH.
- B. **H<sub>02</sub>**. Dentro de la microcuenca San Agustín no existen ZPRH.

## VI. MARCO TEÓRICO

### A. Zonas potenciales de recarga hídrica

#### 1. Acuíferos

Los acuíferos son formaciones geológicas subterráneas que pueden almacenar y liberar agua. Consiste en una o más capas de roca, sedimento, poros, grietas o fisuras que se pueden llenar con agua y permitir que circulen libremente debido a la fuerza de la gravedad. Los acuíferos presentan una medida de permeabilidad y porosidad específica, factores que determinan las características hidráulicas del acuífero, es decir, cómo se desplaza el agua según el tipo de roca del suelo.

La recarga del acuífero se produce a medida que las precipitaciones comienzan a caer en el suelo, esta a su vez se percola con las capas permeables hasta encontrar un tipo de roca impermeable donde se acumula formando el acuífero. Se considera que un sistema acuífero es una colección dispersa de materiales permeables y menos permeables que actúan como unidades hidráulicas que producen agua en toda el área [17].

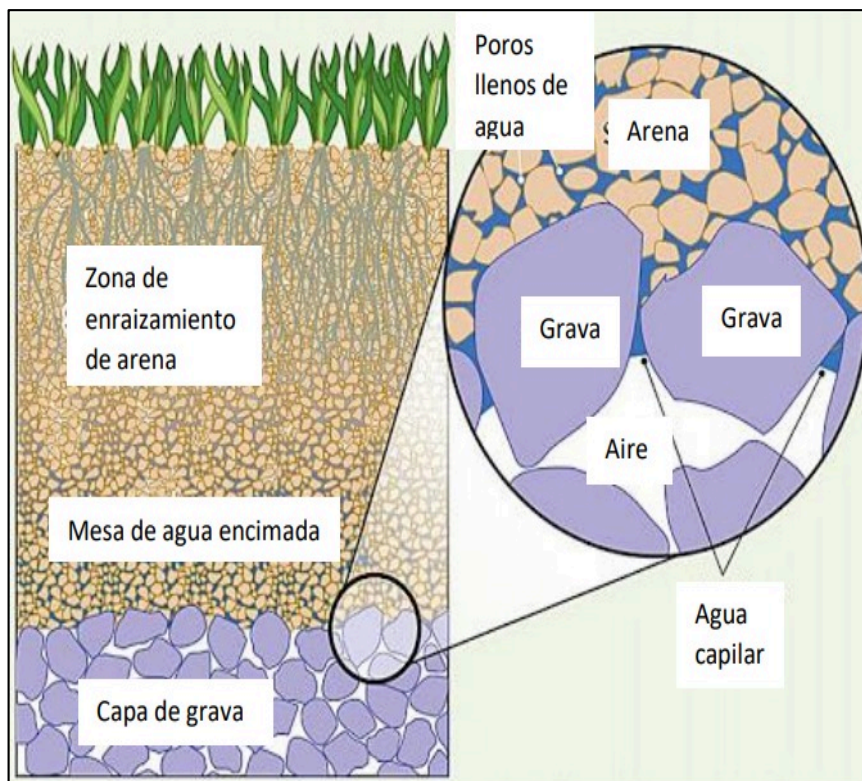


Figura 1. Infiltración de agua en el suelo [18].

## 2. Recarga hídrica

La recarga ocurre cuando el agua, después de infiltrarse en el suelo, se filtra a través de la zona no saturada y alcanza el nivel freático. La recarga total incluye cuatro procesos que se superponen, pero no se excluyen mutuamente: recarga directa, recarga indirecta, recarga artificial y recarga local. Es probable que disminuya la recarga directa de agua subterránea en las áreas urbanas, ya que el aumento de las superficies impermeables reduce la evapotranspiración, aumenta la escorrentía y limita la recarga de lluvia [19].

Al mismo tiempo existen otros factores que reducen la recarga hídrica y los cuales incluyen la infiltración a alcantarillas, tuberías de agua y alcantarillas pluviales. La recarga directa ocurre principalmente en áreas libres de pavimento y, en menor escala, a través de la cubierta generalmente reconocida como impermeable.

El agua subterránea presenta varias características que influyen en su aparición y movimiento, como la geomorfología, la litología, el grado de meteorización, las estructuras geológicas, la porosidad, la pendiente, el uso y cobertura del suelo, los patrones de drenaje, la forma del suelo, y el clima.

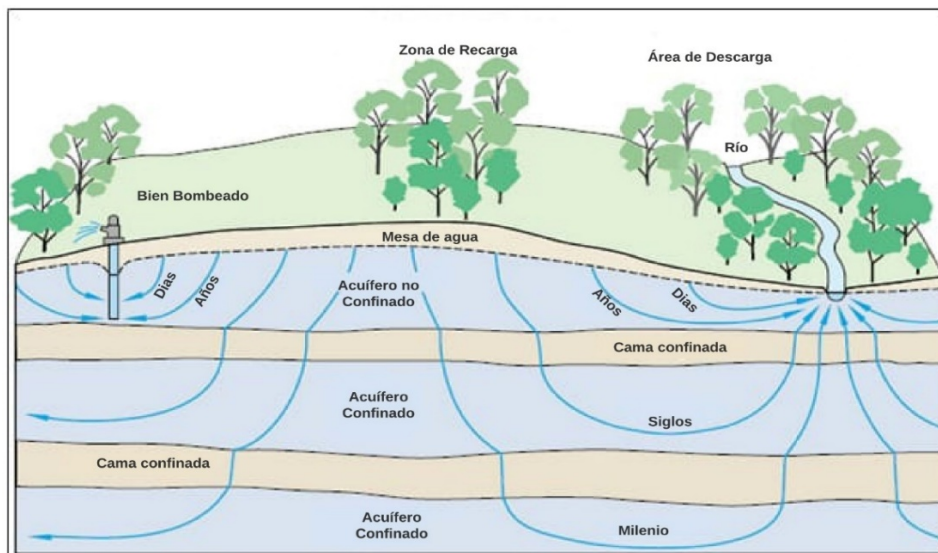


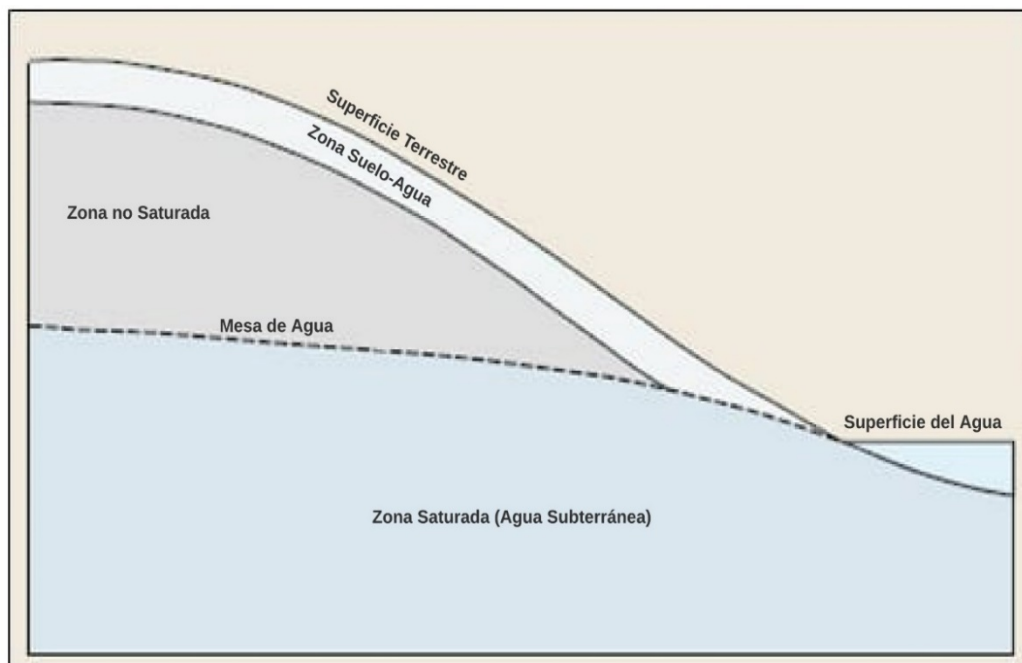
Figura 2. Flujos del agua subterránea hacia los puntos de descarga de agua superficial[20].

## 3. Relación entre escurrimiento superficial y escurrimiento subterráneo

La relación existente se basa principalmente en el que el escurrimiento superficial es uno de los varios componentes importantes en el balance de recarga hídrica subterránea, este actúa directamente entre las condiciones del flujo superficial y los acuíferos por medio de las interacciones agua subterránea-agua superficial. La dificultad que ha existido en la estimación

de la recarga subterránea y el escurrimiento superficial han generado incertidumbres para caracterizar las relaciones entre estos dos factores[21].

Se ha buscado realizar grandes esfuerzos para mejorar la comprensión de estos fenómenos y se han implementado varios enfoques diferentes de diversa complejidad que tienen como objetivo proteger y administrar de forma más eficiente los recursos hídricos subterráneos.

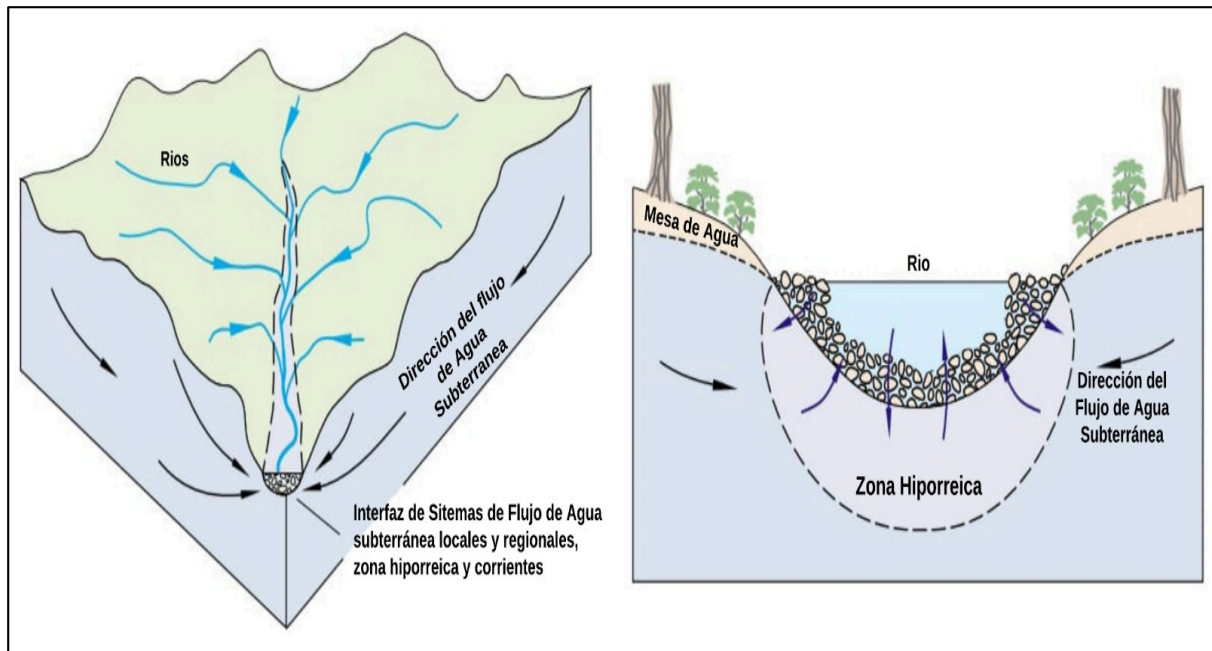


**Figura 3.** Flujo del nivel freático hacia los cuerpos de aguas superficiales [20].

#### ***4. Importancia de la recarga hídrica en el ciclo hidrológico***

El agua subterránea es el componente más reciente del ciclo hidrológico, la importancia radica en que uno de los servicios ecosistémicos que ofrecen los acuíferos es la regulación de caudales superficiales, proceso que ocurre cuando en épocas de sequías libera hacia los ríos o arroyos el agua acumulada durante las épocas de tormenta, aportando así suministro de agua al caudal superficial, fundamentalmente es necesario mantener esta etapa del ciclo hidrológico ya que permite la estabilidad del mismo.

Las actividades de sobreexplotación de los acuíferos ponen en riesgo la estabilidad de los mismos de manera directa entorno a que los niveles de extracción superan los niveles de reposición.



**Figura 4** .Importancia del flujo de agua subterránea para la regulación del régimen hídrico [20].

## ***B. Variables Físicas***

### ***1. Litología***

El término " litología " hace alusión al estudio y descripción de muchos tipos de rocas y sus propiedades, como composición, textura, estructura, contenido de minerales La litología no es solo un concepto geológico, sino que también es una indicación importante en hidrogeología. Desempeña un papel importante en las investigaciones hidrogeológicas por su capacidad de proporcionar información sobre el tipo y propiedades de las formaciones rocosas que actúan como acuíferos. La porosidad y la permeabilidad están fuertemente influenciadas por la litología. Es una herramienta importante para comprender las características hidrogeológicas de un área, ya que afecta directamente cómo se almacena y mueve el agua dentro del subsuelo, alterando la disponibilidad y el flujo del agua subterránea[22].

### ***2. Pendiente y microrelieve***

La pendiente del terreno es un factor crucial en la generación de la escorrentía superficial, porque tiene una influencia clave en la distribución de la precipitación entre la escorrentía superficial y la infiltración. Un terreno más inclinado provoca una escorrentía más rápida y limita la recarga de agua en el suelo. En términos simples, la pendiente determina tanto la velocidad de desplazamiento del agua sobre la superficie del suelo como la cantidad que se

filtra en el mismo. Una topografía de mayor pendiente tiene un mayor potencial de escorrentía superficial [23].

### ***3. Tipo de suelo***

El término se refiere a numerosas clasificaciones utilizadas para agrupar los diversos materiales que componen la capa superior de la corteza terrestre. Estas categorizaciones se fundamentan en las propiedades físicas y químicas distintivas de los suelos, incluida su porosidad, textura, estructura y composición mineral. La capacidad de infiltración inicial de una región está muy influenciada por la variedad de tipos de suelo presentes, ya que el tipo de suelo dominante en un lugar determinado tiene un gran impacto en la forma en que el agua interactúa con la superficie terrestre. Dado que cada forma de suelo tiene varias consecuencias para la retención de agua, la permeabilidad y los usos potenciales, comprender los diversos tipos de suelo es esencial para la GIRH, la planificación agrícola y la evaluación del impacto ambiental.[24].

### ***4. Cobertura vegetal***

La cobertura vegetal se refiere al porcentaje de ocupación de comunidades vegetales permanentes en el suelo. Su presencia constituye un componente fundamental dentro de la metodología considerada, ya que influye positivamente en la infiltración del agua al facilitar un mayor contacto entre el agua de lluvia y el suelo. Además, produce efectos positivos como la disminución de la velocidad de la escorrentía, la prevención de la erosión, la atenuación del impacto de las gotas de lluvia y la reducción de la sequedad ocasionada por la exposición solar. Todos estos beneficios contribuyen a preservar las cualidades del suelo que son propicias para la recarga hídrica [25].

### ***5. Uso del suelo***

El "uso de la tierra" se refiere a la manera en que se aprovecha y gestiona el espacio terrestre, lo que incluye tanto actividades humanas como características naturales presentes en una región determinada. Esto puede variar desde actividades agrícolas y urbanas hasta áreas forestales y cuerpos de agua. Este factor tiene un impacto crucial en los estudios hidrogeológicos. La conexión entre la utilización del suelo y las aguas subterráneas es fundamental. Por ejemplo, las áreas urbanas densamente pobladas pueden requerir una mayor



extracción de acuíferos pudiendo así abastecer la demanda de agua potable e industrial. No obstante, las áreas agrícolas pueden depender del agua subterránea para el riego[26].

### ***C. Seguridad hídrica***

#### ***1. Ordenamiento territorial en la gestión hídrica***

El ordenamiento del territorio y su relación con el recurso hídrico es evidente a partir de procesos en los cuales garantizan el desarrollo de las actividades que generan bienes o servicios, los cuales realiza el ser humano para su avance como sociedad. Dicho esto, ciertamente los cambios en la cobertura biofísica afectan el proceso de recarga de agua subterránea disponible para consumo doméstico y funciones ambientales. Desde ese punto de vista la relación entre la gestión hídrica y territorial tiene que ser adecuada y vincular todos los posibles usos del suelo y las actividades entorno al desarrollo del manejo en las cuencas hidrográficas que tiene como finalidad prevenir los riesgos de origen hídrico, así mismo de cumplir con el aseguramiento hídrico, enmarcados en el objetivo 6 de desarrollo sostenible[27].

Si bien existe una correlación directa entre cómo el uso de la tierra interviene y es influenciado por los sistemas de aguas subterráneas, el uso del suelo habitualmente se planifica y gestiona siguiendo criterios antropogénicos en lugar de naturales. Por lo tanto, para alcanzar la sostenibilidad de las aguas subterráneas, se debe integrar conjuntamente el manejo de este recurso y la planificación del espacio físico para el bienestar social [28].

