

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y
CIVIL**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica
mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la
microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

Bach. Jhony Jesus QUISPE ANCHAYHUA

ASESOR:

MSc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO

AYACUCHO - PERÚ

2025

La recarga hídrica constituye un proceso fundamental para la sostenibilidad de los recursos hídricos, particularmente en cuencas altoandinas, donde la variabilidad estacional y los efectos del cambio climático intensifican los problemas de disponibilidad de agua. La identificación de zonas potenciales de recarga hídrica es clave para garantizar la seguridad hídrica, orientar prácticas de conservación y diseñar estrategias de manejo sostenible del recurso agua.

En la literatura científica, los métodos tradicionales de identificación se han basado en modelos de superposición ponderada que asignan pesos fijos a variables ambientales, como pendiente, suelos, rocas, cobertura y precipitación. Ejemplo de ello son los algoritmos de (Matus et al., 2009) y (Rodríguez Levy et al., 2023). Sin embargo, estas metodologías suelen presentar limitaciones al depender de la asignación subjetiva de ponderaciones, lo cual introduce sesgos y reduce la confiabilidad de los resultados.

Este estudio aborda dicha limitación mediante la aplicación del Algoritmo de Enjambre de Partículas (*Particle Swarm Optimization, PSO*) con enfoque multiobjetivo, el cual optimiza de manera adaptativa la combinación de seis factores ambientales: pendiente del terreno, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal, uso del suelo y precipitación. A través de métricas estadísticas como la varianza y la entropía, el PSO permitió recalibrar las ponderaciones y destacar la influencia diferencial de cada variable.

Los resultados mostraron que la pendiente (25.6%) y la precipitación (26.9%) constituyen los factores más determinantes en la delimitación de zonas de recarga, seguidos por el tipo de roca (18.4%), el uso del suelo (15.0%) y la cobertura vegetal (12.1%), mientras que el tipo de suelo presentó una influencia menor (2.0%). Esta redistribución evidencia la capacidad del *PSO* para reducir la subjetividad en comparación con métodos tradicionales, generando mapas de recarga hídrica con mayor precisión y discriminación espacial.

En términos generales, la incorporación de técnicas de inteligencia artificial en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica representa un avance significativo hacia la toma de decisiones más objetivas y basadas en datos. Los hallazgos de esta investigación demuestran que el uso de *PSO* no solo mejora la calidad del análisis espacial, sino que también constituye una herramienta innovadora para la planificación hídrica en regiones andinas. Finalmente, este enfoque abre la posibilidad de integrar futuros modelos hidrológicos dinámicos y validaciones en campo que consoliden la metodología como un soporte técnico esencial en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica.

Palabras clave: Recarga hídrica, Algoritmo Enjambre de Partículas, optimización, inteligencia artificial, microcuenca Yucaes, Ayacucho, sistemas de información geográfica, precipitación, pendiente del terreno, cobertura vegetal, uso del suelo, tipo de roca, tipo de suelo.

Abstract

Water recharge is a fundamental process for the sustainability of water resources, particularly in high Andean basins, where seasonal variability and the effects of climate change intensify water availability problems. Identifying potential water recharge zones is key to ensuring water security, guiding conservation practices, and designing sustainable water resource management strategies.

In the scientific literature, traditional identification methods have been based on weighted overlay models that assign fixed weights to environmental variables such as slope, soil, rock cover, and precipitation. Examples of this are the algorithms of (Matus et al., 2009) and (Rodríguez Levy et al., 2023). However, these methodologies often have limitations due to their dependence on the subjective assignment of weights, which introduces bias and reduces the reliability of the results. This study addresses this limitation by applying a multi-objective Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, which adaptively optimizes the combination of six environmental factors: terrain slope, soil type, rock type, vegetation cover, land use, and precipitation. Using statistical metrics such as variance and entropy, PSO allowed for recalibrating the weights and highlighting the differential influence of each variable.

The results show that slope (25.6 %) and precipitation (26.9 %) are the most determining factors in delimiting recharge zones, followed by rock type (18.4 %), land use (15.0 %), and vegetation cover (12.1 %), while soil type had a lesser influence (2.0 %). This redistribution demonstrates PSO's ability to reduce subjectivity compared to traditional methods, generating water recharge maps with greater accuracy and spatial discrimination.

Overall, the incorporation of artificial intelligence techniques in the identification of potential water recharge zones represents a significant advance toward more objective and data-driven decision-making. The findings of this research demonstrate that the use of PSO not only improves the quality of spatial analysis but also constitutes an innovative tool for water planning in Andean regions. Finally, this approach opens the possibility of integrating future dynamic hydrological models and field validations that consolidate the methodology as an essential technical support in the identification of potential water recharge zones.

Keywords: Water recharge, Particle Swarm Algorithm, Optimization, artificial intelligence, Yucaes microbasin, Ayacucho, geographic information systems, precipitation, land slope, vegetation cover, land use, rock type, soil type.

El agua constituye uno de los recursos más importantes para la sostenibilidad ambiental, económica y social, dado que abastece a poblaciones, actividades agrícolas e industriales, además de mantener los ecosistemas. Sin embargo, en los últimos años se ha intensificado la presión sobre este recurso debido al crecimiento poblacional, el cambio climático y el uso inadecuado del suelo, generando problemas de disponibilidad y calidad hídrica. Frente a ello, la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica se presenta como una estrategia clave para garantizar la seguridad hídrica y promover una gestión integral de este recurso.

En el ámbito internacional, diversas investigaciones han desarrollado metodologías para determinar las zonas con mayor potencial de recarga. Una de las más utilizadas es el algoritmo propuesto por Matus et al. (2009) y posteriormente adaptado por Rodríguez Levy et al. (2023), el cual se implementa en entornos SIG mediante procesos de álgebra de mapas. Si bien este método ha sido aplicado con éxito en países de Centroamérica y Bolivia, presenta limitaciones al basarse en la asignación subjetiva de pesos a las variables, lo cual reduce su objetividad y exactitud en contextos distintos.

En este escenario, el uso de técnicas de inteligencia artificial emerge como una alternativa innovadora que permite optimizar la asignación de pesos y minimizar la subjetividad. En particular, el Algoritmo Enjambre de Partículas (*PSO*) ha mostrado gran eficiencia en problemas de optimización compleja, logrando resultados más precisos y adaptativos. Su implementación en la identificación de zonas de recarga hídrica representa un aporte significativo en la modernización de las metodologías tradicionales.

La microcuenca Yucaes, ubicada en el departamento de Ayacucho, constituye un espacio de especial interés debido a su importancia para el abastecimiento hídrico de comunidades rurales y actividades productivas. Sin embargo, enfrenta presiones antrópicas como el cambio de uso del suelo, la deforestación y la variabilidad climática, que amenazan su capacidad de recarga. Esto justifica la necesidad de aplicar herramientas más avanzadas que permitan identificar con mayor exactitud las áreas prioritarias para la recarga hídrica.

En este sentido, la presente investigación plantea como hipótesis general que la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas genera

resultados óptimos y más confiables que los obtenidos con metodologías tradicionales. Para su comprobación, se establecieron los siguientes objetivos: implementar el Algoritmo de Enjambre de Partículas en el análisis espacial de la microcuenca Yucaes, determinar la influencia de las variables fisiográficas, edáficas y climáticas en la recarga hídrica, y comparar el rendimiento del método con modelos empíricos previamente aplicados en otros países.

De esta manera, la investigación busca no solo aportar un avance metodológico al campo de la gestión de recursos hídricos, sino también contribuir con información científica que pueda servir de base para la toma de decisiones en la planificación territorial y la implementación de políticas de conservación y aprovechamiento sostenible del agua en Ayacucho.

La presente investigación está organizada con la siguiente estructura:

■ **Capítulo I:** Planteamiento del Problema

En este primer capítulo se expone el contexto general de la investigación, precisando la situación que motiva el estudio y su relevancia en el ámbito científico y social. Posteriormente, se establece la delimitación del problema, definiendo su alcance espacial, temporal y temático. También se formula el problema de investigación a través de interrogantes concretas que orientan el trabajo. Asimismo, se desarrolla la justificación, destacando la pertinencia académica y la utilidad práctica de la investigación. Finalmente, se identifican las limitaciones que condicionan el estudio y se presentan los objetivos, tanto el general como los específicos.

■ **Capítulo II:** Marco Teórico

Este capítulo comprende la revisión de antecedentes relevantes que sustentan el estudio, permitiendo identificar aportes y vacíos de conocimiento en investigaciones previas. Del mismo modo, se desarrollan las bases teóricas fundamentales que respaldan la investigación, y se establece el marco conceptual, donde se definen los términos clave y categorías analíticas empleadas a lo largo del trabajo.

■ **Capítulo III:** Metodología de la Investigación

En este apartado se describe de manera detallada el enfoque metodológico adoptado. Se especifica el tipo, nivel y diseño de la investigación, así como la población y la muestra de estudio. También se presenta la hipótesis a contrastar y la respectiva operacionalización de variables. De igual forma, se señalan las técnicas e instrumentos utilizados para la recolección de información y las herramientas de análisis estadístico aplicadas.

■ **Capítulo IV:** Resultados

Este capítulo muestra los hallazgos alcanzados en el proceso de investigación. Se presentan los resultados obtenidos de forma ordenada y sistemática, acompañados de cuadros, gráficos y mapas que facilitan su comprensión. Además, se incluye el análisis e interpretación de los mismos, relacionándolos con los objetivos planteados y con el marco teórico de referencia.

■ **Capítulo V:** Conclusiones y Recomendaciones

En el último capítulo se exponen las conclusiones principales del estudio, destacando los aportes más relevantes obtenidos a partir del cumplimiento de los objetivos. Asimismo, se formulan recomendaciones orientadas tanto a la aplicación práctica de los resultados como a la realización de investigaciones futuras que profundicen o amplíen la temática abordada.

Dedicatoria

A Dios, por guiarme siempre con su luz y fortaleza; a mi querida madre Rosalina y a José, por su amor y apoyo incondicional; a mi padre Quintiliano y a mi hermano Kevin, por su ejemplo y aliento constante, quienes han sido el pilar fundamental en este camino.

Agradecimientos

- ☞ Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, por brindarme una sólida formación académica y por ser el espacio donde pude desarrollarme tanto en lo profesional como en lo personal. Gracias a sus docentes y al respaldo institucional, adquirí conocimientos, principios y valores que me acompañarán a lo largo de mi vida profesional. Me honra haber pertenecido a esta prestigiosa casa de estudios.
- ☞ Mi especial agradecimiento al Ingeniero Jaime Leonardo Bendezú Prado, por su constante orientación, compromiso y dedicación durante el desarrollo de este trabajo. Su guía académica, experiencia y disposición fueron fundamentales para el cumplimiento de los objetivos propuestos, aportando significativamente a mi crecimiento profesional y personal.
- ☞ A mi querida familia, mi más profundo reconocimiento y gratitud. Su apoyo incondicional, amor y paciencia estuvieron presentes en cada etapa de este camino. Sus palabras de ánimo, comprensión y sacrificios se convirtieron en la fuerza que me sostuvo en los momentos más difíciles. Este logro no es solo mío, sino también de ustedes.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

AYACUCHO, AGOSTO 2025

JHONY JESUS QUISPE ANCHAYHUA

Índice general

portada	II
Resumen	IX
Abstract	IX
Introducción	IX
Dedicatoria	IX
Agradecimientos	IX
1. Planteamiento del problema	1
1.1. Descripción del problema	1
1.1.1. Internacional	1
1.1.2. Nacional	2
1.1.3. Regional	3
1.2. Delimitación del problema	4
1.2.1. Espacial	4
1.2.2. Temporal	4
1.2.3. Temática y unidad de análisis	4
1.3. Formulación del problema	5
1.3.1. Problema general	5
1.3.2. Problemas específicos	5
1.4. Justificación e importancia	5
1.5. Limitaciones de la investigación	6
1.6. Objetivos	7
1.6.1. Objetivo general	7
1.6.2. Objetivos específicos	7

2. Marco teórico	8
2.1. Antecedentes	8
2.1.1. Investigaciones internacionales	8
2.1.2. Investigaciones nacionales	9
2.2. Bases teóricas	10
2.2.1. Cuencas hidrográficas	10
2.2.2. Clasificación de cuencas hidrográficas	10
2.2.3. La cuenca hidrográfica como sistema	14
2.2.4. Ciclo natural del agua en una cuenca hidrográfica	15
2.2.5. Recarga hídrica	16
2.2.6. Zonas de recarga hídrica en cuencas hidrográficas	17
2.2.7. Clasificación de zonas de recarga hídrica en cuencas hidrográficas	17
2.2.8. Factores que afectan la recarga hídrica	19
2.2.9. Probabilidad de recarga hídrica	20
2.2.10. Metodologías de identificación de zonas de recarga hídrica	20
2.2.11. Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO)	22
2.3. Marco conceptual	24
2.3.1. Factores geofísicos	24
2.3.2. Factores biofísicos	29
2.3.3. Uso/cobertura actual de suelo	30
2.3.4. Factor climático	31
2.3.5. Algoritmo de Óscar Matus modificado	32
2.3.6. Implementación del Algoritmo Enjambre de Partículas	33
3. Método de la investigación	35
3.1. Enfoque	35
3.2. Alcance	35
3.3. Diseño de investigación	36
3.4. Población y muestra	36
3.5. Hipótesis	36
3.5.1. Hipótesis general	36
3.5.2. Hipótesis específicas	36
3.6. Operacionalización de variables	37
3.6.1. Variables	37
3.6.2. Definición conceptual	37
3.6.3. Definición operacional	38
3.7. Técnicas e instrumentos	38
3.8. Técnicas estadísticas aplicadas	39
3.9. Desarrollo del trabajo de tesis	39
3.9.1. Delimitación de la microcuenca Yucaes	41
3.9.2. Mapa raster de pendientes de la microcuenca Yucaes	42
3.9.3. Mapa raster de tipos de suelo de la microcuenca Yucaes	44
3.9.4. Mapa raster de tipos de roca de la microcuenca Yucaes	46

3.9.5. Mapa raster de tipos de cobertura vegetal de la microcuenca Yucaes	48
3.9.6. Mapa raster de uso/cobertura actual de suelo de la microcuenca Yucaes .	50
3.9.7. Mapa raster de distribución de la precipitación en la microcuenca Yucaes	52
3.9.8. Implementación del Algoritmo Enjambre de Partículas en PyThon	73
4. Resultados	79
4.1. Contrastación de hipótesis	79
4.1.1. Primera hipótesis	79
4.1.2. Segunda hipótesis	83
4.1.3. Tercera hipótesis	84
4.1.4. Hipótesis general	87
4.1.5. Contrastación de la hipótesis general	87
5. Conclusiones	88
5.1. Conclusiones	88
5.2. Recomendaciones	89
5.3. Trabajos futuros	89
Bibliografía	91
A. Anexos	
Mapas temáticos	94
B. Anexos	
Matriz de consistencia	104

Índice de figuras

2.1. Clasificación de cuencas hidrográficas según su jerarquía	11
2.2. Clasificación de cuencas hidrográficas según su tamaño	11
2.3. Clasificación de cuencas hidrográficas según su morfología	12
2.4. Clasificación de cuencas hidrográficas según su red de drenaje	13
2.5. Clasificación de cuencas hidrográficas según su climatología	13
2.6. Clasificación de cuencas hidrográficas según su geomorfología	14
2.7. Ciclo natural del agua en una cuenca hidrográfica	16
2.8. Esquema de una zona de recarga hídrica	18
2.9. Funcionamiento del Algoritmo Enjambre de Partículas	24
2.10. Vista satelital de la microcuenca Yucaes	25
2.11. Diagrama de flujo de la implementación del Algoritmo Enjambre de Partículas	34
3.1. Proceso de delimitación de la microcuenca Yucaes	42
3.2. Proceso de reclasificación de pendientes de la microcuenca Yucaes	44
3.3. Proceso de reclasificación de tipos de suelo de la microcuenca Yucaes	46
3.4. Proceso de reclasificación de tipos de roca de la microcuenca Yucaes	48
3.5. Proceso de reclasificación de tipos de cobertura vegetal de la microcuenca Yucaes	50
3.6. Proceso de reclasificación de tipos de uso y cobertura actual de suelo de la microcuenca Yucaes	52
3.7. Estaciones meteorológicas cercanas a la microcuenca Yucaes	70
3.8. Proceso de interpolación de precipitaciones en la microcuenca Yucaes	71
3.9. Zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca Yucaes, obtenido mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas.	78
4.1. Imagen satelital de la microcuenca Yucaes.	80
4.2. Zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca Yucaes, obtenido mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas.	81
4.3. Imagen satelital de la microcuenca Yucaes.	82
4.4. Imagen satelital de la microcuenca Yucaes.	82

4.5. Zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca Yucaes obtenido con la metodología tradicional.	85
4.6. Zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca Yucaes, obtenido mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas.	86

Índice de tablas

2.1. Probabilidad de recarga hídrica según la pendiente de terreno.	26
2.2. Probabilidad de recarga hídrica según el tipo de roca.	27
2.3. Probabilidad de recarga hídrica según el tipo de suelo.	28
2.4. Probabilidad de recarga hídrica según la cobertura vegetal	29
2.5. Probabilidad de recarga hídrica según el tipo de uso y cobertura actual de suelo. .	30
2.6. Probabilidad de recarga hídrica según la distribución de la precipitación.	31
2.7. Clasificación de zonas potenciales de recarga hídrica	33
3.1. Definición operacional de la variables de tesis	38
3.2. Reclasificación de pendientes de la microcuenca Yucaes	43
3.3. Reclasificación de tipos de suelo de la cuenca Yucaes	45
3.4. Reclasificación de tipos de roca de la microcuenca Yucaes	47
3.5. Reclasificación de tipos de cobertura vegetal de la microcuenca Yucaes	49
3.6. Reclasificación de tipos de uso y cobertura actual de suelo de la microcuenca Yucaes	51
3.7. Datos de la estación meteorológica Wayllapampa	54
3.8. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Wayllapampa	54
3.9. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Wayllapampa	55
3.10. Datos de la estación meteorológica Vilcashuamán	56
3.11. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Vilcashuamán	56
3.12. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Vilcashuamán	57
3.13. Datos de la estación meteorológica La Quinoa	57
3.14. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica La Quinoa .	58
3.15. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica La Quinoa .	59
3.16. Datos de la estación meteorológica Lircay	59
3.17. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Lircay	59
3.18. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Lircay	60
3.19. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Lircay	61
3.20. Datos de la estación meteorológica Acobamba	61
3.21. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Acobamba . .	61

3.22. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Acobamba . . .	62
3.23. Datos de la estación meteorológica San Pedro De Cachi	63
3.24. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica San Pedro De Cachi	63
3.25. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica San Pedro De Cachi	64
3.26. Datos de la estación meteorológica Pampas	64
3.27. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Pampas . . .	65
3.28. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Pampas . . .	66
3.29. Datos de la estación meteorológica Huancapi	66
3.30. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Huancapi . .	66
3.31. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Huancapi . .	67
3.32. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Huancapi . .	68
3.33. Datos de la estación meteorológica Quillabamba	68
3.34. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Quillabamba	68
3.35. Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Quillabamba	69
3.36. Datos entrada espaciales de precipitaciones para ArcGIS	70
3.37. Clasificación de la distribución de precipitación en la microcuenca Yucaes	72

Planteamiento del problema

1.1 Descripción del problema

1.1.1 Internacional

La creciente presión sobre los recursos hídricos a nivel internacional se ha visto intensificada por el cambio climático debido al calentamiento global, el crecimiento demográfico y la expansión de actividades industriales y agrícolas. Según la (UNESCO, 2020), cerca del 40% de la población mundial reside en zonas sometidas a estrés hídrico, con una tendencia creciente debido al incremento de la demanda de agua y la disminución de la disponibilidad de fuentes hídricas renovables. Este problema es particularmente crítico en países en vías de desarrollo, donde la falta de infraestructura adecuada y la sobreexplotación de los acuíferos han generado una crisis de disponibilidad de agua potable y afectado de esta manera la producción agrícola.

En este contexto, la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en cuencas hidrográficas se ha convertido en una estrategia clave para la sostenibilidad de los recursos de agua subterránea y superficial. La recarga hídrica es un proceso natural mediante el cual el agua de precipitación o escorrentía se infiltra en el suelo y alcanza los acuíferos. Su estudio y delimitación resultan esenciales para la planificación de la gestión del agua, la conservación de ecosistemas y la reducción del impacto de la explotación de los recursos hídricos. Sin embargo, la identificación de áreas con alto potencial de recarga requiere métodos de análisis avanzados que permitan evaluar múltiples variables físicas y climáticas de manera simultánea.

Los modelos tradicionales para la identificación y delimitación de zonas potenciales de recarga hídrica han estado basados en enfoques determinísticos y empíricos que, si bien han proporcio-

nado resultados aceptables, presentan limitaciones en cuanto a la optimización y precisión de las estimaciones. Métodos como el balance hídrico, la evaluación de la conductividad hidráulica y la interpolación de datos hidrometeorológicos requieren una gran cantidad de datos y suelen verse limitados por la variabilidad espacial y temporal de los factores que influyen en la recarga de los acuíferos.

Para superar estas limitaciones, el uso de técnicas de inteligencia computacional, como el Algoritmo Enjambre de Partículas (PSO), ha emergido como una alternativa eficiente para la optimización de modelos de análisis hidrológico. El PSO es un algoritmo bioinspirado basado en el comportamiento colectivo de enjambres de partículas, como bandadas de aves o cardúmenes de peces, que busca soluciones óptimas a problemas complejos mediante la cooperación y el intercambio de información entre las partículas. En el caso de la identificación de zonas de recarga hídrica, este algoritmo permite optimizar la selección de áreas con mayores probabilidades de infiltración, considerando múltiples variables de manera simultánea, como la precipitación, la pendiente del terreno, el tipo del suelo, la cobertura vegetal, la composición geológica y el uso actual del suelo.

La ventaja del PSO en este tipo de aplicaciones radica en su capacidad para encontrar soluciones óptimas sin necesidad de realizar exhaustivas exploraciones en todo el espacio de búsqueda, lo que lo hace computacionalmente eficiente. A diferencia de los métodos tradicionales, que dependen de ecuaciones predefinidas y datos limitados, el PSO permite modelar sistemas complejos con alta variabilidad y ajustar dinámicamente las condiciones de búsqueda para mejorar la precisión de los resultados.

En este estudio, se implementa el Algoritmo Enjambre de Partículas en el lenguaje de programación Python, aprovechando su flexibilidad y capacidad de procesamiento numérico avanzado. Mediante la programación en este lenguaje, es posible integrar múltiples fuentes de datos y optimizar el análisis de variables hidrológicas y de suelo sin depender de software especializado, lo que facilita la reproducibilidad y escalabilidad del modelo. Este enfoque no solo permite mejorar la precisión en la identificación de zonas de recarga hídrica, sino que también contribuye a la toma de decisiones basada en datos para la gestión sostenible del recurso hídrico.

1.1.2 Nacional

En el territorio peruano, la diversidad climática y la complejidad orográfica generan una distribución altamente heterogénea de los recursos hídricos, lo que dificulta su gestión eficiente y equitativa. Según la Autoridad Nacional del Agua, el 97.7% del agua superficial del país se encuentra en la vertiente amazónica, mientras que la vertiente del Pacífico, donde se concentra más del 60% de la población, dispone de apenas el 1.8% del recurso hídrico (ANA, 2021). Esta asimetría en la disponibilidad del agua ha generado un estrés hídrico significativo, especialmente en las regiones costeras y andinas, donde la escasez se ve agravada por la sobreexplotación de acuíferos y la variabilidad climática, por este motivo resulta primordial la identificación de zonas con alto potencial de recarga hídrica.

Según las proyecciones del Ministerio del Ambiente indican que el cambio climático reducirá progresivamente la disponibilidad hídrica en varias cuencas hidrográficas del país, debido al retroceso acelerado de los glaciares andinos y la reducción de precipitaciones en ciertas zonas

(MINAM, 2020). Estudios recientes evidencian que la superficie glaciar en los Andes peruanos ha disminuido en más del 50 % en los últimos 50 años, afectando directamente la capacidad de regulación hídrica natural de las cuencas (INAIGEM, 2019).

Además, en las zonas rurales, la problemática del acceso al agua es aún más crítica. Datos del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego revelan que aproximadamente el 35 % de las comunidades rurales no cuenta con acceso seguro y continuo a fuentes de agua potable, lo que repercute en la seguridad alimentaria y la salud de las poblaciones (MIDAGRI, 2019). Esta situación exige la implementación de estrategias basadas en criterios científicos para identificar, proteger y aprovechar de manera sostenible las zonas de recarga hídrica, garantizando la conservación de los ecosistemas y la seguridad hídrica de las comunidades.

En este contexto, la aplicación de metodologías basadas en optimización bioinspirada, como el Algoritmo Enjambre de Partículas (PSO), representa una alternativa innovadora para la identificación eficiente de áreas prioritarias para la recarga hídrica.

La implementación de estas técnicas en la planificación y gestión de los recursos hídricos podría contribuir significativamente a la resiliencia hídrica del país, optimizando la toma de decisiones para garantizar la sostenibilidad del agua a largo plazo.

1.1.3 Regional

La región de Ayacucho, ubicada en la sierra sur del país, presenta una topografía accidentada con altitudes que oscilan entre los 251 y 5505 m.s.n.m., lo que genera una alta variabilidad climática y condiciones hidrogeológicas complejas (INDECI, 2019). Su clima es predominantemente seco, con precipitaciones estacionales concentradas entre los meses de diciembre y marzo, seguidas de largos períodos de estiaje que afectan la disponibilidad hídrica en las cuencas hidrográficas (SENAMHI, 2021).

Uno de los problemas más críticos en la región es la disponibilidad y acceso al agua, especialmente en las zonas rurales. Según el Plan de Desarrollo Regional Concertado de Ayacucho 2021-2026, más del 50 % de las áreas rurales enfrentan dificultades significativas en el acceso al recurso hídrico, lo que impacta negativamente en la producción agrícola, la seguridad alimentaria y el desarrollo socioeconómico (GOREAYA, 2021). La escasez de agua se ve agravada por factores como la deforestación, la degradación del suelo y el incremento de la demanda hídrica en sectores productivos como la agricultura y la ganadería.

El retroceso glaciar en las zonas altoandinas de Ayacucho también ha reducido la capacidad de regulación natural del agua, afectando los caudales de los ríos y la capacidad de recarga de los acuíferos (INAIGEM, 2019). Estudios del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña advierten que la pérdida de cobertura glaciar en los Andes del sur peruano supera el 40 % en las últimas décadas, lo que compromete la disponibilidad de agua en los ecosistemas que dependen de estos reservorios naturales (INAIGEM, 2019).

Ante esta situación, es fundamental desarrollar estrategias para la identificación y protección de zonas potenciales de recarga hídrica. La aplicación de metodologías avanzadas, como el Algoritmo Enjambre de Partículas (PSO), permite optimizar el análisis de múltiples variables que influyen en la recarga de acuíferos, facilitando la toma de decisiones en la gestión integral de los recursos hídricos. Si bien tradicionalmente se han utilizado herramientas de Sistemas de

Información Geográfica para este propósito, la implementación de modelos de optimización en entornos computacionales independientes representa una alternativa eficiente para evaluar la dinámica hídrica en la región. La combinación de estas técnicas puede mejorar la planificación del uso del agua en Ayacucho, fortaleciendo la resiliencia de las comunidades rurales ante la variabilidad climática y la crisis hídrica.

1.2 Delimitación del problema

1.2.1 Espacial

El presente estudio se centra en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, dentro de la región Ayacucho, utilizando el Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO) mediante el lenguaje de programación Python. Para ello, se seleccionarán áreas donde la interacción de factores clave, como la pendiente de terreno, precipitación, cobertura vegetal, tipo de suelo, uso actual del suelo y la configuración geológica, influya significativamente en el potencial de recarga hídrica, permitiendo así una evaluación más precisa y optimizada de estas zonas estratégicas.

1.2.2 Temporal

La presente investigación se llevó a cabo entre marzo y agosto de 2025, período durante el cual se desarrolló y se validó un código basado en el Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO) mediante el lenguaje de programación Python para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, dentro de la región Ayacucho. Este proceso incluirá la integración y análisis de factores clave, como la pendiente de terreno, precipitación, cobertura vegetal, tipo de suelo, uso actual del suelo y la configuración geológica, con el fin de optimizar la precisión en la delimitación de estas áreas estratégicas.

1.2.3 Temática y unidad de análisis

☞ **Temática:** La presente investigación se enmarca en el ámbito de la gestión integrada de los recursos hídricos, con énfasis en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho. Para ello, se emplearon técnicas de inteligencia artificial y métodos de optimización computacional, implementando el Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO) en el lenguaje de programación Python. El objetivo principal fue identificar las áreas estratégicas para la recarga hídrica, contribuyendo a una gestión sostenible del recurso hídrico en la zona de estudio.

☞ **Unidad de análisis:** La unidad de análisis corresponde a la microcuenca Yucaes, ubicada en la región Ayacucho, Perú. En este ámbito espacial se aplicó el Algoritmo de Enjambre de Partículas implementado en el lenguaje de programación Python para la identificación de áreas con alto potencial de recarga hídrica, considerando factores clave, como la pendiente de terreno, precipitación, cobertura vegetal, tipo de suelo, uso actual del suelo y la configuración geológica, de esta microcuenca.

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema general

¿Es posible la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025?

1.3.2 Problemas específicos

- ☞ ¿Cómo se puede implementar el Algoritmo de Enjambre de Partículas para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025?
- ☞ ¿Cómo influye la pendiente del terreno, el tipo de suelo, el tipo de roca, la cobertura vegetal, el uso del suelo y la precipitación en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025?
- ☞ ¿Cuál es el rendimiento del Algoritmo Enjambre de Partículas en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025, en comparación con métodos tradicionales?

1.4 Justificación e importancia

- ☞ **Justificación:** La presente investigación surge de la necesidad de identificar y proteger zonas estratégicas de recarga hídrica en la región Ayacucho, donde la disponibilidad de agua se encuentra condicionada por factores climáticos, geológicos y de cobertura vegetal. La adecuada gestión de estos recursos resulta fundamental para garantizar la sostenibilidad del abastecimiento de agua, especialmente en territorios expuestos a la escasez hídrica y a los efectos del cambio climático.

Desde un enfoque metodológico, el estudio incorpora el Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO) implementado en el lenguaje de programación Python, herramienta de optimización que posibilita el procesamiento eficiente de grandes volúmenes de información geoespacial. Su aplicación en la identificación de áreas con mayor potencial de recarga hídrica representa un aporte innovador dentro de la hidrología computacional, al integrar técnicas de inteligencia artificial y análisis espacial en la gestión de cuencas.

Asimismo, los resultados de esta investigación no solo contribuirán al conocimiento científico, sino que también fortalecerán la planificación territorial hídrica y la toma de decisiones en materia de conservación, favoreciendo la sostenibilidad de los ecosistemas y el bienestar de las comunidades locales dependientes de este recurso vital.

- ☞ **Importancia:** La relevancia de este estudio radica en su contribución directa al manejo sostenible del agua, recurso esencial para el desarrollo social, económico y ambiental de la región Ayacucho. La identificación precisa de zonas con alto potencial de recarga hídrica permitirá priorizar acciones de conservación de suelos, reforestación y protección ambiental,

mejorando la infiltración y la disponibilidad de agua subterránea en escenarios de creciente presión hídrica.

De igual manera, la incorporación de algoritmos de optimización e inteligencia artificial en el análisis hidrológico representa una innovación metodológica replicable en otras cuencas con problemáticas similares. Esto abre nuevas perspectivas para el uso de modelos computacionales en el ámbito de la gestión de los recursos hídricos, incrementando la precisión, objetividad y confiabilidad de los diagnósticos generados.

Finalmente, la investigación ofrece una base científica sólida para el diseño de políticas públicas orientadas a la seguridad hídrica y a la conservación de ecosistemas estratégicos, contribuyendo a la construcción de estrategias efectivas de adaptación frente al cambio climático y de resiliencia en comunidades vulnerables.

1.5 Limitaciones de la investigación

☞ **Disponibilidad y calidad de los datos:** La confiabilidad en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica estuvo directamente condicionada por la disponibilidad de datos, resolución de data espacial y temporal, así como por la precisión de los datos empleados. Entre los insumos críticos que se consideraron fueron:

- ☞ Modelos de elevación digital (DEM), cuya resolución determina el nivel de detalle en el cálculo de pendientes, acumulación de flujo y delimitación de cuencas.
- ☞ Mapas raster de pendiente, generados a partir del DEM, que permiten identificar gradientes topográficos relevantes para los procesos de infiltración en las cuencas.
- ☞ Mapas raster de tipos de suelo, cuya calidad depende de estudios edafológicos detallados que condicionan la capacidad de infiltración y retención hídrica de las cuencas.
- ☞ Mapas de litología o tipo de roca, que determinan la permeabilidad y porosidad del sustrato de la cuenca.
- ☞ Mapas de cobertura vegetal y de uso del suelo, indispensables para evaluar la evapotranspiración, el grado de impermeabilización y la protección frente a la erosión en las cuencas.
- ☞ Registros climáticos (mapas raster de precipitación y series históricas de registros pluviométricos), que requieren alta resolución temporal y espacial para reflejar la variabilidad de las precipitaciones en las cuencas.

Las limitaciones más significativas dentro de la calidad de datos surgieron cuando la información estuvo disponible únicamente en resoluciones gruesas (30 m) y provenía de fuentes con baja actualización temporal, lo que redujo la capacidad de capturar fenómenos locales relevantes. Asimismo, la carencia de bases de datos homogéneas y estandarizadas generó la necesidad de procesos de interpolación, corrección de datos, incrementando la incertidumbre en los resultados finales.

☞ **Validación en campo:** La validación de los resultados mediante mediciones en campo es fundamental para garantizar la confiabilidad de las investigaciones de este tipo. Sin

embargo, las limitaciones en el acceso a determinadas áreas de estudio, debido a factores geográficos, económicos y administrativos, dificultaron la ejecución de esta fase, por este motivo no se validó en campo.

Asimismo, la escasez de estudios previos en la región que emplearan metodologías similares restringió la posibilidad de realizar comparaciones directas y de fortalecer la validación de los resultados obtenidos con el Algoritmo Enjambre de Partículas.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Identificar zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025.

1.6.2 Objetivos específicos

- ☞ Implementar el Algoritmo de Enjambre de Partículas para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025.
- ☞ Determinar la influencia de la pendiente del terreno, el tipo de suelo, el tipo de roca, la cobertura vegetal, el uso del suelo y la precipitación en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025.
- ☞ Determinar el rendimiento del Algoritmo Enjambre de Partículas en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025, en comparación con métodos tradicionales.

2.1 Antecedentes

2.1.1 Investigaciones internacionales

Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica (Matus et al., 2009). Este boletín técnico presenta una guía metodológica para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica, aplicada en la subcuenca del río Jucapa, Nicaragua. Los autores proponen un enfoque que combina técnicas geoespaciales con la participación activa de actores locales, con el fin de priorizar áreas críticas para la conservación y gestión sostenible del agua. La guía incluye herramientas prácticas para el mapeo participativo, el análisis de suelos, cobertura vegetal y prácticas de uso de la tierra, destacando la importancia de integrar el conocimiento local en la planificación hidrológica.

GIS-based recharge estimation by coupling surface-subsurface water balances (Batelaan & De Smedt, 2015). Esta investigación se llevó a cabo en Bélgica con el objetivo de desarrollar un modelo de recarga hídrica basado en SIG y modelado hidrológico. Implementaron un método de balance hídrico utilizando el modelo *WetSpass*, que permitió simular los procesos de evaporación, escorrentía y recarga en diferentes tipos de suelos y coberturas vegetales. Sus resultados mostraron que la recarga varía significativamente dependiendo de la pendiente del terreno y las características geológicas.

Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques (Magesh et al., 2019). En este estudio, desarrollaron un modelo en la India combinando teledetección y análisis multicriterio en SIG para

identificar áreas con alto potencial de recarga. Consideraron variables como geomorfología, tipo de suelo, densidad de drenaje y pendiente, aplicando el método de análisis jerárquico (AHP) para ponderar los factores. Los resultados permitieron generar mapas de aptitud hídrica que han sido utilizados en la planificación de proyectos de conservación de agua.

Application of artificial neural networks for groundwater recharge potential mapping in Bangladesh (Chowdhury et al., 2020). Realizaron un estudio en Bangladesh aplicando redes neuronales artificiales (RNA) combinadas con algoritmos de optimización para predecir la capacidad de recarga de acuíferos. Compararon la efectividad de modelos tradicionales, como el de Penman-Monteith, con enfoques basados en aprendizaje automático, encontrando que las redes neuronales mejoraban la precisión en un 20 %.

Application of swarm intelligence algorithms for groundwater potential mapping in semi-arid regions (Rahmati et al., 2021). Aplicaron el Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO) en combinación con técnicas de aprendizaje automático para modelar zonas de recarga en cuencas de Irán. Su investigación mostró que PSO mejoraba la optimización de parámetros en comparación con métodos deterministas, permitiendo identificar áreas estratégicas con mayor precisión.

Guía para la localización y gestión de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua (Villaruel Coca et al., 2024). Este estudio establece un marco metodológico integral y aplicable para la identificación, delimitación y gestión estratégica de zonas de recarga hídrica, integrando de manera sinérgica Enfoques Basados en la Naturaleza (EbN) con sistemas de conocimiento local y comunitario. Su contribución central radica en el desarrollo de instrumentos técnicos y participativos concretos que facilitan la incorporación de criterios hidrológicos en la planificación territorial, con el objetivo explícito de fortalecer la governance del agua y la conservación de los servicios ecosistémicos hidrológicos. La propuesta metodológica no solo permite priorizar áreas críticas para la recarga acuífera, sino que también provee un conjunto de orientaciones para el diseño e implementación de medidas de conservación, restauración y manejo sostenible adaptadas a contextos socioecológicos específicos

2.1.2 Investigaciones nacionales

Identificación de zonas de recarga hídrica en la sierra peruana mediante SIG y análisis multicriterio (López et al., 2016). Desarrollaron una metodología basada en SIG y análisis multicriterio para identificar zonas de recarga hídrica en la sierra peruana. Su estudio utilizó datos de uso del suelo, pendientes y precipitación, aplicando un sistema de ponderación basado en el método de Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Sus hallazgos permitieron la zonificación de áreas prioritarias para la conservación del agua subterránea.

Efecto del cambio de uso del suelo en la recarga hídrica en la cuenca del río Mantaro. En esta investigación, (Gómez et al., 2019) realizaron un estudio en la cuenca del río Mantaro, donde analizaron el impacto de la deforestación y el cambio de uso del suelo sobre la recarga de acuíferos. Utilizaron modelos hidrológicos distribuidos y datos satelitales para cuantificar las variaciones en la infiltración, concluyendo que la deforestación reduce significativamente la capacidad de almacenamiento de agua en el subsuelo.

Estimación de la recarga hídrica en la región Cusco mediante teledetección y aná-

lisis estadístico. En esta investigación, (Quispe et al., 2021) utilizaron imágenes satelitales y técnicas estadísticas para estimar la recarga hídrica en la región de Cusco. Aplicaron modelos de regresión espacial para correlacionar variables como índices de vegetación (NDVI), precipitación y permeabilidad del suelo. Su estudio resaltó la importancia de contar con datos geospaciales actualizados para mejorar la exactitud de los modelos de recarga hídrica.

2.2 Bases teóricas

Esta investigación se sustenta en los principios fundamentales de la hidrología y la geología, complementados con el uso de modelos de elevación digital (DEM) como herramientas clave. Estos campos del conocimiento son esenciales para comprender la dinámica del agua y la estructura del terreno, elementos cruciales para identificar áreas con potencial de recarga hídrica en cuencas hidrográficas.

El estudio integra un enfoque optimizado mediante el Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO), una técnica de inteligencia computacional. Este algoritmo, implementado en Python, optimiza la integración de múltiples variables para evaluar las condiciones que favorecen la infiltración del agua en el subsuelo.

2.2.1 Cuencas hidrográficas

Una cuenca hidrográfica es un sistema natural delimitado por divisorias de aguas, donde toda la escorrentía superficial y subsuperficial converge hacia un único punto de drenaje, como un río, lago, embalse o acuífero subterráneo (Villón, 2002). Está compuesta por diversos elementos, incluyendo la red de drenaje, el relieve, el clima, el suelo, la vegetación y las actividades humanas, los cuales influyen en su dinámica hidrológica (De Moya, 1992).

Desde el punto de vista de la gestión del agua, la cuenca hidrográfica se considera la unidad fundamental para la planificación y administración de los recursos hídricos, ya que permite evaluar la disponibilidad, calidad y uso del agua en un territorio determinado ((GWP), 2009).

2.2.2 Clasificación de cuencas hidrográficas

La clasificación de cuencas hidrográficas es fundamental para la gestión del agua, el diseño de infraestructuras y la planificación ambiental. Existen diversos criterios de clasificación, los cuales han sido desarrollados por múltiples autores en función de la hidrología, la geomorfología y la climatología de las cuencas.

