

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

ESCUELA DE POSGRADO



**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS**

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

TESIS:

**IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA Y SU RELACIÓN CON
EL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO REJO
CAJAMARCA**

Para optar el Grado Académico de

MAESTRO EN CIENCIAS

MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL

Presentada por:

JOSÉ ARTURO BRINGAS SÁNCHEZ

Asesor:

M.Sc. WALTER RONCAL BRIONES

Cajamarca, Perú

2024


CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:
José Arturo Bringas Sánchez
DNI: 45986999
Escuela Profesional/Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias. Programa de Maestría en Ciencias. Mención: Gestión Ambiental
2. Asesor: M. Sc. Walter Ricardo Roncal Briones
3. Grado académico o título profesional
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
4. Tipo de Investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:

Identificación de Zonas de Recarga Hídrica y su Relación con el Cambio de uso del Suelo en la Cuenca del río Rejo Cajamarca
6. Fecha de evaluación: 12/12/2024
7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 10%
9. Código Documento: 3117: 424678711
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 25/02/2025

*Firma y/o Sello
Emisor Constancia*



M. Sc. Walter Ricardo Roncal Briones
DNI: 26632728

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023

COPYRIGHT © 2024 by
JOSÉ ARTURO BRINGAS SÁNCHEZ
Todos los derechos reservados



PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las ¹⁷..... horas, del día 12 de diciembre del dos mil veinticuatro, reunidos en el Auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Jurado Evaluador presidido por el **Dr. MARCIAL HIDELSO MENDO VELÁSQUEZ**, **Dr. EDIN EDGARDO ALVA PLASENCIA**, **Dr. WILFREDO POMA ROJAS** y en calidad de Asesor el **M.Sc. WALTER RICARDO RONCAL BRIONES**, actuando de conformidad con el Reglamento Interno y el Reglamento de Tesis de Maestría de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se dio inicio a la Sustentación de la Tesis titulada **"IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO REJO CAJAMARCA"**, presentada por el **Bachiller en Ciencias Forestales JOSÉ ARTURO BRINGAS SÁNCHEZ**.

Realizada la exposición de la Tesis y absueltas las preguntas formuladas por el Jurado Evaluador, y luego de la deliberación, se acordó.....^{aprobar}.....con la calificación de ^{Diecisiete (17)}.....la mencionada Tesis; en tal virtud, el **Bachiller en Ciencias Forestales, JOSÉ ARTURO BRINGAS SÁNCHEZ**, está apto para recibir en ceremonia especial el Diploma que lo acredita como **MAESTRO EN CIENCIAS con Mención en GESTIÓN AMBIENTAL**, de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias.

Siendo las ^{18:30}..... horas del mismo día, se dio por concluido el acto.


.....
M.Sc. Walter Ricardo Roncal Briones
Asesor


.....
Dr. Marcial Hidelso Mendo Velásquez
Jurado Evaluador


.....
Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia
Jurado Evaluador


.....
Dr. Wilfredo Poma Rojas
Jurado Evaluador

DEDICATORIA

Agradezco al Gran Arquitecto del Universo por guiar mi camino. A mis padres, hermanos, sobrina e hija, quienes han sido mi fortaleza y apoyo incondicional en cada paso que doy, impulsándome a alcanzar mis sueños y celebrar cada logro.

A Karyn Junnet, por ser una pieza fundamental en mi crecimiento y en esta travesía de aprendizaje y superación.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento al Ing. Walter Ricardo Roncal Briones por su amabilidad y valiosa orientación en el desarrollo de este trabajo de investigación para la maestría en Gestión Ambiental.

Asimismo, al Ing. Carlos Cerna Moreno por su dedicación en el procesamiento de datos en GIS y al Ing. Germán H. Alcántara Boñón por su apoyo y colaboración.

"La naturaleza no se apresura, sin embargo, todo se cumple."

Lao Tsé

CONTENIDO

CONTENIDO	viii
LISTA DE TABLAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1. Antecedentes de la investigación	5
2.1.1. <i>Antecedentes Internacionales.</i>	5
2.1.2. <i>Antecedentes Nacionales.</i>	12
2.2. Bases teóricas.....	15
2.2.1 <i>Cuenca hidrográfica</i>	15
2.2.2 <i>Ciclo hidrológico</i>	16
2.2.3 <i>Balance hídrico</i>	18
2.2.4 <i>Zonas de recarga hídrica</i>	19
2.2.5 <i>Clasificación de las zonas de recarga hídrica</i>	20
2.2.6 <i>Factores que afectan la recarga hídrica</i>	20
2.2.7 <i>Recarga hídrica y la actividad antrópica</i>	26
2.2.8. <i>Medidas de conservación para las zonas de recarga hídrica</i>	27
2.2.9 <i>Importancia de la recarga hídrica</i>	29
2.2.10 <i>Cambio de uso del suelo</i>	30
2.2.11 <i>Análisis multitemporales de cambio de uso del suelo</i>	31
2.2.12 <i>Relación entre cambio de uso del suelo y zona de recarga hídrica</i>	34
2.2.13. <i>Identificación de las zonas de recarga con Sistemas de Información Geográfica (SIG)</i> .	35
2.3. Definición de términos básicos.....	36
CAPÍTULO III.....	40
MATERIALES Y MÉTODOS	40
3.1. Ubicación de la cuenca	40

3.2 Características de la zona de estudio.....	41
3.2.1 Demarcación hidrográfica de cuenca del río Rejo.	41
3.2.2 Infraestructura hidráulica en el lugar de estudio	41
3.2.3 Zona de vida.	41
3.2.4 Pendiente.	41
3.2.5 Geología.....	42
3.2.6 Clima.....	43
3.2.7 Suelos	43
3.3. Materiales	44
3.3.1 Materiales de campo	44
3.3.2 Materiales de gabinete	45
3.4. Metodología.....	45
3.4.1. Unidad de análisis, población y muestra.....	45
3.4.2 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	45
3.4.3 Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	46
CAPÍTULO IV.....	54
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	54
4.1. Cambio de uso del suelo en la cuenca del río Rejo en un periodo de 10 años	54
4.2. Zonas de recarga hídrica en la cuenca del río Rejo.....	60
4.2.1 Ponderación de los factores que intervienen en la recarga hídrica	61
4.2.2 Zonas de recarga hídrica en la cuenca del río Rejo.....	72
4.3. Relación de las zonas de recarga hídrica y el cambio de uso del suelo en la cuenca del río Rejo – Cajamarca	77
CAPÍTULO V.....	82
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	82
CAPÍTULO VI.....	83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
CAPITULO VII	105
ANEXOS	105
Anexo 1. Categorías de la clasificación Corine Land Cover Adaptada para Perú	105

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Infraestructura hidraulica de la cuenca del rio Rejo	47
Tabla 2 Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según pendiente	54
Tabla 3 Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el tipo de roca (Geología) .	55
Tabla 4 Ponderación de posibilidad de recarga hídrica según textura	56
Tabla 5 Ponderación de posibilidad de recarga hídrica según tipo del suelo	51
Tabla 6 Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el porcentaje de cobertura vegetal	57
Tabla 7 Posibilidades de Recarga Hídrica.....	57
Tabla 8 Cambio de cobertura de suelo en los periodos 2011 y 2020.....	61
Tabla 9 Ponderación de pendientes de la cuenca del río Rejo.....	66
Tabla 10 Ponderación de textura de la cuenca del río Rejo.....	68
Tabla 11 Ponderación de geología de la cuenca del río Rejo	69
Tabla 12 Ponderación tipo de suelo de la cuenca del río Rejo	71
Tabla 13 Ponderación de cobertura del suelo del 2011 de la cuenca del río Rejo.....	73
Tabla 14 Ponderación de cobertura del suelo del 2020 de la cuenca del río Rejo.....	75
Tabla 15 Áreas de Infiltración general de 2011 de la cuenca del río Rejo.....	77
Tabla 16 Áreas de Infiltración general de 2020 de la cuenca del río Rejo.....	75
Tabla 17 Zonas de recarga hídrica y su relación con el cambio de uso del suelo en la cuenca del río Rejo en la cuenca del río Rejo.	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustración del ciclo hidrológico	17
Figura 2. Ubicación de la cuenca del río rejo.....	40
Figura 3. Mapa de pendientes de la cuenca del río rejo.....	42
Figura 4. Mapa geológico de la cuenca del río rejo.....	43
Figura 5. Mapa de suelos de la cuenca del río rejo.....	44
Figura 6. Esquema metodológico propuesto a seguir	53
Figura 7. Cobertura vegetal de la cuenca del río Rejo para el 2011	54
Figura 8. Cobertura vegetal de la cuenca del río Rejo para el 2020.....	55
Figura 9. Ponderación de pendientes de la cuenca del río Rejo	61
Figura 10. Ponderación del suelo por textura de la cuenca del río Rejo.....	63
Figura 11. Ponderación de geología de la cuenca del río Rejo.....	65
Figura 12. Ponderación del suelo por tipo de la cuenca del río Rejo.....	67
Figura 13. Ponderación de cobertura del suelo del 2011 de la cuenca del río Rejo	69
Figura 14. Ponderación de cobertura del suelo 2020 de la cuenca del río Rejo.....	71
Figura 15. Infiltración general de 2011 de la cuenca del río Rejo.....	73
Figura 16. Infiltración general de 2020 de la cuenca del río Rejo.....	75

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó con el objetivo general de identificar las zonas de recarga hídrica y su relación con el cambio de uso del suelo en la cuenca del río Rejo (2011 y 2020), ubicada en las cercanías de la ciudad de Cajamarca. Se utilizó la metodología para la clasificación de usos del suelo propuesta por el Ministerio del Ambiente (2015), CORINE (Coordination of information of the Environment) Land Cover adaptada para Perú; para la identificación de zonas de recarga hídrica, se basó en la ecuación propuesta por Matus (2009) y para la relación entre las variables se realizó un análisis espacial para visualizar y analizar la distribución de las zonas de recarga en relación con los cambios en el uso del suelo. Los resultados indican que la variación en las zonas de recarga hídrica en la cuenca del río Rejo ha sido “Moderada” en los años (2011 y 2020), la cuenca no ha presentado variación significativa en su capacidad de recarga hídrica debido a que el uso de suelo no ha presentado tampoco una gran variación, así mismo, está influenciada por las prácticas de manejo; sin embargo, también se identificó que las áreas con recarga “muy baja” han aumentado (12.75 ha) y las áreas con recarga “alta” han disminuido (- 251.87 ha), lo que sugiere una posible influencia de los diferentes usos del suelo y las prácticas de manejo en la recarga hídrica de la cuenca. Se concluye que las zonas de recarga hídrica tienen relación directa con el cambio de usos del suelo, sin embargo, hay una relación inversa con el uso de suelo de las áreas de extracción minera, que disminuyen la recarga hídrica.

Palabras clave: Zonas de recarga hídrica, usos del suelo.

ABSTRACT

This research aimed to identify water recharge zones and their relationship with land use change in the Rejo River basin (2011 and 2020), located near the city of Cajamarca. The methodology for land use classification proposed by the Ministry of the Environment (2015), based on the CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover system adapted for Peru, was employed. To identify water recharge zones, the equation proposed by Matus (2009) was used. Additionally, a spatial analysis was conducted to visualize and assess the distribution of recharge zones in relation to land use changes. The results indicate that the variation in water recharge zones in the Rejo River basin was classified as "Moderate" between 2011 and 2020. The basin did not exhibit significant variation in its water recharge capacity, as land use changes were not substantial either. Furthermore, water recharge is influenced by management practices. However, it was also observed that areas with "very low" recharge increased by 12.75 ha, while areas with "high" recharge decreased by 251.87 ha, suggesting a potential influence of different land uses and management practices on the basin's water recharge. It is concluded that water recharge zones are directly related to land use change. However, an inverse relationship was identified between water recharge and land use in mining extraction areas, as these activities reduce water recharge capacity.

Keywords: Groundwater recharge zone, land use,

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La distribución y gestión del agua en nuestro país es muy irregular, con frecuencia el uso irracional, la contaminación o la gestión insostenible ha provocado problemas de abastecimiento de agua en muchos lugares. El escaso conocimiento y la falta de conciencia del funcionamiento del régimen hídrico y el mal uso del recurso hídrico perturban a las comunidades del país y amenazan su desarrollo; afectando las nacientes de agua, reduciendo su caudal y contaminando los ríos, lagos y otras fuentes naturales de agua.

De igual manera, la explotación desmedida de bosques y pastizales, amenaza seriamente las funciones ecosistémicas, ya que la vegetación con sus raíces promueve la infiltración y retención, reponiendo las aguas subterráneas esenciales para el abastecimiento de agua; asimismo, a través del proceso de transpiración, la cubierta vegetal produce una gran cantidad de vapor de agua que luego se condensa y posteriormente se descarga como precipitación, provocando erosión y transporte de partículas de suelos y sedimentos que serán arrastradas por el escurrimiento superficial, agravando el problema de contaminación y sedimentación del lecho de los ríos, lo que provoca la disminución de su capacidad para conducir altos volúmenes de escurrimiento que pueden provocar desbordes e inundaciones.

Por lo que se refiera a las zonas de recarga hídrica son áreas con capacidad de infiltrar de forma natural el agua procedente de la precipitación o escorrentía superficial, y con ello, permiten alimentar a los acuíferos donde los flujos subterráneos se desplazan horizontalmente hacia los diferentes cuerpos de agua como lagos, ríos, manantiales y océanos (INAB, 2005).

Más aún las zonas de recarga desempeñan un papel de mucha importancia en el suministro de agua dulce en todo el mundo, ya que son la principal fuente de obtención de este recurso. Además, juegan un papel fundamental en el ciclo del agua; realizar su identificación, protección y conservación asegurará el bienestar de todo ser vivo y del desarrollo económico de cada nación (Donis, 2015).

Cabe destacar que la recarga a los acuíferos es un fenómeno complejo, con numerosas ramificaciones e interconexiones en cuanto a procesos y relaciones con otras fases del ciclo hidrológico. Para poder llegar a resultados prácticos, a la escala temporal y espacial apropiada a cada caso, hay que considerar dichos procesos de forma simplificada y agregada, pero en lo posible con un claro soporte físico (Custodio, 2019).

Es importante dejar en claro que la delimitación de las Zonas Potenciales de Recarga de Agua Subterránea (GWPZ) se ve influenciada por múltiples factores como la precipitación, litología, textura del suelo, pendiente, elevación, distribución del nivel freático, sistemas de drenaje, entre otros (Magesh et al., 2011; Magesh et al., 2012; Thapa et al., 2017; Narayanan y Venugopal, 2021).

Con la finalidad de mejorar el conocimiento en la adecuada gestión del recurso hídrico la presente tesis busca general la identificación de las zonas de recarga hídrica y su relación con el cambio de uso del suelo en la cuenca del río Rejo, ubicada en las cercanías de la ciudad de Cajamarca, departamento de Cajamarca, Perú

Para el desarrollo de la presente investigación se tuvo como objetivos específicos evaluar el cambio uso del suelo en la cuenca del río Rejo en un periodo de 20 años y determinar las zonas de recarga hídrica en la cuenca del río Rejo – Cajamarca, con ello, se busca obtener

información clave que permita comprender el funcionamiento y la dinámica de las zonas de recarga hídrica y los efectos del cambio de uso del suelo en este proceso.

La cuenca del río Rejo enfrenta múltiples desafíos que dificultan una gestión efectiva del recurso hídrico, encontrando dificultades como; el sobrepastoreo con ganado bovino y vacuno con practica de ganadería extensiva, lo que provoca la compactación del suelo y la erosión, el cambio de uso de suelo de pastos naturales a agricultura intensiva, drenaje y desecación de los bofedales para ampliar área de cultivo, la forestación con especies exóticas y los incendios forestales en áreas de pajonales debido a prácticas inadecuadas de la población local. Estos desafíos afectan de manera negativa la gestión del recurso hídrico en la cuenca.

Es importante destacar que la actividad minera se desarrolla hace años en la parte alta de esta cuenca, lo que agrava aún más la situación modificando el territorio y el movimiento natural del agua subterránea.

Es importante investigar y caracterizar las zonas de recarga hídrica en esta cuenca con el fin de protegerlas adecuadamente y gestionar los recursos de manera sostenible, buscando salvaguardar la integridad de la cuenca del río Rejo y garantizar un suministro de agua seguro y sostenible para las comunidades y el ecosistema circundante.

En este contexto y con la finalidad de promover una adecuada gestión de la cuenca, se formula las siguientes preguntas de investigación:

Pregunta principal.

- a) ¿Cuáles son las zonas de recarga hídrica y su relación con el cambio de uso de suelo en la cuenca del río Rejo Cajamarca?

Pregunta secundaria.

- b) ¿Cuál es porcentaje de cambio de uso del suelo durante los 2011 y 2020 en la cuenca del río Rejo?
- c) ¿Cuáles son las zonas de recarga hídrica en la cuenca del río Rejo?

Hipótesis de Investigación

Existe una relación directa entre las zonas de recarga hídrica y el cambio de uso del suelo en la cuenca del río Rejo – Cajamarca

Teniendo los siguientes Objetivos

Objetivo general

- Identificar las zonas de recarga hídrica y analizar su relación con los cambios de uso del suelo en la cuenca del río Rejo, Cajamarca, en los años 2011 y 2020.

Objetivos específicos

- Evaluar el cambio uso del suelo en la cuenca del río Rejo - Cajamarca en los años 2011 y 2020.
- Determinar las zonas de recarga hídrica en la cuenca del río Rejo – Cajamarca. (2011 - 2020).

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales.

En su investigación De Vargas et. al (2023), identificaron cartográficamente las zonas potenciales de recarga de tres pequeñas cuencas hidrográficas urbanas destinadas al abastecimiento público de Caxias do Sul, RS – Brasil. La metodología utilizada consideró seis criterios del medio físico: densidad de lineamientos, densidad de drenaje, forma del terreno, uso y cobertura del suelo, tipo de suelo y pendiente del terreno. Los pesos atribuidos a cada criterio se definieron mediante el método de análisis jerárquico de proceso. La modelación cartográfica para obtener el mapa de zonas potenciales de recarga se desarrolló en software de Sistema de Información Geográfica (SIG). Las zonas potenciales de recarga clasificadas como niveles bajo y moderado dominan en las tres cuencas hidrográficas, representando entre el 79,54% y el 84,57% de las áreas evaluadas. Por otro lado, el nivel elevado se caracteriza entre el 15,43% y el 20,46% de las áreas de las cuencas, siendo este nivel el más favorable para la recarga. Los criterios con mayor influencia en las zonas de recarga fueron la forma del terreno, uso y cobertura del suelo, tipo de suelo y pendiente del terreno.

Nayak et. al (2023), utilizaron un enfoque de toma de decisiones multicriterio (MCDM) basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para mapear los posibles sitios de recarga de agua subterránea. Se consideraron diversas capas temáticas que influyen en la recarga de aguas subterráneas, como litología, geomorfología, densidad de

lineamientos, pendiente, textura del suelo, densidad de drenaje, conductividad hidráulica del suelo, uso y cobertura del suelo, entre otros. Se emplearon datos de profundidad del agua subterránea de lluvia y pre-monzón para identificar las áreas de recarga adecuadas. Mediante el proceso de jerarquía analítica (AHP), se asignaron pesos diferentes a los temas y sus características. Las zonas de recarga de agua subterránea delineadas se clasificaron en muy buenas, buenas, moderadas y pobres. Se encontró que el 27% de la cuenca tiene un potencial de recarga de agua subterránea muy bueno, mientras que el 38% tiene un potencial bueno. Las zonas de recarga moderadas y pobres abarcan el 26% y el 9% de la cuenca, respectivamente. Estas zonas de recarga de agua subterránea se validaron utilizando datos observados de aguas subterráneas de los pozos existentes. Los porcentajes de coincidencia de las zonas de recarga con potencial muy bueno, bueno, moderado y pobre de agua subterránea fueron del 67%, 57.6%, 42.1% y 55.5%, respectivamente.

Lara-Vásquez et. al (2021), se enfocaron en mapear las áreas con potencial de recarga y descarga de agua en la Subcuenca del río Chambo, Ecuador, que abarca una extensión de 3,580 km², siendo crucial para el ciclo hidrológico de la región. Se empleó un enfoque espacial utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Análisis Multicriterio (AMC) para crear un modelo inicial que consideró criterios como litología, geoforma, pendiente, textura del suelo, cobertura vegetal y uso del suelo. Posteriormente, se incorporó la precipitación anual en un segundo modelo. La evaluación reveló áreas con alto potencial de recarga hídrica, especialmente en el margen oriental de la subcuenca, donde las características como permeabilidad de la litología, relieve escarpado, suelos franco-limosos y actividades agropecuarias influyen en la identificación de estas zonas. Por

otro lado, el Índice Topográfico de Humedad (ITH) señala áreas con alto potencial de descarga, principalmente en zonas húmedas y lagunas en la parte central de la subcuenca.

En el estudio de Allafta et. al (2020), utilizaron un concepto integrado para identificar las zonas de potencial hídrico subterráneo (GWPZs) en la cuenca del Shatt Al-Arab utilizando teledetección (RS), sistema de información geográfica (GIS) y proceso analítico jerárquico (AHP). Para este fin, se prepararon y transformaron en datos raster nueve parámetros controladores de la ocurrencia y movimiento del agua subterránea (es decir, litología, precipitación, geomorfología, pendiente, densidad de drenaje, suelo, uso de suelo/cobertura terrestre, distancia al río y densidad de lineamientos) utilizando el software ArcGIS. Estos nueve parámetros (capas temáticas) se asignaron pesos proporcionales a su importancia. Además, se realizó una clasificación jerárquica utilizando una matriz de comparación por pares del AHP para estimar los pesos normalizados finales de estas capas. Se utilizó la técnica de suma ponderada de superposición para integrar las capas en la creación del mapa de GWPZs del área de estudio. El mapa se ha categorizado en cinco zonas (es decir, muy buena, buena, moderada, pobre y muy pobre) que representan el 4, 51, 35, 9 y 1% del área de estudio, respectivamente. Finalmente, para evaluar la efectividad del modelo, el mapa de GWPZs se validó utilizando datos de profundidad del agua subterránea de 99 pozos distribuidos en la cuenca. Los resultados de validación confirman que el enfoque aplicado proporciona resultados sólidos y significativos que pueden ayudar en la planificación prospectiva y la utilización sostenible de los recursos hídricos subterráneos en esta región con escasez de agua.

Dar et. al (2021) estudiaron en el Valle de Cachemira, en el noroeste del Himalaya, las áreas potenciales de aguas subterráneas utilizando Sistemas de Información Geográfica

(SIG) y el método de Jerarquía Analítica (AHP) al incorporar datos de teledetección con información de otras fuentes. Estos conjuntos de datos se utilizaron para preparar ocho capas temáticas de pendiente, textura del suelo, densidad de drenaje, uso de suelo/cobertura terrestre (LULC), litología, geomorfología, densidad de lineamientos y precipitación. El método analítico de la matriz de comparación por pares de AHP se utilizó para evaluar el peso normalizado de estas capas temáticas. Todas las capas temáticas y sus clases correspondientes se asignaron rangos y pesos en función de su impacto en el potencial de aguas subterráneas. El área de estudio se ha clasificado en cinco zonas diferentes de recarga potencial de aguas subterráneas: excelente (28.97%), buena (19.99%), moderada (21.70%), pobre (27.16%) y muy pobre (2.15%). El mapa de potencial de aguas subterráneas preparado para el área de estudio se validó con 245 pozos existentes y la dirección del flujo de la cuenca. La validación de los resultados estuvo en concordancia con la evidencia obtenida, ya que el Área Bajo la Curva (AUC) se calculó en un 79.69% y las investigaciones computacionales de flujo sugieren que el agua subterránea fluye hacia el noreste desde el sur de la cuenca hasta el centro de Cachemira, y hacia el suroeste desde el norte hacia el río Jhelum. La validación sugiere que el método aplicado demuestra proporcionar un resultado muy significativo y confiable para el área de estudio.

Lentswe y Molwalefhe (2020) se centraron en la delimitación de zonas potenciales de recarga de agua subterránea en la cuenca del Motloutse, ubicada en el este de Botswana. Se investiga la distribución espacial de la recarga en esta cuenca semiárida utilizando el Análisis de Superposición Ponderada. La sobreexplotación del agua subterránea en la cuenca de Motloutse para respaldar la expansión doméstica e industrial ha generado la necesidad de determinar áreas donde pueda ocurrir un almacenamiento renovable de agua

subterránea. Se consideraron una serie de parámetros conocidos por su influencia en la recarga, como la litología, densidad de lineamientos, pendiente del terreno, tipo de suelo, espesor del suelo y densidad de drenaje. Se preparó un mapa temático para cada parámetro, reclasificado en potencial alto, moderado y bajo para la recarga. Se aplicó el Proceso Analítico Jerárquico para clasificar la importancia de cada parámetro en relación con la recarga de agua subterránea. Los sitios potenciales de recarga de agua subterránea se delimitaron utilizando la herramienta de Superposición Ponderada del software ArcGIS. Los resultados muestran que el 8% de la cuenca corresponde a sitios de alta recarga, ubicados en áreas con areniscas y afloramientos basálticos fracturados, así como en áreas con suelos arenosos espesos. La recarga moderada ocurre en un 78% y la recarga baja en un 14% del área de la cuenca.