En 1991, la UNESCO advirtió sobre la disminución de la calidad de los acuíferos debido a una mala planificación del uso del suelo a largo plazo[29]. Por tal motivo la planificación territorial en la GIRH resulta una estrategia que incluye la determinación de las áreas de recarga y descarga de acuíferos, la designación de áreas de protección ripícolas, la planificación del espacio terrestre. Hay que mencionar que esto implica también la gestión participativa comunitaria y la consideración de los aspectos sociales, económicos y ambientales para garantizar un manejo sostenible y equitativo del agua.

#### ***2. Seguridad hídrica***

La capacidad de mantener los espacios y procesos de infiltración subterránea de agua que generan un balance en el régimen hídrico y esto se traduce como la principal acción de garantizar la disponibilidad del recurso para el desarrollo socioeconómico. Con una mayor preocupación por la gestión responsable de los recursos hídricos limitados, últimamente se han

propuesto el análisis del aseguramiento hídrico de manera transversal para resolver problemas relacionados a la falta de mecanismos de garantía de disponibilidad de agua.

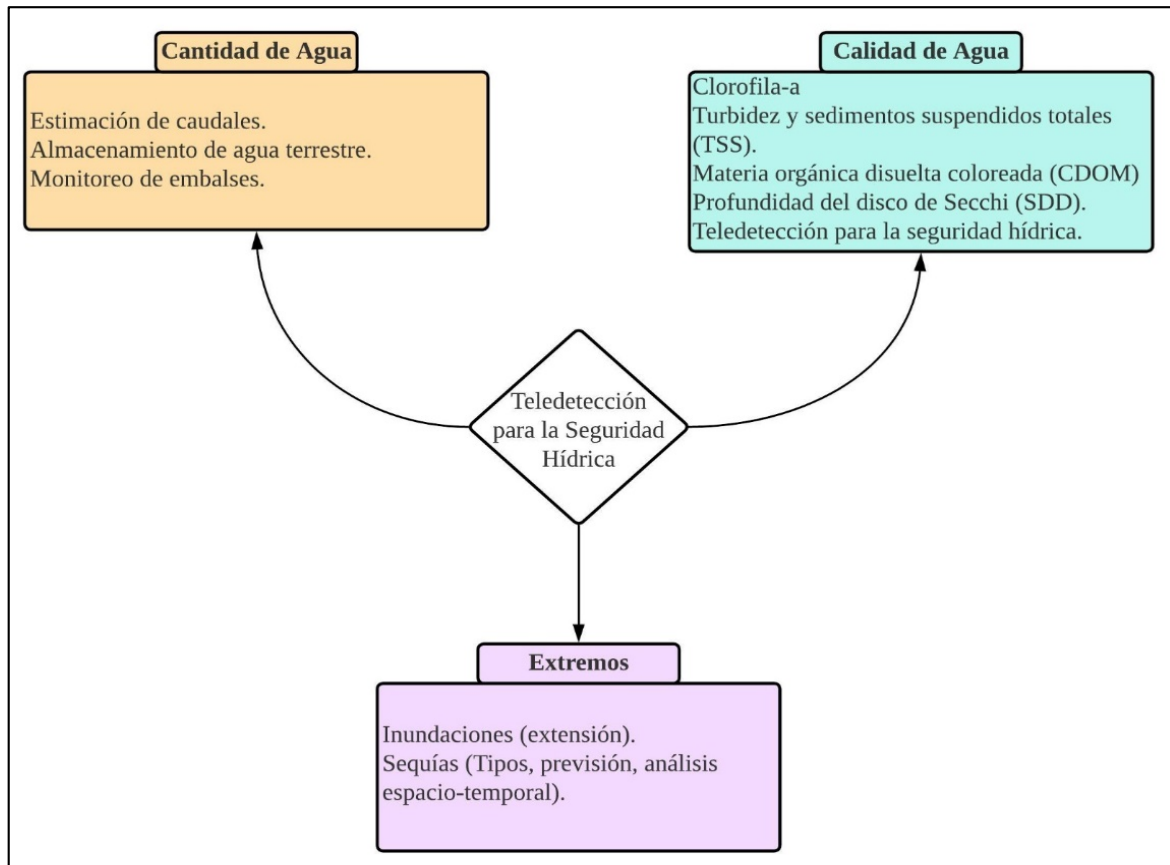
La seguridad hídrica engloba la utilización sostenible y la salvaguarda de los sistemas hídricos, la prevención de riesgos vinculados al agua, el desarrollo sustentable de los recursos hídricos y la preservación de las funciones y servicios del agua para el bienestar humano y el medio ambiente. Para enfrentar los retos de la seguridad del agua, se requiere un enfoque integral que integre aspectos sociales, económicos y ambientales en diversas esferas

Dentro del contexto del cambio climático que antecede el incremento significativo de la temperatura, la seguridad hídrica toma una importancia rol y desafíos asociados a eventual aumento de las presiones en los acuíferos subterráneos que tiene gran incidencia en el uso para el consumo humano. La interrelación que existe entre las comunidades de investigadores, profesionales y partes interesadas se considera cada vez más importante para el reconocimiento y la gestión de la seguridad hídrica. La falta alta de infraestructura y desarrollo de capacidades; los sistemas de gobernanza débiles y rígidos, y la ausencia de un enfoque interdisciplinario, se encuentran entre las principales causas que provoca el aumento de los problemas relacionados GIRH [30].

### ***3. El rol de los sensores remotos en la seguridad hídrica***

La medición y el seguimiento precisos de las variables hidrometeorológicas a través de observaciones in situ es un desafío debido a la inexistencia o la desactualización de los datos socioeconómicos y al deterioro de las redes de observación. La reducción de estaciones hidrometeorológicas a nivel mundial está limitando la disponibilidad de recursos de monitoreo, predicción de sequías y pronóstico de inundaciones. Estas estaciones tienen limitaciones clave, como la falta de cobertura espacial y la falta de conjuntos de datos para grandes partes del mundo.

Debido a las limitaciones en las observaciones terrestres, la disponibilidad de productos de teledetección ha servido como una herramienta en la GIRH y la toma de decisiones entorno a la seguridad hídrica. La teledetección es un método rentable para observar grandes masas de agua con una alta cobertura temporal y una precisión razonable, lo cual no es físicamente posible a través de mediciones in situ [31].



**Figura 5.** Diagrama esquemático de la revisión del papel de las aplicaciones de teledetección para la seguridad hídrica [31].

#### ***4. Seguridad alimentaria***

El agua subterránea juega un papel fundamental en la seguridad alimentaria, ya que es indispensable para la producción agrícola. Según [32], Según [32] menciona en su artículo que la seguridad alimentaria se relaciona directamente con la gestión eficiente de los recursos hídricos subterráneos. Esto significa que debemos proteger los acuíferos, utilizar técnicas de desalinización y riego eficientes, y promover prácticas agrícolas sostenibles para garantizar la disponibilidad continua de agua para la producción de alimentos. La seguridad alimentaria se vincula directamente con la preservación de fuentes sostenibles de agua subterránea para respaldar la producción continua de alimentos.

## ***D. Sistemas de información geográfica***

### ***1. SIG***

Los SIG son recursos tecnológicos que facilitan la recopilación, almacenamiento, análisis y visualización de datos geográficos. Estos sistemas combinan información espacial y atributos relacionados, lo que permite llevar a cabo un análisis espacial y tomar decisiones fundamentadas en la ubicación geográfica de los datos. Los SIG son considerados una de las tecnologías más relevantes en la era de Internet. Estas herramientas permiten a instituciones y personas planificar y tomar decisiones en diversos campos [33].

### ***2. Teledetección***

La teledetección es un método de superficie que tiene como objetivo identificar la presencia, diferencia y distribución de lineamientos, pendientes, topografía, litología, patrones de drenaje (DEMNAS) y cobertura terrestre (Landsat-8). Los resultados de cada análisis se representan en mapas temáticos [34]. Esta herramienta se basa en la interacción entre objetos y sensores que captan imágenes a distancia. Los sensores reciben el flujo de radiación emitido por un objeto y lo convierten en información que se puede analizar y utilizar para diversos fines.

La teledetección se utiliza en diferentes campos, como la vigilancia medioambiental, la agricultura, la gestión del territorio y la cartografía. Los sensores utilizados en la percepción remota capturan información en diferentes regiones del espectro electromagnético, lo que da como resultado datos sobre las propiedades de tipo físicas, químicas y biológicas de los objetos observados.

La combinación de las tecnologías de teledetección y los SIG ha transformado el nivel de las investigaciones de los recursos naturales. La teledetección proporciona datos multispectrales, multitemporales, multisensoriales y multivariados de la superficie terrestre, mientras que los SIG son sistemas de soporte de decisiones que permiten almacenar y analizar datos espaciales de diversas fuentes. La sinergia entre estas dos tecnologías es muy valiosa. La teledetección es una fuente importante de información espacial para los SIG, esta información que se genera se pueden utilizar para apoyar la interpolación de datos de teledetección [35].

### ***3. SIG en la identificación de zonas potenciales de recarga***

Se refiere al proceso de utilizar SIG para analizar y determinar áreas que tienen un alto potencial para la recarga de acuíferos. De acuerdo con [36] menciona en su investigación la importancia del análisis geoespacial en la localización y georreferenciación de ZPRH. El objetivo principal de este análisis es la reducción sustancial tanto de costos como de tiempo en los procesos de exploración y en la demanda adecuada de pozos de extracción de agua subterránea. Además, se destaca que esta metodología contribuye a evitar problemas en la planificación y desarrollo de la extracción de agua subterránea.

El estudio [8] resalta el papel fundamental de la Teledetección y SIG en la evaluación, conservación y seguimiento de programas de desarrollo relacionados con el agua subterránea. En donde también se menciona la importancia de la integración de técnicas geoespaciales y científicas para un manejo equilibrado y sostenible de los recursos hídricos subterráneos en una región específica.

### ***4. Método Pfafstetter en la delimitación de cuencas hidrográficas***

El sistema de codificación de cuencas Pfafstetter fue articulado principalmente estableciendo el orden de la red de drenaje principal de la cuenca, a partir de ahí, se asignan un sistema de numeración de base 10, principalmente identificando las áreas de drenaje de mayor tamaño, este número puede mostrar la relación topológica aguas arriba y aguas debajo, es decir este método es útil en análisis topológico de cuencas e hidrología a multiescalar [37].

Según [38] indica que el empleo de herramienta de geoprocésamiento resulta crucial para la delimitación de cuencas hidrográficas, permitiendo optimizar tiempo y recursos. La delimitación a través de herramientas computacionales requiere de una base de datos del Modelo Digital de Elevación (MDE), que almacena datos de elevación del terreno. El nivel de detalle en la codificación permite que se pueda establecer una gestión de proyectos, además de favorecer toma de decisiones correctas y distribución equitativa de los recursos hídricos.

### ***5. Clasificación supervisada en la zonificación de áreas de cobertura vegetal***

La clasificación supervisada es una técnica de teleducación que es usada en el reconocimiento de patrones espaciales. Es decir, asigna a cada pixel de una imagen espectral una clase de cobertura terrestre o uso de suelo. Esto se lo realiza por medio de

un algoritmo de clasificación que se entrena con una muestra de píxeles que se sabe que pertenecen a cada clase [39].

En su estudio [40] menciona se plantea la posibilidad de generar información sobre el uso del suelo y las distintas coberturas existentes a través de la técnica de clasificación supervisada aplicada a imágenes satelitales. Además, se destaca la utilidad de esta técnica para realizar análisis de cultivos en áreas geográficas de interés. Posteriormente, mediante el enfoque de multitemporalidad y la elaboración de cartografía temática, es posible examinar los patrones de comportamiento y los cambios que ocurren en una zona específica.

En el caso de cobertura vegetal permite identificar diferentes clases existentes, mediante la colocación de puntos de entrenamiento en imágenes satelitales que representen cada clase de cobertura vegetal que se desea identificar para luego utilizar algoritmos de clasificación para así poder asignar a cada píxel de la imagen una clase de cobertura [41].

## ***E. Ecuaciones lineales***

### ***1. Ecuación lineal***

Las ecuaciones lineales se refieren a las fórmulas matemáticas que describen la relación proporcional entre dos o más variables dentro de un modelo de simulación hidrológica. Estas aplicaciones se utilizan para modelar la escorrentía de aguas pluviales en una cuenca urbana y además nos permiten simular el flujo de agua a través de la red de drenaje. Las ecuaciones lineales se utilizan en combinación con modelos de enrutamiento geomorfológico basado en SIG para simular la escorrentía de aguas pluviales en una cuenca urbana.

Según [42] afirma que los modelos de predicción del potencial de recarga de los acuíferos se generan mediante ecuaciones lineales. Esto nos describe la importancia del modelado de las ecuaciones lineales con el uso de SIG, es una opción viable y con bajo costo de aplicación y que tiene con finalidad aportar a las acciones asociadas al aseguramiento hídrico y a la GIRH.

### ***2. Ecuación lineal de Matus 2007***

La fórmula lineal propuesta por Oscar Matus Silva se basa en la integración de cinco variables en el contexto del mapeo mediante el uso de SIG en las ZPRH. Estas variables son:

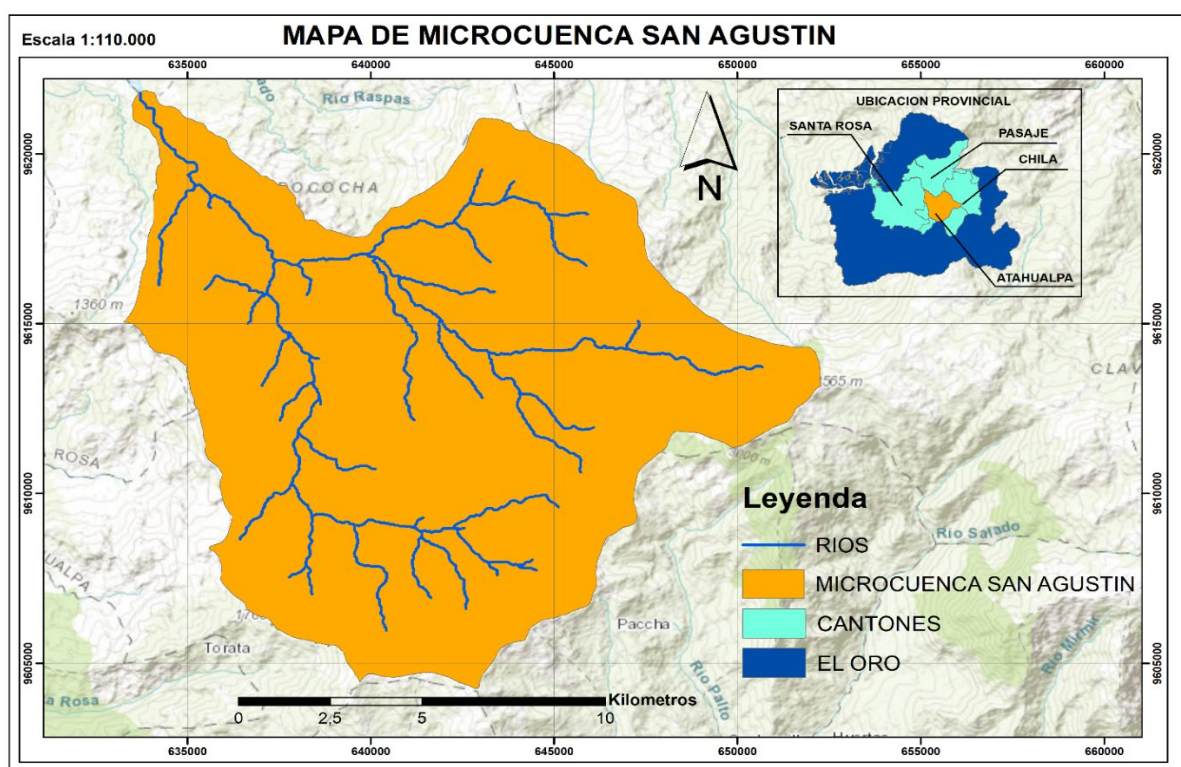
- Uso del suelo.
- Cobertura vegetal.
- Pendiente y micro relieve.
- Tipo de roca.
- Tipo de suelo.

La interrelación y convergencia de estas variables proporciona información relevante para el mapeo de las ZPRH. En su estudio, Matus también incorporó un diagnóstico participativo y desarrolló metodologías de multicriterio, como la clasificación y el rateo. A través de estas metodologías, llegó a la conclusión de que la variable de pendiente tenía un peso de ponderación más importante, mientras que la variable de uso del suelo tenía un peso menor dentro de la ecuación.