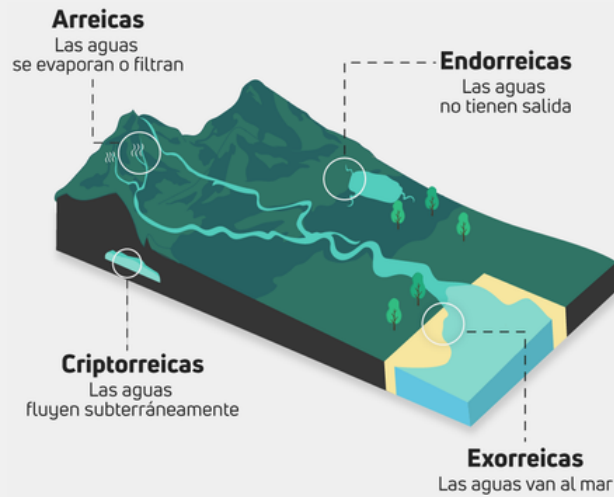
2.2.2.1 Según su jerarquía o nivel de ordenamiento

Esta clasificación se basa en la forma en que la cuenca drena sus aguas y ha sido utilizada por (Horton, 1945) y (Strahler, 1964) en el análisis de redes hidrográficas:

- ☞ **Cuenca exorreica:** Sus aguas drenan hacia el océano o mares abiertos.
- ☞ **Cuenca endorreica:** No tiene salida al océano, y sus aguas se acumulan en lagos o humedales internos.

- ☞ **Cuenca arreica:** No tiene un sistema de drenaje permanente debido a la alta evaporación o infiltración.

Figura 2.1: Clasificación de cuencas hidrográficas según su jerarquía



Fuente: (MasterGIS, 2025).

2.2.2.2 Según su tamaño

Según (Chorley et al., 1984), las cuencas pueden clasificarse en función de su área:

- ☞ **Cuenca mayor:** Más de 10,000 km².
- ☞ **Cuenca mediana:** Entre 1,000 km² y 10,000 km².
- ☞ **Cuenca menor:** Menos de 1,000 km².
- ☞ **Microcuenca:** Menos de 100 km².

Figura 2.2: Clasificación de cuencas hidrográficas según su tamaño



Fuente: (MasterGIS, 2025).

2.2.2.3 Según la morfología

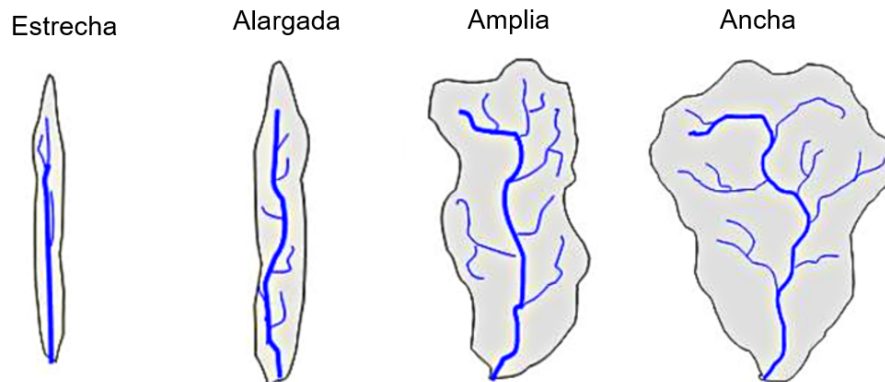
La forma de la cuenca influye en la respuesta hidrológica ante eventos de precipitación (Horton, 1945):

$$Ff = \frac{A}{Lc^2} \quad (2.1)$$

Donde Ff es el factor de forma de Horton, A es el área de la cuenca (m^2) y Lc es la longitud del cauce principal (m), y la clasificación es la siguiente:

- ☞ **Estrecha (rango de Ff : 0 a 0.25)**: Escurrimiento gradual, menor riesgo de crecidas y mayor tiempo de concentración.
- ☞ **Alargada (rango de Ff : 0.25 a 0.50)**: Comportamiento intermedio y moderada concentración de caudal.
- ☞ **Amplia (rango de Ff : 0.50 a 0.75)**: Mayor concentración de caudal y tiempos de concentración medios.
- ☞ **Ancha (rango de Ff : 0.75 a 1)**: Alta concentración de caudal, mayor riesgo de inundaciones y tiempos de concentración cortos.

Figura 2.3: Clasificación de cuencas hidrográficas según su morfología



Fuente: (MasterGIS, 2025).

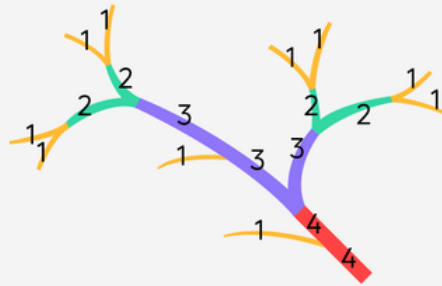
2.2.2.4 Según la red de drenaje

Este método se basa en la jerarquización de los cursos de agua (Strahler, 1964):

- ☞ **Orden 1**: Ríos sin afluentes.
- ☞ **Orden 2**: Unión de dos ríos de orden 1.
- ☞ **Orden 3**: Unión de dos ríos de orden 2, y así sucesivamente.

Este criterio es utilizado en modelos de simulación hidrológica y en algoritmos de procesamiento digital de imágenes para la delimitación de cuencas.

Figura 2.4: Clasificación de cuencas hidrográficas según su red de drenaje



Fuente: (MasterGIS, 2025).

2.2.2.5 Según la climatología

Según (Linsley et al., 1975), las cuencas pueden clasificarse por su régimen hídrico:

- ☞ **Cuencas húmedas:** Alta precipitación, baja evapotranspiración, con abundante vegetación.
- ☞ **Cuencas secas:** Baja precipitación, alta evapotranspiración, generalmente en zonas áridas.
- ☞ **Cuencas nivales:** Dominadas por nieve y glaciares, con escurrimiento estacional.

Figura 2.5: Clasificación de cuencas hidrográficas según su climatología



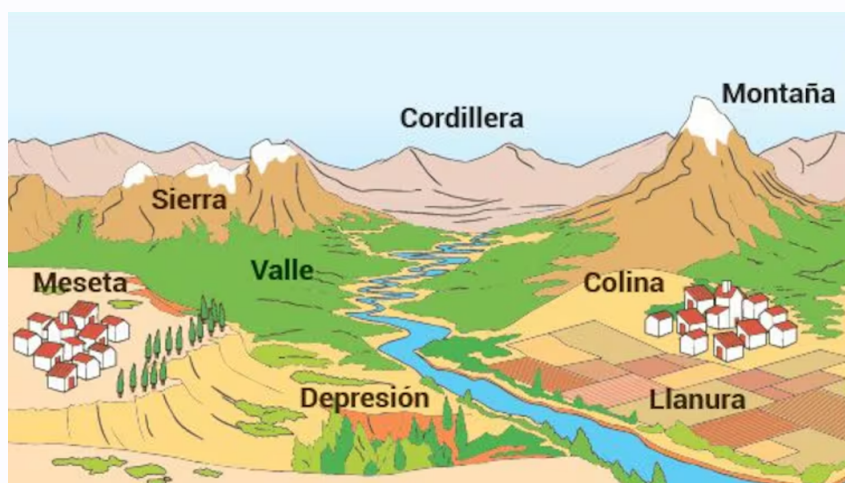
Fuente: (MasterGIS, 2025).

2.2.2.6 Según la geomorfología

Según (Leopold et al., 1964), la clasificación geomorfológica se basa en el relieve:

- ☞ **Cuencas de alta montaña:** Fuertes pendientes, alta erosión, escorrentía rápida.
- ☞ **Cuencas de baja montaña:** Pendientes moderadas, menor escorrentía superficial.
- ☞ **Cuencas de llanura:** Relieve suave, alta sedimentación, drenaje lento.

Figura 2.6: Clasificación de cuencas hidrográficas según su geomorfología



Fuente: (MasterGIS, 2025).

2.2.3 La cuenca hidrográfica como sistema

Una cuenca hidrográfica es una unidad geográfica definida por la topografía, donde todas las aguas superficiales y subterráneas convergen hacia un punto común, como un río, lago o acuífero. Desde una perspectiva sistémica, una cuenca hidrográfica puede ser vista como un sistema dinámico compuesto por múltiples interacciones físicas, biológicas y antrópicas, organizadas en tres zonas funcionales principales (Chow et al., 1988):

- ☞ **Zona de Captación:** También conocida como zona de recarga, es la región donde ocurre la precipitación y el inicio del proceso de escorrentía. Incluye áreas montañosas, bosques y llanuras que favorecen la infiltración del agua en el suelo. Esta zona es fundamental para la conservación del recurso hídrico, ya que las características del suelo, la vegetación y la geología determinan la eficiencia de la recarga de acuíferos (Matus et al., 2009).
- ☞ **Zona de Almacenamiento:** Representa los espacios donde el agua se retiene de forma temporal o permanente en cuerpos superficiales como lagos, embalses y humedales, o en reservorios subterráneos como acuíferos. Esta zona actúa como un amortiguador del sistema, regulando los caudales y minimizando los efectos de eventos extremos como sequías o inundaciones. La eficiencia del almacenamiento depende de la permeabilidad del suelo y de la capacidad de retención de los ecosistemas (Carrica & Lexow, 2004).

- ☛ **Zona de Descarga:** Es el área donde el agua abandona el sistema, ya sea a través de la descarga en ríos y arroyos, la infiltración hacia capas profundas o la evaporación. En esta zona, el agua cumple funciones ecológicas esenciales, proporcionando hábitats acuáticos y abasteciendo a comunidades humanas para el consumo, la agricultura y la industria. La gestión adecuada de la zona de descarga es crucial para evitar la sobreexplotación de los recursos hídricos y mantener el equilibrio ecosistémico (Chamorro, 2016).

2.2.4 Ciclo natural del agua en una cuenca hidrográfica

El ciclo hidrológico en una cuenca hidrográfica constituye un proceso natural y continuo mediante el cual el agua circula entre la atmósfera, la superficie terrestre y el subsuelo, manteniendo un equilibrio dinámico entre sus diferentes componentes. La principal entrada de agua a la cuenca es la precipitación, que se manifiesta en forma de lluvia, nieve o granizo. Parte de esta precipitación es retenida por la cobertura vegetal a través de la intercepción, retornando posteriormente a la atmósfera en forma de vapor de agua (Chow et al., 1988).

El agua que alcanza la superficie puede infiltrarse en el suelo, proceso que depende de factores como la textura, la estructura y la capacidad de almacenamiento del terreno. La infiltración constituye una vía fundamental para la recarga de acuíferos y el desarrollo del flujo subterráneo, que se desplaza bajo tierra y emerge en forma de manantiales o contribuye al caudal base de los ríos, garantizando su continuidad en períodos de estiaje. En contraste, cuando la intensidad o el volumen de la precipitación superan la capacidad de infiltración, se genera la escorrentía superficial, que concentra el agua en quebradas y cauces fluviales hasta alcanzar lagos, humedales o el mar (Chow et al., 1988).

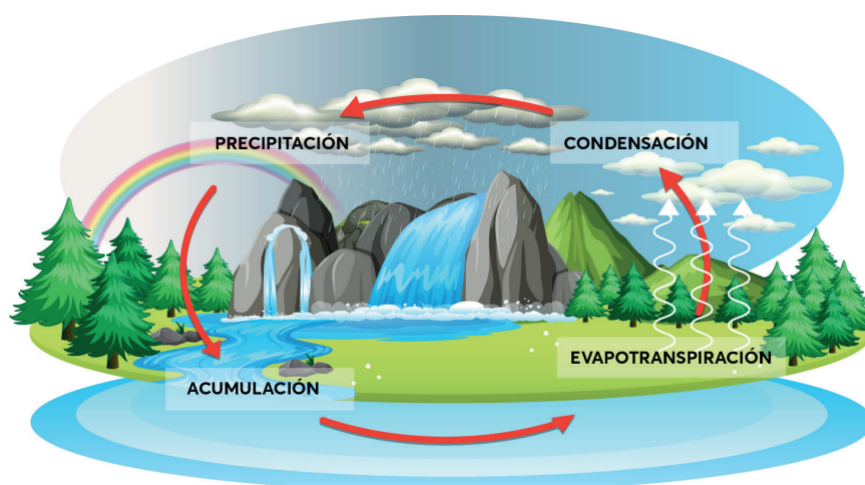
Otro componente esencial es la evapotranspiración, entendida como la suma de la evaporación directa desde suelos, cuerpos de agua y superficies húmedas, y la transpiración de las plantas. Este proceso constituye una de las principales pérdidas de agua de la cuenca hacia la atmósfera y está condicionado por variables climáticas, fisiológicas y edáficas (Chow et al., 1988).

El agua dentro de la cuenca también puede permanecer temporalmente en distintos almacenamientos naturales, como glaciares, nieves de alta montaña, lagos, humedales, embalses o acuíferos subterráneos, que actúan como reguladores hídricos y permiten amortiguar la variabilidad de los aportes hídricos a lo largo del tiempo.

Finalmente, el ciclo se cierra con el retorno del agua a la atmósfera a través de la evaporación, transpiración o sublimación, manteniendo así un proceso dinámico y constante de circulación. Este ciclo puede representarse en forma de balance hídrico mediante la expresión:

$$P = Q + ET + \Delta S \quad (2.2)$$

donde: P corresponde a la precipitación, Q a la escorrentía total (superficial y subterránea), ET a la evapotranspiración, y ΔS a la variación en el almacenamiento hídrico.

Figura 2.7: *Ciclo natural del agua en una cuenca hidrográfica*

Fuente: (MasterGIS, 2025).

2.2.5 Recarga hídrica

La recarga hídrica es un proceso hidrológico fundamental que describe cómo el agua proveniente de precipitaciones, escorrentía superficial o fuentes artificiales penetra a través del suelo y alcanza los acuíferos subterráneos. Este fenómeno es esencial para mantener el equilibrio del ciclo hidrológico, garantizando la disponibilidad de agua dulce para consumo humano, actividades agrícolas, ecosistemas naturales y procesos industriales (Batelaan & De Smedt, 2015).

La recarga hídrica no solo depende de la cantidad de agua que llega al suelo, sino también de la capacidad del terreno para infiltrarla y almacenarla. En este sentido, la recarga puede ser vista como el motor que alimenta los acuíferos, permitiendo su renovación y sostenibilidad a largo plazo. Según (Freeze & Cherry, 1979), la recarga hídrica puede clasificarse en tres categorías principales:

- ☞ **Recarga directa:** Ocurre cuando el agua de lluvia o nieve derretida se infiltra directamente en el suelo y alcanza el nivel freático sin ser interceptada por cuerpos superficiales. Este tipo de recarga es común en áreas con suelos permeables, pendientes moderadas y vegetación natural. Por ejemplo, en regiones montañosas con suelos arenosos, la recarga directa puede representar hasta el 30-40% de la precipitación total.
- ☞ **Recarga indirecta:** Se produce cuando el agua de escorrentía superficial fluye hacia cuerpos de agua (ríos, lagos o embalses) y desde allí se infiltra hacia los acuíferos. Este proceso es especialmente relevante en cuencas con redes fluviales densas y en zonas donde los ríos actúan como drenajes naturales que conectan las aguas superficiales con las subterráneas. Un ejemplo notable es la cuenca del Amazonas, donde los ríos contribuyen significativamente a la recarga de los acuíferos subyacentes.
- ☞ **Recarga artificial:** Es inducida por actividades humanas mediante técnicas específicas

diseñadas para aumentar la infiltración del agua hacia los acuíferos. Ejemplos incluyen pozos de inyección, zanjas de infiltración, sistemas de drenaje controlado y embalses artificiales. La recarga artificial es crucial en regiones donde la recarga natural es insuficiente debido a factores como urbanización, deforestación o cambio climático.

2.2.6 Zonas de recarga hídrica en cuencas hidrográficas

Las zonas de recarga hídrica en una cuenca son áreas donde el agua de precipitación o escorrentía superficial se infiltra en el suelo y contribuye a la alimentación de los acuíferos subterráneos. Estas zonas son fundamentales para la regulación del ciclo hidrológico, la sostenibilidad de los recursos hídricos y la mitigación de sequías (Freeze & Cherry, 1979).

2.2.7 Clasificación de zonas de recarga hídrica en cuencas hidrográficas

Las zonas de recarga hídrica desempeñan un papel fundamental en la regulación del ciclo hidrológico, permitiendo la infiltración del agua en el suelo y su posterior almacenamiento en acuíferos. La identificación y clasificación de estas zonas es clave para la gestión sostenible del recurso hídrico y la planificación del uso del suelo. Según diversos autores, la recarga hídrica puede clasificarse en función de su intensidad, origen y función dentro de la cuenca hidrográfica.

2.2.7.1 Según la intensidad de recarga

La intensidad de recarga depende de la permeabilidad del suelo y la cantidad de agua que logra infiltrarse en el subsuelo:

- ☞ **Zonas de alta recarga:** Son áreas con alta permeabilidad y gran cantidad de agua infiltrada. Suelen estar compuestas por suelos arenosos, gravas y terrenos cársticos, lo que facilita el paso del agua hacia los acuíferos subterráneos (Freeze & Cherry, 1979).
- ☞ **Zonas de recarga media:** Presentan una infiltración moderada, con suelos francoarenosos y una cobertura vegetal densa que ayuda a retener la humedad y favorecer la infiltración (Villón, 2002).
- ☞ **Zonas de baja recarga:** Se caracterizan por su baja permeabilidad, lo que dificulta la infiltración del agua. Generalmente, están formadas por suelos arcillosos o compactados, lo que incrementa la escorrentía superficial (Chorley et al., 1984).

2.2.7.2 Según el origen del agua de recarga

La recarga hídrica puede clasificarse también en función del proceso por el cual el agua alcanza los acuíferos:

- ☞ **Recarga directa:** Ocurre cuando el agua de precipitación se infiltra directamente en el suelo y llega al acuífero sin intermediarios. Este proceso es común en suelos permeables y zonas de baja pendiente (Freeze & Cherry, 1979).
- ☞ **Recarga indirecta:** Se da cuando el agua se acumula en cuerpos de agua superficiales como ríos, lagos o humedales antes de infiltrarse hacia los acuíferos subterráneos. Este tipo

de recarga suele depender de la conexión hidráulica entre el cuerpo de agua y el subsuelo.

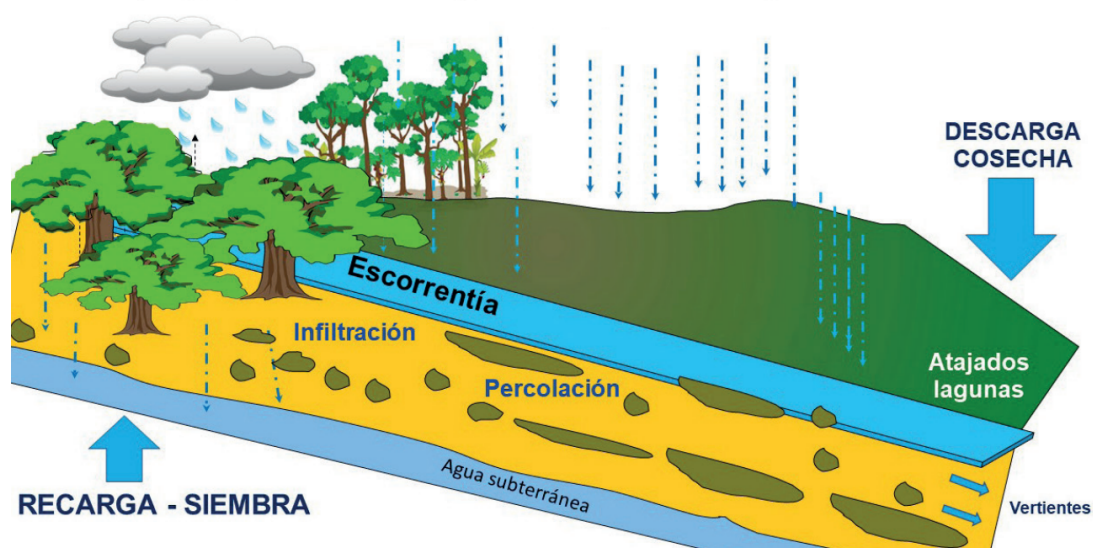
- ☞ **Recarga artificial:** Resultado de la intervención humana mediante la implementación de técnicas como pozos de inyección, zanjas de infiltración y represas filtrantes, utilizadas para mejorar la disponibilidad de agua subterránea (Leopold et al., 1964).

2.2.7.3 Según su función en la cuenca

Las zonas de recarga hídrica también pueden clasificarse según su rol dentro de la dinámica de una cuenca hidrográfica:

- ☞ **Zonas de captación primaria:** Son las áreas donde la infiltración es máxima y la mayor parte del agua contribuye a la recarga de los acuíferos. Estas zonas suelen estar en las partes altas de la cuenca, donde la vegetación y la permeabilidad del suelo favorecen la retención de agua (Freeze & Cherry, 1979).
- ☞ **Zonas de tránsito:** Son áreas donde el agua infiltrada se desplaza a través del subsuelo antes de alcanzar el acuífero o ser descargada en otro punto de la cuenca. En estas zonas, la geología y la estructura del suelo juegan un papel clave en la conducción del flujo subterráneo (Horton, 1945).
- ☞ **Zonas de descarga:** Son áreas donde el agua subterránea aflora a la superficie en forma de manantiales, humedales o filtraciones. Estas zonas son importantes para el mantenimiento del caudal base de los ríos y la preservación de ecosistemas dependientes del agua subterránea (Villón, 2002).

Figura 2.8: Esquema de una zona de recarga hídrica



Fuente: (MasterGIS, 2025).

2.2.8 Factores que afectan la recarga hídrica

La recarga hídrica en cuencas hidrográficas es un proceso clave en el ciclo hidrológico, pues permite la reposición de los acuíferos y el mantenimiento de los flujos base en ríos y manantiales (Todd & Mays, 2005). Este proceso está influenciado por múltiples factores de origen natural y antrópico que determinan la cantidad de agua que se infiltra en el subsuelo y su destino final (Brutsaert, 2005). A continuación, se presentan los principales factores que afectan la recarga hídrica en cuencas hidrográficas.

2.2.8.1 Factores climáticos

- ☞ **Precipitación:** La precipitación es el factor principal que determina la cantidad de agua disponible para la recarga. Su intensidad, duración y distribución espacial influyen en la capacidad de infiltración del suelo (Dingman, 2015).
- ☞ **Evapotranspiración:** La evapotranspiración, que combina la evaporación desde la superficie y la transpiración de las plantas, reduce la cantidad de agua disponible para la recarga (Allen et al., 1998).
- ☞ **Temperatura:** Las altas temperaturas aumentan la evapotranspiración, disminuyendo la cantidad de agua que puede infiltrarse y recargar los acuíferos (Brutsaert, 2005).
- ☞ **Humedad relativa y vientos:** La humedad relativa influye en la tasa de evaporación, mientras que los vientos pueden acelerar la pérdida de humedad en la superficie (Dingman, 2015).

2.2.8.2 Factores geológicos y edáficos

- ☞ **Tipo de roca y estructura geológica:** Las formaciones geológicas determinan la capacidad de almacenamiento y transmisión del agua subterránea. Rocas porosas como las calizas y areniscas permiten una mayor recarga, mientras que rocas ígneas como los granitos limitan el flujo de agua (Fetter, 2001).
- ☞ **Tipo de suelo y permeabilidad:** Los suelos arenosos favorecen la infiltración y recarga, mientras que los suelos arcillosos dificultan este proceso (Hillel, 1998).
- ☞ **Profundidad del nivel freático:** Si el nivel freático es muy superficial, la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo es limitada, lo que afecta la recarga (Todd & Mays, 2005).

2.2.8.3 Factores hidrológicos

- ☞ **Escurrentía superficial:** En cuencas con alta escurrentía, una gran parte del agua precipitada fluye hacia los cuerpos de agua en lugar de infiltrarse (Dingman, 2015).
- ☞ **Cobertura vegetal:** La vegetación facilita la infiltración al reducir la erosión y mejorar la estructura del suelo (Allen et al., 1998).
- ☞ **Cuerpos de agua:** Lagos, humedales y ríos pueden actuar como zonas de recarga o descarga de los acuíferos, dependiendo del gradiente hidráulico (Brutsaert, 2005).

2.2.9 Probabilidad de recarga hídrica

La probabilidad de recarga hídrica (PRH) se entiende como el grado de posibilidad que tiene un área determinada de permitir que el agua proveniente de la precipitación o de cuerpos superficiales infiltre en el suelo y se incorpore a los acuíferos subterráneos. No se refiere únicamente a la existencia de agua en la superficie, sino a la combinación de condiciones físicas, geológicas y ambientales que favorecen o limitan dicho proceso.

En este sentido, la probabilidad de recarga hídrica (PRH) representa un indicador espacial que refleja qué tan factible es que se produzca la recarga natural en una zona específica. Una alta probabilidad de recarga hídrica implica que el terreno presenta características como litologías permeables, pendientes suaves y coberturas vegetales que facilitan la infiltración; mientras que una baja probabilidad está asociada a suelos compactados, pendientes pronunciadas o formaciones geológicas impermeables que restringen el paso del agua hacia el subsuelo.

De esta manera, la probabilidad de recarga hídrica (PRH) se convierte en un elemento fundamental para la gestión integrada de los recursos hídricos, ya que permite identificar las áreas prioritarias para la conservación y protección, así como aquellas con menor potencial de recarga que requieren estrategias de manejo específicas.

2.2.10 Metodologías de identificación de zonas de recarga hídrica

La identificación de zonas de recarga hídrica constituye un componente esencial en la gestión sostenible de los recursos hídricos, ya que permite reconocer los espacios del territorio donde el agua superficial tiene mayor posibilidad de infiltrarse y contribuir al almacenamiento subterráneo. Este conocimiento resulta clave para la planificación territorial, la conservación de ecosistemas y la implementación de proyectos orientados a la seguridad hídrica.

A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversas metodologías para este propósito, que abarcan desde el uso de modelos matemáticos e hidrológicos, capaces de simular procesos de infiltración y flujo subterráneo, hasta enfoques multicriterio, en los que se integran variables físicas, climáticas y ambientales mediante técnicas de ponderación. Asimismo, se han incorporado métodos participativos, que consideran el conocimiento local y la percepción de los pobladores sobre las dinámicas hídricas de su territorio. A continuación, se presentan los métodos más relevantes con sus fundamentos y ecuaciones.

2.2.10.1 Método RAS (*Recharge Area Simulation*)

Este método combina factores climáticos, geológicos y edáficos para estimar la recarga de acuíferos (Forges, 2005). Se basa en la ecuación:

$$R = BC \times C \quad (2.3)$$

donde R es la recarga del acuífero, BC es el balance climático y C es el coeficiente de infiltración, calculado como:

$$C = k_{fc} + k_p + k_v \quad (2.4)$$

donde k_{fc} es el coeficiente del tipo de suelo, k_p el de pendiente y k_v el del uso del suelo.

2.2.10.2 Método de balance de agua

Se basa en la conservación de masa y evalúa la recarga hídrica considerando la variación del nivel freático (Vélez & Vásquez, 2004):

$$R = S_{\gamma} \frac{dh}{dt} \quad (2.5)$$

donde S_{γ} es el rendimiento específico del acuífero y h la altura del nivel freático. También puede expresarse como:

$$P + I = ET + Q + \Delta S \quad (2.6)$$

donde P es la precipitación, I la infiltración, ET la evapotranspiración, Q la escorrentía y ΔS el cambio en el almacenamiento del suelo.

2.2.10.3 Método de trazadores o isótopos

Este método utiliza elementos químicos para rastrear el origen del agua y su movimiento en el subsuelo (Kendall & Caldwell, 1998). Se basa en la ecuación:

$$r = \frac{T_r - PT_p + f_d}{T_r} \quad (2.7)$$

donde r es la tasa de recarga, T_r la concentración del trazador en la recarga, P la precipitación, T_p la concentración del trazador en la precipitación y f_d la masa del trazador en la zona vadosa.

2.2.10.4 Método de balance hídrico del suelo

Evalúa la infiltración del agua en función de factores climáticos y edáficos (Schosinsky, 2006). Se basa en:

$$V = R_p \times A \quad (2.8)$$

donde V es el volumen de recarga, R_p la recarga potencial y A el área de recarga.

2.2.10.5 Método participativo de Óscar Matus

Este enfoque integra el conocimiento técnico y local para la identificación de zonas de recarga (Matus et al., 2009). Evalúa los factores: pendiente, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo. Se expresa como:

$$ZR = [0,27(P) + 0,23(Ts) + 0,12(Tr) + 0,25(Cv) + 0,13(Us)] \quad (2.9)$$

donde ZR es la zona de recarga, P la pendiente, Ts el tipo de suelo, Tr el tipo de roca, Cv la cobertura vegetal y Us el uso del suelo.

2.2.10.6 Estrategia de recarga artificial con jardines de lluvia

Esta técnica consiste en la construcción de zonas con materiales filtrantes para aumentar la infiltración (Gómez, 2015). Se modela con la ecuación de Green-Ampt:

$$I = K_s \left(\frac{H_f + Z}{Z} \right) \quad (2.10)$$

donde I es la tasa de infiltración, K_s la conductividad hidráulica del suelo, H_f la altura del agua y Z la profundidad de la zona no saturada.

2.2.11 Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO)

El Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO) es una técnica de optimización basada en la inteligencia colectiva, inspirada en el comportamiento social de sistemas biológicos como bandadas de aves o cardúmenes de peces. Fue desarrollado por (Kennedy & Eberhart, 1995) y se ha convertido en un enfoque popular para resolver problemas de optimización en diversas áreas, incluyendo la ingeniería, la ciencia de datos y la gestión de recursos naturales.

El PSO es un algoritmo metaheurístico que no requiere gradientes y puede utilizarse en problemas de optimización lineales y no lineales. Su fortaleza radica en su capacidad de explorar y explotar el espacio de búsqueda de manera eficiente mediante la cooperación de múltiples soluciones candidatas, llamadas partículas (Eberhart & Shi, 2001).

2.2.11.1 Principios del Algoritmo Enjambre de Partículas

Cada partícula en el enjambre representa una posible solución y está definida por:

- ☞ **Posición** (x_i): Un vector que representa una posible solución en el espacio de búsqueda.
- ☞ **Velocidad** (v_i): Un vector que determina el desplazamiento de la partícula en cada iteración.
- ☞ **Memoria personal** ($pbest_i$): La mejor posición encontrada por la propia partícula hasta el momento.
- ☞ **Memoria global** ($gbest$): La mejor posición encontrada por cualquier partícula del enjambre.

El algoritmo busca optimizar una función objetivo ajustando dinámicamente la velocidad y la posición de cada partícula basándose en su experiencia individual y en la información compartida por el resto del enjambre (Poli et al., 2007).

2.2.11.2 Ecuaciones de actualización

La actualización de la velocidad y la posición de cada partícula se rige por las siguientes ecuaciones (Eberhart & Shi, 2001):

☞ Actualización de la velocidad

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1r_1(pbest_i - x_i^t) + c_2r_2(gbest - x_i^t) \quad (2.11)$$

Donde:

- ✂ v_i^{t+1} : Nueva velocidad de la partícula i .
- ✂ w : Factor de inercia, controla el impacto de la velocidad anterior.
- ✂ c_1, c_2 : Coeficientes de aceleración para el aprendizaje individual y social, respectivamente.
- ✂ r_1, r_2 : Valores aleatorios entre 0 y 1, que introducen diversidad en la búsqueda.
- ✂ $pbest_i$: Mejor posición personal encontrada por la partícula i .
- ✂ $gbest$: Mejor posición global encontrada en el enjambre.

☞ Actualización de la posición

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (2.12)$$

Donde:

- ✂ x_i^{t+1} : Nueva posición de la partícula i .
- ✂ x_i^t : Posición anterior de la partícula i .
- ✂ v_i^{t+1} : Velocidad recién calculada.

2.2.11.3 Parámetros clave en el Algoritmo Enjambre de Partículas

Para mejorar la convergencia del algoritmo y evitar caer en mínimos locales, se ajustan los siguientes parámetros:

- ☞ **Factor de inercia (w)**: Controla el equilibrio entre exploración (búsqueda global) y explotación (búsqueda local). Valores altos favorecen la exploración, mientras que valores bajos favorecen la explotación.

- ✂ Valores típicos: $w \in [0,4, 0,9]$.

- ✂ Técnicas de ajuste:

- ↳ Decreciente lineal: Se inicia con un valor alto y se reduce con cada iteración.

- ↳ Adaptativo: Se ajusta dinámicamente según la dispersión del enjambre (Shi & Eberhart, 1998).

- ☞ **Coeficientes de aceleración (c_1 y c_2)**:

- ✂ c_1 (aprendizaje individual): Influencia de la mejor solución personal.

- ✂ c_2 (aprendizaje social): Influencia de la mejor solución global.

- ✂ Valores recomendados: $c_1 = c_2 = 1,5$ a $2,5$ (Clerc & Kennedy, 2002).

- ☞ **Tamaño del enjambre (N)**: Afecta la diversidad y la velocidad de convergencia.

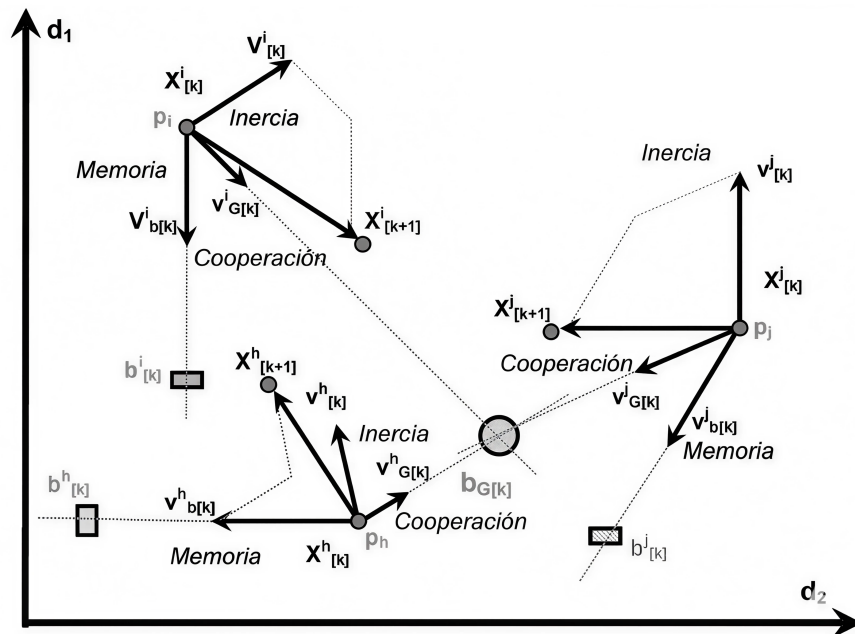
- ✂ Valores típicos: Entre 20 y 100 partículas.

- ✂ Un enjambre grande mejora la exploración, pero aumenta el costo computacional.

☞ **Criterios de convergencia:**

- ☞ Número máximo de iteraciones.
- ☞ Variación mínima en la mejor solución global.
- ☞ Umbral de precisión en la función objetivo (Poli et al., 2007).

Figura 2.9: *Funcionamiento del Algoritmo Enjambre de Partículas*



Fuente: (MasterGIS, 2025).

2.3 Marco conceptual

La identificación de zonas potenciales de recarga hídrica requiere la consideración de un conjunto de factores geofísicos, biofísicos y climáticos que condicionan el comportamiento hidrológico de una cuenca hidrográfica. Dichos factores permiten caracterizar la capacidad del suelo y del ecosistema para favorecer procesos de infiltración, almacenamiento subterráneo y regulación hídrica.

En este sentido, los principales elementos que intervienen directamente en el estudio son:

2.3.1 Factores geofísicos

Los factores geofísicos corresponden a las características intrínsecas de los ecosistemas, las cuales no pueden ser modificadas por la acción humana en el corto plazo fácilmente, o bien presentan una alta dificultad para ser intervenidas, dentro de las consideradas en el presente estudio son las siguientes:

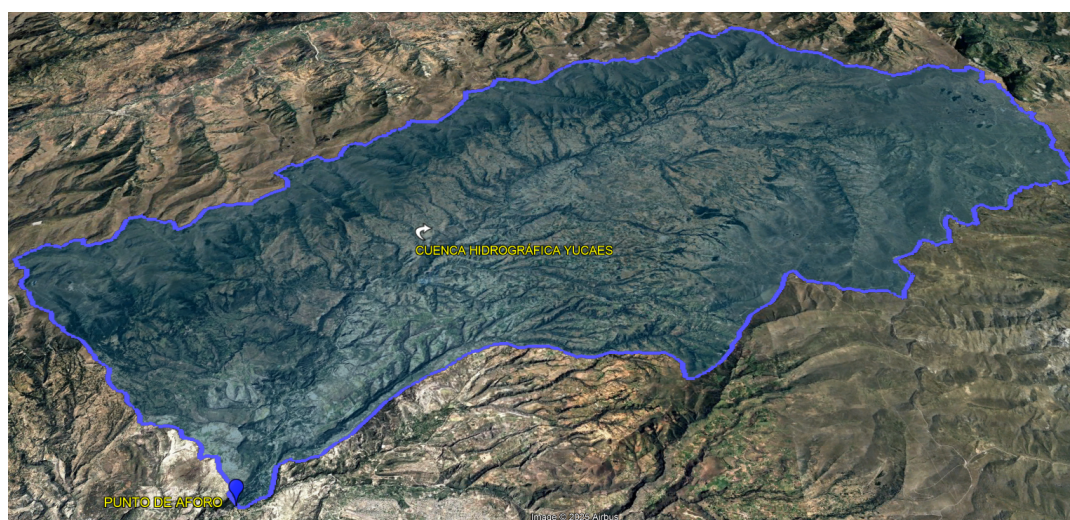
2.3.1.1 Cuenca hidrográfica delimitada

Una cuenca hidrográfica delimitada es la unidad territorial definida por un área de drenaje natural, cuyos límites han sido trazados de manera precisa a partir de criterios topográficos, hidrológicos y geomorfológicos. Dichos límites corresponden a las divisorias de aguas que separan la escorrentía superficial que fluye hacia un curso principal de agua (río, quebrada o lago) de aquella que drena hacia cuencas adyacentes.

La delimitación de una cuenca permite establecer con exactitud su extensión espacial, conocer la red hidrográfica que la compone y caracterizar sus parámetros fisiográficos (área, perímetro, pendiente media, longitud de cauce principal, entre otros). Este proceso es fundamental en estudios de gestión de recursos hídricos, planificación territorial, identificación de zonas de recarga hídrica y modelación hidrológica, ya que garantiza que el análisis se realice sobre un sistema cerrado y correctamente definido.

En el presente estudio, la delimitación de la cuenca hidrográfica Yucaes se lleva a cabo mediante el uso de modelos de elevación digital (DEM), procesados en entornos de sistemas de información geográfica (SIG), específicamente con la herramienta ArcGIS. Esta metodología permite identificar con alta precisión las divisorias de aguas que definen los límites naturales de drenaje, a partir de la topografía del terreno. El procesamiento del modelo de elevación digital incluye etapas como la corrección de depresiones (*sink filling*), la generación de la dirección de flujo y la acumulación de flujo, lo cual facilita la definición automática de redes de drenaje y áreas de aporte. Gracias a este procedimiento, es posible obtener una representación espacialmente consistente y actualizada de la cuenca en estudio, asegurando la confiabilidad de los análisis posteriores, tales como la estimación de parámetros fisiográficos, el análisis hidrológico y la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica.

Figura 2.10: Vista satelital de la microcuenca Yucaes



Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth.

2.3.1.2 Pendiente de la superficie

La pendiente es el grado de inclinación del terreno respecto a un plano horizontal, y constituye un factor clave en los procesos hidrológicos y geomorfológicos. Este parámetro influye directamente en la relación entre infiltración y escorrentía. Las superficies con baja pendiente tienden a retener el agua por más tiempo, lo que facilita la infiltración hacia el subsuelo y, por tanto, la recarga hídrica; en contraste, en terrenos con altas pendientes predomina el escurrimiento superficial, lo que disminuye la capacidad de recarga y aumenta la erosión. A través de herramientas de percepción remota y análisis en sistemas de información geográfica (SIG) específicamente con la herramienta ArcGIS es posible calcular con precisión el porcentaje de pendiente en una cuenca hidrográfica y generar mapas temáticos actualizados. Estos mapas permiten clasificar las distintas zonas en función de su aptitud para la recarga hídrica, estableciendo categorías que orientan la gestión del recurso y la toma de decisiones para la planificación territorial y ambiental.

En el presente estudio, la elaboración del mapa de pendientes se llevó a cabo a partir de modelos de elevación digital (*DEM*), procesados en entornos de Sistemas de Información Geográfica (SIG), empleando la herramienta ArcGIS. Esta metodología permite calcular con precisión el grado de inclinación del terreno y representarlo de manera cartográfica, facilitando su análisis espacial. Con base en los resultados obtenidos, las pendientes fueron clasificadas en cinco categorías, establecidas de acuerdo con su potencial de recarga hídrica: las zonas con menor inclinación presentan mayores probabilidades de favorecer la infiltración, mientras que las áreas con pendientes más pronunciadas tienden a incrementar la escorrentía superficial y reducir la recarga.

Tabla 2.1: Probabilidad de recarga hídrica según la pendiente de terreno.