Arshad et. al (2020) propusieron una metodología para trazar zonas favorables de recarga de potencial de agua subterránea (FPRI) integrando mapas del índice de recarga de potencial de agua subterránea (PRI) con el índice de vulnerabilidad de agua subterránea basado en DRASTIC (VI). Para evaluar ambos índices, se superpusieron diferentes capas temáticas correspondientes a cada índice en ArcGIS. En el análisis de superposición, los pesos (para varias capas temáticas) y los valores de calificación (para subclases) se asignaron en base a una revisión de literatura publicada. Ambos fueron normalizados y modificados utilizando el proceso jerárquico analítico (AHP) y un modelo de razón de frecuencia respectivamente. Después de evaluar PRI y FPRI, estos mapas se validaron utilizando el método del área bajo la curva (AUC). El mapa de PRI indica que el 53% del área evaluada se encuentra en zonas de recarga muy bajas a bajas, el 22% en moderadas, y el 25% en zonas de recarga de potencial alto a excelente. El mapa de VI indica que el 38%

del área evaluada se encuentra en zonas de vulnerabilidad muy bajas a bajas, el 33% en moderadas, y el 29% en zonas de vulnerabilidad de alta a muy alta. El mapa de FPRI muestra que la región central de Punjab es moderada a altamente favorable para la recarga debido a su baja vulnerabilidad y alto potencial de recarga. Durante el proceso de validación, se encontró que el AUC estimado con pesos y valores de calificación modificados fue del 79% y 67%, para los índices PRI y VI, respectivamente.

En el estudio de Etikala et. al (2019) evaluaron las zonas de potencial de agua subterránea utilizando ocho capas temáticas influyentes en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Las ocho capas, que incluyen litología, densidad de lineamientos, geomorfología, uso de suelo/cobertura terrestre, densidad de drenaje, suelos, precipitación y mapas de pendiente, se generaron y se asignaron puntajes y pesos fijos de acuerdo con su capacidad para retener agua utilizando la técnica de factor de influencia múltiple (MIF) y métodos de superposición ponderada en SIG. Los resultados finales categorizaron el área de estudio en cuatro clases, a saber, zonas pobres, moderadas, buenas y muy buenas, que contribuyeron con 89.99 km² (23.17%), 181.10 km² (46.62%), 101.75 km² (26.19%) y 15.64 km² (4.02%), respectivamente.

Walczuk et. al (2019) en el municipio de Caetit  (Bahía) buscó comprender los impactos que los factores pluviométricos en asociación con variaciones físicas del suelo imprimen en las tasas de recarga de un ac fero. El estudio presenta relevancia social y científica, ya que se ubica en una región de clima semiárido e investiga un ac fero del tipo fracturado. Los resultados indican que el volumen de lluvia propiamente dicho se relaciona hasta en un 35% con la recarga, mientras que las variaciones en el espesor de los suelos impactan hasta en un 9% las tasas percibidas en pozos de monitoreo; a su vez, la

profundidad de la superficie piezométrica condiciona hasta un 22% de la eficiencia de los procesos de recarga. La no significancia estadística de las pruebas de correlación cruzada entre las variables consideradas evidencia que las cuestiones distributivas de la lluvia presentan relevancia para el mantenimiento hídrico subterráneo. Volúmenes similares de precipitación pueden traducirse en diferentes tasas de recarga. Los meses con concentración de precipitación benefician a las regiones con suelos espesos y, dependiendo del período del año, las diferencias en las tasas de recarga varían entre el 34% y el 335%. Los años con bajos volúmenes de precipitación contribuyen a la recarga en lugares con rocas fracturadas aflorantes o incluso donde los suelos son poco espesos, especialmente si hay una buena distribución dentro del período lluvioso, es decir, eventos no concentrados. Este estudio destaca la importancia de considerar los factores pluviométricos y físicos del suelo en la evaluación de las tasas de recarga de acuíferos en regiones semiáridas. La comprensión de cómo estos factores interactúan puede ayudar a mejorar la gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos en estas áreas.

José-Ríos et. al (2019) realizaron una investigación, en la región de la cuenca del lago de Zirahuén, utilizando el modelo de simulación espaciotemporal en cuencas Soil-Water-Balance (SWB) para ampliar el entendimiento de las variables del ciclo hidrológico. Este enfoque se basó en las propiedades hidrodinámicas del suelo, la cobertura vegetal y los datos climáticos diarios. Los resultados revelaron cómo el uso del suelo afecta los flujos de agua y la recarga de los acuíferos, lo que se tradujo en cambios significativos en la disponibilidad de agua, especialmente durante el periodo 2009-2015. Al comparar estos hallazgos con los datos de 2016, se observó que el Índice de Aguas Subterráneas (IDAS) fue subestimado en un 14.64%, mientras que la Disponibilidad Relativa (DR) fue

subestimada en un 150% en relación a los valores obtenidos en este estudio. Para mejorar la gestión y la fiabilidad del recurso hídrico, se sugiere implementar estrategias de monitoreo que evalúen la cantidad, calidad y variabilidad temporal del agua con el fin de validar los resultados obtenidos. Esto permitiría una mejor comprensión de los procesos hidrológicos en la cuenca del lago de Zirahuén y facilitaría la toma de decisiones informadas para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región.

El estudio de Arellano y Ruiz (2018) analizó las tendencias interanuales de los servicios ecosistémicos hidrológicos en la cuenca del río Zanatenco, ubicada en la Costa de Chiapas - México. Se evaluaron los servicios de regulación de flujos de agua, control de erosión hídrica y provisión de agua. Los resultados indican que el escurrimiento superficial disminuye anualmente, lo que ha llevado a un aumento en la frecuencia e intensidad de los periodos de sequía. La erosión hídrica potencial es alta en terrenos escarpados, pero las áreas con cobertura vegetal desempeñan un papel importante en la protección contra la erosión. En general, la cuenca presenta un desequilibrio hídrico en la actualidad. Este desequilibrio se manifiesta en la disminución de los flujos de agua y la provisión de este recurso, lo cual puede tener implicaciones negativas para los ecosistemas y las comunidades que dependen de ellos. Para revertir esta tendencia, se requieren estrategias de gestión integrada de los recursos hídricos que consideren la conservación de la cobertura vegetal, especialmente en las áreas con mayor riesgo de erosión.

2.1.2. Antecedentes Nacionales.

Vílchez (2019) en su estudio "Impacto de los Servicios Ecosistémicos de regulación del recurso hídrico en la conservación de la vegetación en la subcuenca del río Grande - Cajamarca" tuvo como objetivo principal determinar el rol que tienen los servicios

ecosistémicos de regulación del recurso hídrico en el Centro Poblado de LLushcapampa Baja en la Subcuenca del río Grande – Cajamarca. Para ello, se analizó la conservación de la vegetación considerando el transecto para la vegetación y la revisión de documentación, así como encuestas. Para los servicios ecosistémicos de regulación del recurso hídrico, se consideró un estudio hidrológico y muestras de la calidad del agua en 5 puntos (época de lluvia y sequía). Los resultados obtenidos fueron trabajados estadísticamente para darles fiabilidad y consistencia, aplicándose el estadístico descriptivo de frecuencias, la correlación estadística bivariada y la fiabilidad a nivel de escala. Se concluyó que el rol que tienen los servicios ecosistémicos de regulación hídrica en la conservación de la vegetación en el Centro Poblado de LLushcapampa Baja en la Subcuenca del río Grande – Cajamarca es altamente significativo, con un valor del 0,01, mucho menor al 5%, que es el estandarizado para este tipo de estudio.

Salas et. al (2018) investigaron la deforestación en el área de conservación privada Tilacancha, zona de recarga hídrica y de abastecimiento de agua para Chachapoyas. Este estudio tiene como objetivo determinar la deforestación en el área de conservación privada Tilacancha, cuya zona representa la recarga hídrica y de abastecimiento de agua para Chachapoyas. Se aplicó el algoritmo de clasificación supervisada de máxima probabilidad incorporado en el QGIS para detectar cambios en la cobertura del suelo observados en el ACP Tilacancha utilizando datos satelitales multiespectrales obtenidos de Landsat 5 y 8 para los años 1984, 2000 y 2016. El ACP se clasificó en cinco clases principales de cobertura: arbustos, pastos y cultivos, pajonal y superficie quemada. Los resultados indican que la cobertura forestal para el primer y segundo período se redujo en un 21,63% y 41,39% respectivamente, mientras que el área de pajonal se ha incrementado en un 13,63 % y

18,06% respectivamente. Durante los últimos 32 años, el uso y cobertura del suelo en la zona de estudio ha estado influenciado por factores clave que giran en torno al desarrollo ganadero y agrícola. El nivel de degradación forestal ha aumentado y requiere de manera inmediata tomar nota de los cambios ambientales y establecer políticas urgentes, rigurosas y coherentes para el desarrollo racional de los recursos de esta zona.

Para Días (2018) en su estudio "Análisis multiespectral mediante imágenes satelitales para identificar zonas de recarga hídrica subterránea en la cuenca Jequetepeque", las técnicas satelitales representan una nueva oportunidad para monitorear cambios en la acumulación del recurso hídrico desde el espacio. Esto se debe a las limitaciones que existen hoy en día para obtener medidas completas y confiables de los niveles de agua subterránea en grandes regiones geográficas, lo cual conlleva a que no se obtenga el máximo provecho de un recurso que se caracteriza por su uniformidad en la calidad, buena distribución espacial y, en muchos casos, menor grado de contaminación con respecto a las aguas superficiales. En la investigación, se ha propuesto como objetivo el uso de las imágenes satelitales de tipo LANDSAT 8 y ASTER GDEM en un área de 3956 km² correspondiente a la cuenca Jequetepeque, para ubicar las zonas de recarga hídrica subterránea. Esta información fue contrastada con los pozos inventariados por el ANA y presentó una certeza promedio de 93.6% en función a los pozos inventariados según Vargas (2010). Dentro del procedimiento, a manera de resumen, se puede definir las siguientes etapas: obtención de imágenes satelitales Landsat 8; preparación de las imágenes satelitales, incluyendo corrección, unión y obtención de parámetros para clasificar en árbol, como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), temperatura y pendientes; análisis de parámetros para

ingresarlos a un clasificador en árbol; y finalmente, la ubicación de zonas de recarga hídrica subterránea. En conclusión, este estudio demuestra que es posible identificar zonas de recarga hídrica subterránea usando imágenes satelitales con una certeza promedio de 94%, en función de los pozos existentes en la zona de estudio.

2.2. Bases teóricas

2.2.1 Cuenca hidrográfica

Desde el punto de vista hidrológico, una cuenca hidrográfica es definida como el área geográfica natural o unidad de territorio delimitada por una divisoria topográfica (*Divortium aquarum*), que capta las precipitaciones y drena el agua de escorrentía hacia un colector común, denominado río principal (Vásquez et. al 2016).

Partes de una cuenca hidrográfica

a) Partes altas

Estas partes comprenden altitudes superiores a los 3,000 metros sobre el nivel del mar, llegando en algunos casos hasta los 6,500 msnm. En tales áreas se concentra el mayor volumen de agua, ya sea en forma de nevados o de lluvia, dado que allí la precipitación pluvial es intensa y abundante; es frecuente asimismo la formación de nevados. La topografía de estas zonas es sumamente accidentada y escarpada; en consecuencia, su potencial erosivo es sumamente alto, pero al mismo tiempo su potencial para la producción hidroenergética también es alta. La precipitación total anual promedio alcanza los 800, hasta 1,600 mm por año. En esta parte es frecuente observar lagos y lagunas con abundante actividad biológica. Aquí se ubican los pastores y campesinos pobres que normalmente desarrollan una economía de autoconsumo y subsistencia; pero al mismo tiempo, en estas zonas se encuentra un gran potencial con recursos mineros. A estas partes altas también se

le llama “cabecera de cuenca”, que son las zonas de mayor disponibilidad de agua y de muy buena calidad y que a partir de allí fluyen hacia las partes medias y bajas de las cuencas, ya sea en forma superficial o subterránea. Estas partes altas son claves para su preservación y protección por ser abastecedoras de agua para el resto de la cuenca (Vásquez et. al 2016).

b) Partes medias

Son las comprendidas entre los 800 y 3000 msnm. Las precipitaciones promedio que caen en estas zonas varían entre los 100 – 800 mm/año. En estas zonas están los valles interandinos, caracterizados por el clima benigno y variado. La función de estas partes de la cuenca está relacionada fundamentalmente con el escurrimiento del agua, siendo frecuente en dicho ámbito la presencia de pequeñas ciudades que la circundan, dándose además, como característica, una gran actividad económica (Vásquez et. al 2016).

c) Partes bajas

Abarcan desde el nivel del mar hasta los 800 msnm. La precipitación promedio que cae en la zona es muy escasa (< 100 mm/año), su pendiente es igualmente baja. En este ámbito están los amplios valles costeros, donde se desarrolla una intensa actividad agropecuaria, así como También se ubican las medianas y grandes ciudades consumidoras. En estas zonas se ubican los grandes proyectos de irrigación con importantes sistemas de embalse. El potencial de aguas subterráneas de estas zonas es alto (Vásquez et. al 2016).

2.2.2 Ciclo hidrológico

Concepto teórico, que corresponde a “un modelo o idealización del movimiento, distribución y circulación general del agua en la Tierra”, se fundamenta que toda gota de

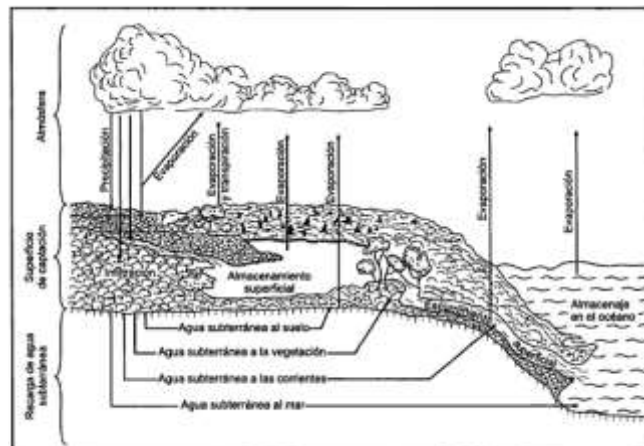
agua, en cualquier momento en que se considere, recorre un circuito cerrado, sin embargo, a pesar de que el concepto es bastante simple, el fenómeno es altamente complejo e intrincado (Maderey y Jiménez 2005).

La mayor parte de agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percollar someramente y dar lugar al nacimiento de manantiales, participar eventualmente en el ciclo de recarga, o; percollar profundamente hacia los acuíferos de donde se desliza hacia los ríos para formar parte de la escorrentía superficial, finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo hidrológico continúa (Chowet. al 1994; SMA 2000; Maderey y Jiménez 2005).

Con los elementos expuestos anteriormente se puede considerar que, el ciclo del agua evoluciona en cuatro medios diferentes: atmósfera, aguas superficiales, superficie del suelo y subsuelo, además se pueden establecer perfectamente tres campos: aguas atmosféricas, aguas superficiales y aguas subterráneas (Seóanez 2002).

Figura 1.

Ilustración del ciclo hidrológico



Fuente: Maderey y Jiménez, 2005, p. 12

2.2.3 Balance hídrico

Es importante tener en consideración, que el balance hídrico tiene un espectro muy amplio, se puede estudiar a nivel de una muestra de suelo hasta una cuenca hidrográfica, es flexible en el tiempo, se puede evaluar de manera diaria, mensual o anual. Este proceso está muy ligado al balance energético, pues participan en él procesos que consumen energía, como la evaporación. El cálculo del balance hídrico es de mucha utilidad cuando se desea cuantificar cambios en las reservas de agua de la unidad en estudio (Seóñez 2002).

Maderey y Jiménez (2005), mencionan que este proceso tiene dos fases, una activa y una pasiva. La parte activa está directamente relacionada con las salidas de agua del sistema y comprende tanto al escurrimiento como a la evaporación. Simultáneamente, en la parte pasiva

La cuantificación del balance hídrico es normalmente complicada, pues la falta de medidas directas, la variación espacial de las variables (tales como precipitación, evapotranspiración), las pérdidas profundas (a acuíferos) y las variaciones del agua almacenada son una limitación en este proceso, sin embargo, como respuesta a estas dificultades, de manera general se admiten dos premisas: la primera supone que las pérdidas profundas son despreciables (se considera que una cuenca es impermeable) y la segunda admite que las variaciones del agua almacenada en la cuenca hidrográfica son despreciables para un periodo normalmente largo (Faustino 2012).

2.2.4 Zonas de recarga hídrica

Entre los métodos más utilizados para estimar esta recarga se destacan, los balances hidrológicos, seguimiento de trazadores ambientales o artificiales (químicos e isotópicos), mediciones directas en piezómetros, cuantificación del flujo subterráneo y las fórmulas empíricas (Carrica y Lexow 2004).

En el proceso de identificación de las zonas potenciales de recarga hídrica, es imperante tener en consideración el tipo, calidad y cantidad de información. Como regla general, en cuencas pequeñas, las principales limitantes que se presentan cuando se realiza la cuantificación del balance hídrico están relacionadas a la escasez de datos y a la escala de la información, mientras que para las cuencas grandes el factor limitante es el tiempo que se necesita para realizar el trabajo de recolección y análisis de esta información (Faustino 2012).

Adicional a los requerimientos de información técnica, es fundamental contar con un conocimiento adecuado de la zona de estudio. Las fuentes de información local (personas de la localidad, agricultores, técnicos) son de mucha importancia para tener una aproximación sobre dónde se ubican las zonas de recarga hídrica y conocer cuáles son las principales variables a considerarse en campo (Matus 2008; Faustino, 2012).

Por otro lado, siempre es necesario tener en cuenta que, la caracterización de la recarga se debe entender no como la definición exacta de un valor, sino como la identificación y establecimiento de un rango de variabilidad de dicha recarga en un ámbito espacial dado (Samper y Pisani 2009).

Las zonas de recarga agrupan una serie de particularidades que motivan la infiltración de agua hasta alcanzar el manto freático (Bardales Espinoza, 2007; Hernández et al., 2020), está asociado a indicadores como la conductividad hidráulica de la roca (Berhe Zenebe et al., 2020) y la elevación topográficamente alta, el nivel freático se encuentra profundo, el suelo es ácido y poco desarrollado con poca cantidad de materia orgánica, baja concentración de sodio y/o sales, la vegetación es xerófita. Las zonas de recarga hídrica son un parte importante del sistema hidrológico de una cuenca hidrográfica, por tanto, cualquier alteración podría causar afectación a los acuíferos y en consecuencia la calidad y cantidad del recurso hídrico (Bueso Campos, 2010).

2.2.5 Clasificación de las zonas de recarga hídrica

a) Clasificación Hidrogeológica y Geomorfológica:

Martínez-Santos et. al (2020) proponen una clasificación basada en las características geológicas y geomorfológicas, donde se destacan:

- Zonas de recarga en acuíferos kársticos: Suelos altamente permeables donde la infiltración es rápida y significativa.
- Zonas de recarga en acuíferos aluviales: Áreas con suelos sedimentarios que permiten una infiltración moderada, típicas de valles fluviales.
- Zonas de recarga en acuíferos confinados: Regiones donde la recarga es limitada debido a la presencia de capas impermeables que restringen el movimiento del agua.

b) Clasificación según el Uso del Suelo y la Vegetación:

López-Caloca et. al (2021) desarrollan una clasificación basada en la influencia del uso del suelo y la cobertura vegetal sobre la capacidad de infiltración:

- Zonas de recarga con cobertura forestal: Regiones con alta capacidad de infiltración debido a la vegetación densa y los suelos poco compactados.
- Zonas de recarga en áreas agrícolas: Áreas con capacidad de recarga variable, dependiendo de las prácticas agrícolas y la compactación del suelo.
- Zonas urbanas y periurbanas: Áreas de baja o nula recarga debido a la impermeabilización del suelo (asfalto, concreto).

c) Clasificación Funcional en la Gestión de Cuencas:

Jiménez-Martínez et. al (2019) clasifican las zonas de recarga hídrica en función de su contribución a la disponibilidad de agua en las cuencas y su manejo:

- Zonas de recarga estratégica: Áreas que aportan grandes volúmenes de agua subterránea y son prioritarias para la gestión sostenible de las cuencas.
- Zonas de recarga natural protegida: Regiones incluidas en áreas naturales protegidas para mantener la calidad del agua y la biodiversidad.
- Zonas de recarga urbana gestionada: Zonas donde se implementan tecnologías como pavimentos permeables o sistemas de infiltración controlada para aumentar la recarga en áreas urbanizadas

d) Clasificación basada en la Conservación y Sustentabilidad:

Muñoz et. al (2020) sugieren una clasificación en la que se integran criterios de conservación ecológica y sostenibilidad de los recursos hídricos:

- Zonas de recarga prioritarias para la conservación: Áreas que cumplen una función crítica en la recarga de acuíferos y en el mantenimiento de ecosistemas acuáticos.
- Zonas de recarga afectadas por cambios de uso del suelo: Regiones donde actividades humanas como la urbanización o la agricultura intensiva han reducido significativamente la capacidad de recarga.
- Zonas de recarga restauradas: Áreas donde se han implementado acciones de restauración ecológica para mejorar la capacidad de infiltración y recarga.

e) Clasificación según la Planificación Territorial y Normativa:

Pérez-Estrada et. al (2021) clasifican las zonas de recarga hídrica de acuerdo con su inclusión en planes de ordenamiento territorial y normativas ambientales:

- Zonas de recarga reguladas: Áreas designadas por la legislación local o nacional para proteger la recarga hídrica, generalmente asociadas a reservas de agua subterránea.
- Zonas de recarga no reguladas: Regiones donde la recarga ocurre de manera natural, pero que no están bajo protección formal.
- Zonas de recarga con infraestructura verde: Áreas urbanas y periurbanas donde se han implementado estrategias de infraestructura verde para mejorar la recarga.

2.2.6 Factores que afectan la recarga hídrica

Los efectos benéficos de la preservación de las zonas de recarga hídrica no son exclusivas del bosque, sino también la recarga hídrica depende de la precipitación, de la escorrentía superficial y del caudal de los ríos (IARNA, 2006). Asimismo, depende de la permeabilidad del suelo, de su contenido de humedad, intensidad de lluvia y el patrón de drenaje de la cuenca. A su vez, se puede mencionar la pendiente de la superficie como un factor importante, ya que, los terrenos con mayor inclinación favorecen la escorrentía superficial; que, por lo contrario, los terrenos que posean poca pendiente retienen por más tiempo el agua lo que favorece la infiltración (Matus, 2009).

De manera más detallada, estos factores son:

a) Clima

En un área territorial las condiciones climáticas dependen de la cantidad de lluvias (entradas de agua) y la evapotranspiración (salidas de agua), este último debido a la pérdida de agua por la transpiración de plantas y la evaporación de agua que regulan el ciclo hidrológico. Por consiguiente, este factor influye en la recarga hídrica para aportar en mayor o menor cantidad el recurso líquido vital para la infiltración de agua de lluvia de forma natural al suelo (FONDECYT, 2010).

Elemento que actúa en la cuenca y que define el nivel de la temperatura, radiación, horas de sol, precipitación, el viento, nubosidad y otros fenómenos climatológicos favorables o adversos para la actividad biológica, productiva, turismo y de servicios. (Vásquez et. al 2016).

b) Suelo

El suelo impermeable y compactado impide o dificultan la infiltración, por lo contrario, un suelo permeable facilita la recarga. Las características del suelo que influyen en la recarga son la textura, densidad aparente, grado de saturación y la capacidad de infiltración (INAB, 2003).

Elementos importantes de una cuenca, ya que, si se relaciona adecuadamente con el agua de buena calidad, favorece la vida humana, animal y vegetal; en caso contrario, pueden producirse fenómenos dañinos como la erosión, huaycos, contaminación, deslizamientos, sedimentación de reservorios, salinización, problema de drenaje (Vásquez et. al 2016).

c) Topografía

La recarga hídrica dependerá del tiempo de contacto entre el agua y la superficie del terreno. A este factor se relaciona el grado de inclinación que posea el terreno, ya que al poseer pendientes fuertes favorecen a la escorrentía superficial, disminuye el tiempo de contacto y reducen la infiltración del agua. Sin embargo, al poseer pendientes de menor grado, maximiza el contacto del agua con el suelo e incrementa la infiltración del suelo (Matus, 2009).

Las características topográficas que inciden en la erosión hídrica son la pendiente y la longitud de la ladera, así como la forma y tamaño del área de drenaje. (Vásquez et. al 2016).

d) Cobertura vegetal

La cobertura vegetal influye en disminuir o aumentar la escorrentía superficial debido a que a mayor cobertura permite mayor tiempo de contacto del agua con la superficie del suelo, esto favorece la infiltración del agua. Por consiguiente, un porcentaje de la lluvia es interceptada por la cobertura vegetal, y es necesario considerar la profundidad y densidad de las raíces y la capacidad de retención del dosel vegetal (Matus, 2009).

Cabe destacar que ante la presencia de cobertura vegetal multiestratificada existe mayor recarga hídrica debido a que ayuda a conservar las propiedades del suelo, que, a su vez, también favorecerán la recarga (CATIE, 2010).

Muy importante en el ciclo hidrológico debido a la evapotranspiración que origina y a la acción de amortiguamiento y protección del impacto directo del agua sobre el suelo, así como a la infiltración del agua en el suelo, a la estabilización del suelo y a la captura y almacenamiento del CO₂ existente en la atmósfera (Vásquez et. al 2016).

e) Uso de suelo

El suelo se deteriora cuando el uso de la tierra se establece en tierras no aptas para dicha intensidad o tipo de uso. A esto se relacionan al deterioro de las características del suelo, dando como resultado la erosión y compactación. También se reduce la capacidad de infiltración y, por consiguiente, la recarga hídrica disminuye (CATIE, 2010).