## VII. METODOLOGIA

### A. Descripción del Área de Estudio

La microcuenca de San Agustín, situada en la región austral de Ecuador específicamente en la provincia de El Oro, ocupa un lugar significativo en la subcuenca y cuenca del río Santa Rosa. Esta región geográfica abarca cuatro cantones distintos: Santa Rosa, Pasaje, Chilla y Atahualpa, y se distribuye a lo largo de las parroquias de Ayapamba, San Juan de Cerro Azul, La Victoria, Pasaje y Chilla. Un rasgo distintivo de esta área de estudio es su marcada variación altitudinal, alcanzando alturas extremas que oscilan entre los 3647 msnm en su punto más alto y los 36 msnm en su punto más bajo. Con una elevación promedio alrededor de los 1238 msnm, la microcuenca se extiende a lo largo de 18635 hectáreas de terreno. Esta extensión se traduce en una longitud total de 67 kilómetros. Dentro de esta microcuenca se encuentran dos fuentes hídricas superficiales notables: el río Dumarí y el río San Agustín. Además, en esta área convergen los poblados de Playas de Daucay, Cerro Azul, Guarumal y Saladillo, que contribuyen al entramado poblacional y cultural de la región. Esta microcuenca se encuentra caracterizada por tres tipos de clima: Tropical Megatérmico húmedo, ecuatorial mesotermico húmedo y subtropical mesotermico húmedo de acuerdo con la clasificación climática de [43]. El rango de precipitación va desde 1000 a 2000 mm y la temperatura oscila entre 12 a 22 °C.



**Figura 6.** Mapa de ubicación de la microcuenca San Agustín.

**Elaboración:** Los Autores.



## **B. Materiales**

- Sistema de información geográfica (SIG)
- Cartografía temática en formato shapefile del Mapa interactivo del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición ecológica (MAATE).
- Cartografía temática en formato shapefile del portal del Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS) perteneciente al Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).
- Capas en formato shapefile del portal del Sistema Nacional de Información (SNI)
- Imágenes satelitales de la base de datos de COPERNICUS (SENTINEL 2) y de ALASKA (ALOS PALSAR)

## **C. Equipos**

- Computador portátil (Lenovo B40-80)
- Gps Garmin
- Cámara fotográfica celular

TABLA I.  
FIRMAS ESPECTRALES SATÉLITE SENTINEL 2A

<b>Nombre del producto</b>	<b>Numero de banda</b>	<b>Nombre de la banda</b>	<b>Resolución espectral (um)</b>	<b>Resolución espacial (m)</b>	<b>Fecha de toma de imagen satelital</b>
Sentinel 2B	1	Coastal aerosol	0,43-0,45	60	29-08-2023
Sentinel 2B	2	Blue	0,45-0,52	10	29-08-2023
Sentinel 2B	3	Green	0,54-0,57	10	29-08-2023
Sentinel 2B	4	Red	0,65-0,68	10	29-08-2023
Sentinel 2B	5	Vegetación Red Edge	0,69-0,71	20	29-08-2023
Sentinel 2B	6	Vegetación Red Edge	0,73-0,74	20	29-08-2023
Sentinel 2B	7	Vegetación Red Edge	0,77-0,79	20	29-08-2023
Sentinel 2B	8	NIR	0,78-0,90	10	29-08-2023
Sentinel 2B	8a	Vegetación Red Edge	0,85-0,87	20	29-08-2023
Sentinel 2B	9	Water vapor	0,93-0,95	60	29-08-2023
Sentinel 2B	10	SWIR-Cirrus	1,36-1,39	60	29-08-2023
Sentinel 2B	11	SWIR	1,56-1,65	20	29-08-2023
Sentinel 2B	12	SWIR	2,10-2,28	20	29-08-2023

**Elaboración:** Los Autores.

## D. Métodos

Para alcanzar los objetivos planteados se utilizó la metodología descriptiva experimental, se basó en el análisis de datos obtenidos a partir de metadatos de diversas fuentes de acceso público en el Ecuador como el portal SIGTIERRAS perteneciente al MAG, del mapa interactivo del MAATE, Satélites pertenecientes a la base de datos de Copernicus y Alaska, los cuales ayudó al cumplimiento de los objetivos desarrollados en tres fases, las cuales fueron:

La primera fase consistió en el análisis de la cartografía temática a través de los SIG, usando la proyección UTM zona 17 sur Datum WGS84 para la caracterización geofísica del área de estudio. La segunda fase comprendió en el análisis y tratamiento de los datos adquiridos de las variables geofísicas utilizando la ecuación de Matus 2007, lo que permitió la creación del mapa de ZPRH. En la tercera fase se llevó a cabo la evaluación del potencial de recarga de cada área identificada mediante la aplicación de la ecuación antes mencionada, categorizando las áreas según su potencial como: con muy alto, alto, moderado, bajo y muy bajo potencial.

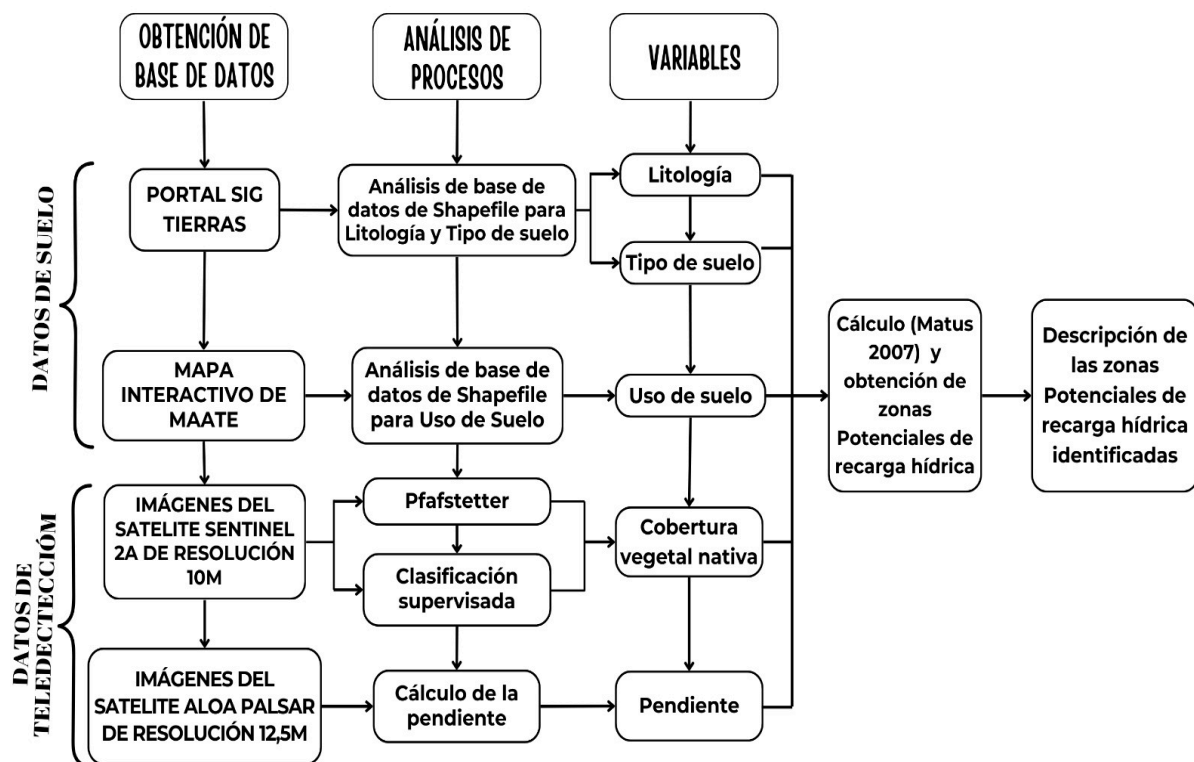


Figura 7. Diagrama de flujo de la metodología para la obtención de zonas potenciales de recarga hídrica

Elaboración: Los Autores.

## 1. Caracterización de las variables en la zona de estudio

Se emplearon las capas cartográficas en formato shapefile de diversas variables físicas, conforme a lo propuesto por Matus (2007). Estas variables incluyeron la pendiente y microrelieve, el tipo de suelo, el uso del suelo, la cobertura vegetal y la litología. Estas capas fueron sometidas a un análisis a través de SIG para su caracterización.

### a) Pendiente y microrelieve

Para la obtención del porcentaje de la pendiente del terreno en la region de interés se se accedió a la base de datos del satélite ALOS PALSAR en el sitio web de Alaska Satélite ( <https://search.asf.alaska.edu/#/> ). Se descargó el MDE de resolución de pixel de 12.5 m por 12.5m que fue procesado en SIG para obtener la pendiente. La pendiente y microrelieve se clasificaron en la siguiente **TABLA II**.

TABLA II.

CLASIFICACIÓN DE LA PONDERACIÓN SEGÚN PENDIENTE Y MICRORELIEVE DEL TERRENO

Criterio de variables	Microrelieve	Porcentaje %	Ponderación	% de influencia
Pendiente y microrelieve	Plano a casi plano	0-6	5	
	Ligeramente ondulado	6-15	4	
	Moderadamente ondulado	15-45	3	27
	Colinado	45-65	2	
	Escarpado	>65	1	

**Fuente:** Matus, 2007.

**Elaboración:** Los Autores, 2024.

### b) Litología

La información relacionada con la litología de la zona de estudio se la obtuvo de la cartografía temática de Geopedología, obtenido del portal SIGTIERRAS del MAG, el cual se realizó mediante la recolección de información de imágenes satélites y con la validación de datos en campo en el marco de un convenio de Cooperación suscrito entre el MAG, el Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos, y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Para su ponderación se clasificó de la siguiente manera como se observa en la **TABLA III**.

TABLA III.  
CLASIFICACIÓN DE LA PONDERACIÓN PARA LITOLOGÍA

Criterio de variables	Clasificación Permeabilidad	Ponderación	% de influencia
Tipo de roca	Generalmente alta	5	12
	Muy baja	2	
	Prácticamente impermeable	1	

**Fuente:** Matus, 2007.

**Elaboración:** Los Autores, 2024.

### c) *Tipo de suelo*

Para la identificar el tipo de suelo, se empleó la cartografía temática especializada en hidrogeología, la cual se encuentra disponible en el portal SIGTIERRAS del MAG, el cual se realizó mediante la recolección de información de imágenes satélites y con la validación de datos en campo a través de un convenio de Cooperación suscrito entre el MAG, el Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos, y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

La evaluación del potencial de recarga consideró que una textura con partículas gruesas del suelo promueve la infiltración y el drenaje del agua, por lo que se asignaron mayores valores a las zonas con estas características. A continuación, se presenta la clasificación de la ponderación de la variable en la **TABLA IV**.

TABLA IV.  
CLASIFICACIÓN DE LA PONDERACIÓN PARA EL TIPO DE SUELO.

Criterio de variables	Clasificación	Ponderación	% de influencia
Tipo de suelo	Franco arenoso (fino a grueso)	5	23
	Franco arcillo limoso	4	
	Arcillo arenoso	2	
	Arcilloso	1	

**Fuente:** Matus, 2007.

**Elaboración:** Los Autores, 2024.

### d) *Cobertura vegetal permanente*

Para el cálculo de esta variable se obtuvieron imágenes satelitales multiespectrales de la plataforma Copernicus ( <https://dataspace.copernicus.eu/browser/> ) satélite Sentinel 2A, con una resolución de pixel de 10m por 10m. Se realizaron las correcciones radiométricas y atmosféricas en SIG.

## Método Pfafstetter

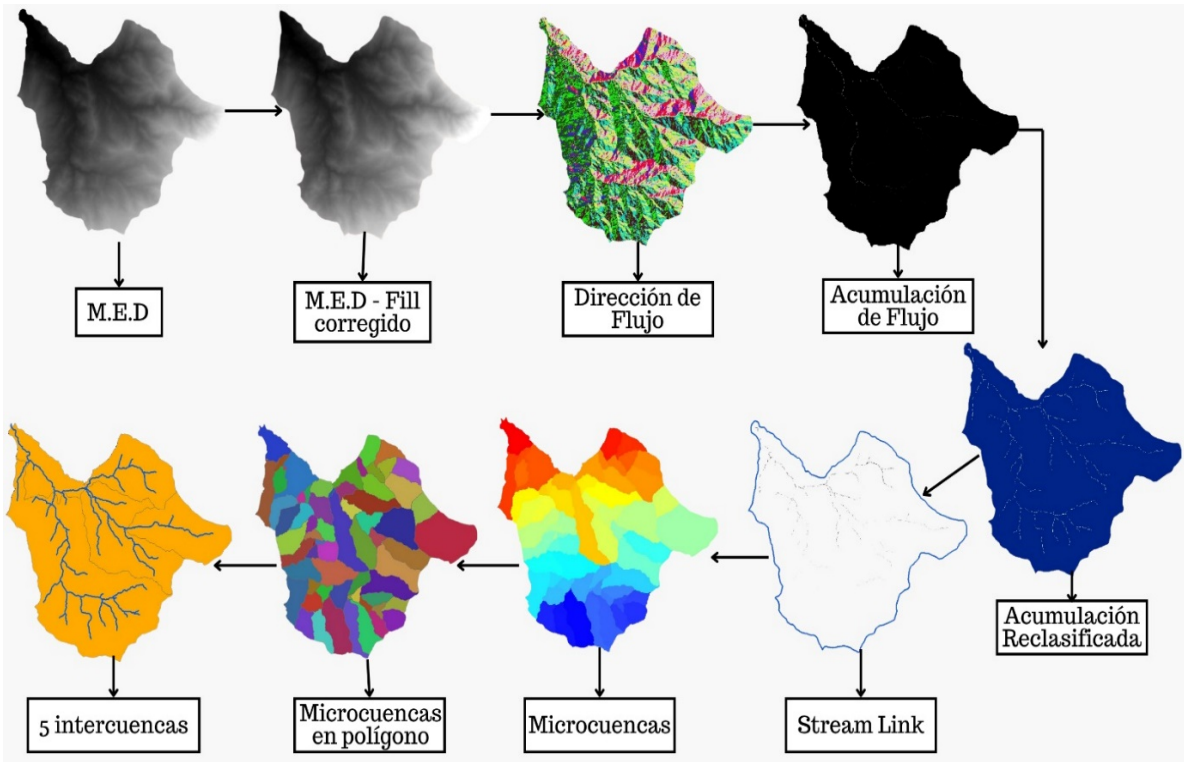
Se utilizó el método de Pfafstetter para la codificación de cuencas internas, esto con el fin de obtener áreas de estudios de menor escala espacial con respecto al total de la microcuenca y poder lograr cuantificar la vegetación nativa en porcentajes, para luego así poder ponderarlos según la metodología de Matus (2007). Este método consiste en identificar el curso del río principal usando como base un DEM con una resolución de 12.5m por 12.5m en formato TIFF, que a través de la herramienta Hydrology se determinó las 2 UH de tipo cuenca que son las áreas que confluyen en el río principal, a estas se las codificó con los números 2, 4. Las otras áreas de drenaje se agruparon en UH de tipo intercuenca, y se le asignaron códigos desde el punto de descarga o área de confluencia hacia aguas arriba con los números impares 1,3, 5.

Según la Secretaria Nacional del Agua de Ecuador [44] afirma que la cuenca del Rio Santa Rosa fue clasificada y codificada con el número 13958 que corresponde al nivel 5, al no existir más codificaciones se tomó como base para las demás codificaciones. Cabe destacar que la metodología propuesta por [44] sostiene que se puede dividir el siguiente nivel en 9 UH, pudiendo dar el caso de poseer un menor número pero nunca mayor, siendo este el caso de nuestra área de investigación. Por consiguiente, hemos clasificado y codificado según la TABLA V las UH obtenidas con la metodología Pfafstetter.