Clase de pendiente	Rango de pendiente (%)	PRH
Terreno plano a casi plano	0 – 6	Muy alta
Terreno moderadamente ondulado	6 – 15	Alta
Terreno ondulado	15 – 45	Moderada
Terreno escarpado	45 – 65	Baja
Terreno fuertemente escarpado	>65	Muy baja

Fuente: Adaptado de (Matus et al., 2009) mediante LaTeX.

2.3.1.3 La composición geológica

La composición geológica, en el contexto de la recarga hídrica, se relaciona con la naturaleza litológica del terreno y la disposición de sus estratos, lo que condiciona la permeabilidad y la capacidad de conducción del agua hacia acuíferos subterráneos. Materiales como arenas gruesas, gravas, piedra pómez o depósitos poco consolidados favorecen la infiltración debido a su elevada porosidad y conductividad hidráulica, mientras que formaciones compactas o de baja permeabilidad restringen el proceso. Para evaluar este factor, es necesario generar un mapa geológico en

entornos SIG a partir de imágenes satelitales de alta resolución y cartografía existente, lo que permite identificar y clasificar las diferentes unidades geológicas del área de estudio en función de su potencial de recarga.

En el presente estudio, la elaboración del mapa de composición geológica se realizó a partir de información proveniente de modelos de elevación digital (DEM) y su procesamiento en entornos de sistemas de información geográfica (SIG), utilizando la herramienta ArcGIS. Esta metodología permite integrar y analizar de manera precisa la distribución y características litológicas del terreno, representándolas cartográficamente para facilitar su interpretación espacial.

Con base en los resultados obtenidos, las unidades geológicas fueron clasificadas en cinco categorías, definidas en función de su capacidad de recarga hídrica. En este sentido, los materiales con mayor grado de permeabilidad y porosidad (por ejemplo, depósitos aluviales o rocas fracturadas) presentan una alta probabilidad de favorecer la infiltración; mientras que las litologías de carácter más impermeable (como lutitas, arcillas o rocas ígneas compactas) tienden a incrementar la escorrentía superficial y, en consecuencia, a reducir los procesos de recarga.

Tabla 2.2: *Probabilidad de recarga hídrica según el tipo de roca.*

Tipo de roca	PRH
Rocas muy permeables, muy suaves, agregados gruesos, con macroporos interconectados(arena gruesa, piedra pómez, grava).	Muy alta
Rocas permeables suaves, agregados medianos, con poros interconectados(arena fina o arenisca con poca cementación).	Alta
Rocas moderadamente permeables, semi-suaves, con regular conexión entre poros.	Moderada
Rocas poco permeables, un poco duras, moderadamente compactadas, constituidas por partículas finas, con presencia de fracturas interconectadas(combinación de gravas con arcillas).	Baja
Rocas impermeables, duras, cementadas, compactadas, constituidas por partículas muy finas, sin presencia de fracturas.	Muy baja

Fuente: Adaptado de (Matus et al., 2009) mediante LaTeX.

2.3.1.4 Tipo del suelo

El tipo de suelo, y particularmente su textura, constituye un factor determinante en la capacidad de recarga hídrica. La textura del suelo definida por la proporción relativa de arena, limo y arcilla influye directamente en la infiltración, la retención de agua y la conductividad hidráulica del perfil edáfico.

Los suelos con alta proporción de arcilla tienden a ser impermeables o de baja infiltración, debido a la compactación y la baja porosidad, lo que limita el paso del agua hacia horizontes más profundos. En contraste, los suelos con mayor contenido de arena y estructura suelta presentan alta permeabilidad y capacidad de infiltración, favoreciendo la recarga de acuíferos. Sin embargo,

una textura excesivamente arenosa puede reducir la retención de humedad, acelerando el drenaje y disminuyendo la disponibilidad de agua en el suelo.

De manera general, los suelos franco arenosos ofrecen un equilibrio óptimo, ya que combinan una buena capacidad de infiltración con una retención adecuada de humedad, lo que los convierte en los más favorables para la recarga hídrica. En este sentido, la caracterización y clasificación de los tipos de suelo resulta esencial para generar mapas temáticos y raster de recarga potencial, permitiendo identificar áreas con mayor aptitud para la infiltración y almacenamiento subterráneo del recurso hídrico.

En el presente estudio, la elaboración del mapa de suelos se realizó a partir de información proveniente de modelos de elevación digital (DEM) y su procesamiento en entornos de sistemas de información geográfica (SIG), utilizando la herramienta ArcGIS. Esta metodología permitió integrar y analizar de manera precisa la distribución espacial de los tipos de suelo, representándolos cartográficamente para facilitar su interpretación y evaluación en relación con la recarga hídrica.

Con base en los resultados obtenidos, los suelos fueron clasificados en cinco categorías, definidas en función de su textura y capacidad de infiltración. En este sentido, los suelos con mayor grado de permeabilidad y porosidad (por ejemplo, suelos arenosos o franco-arenosos) presentan una alta probabilidad de favorecer la infiltración y el almacenamiento subterráneo de agua. Por el contrario, aquellos con predominio de arcillas o estructuras más compactas tienden a limitar la infiltración, incrementando la escorrentía superficial y reduciendo así el potencial de recarga hídrica.

Tabla 2.3: Probabilidad de recarga hídrica según el tipo de suelo.

Tipo de roca	PRH
Suelos franco arenosos a arenosos, con tamaño de agregados o partículas de gruesos a medios, con muy rápida capacidad de infiltración (>25cm/hora).	Muy alta
Suelos francos con partes iguales de arena, limo y arcilla, con rápida capacidad de infiltración (12.7 25cm/hora).	Alta
Suelos franco limosos, con partículas de tamaño medio a finas, con moderada a moderadamente rápida capacidad de infiltración (2 12.7cm/hora).	Moderada
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 (0.13 2cm/hora).	Baja
Suelos arcillosos, muy pesados, con partículas muy finas, compactados, con muy lenta capacidad de infiltración (menos de 0.13 cm/hora).	Muy baja

Fuente: Adaptado de (Matus et al., 2009) mediante LaTeX.

2.3.2 Factores biofísicos

El uso y la cobertura del suelo son los factores que reflejan la interacción entre la vegetación natural y las transformaciones humanas, determinando la funcionalidad ecológica del territorio y su capacidad de favorecer procesos como la infiltración y la recarga hídrica en cuencas hidrográficas.

2.3.2.1 Cobertura vegetal

La cobertura vegetal se define como la proporción de superficie de un territorio ocupado por vegetación, la cual puede estar conformada por pastizales, matorrales, bosques naturales u otras formaciones vegetales. Su presencia desempeña un rol fundamental en el ciclo hidrológico, ya que influye directamente en la interceptación, infiltración y retención del agua. A mayor cobertura vegetal, especialmente cuando se trata de especies nativas, se incrementa la capacidad del suelo para infiltrar agua y favorecer la recarga de los acuíferos.

Asimismo, mediante el uso de índices derivados de la percepción remota, como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) o el factor de cobertura vegetal (FVC), es posible generar mapas precisos de cobertura vegetal. Estos insumos permiten interpretar el territorio y reclasificarlo en función de su potencial de recarga hídrica según este parámetro.

En el presente estudio, la elaboración del mapa de cobertura vegetal se realizó a partir de información obtenida de (GEO GPS Perú, 2024) y procesada en entornos de sistemas de información geográfica (SIG), utilizando la herramienta ArcGIS. Esta metodología permitió generar una representación cartográfica precisa de la distribución espacial de la vegetación, facilitando su interpretación y evaluación en relación con la recarga hídrica.

Con base en los resultados obtenidos, la cobertura vegetal fue clasificada en cinco categorías, definidas de acuerdo con su densidad y capacidad de favorecer la infiltración. En este sentido, las zonas con mayor grado de cobertura vegetal, especialmente aquellas dominadas por especies nativas, presentan una alta probabilidad de propiciar la infiltración y el almacenamiento subterráneo de agua. Por el contrario, las áreas con escasa o nula cobertura tienden a incrementar la escorrentía superficial, reduciendo el potencial de recarga hídrica.

Tabla 2.4: Probabilidad de recarga hídrica según la cobertura vegetal

Cobertura vegetal permanente (porcentaje)	PRH
>80	Muy alta
70 - 80	Alta
50 - 70	Moderada
30 - 50	Baja
<30	Muy baja

Fuente: Adaptado de (Matus et al., 2009) mediante LaTeX.

2.3.3 Uso/cobertura actual de suelo

El uso y cobertura actual del suelo se refiere tanto a las formas naturales de vegetación presentes en un territorio como a las modificaciones derivadas de las actividades humanas, tales como la agricultura, la forestación o la urbanización. Este factor representa una de las variables más dinámicas y determinantes en el proceso de recarga hídrica en cuencas hidrográficas, ya que puede favorecerla o limitarla según las condiciones de manejo y conservación del suelo que se haya dado.

Prácticas que generan erosión o compactación disminuyen la capacidad de infiltración del suelo, reduciendo así la recarga, mientras que la presencia de coberturas vegetales diversas como bosques, arbustos, pastos o herbazales incrementa la permeabilidad del suelo y favorece el almacenamiento de agua en el subsuelo. Actualmente, el uso de percepción remota y análisis SIG permite identificar y clasificar los diferentes tipos de cobertura del suelo, proporcionando insumos fundamentales para la planificación y gestión sostenible de las zonas con potencial de recarga hídrica.

En el presente estudio, la elaboración del mapa de uso y cobertura del suelo se realizó empleando técnicas de percepción remota y análisis espacial en sistemas de información geográfica (SIG). Esta herramienta permitió identificar y clasificar las distintas coberturas presentes en el territorio, diferenciando tanto las formas naturales de vegetación como las modificaciones derivadas de actividades humanas, tales como la agricultura, la forestación o la urbanización.

El uso y cobertura del suelo constituye una variable dinámica y de gran relevancia en el proceso de recarga hídrica, dado que puede favorecerla o limitarla en función de las prácticas de manejo y conservación. Por ejemplo, actividades que generan erosión o compactación reducen la capacidad de infiltración, mientras que la presencia de coberturas vegetales como bosques, arbustales, pastizales o herbazales incrementa la permeabilidad del suelo y promueve el almacenamiento de agua en el subsuelo.

La clasificación realizada en el mapa constituye un insumo fundamental para la identificación de las zonas con potencial de recarga hídrica, ya que permite visualizar de manera precisa la distribución espacial de las coberturas y su relación con los procesos hidrológicos de la microcuenca.

Tabla 2.5: Probabilidad de recarga hídrica según el tipo de uso y cobertura actual de suelo.

Uso/cobertura de suelo	PRH
Forestal nativo	Muy alta
Arbustal nativo	Alta
Forestal exótico pastizal	Moderada
Agrícola temporal/pastoril	Baja
Agrícola urbano	Muy baja

Fuente: Adaptado de (Matus et al., 2009) mediante LaTeX.

2.3.4 Factor climático

La precipitación constituye la principal fuente de recarga hídrica, especialmente en los valles interandinos, donde la disponibilidad de agua depende tanto de su cantidad como de su distribución espacial y temporal. Estas regiones presentan un prolongado periodo seco de 8 a 9 meses y una temporada de lluvias concentrada en apenas tres o cuatro meses, lo que convierte a la precipitación en un factor determinante para garantizar la infiltración y almacenamiento de agua en el subsuelo.

2.3.4.1 Distribución territorial de la precipitación

En los valles secos interandinos, la precipitación pluvial se caracteriza por su marcada variabilidad espacial y temporal, lo que determina diferencias significativas en la disponibilidad de agua dentro de un mismo territorio. Las zonas con mayor concentración de lluvias constituyen áreas estratégicas para la recarga hídrica, ya que durante la temporada de precipitaciones actúan como focos de infiltración natural. La evaluación de este factor requiere no solo cuantificar los valores históricos de precipitación, sino también analizar su distribución geográfica en toda la cuenca, con el fin de identificar patrones de acumulación de agua sobre la cuenca. Sin embargo, esta estimación enfrenta la limitación de la escasa cobertura de estaciones meteorológicas y la calidad irregular de los registros climáticos. En este sentido, la construcción de mapas de distribución espacial de la lluvia, apoyados en registros históricos y herramientas de interpolación geoespacial, se convierte en una estrategia esencial para priorizar las zonas con mayor potencial de recarga y orientar la gestión hídrica de manera sostenible.

En la presente investigación se utilizaron datos de precipitación descargados de la plataforma del (Autoridad Nacional del Agua, 2024), los cuales fueron sometidos a un proceso de depuración y organización para asegurar su calidad y consistencia. Posteriormente, dichos registros fueron incorporados en el software ArcGIS, aplicando la técnica de interpolación espacial *IDW (Inverse Distance Weighting)* con el fin de estimar la variabilidad espacial de la precipitación en la zona de estudio. Este procedimiento permitió generar un mapa de distribución de precipitaciones, el cual constituye un insumo clave para comprender los patrones de lluvia en el territorio y, a partir de ello, clasificar las áreas en cinco categorías según su probabilidad de recarga hídrica.

Tabla 2.6: Probabilidad de recarga hídrica según la distribución de la precipitación.

Precipitación pluvial	PRH
Alrededor del máximo histórico	Muy alta
Entre el máximo y el promedio histórico	Alta
Alrededor del promedio histórico	Moderada
Entre el promedio y el bajo histórico	Baja
Alrededor del registro histórico más bajo	Muy baja

Fuente: Adaptado de (Matus et al., 2009) mediante LaTeX.

2.3.5 Algoritmo de Óscar Matus modificado

El algoritmo para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica desarrollado por (Matus et al., 2009) y posteriormente modificado por (Rodríguez Levy et al., 2023), se fundamenta en un modelo de superposición ponderada que se ejecuta en entornos de sistemas de información geográfica, como ArcGIS o QGIS. El objetivo principal es determinar qué lugares dentro de las cuencas hidrográficas presentan mejores condiciones para que el agua de las precipitaciones se infiltre en el suelo y recargue los acuíferos aguas abajo.

$$ZPRH = [0,17(Pend) + 0,18(Ts) + 0,10(Tr) + 0,17(Cve) + 0,16(Us/C) + 0,22(Pp)] \quad (2.13)$$

Donde $ZPRH$ son las zonas con potencial de recarga, P la pendiente, Ts el tipo de suelo, Tr el tipo de roca, Cv la cobertura vegetal y Us el uso/covertura actual del suelo y Pp la precipitación. Este algoritmo propuesto por (Rodríguez Levy et al., 2023) combina seis factores principales, incorporando una variable adicional respecto al planteamiento original de (Matus et al., 2009) que viene a ser la precipitación. Cada factor cuenta con un peso específico asignado por juicio experto que refleja su importancia relativa en el proceso de recarga hídrica dependiendo de la zona.

- ☞ En primer lugar viene a ser la pendiente de la cuenca, que influye directamente en la infiltración de la precipitación, las zonas planas o ligeramente onduladas permiten mayor infiltración, mientras que las laderas con fuerte inclinación favorecen la escorrentía superficial.
- ☞ El segundo factor viene a ser el tipo de suelo de la cuenca, los suelos franco arenosos y sueltos poseen alta capacidad de infiltración, mientras que los suelos arcillosos baja capacidad de infiltración.
- ☞ En tercer lugar viene a ser la composición geológica o tipo de roca de la cuenca, las rocas permeables, como areniscas y gravas, favorecen la recarga hídrica, a diferencia de las formaciones compactas o impermeables que la limitan.
- ☞ Otro factor relevante es la cobertura vegetal de la cuenca, una mayor proporción de vegetación sobre la cuenca, especialmente la nativa, incrementa la infiltración y reduce la escorrentía superficial.
- ☞ De manera asociada, el uso y cobertura actual del suelo de la cuenca también influye, los bosques naturales promueven la recarga hídrica, mientras que la agricultura intensiva o las zonas urbanas la limitan.
- ☞ Finalmente, el factor con mayor peso es la precipitación pluvial sobre la cuenca, las áreas con mayores volúmenes de precipitaciones presentan, de manera natural, un mayor potencial de recarga hídrica.

El resultado de la ecuación del algoritmo es un valor entre uno y cinco, que representa la aptitud de un área para la recarga hídrica, desde muy baja, baja, moderada, alta y muy alta. Con estos

valores, es posible elaborar un mapa de aptitud que permite identificar espacialmente las zonas potenciales de recarga hídrica en cuencas hidrográficas.

Tabla 2.7: Clasificación de zonas potenciales de recarga hídrica

Probabilidad de recarga hídrica	Rango (ZPRH)
Muy alta	4.1 - 5.0
Alta	3.5 - 4.09
Moderada	2.6 - 3.49
Baja	2.0 - 2.59
Muy baja	1.0 - 1.99

Fuente: Adaptado de (Matus et al., 2009) mediante LaTeX.

2.3.6 Implementación del Algoritmo Enjambre de Partículas

En la presente investigación se construye un modelo espacial para identificar zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, a partir de diferentes factores ambientales que sirven como insumos para el modelo. Estos factores como la configuración de pendientes de la microcuenca, el tipo de suelo, la composición geológica, la cobertura vegetal, el uso del suelo y la precipitación se representan en mapas ráster y posteriormente son normalizados para llevarlos a una misma escala comparable. En algunos casos, como en el de la pendiente, los valores se invierten, ya que una mayor inclinación del terreno reduce la capacidad de infiltración de la precipitación en la microcuenca.

Una vez preparados los insumos, surge la necesidad de combinarlos en un solo índice. Sin embargo, en lugar de asignar los pesos de manera subjetiva, como ocurre con frecuencia en la literatura clásica por ejemplo, en los enfoques propuestos por (Matus et al., 2009) y (Rodríguez Levy et al., 2023) se emplea un algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO) de carácter multiobjetivo. Este algoritmo simula el comportamiento colectivo de un grupo de partículas que exploran distintas combinaciones de pesos en la ecuación de (Rodríguez Levy et al., 2023), hasta encontrar aquella que produce el mejor resultado del índice.

El criterio para definir el mejor resultado no se establece de manera arbitraria, sino que se construye a partir de dos propiedades estadísticas del mapa resultante:

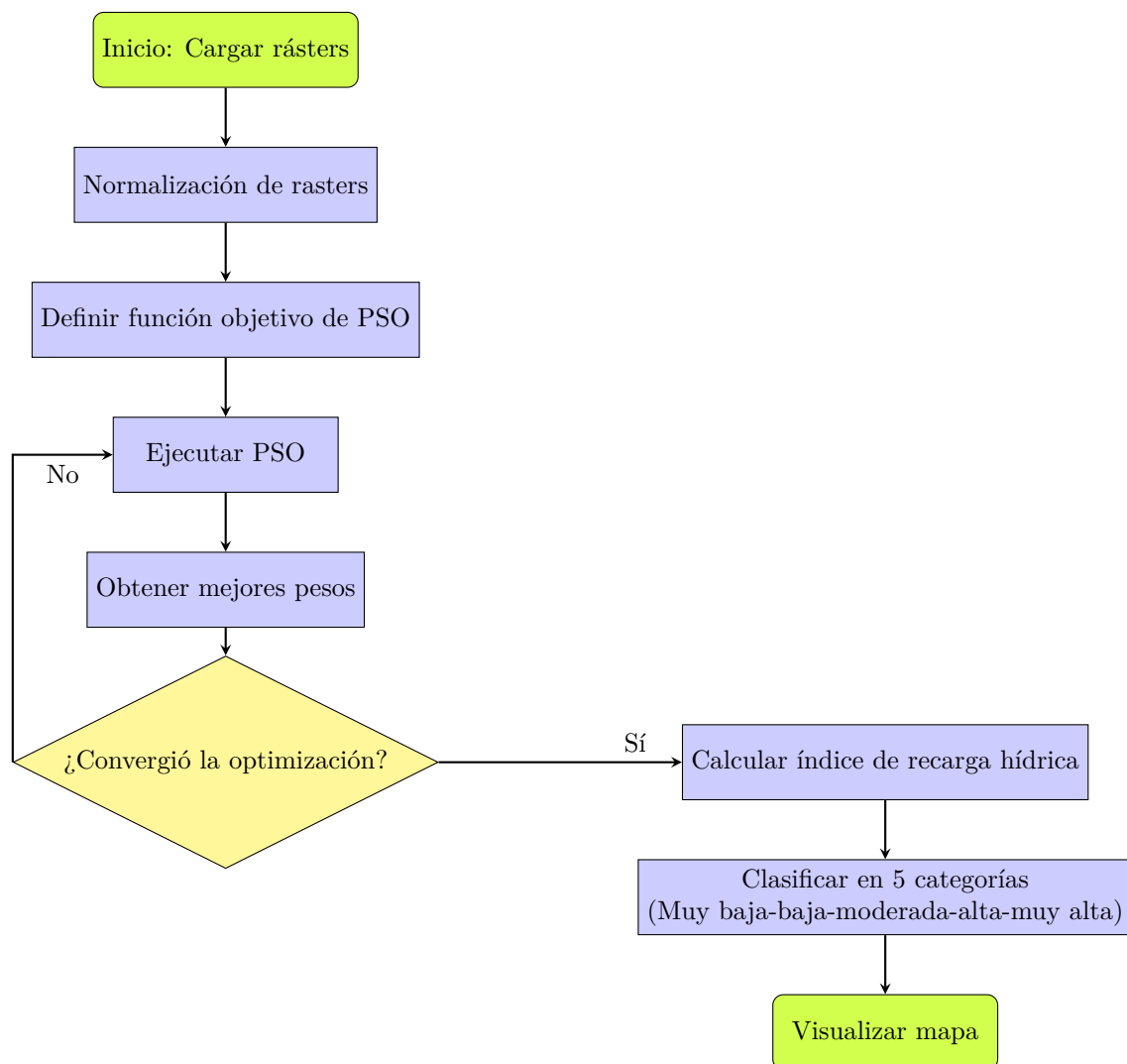
- ☞ **Varianza:** mide cuánto difieren los valores del índice en el espacio. Una varianza alta implica que el mapa distingue con claridad las zonas con diferentes niveles de recarga hídrica.
- ☞ **Entropía:** mide el equilibrio en la representación de las clases. Una entropía alta indica que las categorías de recarga (muy baja, baja, moderada, alta y muy alta) están bien distribuidas y no concentradas en un solo grupo.

De esta manera, la función objetivo que guía al algoritmo busca un balance entre la varianza y la entropía, garantizando que el mapa final sea, al mismo tiempo, discriminante y equilibrado.

Tras ejecutar el algoritmo de enjambre de partículas, se obtienen los pesos optimizados para cada factor. Con ellos se calcula el índice de recarga hídrica y se clasifica en cinco categorías de acuerdo con la literatura clásica. El resultado final es un mapa que refleja las zonas con distinto potencial de recarga hídrica, desde muy baja hasta muy alta, y que ha sido generado reduciendo al mínimo la subjetividad en la asignación de criterios.

En síntesis, este enfoque transforma lo que tradicionalmente constituye una decisión basada en juicios de expertos o en criterios empíricos, en un proceso automatizado y optimizado, respaldado por un algoritmo de inteligencia de enjambre de partículas. De esta manera, el modelo aporta un soporte técnico sólido para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes.

Figura 2.11: Diagrama de flujo de la implementación del Algoritmo Enjambre de Partículas



Fuente: Elaboración propia mediante LaTeX.

3.1 Enfoque

El enfoque metodológico de la presente investigación es de naturaleza cuantitativa, con una marcada orientación hacia el análisis espacial y la optimización computacional. Se fundamenta en la integración de técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el procesamiento digital de Modelos de Elevación Digital (*DEM*) para la extracción, análisis y modelado de variables geospaciales asociadas a la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica el cual es posteriormente clasificado mediante criterios multicriterio, adicionalmente, se implementa un algoritmo de optimización basado en Enjambre de Partículas (*particle Swarm Optimization, PSO*), cuyo propósito es la estimación y ajuste óptimo de los pesos asignados a los factores condicionantes de la recarga, garantizando así una evaluación más robusta, objetiva y reproducible de las zonas potenciales.

3.2 Alcance

El alcance de la investigación es de carácter descriptivo y explicativo, con un enfoque geoespacial orientado a la identificación de zonas con alto potencial de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho. El estudio comprende el desarrollo de un modelo de identificación de áreas potenciales de recarga, las cuales son clasificadas mediante criterios multicriterio. Asimismo, se incorpora un algoritmo de optimización basado en Enjambre de Partículas (*Particle Swarm Optimization, PSO*), con el objetivo de ajustar de manera óptima los pesos de los factores ambientales que condicionan la recarga, tales como la pendiente, el tipo de suelo, la composición geológica, la cobertura vegetal, el uso del suelo y la precipitación.

3.3 Diseño de investigación

El diseño de la investigación es de tipo no experimental, dado que no implica la manipulación de las variables de estudio, sino su observación y análisis en su estado natural a partir de información geoespacial. Asimismo, posee un carácter transversal, ya que el análisis se desarrolla en un momento específico, empleando datos actuales disponibles de la microcuenca Yucaes.

3.4 Población y muestra

- ☞ **Población:** La población de estudio está constituida por la totalidad del territorio de la microcuenca Yucaes, ubicada en la región de Ayacucho, Perú. Esta unidad hidrográfica resulta de interés debido a su relevancia en los procesos de recarga hídrica y a su potencial para la gestión sostenible de los recursos hídricos.
- ☞ **Muestra:** La muestra corresponde a la superficie representada por el Modelo de Elevación Digital (*DEM*) y los conjuntos de datos geoespaciales empleados en la investigación, tales como pendiente, tipo de suelo, composición geológica, cobertura vegetal, uso del suelo y precipitación. Se adopta un muestreo no probabilístico por conveniencia, en la medida que se seleccionan los datos disponibles dentro del área de estudio que cumplen con los criterios de calidad, precisión y resolución necesarios para la aplicación del Algoritmo Enjambre de Partículas (*PSO*).

3.5 Hipótesis

3.5.1 Hipótesis general

La identificación de zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025, genera resultados óptimos.

3.5.2 Hipótesis específicas

- ☞ La implementación del Algoritmo de Enjambre de Partículas (*PSO*) para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025, optimiza la asignación de los pesos de los factores ambientales, permitiendo una identificación más precisa y objetiva.
- ☞ la pendiente del terreno, el tipo de suelo, el tipo de roca, la cobertura vegetal, el uso del suelo y la precipitación tienen una influencia significativa en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025.
- ☞ El rendimiento del Algoritmo Enjambre de Partículas en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025, en comparación con métodos tradicionales es más eficiente y precisa.

3.6 Operacionalización de variables

3.6.1 Variables

- ☞ **Variable independiente:** Algoritmo Enjambre de Partículas.
- ☞ **Variable dependiente:** Zonas potenciales de recarga hídrica.

3.6.2 Definición conceptual

☞ Algoritmo Enjambre de Partículas.

El Algoritmo de Enjambre de Partículas (*Particle Swarm Optimization, PSO*) es un método de optimización estocástico basado en los principios de la inteligencia colectiva, inspirado en el comportamiento social de los enjambres presentes en la naturaleza, como las bandadas de aves o los cardúmenes de peces. El algoritmo se fundamenta en una población de partículas, cada una de las cuales representa una solución candidata dentro de un espacio de búsqueda definido. Estas partículas se desplazan iterativamente en el espacio de soluciones ajustando su posición y velocidad en función de dos componentes principales: la mejor solución alcanzada por cada partícula en su experiencia individual (*pbest*) y la mejor solución alcanzada por todo el enjambre hasta el momento (*gbest*).

El proceso de actualización de las partículas se rige por ecuaciones matemáticas que integran componentes de inercia, exploración y explotación, garantizando un equilibrio entre la búsqueda global y el refinamiento local de las soluciones. Esta dinámica permite que el enjambre evolucione hacia regiones del espacio con mayor probabilidad de contener la solución óptima o cuasi-óptima.

En el marco de la presente investigación, el *PSO* se aplica como herramienta de optimización multicriterio para determinar la asignación óptima de pesos a los factores ambientales que condicionan la recarga hídrica, tales como la pendiente, el tipo de suelo, la litología, la cobertura vegetal, el uso del suelo y la precipitación. De esta manera, se maximiza la capacidad del modelo para diferenciar espacialmente las zonas potenciales de recarga hídrica, garantizando un análisis más objetivo, reproducible y robusto en comparación con métodos de ponderación subjetiva (Kennedy & Eberhart, 1995).

☞ Zonas potenciales de recarga hídrica

La identificación de zonas potenciales de recarga hídrica consiste en el proceso de análisis y delimitación espacial de áreas del territorio que presentan condiciones favorables para la infiltración del agua hacia los acuíferos. Este procedimiento integra información geoespacial proveniente de modelos de elevación digital, variables ambientales (pendiente, tipo de suelo, litología, cobertura vegetal, uso del suelo y precipitación) y técnicas de evaluación multicriterio. Su objetivo es establecer, de manera cuantitativa y objetiva, los sectores con mayor aptitud para la recarga natural o artificial de los recursos hídricos subterráneos, constituyendo así una herramienta fundamental para la planificación y la gestión sostenible del agua en cuencas hidrográficas (UNESCO, 2020).

3.6.3 Definición operacional

A continuación, en la tabla 3.1, se presenta la operacionalización de las variables independiente y dependiente, especificando sus respectivas dimensiones y indicadores.

Tabla 3.1: Definición operacional de la variables de tesis

VARIABLE	TIPO	DIMENSIONES	INDICADORES
Algoritmo Enjambre de Partículas	Independiente	☞ Configuración del algoritmo	☞ Número de partículas
			☞ Número de iteraciones
		☞ Datos de entrada al algoritmo	☞ Coeficientes de inercia (w)
			☞ Coeficientes de aceleración (c1,c2)
			☞ Mapa raster de pendientes
			☞ Mapa raster tipo de suelos
			☞ Mapa raster tipo de rocas
			☞ Mapa raster tipo de cobertura vegetal
			☞ Mapa raster tipo uso/ cobertura actual de suelo
			☞ Mapa raster de precipitaciones
☞ Criterios de optimización del algoritmo	☞ Función objetivo		
	☞ Varianza poblacional		
	☞ Entropía del enjambre		
	☞ Error de optimización		
☞ Rendimiento del algoritmo	☞ Tiempo de convergencia		
	☞ Precisión del resultado		
☞ Validación del algoritmo	☞ Comparación con métodos tradicionales		
	☞ Índice de correlación		
Zonas potenciales de recarga hídrica	Dependiente	☞ Clasificación de zonas de recarga	☞ Error cuadrático medio
			☞ Potencial de recarga muy bajo
			☞ Potencial de recarga bajo
			☞ Potencial de recarga moderado
			☞ Potencial de recarga alto
			☞ Potencial de recarga alto

Fuente: Elaboración propia mediante LaTeX.

3.7 Técnicas e instrumentos

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, fundamentado en el análisis de datos geoespaciales mediante procesamiento raster y en la optimización computacional con técnicas de inteligencia artificial. Para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, se implementó en Python el Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO), el cual permitió asignar de manera óptima los pesos relativos a los factores condicionantes de la recarga.

El procedimiento metodológico comprendió las siguientes técnicas e instrumentos:

☞ **Técnicas:**

- Procesamiento de datos raster para la normalización e integración de variables físicas,

edáficas y climáticas.

- Optimización computacional mediante el Algoritmo de Enjambre de Partículas, utilizando como función objetivo una combinación de varianza y entropía, con el fin de maximizar la diferenciación espacial y la diversidad de clases de recarga.
- Clasificación espacial de resultados en cinco categorías de potencial de recarga (muy baja, baja, moderada, alta, muy alta) empleando cuantiles estadísticos.

☞ Instrumentos:

- Lenguaje de programación PyThon con librerías especializadas en análisis geoespacial y optimización (*NumPy, Rasterio, Matplotlib, SciPy, PySwarms*).
- Sistema de Información Geográfica (ArcGIS) para validación cartográfica de los resultados.
- Capas raster reclasificadas como insumos: pendiente, tipos de suelo, litología, cobertura vegetal, uso actual del suelo y precipitación.

3.8 Técnicas estadísticas aplicadas

Dado que el trabajo se basa en el procesamiento de capas raster y en la optimización mediante *PSO*, las técnicas estadísticas aplicadas se orientaron a la evaluación del desempeño del algoritmo y a la clasificación espacial, más que a estadísticos descriptivos tradicionales. Se consideraron las siguientes:

- ☞ **Función objetivo:** Cálculo de varianza espacial y entropía de *Shannon* como criterios de optimización, buscando maximizar simultáneamente la dispersión de los valores de recarga y la diversidad informativa de las clases.
- ☞ **Clasificación por cuantiles:** Segmentación del índice de recarga hídrica en cinco categorías ordinales (muy baja a muy alta), a partir de los percentiles 20, 40, 60 y 80.
- ☞ **Evaluación del rendimiento del algoritmo:** Análisis de convergencia del *PSO* (mejor costo alcanzado, número de iteraciones, estabilidad de los pesos).
- ☞ **Validación espacial:** Comparación de los mapas obtenidos mediante *PSO* frente a metodologías tradicionales de superposición ponderada en SIG, evaluando la coherencia espacial y la diferenciación de categorías de recarga.

3.9 Desarrollo del trabajo de tesis

Para el desarrollo de la presente investigación, en una primera etapa se procedió a la recopilación, sistematización y preprocesamiento de la información base requerida como insumo para el Algoritmo Enjambre de Partículas. En este sentido, se desarrollaron las siguientes actividades:

1. Descarga de modelos de elevación digital (*DEM*)

Se obtuvieron modelos de elevación digital desde la plataforma (GEO GPS Perú, 2024), los cuales fueron empleados para la delimitación de la cuenca hidrográfica Yucaes y la generación del mapa raster de pendientes. Estos modelos constituyen un insumo fundamental para caracterizar la morfometría del terreno y definir las áreas de análisis, facilitando la posterior identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca en estudio.

2. Obtención de archivos vectoriales (*shapefile*)

De la misma plataforma se descargaron archivos en formato *shapefile* correspondientes a variables biofísicas y geológicas de relevancia para la evaluación de la recarga hídrica. Dichas variables fueron reclasificadas y transformadas a formato raster para su integración como datos de entrada en el algoritmo. Entre los principales insumos se consideran:

- ☞ Mapa de suelos
- ☞ Mapa litológico (tipos de roca)
- ☞ Mapa de cobertura vegetal
- ☞ Mapa de uso y cobertura actual del suelo

La conversión a raster permitió garantizar la homogeneidad en la resolución espacial y la compatibilidad con los demás insumos dentro del entorno SIG, lo cual es indispensable para los procesos de superposición y análisis multicriterio que demanda la metodología propuesta.

3. Datos de precipitaciones

En relación con la variable climática, se recopilaron series históricas de precipitación provenientes de estaciones meteorológicas administradas por la (Autoridad Nacional del Agua, 2024). Posteriormente, los datos fueron depurados y organizados en series temporales consistentes, para luego ser interpolados espacialmente y generar el mapa raster de precipitaciones de la microcuenca Yucaes. Dicho procedimiento se ejecutó en el entorno de ArcGIS, empleando técnicas de interpolación espacial recomendadas en la literatura hidrológica.

4. Procesamiento en SIG

La totalidad de los insumos (*DEM*, variables biofísicas, litológicas y climáticas) fueron procesados en un entorno de Sistema de Información Geográfica (ArcGIS). Se aplicaron herramientas de geoprocésamiento orientadas a la estandarización de la resolución espacial, proyección cartográfica y formato de los datos, garantizando así la compatibilidad de todos los insumos en un mismo marco de análisis. Finalmente, los mapas raster fueron clasificados conforme a los criterios metodológicos establecidos por (Rodríguez Levy et al., 2023), lo que asegura la coherencia técnica y científica con investigaciones previas orientadas a la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica.

3.9.1 Delimitación de la microcuenca Yucaes

La delimitación de la microcuenca Yucaes se efectuó a partir de un modelo de elevación digital (*DEM*) descargado de (GEO GPS Perú, 2024), cuyo sistema de referencia corresponde al datum WGS84. Este *DEM* presenta una resolución espacial de 30 x 30 m y una exactitud caracterizada por un error vertical promedio de ± 20 m (vertical) y ± 30 m (horizontal). El proceso se desarrolló siguiendo las fases de preprocesamiento y análisis hidrológico en el entorno del software ArcGIS 10.8. A continuación, se detallan las etapas metodológicas aplicadas.

1. Preparación del modelo de elevación digital

Se cargó el modelo de elevación digital al software ArcGIS y, para garantizar la precisión de los cálculos hidrológicos, se re proyectó a coordenadas UTM WGS84, zona correspondiente al ámbito de estudio, utilizando la herramienta *Project Raster*. Posteriormente, el modelo de elevación digital fue recortado al área aproximada de la cuenca Yucaes mediante la herramienta *Clip Raster*, empleando como máscara un shapefile de referencia del ámbito de ubicación de la microcuenca Yucaes.

2. Corrección del modelo de elevación digital

El modelo de elevación digital re proyectado presentaba pequeñas depresiones artificiales (*sinks*) que podían interrumpir la continuidad del flujo superficial. Para corregirlas, se aplicó la herramienta *Fill* (ArcToolbox \rightarrow Spatial Analyst Tools \rightarrow Hydrology \rightarrow Fill), obteniéndose un modelo de elevación digital corregido que garantiza la continuidad del drenaje en la microcuenca Yucaes.

3. Dirección de flujo

A partir del modelo de elevación digital corregido se generó el raster de *Flow Direction*, el cual asigna a cada celda la dirección del flujo de escorrentía en función de la pendiente máxima hacia una celda vecina. Esta capa constituye la base para los cálculos de acumulación de flujo y la posterior delimitación de la microcuenca Yucaes.

4. Acumulación de flujo

Con la herramienta *Flow Accumulation* se generó un raster que representa el número de celdas que drenan hacia cada punto del terreno. Este raster permitió identificar el trazado de cauces principales y secundarios dentro de la microcuenca Yucaes.

5. Definición del punto de aforo

Se creó un shapefile de punto en el lugar de descarga de la microcuenca Yucaes, correspondiente al cauce principal en su salida natural. Para mayor precisión, se aplicó la herramienta *Snap Pour Point*, ajustando la ubicación del punto de salida a la celda de mayor acumulación de flujo dentro de un radio de tolerancia definido de +20 m, el punto de aforo definido fue:

$$\text{E}=587115.00$$

$$\text{N}=8550964.00$$

6. Delimitación de la microcuenca Yucaes

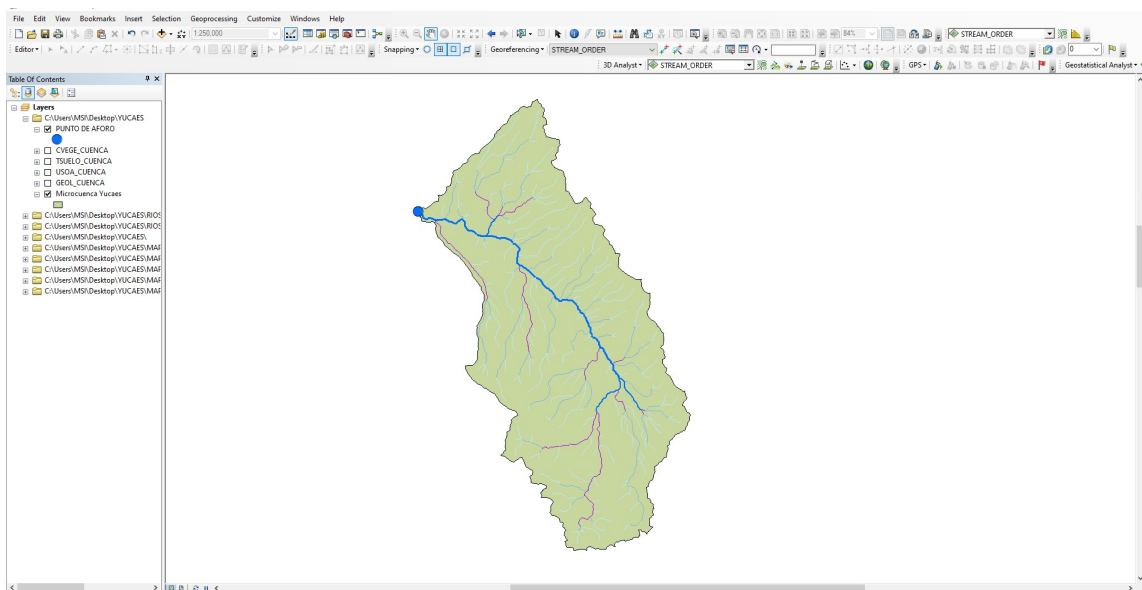
Se procedió a ejecutar la herramienta *Watershed* (ArcToolbox → Spatial Analyst Tools → Hydrology → Watershed), utilizando como entradas el raster de dirección de flujo (*Flow Direction*) y el punto de aforo ajustado (*Snap Pour Point*). Como resultado, se obtuvo un raster con los límites de la microcuenca Yucaes.

7. Conversión a polígono

El raster de la microcuenca Yucaes fue convertido a un archivo vectorial en formato *shapefile* mediante la herramienta *Raster to Polygon* (ArcToolbox → Conversion Tools → From Raster → Raster to Polygon). Finalmente se obtuvo el shapefile del límite de la microcuenca Yucaes.

Este insumo constituye la base para la generación de mapas raster (pendiente, tipos de suelos, tipos de roca, tipos de cobertura vegetal, tipos de uso de suelo y la distribución de la precipitación) y para la aplicación del Algoritmo Enjambre de Partículas para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes.

Figura 3.1: *Proceso de delimitación de la microcuenca Yucaes*



Fuente: Elaboración propia mediante ArcGIS.