Los tipos de uso de la tierra con cobertura natural promueven la recarga hídrica, mientras que usos como agrícolas, pecuarios y urbanos tienden a limitar o inhibir completamente la infiltración de agua (IARNA, 2006).

f) Geología

El tipo de roca permitirá determinar si la recarga hídrica es subsuperficial o profunda de aguas subterráneas, a lo cual, se denomina acuífero. Asimismo, es posible determinar si hay existencia de una capa de material rocoso o arcilla impermeable que no permite el paso de agua hacia el acuífero o pudiéndose desplazar a través de flujos de agua subsuperficiales con movimiento horizontal que luego brota en un manantial o alimentan a un río (CATIE, 2010).

Las características de las rocas como la porosidad y la permeabilidad son las que principalmente determinan la recarga hídrica. La permeabilidad de una roca se mide por la velocidad a la que se va a transmitir el agua a través de una sección transversal (CATIE, 2010).

Cabe mencionar que existen dos fuerzas que controlan el movimiento del agua en la roca, como son la gravedad y la atracción molecular. La gravedad hace que el agua pueda infiltrarse hasta zonas impermeables y también pueda desplazarse lateralmente generando el flujo de manantiales, ríos y pozos. La segunda fuerza, retarda el flujo a través de pequeños poros de las rocas (National Groundwater Association, 2010)

2.2.7 Recarga hídrica y la actividad antrópica

Las zonas de recarga hídrica son una parte importante del sistema hidrológico de una cuenca hidrográfica, y al presentarse cualquier fenómeno que altere su estado provocará un efecto negativo que se verá reflejado en los acuíferos y, por consiguiente, en el aprovechamiento de la cantidad y calidad de agua, caracterizados por mecanismos de uso poco eficiente del recurso (New Jersey Stormwater, 2004).

Los impactos potencialmente adversos del desarrollo desmedido dentro de la dinámica de la recarga hídrica han sido durante mucho tiempo señalados; entre ellos el crecimiento demográfico, urbanismo, deforestación, la expansión de fronteras agropecuarias, entre otros. Estos factores han ido reduciendo la permeabilidad de los suelos a través de la perturbación y compactación, con ello, reducen la tasa de recarga del agua subterránea. Estas reducciones en la recarga hídrica de las aguas subterráneas pueden tener impacto negativo en arroyos, humedales y otros cuerpos de agua reduciendo el volumen, calidad y la velocidad del flujo de agua base de los mismos, también afectando negativamente el rendimiento de los pozos de abastecimiento de agua (New Jersey Stormwater, 2004).

Por otro lado, la mayoría de la contaminación de flujos subterráneos es el resultado de la actividad antrópica presente, los contaminantes pueden filtrarse en aguas subterráneas debido a fugas de tanques subterráneos, pozos, fosas sépticas y vertederos. El uso de pesticidas y fertilizantes, jabones, petróleo, aceite, entre otros, pueden estar presentes en los flujos subterráneos, infiltrándose lentamente hasta llegar a un punto de concentración, incrementando los niveles de contaminación de acuíferos o flujos subterráneos causando niveles bajos de calidad de agua y, por consiguiente, afectando el aprovechamiento del recurso (Longwood University, 2003).

2.2.8. Medidas de conservación para las zonas de recarga hídrica

En la actualidad existen conflictos entre los usuarios del recurso hídrico, esto debido a que el desarrollo económico lleva consigo el cambio de uso de la tierra, la sobreexplotación de suelo, extracción de aguas subterráneas, contaminación, deforestación, construcción de pozos, entre otros. En consideración a esta tendencia de deterioro de estas

zonas de recarga se establece lo siguiente para su adecuada administración, protección y conservación (Planning Commission Government of India, 2012):

- Gestión de zonas de protección de recarga hídrica;
- Regulación de zonas de protección de recarga hídrica;

a) Gestión de zonas de protección de recarga hídrica

La gestión de zonas de protección debería ser delimitada según lo siguiente (Planning Commission Government of India, 2012):

1. Protección las zonas de recarga y descarga natural de amenazas como deterioro físico como el cambio de uso de la tierra, erosión, contaminación, etc.
2. Protección de aguas subterráneas de manera que cubra con las necesidades de ecosistemas dependientes.
3. Protección de zonas vulnerables que requieren atención especial y regulación por alteración química del agua.
4. Disposición de suministro de agua en cantidad y calidad bajo sistemas de manejo y sostenibilidad para cumplir con las necesidades de cualquier ser vivo.
5. Disponer agua para el desarrollo económico sostenible.

b) Regulación de zonas de protección de recarga hídrica

Es necesario involucrar a las autoridades competentes para la toma de medidas posibles para la conservación y protección de las zonas de protección de recarga hídrica, en especial en la realización de planes de protección de aguas subterráneas (Planning Commission Government of India, 2012). Al establecer las zonas de protección se debería regular principalmente:

1. Extracción y aprovechamiento de aguas subterráneas;
2. Deforestación y forestación;
3. Eliminación de residuos de cualquier tipo;
4. Cambios de uso de la tierra y;
5. Prohibición de concesiones mineras.

De acuerdo con Planning Commission Government of India (2012) deberán establecerse comités locales dedicados a supervisar, controlar y sancionar actividades que dentro de las zonas de protección de recarga no se dirijan a la conservación del recurso hídrico.

Asimismo, el enfoque legislativo servirá para complementar el mecanismo de control hacia las zonas de recarga hídrica a través de permisos, sanciones y la utilización coordinada de los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Las autoridades tienen la responsabilidad de establecer lineamientos para la gestión del recurso hídrico, uso de la tierra y el cuidado de la calidad y cantidad de agua para todos los ciudadanos. Pero corresponde a todos los ciudadanos ayudar a mantener el recurso hídrico y recursos naturales asociados en óptimas condiciones para un aprovechamiento efectivo y en beneficio de las generaciones presentes y futuras (Longwood University, 2003).

2.2.9 Importancia de la recarga hídrica

El agua subterránea es sin duda el componente que constituye alrededor de dos terceras partes de los recursos de agua dulce en todo el mundo; además, como alimentan a

lagos, pantanos, embalses y ríos, representan el 3.5 por ciento y la humedad del suelo solo el 1.5 por ciento del agua dulce (Chilton, 2001).

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

2.2.10 Cambio de uso del suelo

Lambin, Helmut y Leppers (2003), resaltan la diferencia entre cobertura y uso del suelo, la primera está dada por los atributos biofísicos o antrópicos de la superficie terrestre y lo segundo está basado en la utilización que el hombre da a esos atributos; así pues, un área específica puede estar cubierta de pasto (cobertura), pero puede estar siendo usada para ganadería o una cancha de fútbol (recreación). También se hace referencia a la magnitud de los cambios, la conversión indica el reemplazo total de una cobertura por otra (café a caña) y la modificación, la cual implica sutiles cambios en la estructura de la cobertura, por ejemplo, la extracción selectiva de especies maderables de un bosque causa perturbaciones.

Según MAGA (2006), la cobertura vegetal concierne a la vegetación natural que proporciona una cobertura al suelo y que puede o no estar utilizada por el hombre (pastos,

bosques y humedales), y el uso de la tierra concierne al hombre y el uso que éste le está dando al suelo para su provecho, principalmente la agricultura.

El cambio del uso del suelo se ha constituido en uno de los factores plenamente implicados en la degradación ambiental de tipo local, sin embargo, su magnitud y ocurrencia a lo largo y ancho del mundo lo han convertido en un problema global (SEMARNAT 2005), pues interfiere en procesos ecosistémicos, altera los ciclos de los nutrientes, modifica el balance hídrico en las cuencas hidrográficas y aporta en el cambio del clima mundial (SEMARNAT 2005; Pineda et. al 2009).

La cobertura, son aquellos cuerpos naturales o artificiales que cubren la superficie del suelo, por lo tanto, pueden originarse de ambientes naturales como resultado de la evolución ecológica (bosques, sabanas, lagunas, etc.) o partir de ambientes artificiales creados y mantenidos por el hombre (cultivo, represas, ciudades)". Mientras que el uso del suelo se define como el "resultado de las actividades productivas y asentamientos humanos que se desarrollan sobre la cobertura del suelo para satisfacer las necesidades materiales o espirituales de los seres humanos, la característica principal de este concepto es la interrelación entre factores físicos o naturales y los factores culturales o humanos" (Bocco et. al 2001).

2.2.11 Análisis multitemporales de cambio de uso del suelo

Los estudios multitemporales son llevados a cabo con el objeto de detectar cambios entre dos o más fechas de referencia, deduciendo de ahí la evolución del medio natural o las repercusiones de la acción humana sobre el medio. Además, son útiles para planificar las medidas adecuadas para evitar su deterioro o asegurar su mejor conservación. "El objetivo de los estudios multitemporales es encontrar una forma de combinar o integrar en

el proceso varias imágenes correspondientes a diferentes fechas” (Chuvieco, 1990). En general, los esfuerzos de analizar y modelar los procesos de cambio de uso del suelo se orientan a responder las siguientes interrogantes: ¿cómo y por qué ocurre el cambio en el uso del suelo?, ¿dónde? Estas tres interrogantes fundamentales son abordadas a través de metodologías apoyadas en el uso de sensores remotos y análisis estadístico espacial (Sandoval y Real, 2005).

Modelos de cambio de uso del suelo

Para responder a la demanda de información sobre los ecosistemas terrestres a diversas escalas, se necesita entender el cambio en el uso de la tierra y cómo estos cambios influyen en la cobertura forestal en el tiempo. Los modelos forman una conexión entre factores antrópicos y físicos que determinan el uso del suelo y la cobertura forestal, estos a su vez proveen un entendimiento y sientan las bases teóricas para simulaciones y predicción de cambios. Los modelos explican el problema teóricamente, pero no duplican cada detalle del mundo real (Lambin, 1994). De esta forma, los modelos de dinámica espacial en un paisaje pueden ser utilizados para:

- Describir fenómenos espaciales cuantitativamente
- Predecir estos fenómenos a escala temporal
- Integrar lo espacial y lo temporal

En temas relacionados con procesos de deforestación se integran las escalas espaciales y temporales, ya que por ejemplo el cambio de bosque a otro tipo de cobertura se da en ecosistemas que ocupan unidades territoriales específicas (paisajes), y surge de la comparación entre dos tiempos concretos (tiempo 0 y tiempo 1), (Bocco 2001); de esta

forma los modelos pueden responder a preguntas de “por qué?”, “cuando?” , y “donde?”, ocurren estos cambios.

Los modelos de cambio de uso del suelo pueden ser vistos como una aproximación a una modelización paisajística de tipo retrospectivo (para trazar la historia de los paisajes) y prospectivos (como ayuda a la toma de decisiones), (Paegelow, Camacho y Menor, 2003). Un ejemplo de análisis de este tipo fue llevado a cabo en Costa Rica por Pontius et al (2003), para ello se utilizó el modelo GEOMOD2, el cual cuantifica los factores asociados con el uso del suelo y simula sus patrones hacia adelante y atrás en el tiempo; así pues, se modeló la pérdida de cobertura de bosque en Costa Rica en los años 1940, 1961 y 1983, además se proyectó un mapa al 2010.

Entre otros tipos de modelos para proyectar el cambio de uso del suelo se destacan: El método estadístico de los datos funcionales o modelo paramétrico de tipo logístico, el cual utiliza funciones polinomiales, considerando no solamente la ocupación de suelo sino también las variables ambientales explicativas; los algoritmos de redes neuronales que agregan también variables explicativas suplementarias y las correlaciona en el espacio y tiempo (Paegelow, et al., 2003). Por último, las cadenas de Markov permiten analizar la estabilidad del ecosistema en función de los cambios ocurridos en un periodo dado, además de proporcionar información sobre la tendencia de cada categoría de uso o cobertura establecida, en función de las probabilidades de transición entre categorías de uso (Lambin, 1994); esta metodología simula la predicción del estado de un sistema en un tiempo determinado a partir de dos estados precedentes, lo cual significa que la modelización no tiene en cuenta las variables explicativas y descriptivas (Paegelow, et al., 2003).

2.2.12 Relación entre cambio de uso del suelo y zona de recarga hídrica

El cambio de uso del suelo puede tener un impacto significativo en las zonas de recarga hídrica. Los cambios en la vegetación, la superficie del suelo y la cobertura de la tierra pueden afectar la cantidad y la calidad del agua que se infiltra en los acuíferos. Por ejemplo, la deforestación y la urbanización pueden disminuir la capacidad del suelo para retener y filtrar el agua, lo que puede aumentar el escurrimiento superficial y disminuir la recarga de los acuíferos.

Según el estudio de identificación y caracterización de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en Cuenca "La Carreta" y "Santa Isabel". Cali (Colombia), los cambios en el uso del suelo pueden afectar la recarga hídrica y la disponibilidad de agua en las cuencas (Rodríguez, 2020).

El efecto del cambio de uso de suelo se da a través de la pérdida de la capacidad de regulación hídrica de la microcuenca, ya que al alterar la originalidad de un ecosistema se pierde la suficiencia de captar e infiltrar el agua de las precipitaciones; aunque de acuerdo con otras investigaciones esta depende del tipo de cobertura predominante en la zona de investigación. (Ticse, G. et al., 2018).

Según el análisis de los cambios de cobertura y uso de la tierra realizado por el Gobierno Regional de Cajamarca, la deforestación y la expansión de la agricultura pueden tener un impacto negativo en la recarga hídrica y la disponibilidad de agua en la región (Alcántara, 2014).

Además, algunos estudios han encontrado que las características de los elementos naturales (suelo, vegetación, elevación topográfica, litología, profundidad al nivel freático, presencia/ausencia de manantiales y cuerpos de agua) son resultado de diversos procesos

involucrados en el funcionamiento del agua subterránea en la naturaleza, por lo que se consideran indicadores confiables de la manifestación superficial de zonas de recarga y descarga. (Peñuela Arévalo. et al., 2013).

La relación entre el cambio de uso del suelo y las zonas de recarga hídrica es compleja y puede variar significativamente en función de las condiciones locales y las prácticas de gestión de la tierra. Sin embargo, varios estudios han demostrado que el cambio de uso del suelo puede tener un impacto significativo en la cantidad y calidad del agua que se infiltra en los acuíferos.

2.2.13. Identificación de las zonas de recarga con Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Las zonas de recarga reúnen características que favorecen la infiltración de agua hasta alcanzar el nivel freático, uno de los indicadores de estas zonas es la conductividad hidráulica de la roca que permite la infiltración del agua de lluvia. Estas zonas se caracterizan por un nivel freático profundo, suelos generalmente ácidos y poco desarrollados, con baja cantidad de materia orgánica y poca concentración de sodio y sales. (Peñuela Arévalo & Carrillo Rivera, 2013)

En contraste con los métodos convencionales, la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) agilizan y hacen más eficiente la evaluación de los recursos de agua subterránea, reduciendo el tiempo y la intensidad laboral requerida (Thapa et al., 2017). Diversos investigadores han empleado enfoques basados en SIG para mapear el potencial de agua subterránea, la geomorfología hidroeléctrica, así como para analizar la disminución del nivel freático y sus efectos en el hundimiento regional, riesgos kársticos y la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea (Thapa et al., 2017). La

delimitación de las Zonas Potenciales de Recarga de Agua Subterránea (GWPZ) se ve influenciada por múltiples factores como la precipitación, litología, textura del suelo, pendiente, elevación, distribución del nivel freático, sistemas de drenaje, entre otros (Narayanan & Venugopal, 2021; Magesh et al., 2012; Magesh et al., 2011; Thapa et al., 2017).

2.3. Definición de términos básicos

2.3.1 Hidrología

Es la ciencia que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, incluyendo propiedades químicas y físicas y su relación con el ambiente y seres vivos (CATIE, 2006).

La hidrología juega un rol importante en la planificación de cuencas, principalmente en los aspectos que tienen relación con el dimensionamiento de estructuras de uso y control del agua, así como estudios y gestión del medio ambiente (Vásquez et. al 2016).

2.3.2 Escorrentía

Se refiere a la cantidad de agua de lluvia, riego o deshielo que excede la capacidad de infiltración del suelo, es decir, que supera la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, y, por lo tanto, esta fluye en dirección longitudinal a la pendiente dirigiéndose a cuerpos de agua como ríos, lagos, embalses y océanos (Matus, 2009).

La escorrentía según Murillo (2009) se refiere al flujo de agua que, al no ser absorbido por la superficie, se desplaza sobre la tierra. En hidrología, la escorrentía hace

referencia a la lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca, es decir, la altura en milímetros del agua de lluvia escurrida y extendida. Normalmente se considera como la precipitación menos la evapotranspiración real y la infiltración. La proporción de agua que sigue cada uno de estos caminos depende de factores como el clima, el tipo de roca o la pendiente del terreno. La escorrentía es un proceso fundamental en el ciclo del agua, ya que representa la fase en la que el agua, que ha caído como precipitación, fluye sobre la superficie y regresa a los cuerpos de agua como lagos, ríos y océanos

2.3.3 Infiltración

Es el movimiento del agua desde la superficie hacia el interior del suelo, acumulándose en los poros del suelo, para poder ser utilizada por plantas o avanzar por gravedad, desplazándose hacia capas más profundas del suelo, donde alimenta a los mantos freáticos. La capacidad de infiltración se mide por la cantidad de agua que el suelo es capaz de absorber por unidad de tiempo (mm/h, cm/min, cm/h), de acuerdo a su humedad, composición y grado de compactación (Matus, 2009).

Es el proceso mediante el cual el agua, al entrar en contacto con el suelo, penetra al interior del perfil del suelo (se infiltra) a través de los poros; a medida que va humedeciéndose el suelo por efecto de la gravedad y a diferencias de potenciales que puedan existir entre las diferentes capas del suelo sigue avanzando el agua hacia capas más profundas; llegando en muchos casos a ser almacenada en los acuíferos o reservorios subterráneos. En el proceso de infiltración del agua en el suelo juega un rol importante el nivel de permeabilidad o porosidad de las diferentes capas del suelo, del grado de pendiente de la superficie del terreno y de la cobertura vegetal (Vásquez et. al 2016).

La infiltración, según Murillo (2009), se refiere al proceso por el cual el agua y los sólidos en suspensión en las aguas de escorrentía se introducen y se distribuyen en el suelo, lo que puede afectar la calidad del agua subterránea y la capacidad del suelo para retener agua y nutrientes. La infiltración es un factor clave en la gestión de la calidad del agua y la prevención de la contaminación, ya que puede llevar a la acumulación de sólidos en suspensión en las capas superficiales del suelo, lo que puede afectar la penetración de la luz y la actividad fotosintética de las plantas y algas, así como la concentración de oxígeno en el agua

2.3.4 Partículas en suspensión

Las partículas en suspensión por escorrentía, según Murillo (2009), se refieren a las partículas que flotan o están en suspensión en el agua y son arrastradas por la corriente, pudiendo ser de origen natural o antropogénico y afectar la calidad del agua y la vida acuática

Las partículas en suspensión se refieren a sólidos diminutos que no se disuelven en el agua, como limo, arcilla y materia orgánica, que son transportados por el flujo de agua. Estas partículas pueden afectar procesos como la recarga de acuíferos y la calidad del agua subterránea. Mays y Todd (2019)

2.3.5 Sedimentación

La sedimentación se refiere al proceso de formación y depósito de sedimentos, que ocurre mediante el transporte de material sólido por una corriente de agua, posándose en el fondo de la cuenca hídrica bajo la acción de la gravedad. Este proceso puede ser causado por la erosión, el arrastre del agua o la precipitación química, y conduce a la acumulación

de sedimentos en el fondo de masas de agua como ríos, embalses o lagunas. La sedimentación es un fenómeno natural que puede ser influenciado por actividades humanas, y es de gran importancia en la dinámica de los ecosistemas acuáticos. Murillo (2009)

2.3.6 Recarga hídrica

Para Custodio (1998) la recarga es el proceso por el cual se incorpora a un acuífero, agua procedente del exterior del contorno que lo limita. Son varias las procedencias de esa recarga, desde la infiltración de la lluvia (la más importante en general) y de las aguas superficiales (importantes en climas poco lluviosos), hasta la transferencia de agua desde otro acuífero, si los mismos son externos al acuífero o sistemas de acuíferos en consideración.

La recarga hídrica se define como el proceso por el cual el agua llega a la capa freática para reponer un acuífero. Esto ocurre de varias formas, como la recarga difusa, la recarga focalizada y la recarga artificial, siendo un componente clave en el balance hídrico subterráneo (de Vries & Simmers, 2002).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

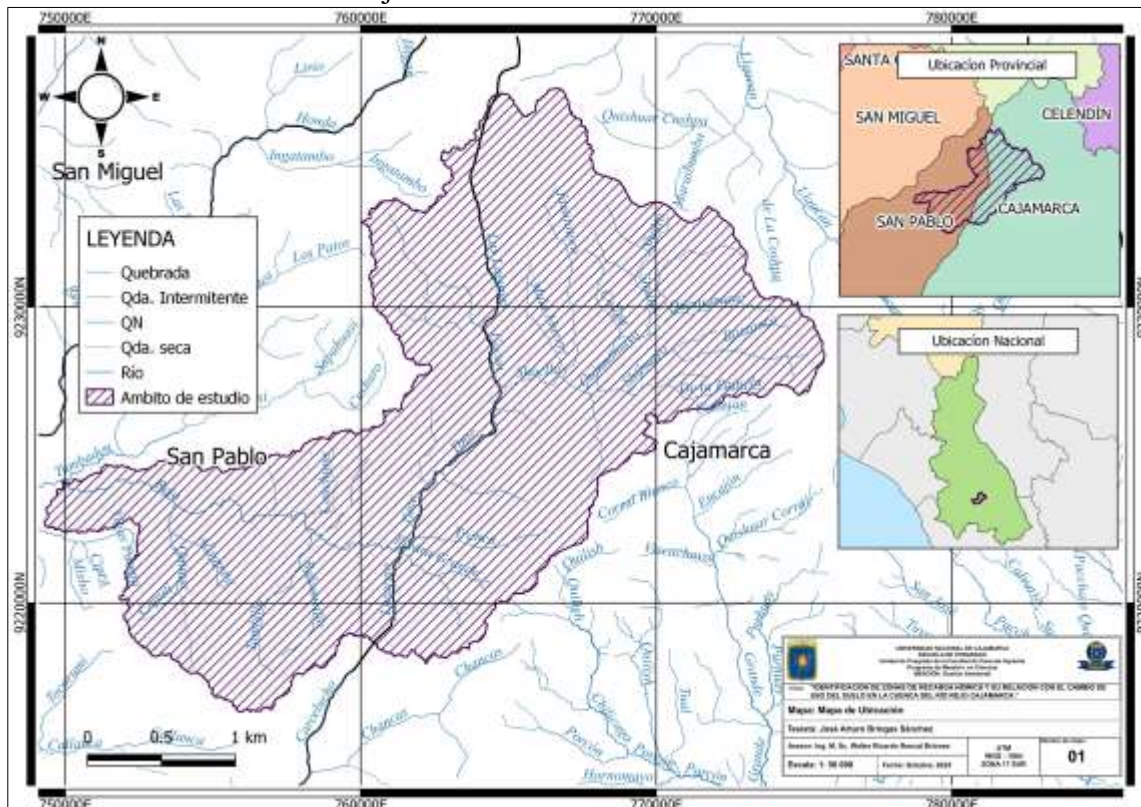
3.1. Ubicación de la cuenca

El estudio se realizó en la cuenca hidrográfica del río Rejo, el cual tiene una extensión aproximada de 22 747.0 hectáreas. Geográficamente, el área se encuentra en los límites UTM 749323.7 E – 9222688.3 N, 766720.1E – 9237405.7 N, 775914.6E – 9228178.4 N y 755948.9 E – 9216318.4 N. Los límites, altitudinales varían de los 2 632 a 3 800 msnm (Autoridad Nacional del Agua, 2015)

Políticamente, la cuenca del río Rejo se encuentra ubicada en las provincias de San Pablo y Cajamarca, ambas pertenecientes al departamento de Cajamarca, ubicado en la zona norte del Perú. El río Rejo es afluente de río Tumbaden.

Figura 2.

Ubicación de la cuenca del río Rejo



3.2 Características de la zona de estudio

3.2.1 Infraestructura hidráulica en el lugar de estudio

La cuenca del río Rejo cuenta con la siguiente Infraestructura hidráulica:

Tabla 1

Infraestructura hidráulica de la cuenca del río Rejo

Código	Nombre de la presa	Río en él se ubica la preses	Tipología de la presa	Volumen total; capacidad del reservorio en x 1000 m3	Finalidad(es) o Uso(s) del embalse
OF-AL26PR001	DIQUE RIO REJO	Rejo	Contrafuertes (CB)	65.00	Riego, regadío/ Suministro de Agua

Fuente: Inventario de Presas en el Perú, ANA-2015.