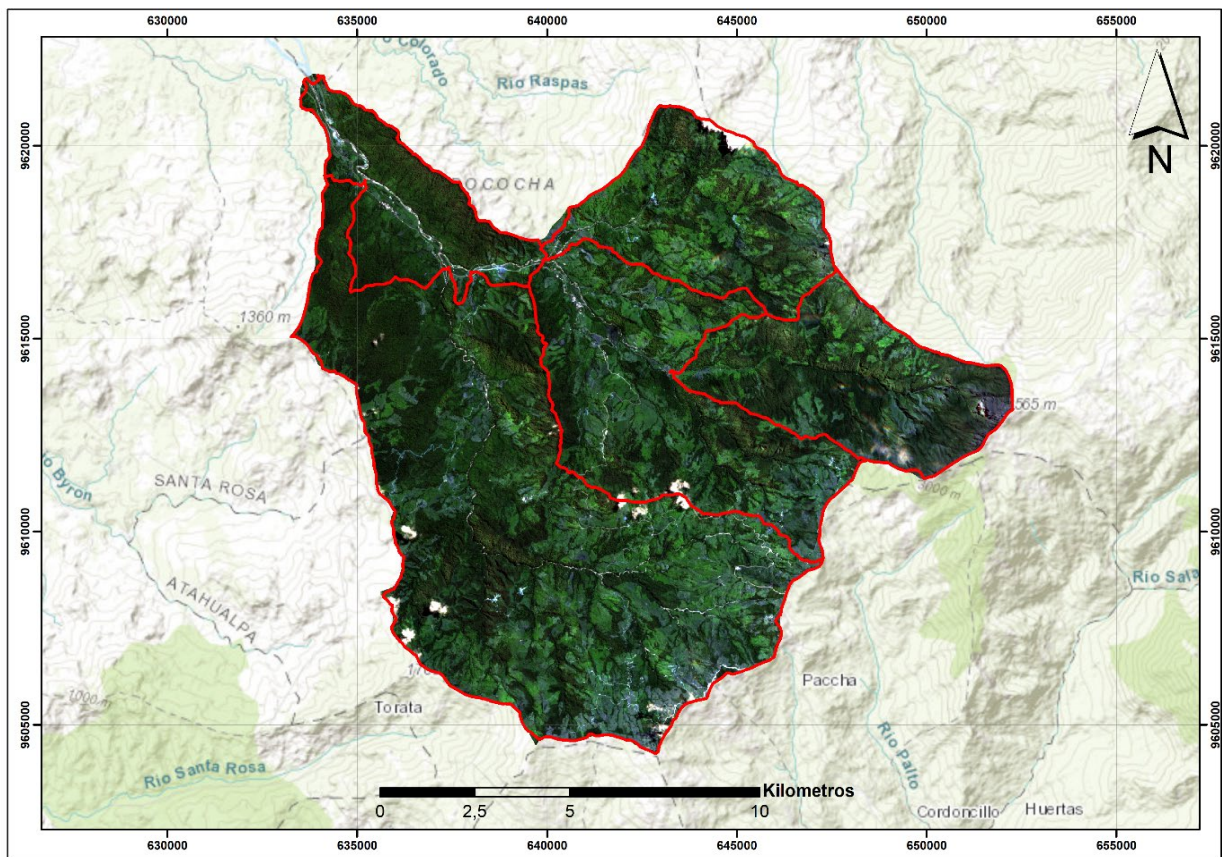
TABLA V.  
CODIFICACIÓN DE UNIDADES HIDROGRÁFICAS DE LA MICROCUENCA SAN AGUSTÍN

Código UH	Superficie (Has)
139581	1536,86
139582	8720,96
139583	3532,47
139584	2285,51
139585	2475,84

**Elaboración:** Los Autores, 2024.



**Figura 8.** Diagrama de flujo del proceso de delimitación de cuencas internas por el Método de Pfafstetter  
**Elaboración:** Los Autores, 2024.



**Figura 9.** Mapa de codificación de intercuenas Método Pfafstetter  
**Elaboración:** Los Autores, 2024.

## **Clasificación supervisada para determinar cobertura vegetal nativa**

Una vez obtenidas las intercuenas a través del método de Pfafstetter, se realizó una clasificación supervisada para identificar las áreas de cobertura de vegetación nativa, usando como insumos las imágenes multiespectrales del satélite SENTINEL 2, este posee una resolución de pixel de (10 m x 10 m). Se utilizó la combinación de las bandas 4,3,2 (color natural) para realizar un análisis visual y poder colocar un total de 19 puntos de interés, estos puntos mencionados fueron verificados con visitas in situ que permitieron georreferenciar las áreas con cobertura de vegetación nativa.

Luego de la verificación en campo, se realizó el refinamiento de las firmas espectrales al momento de clasificar por máxima verosimilitud tomando en cuenta una fracción de rechazo de 0,5 y una ponderación de la probabilidad *a priori* de nombre SAMPLE que determina las probabilidades que son correspondientes al número de celdas en cada categorías en relación con el número total de celdas muestreadas en todas las categorías del archivo de firma, para luego obtener los porcentajes de cobertura vegetal nativa en cada UH, se determinaron las áreas de cada UH y se calculó el área total de vegetación nativa, para finalmente cortar cada UH con su respectiva vegetación nativa, lograr clasificar y luego ponderar según la TABLA VI.

Se utilizó Pfafstetter en relación a que Matus (2007) dividió el área de estudio a través de comunidades, a partir de eso realizó un reconocimiento del porcentaje de cobertura vegetal nativa, donde usó la observación in situ y diferentes metodologías de encuestas y entrevistas a la población, por lo tanto, se tomó la decisión de trabajar de manera técnica y finalmente se procedió dividir la microcuenca en UH de menor tamaño.

Es necesario acotar que al momento de realizar la clasificación supervisada únicamente con los puntos de interés de la clase cobertura vegetal nativa, se obtendrán áreas con un valor nulo, puesto que al momento de crear los puntos de entrenamiento y las firmas espectrales de los mismos, se reconocerá pixeles solamente del comportamiento espectral de las regiones de interés, esto sucede porque se crea un patrón determinado que luego se trasladará en los demás pixeles que no se hayan tomado en cuenta en los puntos de interés, es decir solo se tendrán áreas de cobertura vegetal nativa dentro de la microcuenca con una ponderación de 5 y las demás áreas serán tomadas en cuenta como nulas según la TABLA VI.

Al respecto conviene decir que, al momento de procesar esta variable, es probable que surjan errores en la IZPRH, por lo tanto, es necesario trabajar en UH como se lo menciono anteriormente, y que dentro de ellas se calculó el porcentaje de vegetación nativa, para luego

otorgarles ponderaciones según la TABLA VI. Así podemos resolver el error de las áreas vacías o nulas que se presentaban cuando solamente se trabajaba con una clase.

TABLA VI.  
CLASIFICACIÓN DE LA PONDERACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL

Criterio de variables	Clasificación	Ponderación	% de influencia
Cobertura vegetal permanente	>80% de cobertura Vegetación nativa	5	25
	70-80% de cobertura Vegetación nativa	4	
	50-70% de cobertura Vegetación nativa	3	
	30-50% de cobertura Vegetación nativa	2	
	<30% de cobertura Vegetación nativa	1	

**Fuente:** Matus, 2007.

**Elaboración:** Los Autores, 2024.

#### e) *Uso del suelo*

En la obtención de la información de cobertura vegetal se analizó la cartografía temática de Uso y cobertura de la tierra en Ecuador (2020) obtenida del mapa interactivo online del MAATE. Para la obtención del uso del suelo, el MAATE y MAG realizaron un proceso de tres fases: extracción de información temática, fusión de coberturas temáticas y normalización y estandarización, consiguiendo así esta categoría.

Para asignar una categoría a una zona, se utilizó una leyenda que clasifica la cobertura de la tierra en dos niveles, que en base a las definiciones del Catálogo Nacional de Objetos Geográficos y las definiciones de Matus, se enlazaron las dos categorías basadas en su relación de uso de suelo y así se otorgaron las ponderaciones a cada criterio. Se consideró que la vegetación densa conservada cumple con las funciones ecológicas normales, mientras que las zonas intervenidas con actividades humanas disminuyen, deterioran o anulan los servicios ecosistémicos. A continuación, se muestra la ponderación en la TABLA VII.

TABLA VII.  
CLASIFICACIÓN DE LA PONDERACIÓN DEL USO DEL SUELO.

Criterio de variables	Uso del suelo	Ponderación	% de influencia
Uso del suelo y cobertura vegetal	Bosque Nativo, Vegetación arbustiva y herbácea	5	13
	Tierra Agropecuaria	4	
	Pastizal	3	
	Área sin cobertura vegetal	2	
	Zona antrópica	1	

**Fuente:** Matus, 2007.



**Elaboración:** Los Autores, 2024.

## **2. Cálculo e identificación de zonas potenciales de recarga hídrica**

Para cartografiar las ZPRH se procesaron las capas rasters reclasificadas con las ponderaciones ya definidas anteriormente, a través del SIG, utilizando las capas raster previamente reclasificadas con las ponderaciones establecidas. Esto se realizó utilizando la herramienta raster calculator, aplicando la opción de map algebra de acuerdo con la ecuación sugerida por Matus (2007).

$$ZPRH = [0,27(Pend) + 0,23(Ts) + 0,12(Tr) + 0,25(Cve) + 0,13 (Us)] \quad (1)$$

Dónde:

Pend = pendiente,

Ts = Tipo de suelo,

Tr = Tipo de roca,

Cve = Cobertura vegetal permanente y

Us = Usos del suelo.

Las zonas obtenidas se catalogaron según el criterio sugerido por Matus (2007) en la tabla VIII.

TABLA VIII.  
POTENCIAL DE RECARGA HÍDRICA SEGÚN EL MODELO PROPUESTO.

<b>Potencialidad de recarga</b>	<b>Rango</b>
Muy alta	4,1-5,0
Alta	3,5-4,09
Moderada	2,6-3,49
Baja	2-2,59
Muy baja	1-1,99

**Fuente:** Matus, 2007.

**Elaboración:** Los Autores, 2024.

### ***3. Descripción de las zonas potenciales de recarga alta y muy alta***

Se estableció a través de la cartografía temática del Ecuador obtenida en la base de datos del SNI, los sitios o poblados que se encuentran dentro de las zonas potenciales identificadas, donde se describió las características según las variables de Matus 2007 y se adicionaron otras variables como: tipo de ecosistema basado en la información del Clasificación de los Ecosistemas Terrestres del Ecuador (2013), tipo de clima fundamentado en la clasificación de [43] y zonas de precipitación obtenidas de las capas cartográficas del SNI del año 2014.

## VIII. RESULTADOS

### A. Caracterización de las variables en la zona de estudio

#### 1. Pendiente y microrelieve

En la microcuenca se diferenciaron 5 clases de pendientes con su respectivo microrelieve. Las pendientes con mayor rango de cobertura del área total de estudio es la de entre 15-45% con un relieve ondulado cóncavo distribuido en toda el área de estudio, las cuales representan el 46,61% del área total. Las áreas escarpadas que se manifiestan en un rango de entre 45-65% y un porcentaje del área total de la microcuenca de 28,88% distribuidos mayormente en la parte noreste de la microcuenca. El microrelieve fuertemente escarpado que son mayores de 65% ocupan un 19,78% del área total de estudio. El rango comprendido entre 6-15% ocupan un área de 3,78% del total que posee un microrelieve modernamente ondulado o cóncavo. Finalmente, el microrelieve plano a casi planos que comprende un rango de 0-6% ocupa un área de 0,95% del total de la microcuenca. Como se detalla a continuación en la figura (10).

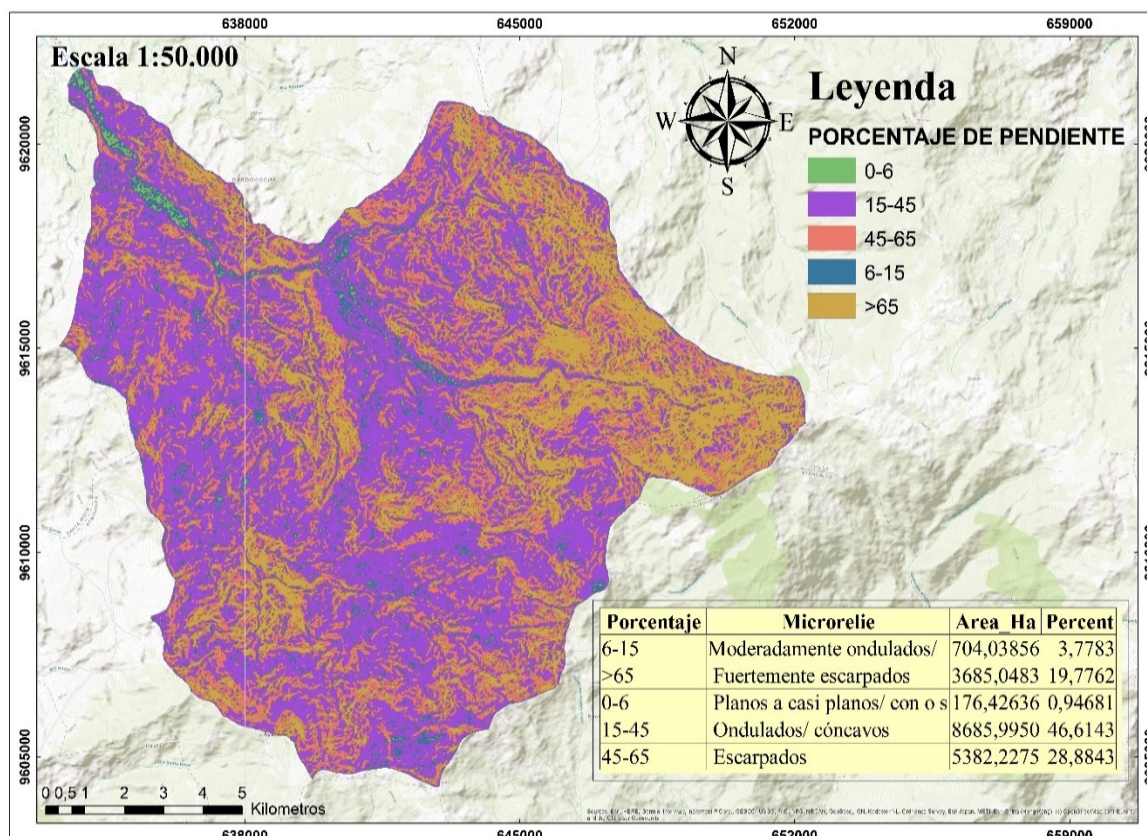


Figura 10. Mapa de pendientes de la Microcuenca San Agustín

Elaborado por: Los Autores

## 2. Litología

En la litología se identificaron tres categorías, tal como se muestra en el mapa (3) y el de mayor área fue ocupada por la categoría de Andesita, Pordifo Andesítico, Toba Andesítica, Aglomerática con una permeabilidad muy baja extendiéndose en un área que representa el 62,45% del total del terreno, que hace referencia a que existió actividad volcánica y pueden proporcionar información sobre las condiciones bajo las cuales se formaron las rocas. Seguida por la categoría Gneis Apilitico, Cuarcita, Esquistos que posee el 36,02 % del área total del terreno y contiene una permeabilidad prácticamente impermeable, la presencia de esta litología indica que el área ha experimentado una serie de eventos geológicos, incluyendo metamorfismo, deformación y erosión. Por último, con 1,53% del total del terreno se presentó la categoría de Deposito Aluvial Rio cataloga con una permeabilidad generalmente alta indicando que el área ha sido influenciada por la acción de un río. La información sobre la litología de un depósito aluvial de río puede ser útil para una variedad de propósitos.

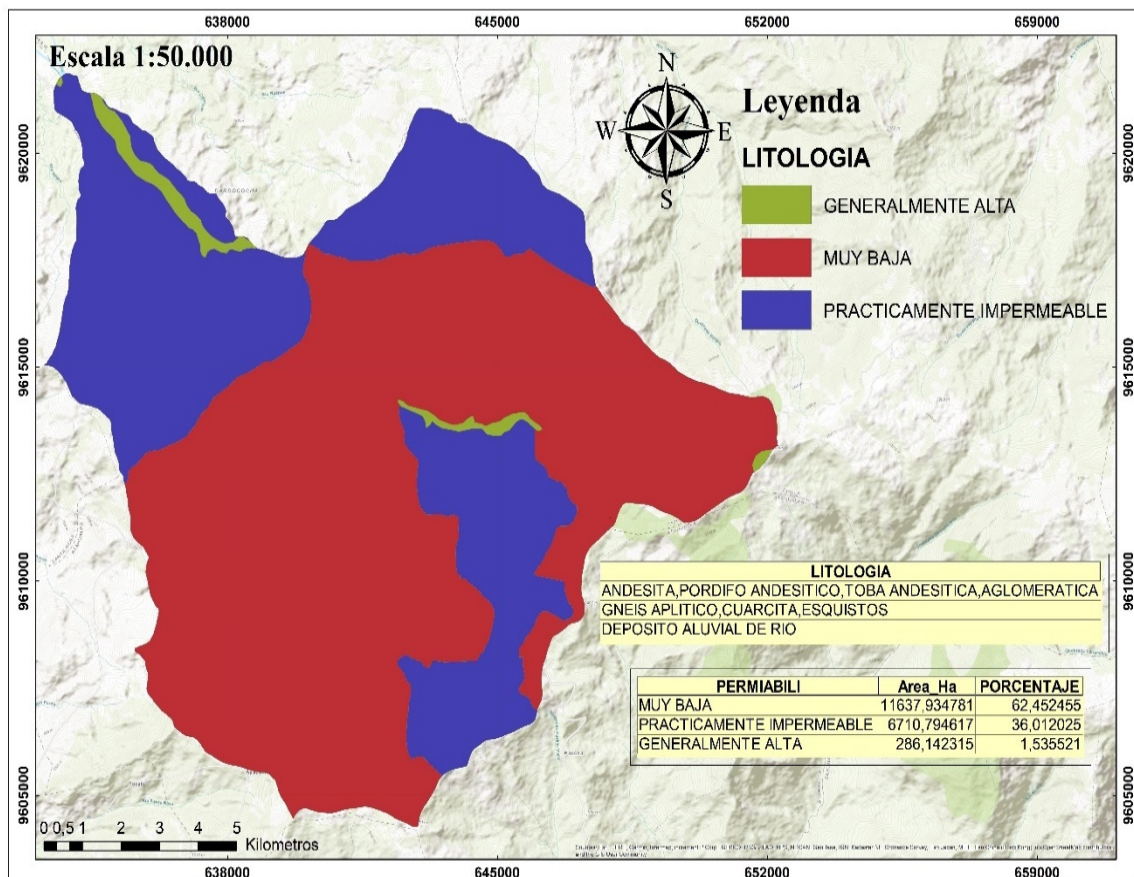


Figura 11. Mapa de litología de la Microcuenca San Agustín

Elaborado por: Los Autores



### 3. Tipo del suelo

En la figura (12) se determinó que el tipo de suelo dominante es el de Arcillo Arenoso que constituye el 55,54% del total del área de estudio con una textura fina. El tipo de suelo Franco Arcilloso Limoso con una textura media constituye un 38,48% del total de la microcuenca. Seguido con un 4,23% el tipo de suelo Franco Arenoso que cuenta con una textura moderadamente gruesa. Finalmente, con un 1,73 siendo el de menor area es el tipo de suelo Arcilloso, que posee una textura fina.