3.9.2 Mapa raster de pendientes de la microcuenca Yucaes

Para la elaboración del mapa ráster de pendientes de la microcuenca Yucaes se utilizó el archivo *shapefile* obtenido en el proceso de delimitación de la microcuenca. A partir de este insumo, se aplicó el siguiente procedimiento metodológico.

1. Preparación del modelo de elevación digital (*DEM*)

- ☞ El modelo de elevación digital fue proyectado al sistema de coordenadas *UTM* con datum *WGS84*, correspondiente a la zona geográfica de la microcuenca.
- ☞ Posteriormente, se recortó el modelo de elevación digital utilizando el polígono delimitado de la microcuenca, con el propósito de obtener un modelo de elevación digital específico del área de estudio.

2. Cálculo de pendientes

- ☞ Se aplicó la herramienta *Slope* del módulo **Spatial Analyst** (ArcToolbox → Spatial Analyst Tools → Surface → Slope) en el software ArcGIS.
- ☞ El cálculo se realizó en unidades de porcentaje de elevación relativa (%).
- ☞ El parámetro **Z factor** se estableció en 1, dado que tanto las coordenadas este, norte y la altitud del DEM se encontraban expresadas en metros.

3. Reclasificación del raster de pendientes

- ☞ El raster de pendientes obtenido fue reclasificado en intervalos de 5 clases, siguiendo criterios morfométricos empleados en estudios previos de (Rodríguez Levy et al., 2023), los cuales se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: *Reclasificación de pendientes de la microcuenca Yucaes*

Pendiente	Tipo de terreno	Probabilidad de recarga hídrica
0 – 6 %	Plano o casi plano	Muy alto
6 – 15 %	Moderadamente ondulado	Alto
15 – 45 %	Ondulado / cóncavo	Moderado
45 – 65 %	Escarpado	Bajo
> 65 %	Fuertemente escarpado	Muy bajo

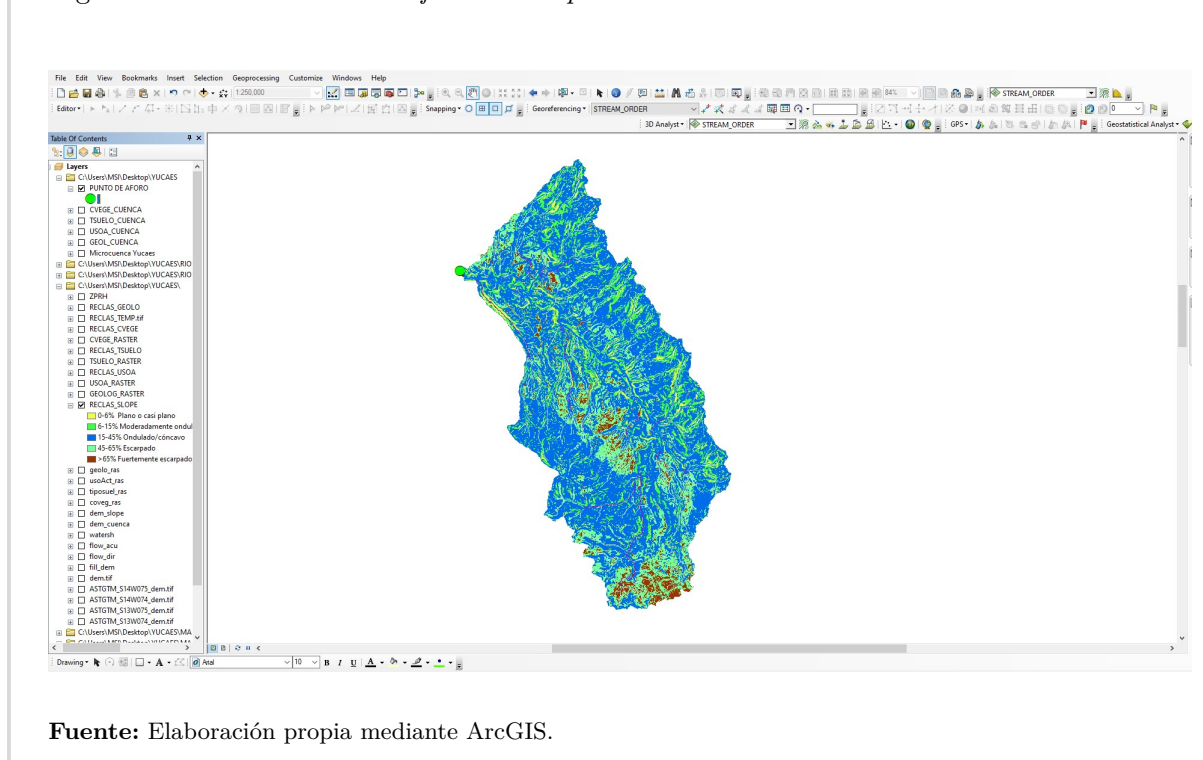
Fuente: Elaboración propia mediante LaTeX.

4. Generación del mapa raster

- ☞ Se aplicó una simbología graduada, asignando colores amarillos a las pendientes planas, tonalidades verdosas a las pendientes moderadas, azules a las pendientes onduladas, verde claro a las pendientes escarpadas y tonos guindos a las pendientes fuertemente escarpadas, el cual fue exportado en formato raster (*.tif*).

De este modo, el procedimiento permitió generar un insumo raster clave para la posterior aplicación del Algoritmo Enjambre de Partículas, para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes.

Figura 3.2: Proceso de reclasificación de pendientes de la microcuenca Yucaes



3.9.3 Mapa raster de tipos de suelo de la microcuenca Yucaes

Para la elaboración del mapa ráster de tipos de suelo de la microcuenca Yucaes se utilizó el archivo *shapefile* obtenido en el proceso de delimitación de la microcuenca. A partir de este insumo, se aplicó el siguiente procedimiento metodológico.

1. Descarga de mapa de suelos

- ☞ Se obtuvo la cartografía nacional de los tipos de suelos en formato vectorial (.shp) desde la plataforma (GEO GPS Perú, 2024).
- ☞ Posteriormente la información contenida a escala nacional de los tipos de suelo, fue adaptada al ámbito de estudio de la microcuenca Yucaes.

2. Preparación y recorte de la información

- ☞ La capa vectorial de suelos fue proyectada al sistema de coordenadas *UTM* con datum *WGS84*, zona correspondiente a la microcuenca Yucaes, ubicada en el departamento de Ayacucho.
- ☞ Se recortó el mapa *shapefile* de suelos empleando el *shapefile* delimitado de la microcuenca Yucaes, a fin de extraer únicamente la información espacial relevante al área de estudio.

3. Conversión a formato raster

- ☞ El *shapefile* recortado fue transformado a formato raster mediante la herramienta *Polygon to Raster* (ArcToolbox → Conversion Tools → To Raster → Polygon to Raster).
- ☞ Se definió la resolución espacial en 30x30 m, manteniendo coherencia con el modelo de elevación digital y con los demás insumos raster.

4. Reclasificación de tipos de suelo

- ☞ El mapa raster fue reclasificado en función de su capacidad de infiltración y permeabilidad, siguiendo criterios establecidos en estudios previos de (Rodríguez Levy et al., 2023), el cual se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.3: *Reclasificación de tipos de suelo de la cuenca Yucaes*

Tipos de suelo	Probabilidad de recarga hídrica
Suelos arenosos, aluviales o zonas acuáticas con alta capacidad de infiltración	Muy alto
Suelos bien drenados, fértiles, con buena infiltración	Alto
Suelos con textura media, buen drenaje, pero limitados por condiciones climáticas o profundidad	Moderado
Suelos arcillosos, compactados, baja infiltración	Bajo
Superficies impermeables que no permiten infiltración	Muy bajo

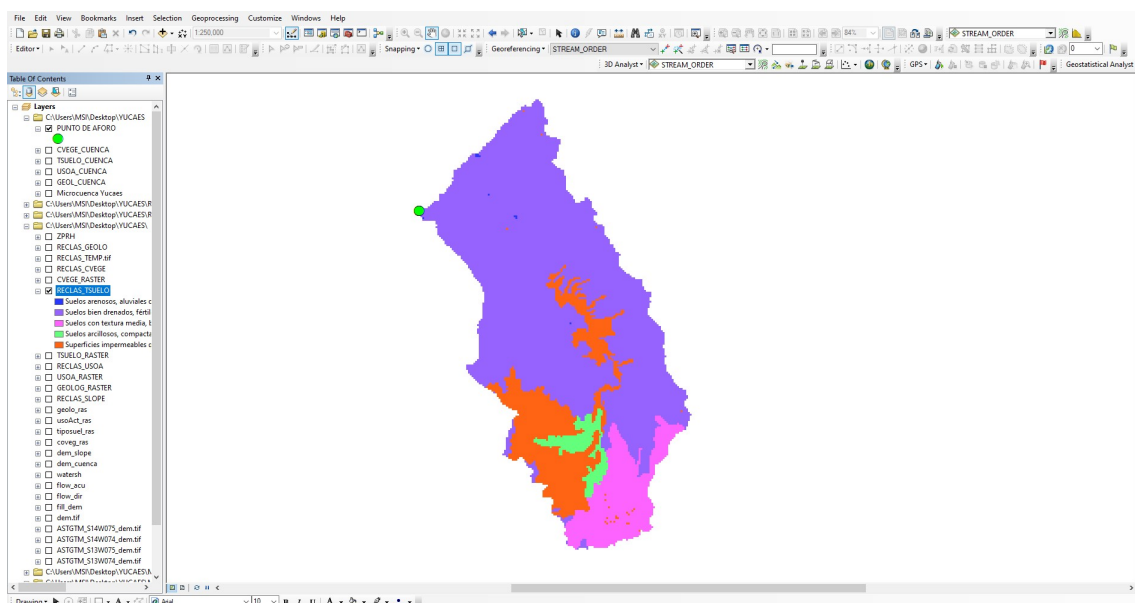
Fuente: Elaboración propia mediante LaTeX.

5. Generación del mapa raster

- ☞ Se aplicó una simbología graduada para representar las distintas clases de suelo, asignando colores específicos según su capacidad de infiltración. Así, se emplearon tonalidades azules para suelos arenosos, aluviales o zonas acuáticas con alta infiltración; morados para suelos bien drenados y fértiles; rosas para suelos de textura media y buen drenaje, aunque limitados por factores climáticos o profundidad; verdes para suelos arcillosos y compactados con baja infiltración; y rojos para superficies impermeables sin capacidad de infiltración. Finalmente, el resultado fue exportado en formato ráster (*.tif*).

De este modo, el procedimiento permitió generar un insumo raster de clasificación de tipos de suelo para la posterior aplicación del Algoritmo Enjambre de Partículas, para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes.

Figura 3.3: Proceso de reclasificación de tipos de suelo de la microcuenca Yucaes



Fuente: Elaboración propia mediante ArcGIS.

3.9.4 Mapa raster de tipos de roca de la microcuenca Yucaes

Para la elaboración del mapa ráster de tipos de roca de la microcuenca Yucaes se utilizó el archivo *shapefile* obtenido en el proceso de delimitación de la microcuenca. A partir de este insumo, se aplicó el siguiente procedimiento metodológico.

1. Descarga de mapa geológico

- ☞ Se descargó el *shapefile* del mapa geológico a nivel nacional desde la plataforma (GEO GPS Perú, 2024).

2. Preparación y recorte de la información

- ☞ El archivo vectorial fue proyectado al sistema de coordenadas *UTM* con datum *WGS84*, correspondiente a la zona geográfica de la microcuenca Yucaes.
- ☞ Se realizó un recorte del *shapefile* de mapa geológico utilizando el polígono delimitado de la microcuenca, con el objetivo de obtener únicamente la información litológica correspondiente a la microcuenca Yucaes.

3. Conversión a formato raster

- ☞ El *shapefile* del mapa de tipos de roca recortado fue convertido a formato raster empleando la herramienta *Polygon to Raster* del software ArcGIS (ArcToolbox → Conversion Tools → To Raster → Polygon to Raster).

- ☞ Se estableció una resolución espacial de 30x30 m, consistente con la resolución del modelo de elevación digital previamente utilizado.

4. Reclasificación de tipos de roca

- ☞ El raster generado fue reclasificado en función de las principales unidades de roca presentes en la microcuenca, de acuerdo con la clasificación geológica consultada en la bibliografía según (Rodríguez Levy et al., 2023) el cual se muestra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: *Reclasificación de tipos de roca de la microcuenca Yucaes*

Tipos de roca	Probabilidad de recarga hídrica
Arenas gravas arcillas, bloques y gravas angulosas consolidadas, gravas subredondeadas a subangulosas arena, lagunas	Muy alto
Areniscas rojas calizas	Alto
Conglomerados areniscas lutitas andesitas, gravas y bloques subangulosos con matriz arenosa y limosa, lavas andesíticas flujos piroclásticos, tobas lapiliticas lavas	Moderado
Granito, lavas tobas	Bajo
Área urbana	Muy bajo

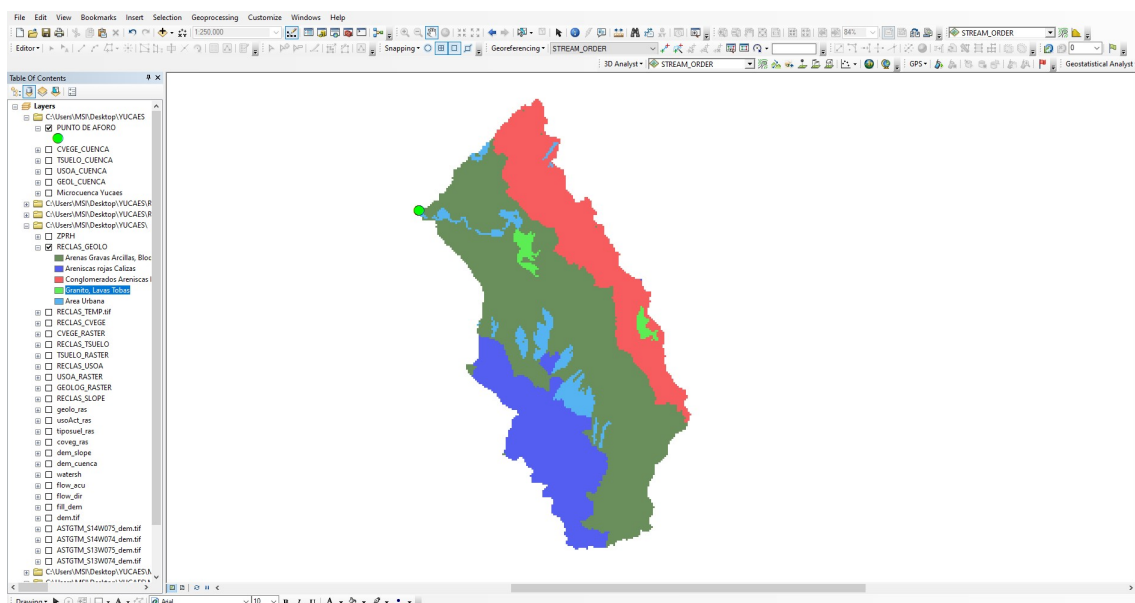
Fuente: Elaboración propia mediante LaTeX.

5. Generación del mapa raster

- ☞ Se aplicó una simbología graduada para representar las distintas clases de roca, asignando colores específicos de acuerdo con su capacidad de infiltración. De este modo, se emplearon tonalidades verdes para rocas como arenas, gravas, arcillas, bloques y gravas angulosas consolidadas, gravas subredondeadas a subangulosas, arenas y lagunas; azules para areniscas rojas y calizas; rosas para conglomerados, areniscas, lutitas, andesitas, gravas y bloques subangulosos con matriz arenosa y limosa, lavas andesíticas, flujos piroclásticos, tobas lapillíticas y lavas; verde oscuro para granitos, lavas y tobas; y celeste para superficies impermeables sin capacidad de infiltración. Finalmente, el mapa resultante fue exportado en formato ráster (.tif).

De este modo, el procedimiento permitió generar un insumo raster de clasificación de tipos de roca para la posterior aplicación del Algoritmo Enjambre de Partículas, para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes.

Figura 3.4: Proceso de reclasificación de tipos de roca de la microcuenca Yucaes



Fuente: Elaboración propia mediante ArcGIS.

3.9.5 Mapa raster de tipos de cobertura vegetal de la microcuenca Yucaes

Para la elaboración del mapa ráster de tipos de cobertura vegetal de la microcuenca Yucaes se utilizó el archivo *shapefile* obtenido en el proceso de delimitación de la microcuenca. A partir de este insumo, se aplicó el siguiente procedimiento metodológico.

1. Descarga y preparación de datos

- ☞ Se descargó el *shapefile* de cobertura vegetal a nivel nacional desde la plataforma (GEO GPS Perú, 2024).
- ☞ El archivo vectorial fue proyectado al sistema de coordenadas *UTM* con datum *WGS84*, correspondiente a la zona geográfica de la microcuenca Yucaes.
- ☞ Mediante la herramienta *Clip* se recortó el *shapefile* de cobertura vegetal utilizando el polígono delimitado de la microcuenca, con el propósito de obtener únicamente la información temática del área de estudio.

2. Conversión a formato raster

- ☞ El *shapefile* recortado de cobertura vegetal fue transformado a formato raster empleando la herramienta *Polygon to Raster* del software ArcGIS (ArcToolbox → Conversion Tools → To Raster → Polygon to Raster).
- ☞ La resolución espacial del raster se definió en 30x30 m, homogénea con la del modelo de elevación digital y demás insumos.

3. Reclasificación de la cobertura vegetal

- ☞ El raster generado fue reclasificado agrupando las categorías de cobertura vegetal en clases de interés para la evaluación de recarga hídrica.
- ☞ Se asignó un valor único a cada categoría reclasificada, siguiendo criterios de estudios previos relacionados con el impacto de la vegetación en la infiltración y retención hídrica según (Rodríguez Levy et al., 2023), lo cual se muestra en la Tabla 3.37.

Tabla 3.5: *Reclasificación de tipos de cobertura vegetal de la microcuenca Yucaes*

Tipos de cobertura vegetal	Probabilidad de recarga hídrica
Áreas de cultivo	Muy alto
Bofedales	Alto
Bosque seco	Moderado
Vegetación arbustiva	Bajo
Áreas urbanas, bosques andinos relictos, lagunas, pajonal	Muy bajo

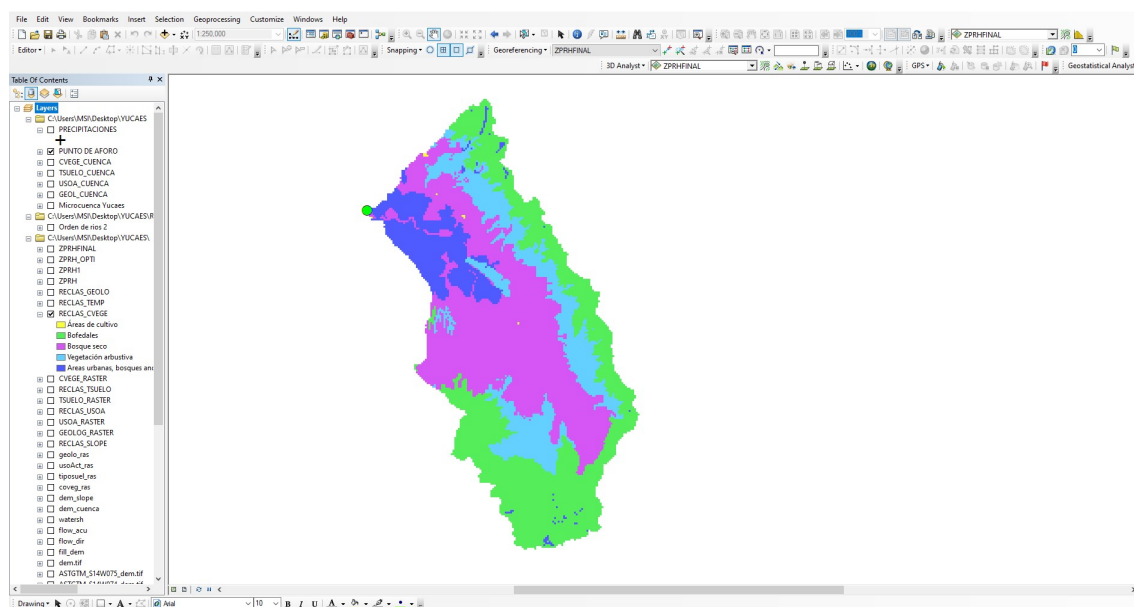
Fuente: Elaboración propia mediante LaTeX.

4. Generación del mapa raster

- ☞ Se aplicó una simbología graduada para representar las distintas clases de cobertura vegetal, asignando colores específicos en función de su capacidad de infiltración. Así, se utilizaron tonalidades amarillas para las áreas de cultivo; verdes para los bofedales; rosas para el bosque seco; celeste para la vegetación arbustiva; y azules para las áreas urbanas, bosques andinos relictos, lagunas y pajonales. Finalmente, el mapa generado fue exportado en formato ráster (.tif).

De este modo, el procedimiento permitió generar un insumo raster de clasificación de tipos de cobertura vegetal para la posterior aplicación del Algoritmo Enjambre de Partículas, para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes.

Figura 3.5: Proceso de reclasificación de tipos de cobertura vegetal de la microcuenca Yucaes.



Fuente: Elaboración propia mediante ArcGIS.

3.9.6 Mapa raster de uso/cobertura actual de suelo de la microcuenca Yucaes

Para la elaboración del mapa ráster de tipos de uso/cobertura actual de suelo de la microcuenca Yucaes se utilizó el archivo *shapefile* obtenido en el proceso de delimitación de la microcuenca. A partir de este insumo, se aplicó el siguiente procedimiento metodológico.

1. Descarga y preparación de datos

- ☞ Se descargó el *shapefile* de uso y cobertura actual del suelo a nivel nacional desde la plataforma (GEO GPS Perú, 2024).
- ☞ El archivo vectorial fue proyectado al sistema de coordenadas *UTM* con datum *WGS84*, correspondiente a la zona geográfica de la microcuenca.
- ☞ Mediante la herramienta *Clip* se recortó el *shapefile* utilizando el polígono delimitado de la microcuenca Yucaes, con el objetivo de restringir la información al área de estudio.

2. Conversión a formato raster

- ☞ El *shapefile* recortado fue convertido a formato raster mediante la herramienta *Polygon to Raster* del software ArcGIS (ArcToolbox → Conversion Tools → To Raster → Polygon to Raster).
- ☞ La resolución espacial del raster se definió en 30x30 m, para garantizar la compatibilidad con los demás insumos temáticos y el modelo de elevación digital.

3. Reclasificación del uso/cobertura actual del suelo

- ☞ El raster generado fue reclasificado, agrupando las categorías en clases representativas de interés para el análisis de recarga hídrica.
- ☞ Se asignó un valor único a cada clase reclasificada, siguiendo criterios de bibliografía especializada sobre la relación entre uso del suelo e infiltración, el cual se muestra en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: *Reclasificación de tipos de uso y cobertura actual de suelo de la microcuenca Yucaes*

Tipos de uso y cobertura actual de suelo	Probabilidad de recarga hídrica
Arbustal, arbustal (exploración minera), áreas agrícolas, áreas agrícolas (exploración minera)	Muy alto
Bosque denso bajo (bosque seco), bosque denso bajo (exploración minera), bosque denso bajo (relictos)	Alto
Herbazal (uso pecuario), lagunas, lagos y ciénagas naturales permanentes	Moderado
Tejido urbano continuo	Bajo
Turberas y bofedales (uso pecuario)	Muy bajo

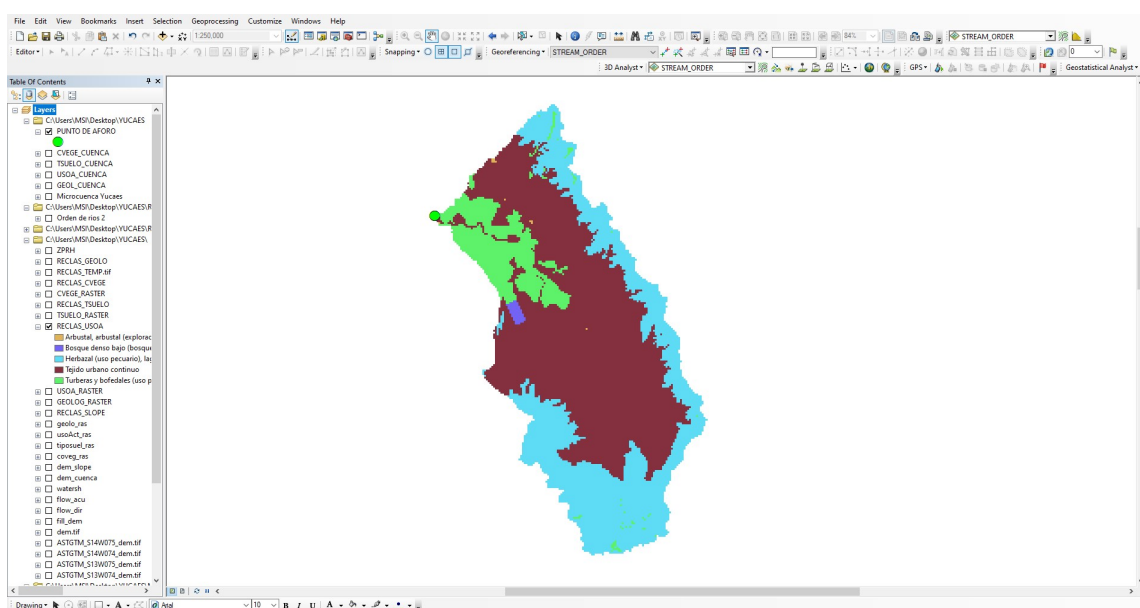
Fuente: Elaboración propia mediante LaTeX.

4. Generación del mapa raster

- ☞ Se aplicó una simbología graduada para representar las distintas clases de uso y cobertura actual del suelo, asignando colores específicos de acuerdo con su capacidad de infiltración. En este sentido, se utilizaron tonalidades naranjas para arbustales, arbustales en exploración minera, áreas agrícolas y áreas agrícolas en exploración minera; azules para bosques densos bajos (bosque seco), bosques densos bajos en exploración minera y bosques densos bajos relictos; celestes para herbazales destinados al uso pecuario, lagunas, lagos y ciénagas naturales permanentes; marrones para el tejido urbano continuo; y verdes para turberas y bofedales empleados en el uso pecuario. Finalmente, el mapa obtenido fue exportado en formato ráster (.tif).

De este modo, el procedimiento permitió generar un insumo raster de clasificación de tipos de uso y cobertura actual de suelo para la posterior aplicación del Algoritmo Enjambre de Partículas, para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes.

Figura 3.6: *Proceso de reclasificación de tipos de uso y cobertura actual de suelo de la microcuenca Yucaes*



Fuente: Elaboración propia mediante ArcGIS.

3.9.7 Mapa raster de distribución de la precipitación en la microcuenca Yucaes

Para generar el mapa raster de distribución espacial de la precipitación sobre la microcuenca Yucaes se descargaron y procesaron los registros históricos de precipitación de las estaciones meteorológicas disponibles en la cuenca y alrededores de la misma del portal (Autoridad Nacional del Agua, 2024). Se obtuvieron series de precipitación de 9 estaciones con 58 años de registro. El procesamiento consistió en control de calidad, análisis de tendencias, completación de datos faltantes, cálculo de precipitación media mensual y de los estadísticos históricos (precipitación máxima histórica, precipitación media histórica y precipitación mínima histórica) por estación. A partir de estos estadísticos puntuales se realizó la interpolación espacial mediante el método *IDW* en el software ArcGIS para generar el mapa raster de distribución de precipitaciones. Finalmente, los rasters fueron recortados a la extensión de la microcuenca Yucaes.

1. Descarga de datos de precipitación

En primer lugar, se accedió al portal institucional del (Autoridad Nacional del Agua, 2024) para descargar los registros históricos de precipitación correspondientes a las estaciones meteorológicas, Wayllapampa, Vilcashuamán, La Quinua, Lircay, Acobamba, San Pedro De Cachi, Pampas, Huancapi y Quillabamba, localizadas en la microcuenca Yucaes y alrededores de la misma.

2. Procesamiento y control de calidad

Una vez recopilados los datos, los datos de precipitaciones diarias fueron convertidas a datos mensuales mediante la sumatoria de los registros diarios, para su posterior estan-

darización de formatos de fecha y las unidades de medida para asegurar la coherencia en la base de datos. Asimismo, se realizó la detección de valores atípicos y errores evidentes, como precipitaciones negativas o magnitudes inconsistentes.

3. Análisis de tendencias

Ya con los datos depurados, se efectuó un análisis exploratorio que incluyó la representación gráfica de las series temporales, la elaboración de diagramas de caja por mes y el cálculo de estadísticas descriptivas (media, mediana, percentiles, entre otras).

4. Completación de datos faltantes

Posteriormente, se aplicaron métodos de interpolación para completar los valores faltantes. La selección de la técnica dependió de la extensión y naturaleza de los huecos de información. Para vacíos cortos se utilizaron métodos de interpolación temporal lineal, promedios móviles o regresión. En el caso de ausencias prolongadas o estaciones con alta proporción de datos faltantes, se recurrió a técnicas basadas en estaciones vecinas (como regresión múltiple).

5. Estadísticos históricos por cada estación meteorológica

Con las series corregidas y completas, se calcularon los principales indicadores para cada estación. Entre ellos se incluyeron: la precipitación media mensual, obtenida como el promedio de cada mes a lo largo de los 58 años de registro; la precipitación máxima histórica anual, definida como el valor máximo observado en la serie; la precipitación mínima histórica anual, como el valor mínimo registrado; y la precipitación media histórica, calculada como el promedio de las precipitaciones anuales en todo el periodo de análisis. Se dejó claramente establecido en el informe si los estadísticos se referían a totales mensuales o anuales, de acuerdo con el enfoque definido.

6. Preparación de datos espaciales de precipitación para ArcGIS

A continuación, se prepararon los datos en un entorno SIG. Para ello se creó una capa de puntos (*shapefile*) representando las nueve estaciones, incorporando como atributos las variables *ESTACION*, *COORD_X*, *COORD_Y*, *PP_{MAX}*, *PP_{MEDIA}*, *PP_{MIN}*. La capa fue proyectada a un sistema de coordenadas adecuado, específicamente *UTM* de la zona correspondiente, para facilitar el análisis espacial. Asimismo, se incorporó el polígono de delimitación de la microcuenca Yucaes, que serviría posteriormente como máscara de recorte.

7. Interpolación espacial (*IDW*) y generación del mapa raster de precipitación

Finalmente, se procedió a la interpolación espacial de la variable seleccionada (precipitación media histórica). Para ello se utilizó el método *Inverse Distance Weighting (IDW)* implementado en el software ArcGIS. Los parámetros se configuraron considerando las características de la red de estaciones: el valor de power se fijó entre 1 y 3 (siendo 2 el más común), con el fin de ajustar el grado de influencia de las estaciones más cercanas. El radio de búsqueda se definió en función de la densidad de estaciones, empleando entre 6 y 12 vecinos. La resolución espacial del raster (cell size) fue determinada de acuerdo con la

extensión de la microcuenca y la escala de trabajo, seleccionándose valores de 30 metros. Una vez ejecutada la interpolación, el raster obtenido fue recortado mediante el polígono de la microcuenca, obteniéndose así el mapa de distribución espacial de las precipitaciones.

3.9.7.1 Series de precipitaciones completadas por cada estación meteorológica

En este apartado, se presenta los registros de precipitación correspondientes a cada una de las estaciones meteorológicas consideradas en la presente tesis, los cuales han sido previamente sometidos a un proceso de depuración, control de calidad y completado de datos faltantes. Dichos valores representan series consistentes y homogéneas, lo que garantiza su confiabilidad para los análisis posteriores.

Tabla 3.7: Datos de la estación meteorológica Wayllapampa

Estación	Wayllapampa (Código: 000664)
Variable	Precipitación Acumulada 1 Día (mm)
Operador	Servicio Nacional Meteorología E Hidrología
WGS 84 Geográficas	Latitud: -13.076389 / Longitud: -74.216667 / Altitud(msnm): 2518
Tipo	Convencional / Climática
Ámbito Político	Dpto: Ayacucho / Prov: Huamanga / Dist.: Pacaycasa
Ámbito Administrativo	AAA: Mantaro / ALA: Ayacucho
Unidad Hidrográfica	Cuenca Mantaro

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.8: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Wayllapampa

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1967	0.00	1.09	4.96	0.90	10.50	0.00	8.00	6.00	9.00	13.00	21.60	118.10
1968	102.60	108.50	78.80	0.00	0.00	6.00	2.50	0.00	18.20	60.20	94.00	156.40
1969	46.50	64.70	218.20	90.50	0.00	4.20	12.40	0.00	37.40	73.00	177.50	129.10
1970	206.50	150.50	336.60	2.35	22.50	0.00	0.00	0.00	88.30	90.10	43.80	60.50
1971	152.30	404.80	97.00	16.80	0.00	17.20	0.00	10.30	18.00	32.40	67.40	45.10
1972	48.70	49.00	104.50	0.00	0.00	0.00	20.20	10.20	12.10	12.60	101.80	94.40
1973	64.70	191.90	210.30	99.90	14.00	0.00	0.00	0.00	43.80	8.40	118.80	174.00
1974	262.10	189.00	183.30	16.20	2.40	36.80	0.00	80.90	0.03	33.00	18.00	51.20
1975	99.80	0.21	221.35	0.47	0.29	0.85	0.62	0.26	0.16	4.53	0.77	4.62
1976	1.01	2.54	4.87	3.86	0.40	0.07	3.83	0.11	2.61	0.23	0.00	0.00
1977	2.04	0.87	2.09	4.14	0.37	0.03	0.03	0.00	1.89	0.80	3.79	0.45
1978	0.49	0.52	2.53	3.05	0.45	0.22	0.00	3.15	0.17	0.16	1.33	3.45
1979	0.00	1.11	1.12	0.27	0.31	0.13	0.45	4.01	0.39	0.20	0.00	0.22
1980	0.32	69.70	72.60	11.00	1.40	0.00	2.00	5.00	3.90	47.00	58.00	14.59
1980	0.32	69.70	72.60	11.00	1.40	0.00	2.00	5.00	3.90	47.00	58.00	14.59

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.9: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Wayllapampa

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1981	95.00	134.00	80.80	3.00	0.00	4.00	0.00	81.20	56.40	116.00	55.00	125.00
1982	0.00	0.30	2.77	0.00	0.38	2.90	0.31	27.00	2.00	38.00	99.00	54.00
1983	0.00	0.93	3.11	0.19	0.72	0.05	1.67	0.00	0.20	0.16	0.00	0.94
1984	0.00	1.92	2.72	0.57	0.47	0.13	1.16	0.00	0.19	0.19	0.11	1.50
1985	0.56	1.21	5.99	3.60	0.17	0.31	0.01	0.00	1.84	0.64	1.45	0.00
1986	0.00	1.13	2.16	1.15	7.80	0.00	0.00	0.00	51.20	1.40	0.00	0.00
1987	192.50	111.70	19.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.80	0.00	11.80
1988	279.30	241.40	108.70	142.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.68	2.65
1989	2.41	2.20	3.64	7.15	0.50	0.25	0.91	0.00	2.63	0.22	0.87	0.00
1990	0.00	1.03	3.05	0.74	0.65	0.46	0.05	0.00	1.60	0.11	1.46	5.40
1991	1.54	1.26	10.82	1.97	0.69	0.26	1.03	40.58	2.04	0.26	0.57	15.37
1992	0.76	2.08	2.20	1.51	0.26	0.12	0.26	0.00	1.15	0.19	0.00	0.02
1993	21.34	6.58	7.98	48.20	9.00	6.00	3.20	7.00	62.90	44.30	59.90	106.90
1994	134.20	84.10	113.70	21.00	4.20	0.20	1.20	0.20	12.00	10.80	33.40	82.60
1995	135.80	126.50	61.20	8.60	18.30	2.40	3.40	2.70	8.60	20.60	44.60	27.60
1996	70.20	106.30	116.30	40.30	2.00	0.00	0.00	14.10	14.20	16.60	34.70	55.80
1997	148.70	88.10	57.50	21.00	1.20	0.00	2.30	16.60	38.60	0.60	69.40	86.00
1998	129.60	92.40	76.60	14.70	0.00	1.20	0.00	1.20	2.20	25.50	5.70	61.50
1999	102.60	109.90	67.10	21.00	0.00	0.00	1.80	0.00	42.00	11.10	82.00	52.70
2000	96.00	188.00	176.00	13.10	21.60	14.60	25.90	6.20	5.90	27.80	9.80	103.20
2001	279.50	161.80	115.40	21.20	33.90	3.20	39.00	17.70	20.20	47.40	65.70	34.50
2002	88.40	122.70	191.60	31.30	16.80	2.20	33.30	20.80	28.80	20.90	42.60	90.90
2003	37.70	177.10	121.70	80.40	5.50	1.00	0.00	16.00	17.20	0.00	13.00	62.90
2004	112.40	80.90	66.40	8.50	8.00	5.40	19.70	8.70	23.80	39.00	43.80	133.80
2005	60.90	60.00	44.00	17.60	26.10	0.00	2.50	4.90	4.00	47.40	26.10	89.40
2006	111.20	82.90	120.20	35.00	6.50	3.50	2.30	13.10	18.30	38.20	88.40	71.10
2007	59.00	71.90	117.30	38.20	23.40	9.00	3.20	6.10	13.50	43.60	0.72	69.40
2008	81.60	65.00	45.80	15.00	23.10	2.70	0.00	3.00	10.30	11.30	24.50	69.80
2009	100.60	138.30	34.30	46.20	15.10	0.40	3.90	6.30	12.40	39.00	71.50	130.80
2010	117.70	104.80	42.50	0.54	0.00	7.59	0.89	0.06	0.13	0.89	0.56	2.36
2011	0.00	1.08	4.35	0.18	0.84	0.05	0.84	1.14	0.53	0.08	4.70	0.00
2012	1.55	0.70	0.99	0.24	0.29	0.80	6.75	5.01	0.76	0.08	1.05	2.60
2013	0.00	1.50	1.87	0.03	0.83	0.23	1.16	0.00	1.29	0.46	0.91	0.00
2014	1.57	0.62	3.78	0.18	0.51	0.21	0.22	1.01	1.27	0.14	2.50	0.00
2015	0.00	0.62	6.31	0.36	0.23	0.42	1.15	0.70	0.09	0.50	1.10	0.32
2016	0.00	0.61	3.10	2.43	0.75	0.47	0.19	1.95	0.55	0.74	0.35	2.10
2017	109.70	158.60	87.70	51.00	28.40	0.00	8.10	9.80	30.40	31.90	48.30	71.90
2018	105.80	120.20	82.90	19.80	7.40	4.40	21.10	40.60	18.90	73.20	90.60	43.20
2019	115.10	147.70	116.40	33.30	6.80	0.60	7.20	0.00	4.40	16.30	103.60	157.30
2020	71.00	100.50	21.90	0.02	1.32	0.00	0.00	2.67	17.60	8.80	6.00	65.80
2021	97.00	97.50	114.00	64.60	15.00	5.60	7.00	2.90	9.00	24.40	43.90	46.20
2022	117.50	88.70	118.90	31.20	0.00	1.70	11.80	15.00	15.70	7.20	14.70	52.60
2023	65.30	79.00	61.60	35.50	29.60	0.70	0.00	1.30	48.70	32.40	29.30	107.50
2024	98.00	145.00	119.60	28.60	0.44	1.40	2.67	2.24	1.62	0.04	0.00	8.66

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.10: Datos de la estación meteorológica Vilcashuamán

Estación	Vilcashuaman (Código: 156211)
Variable	Precipitación Acumulada 1 Día (mm)
Operador	Servicio Nacional Meteorología E Hidrología
WGS 84 Geográficas	Latitud: -13.66 / Longitud: -73.954444 / Altitud(msnm): 3540
Tipo	Convencional / Climática
Ámbito Político	Dpto: Ayacucho / Prov: Vilcas Huaman / Dist.: Vilcas Huaman
Ámbito Administrativo	AAA: Pampas Apurimac / ALA: Pampas
Unidad Hidrográfica	Cuenca Pampas

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.11: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Vilcashuamán