3.2.2 Demarcación hidrográfica de cuenca del río Rejo.

La cuenca del río Rejo pertenece desde el punto de vista hidrográfico a la cuenca del río Jequetepeque, el cual a su vez es parte de la vertiente del océano Pacífico. (Autoridad Nacional del Agua, 2015)

3.2.3 Zona de vida.

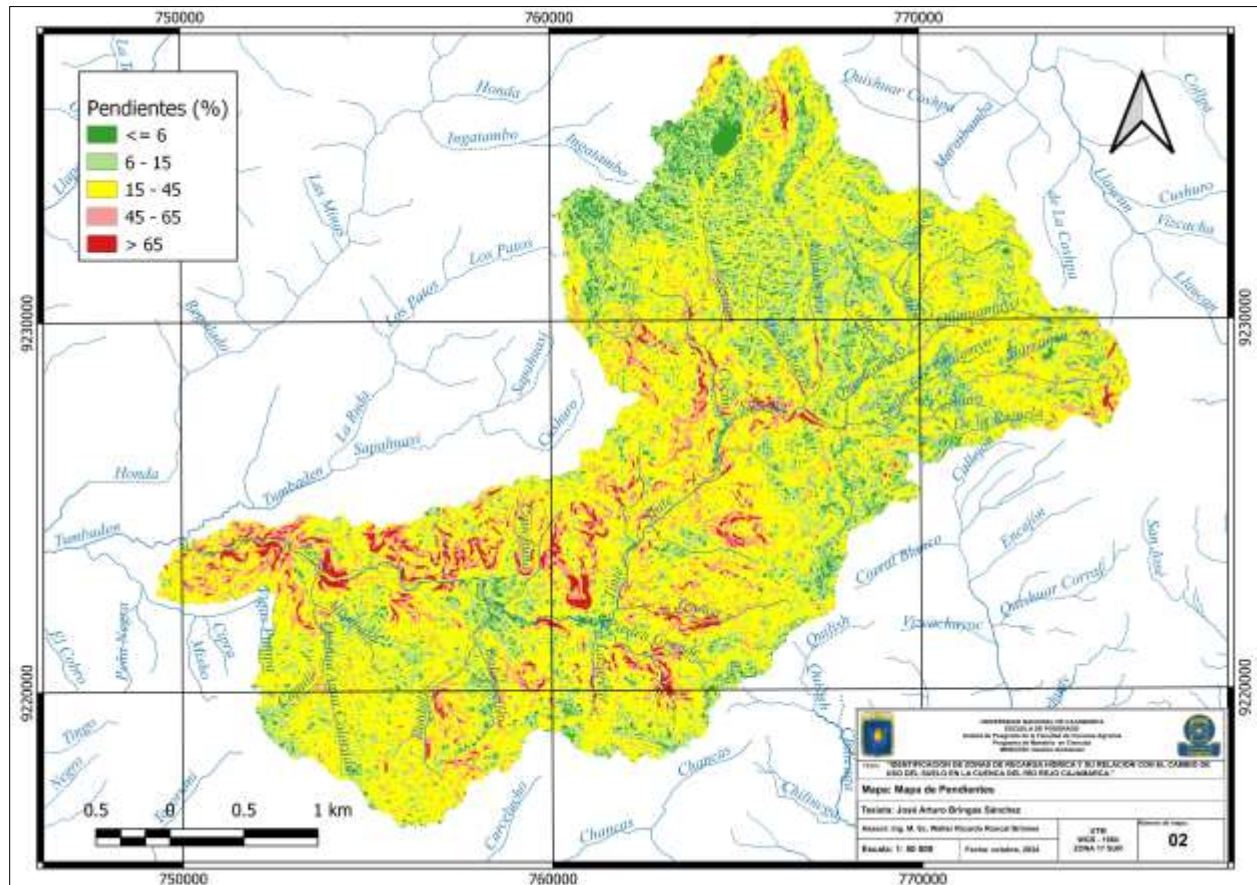
La cuenca del río Rejo comprende la zona de vida: bosque húmedo montano bajo tropical (bmh-MBT), bosque húmedo montano tropical (bh-MT), paramo pluvial subalpino tropical (pp -SAT), tundra pluvial alpino tropical (tp-AT). (ANA, 2015)

3.2.4 Pendiente.

La cuenca del río Rejo presenta una gran variación de pendiente que va desde: plano o casi plano, con o sin rugosidad moderadamente ondulado o cóncavo ondulado o cóncavo escarpado fuertemente escarpado. (ZZE, 2012).

Figura 3.

Mapa de pendientes de la cuenca del río Rejo

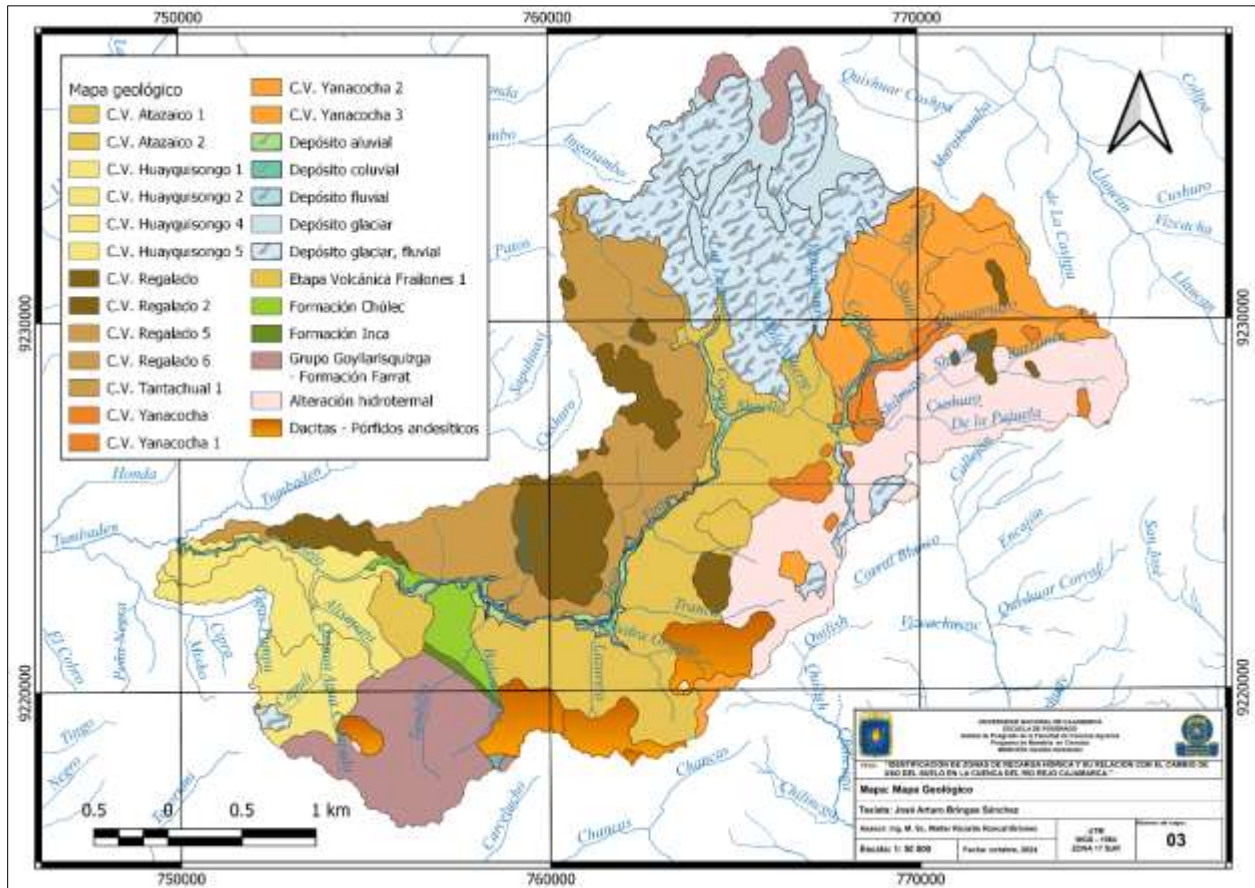


3.2.5 Geología

En la formación geológica, de la cuenca del río Rejo encontramos: depósitos aluviales, depósitos fluvioglaciares, formación chulec, formación farrat, formación inca, formación pariatambo, formación yumagial, volcánico huambos y con una gran presencia de la volcánico san pablo (INGEMMET, 2015)

Figura 4.

Mapa geológico de la cuenca del río Rejo



3.2.6 Clima.

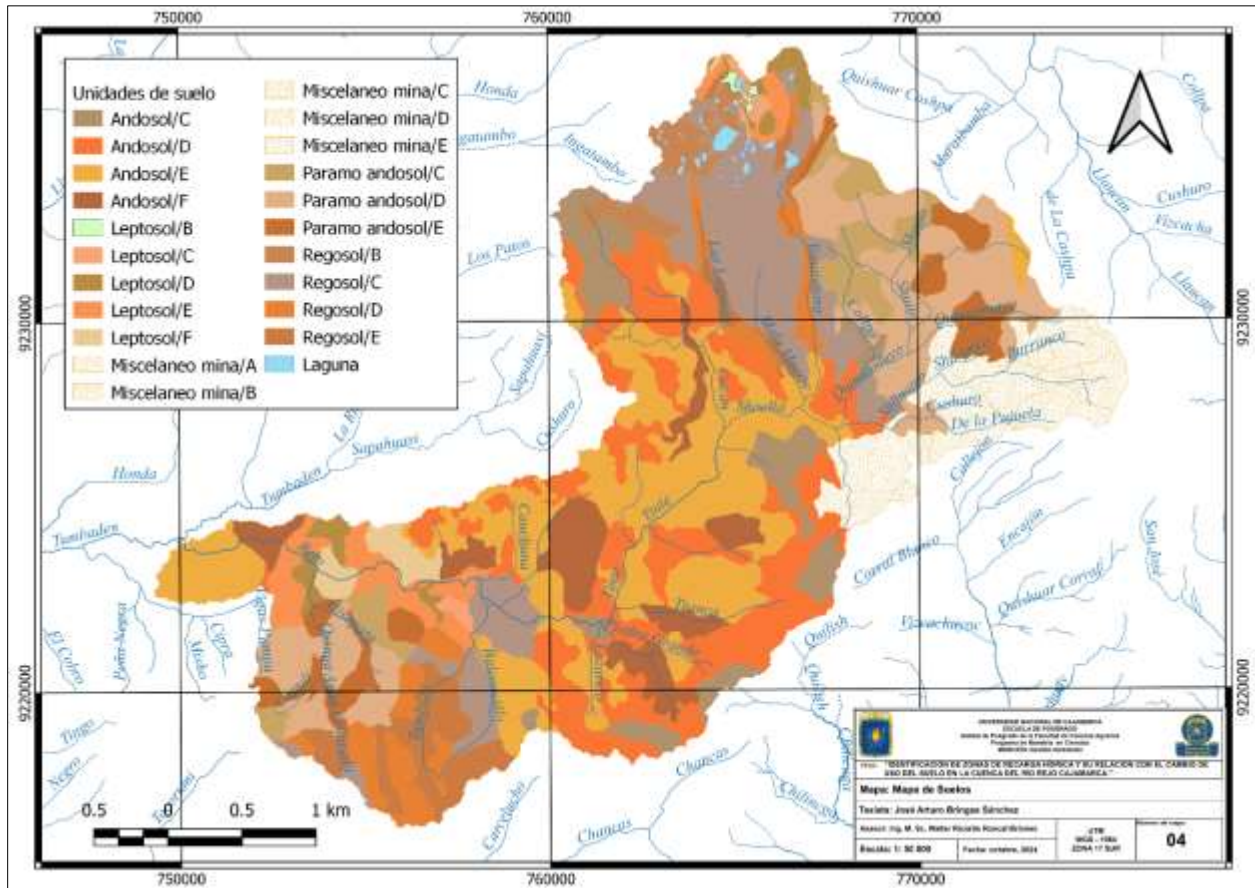
La precipitación anual varía desde 1000 a 1,500 mm, siendo los meses más lluviosos de enero a abril y, la época de estiaje en los meses de junio a setiembre. La temperatura anual fluctúa entre los 4- 12 °C (ANA, 2015)

3.2.7 Suelos

En la cuenca se encuentran varios tipos de suelo como: Andosol, Andosol – Leptosol, Paramo Andosol, Paramo Andosol -Leptosol, Paramosol, Paramosol – Leptosol (Alcántara, 2014),

Figura 5.

Mapa de suelos de la cuenca del río Rejo



3.3. Materiales

Para el desarrollo de la investigación, se utilizó los siguientes materiales:

3.3.1 Materiales de campo

- Mapa de cobertura de la cuenca con los puntos de monitoreo para la clasificación supervisada.
- Libreta de campo.
- Wincha.
- Lápiz.

- Equipos de localización con sistema de posicionamiento global (GPS)

3.3.2 Materiales de gabinete

- Computadora.
- Impresora.
- Mapa hidrográfico de la zona de estudio.
- Softwares de QGIS y Excel.
- Carta Nacional
- Carta Geológica Nacional.
- Mapas de la Zonificación económica ecológica Cajamarca.

3.4. Metodología

3.4.1. Unidad de análisis, población y muestra

Población: Cuenca del río Rejo

Muestra: Cuenca del río Rejo

Unidad de análisis: Las zonas de la recarga hídrica y su relación con el uso del suelo.

Utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), se realizó un análisis espacial para visualizar y analizar la distribución de las zonas de recarga en relación con los cambios en el uso del suelo.

3.4.2 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la recolección de datos se utilizó como técnicas el análisis y registro de tipos de suelo de la cuenca hidrográfica, teniendo como instrumento principal la medición de textura, además se analizó mapas geológicos, de pendientes, y cobertura vegetal.

Para la identificación de la cobertura del suelo de los años 2011 y 2020 se recopiló información de la página de internet USGS (Centro Geológico de los Estados Unidos) <http://earthexplorer.usgs.gov/>. De donde se descargaron las imágenes satelitales Landsat y se clasificó las coberturas y usos del suelo utilizando la metodología propuesta por el Ministerio del Ambiente (2015), CORINE (Coordination of information of the Environment) Land Cover adaptada para Perú. **(Ver anexo 1)**

3.4.3 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

a) Mapa temporal de uso de suelo para la cuenca del río Rejo

Para generar la información correspondiente al uso del suelo se utilizó imágenes satelitales Landsat para el año 2011 y para el año 2020 con resolución de pixel 30 m. Con esta información se siguió el siguiente procedimiento.

Corrección de imágenes: El procedimiento para corregir errores propios de las fotografías convencionales (desplazamiento, distorsión del terreno), se realiza mediante la ortorectificación, en este proceso se combinan los rasgos cualitativos de las fotografías satelitales y la calidad geométrica cartográfica lo que a su vez permite remover la distorsión geométrica de la imagen y así obtener imágenes planimétricamente correctas que representan los objetos del terreno en sus verdaderas coordenadas x, y (Fallas 2004; Ramírez 2008).

Para la ortorectificación de las imágenes, se trabajó con el programa QGIS, en el cual se incorporó información correspondiente a las características de las imágenes y modelo digital de elevación (DEM).

Digitalización de usos de suelo: El proceso se validó con información de campo (visitas y georreferenciación de diferentes usos de suelo)

Para determinar cambios entre los periodos evaluados (2011 y 2020), se elaboró en primer lugar el mapa correspondiente al periodo 2020 y con esta información se procedió a digitalizar el mapa para el periodo 2011, tal como establecen Brenes (2009) e Yglesias (2011). La sobreposición de los mapas temáticos para los dos periodos de ocupación de uso de suelo permite no sólo conocer los cambios existentes en términos de superficie sino también localizar los cambios sucedidos entre estas fechas.

Análisis multitemporal: Los resultados de la fase anterior permitieron generar el análisis correspondiente a las variaciones en la dinámica de uso del suelo con respecto a los periodos estudiados. A partir de las clasificaciones y categorizaciones generadas para cada periodo (2011 y 2020) se evaluó los cambios significativos durante los periodos considerados para la presente investigación.

Los cambios en el uso de suelo se han analizado en dos dimensiones, en magnitud y dirección de cambio. La primera indica, en términos de superficie de suelo, el porcentaje de cambios de uso durante los periodos evaluados, mientras que el segundo aspecto revela la tendencia del cambio, en este punto se identifica los usos del suelo con mayor variación en su superficie, así como las ganancias y pérdidas (Meneses 2000; Mendoza y García 2011).

b) Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica

Para la identificación de zonas de recarga hídrica, el estudio se basó en la ecuación propuesta por Matus (2009) adaptándola en algunos aspectos nominales al uso de nuestra región:

$$\mathbf{ZR = 0.27 (Pendiente) + 0.23 (Textura) + 0.12 (Geología) + 0.25 (tipo de suelo) + 0.13 (Uso del Suelo)}$$

Dónde: ZR = potencial de recarga. (0.27, 0.23, 0.12, 0.25, 0.13; Representan la importancia relativa de cada una de las variables)

En la ecuación se considera cinco elementos con diferentes ponderaciones asignadas, siendo la siguiente:

Tabla 2

Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según pendiente.

MICRORELIEVE	PENDIENTE (%)	Posibilidad de recarga	Ponderación
- Plano o casi plano, con o sin rugosidad	0 – 6	Muy alta	5
- Moderadamente ondulado o cóncavo	6 – 15	Alta	4
- Ondulado o Cóncavo	15 – 45	Moderada	3
- Escarpado	45 – 65	Baja	2
- Fuertemente escarpado	Mayor a 65%	Muy baja	1

Fuente: Elaborado en bases Matus, 2009

Tabla 3*Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el tipo de roca (Geología)*

Rocas (Geología)	Litología (GEOCATMIN – Escala 1:50,000)	Posibilidad de recarga	Ponderación
- Rocas muy permeables, muy suaves, constituidas por cristales o agregados gruesos, con macroporos interconectados; por ejemplo, arena gruesa, piedra pómez, grava o cascajo.	Grava, arena, limo	Muy lata	5
- Rocas permeables, suaves, constituidas por cristales o agregados medianos, con poros interconectados; por ejemplo, arena fina o arenisca con poca cementación.	Arena, limo Arenisca cuarzosa, Limoarcillita Limoarcillita, arenisca	Alta	4
- Rocas moderadamente permeables, semisuaves, con regular conexión entre poros.	Andesita, bloque, ceniza, toba de ceniza Bloque, grava, arena Grava, bloque, Pórfido andesítico, Volcanoclástica, toba de ceniza Andesita, Bloque,	Moderada	3
- Rocas poco permeables, un poco duras, moderadamente compactadas, constituidas por partículas finas, con presencia de fracturas interconectadas; por ejemplo, la combinación de gravas con arcillas	Bloque, ceniza Dacita Toba de ceniza, bloque, ceniza Toba vítrea, Toba vítrea, bloque, ceniza Unidad centro volcánico Yanacocha Alteración hidrotermal	Baja	2
- Rocas impermeables, duras, cementadas, compactadas, constituidas por partículas muy finas, sin presencia de fracturas.	Caliza, lutita	Muy baja	1

Fuente: Elaborado en bases Matus, 2009

Tabla 4*Ponderación de posibilidad de recarga hídrica según textura.*

Textura	Comentario	Posibilidad de recarga	Ponderación
Suelos franco arenosos a arenosos, con tamaño de agregados o partículas de gruesos a medios, con muy rápida capacidad de infiltración	(Láminas cuerpos de agua)	Muy alta	5
Suelos francos, con partes iguales de arena, limo y arcilla, con rápida capacidad de infiltración	Moderada gruesa	Alta	4
Suelos franco limosos, con partículas de tamaño medio a finas, con moderada a moderadamente rápida capacidad de infiltración	Franco arenoso	Moderada	3
Suelos franco arcillosos, combinación de limo y arcilla, con partículas finas, suelos pesados, con muestras de compactación, con lenta a moderadamente lenta capacidad de infiltración.	-	Baja	2
Suelos arcillosos, muy pesados, con partículas muy finas, compactados, con muy lenta capacidad de infiltración.	Zonas de extracción minera	Muy baja	1

Fuente: Elaborado en bases Matus, 2009

Tabla 5*Ponderación de posibilidad de recarga hídrica según tipo del suelo.*

Unidades de suelo	Posibilidad de recarga	Ponderación
(Láminas cuerpos de agua)	Muy alta	5
Andosol/C, Andosol/D, Andosol/E , Andosol/F, Paramo andosol/C, Paramo andosol/D, Paramo andosol/E	Alta	4
Leptosol/B, Leptosol/C, Leptosol/D, Leptosol/E, Leptosol/F, Regosol/B, Regosol/C, Regosol/D,Regosol/E	Moderada	3
Miscelaneo mina/A, Miscelaneo mina/B , Miscelaneo mina/C , Miscelaneo mina/D, Miscelaneo mina/E	Baja	2
-	Muy baja	1

Fuente: Elaborado en bases Matus, 2009**Tabla 6***Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el porcentaje de cobertura vegetal.*

Uso de suelo	Cobertura del Suelo Identificada	Posibilidad de recarga	Ponderación
Bosque donde se dan los tres estratos: árboles, arbustos y hierbas	Láminas (cuerpos) de agua; humedales y zonas pantanosas; bosques de coníferas	Muy alta	5
Sistemas agroforestales o silvopastoriles	Pastizales	Alta	4
Terrenos cultivados y con obras de conservación de suelo y agua	Tierras de labor en seco;	Moderada	3
Terrenos cultivados sin ninguna obra de conservación de suelo y agua	Espacios con escasa vegetación	Baja	2
Terrenos agropecuarios con manejo intensivo	Zonas de extracción minera – suelos desnudos	Muy baja	1

Fuente: Elaborado en bases Matus, 2009

Tabla 7

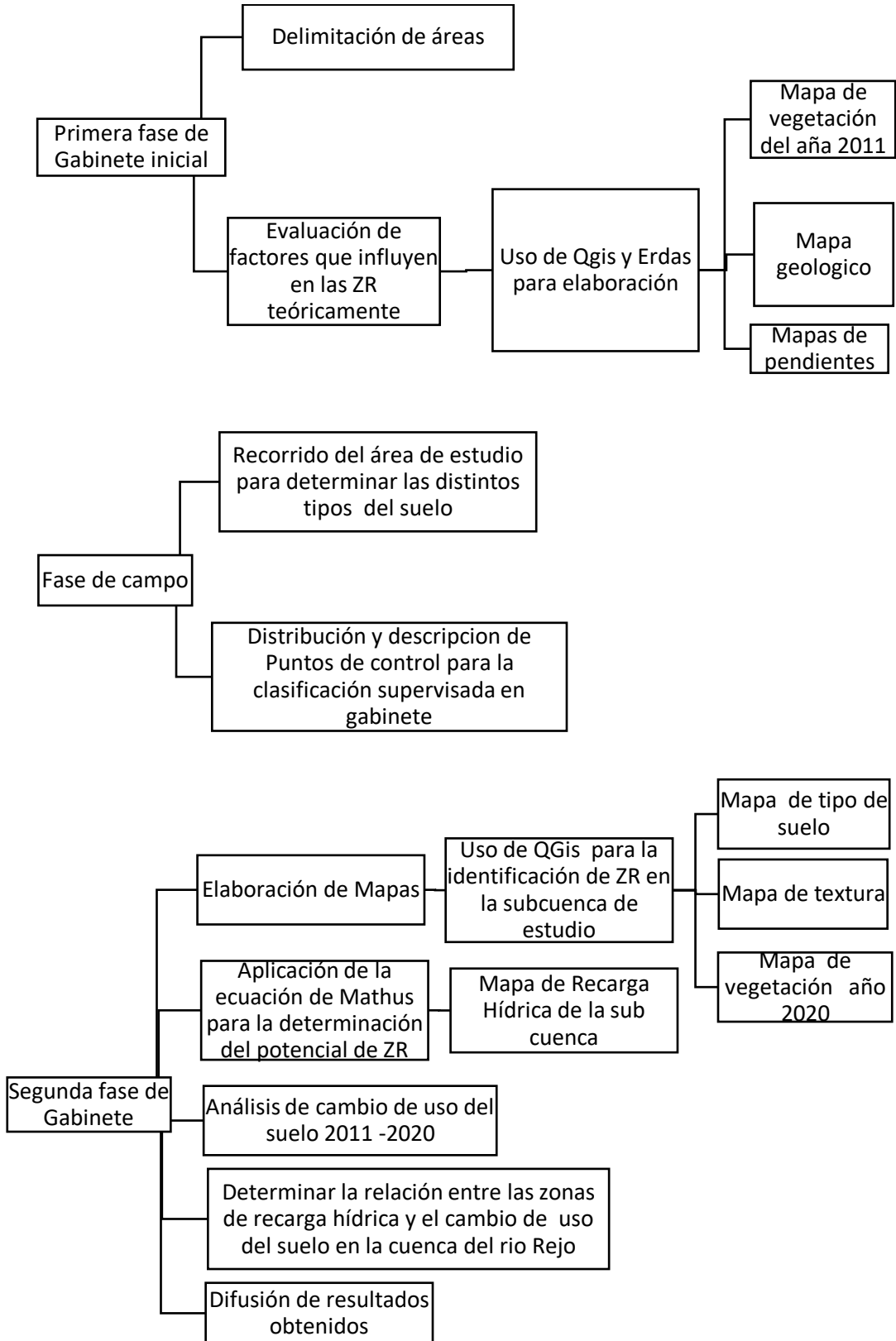
Posibilidades de Recarga Hídrica.

Posibilidad de Recarga Hídrica	Rango (adimensional)
Muy alta	4,1-5
Alta	3,5 – 4,
Moderada	2,6 – 3,49
Baja	2 – 2,59
Muy baja	1 – 1,99

Fuente: Matus, 2009

Figura 6.

Esquema metodológico



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Cambio de uso del suelo en la cuenca del río Rejo.

Se identificó el uso del suelo para el año 2011 y 2020 y se clasificó las coberturas y usos del suelo, encontrando 7 tipos de cobertura utilizando la metodología propuesta por el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2014), Corine Land Cover (Coordination of information of the Environment) adaptada para Perú.

Figura 7.