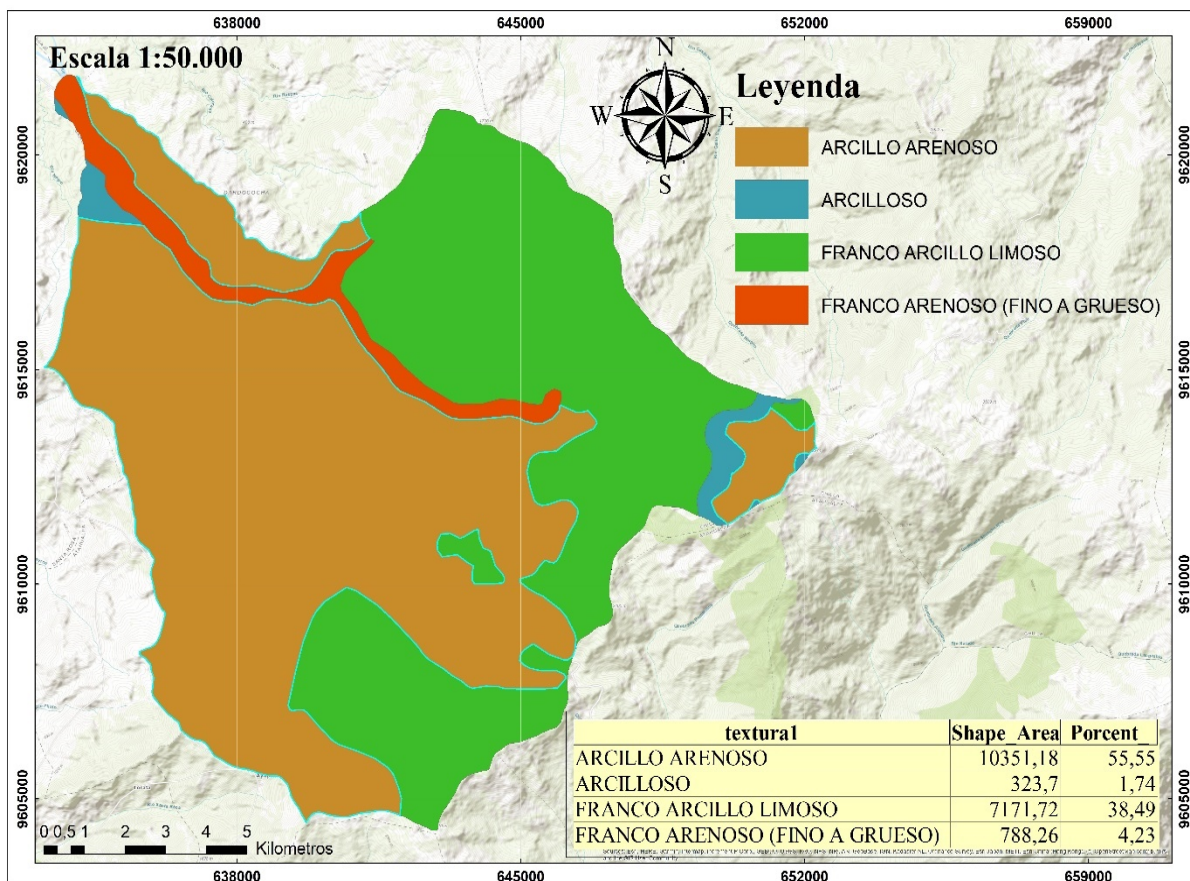
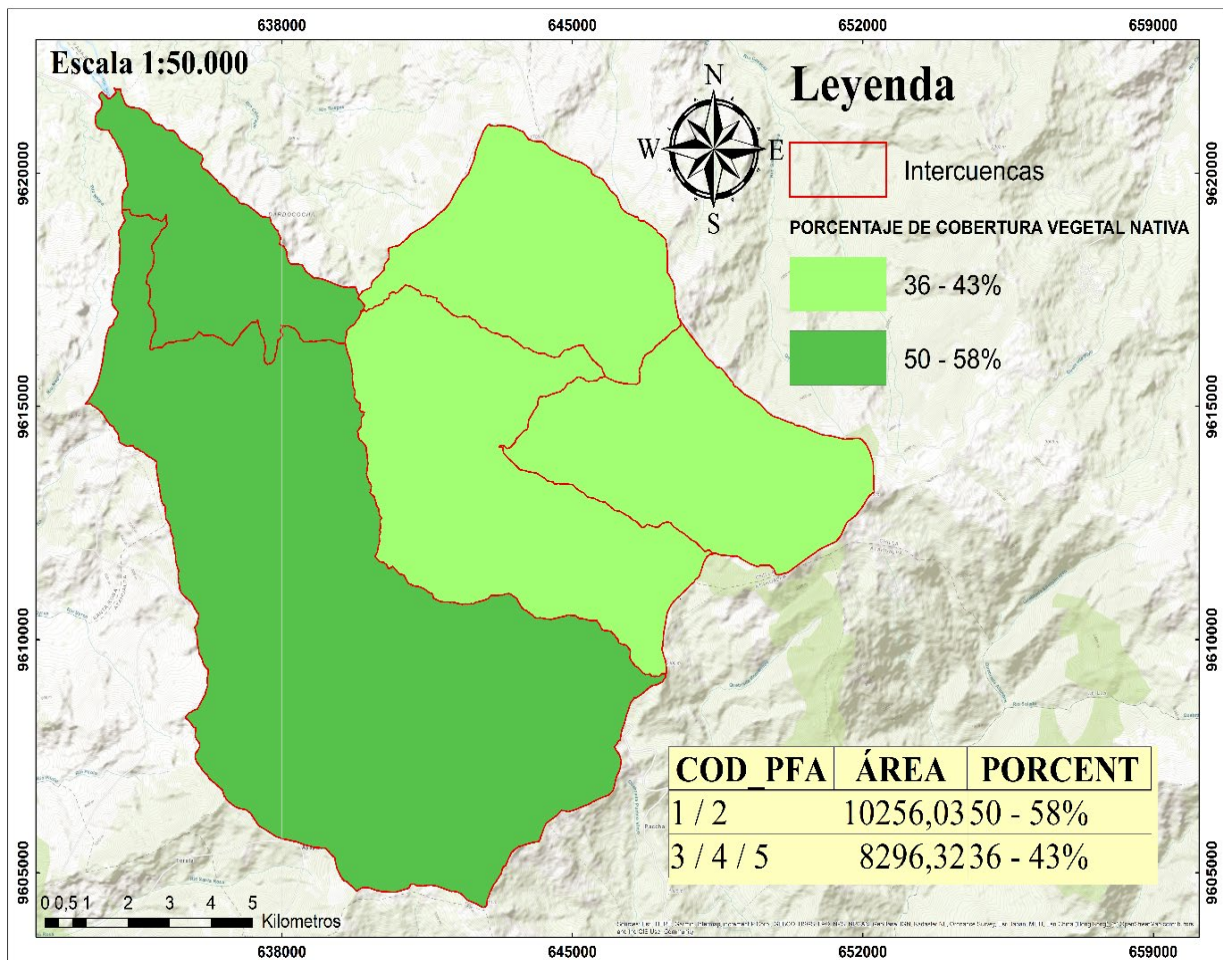


Figura 12. Mapa de tipo de suelo de la Microcuenca San Agustín  
Elaborado por: Los Autores

### 4. Cobertura vegetal

En esta variable se obtuvo 5 intercuenca a través del método Pfafstetter y a través de la herramienta interset se traslapó con el shapefile de cobertura vegetal nativa de la cuenca y finalmente usando la metodología de Matus (2007) se establecieron que las intercuenca 1 y 2 se ponderó con el valor de 3 y un porcentaje de 50-58%, las intercuenca 3, 4, y 5 con el valor

de 2 y un porcentaje de 36-43%, todo esto basado en el porcentaje de cobertura vegetal, tal como lo menciona la metodología, así como se observa en la figura (13).

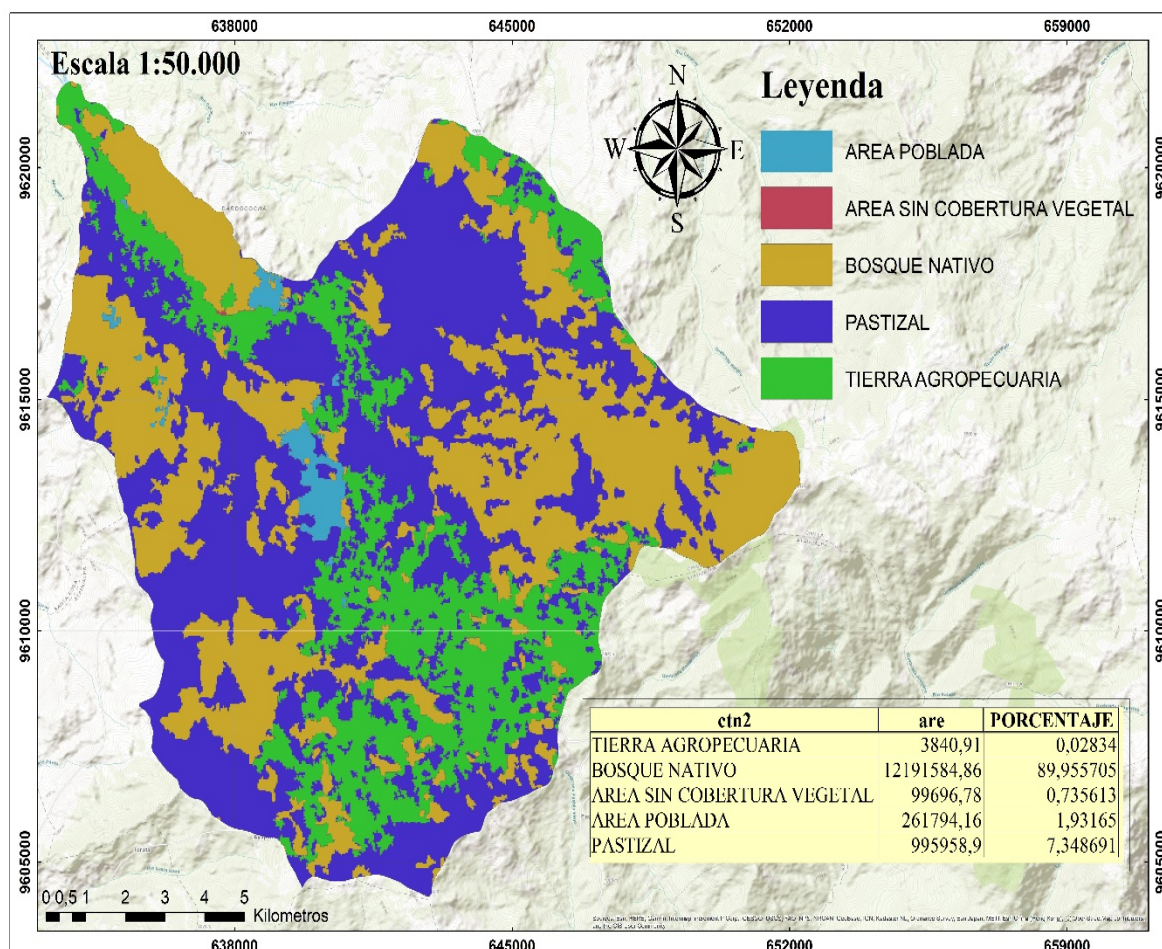


**Figura 13.** Mapa de Cobertura Vegetal Nativa de la Microcuenca de San Agustín  
**Elaborado por:** Los Autores

### 5. *Uso de suelo*

Dentro de esta variable se identificaron 5 tipos de usos del suelo en la microcuenca. Siendo el dominante el bosque nativo, que cuenta con un 89% del área total de la microcuenca, siguiéndole el pastizal que ocupa un 7,34% del área, también tenemos al área poblada que se encuentra distribuida en la parte norte, centro y noroeste de la microcuenca, representando el 1,93% del área total, asimismo identificamos a área sin cobertura vegetal que ocupa el 0,73% del terreno total de la microcuenca y finalmente tenemos a tierras agropecuarias que representan el 0,028%, tal como lo muestra en el figura (14).



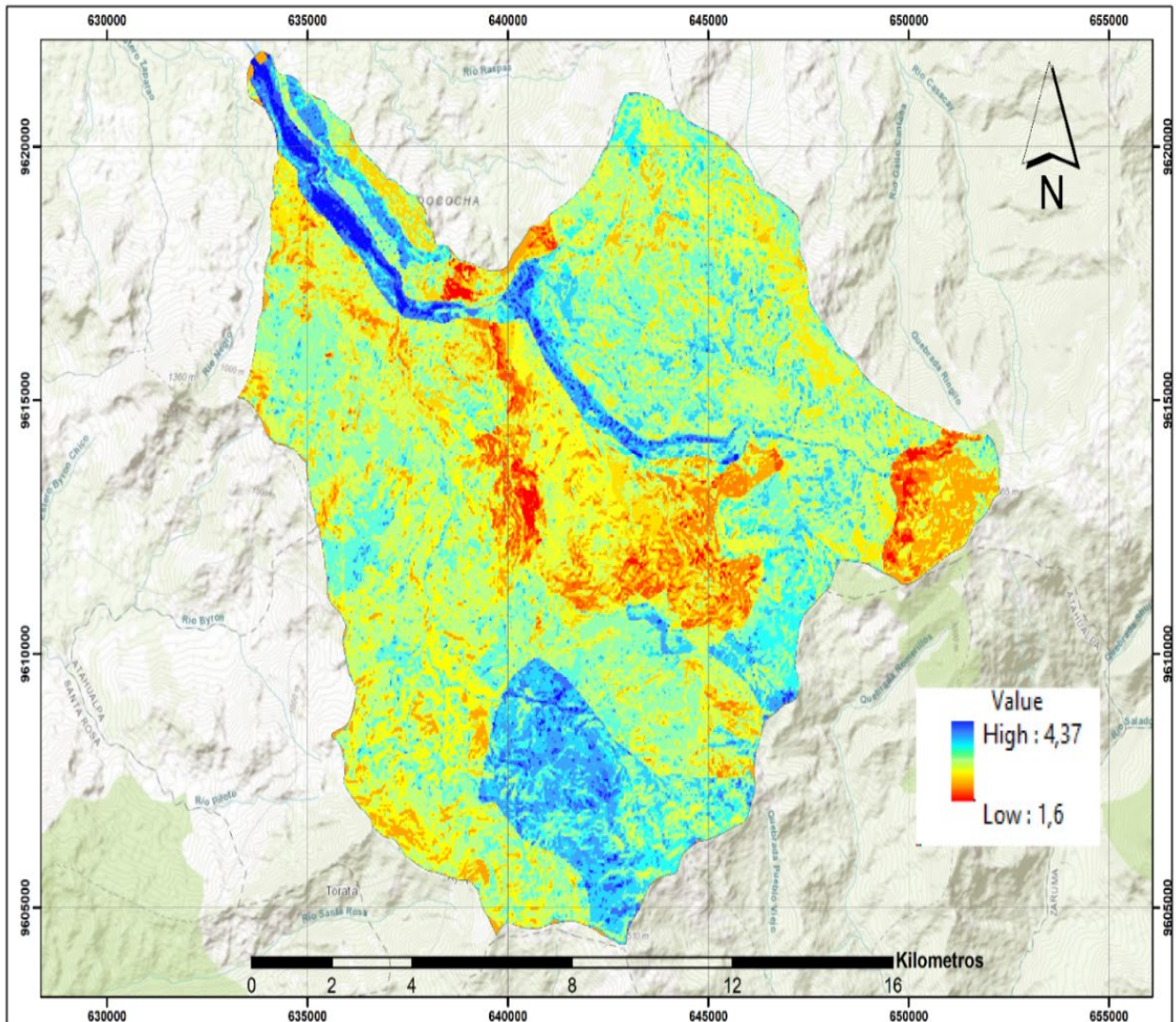


**Figura 14.** Mapa de Uso de Suelo de la Microcuenca San Agustín  
**Elaborado por:** Los Autores

## ***B. Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica***

### ***1. Zonas potenciales de recarga a través de la herramienta calculadora raster***

Los datos obtenidos de las ZPRH se basaron en la combinación de variables: pendiente, litología, uso de suelo, cobertura vegetal y tipo de suelo a través de la aplicación de la ecuación lineal de Matus (2007), se introdujeron las variables en formato raster con su respectiva ponderación en la herramienta calculadora raster, obteniendo así como resultado el mapa representado en la figura 15 que va de un rango de 1,6 a 4,37. Este producto final se lo clasificó según los rangos propuestos en la tabla 8.