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1967	149.90	243.00	231.90	39.50	18.00	0.00	20.60	42.60	32.40	38.40	32.00	20.00
1968	95.00	183.90	226.50	0.00	18.60	39.30	25.00	52.50	34.70	35.70	27.00	15.20
1969	79.00	91.00	87.80	29.00	0.00	24.00	8.10	28.00	100.00	41.00	25.40	104.60
1970	345.40	108.00	121.70	50.20	14.20	0.00	0.00	0.00	52.90	49.20	32.20	221.40
1971	127.60	194.60	153.60	42.20	4.60	7.30	0.00	4.10	3.10	28.60	9.40	77.20
1972	149.20	94.10	190.00	61.40	0.00	0.00	0.00	0.00	42.70	25.60	46.00	106.10
1973	253.40	187.10	182.20	48.70	0.00	0.00	0.00	0.00	50.20	12.00	32.00	149.50
1974	283.00	276.20	137.60	53.30	6.00	26.00	0.00	57.00	12.00	17.00	25.90	73.00
1975	142.20	142.90	205.00	0.00	45.00	0.00	0.00	0.00	79.00	26.00	7.30	87.70
1976	283.50	281.00	209.00	0.00	12.50	0.00	0.00	0.00	125.20	0.00	0.00	71.00
1977	24.00	256.20	87.40	12.00	0.00	0.00	20.70	0.00	0.00	13.00	114.50	43.00
1978	207.40	88.40	48.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	33.00	61.00	49.50	59.00
1979	126.00	136.00	145.00	44.00	25.00	0.00	0.00	0.00	25.00	16.20	35.00	34.00
1980	93.20	135.10	104.00	0.00	0.00	0.00	16.00	0.00	3.00	81.70	29.80	48.20
1981	159.60	328.00	135.80	64.00	0.00	13.00	0.00	104.80	49.20	82.00	106.00	100.00
1982	144.20	247.20	80.00	55.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	80.00	0.88	71.20
1983	109.00	42.70	0.99	0.68	0.00	0.00	0.00	0.76	0.15	0.43	1.08	0.42
1984	0.99	3.60	0.38	0.66	0.52	0.00	1.21	0.63	11.06	3.66	0.57	4.30
1985	1.08	4.56	0.48	0.14	0.00	0.00	0.00	0.07	0.87	0.08	0.83	4.84
1986	2.95	1.69	0.57	1.10	21.88	0.00	0.30	0.58	0.30	0.44	0.72	98.90
1987	246.10	46.00	8.90	6.60	6.50	9.60	12.00	16.30	6.00	69.10	50.20	65.90
1988	212.50	115.60	161.30	72.30	13.70	0.00	0.00	0.00	14.40	0.00	5.60	177.70
1989	291.50	260.80	91.00	77.40	119.90	6.00	6.80	36.00	28.70	104.70	88.70	44.00
1990	162.50	41.20	36.30	14.80	30.30	83.90	0.00	20.20	26.70	86.60	219.80	134.20
1991	138.50	167.30	106.40	66.00	19.00	46.00	0.00	0.00	8.40	47.60	25.80	11.00
1992	61.40	95.40	49.60	12.80	0.00	3.60	4.40	70.40	4.60	27.80	18.60	40.90
1993	189.20	111.00	155.80	66.00	27.80	9.60	11.20	25.80	47.00	37.20	125.20	210.20
1994	234.20	118.50	123.60	46.50	4.20	0.00	0.00	0.00	3.00	15.40	109.70	64.60
1995	210.40	100.60	181.40	12.40	8.00	0.00	3.80	4.80	27.60	53.30	85.00	105.20

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.12: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Vilcashuamán

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1996	141.30	201.70	104.40	50.60	2.00	0.00	0.00	19.00	29.40	25.80	56.50	92.60
1997	113.40	180.50	110.20	51.00	10.90	0.00	2.90	40.10	55.20	35.30	72.60	67.60
1998	111.40	72.90	113.60	13.40	0.00	11.80	0.00	0.00	10.30	22.80	37.40	53.10
1999	70.00	87.60	25.10	18.50	0.20	0.00	6.50	0.00	65.40	5.80	46.20	36.70
2000	75.60	129.70	69.10	0.20	18.40	0.00	0.00	1.20	19.70	40.80	44.30	66.70
2001	140.70	68.50	71.30	0.00	16.40	0.20	2.20	24.30	19.00	28.20	40.70	53.40
2002	79.60	249.10	154.40	39.20	16.00	0.00	53.90	3.80	35.70	59.80	37.80	106.80
2003	97.40	146.40	134.50	41.60	2.70	0.00	0.00	14.50	0.13	39.50	26.60	147.20
2004	83.40	196.00	95.20	47.70	8.10	10.30	13.60	11.90	15.10	26.90	27.40	169.30
2005	101.40	79.50	181.20	22.50	28.50	0.00	1.90	19.90	46.40	40.80	42.70	123.90
2006	239.40	147.90	147.70	52.30	2.00	13.40	0.00	31.90	14.20	41.50	109.40	101.10
2007	124.10	96.10	153.50	37.40	3.90	0.00	13.90	9.50	15.30	35.30	87.20	139.90
2008	196.20	150.60	100.30	10.20	5.50	7.10	0.00	2.10	5.60	23.20	38.30	111.70
2009	144.00	181.86	101.00	57.60	3.50	2.00	21.60	1.20	0.47	44.90	119.00	123.80
2010	213.70	178.70	65.20	1.91	0.88	0.00	4.27	2.04	0.89	3.71	0.52	7.86
2011	0.73	1.02	0.75	0.10	0.05	0.00	1.74	0.02	1.12	0.00	0.66	0.39
2012	1.26	2.21	1.42	0.23	1.94	1.23	0.00	0.17	0.11	14.19	0.85	0.94
2013	1.64	4.14	1.16	0.49	0.00	0.97	0.23	0.09	0.05	1.78	1.59	1.24
2014	2.53	2.46	0.46	0.23	3.77	0.69	0.75	0.60	1.23	0.00	0.46	0.05
2015	1.13	1.08	0.84	0.41	5.62	0.00	3.45	1.01	1.49	0.00	1.09	0.85
2016	1.42	3.50	1.56	0.64	1.10	0.00	0.00	0.36	0.66	6.39	2.08	0.48
2017	259.00	203.60	121.70	78.50	40.70	4.00	11.20	0.70	30.80	50.20	53.50	100.70
2018	214.10	193.30	165.40	30.80	1.20	22.20	18.00	21.30	11.50	33.30	14.80	0.00
2019	190.50	191.50	128.50	43.10	7.30	0.00	10.10	0.00	9.50	58.60	111.00	168.70
2020	62.80	190.00	55.40	14.40	17.60	1.20	0.00	19.20	10.00	16.10	2.22	0.56
2021	1.05	4.68	1.08	0.21	0.00	0.00	0.49	0.06	10.90	55.50	62.20	123.80
2022	252.70	192.10	104.90	45.60	1.70	12.40	0.00	4.70	6.40	4.20	14.50	147.70
2023	140.50	164.90	105.10	4.40	31.90	0.00	1.10	4.00	35.40	41.90	65.90	130.40
2024	131.80	132.30	102.40	46.00	3.36	0.00	0.00	0.01	2.69	0.24	4.87	1.21

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.13: Datos de la estación meteorológica La Quinua

Estación	La Quinua (Código: 000663)
Variable	Precipitación Acumulada 1 Día (mm)
Operador	Servicio Nacional Meteorología E Hidrología
WGS 84 Geográficas	Latitud: -13.055278 / Longitud: -74.141389 / Altitud(msnm): 3260
Tipo	Convencional / Climática
Ámbito Político	Dpto: Ayacucho / Prov: Huamanga / Dist.: Quinua
Ámbito Administrativo	AAA: Mantaro / ALA: Ayacucho
Unidad Hidrográfica	Cuenca Mantaro

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.14: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica La Quinua

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1967	56.50	326.50	445.60	46.00	48.80	0.00	31.70	15.90	61.60	112.60	114.70	189.20
1968	216.70	193.20	127.70	62.80	14.10	42.10	12.60	5.10	32.30	95.40	118.50	146.80
1969	95.30	90.80	123.10	19.40	27.30	11.60	13.70	16.30	26.90	70.50	89.80	131.30
1970	354.70	100.70	110.20	78.50	34.60	12.30	8.00	0.00	48.60	19.90	35.50	91.00
1971	120.50	188.40	153.70	57.40	0.00	0.00	24.00	19.00	0.00	41.20	4.20	153.00
1972	244.90	21.60	255.60	37.20	0.00	0.00	28.20	0.00	3.20	68.80	27.50	74.30
1973	280.10	187.40	297.60	76.80	19.40	0.00	17.80	37.20	50.00	27.60	26.20	172.70
1974	264.00	369.50	240.70	18.20	23.90	41.60	0.00	43.60	46.60	23.90	17.30	63.60
1975	179.40	123.00	115.90	6.40	41.60	0.00	1.20	9.70	29.90	38.50	45.40	123.60
1976	176.30	178.80	149.20	25.30	33.80	17.00	5.80	11.20	75.20	11.40	15.20	75.00
1977	78.20	148.40	73.90	43.40	18.50	0.00	16.30	10.40	31.80	54.50	100.10	97.00
1978	222.60	132.00	87.20	50.60	11.50	15.00	4.90	1.40	42.90	72.70	89.90	98.80
1979	89.20	126.90	159.50	35.00	22.90	0.00	6.20	17.70	11.20	35.50	70.50	64.60
1980	106.70	97.10	124.20	13.30	0.50	0.10	0.00	0.93	1.22	1.01	1.35	0.46
1981	0.45	1.23	3.34	0.15	0.20	0.21	0.60	20.20	74.80	161.40	122.20	104.50
1982	147.60	191.20	78.00	69.10	4.00	6.10	0.00	29.00	46.50	47.90	159.00	63.20
1983	129.70	42.70	77.60	47.00	0.22	0.56	0.00	0.01	1.31	1.13	1.36	1.01
1984	0.58	0.54	3.25	0.09	0.49	0.45	6.55	0.45	14.91	3.01	0.13	0.66
1985	0.20	0.29	1.82	0.11	0.56	0.25	0.58	4.12	0.17	1.32	1.59	0.86
1986	0.24	1.21	2.68	0.47	0.11	0.27	0.42	0.28	0.76	2.75	0.15	0.69
1987	0.89	0.26	1.58	0.64	0.27	0.13	0.00	3.09	0.00	0.97	0.72	1.13
1988	147.00	153.10	104.50	39.50	29.70	0.00	0.00	0.00	16.50	15.50	52.70	133.70
1989	129.70	82.20	116.10	33.20	19.30	10.60	4.10	12.60	47.00	35.50	34.90	81.60
1990	132.50	31.60	39.60	36.90	11.40	55.40	2.40	30.90	26.60	87.40	125.20	125.80
1991	110.90	57.50	88.90	19.30	8.50	35.10	5.90	0.00	61.70	48.20	30.90	45.20
1992	97.10	99.00	73.00	35.90	0.00	21.70	8.80	33.10	8.10	61.80	52.40	50.60
1993	128.70	176.50	78.60	54.50	16.90	11.60	19.70	23.10	84.70	55.30	72.20	149.30
1994	119.30	138.00	100.30	82.20	4.00	7.30	0.00	17.00	32.40	32.50	54.30	146.80
1995	188.50	142.00	146.60	26.00	34.10	1.30	2.30	1.00	20.60	54.20	86.70	58.60
1996	91.30	110.60	128.30	47.80	2.30	0.00	0.50	17.00	30.30	35.70	49.40	82.60
1997	185.70	146.00	128.80	59.90	10.60	0.00	4.00	33.70	58.20	13.10	81.50	105.20
1998	105.50	173.20	141.40	20.20	6.20	4.70	0.00	6.40	5.80	79.50	57.00	71.20
1999	114.40	159.60	139.10	25.70	1.20	4.00	9.40	0.00	78.50	27.20	71.40	125.70
2000	146.10	205.20	126.50	19.60	41.50	11.20	43.70	5.80	16.80	64.10	14.50	111.60
2001	218.30	114.00	155.40	30.30	48.20	5.30	43.50	21.10	33.70	63.00	102.70	106.90
2002	91.50	173.20	111.30	33.80	31.40	1.40	46.90	15.70	73.20	51.60	105.40	170.40
2003	65.10	191.40	202.40	86.60	26.40	2.60	0.30	30.20	39.80	1.60	32.20	113.20
2004	73.80	106.50	92.50	8.60	16.10	15.60	21.60	14.40	34.80	47.60	64.80	173.50
2005	67.80	121.00	103.80	48.10	17.50	0.60	6.40	0.60	20.70	52.30	52.80	146.70
2006	115.20	125.30	152.60	55.50	1.20	2.40	0.00	14.30	6.90	48.80	93.50	82.60
2007	136.30	89.70	197.90	66.20	15.20	0.00	13.40	1.30	30.90	72.40	78.50	117.10
2008	106.70	154.60	95.60	29.90	22.80	10.00	7.10	1.40	27.10	59.40	41.60	75.20
2009	150.50	174.80	56.10	55.90	26.70	0.40	6.10	8.70	36.70	50.60	113.70	109.90
2010	138.70	120.20	119.30	0.85	0.33	0.07	0.00	3.37	0.00	0.76	1.56	1.10

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.15: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica La Quinua

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
2011	0.10	0.08	6.25	0.61	0.22	0.31	0.00	0.00	0.00	0.85	0.94	1.59
2012	0.67	2.48	3.51	0.65	0.59	0.39	5.24	0.95	0.46	1.32	0.23	1.18
2013	0.25	1.47	1.10	0.41	0.30	0.20	0.00	0.10	0.00	1.91	0.68	0.78
2014	0.33	0.35	7.95	0.14	0.28	0.87	0.84	0.75	0.54	1.91	0.08	0.77
2015	0.67	0.64	2.22	0.21	0.21	0.06	0.00	0.41	0.56	1.06	1.36	1.02
2016	0.37	0.23	1.82	0.27	0.23	0.15	5.18	1.04	0.53	0.57	0.80	0.41
2017	147.20	210.10	110.60	63.20	41.00	0.00	5.50	16.00	55.80	34.90	48.00	131.70
2018	157.60	113.60	103.40	41.80	34.60	5.70	20.70	41.00	8.30	90.50	84.10	47.30
2019	161.60	186.00	183.10	49.30	27.40	0.40	4.60	0.00	9.20	40.90	101.10	225.50
2020	111.80	115.10	31.90	0.35	0.10	0.10	3.06	0.24	0.79	1.41	2.80	0.51
2021	0.70	0.10	1.06	0.52	3.50	7.50	2.20	22.80	9.00	59.00	74.50	105.50
2022	132.50	120.40	117.60	43.30	9.50	2.90	1.90	16.50	15.60	16.90	12.40	67.50
2023	70.10	151.30	48.40	49.20	40.10	0.60	0.00	13.20	47.40	8.60	53.70	107.50
2024	0.56	175.70	157.70	21.70	0.06	0.25	0.55	1.19	0.00	1.62	0.93	0.95

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.16: Datos de la estación meteorológica Lircay

Estación	Lircay (Código: 000657)
Variable	Precipitación Acumulada 1 Día (mm)
Operador	Servicio Nacional Meteorología E Hidrología
WGS 84 Geográficas	Latitud: -12.981667 / Longitud: -74.717778 / Altitud(msnm): 3150
Tipo	Convencional / Climática
Ámbito Político	Dpto: Huancavelica / Prov: Angaraes / Dist.: Lircay
Ámbito Administrativo	AAA: Mantaro / ALA: Huancavelica
Unidad Hidrográfica	Cuenca Mantaro

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.17: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Lircay

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1967	51.02	61.10	47.09	40.16	22.96	23.24	59.74	51.65	57.61	79.46	43.17	21.39
1968	45.82	24.11	37.42	45.92	73.96	50.41	76.97	29.91	43.28	52.47	18.89	30.44
1969	121.49	103.70	148.64	74.39	121.51	182.94	80.88	134.69	148.26	150.32	191.06	97.62
1970	49.47	0.85	38.81	50.56	22.72	61.81	62.34	104.66	87.31	21.56	67.51	49.00
1971	18.91	90.02	57.88	55.57	27.81	43.41	94.39	35.34	66.05	48.79	88.10	34.52
1972	24.34	74.61	6.10	57.01	63.77	45.04	69.95	49.18	94.42	19.39	57.25	32.52
1973	49.91	67.34	59.56	83.13	48.55	73.29	20.68	42.63	61.27	41.85	28.41	38.66

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.18: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Lircay

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1974	31.67	70.00	70.47	50.21	48.40	41.65	67.25	18.11	45.06	26.56	42.65	59.03
1975	62.64	56.03	73.32	61.47	63.12	107.90	40.45	29.58	18.74	36.21	76.07	27.10
1976	54.60	64.58	66.49	79.37	52.65	69.79	89.22	9.19	59.12	14.10	76.82	88.49
1977	47.03	87.41	55.98	60.95	76.31	52.57	76.96	34.31	31.20	86.19	60.21	44.64
1978	91.40	67.84	77.91	51.74	30.55	49.78	49.26	34.55	64.93	57.23	48.02	32.54
1979	44.31	51.81	54.78	34.77	70.34	69.87	56.83	26.57	52.26	28.24	70.95	88.77
1980	58.84	55.75	35.56	42.72	36.34	55.42	29.71	62.18	17.95	71.59	61.16	56.88
1981	26.69	64.30	56.90	71.91	33.43	43.20	57.55	43.89	55.47	58.32	42.61	90.06
1982	50.62	54.69	40.07	13.98	78.38	50.02	40.99	50.36	58.00	39.94	34.24	72.70
1983	19.75	40.16	37.94	52.52	31.10	70.79	48.98	49.27	39.20	38.50	47.20	62.63
1984	48.28	69.70	80.01	30.57	78.33	64.12	63.15	94.99	27.47	41.69	70.72	29.41
1985	0.90	1.10	0.26	0.44	0.63	0.98	0.36	1.32	1.08	0.64	1.60	0.87
1986	52.78	0.85	54.99	27.45	30.42	41.61	84.29	23.59	41.48	43.31	25.81	72.09
1987	38.77	45.32	21.85	53.87	30.78	89.72	69.16	64.82	67.46	64.18	54.31	38.00
1988	46.16	40.69	68.73	51.75	32.03	76.95	81.86	37.97	63.60	20.30	64.48	42.52
1989	24.67	64.75	52.41	16.96	63.42	31.37	46.61	40.33	42.73	58.47	26.46	38.21
1990	40.87	35.11	63.05	46.40	44.47	2.74	46.79	59.55	48.89	30.87	80.57	41.92
1991	29.06	86.86	81.67	79.09	46.16	75.60	62.70	61.22	40.11	0.85	34.54	41.09
1992	29.69	18.09	55.76	79.78	7.06	45.85	18.07	18.33	28.58	48.89	61.99	42.59
1993	25.89	48.91	53.09	32.13	59.24	45.20	30.18	42.18	65.38	40.93	17.71	50.36
1994	30.23	80.11	109.51	56.46	61.73	45.02	33.38	37.02	37.31	66.62	62.78	75.59
1995	36.33	41.74	79.64	32.30	64.71	10.72	36.53	49.30	61.60	23.98	50.28	51.64
1996	63.86	36.56	49.69	82.38	51.88	15.04	60.31	26.16	32.55	56.69	46.37	47.08
1997	66.69	73.38	40.36	75.38	40.93	62.34	47.95	59.16	40.87	54.88	40.29	63.48
1998	69.58	51.75	67.66	43.23	35.61	63.78	40.43	15.00	63.65	35.76	54.52	68.16
1999	47.48	54.82	69.37	61.48	37.64	46.19	63.90	30.33	48.47	74.53	35.30	71.01
2000	51.41	43.16	33.32	72.45	18.12	42.29	54.90	56.22	88.85	42.51	22.44	31.18
2001	43.01	10.45	51.15	35.86	48.89	81.33	62.45	43.69	29.38	53.81	53.03	24.86
2002	29.08	53.67	53.38	56.50	36.90	56.54	62.93	29.39	67.00	45.27	7.48	31.41
2003	40.84	61.72	49.96	22.55	70.91	0.85	79.90	70.53	39.75	62.30	15.40	56.70
2004	55.83	64.70	40.26	49.88	34.91	59.44	32.12	52.66	52.78	32.58	44.40	45.01
2005	48.02	40.11	40.67	32.79	73.72	34.08	54.25	6.30	49.25	75.33	50.56	50.10
2006	71.31	67.68	15.10	21.04	20.70	60.46	56.43	23.81	63.27	27.36	65.13	16.10
2007	6.31	23.69	61.78	52.12	72.90	60.80	41.83	38.23	30.91	55.57	35.69	31.62
2008	34.60	14.93	26.60	59.85	55.00	46.35	34.50	45.95	91.24	65.88	45.84	54.79
2009	59.29	46.59	63.25	50.74	10.46	53.76	64.95	43.09	7.11	59.29	49.29	62.96
2010	95.88	46.86	42.86	62.08	58.51	21.32	45.17	53.83	25.16	6.66	34.58	0.85
2011	45.23	21.23	67.34	29.86	64.35	56.13	54.67	79.13	30.44	30.61	28.16	67.25
2012	24.21	51.15	88.33	63.40	51.76	26.44	64.51	78.55	11.26	13.64	35.87	51.80
2013	42.87	42.40	56.54	49.87	66.41	14.17	19.86	22.99	47.11	73.75	55.75	48.04
2014	60.50	31.72	83.40	60.95	16.30	73.19	63.52	31.78	44.88	10.91	49.12	24.00
2015	46.17	65.86	21.68	32.40	26.56	64.59	45.59	46.92	70.90	64.14	31.45	28.32
2016	69.06	54.68	44.02	43.55	50.85	19.17	67.19	74.98	73.22	62.19	43.50	33.02
2017	39.53	49.13	65.14	20.22	48.59	27.63	42.87	80.84	86.74	51.15	61.45	62.75

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.19: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Lircay

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
2018	70.37	52.70	57.36	56.45	31.22	73.21	98.86	93.55	22.85	54.86	19.72	21.95
2019	14.34	21.30	33.39	75.10	43.66	51.46	64.55	63.93	59.27	22.56	37.24	46.85
2020	17.11	30.74	45.66	76.61	91.89	25.60	70.08	7.79	47.67	67.46	79.23	86.09
2021	72.55	29.02	26.81	6.35	52.67	40.27	36.67	54.22	89.47	64.62	52.04	33.80
2022	50.73	66.50	38.02	22.53	53.18	45.39	46.60	55.64	45.01	76.13	60.03	18.90
2023	24.41	52.85	33.54	53.58	23.22	90.35	40.15	60.89	46.35	70.05	73.68	61.09
2024	83.93	66.43	87.93	40.05	35.63	66.85	53.82	42.88	36.97	16.49	23.73	78.45

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.20: Datos de la estación meteorológica Acobamba

Estación	Acobamba (Código: 000659)
Variable	Precipitación Acumulada 1 Día (mm)
Operador	Servicio Nacional Meteorología E Hidrología
WGS 84 Geográficas	Latitud: -12.8375 / Longitud: -74.567778 / Altitud(msnm): 3236
Tipo	Convencional / Climática
Ámbito Político	Dpto: Huancavelica / Prov: Acobamba / Dist.: Acobamba
Ámbito Administrativo	AAA: Mantaro / ALA: Huancavelica
Unidad Hidrográfica	Cuenca Mantaro

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.21: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Acobamba

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1967	82.57	46.71	38.24	45.96	41.10	48.90	42.71	66.65	51.28	8.89	26.57	103.20
1968	84.84	65.57	79.67	35.51	53.94	96.02	48.43	65.06	100.70	59.74	56.58	71.96
1969	30.33	87.93	31.43	71.06	57.42	49.71	72.12	59.83	56.44	76.73	46.98	41.46
1970	104.74	37.05	55.54	75.39	55.17	62.62	48.99	71.34	5.21	49.40	42.56	52.00
1971	53.42	86.33	63.59	45.33	48.76	36.86	68.55	72.63	55.27	35.77	72.87	54.17
1972	153.15	147.15	115.22	126.24	127.96	144.45	161.38	112.93	175.55	133.82	100.57	168.78
1973	59.29	59.72	24.57	75.76	35.36	70.57	65.16	60.20	75.48	57.47	87.46	70.79
1974	61.46	49.24	48.05	37.08	69.96	85.56	78.03	58.65	27.12	52.51	121.53	77.85
1975	16.53	54.20	40.16	79.70	63.57	54.89	62.29	86.28	67.93	46.89	44.21	53.44
1976	63.55	45.06	39.84	44.48	61.47	55.90	82.60	58.89	61.55	56.18	75.28	48.89
1977	18.44	68.37	32.69	40.23	38.16	51.33	79.72	48.43	83.04	44.47	57.14	77.25
1978	68.12	51.29	34.81	66.08	66.28	79.26	30.08	62.96	80.28	46.11	80.16	100.20
1979	59.10	57.35	71.62	33.02	64.76	78.39	58.36	73.13	57.72	47.33	27.53	55.78
1980	64.71	84.53	55.50	28.98	72.02	62.07	63.22	69.85	45.26	94.02	111.07	69.32

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.22: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Acobamba

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1981	70.26	62.64	55.95	43.74	85.75	60.26	48.62	43.65	48.17	73.26	49.99	76.30
1982	25.12	86.75	27.75	38.68	52.86	75.39	55.92	38.62	58.66	79.60	73.73	20.85
1983	77.75	42.63	36.80	84.92	49.54	88.71	21.87	71.35	57.80	82.69	48.20	37.15
1984	90.91	45.79	71.56	48.30	36.63	34.90	75.25	53.92	81.87	60.44	76.54	57.33
1985	67.81	44.79	20.75	35.95	39.28	43.69	46.89	33.15	94.54	80.46	56.58	84.87
1986	67.88	70.03	46.30	71.32	35.54	24.46	58.75	76.00	68.96	38.71	74.56	89.75
1987	43.87	19.74	51.81	80.12	73.79	33.86	77.34	70.75	45.71	54.14	26.00	74.14
1988	74.66	60.04	73.93	75.96	64.08	18.77	43.04	68.33	18.47	91.03	99.96	40.06
1989	15.79	48.88	85.26	63.46	47.83	43.90	45.49	83.15	70.06	25.61	41.09	25.22
1990	62.53	58.89	47.75	62.22	58.52	44.07	59.69	61.72	90.90	87.99	79.95	87.43
1991	29.00	70.36	61.41	71.04	31.21	85.89	74.03	48.18	63.97	89.47	39.41	81.76
1992	88.83	91.49	84.26	73.71	61.96	42.23	60.29	32.32	47.25	64.68	32.90	41.64
1993	76.49	29.81	68.84	57.59	44.98	34.99	83.96	57.96	65.03	52.88	66.40	21.03
1994	56.95	69.38	51.83	51.58	60.28	45.22	36.54	64.90	78.24	51.82	66.49	93.10
1995	55.26	50.57	54.91	73.80	26.72	64.45	37.28	2.52	49.77	58.63	68.36	64.28
1996	33.28	78.26	78.99	56.15	43.71	44.37	57.47	62.80	68.01	38.82	53.40	88.62
1997	27.03	67.11	64.81	79.33	100.93	56.08	57.08	76.81	69.26	11.79	51.18	75.61
1998	42.51	41.13	72.77	28.73	45.06	75.43	38.74	86.84	41.52	83.23	43.03	38.52
1999	68.77	52.00	37.60	18.28	41.16	66.86	98.93	64.89	31.64	13.60	83.69	71.88
2000	52.33	67.02	42.79	53.18	72.25	69.61	75.79	45.81	64.09	79.24	10.16	44.96
2001	85.25	66.63	56.54	47.80	69.14	70.32	37.66	79.51	49.17	83.00	83.74	63.73
2002	2.97	1.92	2.58	2.74	3.32	1.88	3.45	3.01	2.67	0.55	1.30	3.92
2003	80.57	66.14	42.46	66.60	38.95	112.34	39.19	28.65	67.38	36.51	77.35	57.68
2004	85.63	52.84	39.15	66.23	45.70	31.30	64.30	24.92	64.49	61.23	65.67	46.41
2005	50.55	61.77	92.47	63.39	82.76	39.62	83.52	58.66	44.06	28.78	75.33	59.30
2006	17.20	77.57	48.27	56.84	48.91	46.42	46.30	20.25	59.71	65.71	40.68	74.55
2007	35.87	55.54	38.03	65.52	99.46	50.18	47.16	68.42	66.83	50.99	40.51	62.10
2008	93.51	51.57	76.68	59.53	35.80	66.49	18.53	81.84	89.04	25.21	82.22	39.69
2009	72.76	53.56	35.09	60.55	38.12	68.08	40.22	42.27	59.99	70.17	72.14	88.19
2010	69.26	43.05	39.51	29.62	35.79	73.84	52.90	60.30	53.04	66.97	67.79	98.20
2011	52.31	8.61	74.91	42.04	61.21	69.61	51.32	65.26	49.06	80.20	66.19	72.21
2012	49.07	41.78	61.97	48.56	40.41	73.72	56.74	57.12	72.80	90.67	31.43	25.17
2013	29.22	73.51	52.91	61.28	29.12	61.51	35.73	80.57	57.13	68.62	56.40	69.08
2014	72.06	66.16	53.33	46.68	29.41	81.59	53.65	39.03	23.30	73.91	48.86	71.21
2015	107.08	97.34	86.91	47.10	68.38	82.09	60.27	56.25	55.29	64.89	71.23	34.47
2016	43.55	26.30	48.66	73.94	46.27	42.25	58.55	40.51	42.21	91.86	58.47	21.47
2017	74.63	81.53	8.60	55.38	46.38	60.35	49.60	57.30	82.18	70.67	62.34	49.14
2018	60.59	68.64	12.39	59.46	44.97	42.92	39.59	54.90	64.27	41.68	59.56	53.31
2019	27.57	66.67	60.84	62.59	12.60	80.17	75.79	45.77	42.01	67.08	59.50	52.47
2020	39.19	68.03	76.61	92.54	43.67	58.34	62.21	41.30	46.11	34.82	9.75	50.95
2021	60.11	90.89	70.32	69.54	44.58	36.63	49.43	71.53	59.97	82.37	88.58	64.98
2022	105.38	71.50	71.12	49.77	91.16	49.43	72.52	66.98	73.57	68.87	76.47	54.20
2023	72.10	28.17	49.89	39.85	31.81	67.80	37.21	33.53	82.69	106.02	31.93	106.88
2024	51.40	28.00	86.30	91.85	68.39	49.69	64.19	82.96	54.53	64.15	48.53	52.32

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.23: Datos de la estación meteorológica San Pedro De Cachi

Estación	San Pedro De Cachi (Código: 156205)
Variable	Precipitación Acumulada 1 Día (mm)
Operador	Servicio Nacional Meteorología E Hidrología
WGS 84 Geográficas	Latitud: -13.086594 / Longitud: -74.3985 / Altitud(msnm): 3188
Tipo:	Convencional / Climática
Ámbito Político	Dpto: Ayacucho / Prov: Huamanga / Dist.: Santiago De Pischa
Ámbito Administrativo	AAA: Mantaro / ALA: Ayacucho
Unidad Hidrográfica	Cuenca Mantaro

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.24: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica San Pedro De Cachi

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1967	19.76	9.75	45.05	79.47	19.07	11.31	54.07	70.49	48.78	48.55	0.69	55.56
1968	33.13	0.69	44.65	40.91	0.69	36.89	47.12	18.24	28.93	51.81	31.17	83.26
1969	26.55	81.81	23.90	21.77	35.38	52.23	44.11	23.60	40.79	27.16	48.62	28.13
1970	4.79	25.82	41.49	50.99	68.17	62.67	9.60	50.94	53.96	13.65	72.77	46.08
1971	41.84	20.09	31.12	33.47	62.49	47.96	56.61	56.95	13.49	19.79	39.06	77.94
1972	13.40	13.35	31.61	50.26	77.48	46.39	31.42	13.57	36.56	49.59	71.66	20.71
1973	43.22	25.42	69.08	74.07	45.80	24.34	27.87	28.31	44.44	38.06	35.16	35.91
1974	25.25	16.05	17.83	47.98	69.86	36.80	49.72	37.75	36.21	70.79	28.59	46.36
1975	73.40	83.26	34.83	69.55	35.51	71.77	28.74	0.69	10.25	15.51	43.85	0.69
1976	56.49	54.01	29.19	43.29	22.63	0.69	20.14	63.42	36.17	35.41	58.45	45.29
1977	14.01	58.50	37.79	10.64	55.63	19.95	33.37	28.97	0.69	56.31	34.14	36.22
1978	37.51	76.51	24.63	11.14	24.99	47.18	83.26	11.28	21.04	8.25	17.83	56.11
1979	39.66	42.58	43.08	57.82	45.12	80.60	36.93	42.66	21.39	60.06	76.83	59.66
1980	58.88	22.30	27.13	44.77	37.19	37.74	0.69	38.36	52.04	45.41	51.62	63.62
1981	19.34	24.36	46.09	61.86	16.96	0.69	39.57	51.89	42.53	57.60	49.24	75.23
1982	49.37	21.33	70.48	36.92	27.83	0.69	28.38	25.69	24.12	22.39	37.01	57.26
1983	30.49	43.85	24.84	34.05	33.04	55.59	26.60	58.06	28.93	37.95	38.71	18.49
1984	8.02	62.58	59.51	49.37	46.66	59.67	54.35	14.93	20.03	26.19	29.52	27.23
1985	30.17	83.26	44.56	51.00	66.70	63.37	42.98	54.63	48.90	66.55	63.83	19.84
1986	28.25	5.35	62.05	36.65	39.03	56.50	83.26	38.68	40.60	61.22	27.73	56.56
1987	23.03	38.17	20.16	50.52	25.33	43.65	13.30	32.23	48.57	20.34	34.56	28.04
1988	82.29	58.32	42.79	50.34	54.56	46.28	48.29	33.37	37.41	35.26	24.64	51.42
1989	23.20	18.27	55.60	9.06	39.29	56.22	67.05	41.04	6.48	25.45	20.30	66.65
1990	43.60	34.35	39.71	32.75	31.30	40.40	58.02	40.55	40.72	24.04	59.86	23.85
1991	37.14	48.57	11.38	15.12	40.07	20.67	36.70	79.07	58.25	63.31	32.55	30.76
1992	87.19	107.23	53.12	103.47	66.89	98.09	75.26	103.56	57.43	59.27	105.19	82.46
1993	39.73	40.55	36.63	50.28	23.33	64.01	33.68	57.10	71.68	61.57	74.84	40.23
1994	0.69	0.33	0.44	0.11	1.65	0.70	0.02	0.81	0.90	0.71	0.76	1.12
1995	45.20	45.72	18.81	61.30	59.76	36.88	57.66	12.65	40.58	71.67	62.15	43.32

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.25: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica San Pedro De Cachi

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1996	29.20	23.92	18.38	60.77	58.48	47.47	55.12	29.13	7.41	54.81	38.53	44.38
1997	41.53	33.62	37.75	65.17	7.92	43.64	23.50	17.27	36.80	69.48	48.89	25.18
1998	43.04	46.07	68.93	30.28	32.20	42.48	31.44	53.09	27.73	57.06	63.42	50.20
1999	44.86	21.19	73.82	73.62	18.30	65.72	60.24	46.57	23.46	36.44	59.56	30.61
2000	72.02	8.14	32.23	48.60	41.34	25.19	52.85	22.66	68.38	46.42	42.06	74.83
2001	28.85	50.50	21.71	60.30	36.03	46.76	8.13	67.18	35.19	34.25	52.51	1.17
2002	20.06	4.33	40.34	45.29	27.08	30.43	55.09	19.38	72.40	47.48	50.20	50.62
2003	33.12	54.65	18.28	20.73	35.93	55.23	80.26	82.32	34.51	39.93	59.72	82.65
2004	32.17	35.44	35.47	42.44	38.78	35.97	83.26	8.79	23.04	81.18	26.46	62.65
2005	37.89	34.21	22.29	22.83	83.26	76.66	72.87	23.39	45.76	59.43	30.86	27.05
2006	17.81	65.65	50.42	27.85	43.93	69.97	57.45	43.59	48.26	37.75	17.60	44.20
2007	18.22	23.93	34.27	56.01	45.87	63.17	52.00	38.51	69.51	32.26	44.26	26.19
2008	45.08	41.77	42.95	43.85	56.44	15.22	43.93	32.63	13.00	24.75	69.76	33.07
2009	39.58	30.50	47.06	52.29	12.50	36.01	59.47	42.84	11.36	83.26	32.52	47.33
2010	10.82	42.39	45.85	21.94	55.62	54.10	49.87	40.71	27.88	76.84	80.02	34.80
2011	59.33	30.59	75.30	44.47	52.97	4.51	83.26	39.76	42.05	46.77	42.21	28.46
2012	40.73	72.05	43.03	3.26	11.39	19.90	8.13	25.48	58.96	34.61	64.22	37.76
2013	82.28	29.23	42.83	44.64	14.51	60.97	6.19	31.67	25.44	30.47	7.22	51.17
2014	31.02	41.05	10.80	45.22	5.25	59.30	35.52	41.02	42.55	66.55	56.37	31.51
2015	45.87	44.42	57.91	36.79	34.74	45.35	8.63	38.81	0.69	44.03	69.86	35.74
2016	68.41	39.29	34.87	54.70	73.92	33.84	22.17	0.69	21.13	32.37	49.55	42.43
2017	26.65	43.59	48.91	36.11	58.96	42.80	39.05	32.05	50.23	35.44	33.79	29.26
2018	83.26	76.70	50.51	33.38	44.56	70.45	56.05	83.26	16.64	24.69	39.27	29.60
2019	33.45	35.86	64.45	62.31	48.28	3.16	35.17	35.55	35.68	81.15	56.45	21.58
2020	31.97	57.50	66.42	39.08	14.42	61.05	40.93	53.52	44.39	52.93	31.97	34.93
2021	57.56	44.53	31.95	20.77	39.49	39.28	13.92	12.70	53.86	58.51	54.36	11.01
2022	30.44	25.99	48.03	50.84	81.46	57.35	14.97	30.58	38.90	23.16	61.01	30.47
2023	0.69	71.31	46.60	25.88	53.09	45.62	71.58	20.85	10.47	60.43	9.52	54.46
2024	43.67	64.21	73.85	49.27	14.78	79.27	26.98	25.99	37.31	51.00	41.27	55.15

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.26: Datos de la estación meteorológica Pampas

Estación	Pampas (Código: 156217)
Variable	Precipitación Acumulada 1 Día (mm)
Operador	Servicio Nacional Meteorología E Hidrología
WGS 84 Geográficas	Latitud: -13.433333 / Longitud: -73.813361 / Altitud(msnm): 2032
Tipo:	Convencional / Climática
Ámbito Político	Dpto: Apurimac / Prov: Chincheros / Dist.: Los Chankas
Ámbito Administrativo	AAA: Pampas Apurimac / ALA: Pampas
Unidad Hidrográfica	Cuenca Pampas

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.27: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Pampas

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1967	34.76	8.72	49.63	44.14	34.29	46.82	30.07	60.10	34.50	0.76	33.00	26.90
1968	30.32	28.27	0.76	44.87	41.62	62.27	26.56	65.44	8.24	50.12	43.06	37.01
1969	54.93	68.09	21.18	69.52	27.85	30.95	69.52	35.31	19.83	5.22	26.40	17.82
1970	0.76	41.06	43.78	30.65	36.23	41.35	3.49	69.52	13.83	41.70	31.25	13.95
1971	26.43	35.71	31.40	0.84	44.17	45.52	55.82	69.52	26.26	64.51	0.76	20.81
1972	41.45	47.78	66.62	18.96	34.28	46.88	21.93	33.12	27.12	17.30	34.95	36.09
1973	40.07	46.78	20.35	21.00	9.05	52.46	41.24	40.04	58.15	44.57	44.36	23.21
1974	36.40	45.04	39.78	22.61	27.79	49.58	51.20	40.82	61.06	15.42	19.71	39.25
1975	37.33	65.50	36.06	42.67	12.72	29.82	35.39	39.00	46.02	40.20	20.33	30.97
1976	53.59	47.58	7.46	34.11	69.52	65.68	37.79	24.66	0.76	45.47	37.19	19.04
1977	33.12	30.42	47.32	51.24	17.29	31.47	48.23	28.90	69.52	59.11	8.23	52.97
1978	69.52	49.67	58.29	45.13	38.51	10.32	42.56	41.02	38.73	22.68	27.77	33.54
1979	49.85	36.68	53.55	37.26	58.42	23.03	27.40	53.82	54.30	2.70	15.84	46.98
1980	31.50	0.76	65.04	61.99	58.53	28.28	42.84	15.84	11.60	49.66	22.80	47.29
1981	45.81	32.65	34.22	65.67	52.21	13.14	16.65	13.57	40.13	29.10	49.05	59.74
1982	69.52	14.97	44.95	25.08	20.39	34.13	37.07	53.22	17.65	69.52	36.87	35.80
1983	41.31	61.58	10.97	26.64	0.76	44.88	41.10	31.04	48.57	43.28	20.83	18.40
1984	32.57	0.76	43.25	37.40	0.76	54.32	43.16	38.35	18.33	0.76	58.84	69.52
1985	56.21	69.52	43.43	67.55	0.76	56.82	45.46	46.76	27.43	69.52	37.09	40.19
1986	34.23	27.13	38.88	30.07	15.30	69.52	52.13	33.96	0.76	47.76	43.02	0.76
1987	31.24	45.32	31.96	13.40	19.89	47.60	69.52	43.21	21.65	31.44	31.53	55.89
1988	52.36	0.76	38.68	6.13	32.64	69.52	5.52	57.89	36.25	24.94	62.89	36.09
1989	14.08	69.52	9.99	41.18	38.73	69.52	4.51	18.04	36.49	26.53	17.87	47.57
1990	36.40	33.09	27.58	41.49	29.63	34.61	57.23	29.37	33.68	36.32	6.48	68.25
1991	0.76	56.43	66.22	33.41	18.96	43.55	53.64	58.06	11.11	13.73	32.29	38.13
1992	48.51	42.13	0.76	41.33	33.54	55.95	34.97	35.00	45.50	29.11	10.27	64.04
1993	34.86	0.76	10.75	54.19	20.77	63.97	17.25	59.79	20.49	28.44	68.50	61.47
1994	52.57	21.57	30.83	42.97	0.76	56.36	47.15	58.47	37.27	33.18	21.79	49.27
1995	0.76	47.70	22.31	47.04	63.33	32.49	12.67	38.55	27.18	9.20	38.41	53.56
1996	39.34	98.55	70.17	98.55	96.90	98.55	40.18	90.39	42.49	25.60	57.00	76.47
1997	9.88	38.61	29.33	6.43	23.46	9.39	37.17	17.62	19.88	39.71	53.06	47.35
1998	45.19	55.42	21.54	51.94	0.76	46.73	0.76	30.88	15.39	55.98	25.31	37.68
1999	7.14	39.72	61.50	54.40	5.45	39.43	69.52	68.45	32.74	49.76	46.97	30.32
2000	45.18	46.66	19.97	39.01	54.31	35.31	23.89	36.76	13.58	57.84	17.91	25.37
2001	59.02	1.19	22.11	41.45	9.28	22.16	10.89	57.32	27.75	35.56	46.74	62.08
2002	14.82	37.45	42.28	13.64	18.89	65.99	58.71	59.14	47.01	25.52	14.68	46.58
2003	15.81	30.28	65.56	3.65	32.78	0.76	69.52	42.15	32.78	44.79	36.33	38.80
2004	39.74	9.90	50.39	46.94	30.74	45.15	68.32	69.52	69.52	54.78	35.20	27.94
2005	20.86	69.52	34.50	17.85	12.37	5.67	40.50	57.08	46.07	6.48	61.74	0.76
2006	35.99	59.03	31.72	68.68	27.13	4.93	57.69	36.22	36.08	18.17	22.50	46.11
2007	22.73	60.94	69.52	27.77	29.43	61.33	54.38	5.97	42.42	30.45	51.10	53.27
2008	40.40	40.75	42.10	24.91	47.43	29.15	29.96	46.93	32.88	50.11	46.46	7.47
2009	3.53	33.91	19.12	37.79	35.30	54.97	30.00	27.18	44.36	19.63	0.76	46.09
2010	37.01	46.26	60.82	57.36	61.63	40.19	17.02	20.26	17.03	32.71	34.49	19.08