Uso de suelo de la cuenca del río Rejo para el año 2011

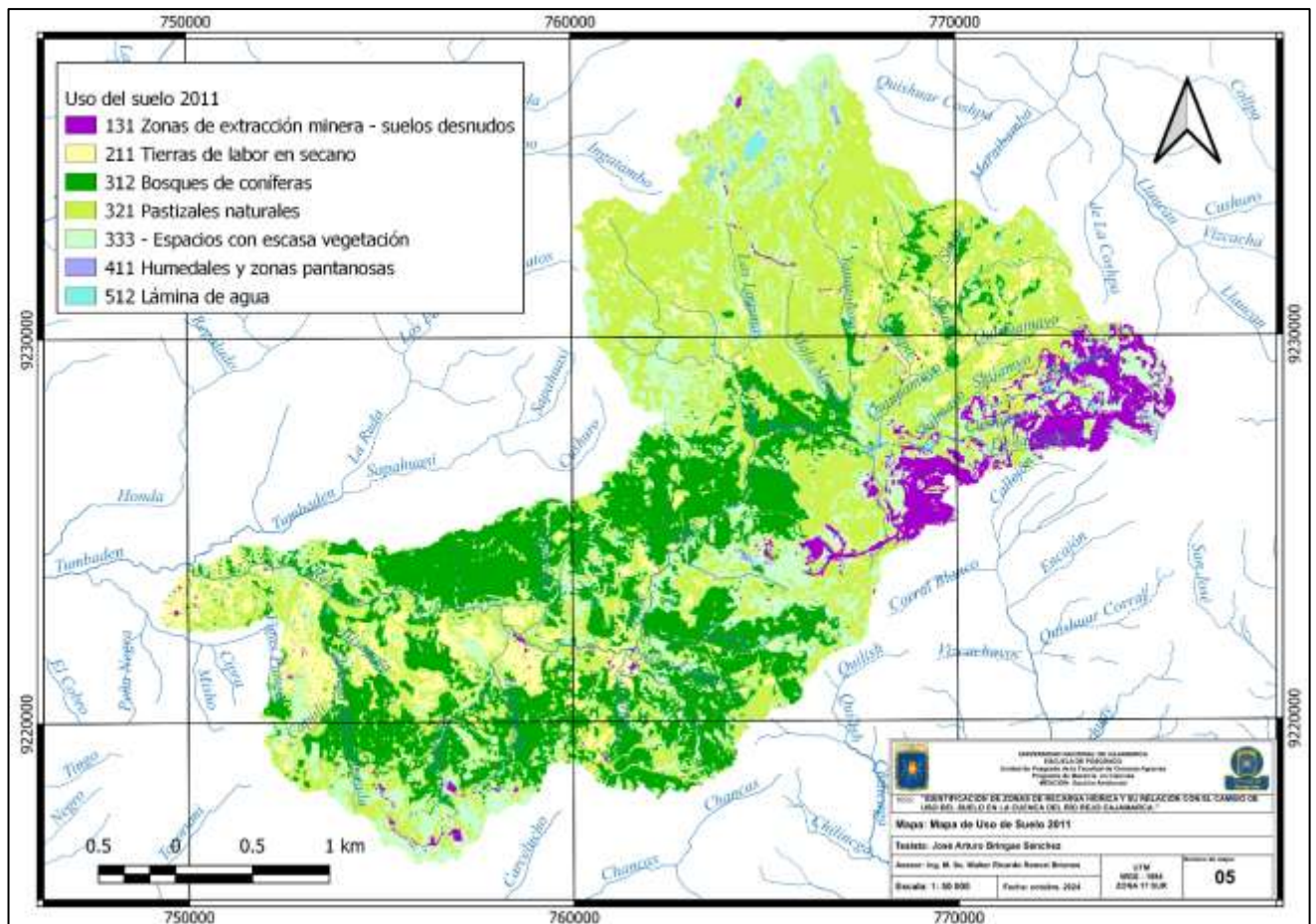
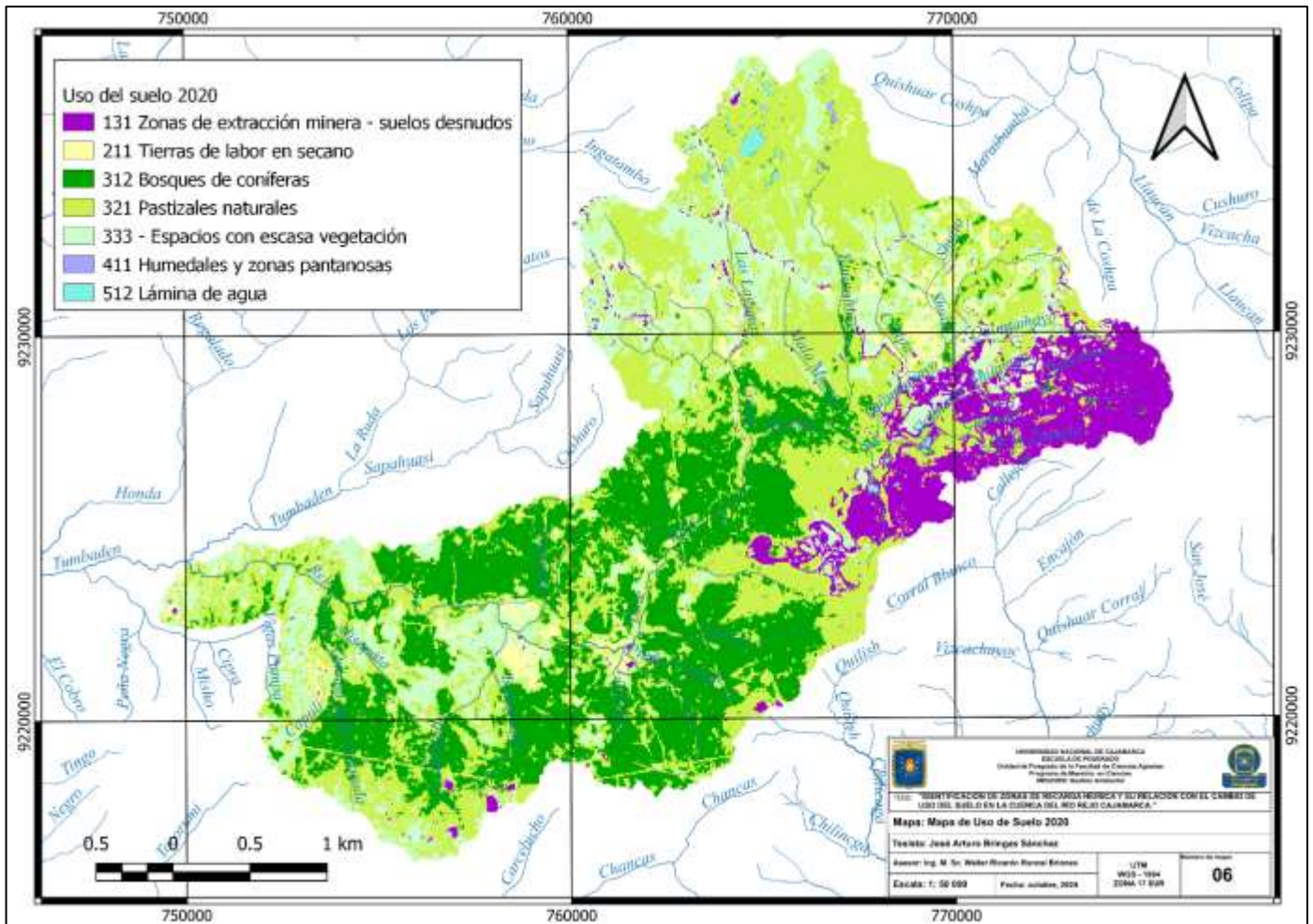


Figura 8.

Uso de suelo de la cuenca del río Rejo para el año 2020



Los resultados mostrados en la figura 7 y 8 permitieron generar el análisis correspondiente a las variaciones en la dinámica de uso del suelo con respecto a los periodos estudiados. A partir de las clasificaciones y categorizaciones generadas para cada lapso de tiempo (2011 y 2020) se evaluaron los cambios significativos durante los periodos considerados para la presente investigación.

Tabla 8*Zonas de cambio de uso de suelo en los periodos 2011 y 2020.*

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	2011		2020		Diferencia de Área (ha)	D (%)
		ha	%	ha	%		
131	Áreas de extracción de minería e hidrocarburos	1,112.38	4.93%	2,145.76	9.51%	1,033.38	92.9
211	Cultivos Transitorios	1,793.65	7.95%	977.95	4.33%	-815.7	-45.48
321	Plantación forestal	5,727.12	25.38%	6,044.76	26.79%	317.64	5.55
331	Herbazal	8,526.33	37.79%	9,108.52	40.37%	582.19	6.83
333	Vegetación secundaria o transición	5,222.85	23.15%	4,169.77	18.48%	-1,053.08	-20.16
411	Áreas pantanosas	103.48	0.46%	51.65	0.23%	-51.83	-50.09
512	Lagunas, lagos y ciénagas naturales	79.28	0.35%	66.68	0.30%	-12.6	-15.89
	Total	22,565.09	100.00%	22,565.09	100.00%	-	-

De la tabla 8 se aprecian las siguientes zonas de cambios de uso de suelo en los periodos (2011 -2020)

Áreas de Minería e Hidrocarburos

Esta zona experimentó un aumento significativo en su uso, pasando de 1,112.38 hectáreas en 2011 a 2,145.76 hectáreas en 2020, lo que representa un aumento del 92.90% en la superficie afectada. Este aumento es debido a la expansión de la actividad extractiva de Minera Yanacocha que está asentada en la parte alta de la cuenca, la misma que se describe en Primer Informe Técnico Sustentatorio de la II Modificación del Estudio de Impacto Ambiental Yanacocha (Fajardo y Torres, 2022).

Cultivos Transitorios

Esta zona de “Cultivos Transitorios” experimentó una disminución significativa, pasando de 1,793.65 hectáreas en 2011 a 977.95 hectáreas en 2020, lo que representa un declive del 45.48% en la superficie afectada. Este declive está relacionado con la

disminución de la producción agrícola en la región y cambios en las prácticas agrícolas, Según datos del INEI, el sector agropecuario en Cajamarca se contrajo 3,6% durante el 2020, mientras que el agro a nivel nacional registró un crecimiento positivo 0,8%. Si bien la producción agropecuaria de la región logró recuperarse en 2021, creciendo 2,2% respecto a 2019, el impacto de la pandemia pudo haber afectado la superficie cultivada en los años siguientes. Los principales cultivos identificados en la zona de estudio son cebada y trigo ocupan las laderas al secano con una cosecha por año; el maíz y la papa ocupan los mejores suelos, generalmente bajo riego.

Que existan hectáreas que no son trabajadas, principalmente por limitado acceso a agua, no necesariamente se debe a una oferta hídrica reducida, sino posiblemente a una deficiente gestión de los recursos hídricos. Dicha razón se refleja en el uso de la superficie agrícola, sea por secano o riego. Mientras que la agricultura de secano depende de las lluvias, siendo muy vulnerable a cambios meteorológicos (limitando la actividad agrícola), la agricultura de riego tiene un suministro de agua asegurado y también es más productiva (Banco Mundial, 2020).

Plantación Forestal

La zona de “Plantación Forestal” experimentó un aumento moderado, pasando de 5,727.12 hectáreas en el año 2011 a 6,044.76 hectáreas en el año 2020. Esto representa un aumento del 5.55% en la superficie afectada, Estos aumentos está relacionado con la actividad forestal impulsado por el gobierno regional con el proyecto “REFORESTACIÓN EN LAS ZONAS ALTOANDINAS DE LAS PROVINCIAS DE SAN PABLO Y SAN MIGUEL, CAJAMARCA”, (Código SNIP: 156230) la meta propuesta para este proyecto que es la siembra de 1´650,000 plántones (pino y aliso) en 1,500 hectáreas, lo cual implica

un monto de inversión de 3'984,254.65 nuevos soles. (Gobierno Regional Cajamarca, 2013)

Herbazal

La zona de “Herbazal” experimentó un aumento aún más significativo, pasando de 8,526.33 hectáreas en el año 2011 a 9,108.52 hectáreas en el año 2020. Esto representa un aumento del 6.83% en la superficie afectada. Este aumento en el área de herbazal se debe principalmente a la expansión de la actividad ganadera, el abandono de tierras de cultivo, la degradación de ecosistemas naturales y posibles cambios en las prácticas de manejo del suelo en la región, en la zonas de estudio la principal especies herbácea identificada es el ichu (*Stipa ichu*).

La región Cajamarca se caracteriza por tener una importante actividad ganadera, principalmente de ganado vacuno y ovino. Según datos del Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), la población ganadera en Cajamarca se ha incrementado en los últimos años, lo que ha conllevado a una mayor demanda de pastos naturales y tierras de pastoreo (MINAGRI, 2022).

Vegetación Secundaria o Transición

La zona de “Vegetación Secundaria o Transición” experimentó una disminución significativa, pasando de 5,222.85 hectáreas en el año 2011 a 4,169.77 hectáreas al en el año 2020. Esto representa un declive del 20.16% en la superficie afectada. La disminución de la vegetación secundaria o transición se debe principalmente a la expansión de la actividad minera, la conversión a otros usos de suelo húmedales por actividades antrópicas y posiblemente a la interrupción de los procesos naturales de regeneración,

Entre 2001 y 2021, Perú ha experimentado la pérdida de 5,4 millones de hectáreas de su vegetación natural, según datos de MapBiomias Perú. En 2021, se contabilizaron 3 millones de hectáreas de vegetación secundaria. Los biomas más perjudicados fueron la Amazonía y los Andes, que representaron el 53 % y el 42 % de la pérdida total, respectivamente (Instituto del Bien Común, 2024).

Áreas Pantanosas

La zona de “Áreas Pantanosas” experimentó la disminución más significativa, pasando de 103.48 hectáreas en 2011 a 51.65 hectáreas en 2020, representando un 50.09% de disminución de esta área, la pérdida de la superficie de áreas pantanosas en la cuenca se debe principalmente a la expansión de la actividad minera, los cambios en el uso del suelo, el drenaje y desecación de humedales por actividades antrópicas como la agricultura y ganadería así como los impactos del cambio climático y la falta de políticas de conservación adecuadas en la región.

Lagunas, Lagos y Ciénagas Naturales

La zona de “Lagunas, Lagos y Ciénagas Naturales” experimentó un declive moderado, pasando de 79.28 hectáreas en 2011 a 66.68 hectáreas en 2020. Esto representa un declive del 15.89% en la superficie afectada, el declive de la superficie de lagunas, lagos y ciénagas naturales en la cuenca se debe principalmente a la expansión de la actividad minera e hidrocarburífera, los cambios en el uso del suelo y posibles variaciones en los regímenes hidrológicos, así como a procesos de contaminación y sedimentación que podrían estar afectando a estos ecosistemas acuáticos.

En la presente investigación la disminución en la superficie de cultivos transitorios y la disminución en la superficie de vegetación secundaria o transición son resultado de la

expansión de la actividad minera, y según los autores Nutini et. al (2013), la expansión de la extracción de minería puede ser una causa importante de la disminución de la superficie de vegetación secundaria o transición.

Los autores Biazin y Sterk (2013), comentan que la vulnerabilidad a la sequía puede impulsar los cambios en el uso y la cobertura del suelo. Además, los autores Findell et. al (2017) señalan que el cambio en el uso y la cobertura del suelo pueden tener un impacto significativo en los extremos climáticos regionales.

La disminución en la superficie de áreas pantanosas y lagunas, lagos y ciénagas naturales es el resultado de la expansión urbana, agrícola y pastoreo, así como los incendios forestales y la expansión de la minería. Estas actividades implican la alteración o destrucción de los ecosistemas acuáticos y la conversión de áreas naturales en áreas urbanas (Mercado-García et al., 2023)

Es difícil predecir si estas tendencias continuarán en el futuro, ya que dependen de muchos factores, incluidos los cambios en las políticas gubernamentales y las condiciones económicas. Sin embargo, es importante monitorear la cobertura del suelo y las tendencias de cambio para comprender mejor los impactos ambientales y sociales de la actividad humana en la región de Cajamarca.

4.2. Identificación de recarga hídrica en la cuenca del río Rejo.

Para la identificación de zonas de recarga hídrica el estudio se basó en la ecuación propuesta por Matus (2009), adaptándola a nuestra región, se ponderó según la ecuación los principales factores (Pendiente, Textura, Geología, tipo de suelo, Uso del Suelo) elementos que intervienen en la recarga hídrica:

4.2.1 Ponderación de los factores que intervienen en la recarga hídrica

a) Pendiente

Figura 9.

Ponderación de pendientes en la cuenca del río Rejo

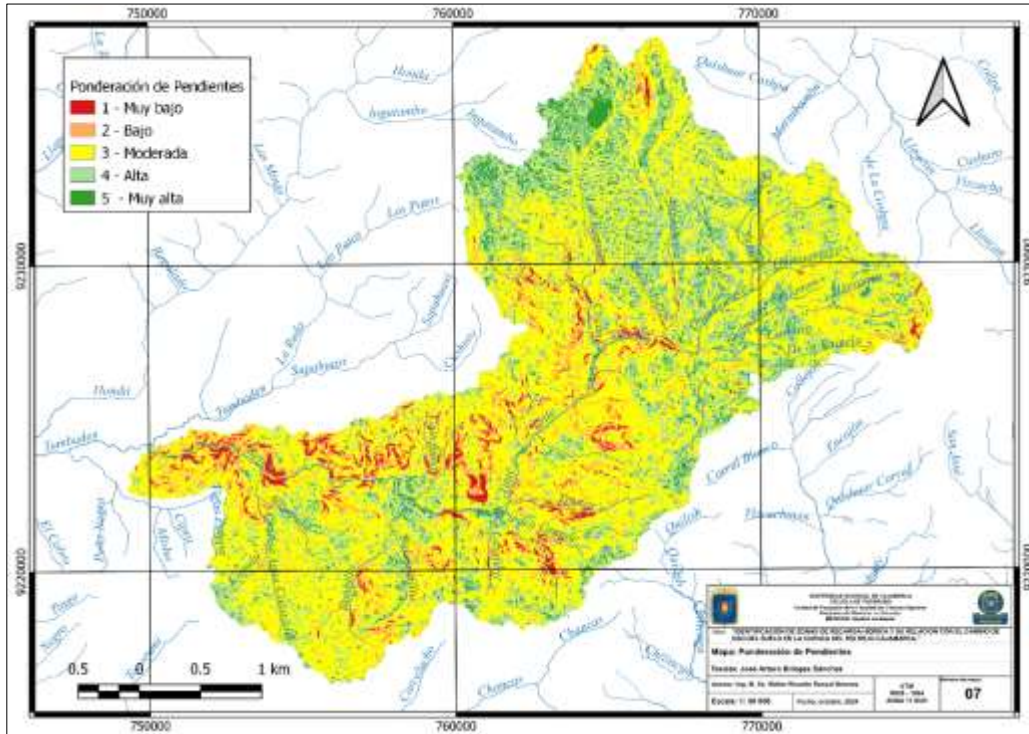


Tabla 9

Ponderación de pendientes en la cuenca del río Rejo.

Pendiente Identificada (%)	Ponderación	Área (ha)	%
Mayor a 65%	5 (Muy alta)	617.37	2.74
45 – 65	4 (Alta)	1,992.38	8.83
15 – 45	3 (Moderada)	12,695.45	56.26
6 – 15	2 (Baja)	5,761.98	25.53
0 – 6	1 (Muy baja)	1,497.91	6.64
Total		22,565.09	100.00

En la figura 9 y en la tabla 9 tenemos la distribución de las áreas de Ponderación de pendientes de la cuenca del río Rejo.

En total, se presentan 22,565.09 hectáreas de áreas que se distribuyen en los cinco rangos, (Muy alta, Alta, Moderada, Baja y Muy baja) teniendo la mayor cantidad de hectáreas en él se ubicaron en el rango "Moderada" posibilidades de Recarga Hídrica respecto a al pendiente con 12,695.45 hectáreas, lo que representa el 56.26% del total de la cuenca.

Esto indica que la cuenca del río Rejo, en su mayoría de hectáreas, presenta pendientes en el rango de "moderada", lo cual se respalda con el estudio de Pérez y Rodríguez (2014), que destaca que la pendiente del terreno juega un papel crucial en la determinación de las áreas de recarga hídrica, ya que influye en la infiltración del agua en el suelo y, por ende, en la recarga de los acuíferos. Según Hernández-Juárez et. al (2020), el mayor potencial de recarga se encuentra en las pendientes moderadamente inclinadas e inclinadas, debido a que estas superficies permiten una mayor distribución espacial del flujo superficial. En cambio, en las pendientes escarpadas, el flujo se concentra hacia los arroyos. Las pendientes ligeramente inclinadas y planas, por su parte, se asocian con zonas de acumulación y descarga.

b) Textura

Figura 10.

Ponderación del suelo por textura en la cuenca del río Rejo

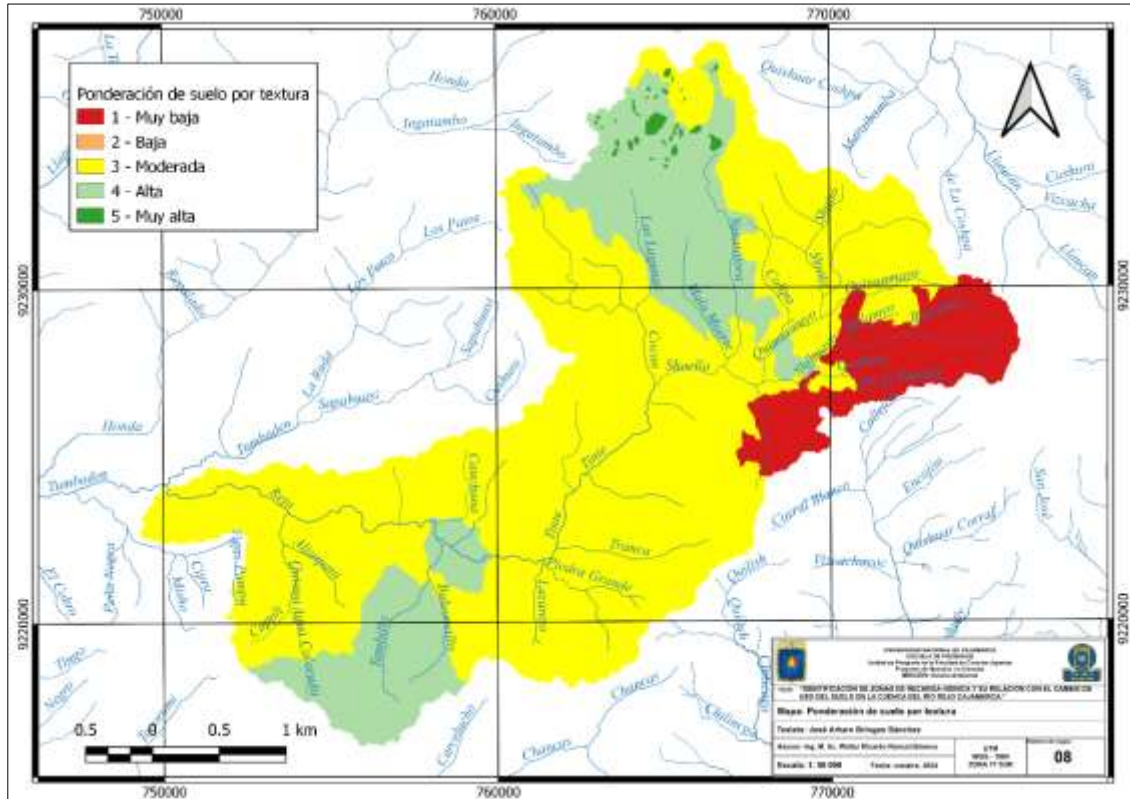


Tabla 10

Ponderación del suelo por textura en la cuenca del río Rejo.

Textura Identificada	Ponderación	Área (ha)	%
Láminas cuerpos de agua	5 (Muy alta)	97.84	0.43
Moderada gruesa	4 (Alta)	4,745.01	21.03
Franco arenoso	3 (Moderada)	15,786.92	69.96
-	2 (Baja)	0.00	0.00
Zonas de extracción minera	1 (Muy baja)	1,935.32	8.58
Total		22565.09	100.00

* No se identificó textura para la ponderación 2 (baja)

En la figura 10 y en la tabla 10 tenemos la distribución de las áreas de ponderación de textura en la cuenca del río Rejo, podemos observar que el rango con mayor porcentaje de áreas es el de " Moderada ", con un 69.96% del total, seguido del rango "Alta" con un 21.03% y el rango "Muy baja" con un 8.58%. El rango "Muy alta" tiene el menor porcentaje de áreas, con solo un 0.43%.

Esto indica que la mayoría de las hectáreas de la cuenca del rio rejo presentan una textura en el rango de “moderada”, lo cual se refuerza al considerar la importancia de la textura del suelo en la recarga hídrica, un tema ampliamente estudiado por diversos autores. Según Custodio y Llamas (2001), la textura del suelo influye tanto por sí misma como por su efecto en la estabilidad de la estructura del terreno. A mayor proporción de materiales finos, como limos y arcillas, el suelo es más susceptible a la disgregación y arrastre de estos materiales por el agua, lo que puede ocasionar el llenado de poros más profundos. La estructura del suelo determina el tamaño de los poros: la presencia de poros grandes reduce la tensión capilar, pero facilita directamente la infiltración del agua. Por su parte, Pinzón y Alfonso (2020) señalan que la textura del suelo juega un papel crucial en la recarga de acuíferos, ya que la velocidad de infiltración, la percolación y la permeabilidad dependen del tamaño y número de los poros.

c) Geología

Figura 11.