**Figura 15.** Mapa de rango porcentual de potencialidad de recarga en formato raster

**Elaborado por:** Los Autores

## ***2. Zonas potenciales de recarga hídrica delimitadas geográficamente***

Posteriormente se realizó la clasificación del raster según la tabla 8, esto se hizo por medio de la caja de herramienta del SIG, en la opción de reclasificación, obteniendo como resultado las áreas que se visualizan en el mapa de la figura 16.





TABLA IX.  
POTENCIALIDAD DE RECARGA EN LA MICROCUENCA

<b>Zona de potencialidad de recarga</b>	<b>Área (Has)</b>	<b>Porcentaje %</b>
Muy baja	380,73	2,043
Baja	7544,43	40,485
Moderada	10399,5	55,806
Alta	206,01	1,105
Muy Alta	1,43	0,008
Total	18635	100

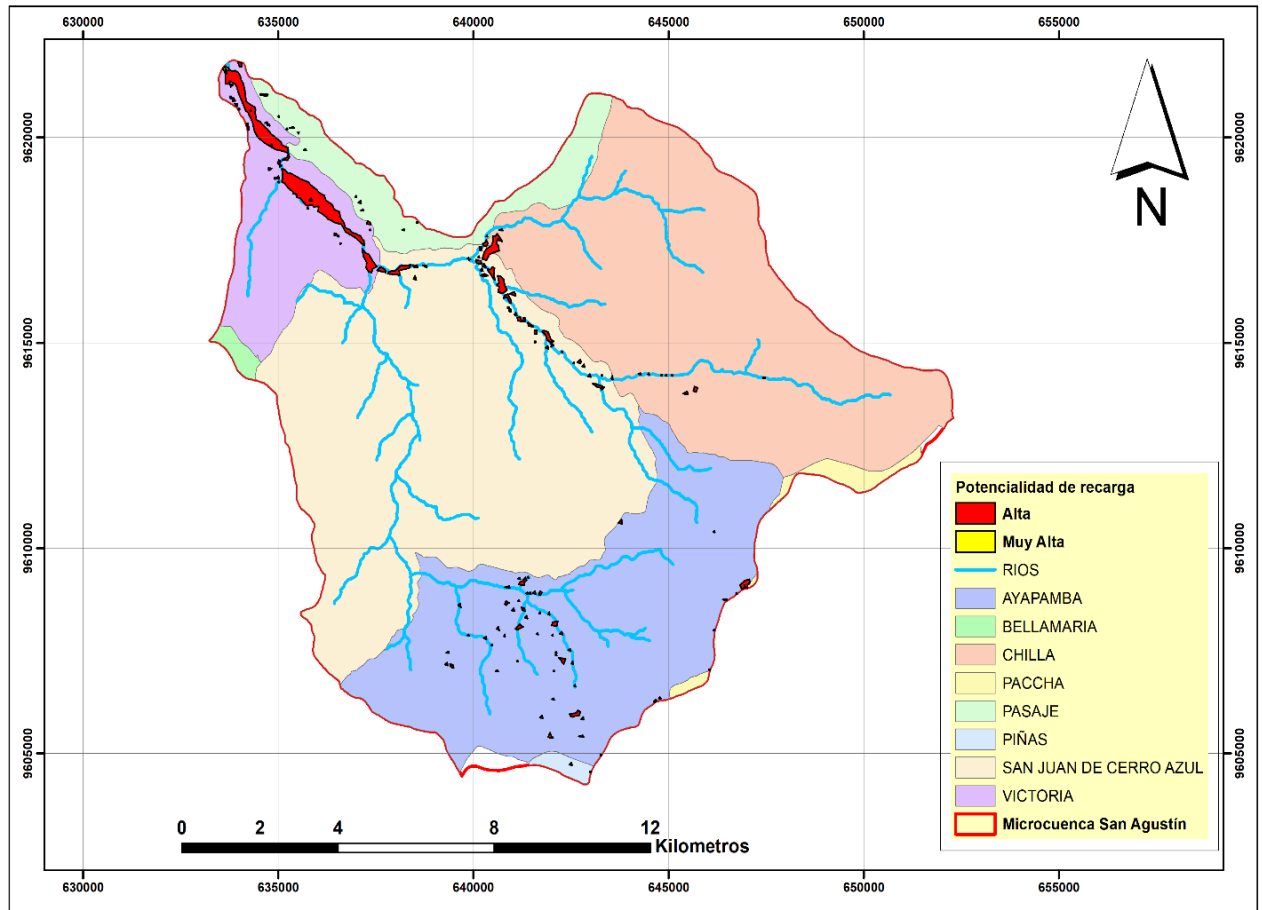
**Elaboración:** Los Autores.

Cabe destacar que, al analizar las características geofísicas y ambientales de la microcuenca, se determinó que esta se clasifica como moderada a baja para la posible infiltración de agua en el suelo. Esto se refleja en un 96,21% del área total, distribuido en categorías que abarcan desde moderada hasta baja potencialidad de recarga hídrica. En otras palabras, la cantidad de precipitación que cae y permanece en el suelo disponible presenta oportunidades limitadas de infiltración en el suelo y por ende recarga de los acuíferos.

### ***3. Extracción geográfica de zonas potenciales de recarga hídrica muy alta y alta.***

Como se observa en la figura 17, estas zonas representan un porcentaje muy bajo en relación al total del área de la microcuenca, sin embargo, esto no se convierte en un obstáculo a la hora de usar este producto como insumo para la declaratoria de una zona de protección hídrica con sus respectivas zonas de manejo, esto con el fin de tener un mecanismo técnico-legal que permita el aseguramiento hídrico de los servicios ecosistémicos asociados a la provisión y regulación.





**Figura 18.** Mapa de parroquias y poblados en zonas potenciales altas y muy altas  
**Elaborado por:** Los Autores

### a) Victoria

El área evaluada e identificada como potencial presente en la parroquia posee las siguientes características:

- Con base en el cálculo de las zonas potenciales con las características antes descritas se determinó que esta parroquia posee con **muy altas y altas** posibilidades de recarga hídrica.
- Se consideró que el porcentaje de mayor área de recarga está ubicada en la parroquia Victoria, dentro del área de influencia se identificaron actividades económicas como: producción de cacao, minería pétreo, ganadería y zonas de recreación turística (ver fig. 19, 20 y 21). Esto quiere decir que esta área se encuentra bajo presión antropogénica es decir que las actividades económicas se han ido expandiendo a lo largo del tiempo.





**Figura 19.** Áreas de producción ganadera.  
**Elaborado por:** Los Autores



**Figura 20.** Entrada a Zonas de minería pétreo  
**Elaborado por:** Los Autores



**Figura 21.** Áreas de producción agrícola – Cacaotera  
**Elaborado por:** Los Autores

## ***2. Ecosistemas del Ecuador Terrestre***

Una vez obtenidas las ZPRH, se analizó la cartografía temática sobre los ecosistemas terrestres con el objetivo de conocer la relación ecológica existente. Como se puede observar en la fig. 19 existen dos tipos de ecosistemas: Bosque siempre verde estacional piemontano del Catamayo-Alamor y Bosque siempre verde montano bajo del Catamayo-Alamor.

### ***a) Bosque siempre verde estacional montano bajo del Catamayo-Alamor***

Este tipo de hábitat se caracteriza por una vegetación perenne que conserva su follaje durante todo el año, predominando al norte del río Jubones en las áreas más húmedas, particularmente en las pendientes escarpadas de las estribaciones occidentales del sur de los Andes, específicamente en el sector de Catamayo-Alamor[45].

Además, se extiende por las zonas elevadas de los cantones Pasaje y Chilla, Balsas, Cerro Azul, la región alta de la cordillera del Oso y la reserva Biológica Buenaventura. Este ecosistema se caracteriza por un clima húmedo a hiperhúmedo, favorecido por una densa cobertura vegetal que facilita una mayor infiltración de agua en el suelo.





**Figura 22.** Bosque siempreverde piemontano del Catamayo-Alamor → Ubicación Microcuenca San Agustín  
**Fuente:** Los Autores

***b) Bosque siempre verde estacional piemontano del Catamayo-Alamor***

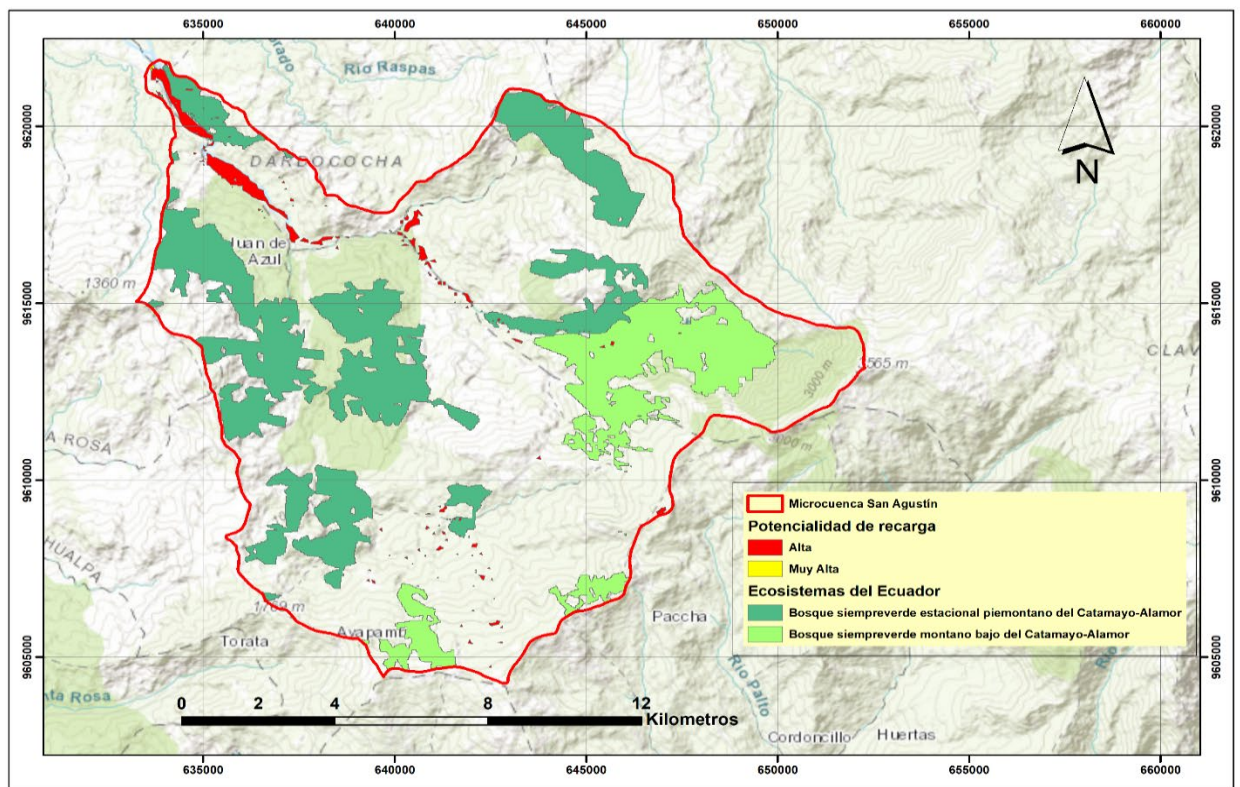
Estos bosques se caracterizan por su estructura de múltiples estratos, con un dosel que oscila entre los 20 y 25 metros de altura, incluyendo árboles emergentes que alcanzan hasta los 35 metros. En este entorno convergen elementos florísticos tanto de bosques perennifolios como de bosques caducifolios y semicaducifolios [45].

Este ecosistema se encuentra en la provincia de El Oro, en lugares como el Cerro San Tintin en Casacay y Unión Lojana, así como en Loja, en áreas como El Limo y El Triunfo.

Existen pocas o reducidas ZPRH identificadas dentro de este ecosistema, sin embargo, este cumple con ciertas características fundamentales que permiten que a través de la vegetación presente pueda ocurrir una mayor infiltración de agua, ya que presenta también un bioclima húmedo, es decir existe presencia de lluvias menores.



**Figura 23.** Bosque siempre verde estacional piemontano del Catamayo-Alamor → Microcuenca San Agustín  
**Fuente:** Los Autores



**Figura 24.** Mapa de ecosistemas terrestres del Ecuador presentes en las zonas potenciales de recarga alta y muy alta  
**Elaborado por:** Los Autores



### 3. Tipos de clima

En relación a las zonas climáticas establecidas por Pourrut en el Ecuador, la mayor parte de ZPRH se encuentran en la zona de clima Tropical Megatérmico Húmedo el cual posee las siguientes características: Se extiende en una franja que abarca aproximadamente 110 kilómetros de ancho, desde Esmeraldas hasta el Golfo de Guayaquil. La precipitación anual total generalmente oscila entre 1000 y 2000 mm, aunque en algunas áreas específicas de las estribaciones bajas de la cordillera puede superar estos valores. Al igual que en el caso anterior, las lluvias se concentran en un único período, que va de diciembre a mayo, mientras que el resto del año es seco. Las temperaturas medias rondan los 24°C, y la humedad relativa varía entre el 70% y el 90% según la temporada. La vegetación consiste en un denso bosque que experimenta un período de receso dentro de su ciclo vegetativo [43].

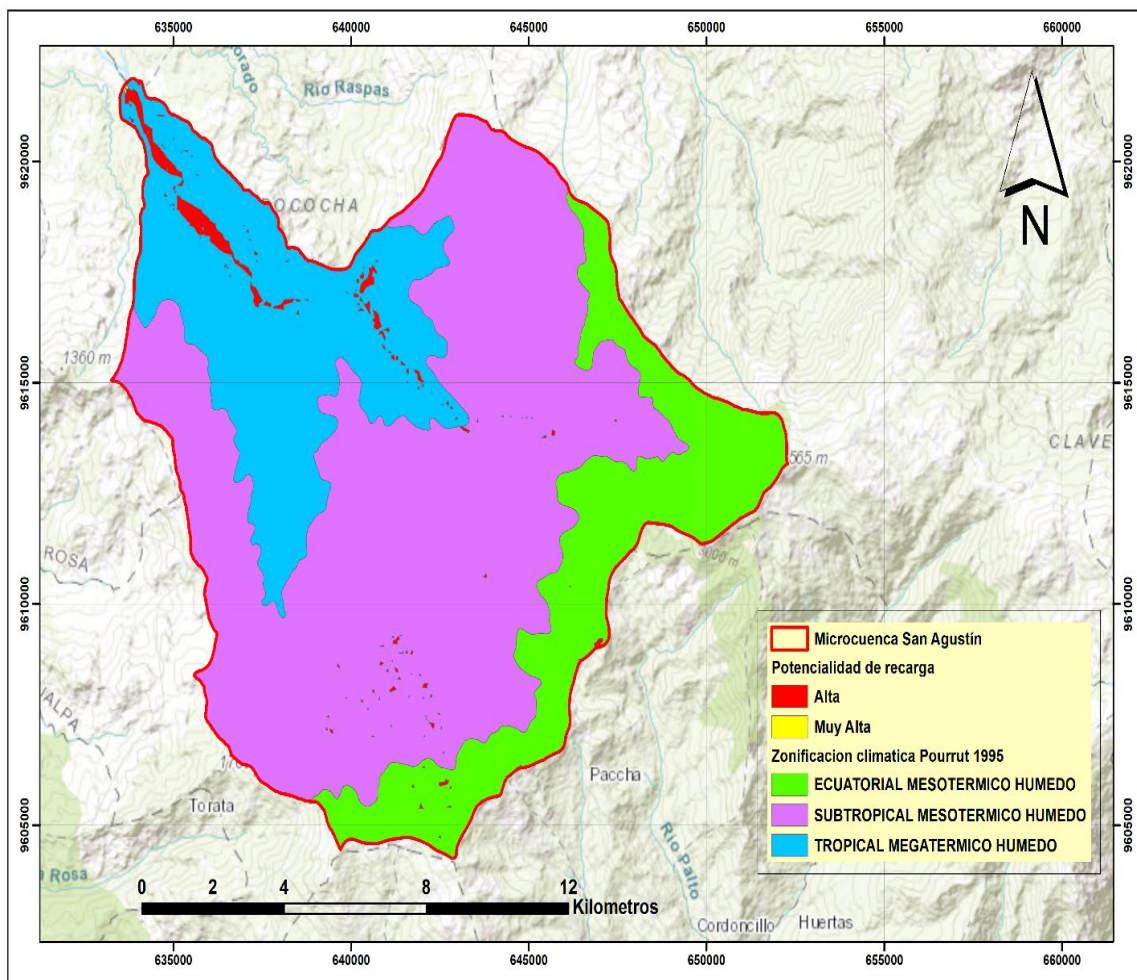


Figura 25. Mapa de zonas climáticas presentes en las áreas identificadas según [43].