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.28: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Pampas

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
2011	38.64	55.50	31.56	27.19	47.73	37.07	42.54	43.27	48.94	51.10	30.17	40.39
2012	39.63	18.47	31.58	40.16	0.76	16.17	40.44	28.47	48.12	40.05	63.26	44.17
2013	12.16	17.82	9.03	27.82	38.83	46.85	20.67	42.55	34.38	8.23	10.01	20.93
2014	38.31	0.76	37.48	32.69	23.51	50.45	22.16	17.36	28.38	9.63	62.97	28.31
2015	44.80	0.76	60.36	33.15	22.37	69.52	27.38	34.94	32.43	41.49	66.33	32.05
2016	45.40	31.01	24.24	57.57	37.38	5.13	35.34	43.69	35.69	69.52	33.35	25.51
2017	36.80	9.67	13.03	57.61	31.40	49.74	40.45	10.92	28.68	10.43	16.38	41.74
2018	12.10	16.68	69.52	21.68	0.76	59.06	5.13	13.63	34.37	37.14	25.50	24.60
2019	0.18	0.23	1.19	1.22	1.09	0.08	0.91	0.70	0.54	1.36	0.07	1.50
2020	64.08	25.92	54.90	35.07	36.13	69.36	43.20	27.29	45.61	53.07	45.14	53.20
2021	17.87	47.04	43.99	7.76	12.48	53.38	40.05	34.47	58.17	11.53	44.81	0.76
2022	17.01	33.03	35.20	7.85	45.57	29.63	41.62	22.40	62.51	59.23	9.81	33.88
2023	19.89	69.52	29.49	3.12	53.84	24.36	28.90	37.89	20.74	24.60	33.33	8.34
2024	9.11	62.02	0.76	65.77	40.15	29.67	23.59	31.14	22.24	14.59	43.15	20.68

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.29: Datos de la estación meteorológica Huancapi

Estación	Huancapi (Código: 000665)
Variable	Precipitación Acumulada 1 Día (mm)
Operador	Servicio Nacional Meteorología E Hidrología
WGS 84 Geográficas	Latitud: -13.748889 / Longitud: -74.068056 / Altitud(msnm): 3186
Tipo	Convencional / Climática
Ámbito Político	Dpto: Ayacucho / Prov: Victor Fajardo / Dist.: Huancapi
Ámbito Administrativo	AAA: Pampas Apurimac / ALA: Pampas
Unidad Hidrográfica	Cuenca Pampas

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.30: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Huancapi

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1967	42.26	64.95	64.54	6.13	88.15	31.87	19.07	55.88	43.06	34.55	80.15	43.68
1968	27.67	20.86	64.52	40.85	64.51	24.16	86.30	46.61	82.87	40.41	48.60	53.90
1969	68.74	53.04	55.41	47.43	46.63	59.98	50.91	53.03	40.72	48.10	79.29	43.01
1970	77.71	74.31	16.33	7.77	67.79	42.10	63.39	45.02	8.17	31.43	59.55	73.97
1971	51.69	59.21	46.23	63.63	68.56	44.19	42.17	49.45	61.27	16.55	34.26	21.59
1972	70.13	45.72	42.46	88.36	40.12	35.17	80.29	0.85	52.24	34.62	45.75	62.82
1973	54.78	55.95	33.24	38.36	15.02	68.27	55.60	35.00	26.32	79.08	58.97	47.43

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.31: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Huancapi

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1974	43.47	23.30	87.92	59.77	24.43	37.42	47.00	55.68	67.02	47.76	74.06	53.06
1975	27.38	57.26	44.54	8.08	49.63	35.68	39.47	47.64	72.58	74.99	51.55	38.36
1976	22.61	43.34	74.45	41.27	39.53	45.52	37.08	42.63	45.38	61.09	32.88	23.81
1977	65.19	46.94	37.53	21.65	63.17	66.35	30.66	38.91	30.99	22.74	39.19	55.77
1978	38.91	55.78	57.34	40.17	41.10	82.74	53.93	74.03	51.83	66.27	75.70	97.01
1979	44.26	74.94	49.05	81.45	30.04	46.35	62.59	74.02	21.69	40.25	48.62	49.58
1980	58.11	22.95	27.70	65.66	85.64	74.86	23.30	45.51	79.51	63.18	78.43	66.52
1981	53.15	64.56	73.81	81.16	48.95	52.77	67.76	59.64	75.37	48.37	53.82	49.09
1982	57.53	76.62	65.26	64.46	77.37	45.85	71.51	33.89	31.86	85.94	67.57	58.00
1983	28.59	61.43	15.67	57.60	73.41	45.39	68.12	7.94	72.09	28.51	57.97	70.79
1984	56.36	18.85	100.07	73.28	30.82	83.46	48.64	20.73	52.86	48.67	56.13	54.52
1985	9.45	45.83	37.42	63.39	41.18	35.24	47.80	33.59	71.92	54.34	64.36	26.49
1986	68.44	44.99	28.99	62.64	39.88	69.73	49.66	80.13	44.31	57.77	65.05	59.89
1987	63.17	72.06	8.14	24.89	100.07	49.82	52.36	36.52	69.90	41.39	53.97	49.70
1988	72.00	41.05	65.31	34.36	81.67	80.26	79.53	83.25	57.54	53.97	50.18	21.19
1989	46.06	48.31	60.86	42.03	42.02	58.86	53.20	30.33	65.27	49.62	46.96	30.20
1990	20.09	48.67	38.83	59.94	53.17	60.48	55.40	22.48	53.01	19.32	60.91	32.22
1991	36.67	35.42	80.79	28.67	60.99	67.41	13.13	20.73	32.05	77.41	58.30	79.67
1992	26.96	56.06	25.80	47.12	59.31	70.45	48.37	68.89	12.42	46.88	46.65	79.43
1993	65.74	11.15	38.41	36.51	29.80	75.32	67.79	70.17	58.81	79.42	69.21	9.87
1994	69.43	74.09	58.03	36.39	54.74	36.19	48.13	65.81	52.28	52.04	45.53	75.79
1995	29.68	55.68	22.04	22.29	28.10	50.01	50.86	54.92	45.88	48.19	23.68	32.95
1996	51.13	38.23	100.07	71.32	45.60	56.12	27.58	79.11	0.85	61.32	37.54	46.11
1997	29.04	62.63	54.22	91.09	39.31	82.50	60.65	50.43	42.01	59.15	74.73	36.08
1998	42.72	45.33	59.81	50.70	47.87	44.53	45.95	30.62	78.51	69.77	85.51	94.68
1999	75.17	27.20	37.44	47.30	57.10	76.88	67.67	32.95	72.66	27.18	64.36	68.40
2000	56.36	19.53	34.36	44.11	80.40	28.89	32.20	1.96	31.67	60.86	58.93	44.61
2001	69.26	36.14	100.07	14.67	48.73	75.82	39.44	39.49	23.03	71.29	50.15	53.00
2002	81.29	60.97	70.70	57.05	50.83	56.97	67.47	39.88	57.39	73.22	5.19	75.63
2003	1.38	0.67	0.75	1.27	0.90	1.24	0.49	0.02	0.61	0.67	0.68	1.52
2004	54.20	69.19	57.52	42.94	50.65	73.88	73.53	18.28	60.17	52.85	64.15	30.80
2005	72.89	64.32	63.22	37.88	87.80	60.46	48.91	37.84	38.91	26.96	53.28	80.50
2006	6.50	29.73	63.79	69.13	49.74	29.37	54.86	37.48	40.57	40.40	45.70	10.98
2007	21.29	38.20	85.75	38.10	68.35	43.15	51.90	40.29	64.53	53.72	40.46	69.94
2008	70.91	59.38	37.25	82.88	58.58	62.67	65.70	38.61	46.47	67.63	67.94	30.16
2009	53.71	30.47	54.14	60.88	67.30	21.54	53.04	69.37	15.33	80.18	86.47	79.95
2010	46.03	48.98	56.74	53.36	64.22	36.76	40.74	66.23	79.83	59.39	25.47	73.84
2011	79.43	32.96	55.77	40.28	87.04	85.08	56.50	74.00	35.91	49.89	14.66	63.03
2012	91.29	35.00	45.20	21.73	28.29	40.33	30.64	82.73	62.34	80.98	40.07	56.84
2013	56.84	91.40	40.46	57.84	27.45	64.15	42.03	44.22	45.88	64.51	8.33	62.16
2014	58.02	54.68	65.84	55.90	59.91	50.79	53.12	31.10	78.88	41.68	59.25	64.94
2015	125.14	89.39	82.64	157.48	67.21	100.11	84.07	62.57	82.31	90.85	131.56	127.55
2016	24.89	60.52	40.37	54.41	27.27	47.83	63.29	39.92	22.04	46.02	26.54	86.44
2017	54.32	60.53	53.31	44.78	89.62	62.31	67.37	100.07	30.75	48.89	87.48	60.63

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.32: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Huancapi

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
2018	44.55	33.15	92.13	51.70	71.03	23.44	66.84	12.79	55.67	36.43	42.62	31.92
2019	11.03	42.08	35.04	2.13	32.32	43.59	69.80	43.12	45.18	51.79	22.44	62.20
2020	73.76	65.48	64.56	47.89	42.80	52.98	55.62	35.46	25.10	46.65	52.26	83.65
2021	50.83	20.62	49.84	57.06	46.95	57.22	45.17	34.22	62.09	32.70	91.84	43.30
2022	38.96	62.26	27.04	47.74	30.55	74.80	74.15	43.19	65.07	30.43	50.62	60.82
2023	77.10	12.22	75.82	62.54	38.77	51.29	1.05	22.66	64.87	76.74	34.31	13.44
2024	57.08	78.69	92.09	27.90	45.84	95.17	40.70	75.10	48.20	54.94	65.72	22.15

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.33: Datos de la estación meteorológica Quillabamba

Estación:	Quillabamba (Código: 000606)
Variable:	Precipitación Acumulada 1 Día (mm)
Operador:	Servicio Nacional Meteorología E Hidrología
WGS 84 Geográficas:	Latitud: -12.855833 / Longitud: -72.691667 / Altitud(msnm): 990
Tipo:	Convencional / Climática
Ámbito Político:	Dpto: Cusco / Prov: La Convencion / Dist.: Santa Ana
Ámbito Administrativo:	AAA: Urubamba Vilcanota / ALA: La Convencion
Unidad Hidrográfica:	Cuenca Urubamba

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.34: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Quillabamba

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1967	107.50	85.50	26.79	83.71	61.86	57.57	58.97	91.52	61.46	91.78	61.28	93.67
1968	92.32	101.05	70.63	76.94	71.60	85.86	64.48	63.49	90.62	74.01	76.41	84.18
1969	65.95	71.24	66.85	69.53	111.41	86.12	96.49	69.85	58.77	44.64	76.49	44.97
1970	80.35	50.32	99.73	92.28	69.83	79.57	109.05	88.51	72.91	77.11	74.10	99.79
1971	63.16	58.34	72.50	29.15	103.89	90.48	84.92	30.21	38.93	79.00	83.36	89.62
1972	57.90	97.25	60.82	68.39	48.12	82.40	94.23	53.76	77.06	86.58	96.51	58.59
1973	57.14	71.49	53.53	70.11	63.58	37.56	82.31	76.64	46.27	74.25	85.45	52.47
1974	67.59	64.07	98.72	62.80	106.72	65.81	87.96	43.49	54.70	69.66	68.12	63.82
1975	52.83	77.79	95.02	105.64	47.18	51.49	48.17	83.22	56.53	62.29	69.13	65.16
1976	103.78	68.10	98.03	55.01	59.08	85.30	82.12	68.02	77.02	71.56	77.46	72.47
1977	99.80	71.41	100.27	114.66	43.32	78.27	106.48	76.35	56.09	27.58	73.74	87.02
1978	89.23	109.91	118.56	73.93	55.34	111.62	94.15	75.07	62.08	57.56	51.16	45.12
1979	51.80	38.06	74.25	107.82	65.26	55.08	51.90	99.75	91.29	92.31	70.70	57.98
1980	88.33	81.16	88.73	70.90	44.42	91.78	88.58	64.19	100.04	51.89	68.72	76.75

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

Tabla 3.35: Precipitación media mensual procesada de la estación meteorológica Quillabamba

AÑO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1981	78.24	52.08	86.19	52.78	53.79	104.26	63.65	113.42	106.60	94.76	71.47	107.05
1982	25.95	71.29	77.65	61.64	100.59	74.79	76.32	95.69	66.50	67.38	76.28	34.59
1983	65.17	74.52	103.79	79.01	58.86	78.90	65.27	54.27	71.82	72.74	112.77	94.04
1984	96.43	99.18	72.69	66.34	66.09	129.53	47.35	75.07	92.21	41.19	74.89	62.52
1985	98.67	89.39	77.52	79.53	58.80	75.67	79.21	52.99	51.53	44.16	79.69	66.70
1986	92.64	93.70	53.93	69.60	49.77	71.25	67.21	59.59	80.45	105.06	81.44	62.50
1987	40.15	54.98	68.42	69.15	78.10	132.64	63.84	52.68	87.38	66.66	64.35	67.55
1988	73.45	40.11	111.26	77.90	63.06	75.39	37.60	58.60	83.09	57.88	41.15	90.11
1989	68.12	73.14	71.46	39.11	55.08	74.32	81.35	57.64	84.76	95.80	65.50	76.76
1990	68.36	69.60	58.68	40.21	90.53	95.45	84.04	68.05	78.05	30.40	69.15	46.79
1991	72.93	55.92	64.83	112.74	44.96	47.04	86.29	111.31	34.45	80.96	94.50	57.39
1992	60.42	19.65	79.09	85.94	85.17	99.60	78.25	38.66	54.36	64.96	65.08	126.52
1993	64.44	83.67	113.68	107.06	47.13	56.00	79.65	98.37	69.76	97.08	56.87	59.84
1994	124.45	111.85	69.50	89.71	82.82	96.73	59.56	69.43	98.30	91.30	24.13	55.88
1995	49.50	39.74	111.35	104.11	45.53	114.14	64.26	96.47	48.71	82.62	55.62	71.81
1996	90.48	69.48	61.40	77.37	64.20	58.19	78.95	48.60	90.73	102.79	55.70	94.60
1997	80.53	63.00	63.44	56.59	44.19	29.80	84.89	88.52	87.41	76.71	57.32	57.46
1998	52.20	56.71	65.30	65.97	107.18	93.43	74.16	68.65	77.93	61.34	83.32	87.48
1999	74.60	79.50	61.66	82.51	73.47	57.57	74.19	115.44	68.75	82.25	65.75	47.49
2000	63.96	47.87	60.67	49.09	54.46	43.84	59.54	60.08	82.93	124.28	30.24	96.91
2001	89.66	71.94	107.38	62.40	40.93	81.97	58.15	72.86	95.88	98.61	76.50	81.68
2002	76.00	46.41	69.57	26.96	76.96	86.68	57.02	68.90	98.66	87.12	114.91	79.61
2003	70.39	66.63	58.52	39.19	75.53	59.13	57.20	86.47	90.04	66.06	48.06	86.98
2004	82.29	60.94	73.65	83.20	90.30	45.21	67.79	62.89	84.94	77.30	69.27	70.83
2005	58.96	66.74	52.14	83.93	66.63	104.75	73.08	54.16	98.47	46.34	49.04	85.27
2006	77.97	120.24	68.92	86.35	91.87	70.67	53.85	74.88	45.98	53.33	76.75	54.13
2007	63.54	66.57	64.11	66.57	82.86	67.71	84.88	61.62	65.42	70.32	56.60	92.69
2008	103.48	99.02	53.32	54.28	44.99	106.22	48.31	100.43	38.41	89.40	61.30	50.75
2009	67.11	83.53	75.28	116.38	51.00	85.87	67.50	76.48	97.13	90.20	75.61	11.21
2010	34.29	104.01	28.50	54.96	50.69	74.04	88.68	114.68	70.21	93.85	83.78	75.69
2011	97.41	91.44	82.79	65.70	55.05	91.04	77.74	80.53	108.03	68.22	72.07	72.49
2012	61.93	75.85	98.80	75.99	75.42	83.99	92.66	75.91	71.16	78.52	110.22	49.55
2013	48.17	69.53	82.79	74.54	100.45	45.08	70.33	82.60	72.90	72.09	60.05	69.89
2014	3.26	1.73	2.51	3.57	2.82	3.69	3.82	3.15	3.17	2.52	1.15	3.81
2015	67.56	75.23	55.41	51.38	48.06	73.25	100.04	71.88	47.79	101.53	36.55	65.97
2016	57.92	73.33	31.35	74.51	57.71	86.24	40.31	78.30	59.69	87.33	43.43	77.44
2017	72.28	69.70	73.23	49.15	96.98	78.51	52.83	55.93	57.96	43.71	73.31	55.20
2018	104.46	78.02	41.08	37.63	71.19	50.14	86.68	49.31	77.69	91.50	73.89	85.98
2019	73.06	59.19	104.37	82.71	101.80	65.51	77.24	74.85	57.80	114.01	62.01	44.79
2020	178.15	120.61	121.66	172.19	165.92	117.98	155.61	127.35	109.59	109.77	144.79	176.68
2021	74.55	83.84	51.84	77.81	58.74	75.06	37.50	72.27	43.72	68.32	89.74	100.81
2022	70.83	88.44	89.05	92.99	44.91	84.02	92.43	82.92	88.81	99.65	55.39	34.26
2023	100.59	74.41	57.62	65.04	37.29	58.81	87.20	72.32	88.07	57.52	96.99	91.73
2024	71.58	79.52	65.25	57.68	87.62	20.82	65.50	93.08	85.23	75.74	63.62	59.70

Fuente: Obtenido de (Autoridad Nacional del Agua, 2024).

3.9.7.2 Datos entrada espaciales de precipitaciones para ArcGIS

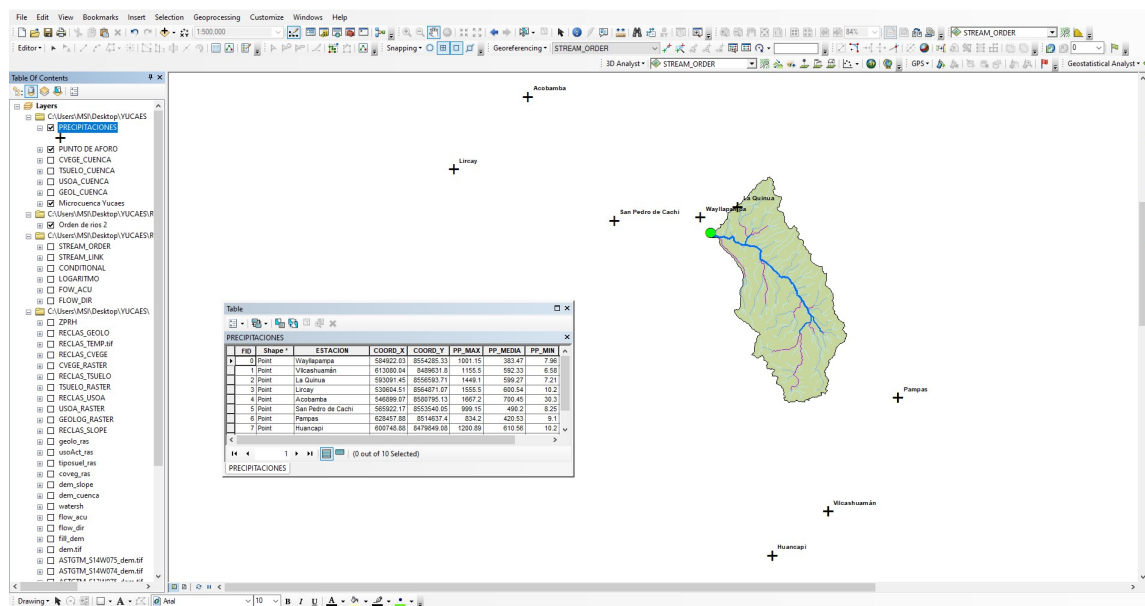
En este apartado, se presenta los datos de entrada al entorno SIG. Para ello se creó una capa de puntos (*shapefile*) representando las nueve estaciones, incorporando como atributos las variables *ESTACION*, *COORD_X*, *COORD_Y*, *PP_{MAX}*, *PP_{MEDIA}*, *PP_{MIN}*. La capa fue proyectada a un sistema de coordenadas adecuado, específicamente *UTM* de la zona correspondiente, para facilitar el análisis espacial. Asimismo, se incorporó el polígono de delimitación de la microcuenca Yucaes, que serviría posteriormente como máscara de recorte.

Tabla 3.36: Datos entrada espaciales de precipitaciones para ArcGIS

ESTACIÓN	COORD_X	COORD_Y	PP_MAX	PP_MEDIA	PP_MIN
Wayllapampa	584922.03	8554285.33	1001.15	383.47	7.96
Vilcashuamán	613080.04	8489631.80	1155.50	592.33	6.58
La Quinua	593091.45	8556593.71	1449.10	599.27	7.21
Lircay	530604.51	8564871.07	1555.50	600.54	10.20
Acobamba	546899.07	8580795.13	1667.20	700.45	30.30
San Pedro de Cachi	565922.17	8553540.05	999.15	490.20	8.25
Pampas	628457.88	8514637.40	834.20	420.53	9.10
Huancapi	600748.88	8479849.08	1200.89	610.56	10.20
Quillabamba	750520.40	8577687.46	1700.30	890.37	35.20

Fuente: Elaboración propia mediante LaTex.

Figura 3.7: Estaciones meteorológicas cercanas a la microcuenca Yucaes

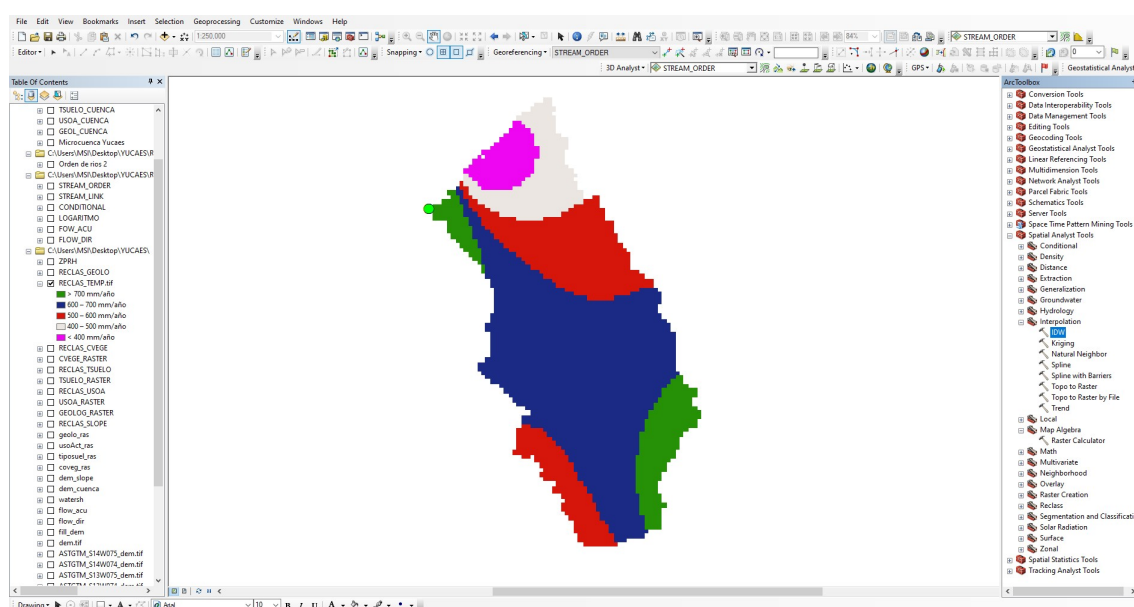


Fuente: Elaboración propia mediante ArcGIS.

3.9.7.3 Interpolación espacial (*IDW*) y generación del raster de precipitación

En este apartado se procedió a la interpolación espacial de la variable (precipitación media histórica). Para ello se utilizó el método *Inverse Distance Weighting (IDW)* implementado en el software ArcGIS. Los parámetros se configuraron considerando las características de la red de estaciones: el valor de power se fijó en 2, con el fin de ajustar el grado de influencia de las estaciones más cercanas. El radio de búsqueda se definió en función de la densidad de estaciones, empleando 6 vecinos. La resolución espacial del raster (cell size) fue determinada de acuerdo con la extensión de la microcuenca y la escala de trabajo, seleccionándose el valor de 30 metros. Una vez ejecutada la interpolación, el raster obtenido fue recortado mediante el polígono de la microcuenca, obteniéndose así el mapa raster de distribución espacial de las precipitaciones.

Figura 3.8: *Proceso de interpolación de precipitaciones en la microcuenca Yucaes*



Fuente: Elaboración propia mediante ArcGIS.

3.9.7.4 Reclasificación del uso/cobertura actual del suelo

Posterior a la obtención del mapa raster de distribución espacial de precipitaciones, este fue sometido a un proceso de reclasificación con el propósito de categorizar los valores de precipitación en rangos significativos desde el punto de vista hidrológico. Para ello, se adoptó la metodología propuesta por (Rodríguez Levy et al., 2023), que establece intervalos de clasificación basados en los registros históricos de cada estación.

El criterio de reclasificación consideró cinco rangos principales:

- ☞ Alrededor del máximo histórico: comprende los valores de precipitación próximos a los mayores registros documentados, asociados a condiciones de elevada disponibilidad hídrica.
- ☞ Entre el máximo histórico y el promedio histórico: incluye las precipitaciones superiores

al promedio, pero que no alcanzan los extremos máximos, representando condiciones de disponibilidad moderada-alta.

- ☞ Alrededor del promedio histórico: agrupa los valores próximos al comportamiento medio de la serie, reflejando la condición más representativa y frecuente del régimen de lluvias en la microcuenca.
- ☞ Entre el promedio histórico y el mínimo histórico: incorpora precipitaciones inferiores a la media, pero aún alejadas de los valores más bajos registrados, indicando disponibilidad reducida de agua.
- ☞ Alrededor del registro histórico más bajo: engloba los valores de precipitación mínimos, que corresponden a las condiciones más críticas de escasez hídrica.

De este modo, la reclasificación permitió generar un mapa raster con cinco clases de precipitación, cada una vinculada a diferentes niveles de probabilidad de recarga hídrica. Esta categorización constituyó un insumo fundamental para el análisis espacial posterior, ya que facilita la identificación de las zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca Yucaes.

Tabla 3.37: Clasificación de la distribución de precipitación en la microcuenca Yucaes

Precipitación pluvial		Probabilidad de recarga hídrica
Alrededor del máximo histórico	>700 mm/año	Muy alto
Entre el máximo y el promedio histórico	600-700 mm/año	Alto
Alrededor del promedio histórico	500-600 mm/año	Moderado
Entre el promedio y el bajo histórico	400-500 mm/año	Bajo
Alrededor del registro histórico más bajo	<400 mm/año	Muy bajo

Fuente: Elaboración propia mediante LaTeX.

Finalmente, se consolidaron los seis insumos fundamentales que constituyen la entrada al algoritmo de Enjambre de Partículas (*PSO*) para la identificación de zonas con potencial de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes. Cada uno de estos insumos corresponde a un mapa ráster previamente procesado y reclasificado en función a su probabilidad de recarga hídrica.

- ☞ Mapa ráster de pendientes, reclasificado según rangos de inclinación, donde las zonas de baja pendiente presentan mayor capacidad de favorecer la recarga hídrica.
- ☞ Mapa ráster de tipos de suelo, categorizado de acuerdo con la textura y permeabilidad, factores determinantes en la infiltración del agua.
- ☞ Mapa ráster de tipos de roca, en el cual se valoró la litología considerando su grado de porosidad y fracturamiento, elementos clave para el almacenamiento subterráneo.

- ☞ Mapa ráster de cobertura vegetal, que refleja la influencia de la vegetación en la regulación de escorrentías y en la infiltración del agua en el suelo.
- ☞ Mapa ráster de uso y cobertura actual del suelo, evaluado según el grado de alteración antrópica y su impacto en los procesos de infiltración.
- ☞ Mapa ráster de distribución de la precipitación, que integra la disponibilidad espacial de agua como insumo primario para la recarga.

3.9.8 Implementación del Algoritmo Enjambre de Partículas en PyThon

Una vez preparados los insumos, surgió la necesidad de integrarlos en un único índice de recarga hídrica. En la literatura clásica, como en los enfoques de (Matus et al., 2009) y (Rodríguez Levy et al., 2023), este proceso suele realizarse mediante la asignación subjetiva de pesos a cada factor, lo cual puede introducir sesgos en los resultados. En contraste, en el presente estudio se propone un enfoque innovador que incorpora un algoritmo de optimización por Enjambre de Partículas (*PSO*) de carácter multiobjetivo.

El *PSO* simula el comportamiento colectivo de partículas que exploran diferentes combinaciones de pesos en la ecuación planteada por (Rodríguez Levy et al., 2023). A través de un proceso iterativo, cada partícula ajusta su posición en el espacio de búsqueda con el fin de mejorar la calidad del índice obtenido, hasta converger en la configuración de pesos más adecuada. De este modo, se elimina la asignación subjetiva y se obtiene un índice sustentado en un proceso de optimización robusto y reproducible.

Algoritmo implementado en PyThon.

```

1  import numpy as np
2  import rasterio
3  import matplotlib.pyplot as plt
4  from matplotlib import colors
5  import pyswarms as ps
6  from scipy.stats import entropy
7
8  # -----
9  # 1. Funciones auxiliares
10 # -----
11 def load_raster(raster_path):
12     """Carga un raster y devuelve data, transform, shape, nodata"""
13     with rasterio.open(raster_path) as src:
14         data = src.read(1).astype(np.float32)
15         transform = src.transform
16         shape = data.shape
17         nodata = src.nodata
18     return data, transform, shape, nodata
19
20 def load_and_mask(raster_path, ref_shape, valid_mask):
21     """Carga un raster, lo ajusta al tamaño necesario y aplica una máscara"""
22     data, _, _, _ = load_raster(raster_path)
23
24     # Ajustamos al tamaño necesario

```

```

25 rows = min(data.shape[0], ref_shape[0])
26 cols = min(data.shape[1], ref_shape[1])
27 data = data[:rows, :cols]
28 mask = valid_mask[:rows, :cols]
29
30 return np.where(mask, data, np.nan)
31
32 # -----
33 # 2. Rutas de los insumos donde se trabaja
34 # -----
35 base_path = 'C:/Users/MSI/Desktop/YUCAES/PROGRAMACION/'
36
37 rasters = {
38     'slope': base_path + '/RECLAS_SLOPE.tif',
39     'soil': base_path + '/RECLAS_TSUELO.tif',
40     'rock': base_path + '/RECLAS_GEOLO.tif',
41     'veg': base_path + '/RECLAS_CVEGE.tif',
42     'use': base_path + '/RECLAS_USOA.tif',
43     'precip': base_path + '/RECLAS_TEMP.tif'
44 }
45
46 invert_factors = {
47     'slope': True, # a mayor pendiente = menor recarga hídrica
48     'soil': False,
49     'rock': False,
50     'veg': False,
51     'use': False,
52     'precip': False
53 }
54
55 # -----
56 # 3. Cargamos los insumos
57 # -----
58 dem_data, dem_transform, dem_shape, dem_nodata = load_raster(rasters['slope',
59 ])
60 valid_mask = (~np.isnan(dem_data)) & (dem_data != dem_nodata)
61
62 factors = []
63 factor_names = []
64
65 for name, path in rasters.items():
66     data = load_and_mask(path, dem_shape, valid_mask)
67     dmin, dmax = np.nanmin(data), np.nanmax(data)
68     data_norm = (data - dmin) / (dmax - dmin + 1e-8)
69     if invert_factors.get(name, False):
70         data_norm = 1 - data_norm
71     factors.append(data_norm)
72     factor_names.append(name)
73
74 # Aseguramos que la configuración tenga la misma forma
75 min_rows = min(f.shape[0] for f in factors)
76 min_cols = min(f.shape[1] for f in factors)

```

```

76     factors = [f[:min_rows, :min_cols] for f in factors]
77
78     # -----
79     # 4. Definimos la clase PSO multiobjetivo (varianza + entropía)
80     # -----
81     class MOPSOWrapper:
82     def __init__(self, factors, alpha=0.5):
83     self.factors = factors
84     self.alpha = alpha # peso entre varianza y entropía
85
86     def objective(self, weights):
87     n_particles = weights.shape[0]
88     cost = np.zeros(n_particles)
89
90     for i in range(n_particles):
91     w = weights[i] + 1e-8
92     w_norm = w / np.sum(w)
93
94     # Índice de recarga hídrica combinado
95     ZR = sum(w * factor for w, factor in zip(w_norm, self.factors))
96     ZR_norm = (ZR - np.nanmin(ZR)) / (np.nanmax(ZR) - np.nanmin(ZR) + 1e-8)
97     # -----
98     # Objetivo 1: la varianza
99     # -----
100    var = np.nanvar(ZR_norm)
101    # -----
102    # Objetivo 2: la entropía de clases (5 clases)
103    # -----
104    q = np.nanquantile(ZR_norm, [0.2, 0.4, 0.6, 0.8])
105    class_map = np.zeros_like(ZR_norm, dtype=np.uint8)
106    class_map[ZR_norm < q[0]] = 1
107    class_map[(ZR_norm >= q[0]) & (ZR_norm < q[1])] = 2
108    class_map[(ZR_norm >= q[1]) & (ZR_norm < q[2])] = 3
109    class_map[(ZR_norm >= q[2]) & (ZR_norm < q[3])] = 4
110    class_map[ZR_norm >= q[3]] = 5
111
112    hist, _ = np.histogram(class_map[~np.isnan(ZR_norm)], bins=5, range=(1, 6))
113    prob = hist / np.sum(hist) if np.sum(hist) > 0 else np.ones(5)/5
114    entr = entropy(prob, base=5) # 01
115    # -----
116    # Normalización de datos
117    # -----
118    var_norm = var / (var + 1e-8)
119    entr_norm = entr
120    # -----
121    # Combinamos el fitness
122    # -----
123    fitness = self.alpha * var_norm + (1 - self.alpha) * entr_norm
124    cost[i] = -fitness # negativo porque PSO minimiza
125
126    return cost
127    # -----

```

```

128 # 5. Ejecutamos PSO multiobjetivo
129 # -----
130 pso = MOPSOWrapper(factors, alpha=0.6) # =0.6 más peso a la varianza
131
132 optimizer = ps.single.GlobalBestPSO(
133     n_particles=30,
134     dimensions=len(factors),
135     options={'c1': 0.7, 'c2': 0.4, 'w': 0.9},
136     bounds=(np.zeros(len(factors)), np.ones(len(factors)))
137 )
138
139 best_cost, best_weights = optimizer.optimize(pso.objective, iters=100)
140 best_weights /= np.sum(best_weights)
141
142 print("Pesos optimizados (MOPSO):")
143 for name, weight in zip(factor_names, best_weights):
144     print(f"{name}: {weight:.3f}")
145 # -----
146 # 6. Calculamos el índice de recarga hídrica
147 # -----
148 ZR = sum(w * factor for w, factor in zip(best_weights, factors))
149 ZR_norm = (ZR - np.nanmin(ZR)) / (np.nanmax(ZR) - np.nanmin(ZR) + 1e-8)
150
151 quantiles = np.nanquantile(ZR_norm, [0.2, 0.4, 0.6, 0.8])
152 class_map = np.zeros_like(ZR_norm, dtype=np.uint8)
153 class_map[ZR_norm < quantiles[0]] = 1
154 class_map[(ZR_norm >= quantiles[0]) & (ZR_norm < quantiles[1])] = 2
155 class_map[(ZR_norm >= quantiles[1]) & (ZR_norm < quantiles[2])] = 3
156 class_map[(ZR_norm >= quantiles[2]) & (ZR_norm < quantiles[3])] = 4
157 class_map[ZR_norm >= quantiles[3]] = 5
158 # -----
159 # 7. Visualizamos del mapa de ZPRH
160 # -----
161 x_min, y_max = dem_transform.c, dem_transform.f
162 x_max = x_min + class_map.shape[1] * dem_transform.a
163 y_min = y_max - class_map.shape[0] * abs(dem_transform.e)
164
165 fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 10))
166 masked_class_map = np.ma.masked_where(np.isnan(ZR_norm), class_map)
167
168 cmap = colors.ListedColormap(['#d73027', "#97e63d", "#14941a", "#98b5f5", "#4c63e6"])
169 norm = colors.BoundaryNorm([0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5], cmap.N)
170
171 extent = [x_min, x_max, y_min, y_max]
172 img = ax.imshow(masked_class_map, cmap=cmap, norm=norm, extent=extent)
173
174 cbar = plt.colorbar(img, ticks=[1, 2, 3, 4, 5])
175 cbar.ax.set_yticklabels(['Muy baja', 'Baja', 'Moderada', 'Alta', 'Muy alta'
176 ])
177
178 ax.set_title('Zonas Potenciales de Recarga Hídrica\nOptimización MOPSO (

```

```

178     Varianza + Entropía)', fontsize=14)
179     ax.set_xlabel("Este (m)")
180     ax.set_ylabel("Norte (m)")
181     ax.grid(True, linestyle="--", linewidth=0.5, alpha=0.5)
182
183     plt.tight_layout()
184     plt.show()
185     # -----
186     # 8. Guardamos el resultado obtenido
187     # -----
188     output_path = base_path + 'ZPR_MOPSO.tif'
189     with rasterio.open(rasters['slope']) as src:
190         meta = src.meta.copy()
191         meta.update(dtype=rasterio.uint8, nodata=255,
192                    height=class_map.shape[0], width=class_map.shape[1],
193                    transform=rasterio.transform.from_origin(x_min, y_max, dem_transform.a, abs(
194                        dem_transform.e)))
195     with rasterio.open(output_path, 'w', **meta) as dst:
196         dst.write(class_map.astype(rasterio.uint8), 1)
197     print(f"Mapa guardado en: {output_path}")

```

3.9.8.1 Resultado de la implementación del Algoritmo Enjambre de Partículas

La formulación original del índice de zonas potenciales de recarga (ZPRH), planteada en la bibliografía de (Rodríguez Levy et al., 2023), se expresa como:

$$ZPRH = [0,17(Pend) + 0,18(Ts) + 0,10(Tr) + 0,17(Cve) + 0,16(Us/C) + 0,22(Pp)] \quad (3.1)$$

Sin embargo, al aplicar el Algoritmo Enjambre de Partículas (*PSO*) multiobjetivo, considerando como funciones de optimización la varianza (para maximizar la dispersión de los valores y, con ello, el poder discriminatorio del índice) y la entropía (para potenciar la incertidumbre informativa y evitar asignaciones dominantes), se obtuvo una nueva configuración de coeficientes, distinta a la propuesta inicial:

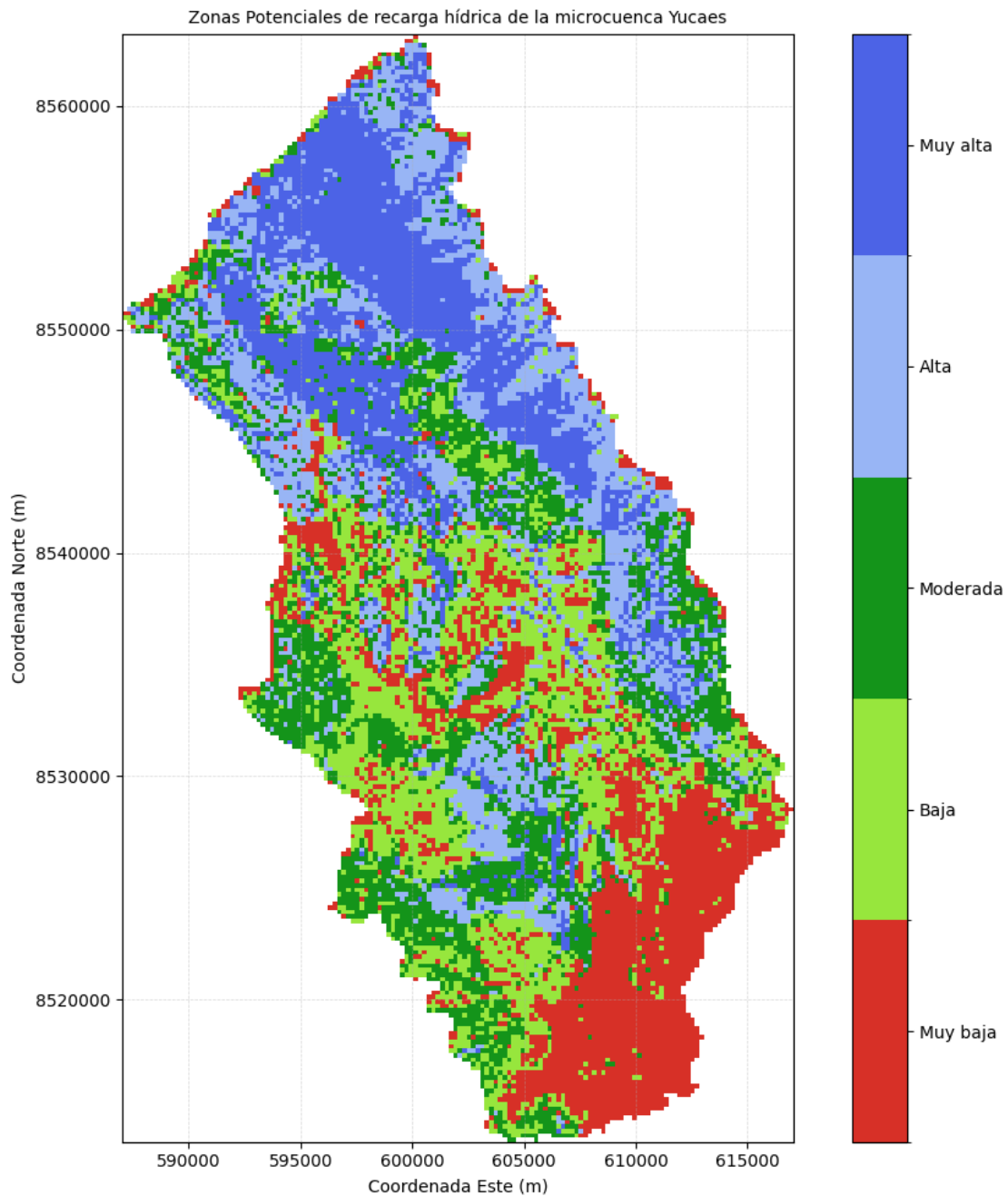
$$ZPRH = [0,256(Pend) + 0,020(Ts) + 0,184(Tr) + 0,121(Cve) + 0,150(Us/C) + 0,269(Pp)] \quad (3.2)$$

Este resultado refleja una redistribución adaptativa de los pesos. La variable pendiente (*Pend*) aumenta considerablemente su participación (de 0.17 a 0.256), lo que evidencia su mayor contribución a la variabilidad global del índice bajo los criterios de optimización. Por el contrario, la variable tipos de suelo (*Ts*) reduce su influencia (de 0.18 a 0.020), indicando un aporte limitado en términos de diferenciación y diversidad informativa. Asimismo, la precipitación (*Pp*) incrementa su peso (de 0.22 a 0.269), reforzando su rol en la explicación de la recarga hídrica. Las demás variables presentan ajustes moderados, manteniendo una participación equilibrada en función de la varianza y la entropía.