Ponderación de geología en la cuenca del río Rejo

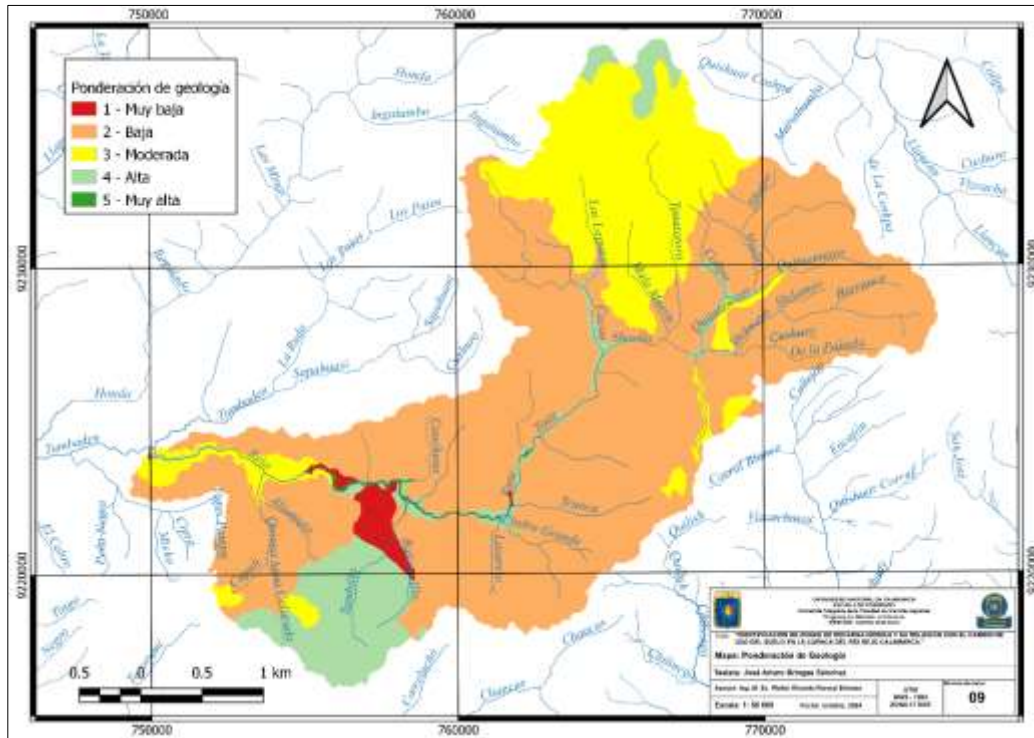


Tabla 11

Ponderación de geología en la cuenca del río Rejo.

Geología identificada	Ponderación	Área (ha)	%
Grava, arena, limo	5 (Muy alta)	79.12	0.35
Arena, limo Arenisca cuarzosa, Limoarcillita	4 (Alta)	2,182.39	9.67
Limoarcillita, arenisca Andesita, bloque, ceniza, toba de ceniza Bloque, grava, arena Grava, bloque Pórfido andesítico Volcanoclástica, toba de ceniza	3 (Moderada)	4,492.15	19.91

Andesita Bloque Bloque, ceniza Dacita Toba de ceniza, bloque, ceniza	2 (Baja)	15,480.01	68.60
Toba vítrea Toba vítrea, bloque, ceniza Unidad centro volcánico Yanacocha Alteración hidrotermal			
Caliza, lutita	1 (Muy baja)	331.42	1.47
Total		22,565.09	100.00

En la figura 11 y en la tabla 11 tenemos la distribución de las áreas de ponderación de geología con posibilidades de recarga hídrica de la cuenca del río Rejo, en este caso, podemos observar que el rango con mayor porcentaje de áreas es el de "Baja", con un 68.60% del total, seguido del rango " Moderada " con un 19.91% y el rango "Alta" con un 9.67%. El rango "Muy baja" tiene un porcentaje de solo un 1.47% y el rango "Muy alta" tiene el menor porcentaje de áreas, con solo un 0.35%.

La mayoría de las hectáreas de la cuenca del río Rejo presentan una geología con rango de "Baja", lo cual se refuerza al considerar la importancia de la geología en la recarga hídrica, tema que ha sido explorado por varios investigadores. Un estudio de la estratigrafía de la zona permite conocer la disposición de los diferentes materiales geológicos, ya que estos pueden influir significativamente en la cantidad de agua recargada (Orozco, 2003).

Es crucial realizar un estudio detallado de la estratigrafía de la zona, ya que la disposición de los materiales geológicos puede afectar de manera significativa la cantidad de recarga hídrica. Por ejemplo, puede existir una cuenca cuyas características climáticas,

edáficas y de cobertura vegetal favorezcan la infiltración de agua, pero si hay una capa impermeable, esta impedirá que el agua alcance mayores profundidades, generando un flujo subsuperficial que alimentará un cauce cercano o dará lugar a manantiales (Padilla, 2003).

d) Tipo de suelo

Figura 12.

Ponderación por tipo de suelo en la cuenca del río Rejo

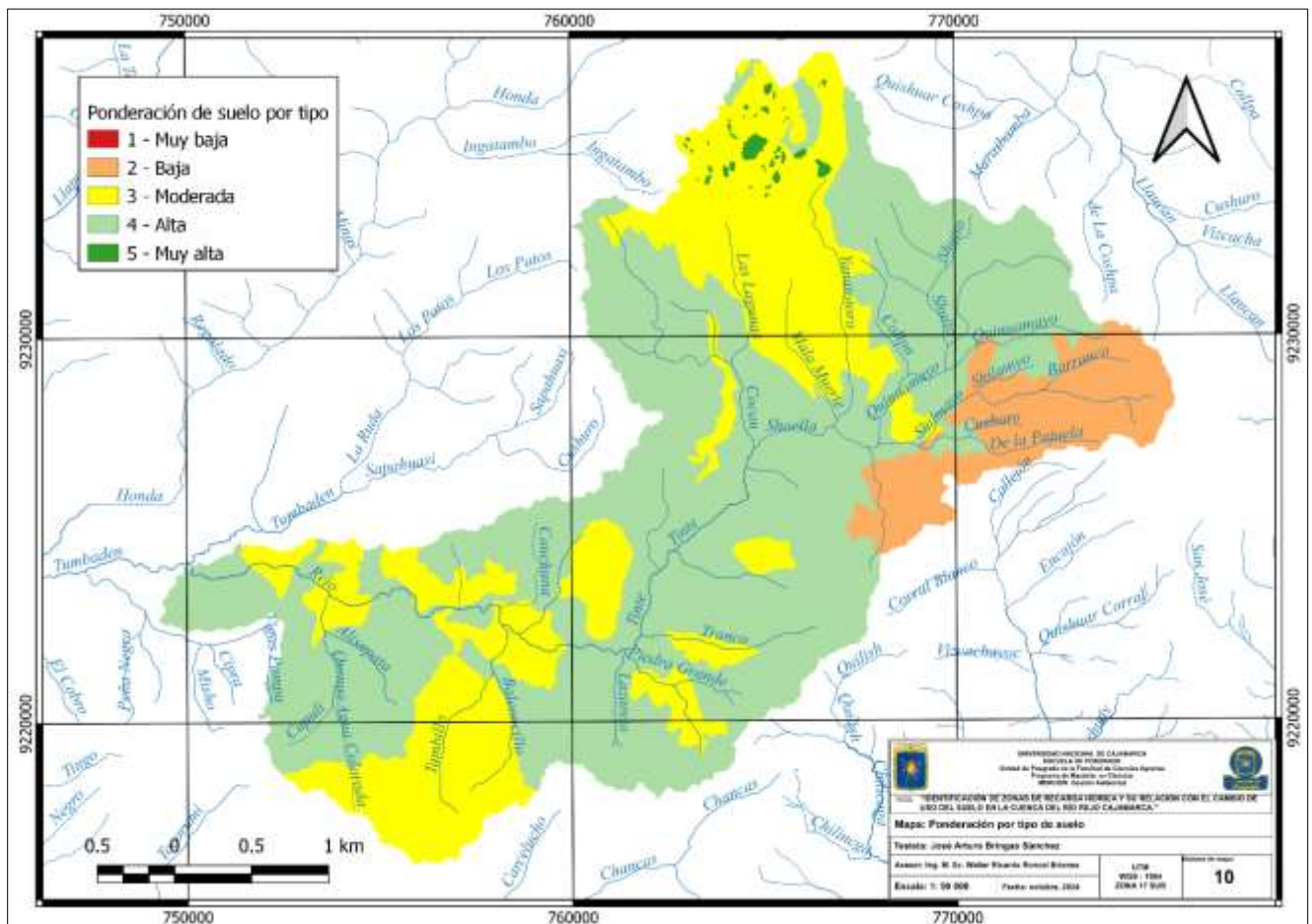


Tabla 12*Ponderación por tipo de suelo en la cuenca del río Rejo.*

Tipo de suelo identificada	Ponderación	Área (ha)	%
(Láminas cuerpos de agua) Andosol/C, Andosol/D, Andosol/E , Andosol/F, Paramo andosol/C, Paramo andosol/D, Paramo andosol/E	5 (Muy alta)	97.20	0.43
Leptosol/B, Leptosol/C, Leptosol/D, Leptosol/E, Leptosol/F, Regosol/B, Regosol/C, Regosol/D,Regosol /E	4 (Alta)	13,793.92	61.13
Misceláneo mina/A, Misceláneo mina/B , Misceláneo mina/C , Misceláneo mina/D, Misceláneo mina/E	3 (Moderada)	6,739.01	29.86
	2 (Baja)	1,934.96	8.58
	1 (Muy baja)	0.00	0.00
	Total	22,565.09	100

* No se identificó tipo de suelo para la ponderación 1 (Muy baja)

En la figura 12 y en la tabla 12 tenemos la distribución de las áreas de ponderación de “tipo de suelo” de la cuenca del río Rejo, en este caso podemos observar que el rango con mayor porcentaje de áreas es el de "Alta", con un 61.13% del total, seguido del rango " Moderada " con un 29.86% y el rango "Baja" con un 8.58%. El rango "Muy baja" tiene un porcentaje de 0.00% y el rango "Muy alta" tiene el menor porcentaje de áreas, con solo un 0.43%.

La mayoría de las hectáreas en la cuenca del río Rejo presentan un tipo de suelo clasificado en el rango de “Alta”. La relevancia del tipo de suelo en la recarga hídrica ha sido ampliamente respaldada en la literatura científica. Nolan et al. (2007) indican que la capacidad de infiltración del suelo está estrechamente vinculada a su porosidad, tamaño de partículas y estado de fisuramiento; cuanto mayor sean estas características, mayor será la capacidad de infiltración. De igual manera, Castiglioni et al. (2006) enfatizan que la infiltración del agua está influenciada significativamente por el tipo de suelo, lo que hace necesario realizar evaluaciones detalladas de sus propiedades.

e) Uso del Suelo 2011

Figura13.

Ponderación de cobertura del suelo del año 2011 de la cuenca del río Rejo

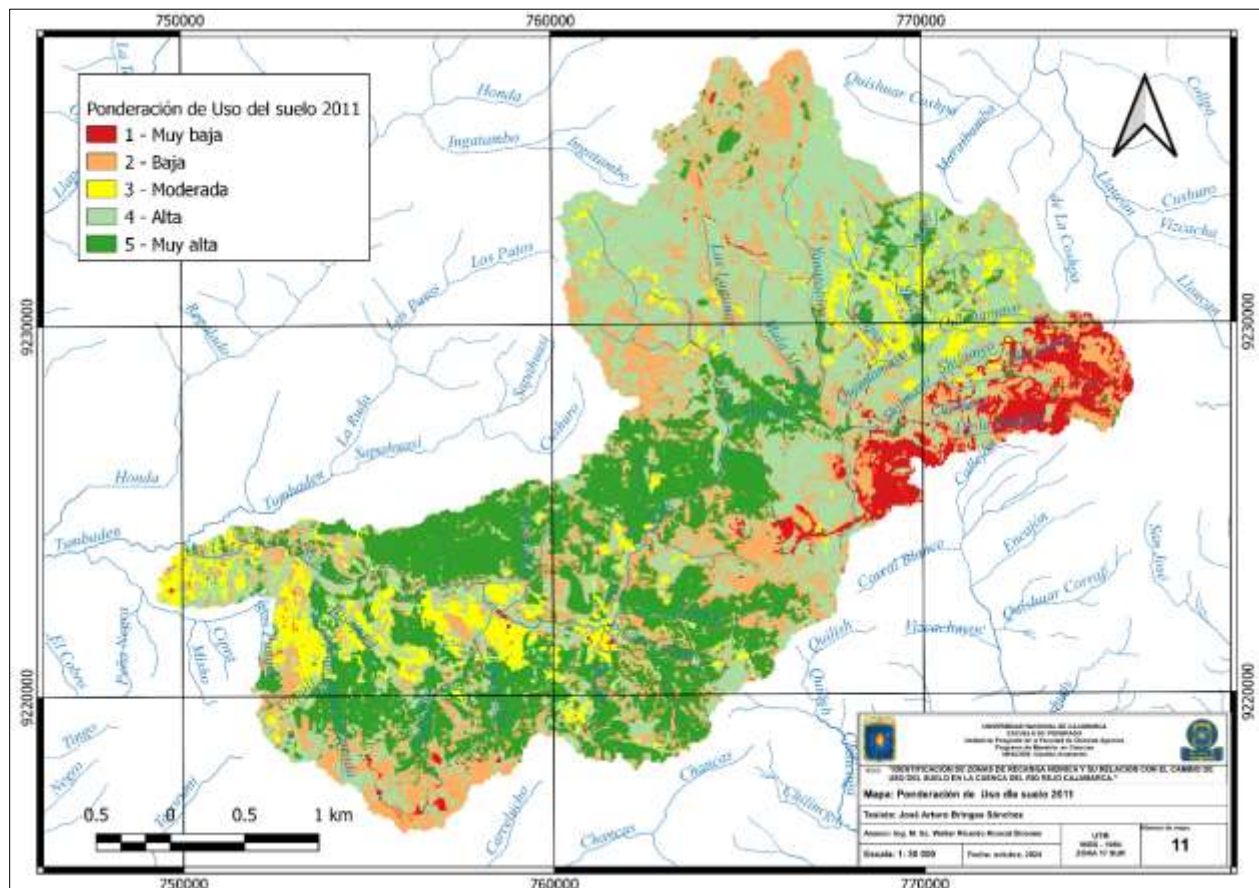


Tabla 13

Ponderación de cobertura del suelo del año 2011 de la cuenca del río Rejo.

Uso de suelo identificado	Ponderación	Área (ha)	%
Láminas (cuerpos) de agua; humedales y zonas pantanosas; bosques de coníferas	5 (Muy alta)	5,899.28	26.14
Pastizales	4 (Alta)	8,542.94	37.86
Tierras de labor en seco	3 (Moderada)	1,791.64	7.94
Espacios con escasa vegetación	2 (Baja)	5,226.23	23.16
Zonas de extracción minera – suelos desnudos	1 (Muy baja)	1,105.00	4.90
	Total	22565.09	100.00

En la figura 13 y en la tabla 13 tenemos la distribución de las áreas de Ponderación de cobertura del suelo del 2011 de la cuenca del río Rejo, en este caso, podemos observar que el rango con mayor porcentaje de áreas es el de “Alta”, con un 37.86% del total, seguido del rango “Muy alta” con un 26.14%, el rango “Baja” con un 23.16%, el rango “Moderada” con un 7.94% y el rango “Muy baja” con un 4.90%.

En comparación con los otros cuadros que hemos analizado previamente, podemos notar que hay una variación considerable en la distribución de áreas. En este caso, el rango “Alta” tiene un porcentaje mayor que en los otros cuadros, asimismo el rango "Muy alta" tiene un porcentaje mayor que en algunos de los otros cuadros y el rango "Baja" mantiene un porcentaje similar.

La consideración del uso del suelo en la gestión de los recursos hídricos es esencial, ya que diversas actividades antropogénicas, como el urbanismo, la deforestación y la expansión de la frontera agrícola, han generado efectos potencialmente negativos en la dinámica de la recarga hídrica durante siglos (Donis, 2015).

f) **Uso del Suelo años 2020**

Figura 14.

Ponderación de cobertura del suelo años 2020 de la cuenca del río Rejo

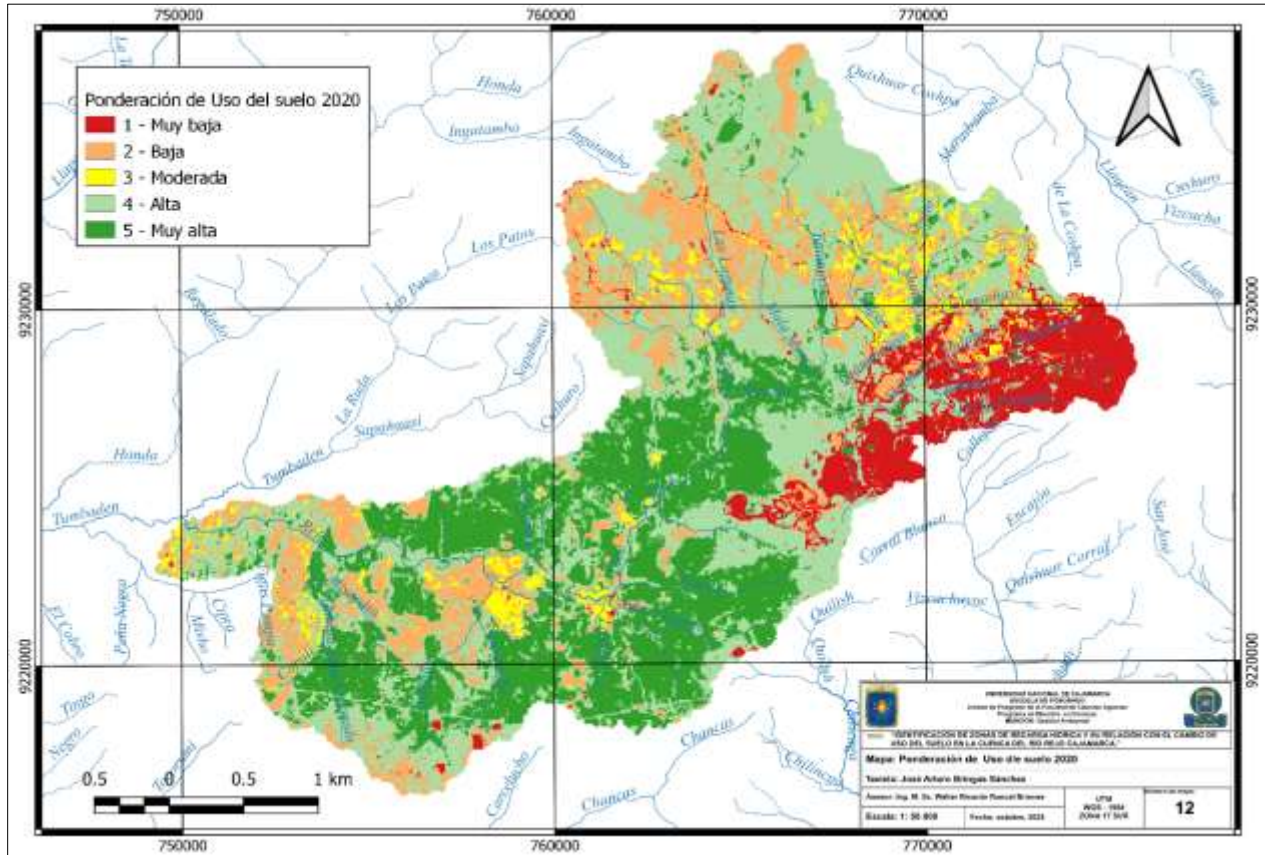


Tabla 14

Ponderación de cobertura del suelo del 2020 de la cuenca del río Rejo.

Uso del suelo identificado	Ponderación	Área (Ha)	%
- Láminas (cuerpos) de agua; humedales y zonas pantanosas; bosques de coníferas	5 (Muy alta)	6,152.36	27.26
- Pastizales	4 (Alta)	9,117.72	40.41
- Tierras de labor en secano	3 (Moderada)	969.81	4.30
- Espacios con escasa vegetación	2 (Baja)	4,177.98	18.52
- Zonas de extracción minera – suelos desnudos	1 (Muy baja)	2,147.22	9.52
Total		22565.09	100.00

En la Figura 14 y la Tabla 14 se presenta la distribución de las áreas de ponderación de cobertura del suelo en 2020 para la cuenca del río Rejo. En este análisis, se observa que el rango con mayor porcentaje de áreas corresponde a “Alta” con un 40.41%, seguido de “Muy alta” con un 27.26%, “Baja” con un 18.52%, “Muy baja” con un 9.52% y “Moderada” con un 4.30%. Comparado con los cuadros anteriores, se aprecia una variación significativa: el rango “Alta” muestra un incremento porcentual en relación con algunos cuadros previos, mientras que el rango "Muy alta" presenta un porcentaje estable en comparación con otros, y los rangos “Baja” y “Muy baja” disminuyen ligeramente. El rango “Moderada” posee el porcentaje más bajo en esta distribución.

El uso del suelo es un factor determinante en la recarga hídrica, ya que influye directamente en la cantidad de agua que puede infiltrarse hacia los acuíferos según Kaur et al. (2020) Las áreas geográficas bajo cuerpos de agua, agricultura y bosque o vegetación tienen un mayor potencial de recarga de agua subterránea que los asentamientos o áreas impermeables y el área debajo de terrenos baldíos

4.2.2 Zonas de recarga hídrica en la cuenca del río Rejo.

Como resultado de la aplicación de la ecuación propuesta por Matus (2008) se tienen los siguientes resultados donde se utilizaron los factores: Pendiente, Textura, Geología, tipo de suelo y Uso del Suelo.

a) Recarga hídrica para el año 2011.

Figura 15.

Recarga hídrica año 2011 en la cuenca del río Rejo

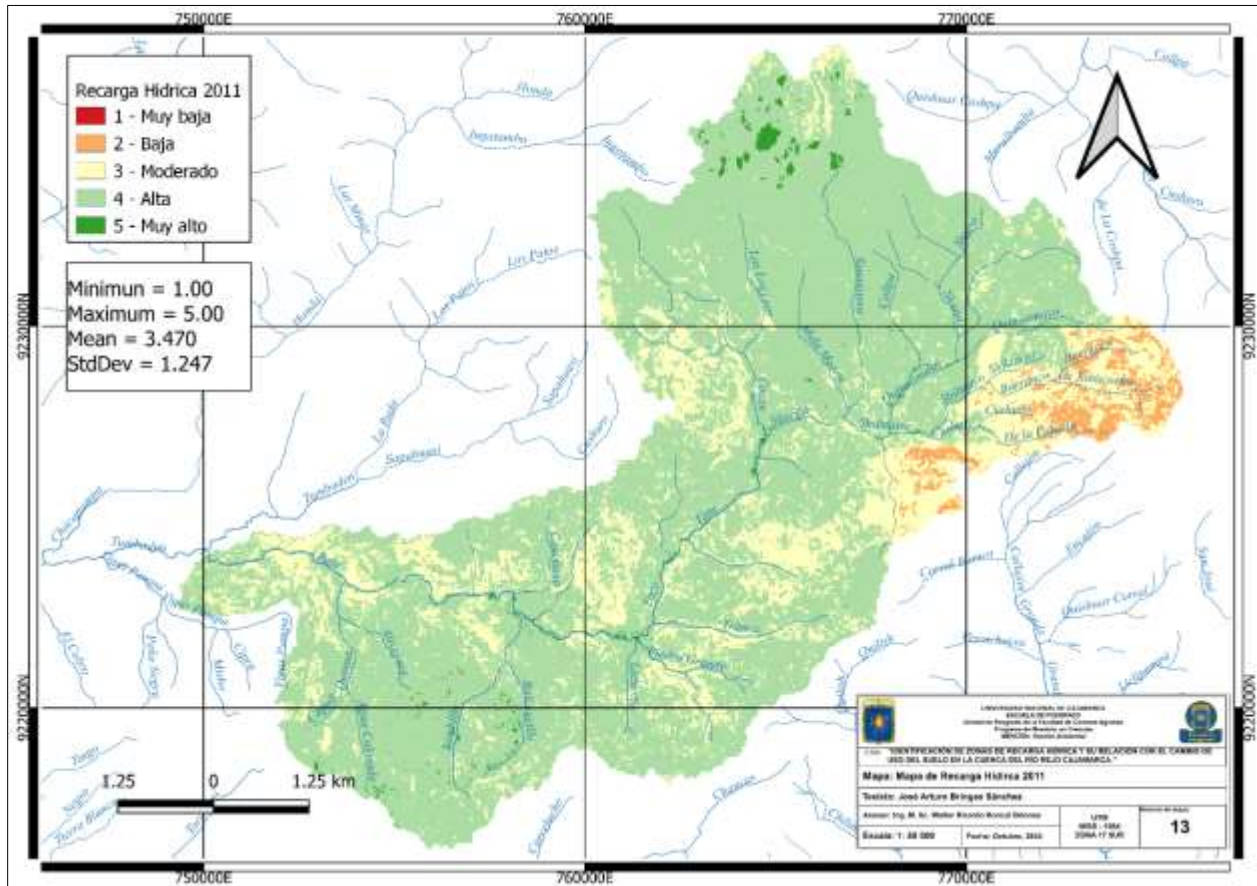


Tabla 15

Áreas de recarga para el año 2011 en la cuenca del río Rejo.

Posibilidad de recarga	Área (ha)	%
Muy baja	6.24	0.03
Baja	1,928.64	8.55
Moderada	15,251.03	67.59
Alta	5,342.81	23.68
Muy alta	36.37	0.16
Total	22,565.09	100.00

En la Figura 15 y la Tabla 15 se presenta la recarga hídrica estimada para el año 2011 en la cuenca del río Rejo. A partir de la aplicación de la ecuación propuesta por Matus (2008) y su interpretación con base en la Tabla N° 07, se identificaron las principales áreas de recarga, distribuidas en toda la cuenca. En el este se evidencia una posibilidad de recarga "Baja", que se extiende hacia el centro de la cuenca. En el centro y sureste predomina el rango de recarga "Moderada", mientras que el rango "Alta" se observa principalmente en el centro y oeste. Por último, las áreas con posibilidad de recarga "Muy Alta" se encuentran de forma localizada en el norte.