Elaborado por: Los Autores

#### 4. Zonas de precipitación

Respecto a la distribución espacial de las precipitaciones, como se observa en la fig. 23, se determinó que la mayor zona con potencialidad de recarga hídrica se sitúa en el intervalo de precipitación promedio anual que va desde 1000-1300 mm. En menor proporción, se identificaron áreas delimitadas con una alta potencialidad de recarga hídrica en los rangos de precipitación promedio anual que van desde 1300-1900 mm.

Esto quiere decir que las ubicaciones de las zonas potenciales están asociados a rangos de promedios menores de precipitación, por lo que se entiende que están relacionados directamente con el cauce o desembocadura del río principal.

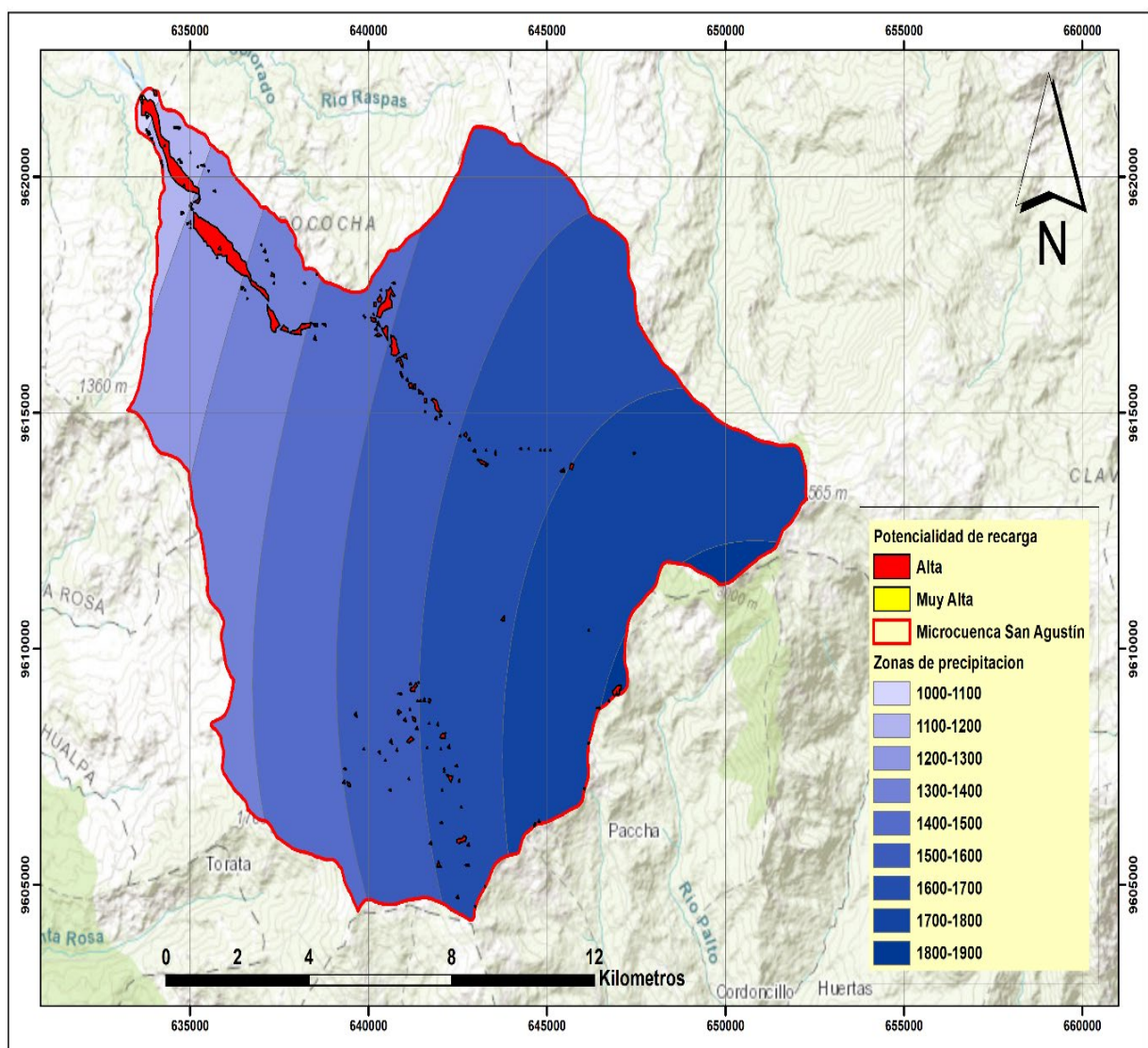


Figura 26. Mapa de zonas de precipitación presentes en el área de estudio.

Elaborado por: Los Autores.

## IX. DISCUSION

Para la identificación de las ZPRH en áreas donde exista un limitado acceso a la información de acuíferos, la metodología que se utilizó es idónea, puesto que está emplea variables de las cuales la información es de libre acceso y disponible, tal como lo indica [6] en su artículo de revisión, que identifico más de 20 variables, que aproximadamente el 40% se encontraron consistentemente en todos los estudios. Estos incluyen a las variables de litología, geomorfología, tipo de suelo, uso y cobertura de suelo, topografía, lineamientos, variables relacionadas con el drenaje, y la pendiente, precipitaciones y recarga de aguas subterráneas.

Se priorizó el uso de datos existentes para optimizar recursos y tiempo, considerando las limitaciones de acceso a la zona. De este modo, la mayoría de las variables se obtuvieron a partir de: Modelos Digitales de Elevación (MDE) los cuales proporcionaron información topográfica esencial para la caracterización del relieve, la pendiente y la red de drenaje, Cartografía temática por medio de la utilización de cartografía temática de diversos tipos, incluyendo geología, hidrogeología, suelos y uso del suelo, elaborados a partir de relevamientos en campo específicos realizados previamente e imágenes satelitales de alta resolución que permitieron la identificación de características geológicas y geomorfológicas, así como la delimitación de unidades hidrogeológicas. El uso de datos existentes se complementó con información puntual de campo, asegurando la precisión y confiabilidad de los resultados.

Se ha determinado que la gradiente topográfica es un factor preponderante en la incidencia de la recarga hídrica. En regiones con gradientes topográficas mínimas, el agua se desplaza a una velocidad reducida, lo que propicia un contacto prolongado con el suelo, favoreciendo así la infiltración. Tal como lo expone [46] en su estudio, a través de la modelización de variables, las de mayor significancia en relación a las ZPRH son: la gradiente y la curvatura de la misma. Esto implica que la integración de estas variables en áreas de gradientes bajas y curvaturas planares horizontales facilita que el agua permanezca en estado de reposo por intervalos más extensos, permitiendo su percolación hacia los acuíferos.

Aplicando la metodología de Matus (2007), se determinó que las zonas altas y muy altas de recarga hídrica se encuentran directamente relacionadas con la zona ripícola adyacente a la red de drenaje y que el porcentaje de área que ocupan estas zonas es relativamente menor

a las demás zonas potenciales identificadas siendo la zona moderada la que ocupa la mayor área dentro de la microcuenca, tal como lo indica [47] en su estudio donde obtuvo resultados similares, aduciendo que las zonas altas y muy altas se relaciona directamente con la red de arroyos. Es importante destacar que el incremento en las ZPRH clasificadas como baja y muy baja está vinculado a la degradación de los ecosistemas y la transformación del uso del suelo, atribuibles al crecimiento de las actividades económicas y la expansión de la frontera agrícola

Según [48], utilizando la metodología de Matus (2007), se identificaron zonas altas y muy altas con un porcentaje de ocupación del 9% en las áreas adyacentes a la red de drenaje de la UH Quebrada Arriba. El estudio indica que esto se debe principalmente a la degradación significativa de los ecosistemas y la cobertura vegetal nativa en estas zonas. De manera similar, se encontró un 1,11% de zonas altas y muy altas en la microcuenca San Agustín, lo que significa que estas áreas poseen la menor capacidad de recarga hídrica.

En relación a la variable de cobertura de vegetación nativa, [49] señala en su estudio que la metodología de Matus no contempla la influencia de las características de la vegetación en el área de estudio, limitándose únicamente al porcentaje de cobertura vegetal. Esta metodología se fundamenta exclusivamente en el análisis del porcentaje de cobertura vegetal. Por ejemplo, el autor menciona la presencia de plantaciones de *Eucalyptus spp.* dentro de su área de estudio, las cuales según [50],[51],[52] mencionan que están directamente relacionada con efectos adversos como la pérdida de agua en el ciclo hídrico de una cuenca, pérdidas en el sistema hídrico por evapotranspiración y debido a las profundidades de sus raíces reduce los niveles de recarga de aguas subterráneas y de descarga hacia la red de drenaje en comparación con los pastizales o cultivos presentes en la zona.

En el presente estudio, se empleó el método Delphi para realizar una nueva clasificación de la variable. Este proceso determinó que la mayor potencialidad de recarga se encuentra en un rango de cobertura vegetal estimado entre el 70% y el 80%.

En relación a la estimación de la superficie de cobertura vegetal en esta investigación, se modificó el proceso de obtención de esta variable, ya que se consideró que Matus (2007) realizó el relevamiento de esta variable a través de una gestión participativa que incluyó observación directa en campo, añadiendo entrevistas a los pobladores de las comunidades para obtener información que permita identificar las zonas de coberturas vegetales nativas.

Dada la situación expuesta, se optó por aplicar un enfoque metodológico que integrara la clasificación supervisada y el sistema de Pfafstetter. Este enfoque se basó en la adquisición de imágenes satelitales para calcular el índice de cobertura vegetal. Para ello, se colocaron puntos

de interés en áreas previamente identificadas en campo como cobertura vegetal nativa. Posteriormente, estas imágenes fueron procesadas utilizando software especializado para determinar los porcentajes de cobertura vegetal nativa en relación con la microcuenca.

Además, se implementó el método de Pfafstetter junto con un el MDE para segmentar la zona de estudio en cuatro intercuenca. Esta segmentación permitió calcular el porcentaje de suelo con cubierta vegetal nativa en cada intercuenca. A continuación, se asignaron ponderaciones según el método sugerido por Matus (2007) para la evaluación final de la cobertura vegetal nativa en la zona de estudio.

Esto quiere decir que en concordancia con el autor anteriormente mencionado podemos afirmar que la cobertura vegetal nativa es uno de las variables de la ecuación que más controversia trae consigo, ya que se debe modelar según las características de cada área de estudio.

Debido a que no se precisaron estudios relacionados con la IZPRH en la microcuenca, se procedió a aplicar a metodología de Matus (2007) puesto que permite generar información consolidada y precisa a través de la utilización de herramientas de fácil acceso y bajo costo, tal como lo menciona [53] en su artículo quien menciona que este tipo de metodología en la IZPRH puede considerarse como una alternativa de gestión del agua en la microcuenca, puesto que es una estrategia practica y de aplicación simple. No se requieren costos financieros altos, pero si recursos humanos técnicos que permitan verificar y precisar los datos obtenidos.

## X. CONCLUSIONES

Se observó que las variables utilizadas (Pendiente y microrelieve, litología, tipo de suelo, uso de suelo y cobertura vegetal nativa) son necesarias para poder obtener las ZPRH, además la disponibilidad de los datos de estas variables es de fácil acceso y con un nivel de confianza alta, debido a que han sido levantados en campo por instituciones gubernamentales.

Se identificó 5 clases de recarga hídrica que van desde muy alta con el 0,008% del territorio total de la microcuenca, a muy baja que tiene un área de 2,04%. Afirmando así que la microcuenca posee un promedio de recarga entre moderada y baja, abarcando el 96,22% del total del territorio, esto va a depender fundamentalmente de las variables que tienen mayor peso en la ecuación como lo son la cobertura vegetal nativa permanente y la pendiente.

Se identificó que, en las parroquias de La Victoria, San Juan de Cerro Azul, Pasaje, Chilla, Paccha, Ayapamba y Piñas existen zonas de recarga potencial alta y muy alta, siendo La Victoria la que destaca con las mayores áreas de recarga. La vegetación nativa y los suelos específicos presentes en estas áreas impulsan su alto potencial de recarga, asociados directamente con las zonas ripícolas. Las zonas de recarga alta y muy alta se han visto presionadas antropogenicamente, esto se debe a que actualmente existe en la parte alta de la microcuenca actividades agrícolas cacaoteras, ganaderas y mineras que están afectando a los ecosistemas y sus bosques nativos en gran medida.

La metodología empleada para detectar ZPRH ofrece una alternativa pragmática que no requiere de información técnica especializada, como datos climáticos detallados o unidades de mapeo específicas, en su desarrollo. Este enfoque simplificado facilita su aplicación y comprensión, lo que resulta beneficioso a la hora de tomar decisiones entorno a la GIRH y la conservación del medio ambiente.

## **XI. RECOMENDACIONES**

Se recomienda tener en cuenta que Matus (2007) en su metodología obtiene la variable cobertura vegetal nativa a través de una metodología de observaciones directas integrando una gestión participativa a través de entrevistas y/o encuestas, lo cual no garantiza precisión en los resultados, para lo cual se sugiere contrarrestar la subjetividad en la valoración de la variable utilizando métodos cuantitativos que permitan integrar no solamente el porcentaje de cobertura vegetal, sino también las características morfológicas, asociadas a la absorción de agua.

Se recomienda utilizar este tipo de metodología como una herramienta que permitirá gestionar el ordenamiento territorial de las actividades en la microcuenca esto con el fin de asegurar la toma de decisiones entorno a la gestión integral del recurso hídrico y por consiguiente su aprovisionamiento a mediano y largo plazo.

En el proceso de obtención del producto final, a través de la calculadora raster, se procedió a utilizar 4 variables con datos de disponibilidad inmediata como Pendiente y micro relieve, litología, uso de suelo y tipo de suelo que representan el 75% de la fórmula sugerida por Matus (2007). A partir de este producto se recomienda aplicar mecanismos de restauración ecológica en las zonas identificadas como alta y muy alta, ya que se encontró degradaciones en estas áreas, esto con el fin de aumentar la posibilidad de recarga usando la totalidad de las variables en la aplicación del 100% del producto final.