En conjunto, el procedimiento de optimización multiobjetivo permite derivar un índice ZPRH

calibrado a partir de criterios estadísticos robustos, lo que evidencia la conveniencia de emplear métodos que integren simultáneamente dispersión e información en la definición de los coeficientes.

Figura 3.9: Zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca Yucaes, obtenido mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas.



Nota: La probabilidad de recarga hídrica se representa con una escala de colores: azul oscuro (muy alta), azul claro (alta), verde oscuro (moderada), verde claro (baja) y rojo (muy baja), Elaborado mediante PyThon.

4.1 Contrastación de hipótesis

4.1.1 Primera hipótesis

La implementación del Algoritmo de Enjambre de Partículas (*PSO*) para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025, optimiza la asignación de los pesos de los factores ambientales, permitiendo una identificación más precisa y objetiva.

4.1.1.1 Contrastación de la primera hipótesis

La formulación original del índice de zonas potenciales de recarga hídrica (*ZPRH*), planteada en la bibliografía de (Rodríguez Levy et al., 2023), se expresa como:

$$ZPRH = [0,17(Pend) + 0,18(Ts) + 0,10(Tr) + 0,17(Cve) + 0,16(Us/C) + 0,22(Pp)] \quad (4.1)$$

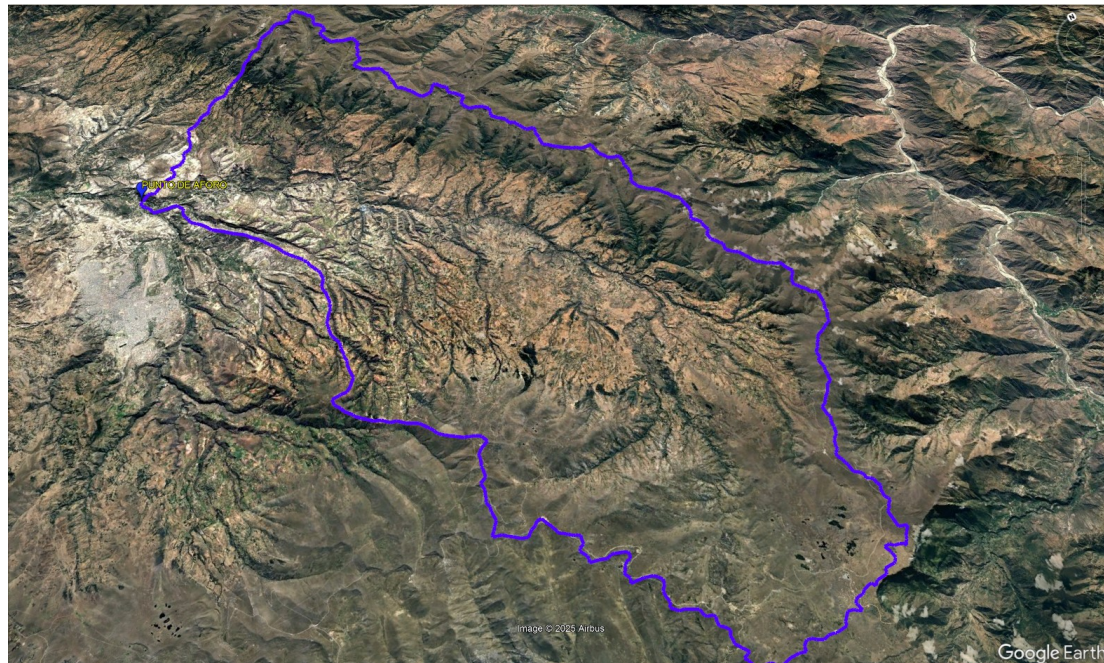
No obstante, al aplicar el Algoritmo Enjambre de Partículas (*PSO*) multiobjetivo, considerando como funciones de optimización la **varianza** (para maximizar la dispersión de los valores y con ello el poder discriminatorio del índice) y la **entropía** (para potenciar la incertidumbre informativa y evitar asignaciones dominantes), se obtuvo una nueva configuración de coeficientes, distinta a la propuesta inicial:

$$ZPRH = [0,256(Pend) + 0,020(Ts) + 0,184(Tr) + 0,121(Cve) + 0,150(Us/C) + 0,269(Pp)] \quad (4.2)$$

Este resultado evidencia una redistribución adaptativa de los pesos asignados a los factores ambientales. La variable *pendiente* (Pend) aumenta su participación de **0.17** a **0.256**, consolidándose como el factor de mayor influencia en la variabilidad global del índice, bajo los criterios de maximización de varianza y entropía. En contraste, la variable *tipos de suelo* (Ts) reduce drásticamente su peso de **0.18** a **0.020**, lo que revela un aporte marginal en la diferenciación espacial del índice. Por su parte, la *precipitación* (Pp) incrementa su coeficiente de **0.22** a **0.269**, confirmando su rol determinante en los procesos de recarga hídrica. El resto de las variables presentan ajustes moderados: *transmisividad* (Tr) pasa de **0.10** a **0.184**, la *cobertura vegetal* (Cve) de **0.17** a **0.121**, y el *uso/cobertura del suelo* (Us/C) de **0.16** a **0.150**.

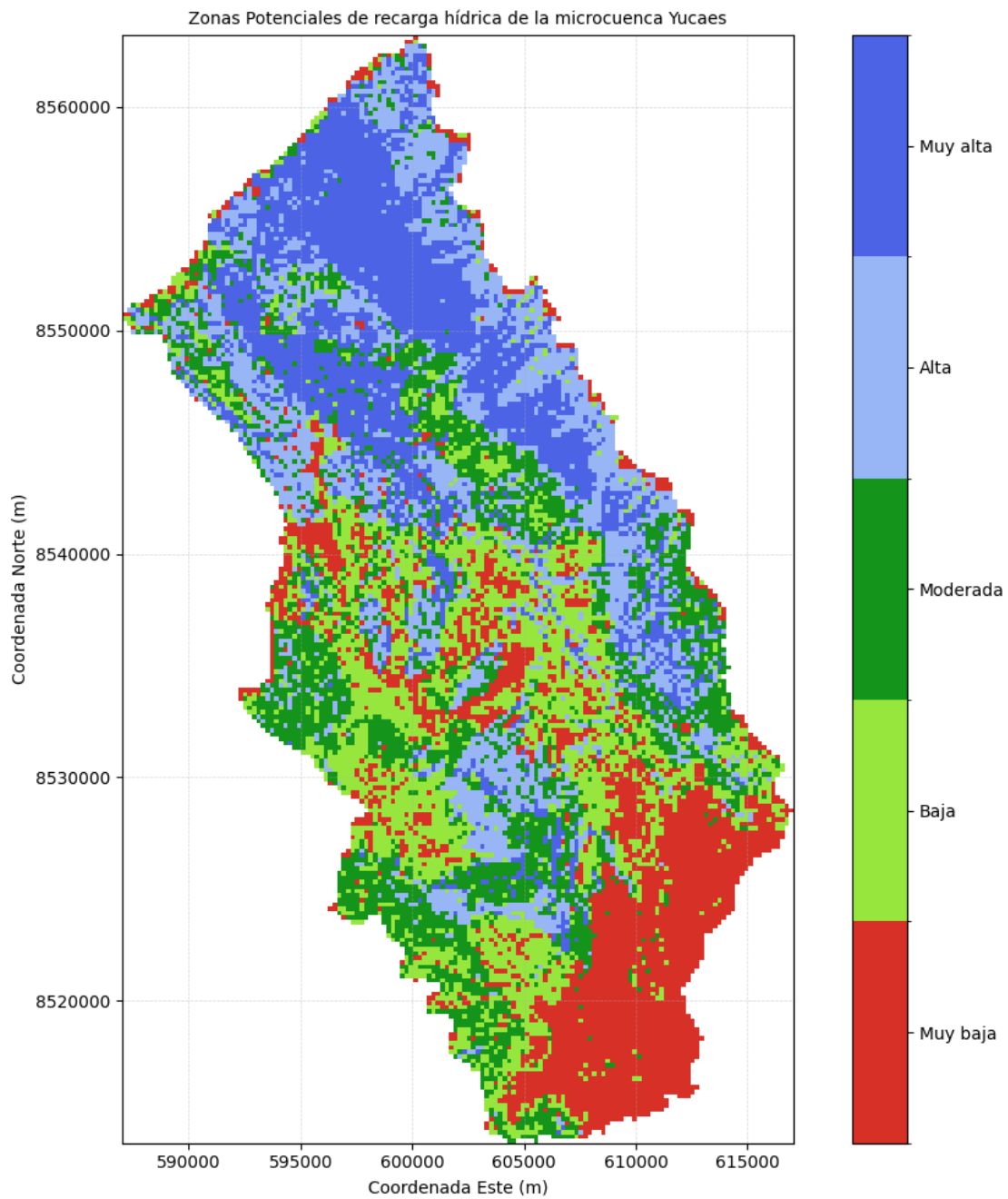
En conjunto, la optimización multiobjetivo permitió derivar un índice ZPRH calibrado a partir de criterios estadísticos robustos, confirmando que la hipótesis planteada es verdadera: el algoritmo *PSO* optimiza efectivamente la asignación de pesos, contribuyendo a una identificación más precisa y objetiva de las zonas potenciales de recarga en la microcuenca Yucaes. Además, la validación visual mediante imágenes satelitales muestra que las áreas clasificadas como de muy alta y alta recarga coinciden con las zonas de recarga natural de la cuenca, lo que refuerza la consistencia del modelo propuesto.

Figura 4.1: Imagen satelital de la microcuenca Yucaes.



Nota: En la siguiente imagen se presentan las características fisiográficas, edáficas y ambientales de la microcuenca, elaboradas a partir de imágenes satelitales de Google Earth.

Figura 4.2: Zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca Yucaes, obtenido mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas.

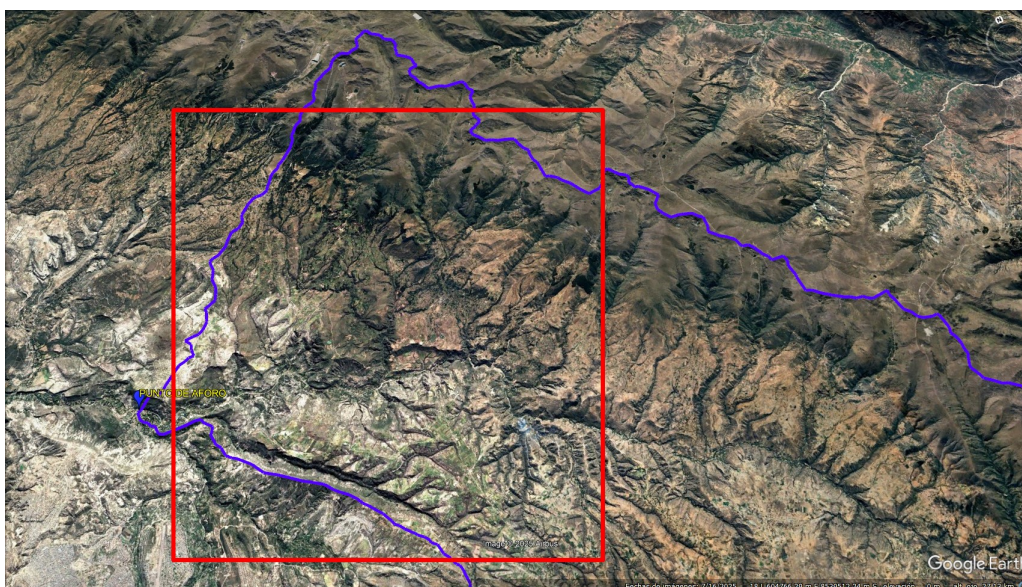


Nota: La probabilidad de recarga hídrica se representa con una escala de colores: azul oscuro (muy alta), azul claro (alta), verde oscuro (moderada), verde claro (baja) y rojo (muy baja), Elaborado mediante PyThon.

Según el mapa obtenido mediante el algoritmo de Enjambre de Partículas, las zonas con muy alta, alta y moderada probabilidad de recarga hídrica representadas en azul oscuro, azul claro y verde oscuro se localizan principalmente en las áreas bajas y centrales de la microcuenca. Al contrastar estos resultados con la imagen satelital de Google Earth, se observa que dichas

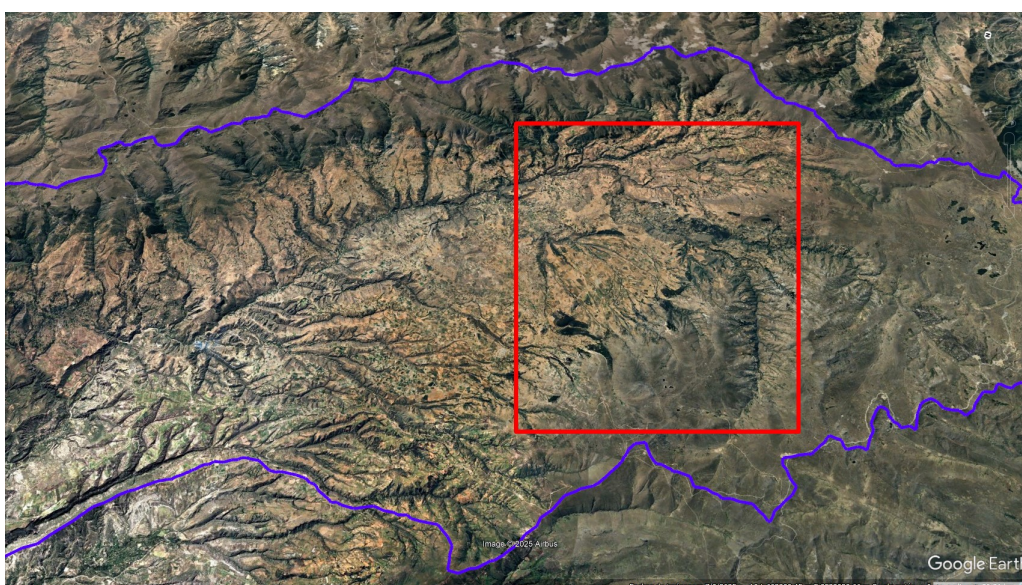
áreas corresponden a zonas agrícolas, con cobertura vegetal, suelos fértiles no rocosos y de pendiente suave, condiciones que favorecen la infiltración y confirman su potencial como áreas de recarga hídrica. Esta correspondencia puede apreciarse claramente en las imágenes satelitales presentadas a continuación.

Figura 4.3: *Imagen satelital de la microcuenca Yucaes.*



Nota: En la siguiente imagen se presentan las características.

Figura 4.4: *Imagen satelital de la microcuenca Yucaes.*



Nota: En la siguiente imagen se presentan las características.

También Según el mapa obtenido mediante el algoritmo de Enjambre de Partículas, las zonas con baja y muy baja probabilidad de recarga hídrica representadas en verde claro y rojo se localizan principalmente en las áreas extremas y altas de la microcuenca. Al contrastar estos resultados con la imagen satelital de Google Earth, se observa que dichas áreas corresponden a zonas no agrícolas, con escasa cobertura vegetal, suelos escarpados y rocosos de fuerte pendiente, condiciones que no favorecen la infiltración y confirman su bajo potencial como áreas de recarga hídrica. Esta correspondencia puede apreciarse claramente en las imágenes satelitales presentadas anteriormente.

Por lo tanto, se acepta la primera hipótesis, la implementación del Algoritmo de Enjambre de Partículas (*PSO*) para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025, optimiza la asignación de los pesos de los factores ambientales, permitiendo una identificación más precisa y objetiva.

4.1.2 Segunda hipótesis

la pendiente del terreno, el tipo de suelo, el tipo de roca, la cobertura vegetal, el uso del suelo y la precipitación tienen una influencia significativa en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025.

4.1.2.1 Contratación de la segunda hipótesis

La hipótesis planteada sostiene que la pendiente del terreno, el tipo de suelo, el tipo de roca, la cobertura vegetal, el uso del suelo y la precipitación influyen significativamente en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes.

En la contrastación de la primera hipótesis se verificó mediante la optimización multiobjetivo con el Algoritmo Enjambre de Partículas (*PSO*), que permitió redistribuir los coeficientes originales propuestos por (Rodríguez Levy et al., 2023). Los pesos finales obtenidos fueron:

$$ZPRH = [0,256(\text{Pend}) + 0,020(\text{Ts}) + 0,184(\text{Tr}) + 0,121(\text{Cve}) + 0,150(\text{Us/C}) + 0,269(\text{Pp})] \quad (4.3)$$

Expresados en porcentajes la influencia relativa, se tiene:

- ☞ **Precipitación (Pp): 26.9 %** → principal factor, determinante en la disponibilidad hídrica para la recarga.
- ☞ **Pendiente (Pend): 25.6 %** → segundo factor más influyente, pues controla la infiltración frente al escurrimiento superficial.
- ☞ **Tipo de roca (Tr): 18.4 %** → influencia media, asociada a la permeabilidad geológica.
- ☞ **Uso/Cobertura del suelo (Us/C): 15.0 %** → relevancia intermedia, vinculada a prácticas agrícolas y ocupación del suelo.
- ☞ **Cobertura vegetal (Cve): 12.1 %** → apoyo secundario, al mejorar la infiltración y reducir la esorrentía.

- ☛ **Tipo de suelo (Ts): 2.0 %** → mínima incidencia en la microcuenca, mostrando que su aporte es reducido frente a otros factores.

La validación espacial con imágenes satelitales confirma esta distribución: las zonas clasificadas con **alta y muy alta recarga** (azul oscuro y azul claro) se ubican en las partes bajas y centrales de la microcuenca, coincidiendo con áreas agrícolas fértiles y con cobertura vegetal, mientras que las zonas de **baja y muy baja recarga** (verde claro y rojo) corresponden a áreas altas, rocosas y con fuerte pendiente, donde la infiltración es mínima.

En consecuencia, la segunda hipótesis queda confirmada, los seis factores evaluados tienen una influencia significativa en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica, aunque con distintos niveles de incidencia, siendo la **precipitación (26.9 %)** y la **pendiente (25.6 %)** los de mayor peso en la microcuenca Yucaes.

4.1.3 Tercera hipótesis

El rendimiento del Algoritmo Enjambre de Partículas en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025, en comparación con métodos tradicionales es más eficiente y precisa

4.1.3.1 Contrastación de la tercera hipótesis

Para la contrastación de la tercera hipótesis, en primer lugar se identificaron las zonas potenciales de recarga hídrica aplicando la metodología tradicional utilizada en estudios previos de otros países. Dicha metodología corresponde al algoritmo propuesto por (Matus et al., 2009) para cuencas de Centroamérica y posteriormente adaptado por (Rodríguez Levy et al., 2023) en Bolivia. La implementación se realizó en el software *ArcGIS*, empleando la herramienta *Spatial Analyst Tools* → *Map Algebra* → *Raster Calculator*, con el modelo matemático siguiente:

$$ZPRH = [0,17(\text{Pend}) + 0,18(\text{Ts}) + 0,10(\text{Tr}) + 0,17(\text{Cve}) + 0,16(\text{Us/C}) + 0,22(\text{Pp})] \quad (4.4)$$

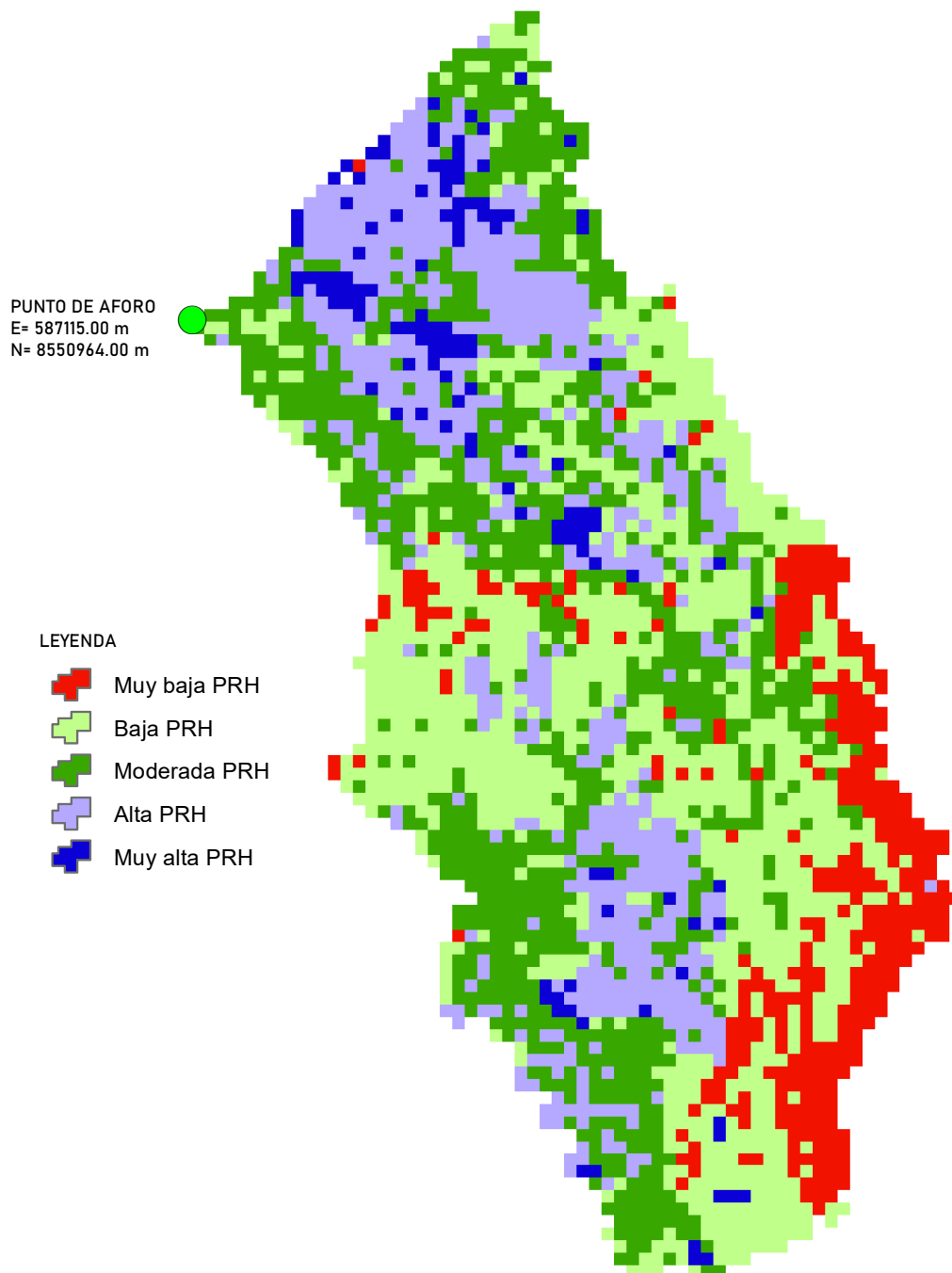
Este enfoque tradicional asigna pesos fijos a cada variable, definidos a partir de criterios empíricos y experiencias de aplicación en contextos distintos al de la microcuenca Yucaes.

Posteriormente, se realizó la comparación visual de los mapas generados con este modelo y los obtenidos mediante la optimización multiobjetivo con el Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO). El análisis permitió identificar que, aunque las diferencias no son drásticas en la distribución espacial general de las zonas de recarga, sí se evidencian variaciones en la delimitación y grado de importancia de las áreas clasificadas. Esto se debe a que el modelo tradicional carece de un proceso de calibración estadística y no incorpora técnicas de inteligencia artificial para la asignación de pesos, lo que limita su capacidad de adaptación a las condiciones ambientales y fisiográficas propias de la microcuenca.

En contraste, la aplicación del PSO multiobjetivo, considerando simultáneamente la varianza y la entropía como funciones de optimización, permitió redistribuir los coeficientes de manera adaptativa, otorgando mayor peso a variables de mayor relevancia en el contexto local (pendiente y precipitación) y reduciendo la incidencia de aquellas con menor aporte (tipo de suelo). Esta

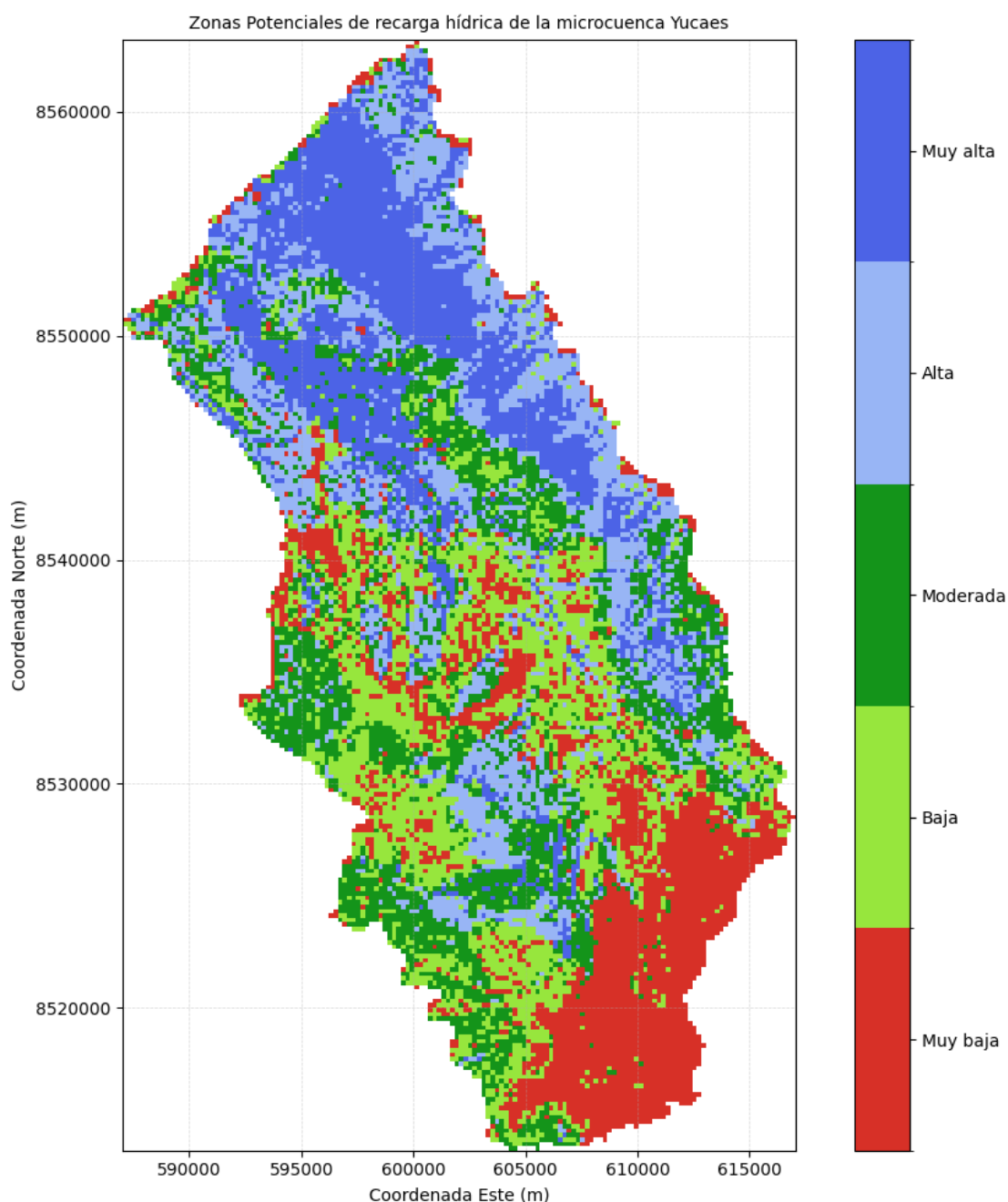
diferencia metodológica explica los ajustes observados en la identificación de las zonas de recarga hídrica y resalta la ventaja de aplicar algoritmos de optimización basados en inteligencia artificial frente a enfoques empíricos, como se muestra a continuación.

Figura 4.5: Zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca Yucaes obtenido con la metodología tradicional.



Nota: La probabilidad de recarga hídrica se representa con una escala de colores: azul oscuro (muy alta), azul claro (alta), verde oscuro (moderada), verde claro (baja) y rojo (muy baja), Elaborado mediante AcrGIS.

Figura 4.6: Zonas potenciales de recarga hídrica de la microcuenca Yucaes, obtenido mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas.



Nota: La probabilidad de recarga hídrica se representa con una escala de colores: azul oscuro (muy alta), azul claro (alta), verde oscuro (moderada), verde claro (baja) y rojo (muy baja), Elaborado mediante PyThon.

Por lo tanto, la comparación entre ambos métodos confirma la tercera hipótesis, el rendimiento del Algoritmo Enjambre de Partículas en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025, en comparación con métodos tradicionales es más eficiente y precisa.

4.1.4 Hipótesis general

La identificación de zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025, genera resultados óptimos.

4.1.5 Contratación de la hipótesis general

La contrastación de las hipótesis específicas confirmó que el Algoritmo Enjambre de Partículas multiobjetivo optimiza la asignación de pesos de los factores ambientales en función de criterios estadísticos robustos (varianza y entropía), logrando una delimitación más precisa y objetiva de las zonas de recarga respecto al enfoque tradicional empírico. Asimismo, la validación espacial con imágenes satelitales mostró una alta correspondencia entre las áreas identificadas como de alta recarga y las zonas agrícolas y vegetadas de la cuenca, mientras que las áreas de baja recarga coincidieron con sectores rocosos y de fuerte pendiente.

En conjunto, estos resultados permiten confirmar la hipótesis general, evidenciando que la aplicación del PSO constituye una metodología eficaz y adaptativa para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes.

5.1 Conclusiones

Las conclusiones fueron desarrolladas en función de los objetivos planteados y de los resultados obtenidos en la investigación, las cuales se presentan enumeradas en orden de específicos a general.

1. Se logró implementar exitosamente el Algoritmo de Enjambre de Partículas en el lenguaje de programación Python para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, generando un mapa final con la clasificación en cinco categorías (muy baja, baja, media, alta y muy alta) que reflejan la probabilidad de recarga hídrica que tiene la microcuenca Yucaes.
2. Se determinó la influencia que tienen las variables, y que las variables con mayor influencia en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes son: precipitación (26.9%), tipo de roca (18.4%) y pendiente del terreno (25.6%). Estas variables, en conjunto con la cobertura vegetal (12.1%), uso del suelo (15.0%) y tipo de suelo (2.0%), definen de manera significativa el potencial de recarga hídrica, confirmando la importancia de un análisis integrado de factores fisiográficos, edáficos y climáticos.
3. Al contrastar los resultados del Algoritmo de Enjambre de Partículas para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica con los obtenidos mediante el método tradicional desarrollado en el software ArcGIS propuesto por Matus et al. (2009) y adaptado por Rodríguez Levy et al. (2023), se evidenció una alta correspondencia espacial entre ambas

metodologías. Sin embargo, el uso de inteligencia artificial y métodos estadísticos como la varianza y entropía permitió una asignación más precisa de los pesos, reduciendo la subjetividad y mejorando la exactitud en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica.

4. La aplicación del Algoritmo de Enjambre de Partículas permitió identificar de manera óptima las zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025. Los resultados obtenidos evidencian una mejora frente a los métodos tradicionales planteados empíricamente para otros países, al incorporar técnicas de inteligencia artificial y estadística avanzada que asignan los pesos de manera más objetiva y precisa, lo que garantiza una mayor confiabilidad en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica.

5.2 Recomendaciones

Las recomendaciones se plantean en función de los resultados obtenidos en la investigación, con el propósito de fortalecer futuros estudios y aplicaciones en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica.

1. Implementar el Algoritmo de Enjambre de Partículas en otras microcuencas de la región, a fin de validar su aplicabilidad en diferentes contextos fisiográficos y climáticos, y así generar una base comparativa que permita evaluar su desempeño frente a distintos escenarios hidrológicos.
2. Incorporar un mayor número de variables ambientales, como la textura del suelo, la infiltración medida en campo y la evapotranspiración, para enriquecer el modelo y aumentar la precisión en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica.
3. Complementar el análisis realizado con validaciones en campo mediante la instalación de piezómetros, estudios de infiltración y monitoreo hidrológico, lo cual permitirá contrastar los resultados del algoritmo con datos empíricos y garantizar la confiabilidad del modelo.
4. Promover el uso de técnicas de inteligencia artificial y optimización multiobjetivo en la gestión de los recursos hídricos de la región, ya que representan herramientas robustas y objetivas para la toma de decisiones en planificación territorial y conservación de zonas de recarga hídrica.

5.3 Trabajos futuros

A partir de los resultados alcanzados en la presente investigación, se plantean los siguientes trabajos futuros que permitirán ampliar y profundizar el estudio de la recarga hídrica en la microcuenca Yucaes y en otras regiones.

1. Desarrollar modelos híbridos que combinen el Algoritmo de Enjambre de Partículas con otras técnicas de inteligencia artificial, como redes neuronales artificiales o algoritmos genéticos, para mejorar la precisión en la asignación de pesos y la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica.

2. Implementar estudios de modelamiento hidrológico integrando los resultados del índice ZPRH con herramientas de simulación de flujos subterráneos, con el fin de cuantificar los volúmenes de recarga efectiva en la microcuenca.
3. Explorar la aplicación del Algoritmo de Enjambre de Partículas en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica a escala regional o de cuencas mayores, lo que permitiría evaluar su escalabilidad y aplicabilidad en la gestión integral de recursos hídricos.
4. Incorporar series temporales de variables climáticas proyectadas (precipitación y temperatura) bajo escenarios de cambio climático, con el propósito de analizar cómo podrían variar en el futuro las zonas de recarga hídrica y aportar a la planificación de medidas de adaptación.

Bibliografía

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 56, 1-300.
- ANA. (2021). *Informe sobre la situación de los recursos hídricos en el Perú*. Ministerio de Agricultura y Riego (MIDAGRI). <https://www.ana.gob.pe>
- Autoridad Nacional del Agua. (2024). Visor por Cuenca - Estaciones Hidrométricas [Accedido: 9 septiembre 2025]. <https://snirh.ana.gob.pe/visorPorCuenca/?IdVar=267>
- Batelaan, O., & De Smedt, F. (2015). GIS-based recharge estimation by coupling surface-subsurface water balances. *Journal of Hydrology*, 337(3-4), 337-355. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.001>
- Brutsaert, W. (2005). *Hydrology: An Introduction*. Cambridge University Press.
- Carrica, J., & Lexow, B. (2004). *Hidrología de acuíferos: procesos de recarga y descarga*. Editorial Académica.
- Chamorro, J. (2016). *Identificación y caracterización de zonas de recarga hídrica mediante SIG* [Tesis doctoral, Universidad Técnica del Norte].
- Chorley, R. J., Schumm, S. A., & Sugden, D. E. (1984). *Geomorphology*. Methuen.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Chowdhury, A., Singh, R., & Kumar, A. (2020). Application of artificial neural networks for groundwater recharge potential mapping in Bangladesh. *Environmental Earth Sciences*, 79(2), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8824-9>
- Clerc, M., & Kennedy, J. (2002). The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(1), 58-73. <https://doi.org/10.1109/4235.985692>
- De Moya, G. (1992). *Gestión de cuencas hidrográficas*. Ediciones Científicas.
- Dingman, S. L. (2015). *Physical Hydrology*. Waveland Press.
- Eberhart, R. C., & Shi, Y. (2001). Particle swarm optimization: Developments, applications and resources. *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation*, 1, 81-86. <https://doi.org/10.1109/CEC.2001.934374>
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*. Prentice Hall.
- Forges, J. (2005). *Método RAS para determinar la recarga de aguas subterráneas*. San Salvador, El Salvador.