El rango con mayor porcentaje de áreas corresponde a la posibilidad de recarga "Moderada", con un 67.59% del total, seguido por el rango "Alta", con un 23.68%. La media de la distribución es de 3.470, lo que indica que la mayoría de las áreas están concentradas en el rango "Moderada". La desviación estándar de 1.247 sugiere una variabilidad moderada en la distribución de áreas entre los diferentes rangos.

b) Recarga hídrica para el año 2020.

Figura 16.

Recarga hídrica año 2020 en la cuenca del río Rejo.

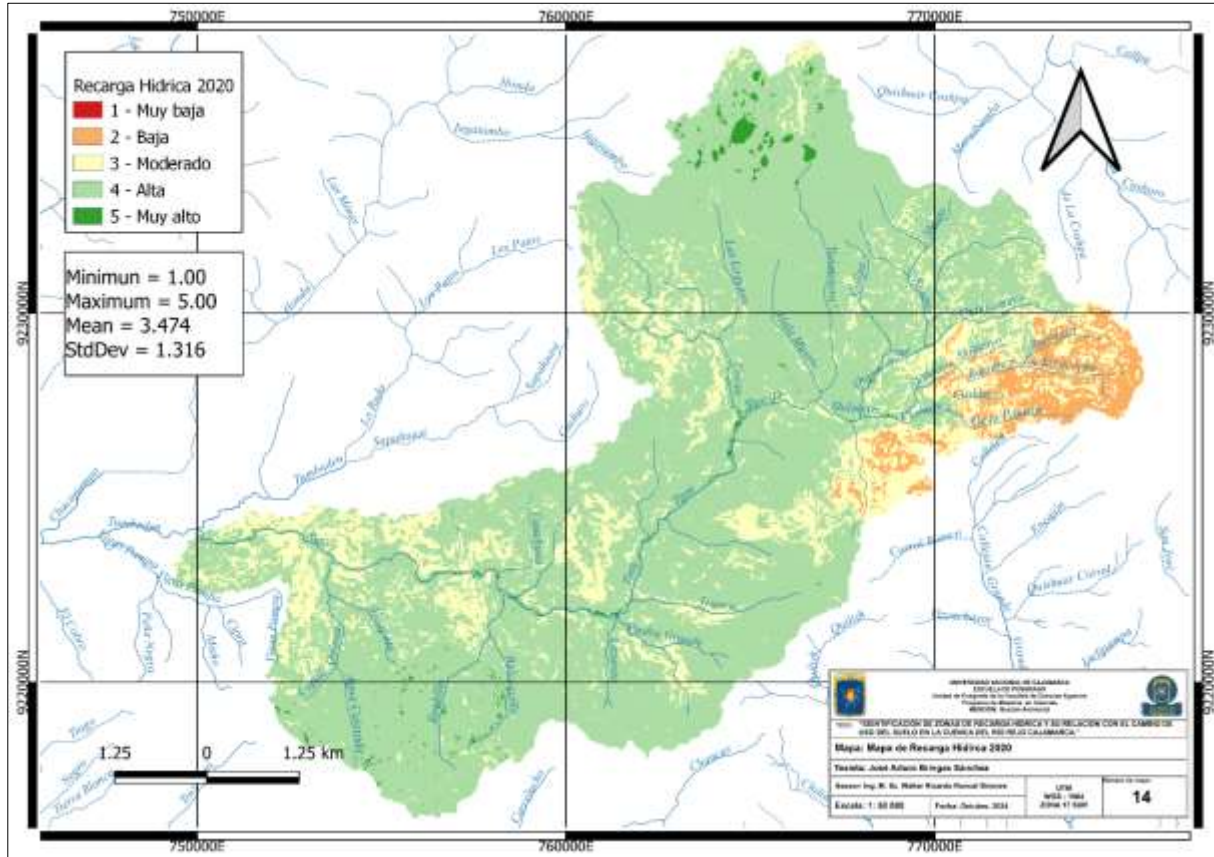


Tabla 16

Áreas de recarga hídrica para 2020 en la cuenca del río Rejo

Posibilidad de recarga	Área (ha)	%
Muy baja	18.99	0.08
Baja	1,931.33	8.56
Moderada	15,480.65	68.60
Alta	5,090.94	22.56
Muy alta	43.18	0.19
Total	22,565.09	100.00

En la Figura 16 y la Tabla 16 se presenta la estimación de la recarga hídrica correspondiente al año 2020 en la cuenca del río Rejo. A partir de la aplicación de la ecuación propuesta por Matus (2008), se identificaron las principales áreas de recarga, distribuidas a lo largo de la cuenca. En el este se observa una posibilidad de recarga "Baja", que se extiende hacia el centro-este. En la zona centro-sur y en áreas dispersas del norte predomina el rango "Moderada", abarcando una franja significativa de la cuenca. El rango "Alta" cubre gran parte del centro y oeste, mientras que el rango "Muy Alta" se localiza en pequeñas áreas del norte.

En el centro de la cuenca, la presencia de plantaciones forestales (Porcón) fomenta zonas de alta recarga. Estas cubiertas boscosas, durante su desarrollo, captan aproximadamente el 50% de las precipitaciones pluviales, lo que contribuye significativamente a mantener y regular los patrones hidrológicos (Villegas, 2004).

Los datos muestran que el rango de la recarga hídrica tiene un valor promedio de 3.474, basado en la interpretación de la Tabla N° 07, lo que indica que gran parte del área se clasifica como "Moderada". La desviación estándar de 1.316 refleja una dispersión moderada en la distribución de áreas entre los diferentes rangos. El rango con mayor porcentaje corresponde a la posibilidad de recarga "Moderada", con un 68.60%, seguido del rango "Alta", con un 22.56%.

4.3. Relación de las zonas de recarga hídrica identificadas con el cambio de uso del suelo.

Tabla 17.

Zonas de recarga hídrica y su relación con el cambio de uso del suelo en la cuenca del río Rejo.

Ponderación	2011		2020		Diferencia de Área	
	(ha)	%	(ha)		(ha)	D (%)
1 Muy baja	6.24	0.03	18.99	0.08	12.75	0.06%
2 Baja	1928.64	8.55	1931.33	8.56	2.69	0.01%
3 Media	15251.03	67.59	15480.65	68.60	229.62	1.02%
4 Alta	5342.81	23.68	5090.94	22.56	-251.87	-1.12%
5 Muy alta	36.37	0.16	43.18	0.19	6.81	0.03%
Total	22565.09		22565.09			

El análisis de la Tabla 17, que relaciona las zonas de recarga hídrica con el cambio de uso del suelo en la cuenca del río Rejo (según la Tabla 8), muestra lo siguiente:

La recarga “Muy Baja”

Aumentó de 6.24 ha en el año 2011 a 18.99 ha en el año 2020, lo que significa un incremento de 12.75 ha que representa el 67.1%. Este aumento tiene relación con la disminución de áreas que facilitan la infiltración (según la tabla 8) como: “Vegetación Secundaria o Transición” (-20.16%), “Área Pantanosas” (-50.09 %), “Lagunas, Lagos y Ciénagas Naturales” (-15.89 %); del mismo modo tiene relación con el aumento de áreas que no facilitan la infiltración como el área de “Extracción Minera” que creció un 92.90%, Las áreas con variaciones negativas coinciden con los resultados de estudios previos (Martínez-Garza et al., 2018; González-Sosa et al., 2020) que ha demostrado que la variaciones negativas pueden tener un impacto negativo en la recarga hídrica. Así también,

estas áreas corresponden principalmente a zonas con un alto nivel de erosión del suelo, lo cual es consistente con los resultados de estudios previos (Martínez-Garza et al., 2018; González-Sosa et al., 2020) que han demostrado que la erosión puede disminuir la capacidad de infiltración y, por lo tanto, la recarga hídrica.

La minería tiene impactos ambientales significativos, especialmente en la contaminación del agua. La actividad minera puede generar una gran descarga de material tóxico, partículas finas y gases contaminantes, lo que puede degradar el suelo y arriesgar la supervivencia de la biota que mantiene el equilibrio de los ecosistemas (Martínez, 2021).

Es importante señalar que la cuenca del río rejo cuenta con un dique construido por la empresa Minera Yanacocha SRL en la parte alta lo que ayuda a la retención de la sedimentación que arrastra las quebradas, producto de la erosión.

La recarga “Baja”

Aumentó ligeramente de 1,928.64 ha en el año 2011 a 1,931.33 ha en el año 2020, teniendo un incremento 2.69 ha que representa el 0.1%. En términos de recarga hídrica apenas han experimentado cambios en su cobertura, ya que la diferencia de área es muy pequeña. Esto puede indicar una estabilidad en la cobertura del suelo y la vegetación en estas áreas durante el período analizado.

La recarga “Moderada”

Aumentó de 15,251.03 ha en el año 2011 a 15,480.65 ha en el año 2020. En términos de recarga hídrica han experimentado un aumento del 229.62 ha que representa el 1.5% en su cobertura durante el período de tiempo entre 2011 y 2020. Este aumento tiene relación con las áreas que no han presentado grandes cambios; Plantación forestal (5.55%),

Herbazal (6.83 %), Aunque este aumento es relativamente pequeño, aún puede tener implicaciones para la recarga hídrica en estas áreas.

Según el estudio de González et. al (2016), la variabilidad en las zonas de recarga hídrica de una cuenca hidrográfica puede estar influenciada por múltiples factores, tales como la geomorfología, el uso del suelo y la precipitación. Estos autores encontraron que la recarga hídrica se incrementó en zonas con uso del suelo forestal y áreas de ladera, mientras que se redujo en zonas con uso del suelo agrícola y áreas de planicie.

La recarga “Alta”

Disminuyó de 5,342.81 ha en el año 2011 a 5,090.94 ha en el 2020. En términos de recarga hídrica han experimentado una disminución en 251.87 ha que representa el 4.9% en el período de tiempo entre 2011 y 2020. Esta disminución tiene una relación con las áreas que promueven la infiltración como; “Vegetación Secundaria o Transición” (-20.16%), Área pantanosas (-50.09%), Lagunas, lagos y ciénagas naturales (-15.89%), del mismo modo tiene una relación con áreas que se incrementaron que no facilitan la infiltración como el área de extracción minera (92.90%).

Según el análisis de los cambios de cobertura y uso de la tierra realizado por el Gobierno Regional de Cajamarca, la deforestación y la expansión de la agricultura pueden tener un impacto negativo en la recarga hídrica y la disponibilidad de agua en la región (Alcántara, 2014).

La recarga “Muy Alta”

Aumentó de 36.37 ha en 2011 a 43.18 ha en 2020, un incremento de 6.81 ha que representa el 15.8%. Este aumento tiene relación con las áreas que no han presentado grandes cambios; Plantación forestal (5.55%), Herbazal (6.83 %), del mismo modo el aumento puede estar relacionado con la conservación de la cobertura del suelo y la vegetación en estas áreas. Estos resultados tienen relación con el estudio de recursos de rocas y minerales industriales para la inclusión económica, social y desarrollo en la región Cajamarca, la alteración de la cobertura del suelo, como la deforestación, puede afectar la infiltración del agua y, por lo tanto, la recarga hídrica (INGEMMET, 2020).

Se debe mencionar que en la cuenca del río Rejo se encuentra La Cooperativa Agraria de Trabajadores Atahualpa-Jerusalén que presenta una superficie de plantación forestales con especies exóticas (genero pinus) de 8,471 ha (Kometter, 2018) frente a esta cobertura que ha aumentado (5.55%), Cordero (2011), afirma que las plantaciones forestales de especies exóticas de rápido crecimiento, producen cambios profundos en el funcionamiento del ecosistema, como alteraciones en el ciclo hidrológico y acidificación de los suelos, que afectan la magnitud y la distribución temporal del caudal de ríos y arroyos; ya que cuando se establecen plantaciones forestales en zonas originalmente carentes de vegetación arbórea se presentan alteraciones en la forma que circula el agua en el ecosistema (Nosetto & Jobbágy, 2014).

El cambio de uso del suelo, especialmente la deforestación y la conversión de áreas naturales en zonas agrícolas o urbanas, puede afectar significativamente la recarga hídrica (Martínez, 2020). Mantener la cobertura forestal es crucial para asegurar el flujo de agua en las zonas de recarga hídrica (Jiménez et al., 2019). Además, que el cambio de uso del

suelo puede influir en la dinámica de la recarga hídrica, lo que resalta la importancia de considerar este factor en la gestión ambiental (Jiménez et al., 2019).

Asimismo, de acuerdo con el artículo "Zonas de recarga hídrica y su importancia para la gestión integrada del recurso hídrico" (Sánchez et al., 2015). La disminución de la cobertura vegetal y la expansión de la agricultura y la urbanización pueden reducir la capacidad de infiltración del agua y, por lo tanto, disminuir la recarga hídrica. En este sentido, la identificación y protección de las zonas de recarga hídrica debe ser una prioridad en la planificación y gestión del recurso hídrico a nivel de cuenca.

El estudio de recursos de Rocas y Minerales Industriales para la Inclusión Económica, Social y Desarrollo en la Región Cajamarca, concluye que la conservación de la vegetación y la gestión adecuada del suelo pueden promover la infiltración del agua y, por lo tanto, la recarga hídrica (INGEMMET, 2020).

Los resultados de la presente investigación indican que la variación en las zonas de recarga hídrica en la cuenca del río Rejo ha sido principalmente "Moderada" durante los años analizado (2011 y 2020), Es decir de las 22565.09 hectáreas de superficie de la cuenca 15480.65 hectáreas no ha presentado variación significativa en su capacidad de recarga hídrica, lo que está influenciada por los diferentes usos del suelo y las prácticas de manejo. Sin embargo, también se identificó que las áreas con recarga "muy baja" han aumentado (12.75 ha) y las áreas con recarga "alta" han disminuido (- 251.87 ha), lo que indica una influencia negativa por los diferentes usos del suelo y las prácticas de manejo en la cuenca, lo que indica que podría tener consecuencias negativas en la disponibilidad de agua en el futuro.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- De la evaluación en los años de 2011 y 2020 para el uso de suelo, se observó una disminución en la “Vegetación Secundaria o en Transición” (-20.16 %); en los “Cultivos Transitorios” (-45.48 %); “Áreas pantanosas” (-50.09 %) y las “Lagunas, Lagos y Ciénagas Naturales” (-15.89%). En cambio han aumentado las “Áreas de Extracción de Minería e Hidrocarburos” (92.9 %); las “Plantaciones Forestales” (5.5%) y “Herbazal” (6.83).
- Se determinó que las zonas de recarga hídrica en la cuenca del río Rejo para el año 2011 presentan un nivel de recarga “Moderada” (67.59 %), para el año 2020 se mantiene con el mismo nivel “moderada” (68.60 %), observándose solo una ligera variación en los porcentajes.
- Se identificó una relación directa y positiva entre las zonas de recarga hídrica y ciertos cambios en el uso del suelo, específicamente en áreas de plantación forestal, herbazal y vegetación secundaria o en transición. Estos usos de suelo, que además ocupan la mayor extensión en la cuenca, favorecen la recarga hídrica. En contraste, se observó una relación directa negativa con las áreas destinadas a la extracción minera, las cuales demuestran un impacto adverso al influir en la disminución de la recarga hídrica.
- Se recomienda implementar medidas de conservación y restauración (reforestación, terrazas, zanjas de infiltración y barreras vivas) de las zonas de recarga hídrica en la zona de variación “muy baja” y “baja” para evitar impactos negativos en la disponibilidad de agua en la cuenca del río Rejo.
- Se recomienda la delimitación de las áreas críticas para la recarga hídrica con la finalidad de protegerlas adecuadamente y evitar impactos negativos en el ciclo hidrológico

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcántara Boñón, G. H. (2014). Análisis de los cambios de la Cobertura y Uso de la Tierra. <https://zeeot.regioncajamarca.gob.pe>.
https://zeeot.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/EE_CUT_tercera_version_diciembre_2014.pdf
- Allafta, H., Opp, C., & Patra, S. (2020). Identification of groundwater potential zones using remote sensing and GIS techniques: A case study of the Shatt Al-Arab basin. *Remote Sensing*, 13(1), 112. <https://doi.org/10.3390/rs13010112>
- Arshad, A., Zhang, Z., Zhang, W., & Dilawar, A. (2020). Mapping favorable groundwater potential recharge zones using a GIS-based analytical hierarchical process and probability frequency ratio model: A case study from an agro-urban region of Pakistan. *Geoscience Frontiers*, 11(5), 1805–1819. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.12.013>
- Autoridad Nacional del Agua. (2015). Evaluación de recursos hídricos en la cuenca del río jequetepeque. http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/erh-jequetepeque_2015_superficiales.pdf
- Arellano, L. Ruiz, L. E. (2018). Evaluación y tendencias de los servicios ecosistémicos hidrológicos de la cuenca del río Zanatenco, Chiapas. *Investigaciones geográficas*, 8-(1) 8-12. <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n95/2448-7279-igeo-95-00005.pdf>
- Banco Mundial. (2020). *El agua en la agricultura*. Banco Mundial. <https://www.worldbank.org/en/topic/water/publication/better-water-management-in-agriculture>

- Barrantes, B. E. y M, V. H. (2016). Riqueza del recurso hídrico y su relación con la cubierta vegetal en la Reserva Forestal Grecia, Alajuela, Costa Rica. *Cuadernos de Investigación UNED*, 8 (1), 8-12. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/cinn/v8n1/1659-4266-cinn-8-01-00008.pdf>
- Bardales Espinoza, W. (2007). Metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica naturales en las cuencas de Guatemala
- Berhe Zenebe, G., Hussien, A., Girmay, A. Hailu, G. (2020). Spatial analysis of groundwater vulnerability to contamination and human activity impact using a modified DRASTIC model in Elalla-Aynalem Catchment, Northern Ethiopia. *Sustain. Water Resour. Manag.* 6, 1–16. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40899-020-00406-7>
- Biazin, B. y Sterk, G. (2013). Drought vulnerability Drives Land Use and Land Cover Changes in the Rift Valley Dry Lands of Ethiopia. *Agric. Ecosyst. Environ*, 164, 100–112.
- Bocco, G., Mendoza, M., & Velázquez, A. (2001). Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping—a tool for land use planning in developing countries. *Geomorphology (Amsterdam, Netherlands)*, 39(3–4), 211–219. [https://doi.org/10.1016/s0169-555x\(01\)00027-7](https://doi.org/10.1016/s0169-555x(01)00027-7)
- Bardales Espinoza, J. (2007). Identificación de zonas de recarga hídrica en la cuenca del río Chillón, Lima - Perú, utilizando sistemas de información geográfica (SIG) [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional UNALM. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/1524>
- Bravo, L. C., Sáenz, D. A., Alatorre, L. C., Priego, A., Torres, M. E. y Granado, A. (2015). Identificación de áreas potenciales de recarga hídrica al acuífero Cuauhtémoc (Chihuahua), mediante una evaluación espacial multicriterio, México. <https://www.researchgate.net/publication/309118247>

- Brenes, C. (2009). Análisis multitemporal de cambio de uso de suelo y dinámica del paisaje en el Corredor Biológico Volcánica Talamanca, Costa Rica (Tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Brutsaert, W. (2005). Hydrology: An introduction. Cambridge University Press.
- Castiglioni, M., Massobrio, M., Chagas, C., Santanatoglia, O., & Buján, A. (2006). Infiltración del agua con labranza cero del suelo en una microcuenca agrícola en Argentina. *Terra Latinoamericana*, 24(4), 423-430.
- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). (2006). Hidrología. Hidrología y Gestión de Cuencas Curso Internacional. Turrialba, Cartago, Costa Rica.
- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). (2010). Metodología para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas. Validación en la subcuenca del Río Matus, O. (2009). Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A5974E/A5974E.PDF>
- Carrillo, M. y Carrillo, S. (2005). Estudio de la amenaza de inestabilidad de laderas y desarrollo de un escenario preliminar de la vulnerabilidad de la infraestructura vital, microcuenca del Río Purires, provincia de Cartago, Costa Rica (en línea). Consultado 5 jul. 2011. Disponible en http://www.geologia.ucr.ac.cr/revista/to_pdf/revista/34-35/12-tesis-licenciatura.pdf
- Chamorro, C. (2016). Identificación de zonas de recarga hídrica en la cuenca del río Chillón, Lima - Perú, utilizando sistemas de información geográfica (SIG) [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional UNALM. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/2345>

- CEPAL. (s/f). Recursos hídricos. Cepal.org. Recuperado el 25 de julio de 2023, de <https://www.cepal.org/es/subtemas/recursos-hidricos>
- Chilton, J. (2001). World Health Organization. http://www.who.int/water_sanitation_health/resourcesquality/wqachapter9.pdf
- Chow, V., Maidment, D. y Mays, L. (1994). Hidrología aplicada. McGraw-Hill Interamericana, SA. Bogotá, Colombia.
- Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de teledetección especial. Ediciones Rialp, Madrid, España
- Cordero Rivera, A. (2011). Cuando los árboles no dejan ver el bosque: efectos de los monocultivos forestales en la conservación de la biodiversidad. Acta Biológica Colombiana, 16(2), 247-268. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-548X2011000200018&lng=en&tlng=es.
- Cusquisiban Quispe, G. D. (2020). Ubicación de zonas de recarga hídrica usando imágenes Landsat 8 mediante el método de árbol de decisiones en la cuenca del río Chamán, Cajamarca y La Libertad-Perú [Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/23581>
- Custodio, G. 1998. Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evolución y la incertidumbre. Boletín Geológico y Minero 109-4: 13-29, citado por González Carrasco, W. del C. 2010. Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la subcuenca del río Zaratí, Panamá. Turrialba, CR. CATIE, Tesis Mag. Sc. 175 p.

- Custodio Gimena, E. (2019). *Recarga natural a los acuíferos, metodología y soporte de la isotopía del agua: aplicación a la planificación hidrológica y conocimiento de las aguas subterráneas en España: informe RAEMIA* (J. Jódar Bermúdez, Ed.). Iniciativa Digital Politècnica. Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC. <https://doi.org/10.5821/ebook-9788498808148>
- Coy, J. (2015). Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la sub cuenca del río Tzunutz, Guatemala. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/17/17_0549.pdf
- Cook, P. G. y Herczeg, A. L. (2013). *Environmental tracers in groundwater hydrology*. Springer Science & Business Media.
- Dar, T., Rai, N., & Bhat, A. (2021). Delineation of potential groundwater recharge zones using analytical hierarchy process (AHP). *Geology Ecology and Landscapes*, 5(4), 292–307. <https://doi.org/10.1080/24749508.2020.1726562>
- De Vargas, T., Sgorla, V., Belladonna, R., & Vedana, L. A. (2023). Mapas de zonas potenciais de recarga da água subterrânea como uma nova ferramenta para a segurança hídrica do abastecimento público. *Águas Subterrâneas*, 37(1). <https://doi.org/10.14295/ras.v37i1.30152>
- De Vries, J. J., & Simmers, I. (2002). Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 5–17. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0171-7>
- Donis-Cáceres, L. F. (2015). Identificación de zonas de recarga hídrica en la microcuenca del río Negro, ciudad de Guatemala: Sistematización de práctica profesional (Tesis de Licenciatura). Universidad Rafael Landívar, Guatemala.

Drought and Human Impacts on Land Use and Land Cover Change in a Vietnamese Coastal Area

- MDPI. (s.f.). Recuperado el 14 de julio de 2023, de <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/3/333>

EAHMY. (2013). Base de datos digitales de las Redes de observación hidrológicas, hidrogeológicas y de calidad de las aguas (Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Mayabeque).

FAO. (2019). Land use statistics and indicators. Recuperado de <http://www.fao.org/land-water/land-use/es/>

Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Snyder, P.K. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570-574. doi: 10.1126/science.1111772

FONDECYT. (2010). Identificación y caracterización de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en la subcuenca de los Ríos Taco y Shusho, Municipio de Chiquimula. Guatemala. Recuperado de <http://glifos.concyt.gob.gt/digital/fodecyt/fodecyt%202009.46.pdf>

Faustino, J. (2012). Identificación, evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica. Managua.

Fallas, J. (2004). Ortorectificación de fotos aéreas con Ilwis. http://163.178.140.110/icomvis/images/Documentos/PublicacionesTELESIG/Ortorectificacion_y_georeferenciacion_1.pdfNI. 114 p.

Fajardo Vargas, L. W., & Torres Pereira, R. (2022). *Reporte de evaluación ambiental de seguimiento de agua superficial, agua subterránea y efluentes minero en el área de influencia de la unidad minera Yanacocha de Minera Yanacocha S.R.L., distritos de*

Cajamarca, Baños del Inca y La Encañada, provincia y departamento de Cajamarca, en el
2022. <https://repositorio.oefa.gob.pe/handle/20.500.12788/1306>

Findell, K.L., Berg, A., Gentine, P., Krasting, J.P., Lintner, B.R., Malyshev, S., Santanello, J.A., Sheliakova, E. (2017). The Impact of Anthoropogenic Land Use and Land Cover Change on Regional Climate Extremes. *Nat. Commun.*

Figueredo Pan, J. L. (2019). Metodología para determinar zonas de recarga hídrica en municipios o áreas rurales. *Repositorio de la Universidad Militar Nueva Granada*. Recuperado de https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/34946/FIGUEREDOPANJ_ORGELUIS2019.PDF.pdf?isAllowed=y&sequence=1

García, M. G. (2009). Determinación de las zonas potenciales de recarga hidria en la subcuenca de los ríos Tacó y Shusho, municipio de Chiquimula, departamento de Chiquimula, Guatemala [Tesis posgrado, Universidad de San Carlos de Guatemala.]. Repositorio institucional USAC. <https://core.ac.uk/reader/35293427>

Gobierno Reional Cajamarca. (2013). Proyecto Reforestación en las Zonas Altoandinas de San Pablo y San Miguel se desarrolla con éxito. <https://siar.regioncajamarca.gob.pe/novedades/proyecto-reforestacion-las-zonas-altoandinas-san-pablo-san-miguel-se>

González-Sanchis, M., Jiménez-Espinosa, R., y Andreu-Rodes, J. M. (2019). Impact of land use and cover change on groundwater recharge in a Mediterranean watershed. *Journal of Environmental Management*, 250, 109493.

González-Sosa, E., López-Barrera, F., y Huerta-Lwanga, E. (2020). Uso del suelo y su impacto en la recarga hídrica. Un caso de estudio en la región de Los Tuxtlas, Veracruz. *Revista*

- Hernández-Juárez, R. A., Martínez Rivera, L. M., Peñuela-Arévalo, L. A., & Rivera-Reyes, S. (2020). Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la cuenca del río Ayuquila-Armería mediante el uso de SIG y el análisis multicriterio. *Investigaciones Geográficas*, (101), e59892. <https://doi.org/10.14350/riig.59892>
- Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA), & (pejeza), P. E. J. (2004). *Actualización del plan de ordenamiento ambiental de la cuenca del río Jequetepeque para la protección del reservorio Gallito Ciego y del valle agrícola*. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3623>
- IARNA. (2002). El agua: Situación actual y necesidades de gestión. Guatemala, Guatemala.
- IARNA. (2003). Vulnerabilidad socioambiental: Aplicación para Guatemala. Guatemala.
- IARNA. (2006). Hidrología Forestal. Guatemala, Guatemala
- INAB (Instituto Nacional de Bosques). (2005). Programa de Investigación de Hidrología Forestal. Guatemala.
- INEGI. (2005). Guía para la interpretación de cartografía geológica. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/guias-carto/geolo/GEOI.pdf
- INGEMMET. (2020). Estudio de recursos de rocas y minerales industriales para la inclusión económica social y desarrollo en la región Cajamarca. https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/2800/3/B068-Estudio_recursos_rocas_minerales_industriales-Cajamarca.pdf

- Instituto del Bien Común. (2024, Julio 10). *Alertan sobre cambios significativos en la vegetación natural de Perú en las últimas dos décadas*. Ibcperu.org. <https://ibcperu.org/alertan-sobre-cambios-significativos-en-la-vegetacion-natural-de-peru-en-las-ultimas-dos-decadas/>
- Iturbe G, A. (2008). Estimación de la recarga de acuíferos en la Cuenca del Rio Texcoco. Tesis licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales. Chapingo, México.
- Jiménez-Martínez, J., Rinaldo, A., & Rodríguez-Iturbe, I. (2019). Groundwater recharge in arid and semiarid regions: A review of challenges and opportunities. *Water Resources Research*, 55(5), 3789–3807.
- José-Ríos, M., Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, Prado-Hernández, V., Romero-Bautista, A., Reyes-López, D., Pascual-Ramírez, F., Universidad Autónoma Chapingo, México, Instituto Tecnológico del Valle de Morelia, México, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México, & Universidad Nacional Autónoma de México, México. (2019). Estimación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del lago de Zirahuén. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(3), 275–288. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-03-11>
- Jobbágy, E. G., Acosta, A. M., & Noretto, M. D. (2013). Rendimiento hídrico en cuencas primarias bajo pastizales y plantaciones de pino de las sierras de Córdoba (Argentina). *Ecología Austral*, 23(2), 087–096. <https://doi.org/10.25260/ea.13.23.2.0.1164>
- Kaur, L., Rishi, M. S., Singh, G., & Nath Thakur, S. (2020). Groundwater potential assessment of an alluvial aquifer in Yamuna sub-basin (Panipat region) using remote sensing and GIS techniques in conjunction with analytical hierarchy process (AHP) and catastrophe theory

(CT). *Ecological Indicators*, 110(105850), 105850.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105850>

Kometter, R. (2018). REVISIÓN DE LA VALIDACIÓN DE PLANTACIONES FORESTALES EN LA GRANJA PORCÓN. Researchgate.net.
https://www.researchgate.net/publication/325251473_REVISION_DE_LA_VALIDACION_DE_PLANTACIONES_FORESTALES_EN_LA_GRANJA_PORCON

Lambin, E. (1994). Modelling deforestation processes; a review. Luxembuorg, BE. European Comisión.

Lambin, E., Geist, H., Leppers, E. (2003). Dynamics of Land-Use and Land-Cover Change in Tropical Regions. Annual Reviews of Environmental Resources. Recuperado de <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>

Lambin, E.F. & Geist, H.J. (2006). Land-use and land-cover change: local processes and global impacts. Springer Science & Business Media.

Lara-Vásquez, N. X., Cushquicullma-Colcha, D. F., Guaiña-Yungán, J. I., Espinoza, V. M., & Ati-Cutiupala, G. M. (2021). 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 del Conocimiento*, 6(6), 122–148.
<https://doi.org/10.23857/pc.v6i6.2745>

Lara-Vásquez, N. X., Cushquicullma-Colcha, D. F., Guaiña-Yungán, J. I., Espinoza, V. M., & Ati-Cutiupala, G. M. (2021). 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 del Conocimiento*, 6(6), 122–148.
<https://doi.org/10.23857/pc.v6i6.2745>

Leyva, S. E. (2010). *Acuíferos Semiconfinados y su Modelación: Aplicaciones al Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra. México, D. F.
<http://www.mmc.geofisica.unam.mx/mmc/tesis/EstherLeyva/EstherTesis-II.pdf>

Lentswe, G. B., & Molwalefhe, L. (2020). Delineation of potential groundwater recharge zones using analytic hierarchy process-guided GIS in the semi-arid Motloutse watershed, eastern Botswana. *Journal of Hydrology. Regional Studies*, 28(100674), 100674.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100674>

López, Vy Plata, W. (2009). Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivado de la expansión urbana de la zona metropolitana de la ciudad de México, 1990 - 2000 *Investigaciones Geográficas*: 85 – 101

López-Caloca, A., Estrada-Carmona, N., & Gómez-Mendoza, L. (2021). Land use change and groundwater recharge in the central highlands of Mexico: Implications for water resource management. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 35, 100821.

Longwood University. (2003). Longwood University. Recuperado de Longwood University:
<http://www.longwood.edu/cleanva/images/Sec4.groundwaterchapter.pdf>

Lukas, S. y Girard, M. C. (2010). Hydrogeological methods for estimating recharge. In *Recharge of Phreatic Aquifers in (Semi) Arid Areas* (pp. 29-47). Springer, Dordrecht.

Lux, B. F. (2012). Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca del río Turbala, ubicada en la cuenca del río Naranjo, Guatemala.

https://www.academia.edu/35531177/Tesis_de_Ingenier%C3%ADa_en_Agronom%C3%ADa

Maderey, E. y Jiménez, A. (2005). Principios de Hidrogeografía: estudio del ciclo hidrológico. UNAM. México 100 p.

MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, GT). (2006). Mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra: memoria técnica y descripción de resultados. Guatemala.

Marqués, R. F. (s.f.) MANEJO INTEGRADO DE CUENCAS.
<https://es.scribd.com/document/368558397/Cuenca-Del-Porcon-Cajamarca>

Matus. O. (2008). Elaboración Participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua. Tesis Maestría. Turrialba, CR. CATIE. 186 pp. Jucuapa, Nicaragua.

Matus. O., Faustino. J. y Jiménez, F. (2009) Guía para la indentifiacion participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. Costa Rica
http://201.207.189.89/bitstream/handle/11554/8339/Guia_para_la_identificacion_participativa.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Martínez-Santos, P., Mahlkecht, J., Breña-Naranjo, J. A., Ramos-Leal, J. A. y Chávez, A. (2008). Groundwater vulnerability and nitrate contamination in the Guanajuato Valley aquifer, Mexico. Hydrogeology Journal, 16(4), 727-740.

Martínez, P. (2021, agosto 9). La contaminación del agua en la minería | Observatorio Económico.
<https://www.obela.org/>. Recuperado 11 de junio de 2023, de <https://www.obela.org/analisis/la-contaminacion-del-agua-en-la-mineria>

- Martínez-Santos, P., Herrera-Pantoja, M., & García-Rubio, M. (2020). Hydrogeological characterization of groundwater recharge areas: A methodological review. *Water*, 12(1), 154.
- Magesh, N. S., Chandrasekar, N., & Soundranayagam, J. P. (2011). Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geoscience Frontiers*, 2(2), 265-274. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.01.005>
- Magesh, N. S., Chandrasekar, N., & Soundranayagam, J. P. (2012). Morphometric evaluation of Papanasam and Manimuthar watersheds, parts of Western Ghats, Tirunelveli district, Tamil Nadu, India: A GIS approach. *Environmental Earth Sciences*, 64(2), 373-381. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0860-4>
- Méndez-Toribio, M., Martínez-Garza C, Ceccon, E. y Guariguata, M.R. (2018). La restauración de ecosistemas terrestres en México: Estado actual, necesidades y oportunidades. Documentos Ocasionales 185. Bogor, Indonesia: CIFOR.
- Mendoza, M., López, E., y Bocco, G. (2001). Regionalización ecológica, conservación de recursos naturales y ordenamiento territorial en la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán (en línea). Morelia, MX. 263 p. <http://www.oikos.unam.mx/laboratorios/geoecologia/PDF/CAMBIO/2USODELSUELO.PDF>
- Meneses, M. (2000). Cambios en el uso del suelo y expansión de plantaciones. *Ambiente y Desarrollo*, 16,86-96. http://www.cipma.cl/web/200.75.6.169/RAD/2000/1-2_Meneses.pdf
- Mendoza, G. y García, K. (2011). Análisis multitemporal de uso y cobertura del suelo en el Municipio de Manaure-Guajira-Colombia, implementando imágenes landsat (en línea) In

Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR (Curitiba, BR.) Análisis multitemporal de uso y cobertura del suelo en el Municipio de Manaure-Guajira-Colombia, implementando imágenes landsat (en línea). 6442 - 6449 p.
<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0185.pdf>

Mercado-Garcia, D., Block, T., Horna Cotrina, J. T., Deza Arroyo, N., Forio, M. A. E., Wyseure, G., y Goethals, P. (2023). Freshwater management discourses in the northern Peruvian Andes: The watershed-scale complexity for integrating mining, rural, and urban stakeholders. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(6).
<https://doi.org/10.3390/ijerph20064682>

Milder, J.C., Scherr, S.J., Bracer, C., y Montagne, C. (2014). Trends and future potential of payment for ecosystem services to alleviate rural poverty in developing countries. *Ecology and Society*, 19(2), 2. doi: 10.5751/ES-06350-190202

Monzón, F. (2012). *Biología y geología interactiva*.
http://biologiaygeologia.org/unidadbio/a_ctma/hidrosfera/hidrosfera2.html

Muñoz, A., Pacheco, C., & Rojas, L. (2020). Sustainable groundwater management: A case study of recharge areas conservation in semi-arid regions. *Sustainability*, 12(4), 1387.

National Groundwater Association. 2010. National Groundwater Association.
<http://www.ngwa.org/Fundamentals/hydrology/Pages/Forces-controllingwater-in-rocks.aspx>

Narayanan, P., & Venugopal, K. (2021). Delineation of groundwater potential zones in Palakkad district, Kerala using remote sensing and GIS techniques. *Groundwater for Sustainable Development*, 12, 100525. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100525>

- Nayak, D., Das, D. M., Raul, S. K., Sahoo, B. C., & Das, I. C. (2023). Delineation of potential groundwater recharge zones in the middle reach of mahanadi river basin using GIS-based MCDM technique. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 51(7), 1465–1478. <https://doi.org/10.1007/s12524-023-01708-x>
- New Jersey Stormwater. (2004). Chapter 6: Groundwater Recharge. New Jersey Stormwater Best Management Practices Manual. New Jersey, United States. http://www.njstormwater.org/bmp_manual/NJ_SWBMP_6%20print.pdf
- Nolan, B. T., Healy, R. W., Taber, P. E., Perkins, K., Hitt, K. J., & Wolock, D. M. (2007). Factors influencing ground-water recharge in the eastern United States. *Journal of Hydrology*, 332(1–2), 187–205. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.029>
- Nosetto, M. D., & Jobbagy Gampel, E. G. (2014). Plantaciones forestales: sus servicios e impactos hidrológicos. *Producción Forestal*, 8(1), 18-20. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/14643>
- Nutini, F., Boschetti, M., Brivio, P.A., Bocchi, S. y Antoninetti, M. (2013). Land-use and land-cover change detection in a semi-arid area of Niger using multi-temporal analysis of Landsat images. *Int. J. Remote Sens.*, 34, 4769–4790.
- Orozco, E. O. (2003). Modelo matemático preliminar del valle aluvial de la Antigua Guatemala (Master's thesis). Universidad Nacional de Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología.
- Paegelow, M., Camacho, M.T. y Menor, J. (2003). Cadenas de Markov, Evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*. Madrid, España. <http://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/21>

Padilla, T. A. (2003). Evaluación del potencial hídrico en la microcuenca del río Cantil, para el aprovechamiento de las aguas subterráneas en la finca Sabana Grande, El Rodeo, Escuintla, Guatemala [Master's thesis, Universidad de Costa Rica]. Universidad de Costa Rica Repository.

Planning Commission Government of India. (2012). Draft Model Bill for the Conservation, Protection and Regulation of Groundwater. India.

Peñuela Arévalo, L. A., Carrillo Rivera, J. J. (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones geográficas*, (81), 18-32. Recuperado en 11 de junio de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112013000200003&lng=es&tlng=es.

Pérez, U. y Bosque, J. (2008). Transiciones de la cobertura y uso de la tierra en el periodo 1991 - 2005 en la cuenca del río Combeima, Colombia (en línea). *Serie Geográfica: Profesora María de los Ángeles Díaz Muñoz, In Memoriam*, 14,163 – 178. http://desarrollo.ut.edu.co/tolima/hermesoft/portal/home_1/rec/arc_14564.pdf

Pérez Álvarez, P., & Rodríguez Lugo, D. M. (2014). Determinación de la recarga hídrica potencial en la cuenca hidrográfica Guara, Cuba. *Aqua-LAC*, 6(2), 58–70. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2014-v6-2-06>

Pérez-Estrada, C., Martínez-Santiago, S., & Gallegos, J. (2021). Green infrastructure as a strategy for urban groundwater recharge in Latin American cities. *Water*, 13(3), 341.

- Perú. Ministerio del Ambiente. (2015). Mapa nacional de cobertura vegetal: memoria descriptiva
Ministerio del Ambiente. Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento
del Patrimonio Natural. Av. Javier Prado Oeste 1440, San Isidro Lima,
- Perú. Ministerio de Agricultura (2004). Plan de ordenamiento, manejo ambiental y desarrollo
social en la cuenca media y alta del jequetepeque para la protección del embalse gallito ciego.
Proyecto especial Jequetepeque-Zaña (PEJEZA) autoridad Autonomía Jequetepeque.
- Pineda, N., Bosque, J., Gómez, M., Plata, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el
Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión
multivariantes: una aproximación a los procesos de deforestación (en línea). México.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112009000200004
- Pinzón Pulido, I. L., & Alfonso Palacios, A. P. (2020). Identificación de las principales áreas de
recarga de acuíferos en la zona media del departamento de Cesar. *Ingeciencia*, 5, 109-124.
[https://editorial.ucentral.edu.co/ojs_uc/index.php/Ingeciencia/article/download/3191/3200/
7366](https://editorial.ucentral.edu.co/ojs_uc/index.php/Ingeciencia/article/download/3191/3200/7366)
- Pontius, R., Shusas, E. y McEachern. M. (2004). Detecting important categorical land changes
while accounting for persistence (en línea). *Agriculture Ecosystems & Environment* 101:251
- 268 p. https://www.clarku.edu/~rpontius/pontius_etal_2004_aee.pdf
- Postel, S. (2006). Conservando los ecosistemas de agua dulce. *The Worldwatch Institute: La
situación del mundo*.
- Quispe, A. (2017). Zonificación Ecológica Económica y Ordenamiento Territorial en Cajamarca.
(1ra ed.) Grupo Propuesta Ciudadana.

Rodríguez, L. R., Ornelas, L. E., Bravo, L. C., Alatorre, L. y Rojas, H. L. (2015). Análisis y aplicación de un modelo empírico-conceptual para la identificación de zonas potenciales para recarga hídrica: cuenca de laguna de Bustillos, Chihuahua.

Rodríguez, D. M. y Pérez, Á. P. (2014). Determinación de la recarga hídrica potencial en la Cuenca hidrográfica Guara, de Cuba. Aqua-LAC, 6 (2) 58 – 70
<http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/06-RodriguezLugo.pdf>

Samper, J., y Pisani, B. (2009). Acuífer recharge evaluation by a combination of soil water balance and groundwater flows models (en línea). Zona no Saturada 9,1-8.
<http://congress.cimne.com/zns09/admin/files/filepaper/p411.pdf>

Sandoval, V., y Real, P. (2005). Modelamiento y prognosis estadística y cartográfica del cambio de uso de la tierra. Bosque. 26, 55-63. Santiago de Chile.

Sáenz, A. A., Bravo, L. C., Torres, M. E., y Alatorre, C. (2015). Localización de zonas con potencial natural de recarga hídrica: ensayo de enfoque multiescalar en el acuífero Cuauhtémoc.
https://www.researchgate.net/publication/302511670_Localizacion_de_zonas_con_potencial_natural_de_recarga_hidrica_ensayo_de_enfoque_multiescalar_en_el_acuifero_Cuauhtemoc

Salas, R., Barboza, E., Rojas, N., Mamani, J., y Rodríguez, N. (2018). Deforestación En El Área De Conservación Privada Tilacancha: Zona De Recarga Hídrica Y De Abastecimiento De Agua Para Chachapoyas. Revista de Investigación en Agroproducción Sustentable 2 (2), 45-64. <http://revistas.untrm.edu.pe/index.php/INDESDOS/article/download/393/505>

- Sánchez, G., Mancilla, R., Flores, E., y Castillo, J. (2015). Zonas de recarga hídrica y su importancia para la gestión integrada del recurso hídrico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 31(4), 463-477
- Sánchez, C. K. (2002). Metodología de análisis multicriterio para la identificación de áreas prioritarias de manejo del recurso hídrico en la cuenca del Río Sarapiquí, Costa Rica. Tesis Maestría. Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2005). Informe de la situación del medio ambiente en México: vegetación y uso del suelo (en línea). México. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/introduccion/presentacion.html
- Seóanez, M. (2002). Tratado de climatología aplicada a la ingeniería medioambiental. Madrid, ES. 734 p.
- Sharma, S., Sundriyal, P., y Chauhan, D. S. (2019). Assessment of groundwater recharge potential through land use land cover change analysis in a part of Indian Himalaya. *Environmental Earth Sciences*, 78(1), 19.
- Thapa, R., Gupta, S., Guin, S., & Kaur, H. (2017). Delineation of groundwater potential zones in hard rock terrains of India using remote sensing, geographic information system and analytic hierarchy process techniques. *Hydrogeology Journal*, 25(4), 1123-1143. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1537-9>
- Ticse, G. (2018). Correlación de la cobertura vegetal de pastos naturales con la recarga hídrica de la cuenca alta del río Shullcas como medida de adaptación al cambio climático en el periodo

- julio - 2013 hasta junio - 2014. Tesis para optar el título de Ingeniera Ambiental, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Continental, Huancayo, Perú
- Toth, J. (2009). Groundwater recharge estimation under the changing land-use of the Pannonian basin. *Hydrogeology journal*, 17(8), 2025-2039.
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2019). *Groundwater Hydrology* (3.^a ed.). Wiley.
- Turner, B.L., Lambin, E.F., y Reenberg, A. (2007). *Land change science: Observing, monitoring and understanding trajectories of change on the Earth's surface*. Springer Science & Business Media
- Vásquez, V. A., Mejía, M. A., Faustino, M. J., Terán, A. R., Vásquez, R. I., Díaz, R. J., Vásquez, R. C., Castro, A. A., Tapia, M. M. y Alcántara, R. J. (2016) *Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas*. (1^o ra) Fondo Editorial-UNALM
- Vargas, J. C. C. (2021, agosto 9). *Recursos hídricos: América Latina y El Caribe al 2050*. iAgua. <https://www.iagua.es/blogs/juan-carlos-castro-vargas/recursos-hidricos-america-latina-y-caribe-al-2050-0>
- Valdez, A. L. (2012). *Delimitación de áreas de recarga de acuíferos con métodos de evaluación*. Chapingo, México
https://www.academia.edu/35112101/DIVISION_DE_CIENCIAS_FORESTALES
- Vásquez, N. X., Colcha, D. F. C., Guaiña Yungán, J. I., Espinoza, V. M., & Ati Cutiupala, G. M. (2021). 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. *Dialnet*.

Recuperado

de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8017000.pdf>

Velázquez, A., Mas, J., Díaz, J., Mayorga, R., Alcántara, P., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurrea, E., y Palacios, J. (2002). Patrones y tasas de cambio de usos de suelo en México (en línea). *Gaceta Ecológica*: 21 37. <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906202.pdf>

Vílchez, D. R. (2019). Impacto de los servicios ecoistémicos de regulación del recurso hídrico en la conservación de la vegetación en la subcuenca del río grande – Cajamarca [Tesis posgrado, Universidad Nacional de Cajamarca.]. Repositorio institucional UNC. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/3824>

Villegas, J. (2004). Análisis del conocimiento en la relación agua-suelo-vegetación para el Departamento de Antioquía. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquía*, 1, 73-79. <https://www.redalyc.org/pdf/1492/149217763007.pdf>

Villar Cabeza, M. Á., Marcelo Bazán, F. E., Baselly Villanueva, J. R., & Villena Velázquez, J. J. (2014). Estimación de volúmenes maderables en plantaciones de *Pinus patula* Schltdl. & Cham. en la Cooperativa Atahualpa Jerusalén Granja Porcón en la región Cajamarca. Repositorio INIA. https://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/20.500.12955/912/1/Villar-Estimacion_maderables_Pinus_%20patula.pdf

Walczuk, A., Campos, J. E. G., & Azevedo, J. H. (2019). Recarga de Acuíferos em Região de Clima Semiárido: uma Análise Acoplada entre Variabilidade Pluviométrica e Características Pedológicas. *Anuario Instituto de Geociencias*, 42(3), 536–557. https://doi.org/10.11137/2019_3_536_557

Yglesias, M. (2011). Integración de la dimensión espacio-temporal y los procesos sociales: el caso del cambio de uso de la tierra del cantón de Hojanca, Costa Rica. Tesis Mag. Sc.

CAPÍTULO VII

ANEXOS

Anexo 1. Categorías de la clasificación Corine Land Cover Adaptada para Perú

Nivel I	Nivel II	Nivel III	
1. Áreas Artificialidades	1.1 Áreas urbanizadas	1.1.1 Tejido urbano continuo 1.1.2 Tejido urbano discontinuo	
	1.2 Áreas industriales e infraestructura	1.2.1 Áreas Industriales o comerciales 1.2.2 Red vial, ferroviaria y terrenos asociados 1.2.3 Áreas portuarias 1.2.4 Aeropuertos 1.2.5 Obras hidráulicas	
	1.3 Áreas de extracción de minería e hidrocarburos y escombreras	1.3.1 Áreas de extracción de minería e hidrocarburos 1.3.2 Áreas de disposición de residuos	
	1.4 Áreas verdes artificiales no agrícolas	1.4.1 Áreas verdes urbanas 1.4.2 Instalaciones recreativas	
	2. Áreas Agrícolas	2.1 Cultivos transitorios	2.1.1 Cultivos Transitorios
		2.2 Cultivos permanentes	2.2.1 Cultivos permanentes
		2.3 Pastos	
		2.4 Áreas agrícolas heterogéneas	2.4.1. Mosaico de Cultivos 2.4.2. Mosaico de Pastos y Cultivos 2.4.3. Mosaico de Cultivos, pastos y espacios naturales 2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales 2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales
3. Bosques y áreas mayormente naturales		3.1 Bosque	3.1.1 Bosque denso bajo 3.1.2 Bosque abierto bajo 3.1.3 Bosque denso alto 3.1.4 Bosque abierto alto 3.1.5 Bosque fragmenado 3.1.6. Bosque ripario
	3.2 Bosques Plantados	3.2.1. Plantación forestal	
	3.3 Áreas con vegetación herbácea y/o arbustivo	3.3.1 Herbazal 3.3.2 Arbustal	

		3.3.3 Vegetación secundaria o transición
		3.3.4 Vegetación arbustiva/ Hebaces
		3.3.5 Arbustal / área intervenida
		3.3.6 Herbazal / área intervenida
		3.3.7 Arbustal - Herbazal / área intervenida
	3.4 Áreas sin o con poca vegetación	3.4.1. Áreas arenosas naturales 3.4.2 Afloramientos rocosos 3.4.3 Tierras desnudas (incluye áreas erosionadas naturales y también degradadas) 3.4.4 Áreas quemadas 3.4.5 Glaciares 3.4.6 Salares
4. Áreas húmedas	4.1 Áreas húmedas continentales	4.1.1 Áreas pantanosas 4.1.2 Tuberías y bofedales 4.1.3 Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
	4.2 Áreas húmedas costeras	4.2.1. Pantanos costeros 4.2.2. Salitral 4.2.3. Sustratos y sedimentos expuestos en bajamar
5. Superficies de Agua	5.1. Aguas continentales	5.1.1. Ríos (50 m) 5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales permanentes 5.1.3. Lagunas, lagos y ciénagas naturales estacionales 5.1.4. Canales 5.1.5. Cuerpos de agua artificiales
	5.2 Aguas costeras	5.2.1. Lagunas costeras 5.2.2. Mares y océanos 5.2.3. Estanques para acuicultura marina

Fuente: Ministerio del Ambiente. (2015). Mapa nacional de cobertura vegetal: memoria descriptiva