A partir de la IZPRH alta y muy alta, se recomienda declarar Áreas de Protección Hídrica por parte del MAATE con el fin de implementar lineamientos específicos que permitan gestionar integralmente los recursos hídricos principalmente enfocado a mantener y mejorar la calidad y cantidad de agua subterránea, contribuyendo a la seguridad hídrica de la microcuenca.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] T. Melese y T. Belay, «Groundwater Potential Zone Mapping Using Analytical Hierarchy Process and GIS in Muga Watershed, Abay Basin, Ethiopia», *Global Challenges*, vol. 6, n.º 1, p. 2100068, ene. 2022, doi: 10.1002/gch2.202100068.
- [2] J. P. Chonlong Alcivar y H. A. Pacheco Gil, «Estimación de zonas potenciales de aguas subterráneas en la cuenca del río Portoviejo mediante análisis jerárquico basado en SIG y teledetección», *Rev\_Bas\_de\_la\_Ciencia*, vol. 6, n.º 1, p. 1, abr. 2021, doi: 10.33936/rev\_bas\_de\_la\_ciencia.v6i1.2648.
- [3] P. Campoverde-Muñoz *et al.*, «Risk Assessment of Groundwater Contamination in the Gala, Tenguel, and Siete River Basins, Ponce Enriquez Mining Area—Ecuador», *Sustainability*, vol. 15, n.º 1, p. 403, dic. 2022, doi: 10.3390/su15010403.
- [4] S. G. Ramirez, G. P. Williams, y N. L. Jones, «Groundwater Level Data Imputation Using Machine Learning and Remote Earth Observations Using Inductive Bias», *Remote Sensing*, vol. 14, n.º 21, p. 5509, nov. 2022, doi: 10.3390/rs14215509.
- [5] M. Smith, K. Cross, M. Paden, y P. Laban, Eds., *Acuíferos: Gestión Sostenible de las Aguas Subterráneas*. San José, Costa Rica: UICN ORMACC, 2020.
- [6] S. Díaz-Alcaide y P. Martínez-Santos, «Review: Advances in groundwater potential mapping», *Hydrogeol J*, vol. 27, n.º 7, pp. 2307-2324, nov. 2019, doi: 10.1007/s10040-019-02001-3.
- [7] T. Kariyawasam, V. Basnayake, S. Wanniarachchi, R. Sarukkalige, y U. Rathnayake, «Application of GIS Techniques in Identifying Artificial Groundwater Recharging Zones in Arid Regions: A Case Study in Tissamaharama, Sri Lanka», *Hydrology*, vol. 9, n.º 12, p. 224, dic. 2022, doi: 10.3390/hydrology9120224.
- [8] R. A. Maddio, A. C. Dufilho, y M. Gandini, «Estimación de la recarga potencial de agua subterránea de un acuífero mediante teledetección y sistemas de información geográfica», *Rev.Geol.Ap.Ing y Amb.*, n.º 50, p. e006, jul. 2023, doi: 10.59069/24225703e006.
- [9] E. Boughariou, N. Allouche, F. Ben Brahim, G. Nasri, y S. Bouri, «Delineation of groundwater potentials of Sfax region, Tunisia, using fuzzy analytical hierarchy process, frequency ratio, and weights of evidence models», *Environ Dev Sustain*, vol. 23, n.º 10, pp. 14749-14774, oct. 2021, doi: 10.1007/s10668-021-01270-x.
- [10] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, *Informe mundial de las naciones unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018*. en Informe Mundial de



- las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. UN, 2019. doi: 10.18356/c18ed0db-es.
- [11] R. Valencia, D. D. Serrano, y R. Galárraga-Sánchez, «Cambios de uso del suelo en cuencas alto andinas y consecuencias en la oferta hídrica. Caso de estudio microcuenca del río Blanco, páramos del Nevado Cayambe, Ecuador.», vol. 34, n.º 1, 2014.
- [12] A. Mendoza y J. David, «Estudio de la influencia de la vegetación y bosque de ribera en la calidad del agua del río Tomebamba de la ciudad de Cuenca», Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador, Cuenca, 2020.
- [13] Lara-Vásquez Norma Ximena, Cushquicullma-Colcha Diego Francisco, Guaiña-Yungán Jonny Israel, Espinoza Víctor Manuel, y Ati-Cutiupala Guicela Margoth, «Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la subcuenca del Río Chambo mediante los sistemas de información geográfica y el análisis multicriterio», *Polo de conocimiento*, vol. 6, n.º 6, pp. 122-148, 2021, doi: 10.23857/pc.v6i6.2745.
- [14] V. X. Macas-Espinosa y K. F. López-Escobar, «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», *Rev. Teledetec.*, n.º 51, p. 135, jun. 2018, doi: 10.4995/raet.2018.7592.
- [15] G. C. Egas, «Caracterización y evaluación de la Cuenca Alta del Río Santa Rosa».
- [16] Secretaría nacional de planificación, «Plan de creación de oportunidades 2021-2025.» 2021.
- [17] O. G. Almanza Tovar, J. A. Ramos Leal, J. Tuxpan Vargas, G. De Jesús Hernández García, y J. De Lara Bashulto, «Contrast of aquifer vulnerability and water quality indices between a unconfined aquifer and a deep aquifer in arid zones», *Bull Eng Geol Environ*, vol. 79, n.º 9, pp. 4579-4593, nov. 2020, doi: 10.1007/s10064-020-01884-x.
- [18] N. C. Weil. Ray R. Brady y R. R. Weil, *The nature and properties of soils*, Fifteenth edition. Columbus: Pearson, 2016.
- [19] M. J. Afonso, L. Freitas, y H. I. Chaminé, «Groundwater recharge in urban areas (Porto, NW Portugal): the role of GIS hydrogeology mapping», *Sustain. Water Resour. Manag.*, vol. 5, n.º 1, pp. 203-216, mar. 2019, doi: 10.1007/s40899-019-00302-9.
- [20] USGS, «Hydrologic Cycle and Interactions». Accedido: 9 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://pubs.usgs.gov/circ/circ1139/htdocs/natural\\_processes\\_of\\_ground.htm](https://pubs.usgs.gov/circ/circ1139/htdocs/natural_processes_of_ground.htm)

- [21] R. K. Weatherl, M. J. Henao Salgado, M. Ramgraber, C. Moeck, y M. Schirmer, «Estimating surface runoff and groundwater recharge in an urban catchment using a water balance approach», *Hydrogeol J*, vol. 29, n.º 7, pp. 2411-2428, nov. 2021, doi: 10.1007/s10040-021-02385-1.
- [22] A. Jothibasú y S. Anbazhagan, «Spatial mapping of groundwater potential in Ponnaiyar River basin using probabilistic-based frequency ratio model», *Model. Earth Syst. Environ.*, vol. 3, n.º 1, p. 33, abr. 2017, doi: 10.1007/s40808-017-0283-2.
- [23] S. K. Singh, M. Zeddies, U. Shankar, y G. A. Griffiths, «Potential groundwater recharge zones within New Zealand», *Geoscience Frontiers*, vol. 10, n.º 3, pp. 1065-1072, may 2019, doi: 10.1016/j.gsf.2018.05.018.
- [24] H. V. Zimik, T. Angchuk, A. K. Misra, R. Kr. Ranjan, N. Wanjari, y S. Basnett, «GIS-based identification of potential watershed recharge zones using analytic hierarchy process in Sikkim Himalayan region», *Appl Water Sci*, vol. 12, n.º 11, p. 248, nov. 2022, doi: 10.1007/s13201-022-01758-5.
- [25] «Elaboracion\_participativa\_de\_una\_metodologia.pdf». Accedido: 21 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/3299/Elaboracion\\_participativa\\_de\\_una\\_metodologia.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/3299/Elaboracion_participativa_de_una_metodologia.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [26] S. Arya, T. Subramani, y D. Karunanidhi, «Delineation of groundwater potential zones and recommendation of artificial recharge structures for augmentation of groundwater resources in Vattamalaikarai Basin, South India», *Environ Earth Sci*, vol. 79, n.º 5, p. 102, mar. 2020, doi: 10.1007/s12665-020-8832-9.
- [27] G. Calderon, M. L. Zulaica, H. E. Massone, y J. Dalla Torre, «Vinculación entre el Ordenamiento Territorial y la gestión del agua en Argentina y en la provincia de Buenos Aires. Análisis de aspectos normativos e institucionales (2003-2019)», *Rev. geogr. Norte Gd.*, n.º 77, pp. 173-189, dic. 2020, doi: 10.4067/S0718-34022020000300173.
- [28] A. C. R. Braga, S. Serrao-Neumann, y C. De Oliveira Galvão, «Groundwater Management in Coastal Areas through Landscape Scale Planning: A Systematic Literature Review», *Environmental Management*, vol. 65, n.º 3, pp. 321-333, mar. 2020, doi: 10.1007/s00267-019-01244-w.
- [29] J. Cerutti, R. Lavoie, y R. Lefebvre, «Development of a knowledge base to support the consideration of groundwater protection in land-use planning», *Sustain. Water Resour. Manag.*, vol. 5, n.º 2, pp. 401-413, jun. 2019, doi: 10.1007/s40899-017-0175-7.

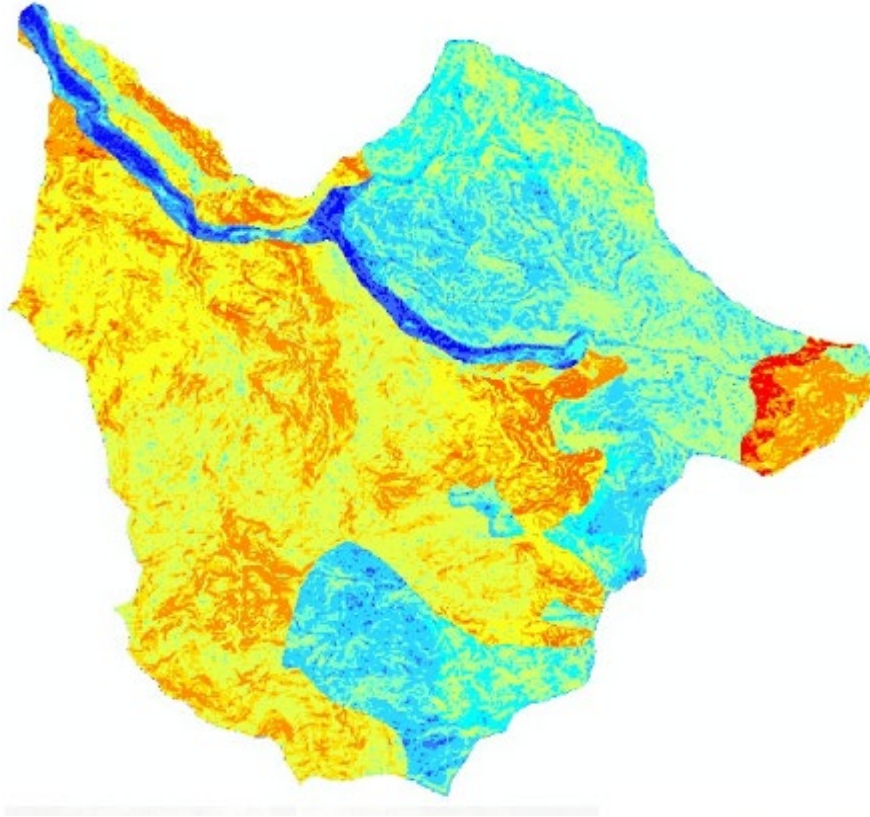
- [30] B. Mishra, P. Kumar, C. Saraswat, S. Chakraborty, y A. Gautam, «Water Security in a Changing Environment: Concept, Challenges and Solutions», *Water*, vol. 13, n.º 4, p. 490, feb. 2021, doi: 10.3390/w13040490.
- [31] I. Chawla, L. Karthikeyan, y A. K. Mishra, «A review of remote sensing applications for water security: Quantity, quality, and extremes», *Journal of Hydrology*, vol. 585, p. 124826, jun. 2020, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124826.
- [32] B. Funk, S. A. Amer, y F. A. Ward, «Sustainable aquifer management for food security», *Agricultural Water Management*, vol. 281, p. 108073, may 2023, doi: 10.1016/j.agwat.2022.108073.
- [33] A. S. A. Osman y E. G. A. Kalil, «Inquiring Prescriptions Using Geographic Information System (GIS)», *International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 21, n.º 12, pp. 409-414, dic. 2021, doi: 10.22937/IJCSNS.2021.21.12.56.
- [34] J. Ivana, L. Supriatna, y T. R. P. Astuti, «Identification of Potential Groundwater Recharge Zone Using Remote Sensing and GIS in Upstream Cibeet Sub-watershed, Bogor, West Java», *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1111, n.º 1, p. 012025, dic. 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1111/1/012025.
- [35] A. K. Saraf, P. R. Choudhury, B. Roy, B. Sarma, S. Vijay, y S. Choudhury, «GIS based surface hydrological modelling in identification of groundwater recharge zones», *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, n.º 24, pp. 5759-5770, dic. 2004, doi: 10.1080/0143116042000274096.
- [36] Simeneh Gedefaw Abate, «Geospatial analysis for the identification and mapping of groundwater potential zones using RS and GIS at Eastern Gojjam, Ethiopia», *Groundwater for sustainable development*, vol. v. 19, pp. 100824-, 2022, doi: 10.1016/j.gsd.2022.100824.
- [37] M. S. Cho y J. Qi, «Determination of Spatial Pattern of Environmental Consequences of Dams in Watersheds», *Land*, vol. 12, n.º 12, p. 2154, dic. 2023, doi: 10.3390/land12122154.
- [38] F. Jumbo, M. Zea, N. Loja, R. Morocho, J. Cartuche, y E. Loján, «Delimitation and Codification of Hydrographic Units Through the Use of Geographic Information Systems», en *Technology Trends*, vol. 798, M. Botto-Tobar, N. Esparza-Cruz, J. León-Acurio, N. Crespo-Torres, y M. Beltrán-Mora, Eds., en *Communications in Computer and Information Science*, vol. 798. , Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 185-198. doi: 10.1007/978-3-319-72727-1\_14.

- [39] S. C. Ríos, S. Z. Alfaro, E. R. Ríos, y V. M. Párraga, «Comparación de técnicas para determinar cobertura vegetal y usos de la tierra en áreas de interés ecológico, Manabí, Ecuador Comparison of Techniques to Determine Vegetation Cover and land Use in Areas of Ecological Interest, Manabi, Ecuador», *UD y la Geomática*, n.º 9, 2014.
- [40] J. H. Rivas León, «Determinación de cultivos agrícolas y firmas espectrales mediante el procesamiento de imágenes satelitales utilizando el método de clasificación supervisada», *Perfiles\_Ingenieria*, vol. 16, n.º 16, pp. 85-92, dic. 2020, doi: 10.31381/perfiles\_ingenieria.v20i15.3548.
- [41] Emilio. Chuvieco Salinero, *Teledetección ambiental : la observación de la tierra desde el espacio*, 1a. ed. en esta presentación, Actualizada. en Ariel ciencia. Barcelona: Ariel, 2010.
- [42] Z. Isnain y H. E. Mokthar, «Mapping the Groundwater Potential Areas by Using the GIS Method in Kg Samawang, Sandakan, Sabah, Malaysia.», *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1103, n.º 1, p. 012017, nov. 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1103/1/012017.
- [43] P. Pourrut, G. Gdmez, y A. Segovia, «FACTORES CONDICIONANTES DE LOS REGIMENES CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS».
- [44] J. Jurado, «SECRETARIA NACIONAL DEL AGUA DEL ECUADOR SECRETARIA GENERAL DE LA COMUNIDAD ANDINA UNIÓN INTERNACIONAL PARA LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA».
- [45] Ministerio del Ambiente del Ecuador., *Sistema de clasificacion de ecosistemas terrestres del Ecuador Continental*. Quito, 2013.
- [46] T. De Vargas, V. Sgorla, R. Belladonna, y L. A. Vedana, «Mapas de zonas potenciais de recarga da água subterrânea como uma nova ferramenta para a segurança hídrica do abastecimento público», *R. Águas Subter.*, vol. 37, n.º 1, ene. 2023, doi: 10.14295/ras.v37i1.30152.
- [47] A. Hassaballa y A. Salih, «Mapping Groundwater Potential (GWP) in the Al-Ahsa Oasis, Eastern Saudi Arabia Using Data-Driven GIS Techniques», *Water*, vol. 16, n.º 2, p. 194, ene. 2024, doi: 10.3390/w16020194.
- [48] A. A. Urbina G. y E. V. Maradiaga-F, «Delimitación de zonas potenciales de recarga hídrica en la unidad hidrográfica Quebrada Arriba, departamento de Madriz, Nicaragua», *Intropica*, pp. 43-54, jun. 2021, doi: 10.21676/23897864.3813.
- [49] I. E. Rodriguez-Levy *et al.*, «Development and Application of a Methodology for the Identification of Potential Groundwater Recharge Zones: A Case Study in the Virvini

- Micro-Basin, Tiraque, Bolivia», *Water*, vol. 15, n.º 7, p. 1268, mar. 2023, doi: 10.3390/w15071268.
- [50] T. S. Mattos, P. T. S. D. Oliveira, M. C. Lucas, y E. Wendland, «Groundwater Recharge Decrease Replacing Pasture by Eucalyptus Plantation», *Water*, vol. 11, n.º 6, p. 1213, jun. 2019, doi: 10.3390/w11061213.
- [51] F. R. de Oliveira, L. N. Menegasse, y U. Duarte, «IMPACTO AMBIENTAL DO EUCALIPTO NA RECARGA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM ÁREA DE CERRADO, NO MÉDIO VALE DO JEQUITINHONHA, MINAS GERAIS.», *Águas Subterrâneas*, jul. 2002, Accedido: 19 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22677>
- [52] A. I. J. M. Van Dijk, P. B. Hairsine, J. P. Arancibia, y T. I. Dowling, «Reforestation, water availability and stream salinity: A multi-scale analysis in the Murray-Darling Basin, Australia», *Forest Ecology and Management*, vol. 251, n.º 1-2, pp. 94-109, oct. 2007, doi: 10.1016/j.foreco.2007.06.012.
- [53] E.-D. Diaz-Ibañez, C.-S. Hernández-Ordoñez, H. Polanco-Méndez, y L. J. Califa, «Identificación participativa de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Cune, Cundinamarca – Colombia», *Gest. Ambient.*, vol. 24, n.º 1, p. 95696, ene. 2021, doi: 10.15446/ga.v24n1.95696.

## ANEXOS

*Anexo A. Mapa de Zonas Potenciales de Recarga hídrica con el 75% de variables utilizadas.*



*Anexo B. Bosque nativo de la microcuenca San Agustín*





*Anexo C. Toma de puntos para el procesamiento de la variable de cobertura vegetal nativa*



*Anexo D. Ruinas de Yacuviña ubicadas dentro de la microcuenca San Agustín*





*Anexo E. Bosque húmedo presente en la microcuenca San Agustín*



*Anexo F. Cultivos de cacao presente en la microcuenca San Agustín*





*Anexo G. Actividades ganaderas presentes en la microcuenca San Agustín*



*Anexo H. Río Playas de Daucay donde se presenta recarga Alta*





*Anexo I. Ríos Dos Bocas donde se presenta recarga hídrica Alta*



*Anexo J. Presencia de actividad minera en la microcuenca San Agustín*