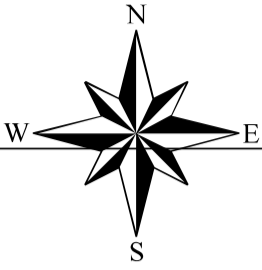
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.
- GEO GPS Perú. (2024). *GEO GPS Perú Soluciones en Ingeniería y Geomática* [Nuestra misión es proporcionar las mejores Soluciones Integrales en Ingeniería y Geomática]. <https://www.geogpsperu.com/>
- Gómez, M. (2015). Recarga artificial de acuíferos mediante jardines de lluvia en el Eje Cafetero colombiano. *Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica de Pereira*. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/5587>
- Gómez, R., Pérez, L., & Torres, A. (2019). Efecto del cambio de uso del suelo en la recarga hídrica en la cuenca del río Mantaro. *Revista de Hidrología Andina*, 10(2), 89-103.
- GOREAYA. (2021). *Plan de Desarrollo Regional Concertado de Ayacucho 2021-2026*. Gobierno Regional de Ayacucho. <https://www.regionayacucho.gob.pe>
- (GWP), G. W. P. (2009). *Integrated water resources management*. GWP Publications.
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. Academic Press.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275-370.
- INAIGEM. (2019). *Evaluación del retroceso glaciar en los Andes peruanos*. Gobierno del Perú. <https://www.inaigem.gob.pe>
- INDECI. (2019). *Atlas de Peligros Naturales del Perú*. Gobierno del Perú. <https://www.indeci.gob.pe>
- Kendall, G., & Caldwell, E. (1998). Fundamentos de la geoquímica de isótopos. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444815460500094>
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, 4, 1942-1948. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Leopold, L. B., Wolman, M. G., & Miller, J. P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. W. H. Freeman; Company.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. H. (1975). *Hydrology for Engineers*. McGraw-Hill.
- López, J., Sánchez, C., & Ramos, M. (2016). *Identificación de zonas de recarga hídrica en la sierra peruana mediante SIG y análisis multicriterio* (Vol. 8). Revista Peruana de Hidrología.
- Magesh, N. S., Chandrasekar, N., & Soundranayagam, J. P. (2019). Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geoscience Frontiers*, 3(2), 189-196. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.10.007>
- MasterGIS. (2025). MasterGIS - Plataforma de formación en Sistemas de Información Geográfica [Accedido: 31 de agosto de 2025].
- Matus, O., Faustino-Manco, J., & Jiménez-Otálora, F. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica*. CATIE.
- MIDAGRI. (2019). *Acceso al Agua en Comunidades Rurales del Perú*. Gobierno del Perú. <https://www.midagri.gob.pe>
- MINAM. (2020). *Impacto del Cambio Climático en los Recursos Hídricos del Perú*. Gobierno del Perú. <https://www.minam.gob.pe>

- Poli, R., Kennedy, J., & Blackwell, T. (2007). Particle swarm optimization: An overview. *Swarm Intelligence*, 1(1), 33-57. <https://doi.org/10.1007/s11721-007-0002-0>
- Quispe, D., Vargas, E., & Huamán, P. (2021). Estimación de la recarga hídrica en la región Cusco mediante teledetección y análisis estadístico. *Revista Geoespacial del Perú*, 12(1), 34-50.
- Rahmati, O., Samani, A. N., Deo, R. C., & Mohammadi, F. (2021). Application of swarm intelligence algorithms for groundwater potential mapping in semi-arid regions. *Journal of Hydrology*, 597, 126210. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126210>
- Rodríguez Levy, I. E., Centellas-Levy, M. A., Ferreira, W. J., Mustafa, S. M. T., Rivera-Rodríguez, L., Gonzales Amaya, A., & Huysmans, M. (2023). Development and Application of a Methodology for the Identification of Potential Groundwater Recharge Zones: A Case Study in the Virvini Micro-Basin, Tiraque, Bolivia. *Water*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/w15071268>
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de recarga potencial de acuíferos mediante balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*. http://www.geologia.ucr.ac.cr/revista/revista/pdf_frameset.html
- SENAMHI. (2021). *Informe sobre la Variabilidad Climática en la Sierra Sur del Perú*. Ministerio del Ambiente. <https://www.senamhi.gob.pe>
- Shi, Y., & Eberhart, R. C. (1998). A modified particle swarm optimizer. *Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 69-73. <https://doi.org/10.1109/ICEC.1998.699146>
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. En V. T. Chow (Ed.), *Handbook of Applied Hydrology* (pp. 4-39). McGraw-Hill.
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2005). *Groundwater Hydrology*. John Wiley & Sons.
- UNESCO. (2020). *World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*. United Nations Educational, Scientific; Cultural Organization. <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2020>
- Vélez, M., & Vásquez, L. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. *Avances en Recursos Hidráulicos*. <http://www.bdigital.unal.edu.co/6105/>
- Villarroel Coca, T. F., Centellas Levy, M. A., & Pinedo Maráz, M. L. (2024). *Guía para la localización y gestión de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua: Contribuyendo a la planificación territorial del agua*. Fundación AGRECOL Andes. <https://www.agrecolandes.org>
- Villón, R. (2002). *Hidrología aplicada a la gestión de cuencas*. Instituto Nacional de Recursos Hídricos.

A

Anexos
Mapas temáticos







MAP-01: MICROCUENCA YUCAES

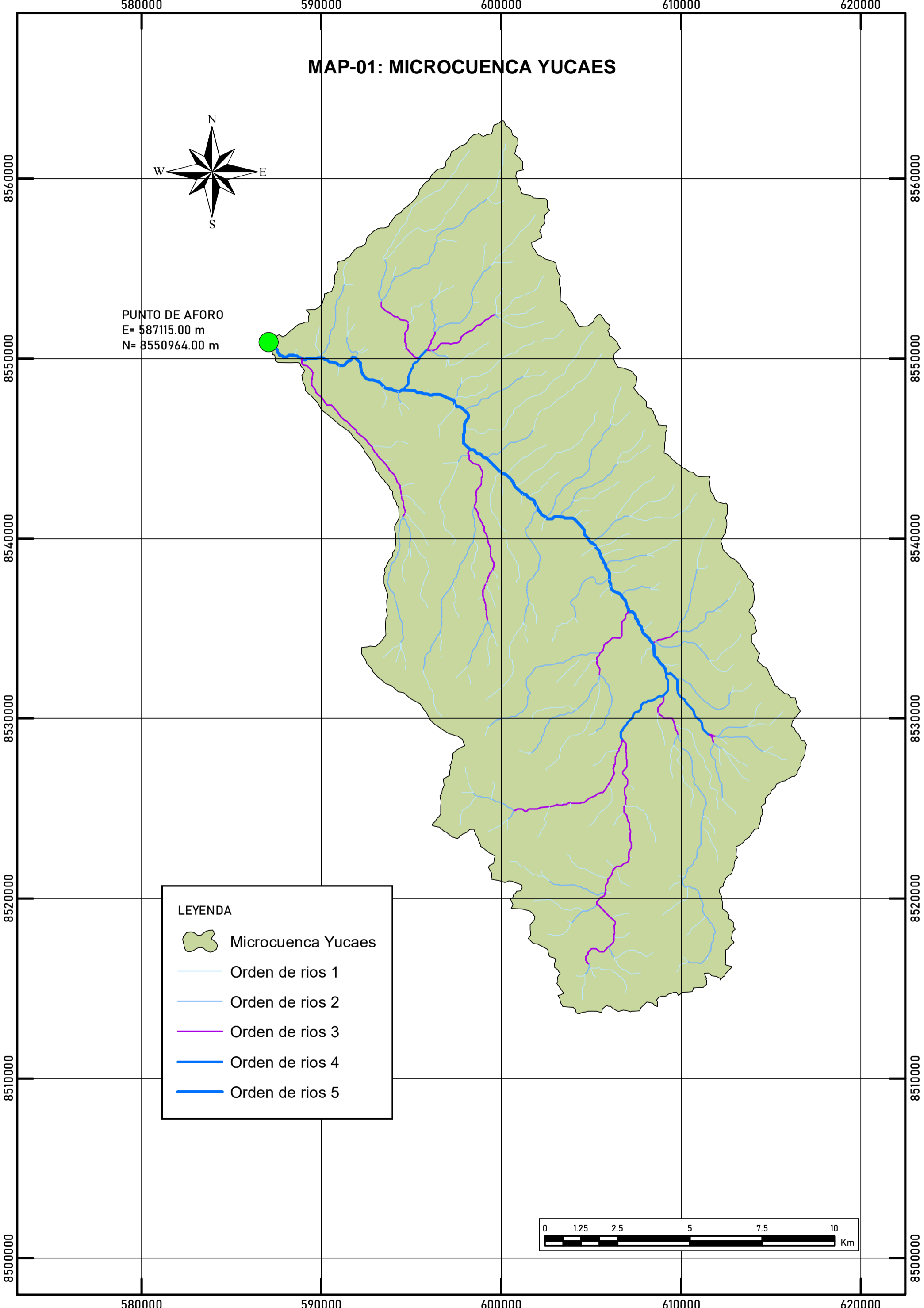
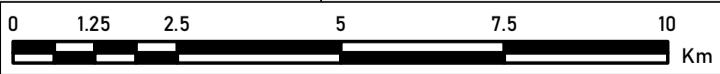


PUNTO DE AFORO
E= 587115.00 m
N= 8550964.00 m

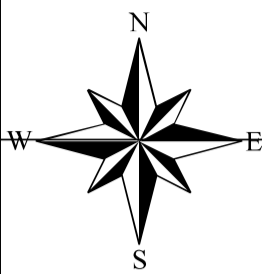


LEYENDA

-  Microcuenca Yucaes
-  Orden de rios 1
-  Orden de rios 2
-  Orden de rios 3
-  Orden de rios 4
-  Orden de rios 5








MAP-02: MAPA DE RECLASIFICACIÓN DE PENDIENTES DE LA MICROCUENCA YUCAES

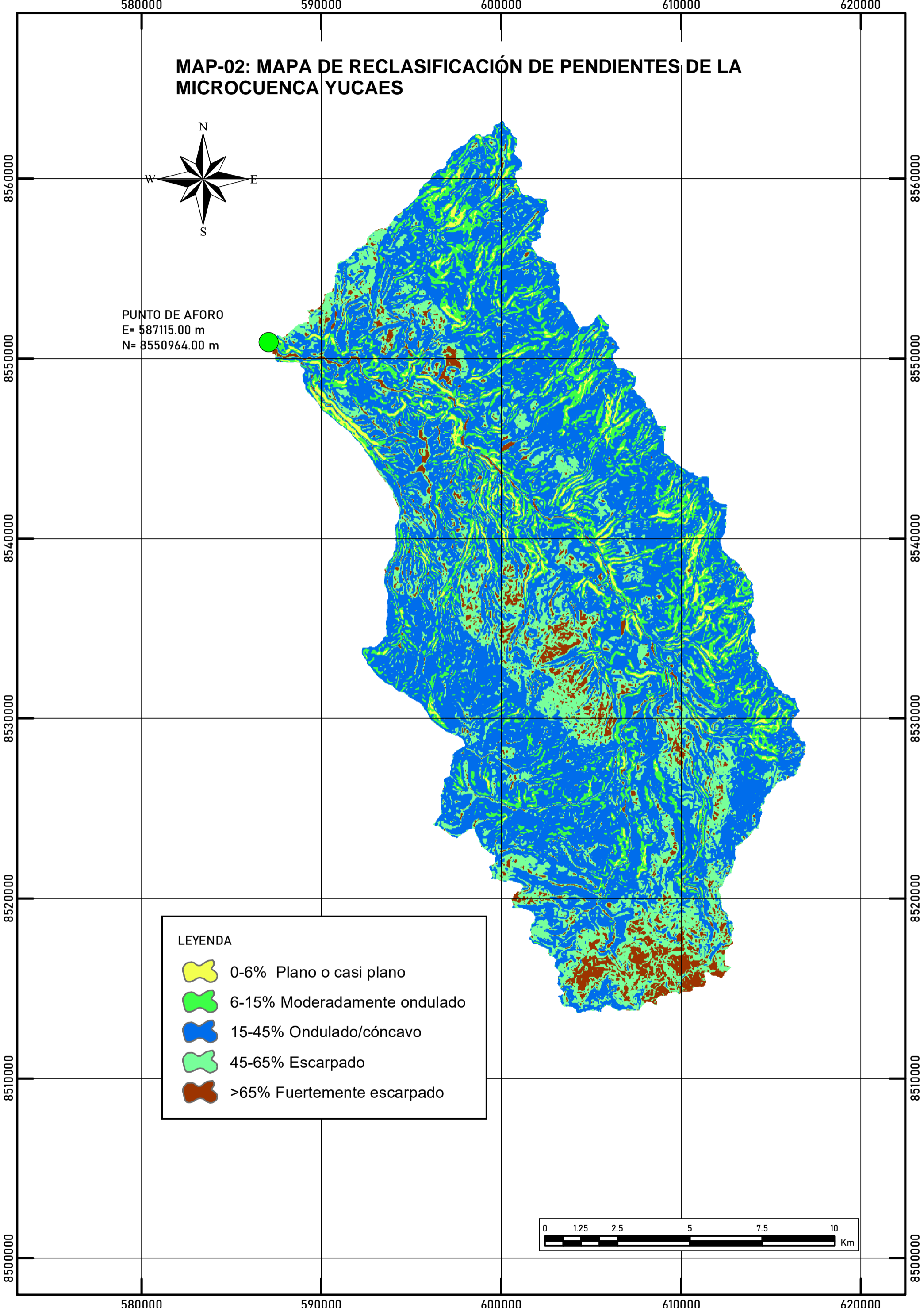
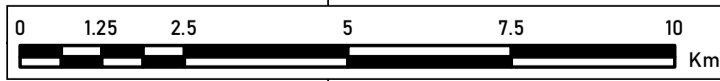


PUNTO DE AFORO
E= 587115.00 m
N= 8550964.00 m

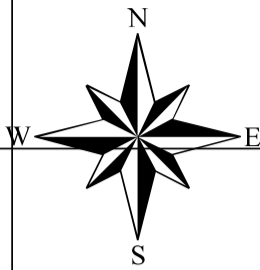


LEYENDA

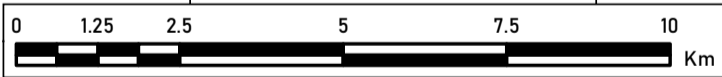
-  0-6% Plano o casi plano
-  6-15% Moderadamente ondulado
-  15-45% Ondulado/cóncavo
-  45-65% Escarpado
-  >65% Fuertemente escarpado








MAP-03: MAPA DE RECLASIFICACIÓN DE TIPOS DE SUELO DE LA MICROCUENCA YUCAES



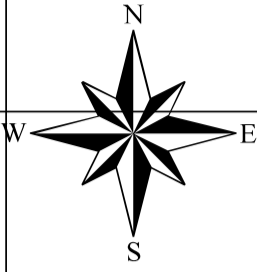
PUNTO DE AFORO
E= 587115.00 m
N= 8550964.00 m



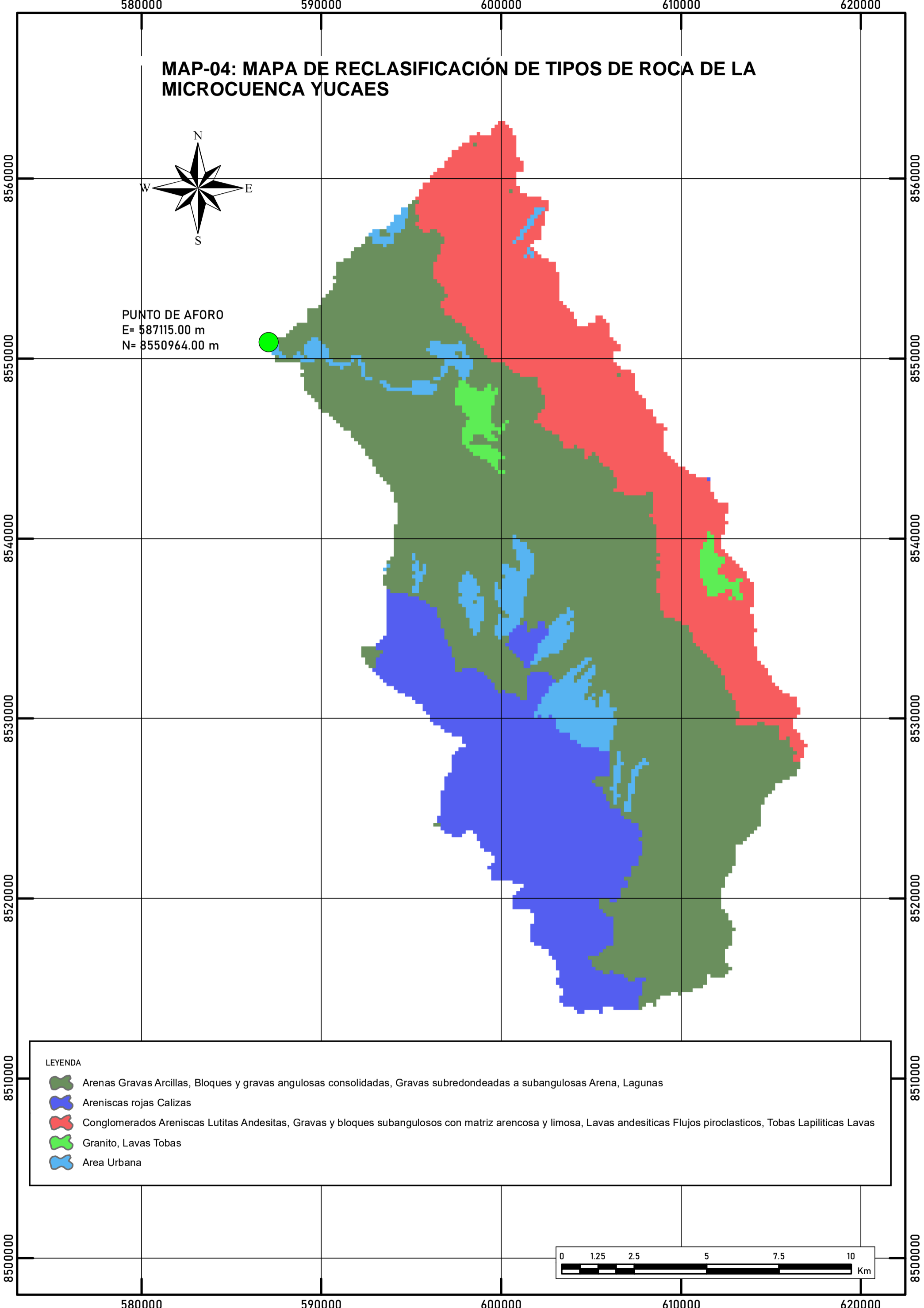
LEYENDA

-  Suelos arenosos, aluviales o zonas acuáticas con alta capacidad de infiltración
-  Suelos bien drenados, fértiles, con buena infiltración
-  Suelos con textura media, buen drenaje, pero limitados por condiciones climáticas o profundidad
-  Suelos arcillosos, compactados, baja infiltración
-  Superficies impermeables que no permiten infiltración

MAP-04: MAPA DE RECLASIFICACIÓN DE TIPOS DE ROCA DE LA MICROCUENCA YUCAES

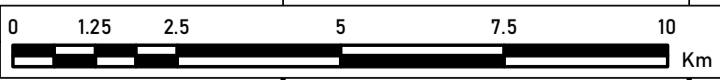


PUNTO DE AFORO
E= 587115.00 m
N= 8550964.00 m

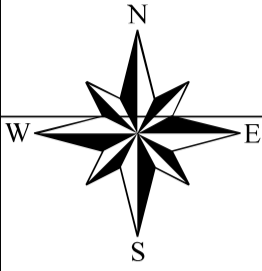


LEYENDA

- Arenas Gravas Arcillas, Bloques y gravas angulosas consolidadas, Gravas subredondeadas a subangulosas Arena, Lagunas
- Areniscas rojas Calizas
- Conglomerados Areniscas Lutitas Andesitas, Gravas y bloques subangulosos con matriz arenosa y limosa, Lavas andesiticas Flujos piroclasticos, Tobas Lapiliticas Lavas
- Granito, Lavas Tobas
- Area Urbana



MAP-05: MAPA DE RECLASIFICACIÓN DE TIPOS DE COBERTURA VEGETAL DE LA MICROCUENCA YUCAES

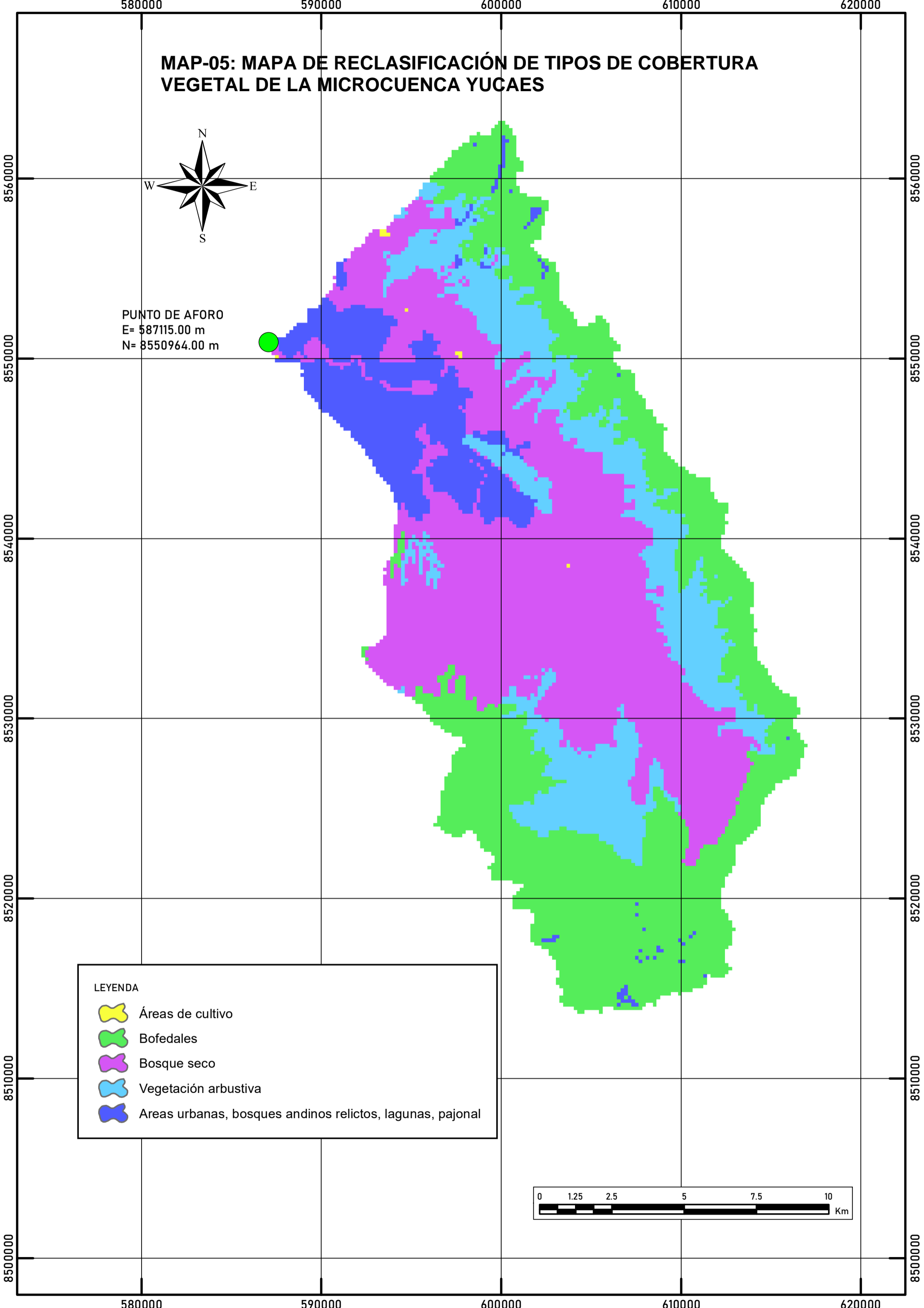
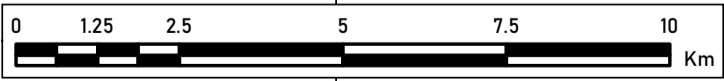


PUNTO DE AFORO
E= 587115.00 m
N= 8550964.00 m

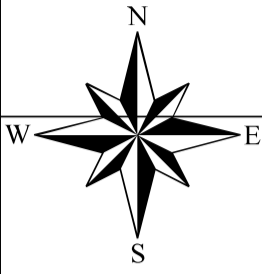


LEYENDA

- Áreas de cultivo
- Bofedales
- Bosque seco
- Vegetación arbustiva
- Areas urbanas, bosques andinos relictos, lagunas, pajonal








MAP-06: MAPA DE RECLASIFICACIÓN DE TIPOS DE USO Y COBERTURA ACTUAL DE SUELO DE LA MICROCUENCA YUCAES

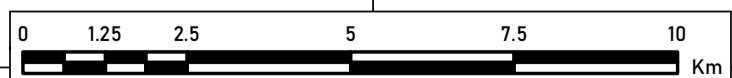


PUNTO DE AFORO
E= 587115.00 m
N= 8550964.00 m



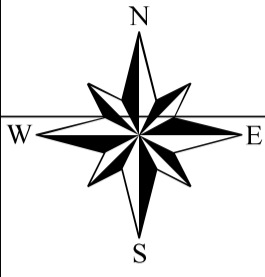
LEYENDA

-  Arbustal, arbustal (exploración minera), areas agrícolas, areas agrícolas (exploración minera)
-  Bosque denso bajo (bosque seco), bosque denso bajo (exploración minera), bosque denso bajo (relictos)
-  Herbazal (uso pecuario), lagunas, lagos y ciénagas naturales permanentes
-  Tejido urbano continuo
-  Turberas y bofedales (uso pecuario)



580000 590000 600000 610000 620000

MAP-07: MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE PRECIPITACIONES DE LA MICROCUENCA YUCAES



PUNTO DE AFORO
E= 587115.00 m
N= 8550964.00 m

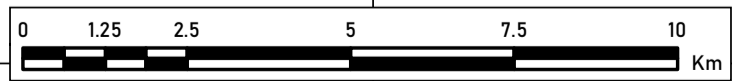


8560000
8550000
8540000
8530000
8520000
8510000
8500000

8560000
8550000
8540000
8530000
8520000
8510000
8500000

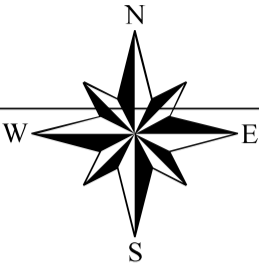
LEYENDA

-  > 700 mm/año
-  600 – 700 mm/año
-  500 – 600 mm/año
-  400 – 500 mm/año
-  < 400 mm/año



580000 590000 600000 610000 620000






MAP-08: MAPA DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA DE LA MICROCUENCA YUCAES

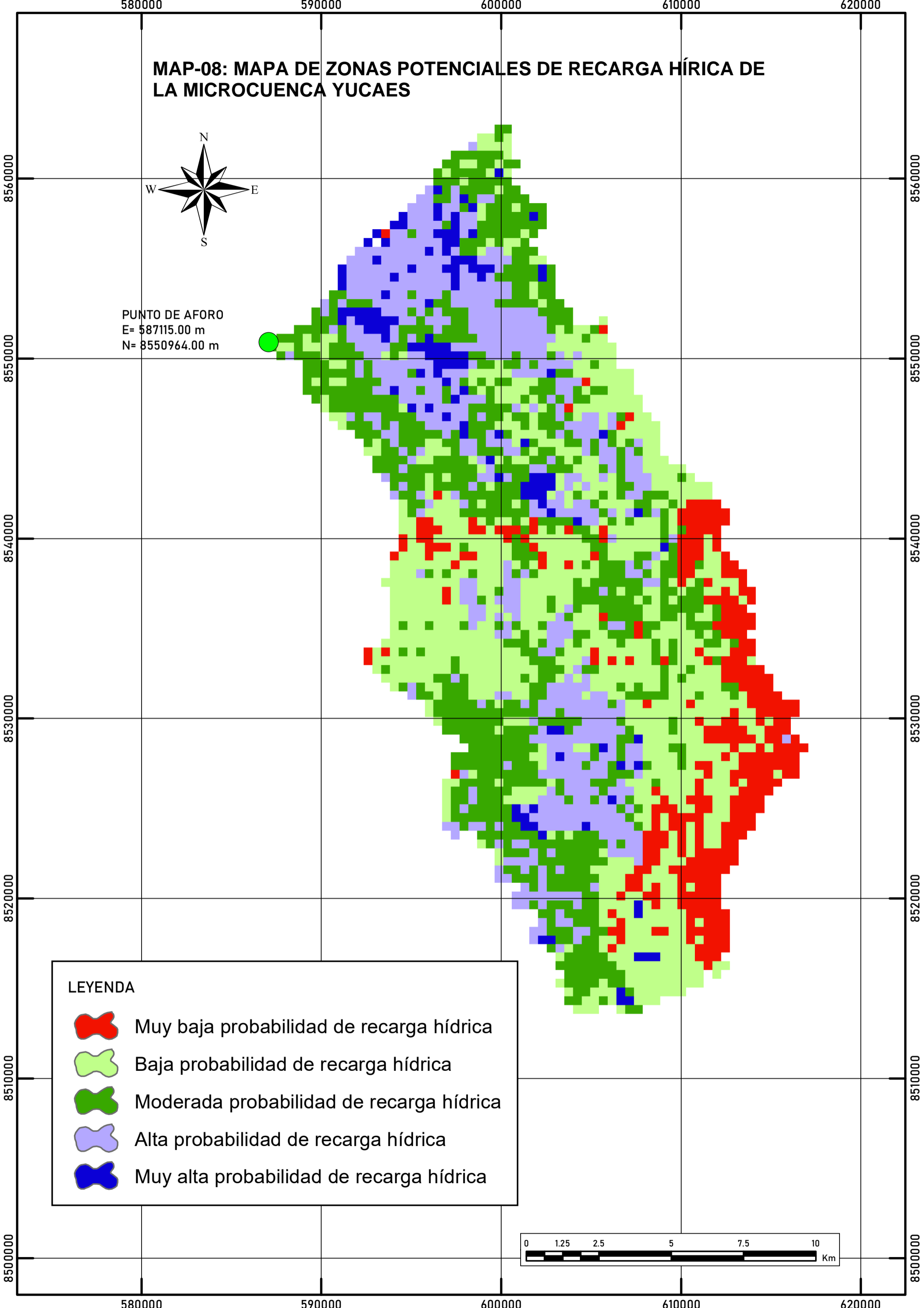
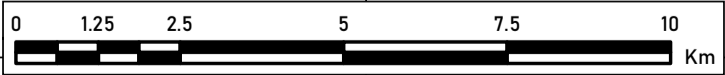


PUNTO DE AFORO
E= 587115.00 m
N= 8550964.00 m

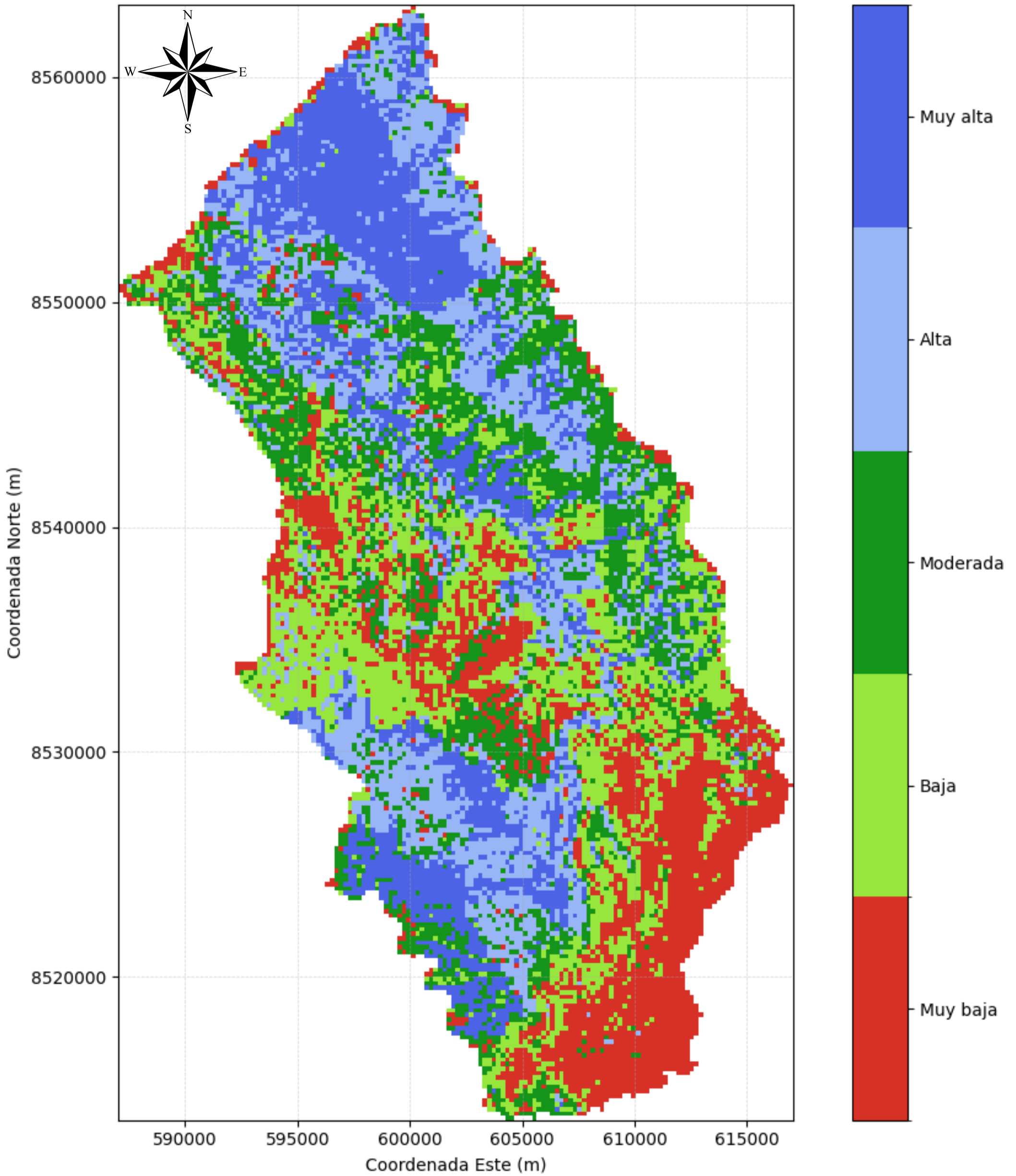


LEYENDA

-  Muy baja probabilidad de recarga hídrica
-  Baja probabilidad de recarga hídrica
-  Moderada probabilidad de recarga hídrica
-  Alta probabilidad de recarga hídrica
-  Muy alta probabilidad de recarga hídrica



MAP-09: MAPA DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA MEDIANTE EL ALGORITMO ENJAMBRE DE PARTICULAS DE LA MICROCUENCA YUCAES



B

Anexos
Matriz de consistencia

Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025

MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	Metodología	Poblacion y Muestra
¿Es posible la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025?	Identificar zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025	La identificación de zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025, genera resultados óptimos	Algoritmo Enjambre de Partículas (independiente)	Configuración del algoritmo	<ul style="list-style-type: none"> • Número de partículas • Número de iteraciones • Coeficiente de inercia (w) • Coeficientes de aceleración (c1, c2) 	<p>Método: Deductivo Se parte de principios teóricos generales y se aplican a casos específicos de la zona de estudio para identificar las áreas potenciales de recarga hídrica.</p> <p>Orientación: Cuantitativa La investigación se basa en datos numéricos y se utiliza para resolver un problema real. Además, se implementan el algoritmo Enjambre de Partículas.</p>	Poblacion: Microcuenca Yucaes
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis específicas		Datos de entrada al algoritmo	<ul style="list-style-type: none"> • Mapa raster de pedientes • Mapa raster tipo de suelos • Mapa raster tipo de rocas • Mapa raster tipo de cobertura vegetal • Mapa raster tipo uso/ cobertura actual de suelo • Mapa raster de precipitaciones 	<p>Enfoque: Cuantitativo Se analizarán datos medibles y numéricos provenientes de variables y se aplicarán modelos matemáticos.</p>	
¿Cómo se puede implementar el Algoritmo de Enjambre de Partículas para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025?	Implementar el Algoritmo de Enjambre de Partículas para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025	La implementación del Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO) para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025, optimiza la asignación de los pesos de los factores ambientales, permitiendo una identificación más precisa y objetiva		Criterios de optimización del algoritmo	<ul style="list-style-type: none"> • Función objetivo • Varianza poblacional • Entropía del enjambre 	<p>Fuente de datos: Investigación documental Se utilizarán datos ya existentes, recopilados y validados en investigaciones previas, lo que permite basar el estudio en información confiable y actualizada.</p>	
				Rendimiento del algoritmo	<ul style="list-style-type: none"> • Error de optimización • Tiempo de convergencia • Precisión del resultado 	<p>Tipo: Descriptiva y explicativa La investigación busca describir las características de la zona de estudio y, a partir de ello, explicar cómo estas influyen en la recarga hídrica.</p>	
¿Cómo influye la pendiente del terreno, el tipo de suelo, el tipo de roca, la cobertura vegetal, el uso del suelo y la precipitación en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025?	Determinar la influencia de la pendiente del terreno, el tipo de suelo, el tipo de roca, la cobertura vegetal, el uso del suelo y la precipitación en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025	la pendiente del terreno, el tipo de suelo, el tipo de roca, la cobertura vegetal, el uso del suelo y la precipitación tienen una influencia significativa en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025		Validación del del algoritmo	<ul style="list-style-type: none"> • Comparación con métodos tradicionales • Índice de correlación • Error cuadrático medio 	<p>Nivel: Correlacional ya que busca analizar la relación entre variables como la pendiente, el tipo de suelo, el tipo de roca, la cobertura vegetal y el uso del suelo con la capacidad de recarga hídrica.</p>	Muestra: Microcuenca Yucaes
¿Cuál es el rendimiento del Algoritmo Enjambre de Partículas en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025, en comparación con métodos tradicionales?	Determinar el rendimiento del Algoritmo Enjambre de Partículas en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025, en comparación con métodos tradicionales	El rendimiento del Algoritmo Enjambre de Partículas en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025, en comparación con métodos tradicionales es más eficiente y precisa	Zonas potenciales de recarga hídrica (dependiente)	Clasificación de zonas de recarga	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial de recarga muy bajo • Potencial de recarga bajo • Potencial de recarga moderado • Potencial de recarga alto • Potencial de recarga muy alto 	<p>Diseño: No experimental-transversal ya que no manipulamos las variables independiente sino observamos y nalaizamos la data existente en un solo tiempo.</p> <p>Direccionalidad: Unidireccional</p> <p>Fenomeno estudiado: Retrospectivo</p> <p>Estudio del diseño: cohortes</p>	



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 063-2025-FIMGC

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **RESOLUCIÓN DECANAL N° 472-2025-FIMGC-D**, a los doce días del mes de diciembre de 2025, siendo las 10:00 a.m., reunidos en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, bajo la presidencia del **MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CARDENAS**, y los miembros: **MSc. Ing. Edmundo CANCHARI GUTIERREZ**; **MSc. Ing. Saúl Walter RETAMOZO FERNANDEZ** y **MSc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZU PRADO**, actuando como secretario docente el **Ing. Amílcar TACURI GAMBOA**, para proceder a la sustentación de tesis para optar el **Título Profesional de Ingeniero Civil**, del bachiller:

JHONY JESUS QUISPE ANCHAYHUA

Quien presentó la tesis denominada:

Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025

Los señores miembros del jurado, luego de expuesta la tesis y absueltas las preguntas, deliberaron y declararon:

Aprobado con Dieciséis (16)

Siendo las 12:00 p.m. del día 12 de diciembre de 2025, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad con lo actuado, los miembros del jurado firman al pie del presente.

MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CARDENAS
Presidente

MSc. Ing. Edmundo CANCHARI GUTIERREZ
Miembro

MSc. Ing. Saúl Walter RETAMOZO
FERNANDEZ
Miembro

MSc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZU PRADO
Miembro - Asesor

Mg. Ing. Amílcar TACURI GAMBOA
Secretario docente de la FIMGC



CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 033-2025-FIMGC/ASIH

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, de la Escuelas Profesional de **Ingeniería Civil** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la **Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 697-2024-FIMGC-UNSCH-D**, dejo constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : Jhony Jesus QUISPE ANCHAYHUA
Escuela Profesional : INGENIERÍA CIVIL
Título de la Tesis : Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025
Evaluación de la Originalidad : 12 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 2852105460

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 31 de diciembre del 2025



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

Mg. Ing. Alex Sander IRCANAUPA HUAMANT
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado
Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil

Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025

por Jhony Jesus QUISPE ANCHAYHUA

Fecha de entrega: 31-dic-2025 04:22p. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2852105460

Nombre del archivo: Tesis_Jhony_Jesus_Quispe_Anchayhua.pdf (15.41M)

Total de palabras: 42505

Total de caracteres: 206838

Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica mediante el Algoritmo Enjambre de Partículas en la microcuenca Yucaes, Ayacucho 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%	11%	6%	7%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	2%
	Trabajo del estudiante	
2	repositorio.unc.edu.pe	2%
	Fuente de Internet	
3	repositorio.utn.edu.ec	1%
	Fuente de Internet	
4	Submitted to	1%
	Trabajo del estudiante	
5	repositorio.catie.ac.cr	1%
	Fuente de Internet	
6	www.repositorio.usac.edu.gt	<1%
	Fuente de Internet	
7	repositorio.una.edu.ni	<1%
	Fuente de Internet	
8	hdl.handle.net	<1%
	Fuente de Internet	
9	repositorio.untels.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
10	KNIGHT PIESOLD CONSULTORES S.A.. "EIA del Proyecto Plataforma de Lixiviación 4B-PAD 4B-IGA0003158", R.D. N° 274-2010-MEM/AAM, 2020	<1%
	Publicación	

11	Submitted to Universidad Católica Boliviana "San Pablo" Trabajo del estudiante	<1 %
12	repositorio.ugto.mx Fuente de Internet	<1 %
13	docplayer.es Fuente de Internet	<1 %
14	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
15	repository.udistrital.edu.co Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.ucm.edu.co Fuente de Internet	<1 %
17	oldri.ues.edu.sv Fuente de Internet	<1 %
18	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
19	livrosdeamor.com.br Fuente de Internet	<1 %
20	1library.co Fuente de Internet	<1 %
21	biblioteca.usac.edu.gt Fuente de Internet	<1 %
22	cunori.edu.gt Fuente de Internet	<1 %
23	Felix Alan Aguilar Carrera. "Revista completa", Agua, Saneamiento & Ambiente, 2024 Publicación	<1 %
24	literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080 Fuente de Internet	<1 %

25	www.cio.mx Fuente de Internet	<1 %
26	Submitted to Institución Tecnológica Metropolitana de Medellín Trabajo del estudiante	<1 %
27	eprints.uanl.mx Fuente de Internet	<1 %
28	Submitted to FUNIBER Trabajo del estudiante	<1 %
29	bibliotecadigital.udea.edu.co Fuente de Internet	<1 %
30	Submitted to University of Sheffield Trabajo del estudiante	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo