

Cobertura vegetal en la recarga de acuíferos: una revisión sistemática

Vegetation cover in aquifer recharge: a systematic review

Recibido: 02/04/2025 - Aceptado: 14/07/2025

Oliver Raul Cutipa Condori

<https://orcid.org/0009-0007-0534-3319>

74913433@continental.edu.pe

Universidad Continental. Cusco, Perú

Sixto Quispe Fernandez

<https://orcid.org/0009-0008-0283-8524>

43620574@continental.edu.pe

Universidad Continental. Cusco, Perú

Gorki Federico Ascue Salas

<https://orcid.org/0000-0002-4477-7132>

gascue@continental.edu.pe

Universidad Continental. Cusco, Perú

Resumen

La presente investigación analiza el impacto de la cobertura vegetal sobre la recarga de acuíferos en regiones altoandinas, donde los cambios en el uso del suelo y la disminución de la vegetación han modificado los procesos hidrológicos, afectando negativamente la capacidad de infiltración y la sostenibilidad hídrica. El objetivo principal es evaluar cómo la cobertura vegetal incide en los procesos de recarga subterránea, a través de una revisión documental sistemática basada en el enfoque cualitativo y la metodología PRISMA. Para ello, se seleccionaron 27 estudios relevantes de la base de datos Scopus, priorizando criterios de pertinencia, actualidad y rigor científico. Los resultados evidencian que una cobertura vegetal densa, en especial con especies nativas, promueve la infiltración del agua, disminuye la escorrentía y favorece la recarga de los acuíferos. Por el contrario, las zonas degradadas o deforestadas experimentan menor capacidad de retención hídrica y mayores pérdidas de agua superficial. En consecuencia, se concluye que la restauración de la cobertura vegetal, mediante estrategias de manejo ecológico, resulta fundamental para mejorar la recarga de acuíferos y garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico en las microcuencas altoandinas. Así, la conservación y recuperación de la vegetación no solo contribuye a la resiliencia de los sistemas hídricos, sino que también representa una estrategia clave para enfrentar los desafíos derivados del cambio de uso del suelo en estos frágiles ecosistemas.

Palabras clave: cobertura vegetal, microcuencas altoandinas, recarga de acuíferos.

Abstract

This research analyzes the impact of vegetation cover on groundwater recharge in high Andean regions, where land-use changes and vegetation decline have modified hydrological processes, negatively affecting infiltration capacity and water sustainability. The main objective is to evaluate how vegetation cover affects groundwater recharge processes through a systematic documentary review based on a qualitative approach and the PRISMA methodology. To this end, 27 relevant studies were selected from the Scopus database, prioritizing criteria of relevance, timeliness, and scientific rigor. The results show that dense vegetation cover, especially with native species, promotes water infiltration, reduces runoff, and favors groundwater recharge. In contrast, degraded or deforested areas experience lower water retention capacity and greater surface water losses. Consequently, it is concluded that restoring vegetation cover through ecological management strategies is essential to improve aquifer recharge and ensure the sustainability of water resources in high Andean micro-watersheds. Thus, the conservation and restoration of vegetation not only contributes to the resilience of water systems but also represents a key strategy for addressing the challenges arising from land-use change in these fragile ecosystems.

Keywords: vegetation cover, high Andean micro-watersheds, aquifer recharge.

Introducción

En las zonas altoandinas del Perú, la disponibilidad de agua subterránea atraviesa una situación crítica debido a las alteraciones del paisaje y, sobre todo, al progresivo deterioro de la cobertura vegetal. Diversos factores, tales como la expansión agrícola sin planificación, el sobrepastoreo y la deforestación, han transformado profundamente los patrones naturales de infiltración y, en consecuencia, han reducido la capacidad de recarga de los acuíferos. Un caso emblemático es la microcuenca Ccasapata Kcucho – Marcaconga – Sangará, en la región Cusco, donde actualmente se ubica la Reserva de Patrimonio Natural (REPANA). Este espacio ha sufrido numerosas intervenciones humanas que han mermado su resiliencia hidrológica y su capacidad de almacenamiento subterráneo. Dichas transformaciones han provocado una disminución de la cobertura vegetal, lo que ha reducido la interceptación y retención hídrica, ha alterado la estructura del suelo y ha incrementado la escorrentía superficial, afectando de manera directa el equilibrio del ciclo hidrológico.

En efecto, estudios recientes evidencian que la pérdida de vegetación impacta negativamente en la conductividad hidráulica del suelo, disminuye la materia orgánica y limita la retención de humedad, lo que reduce significativamente los procesos de recarga de acuíferos (Siddik et al., 2022; Mengistu et al., 2022). Adicionalmente, la presencia de especies vegetales adaptadas a las condiciones altoandinas, así como la densidad y distribución espacial del follaje, desempeñan un papel determinante en la regulación del ingreso de agua al subsuelo (Song et al., 2021; Salem et al., 2023). Sin embargo, pese a estos conocimientos, la mayoría de intervenciones en microcuencas todavía no incorpora prácticas de restauración ecológica integrales ni estrategias de reforestación con especies nativas, lo que agrava las consecuencias de la degradación ambiental.

En este contexto, y considerando la marcada sensibilidad climática de los ecosistemas de montaña, es crucial generar conocimiento situado sobre la relación entre la cobertura vegetal y la recarga de acuíferos. Esta investigación busca contribuir al diseño de estrategias para la gestión sostenible del agua subterránea, en un escenario marcado por incremento de presiones antrópicas y el cambio climático. Además, este trabajo se enmarca en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente el ODS 6 (agua limpia y saneamiento) y el ODS 15 (vida de ecosistemas terrestres), promoviendo un enfoque que integra las dimensiones hidrológicas, ecológicas y sociales.

Partiendo de estas consideraciones, la pregunta central de este estudio es: ¿De qué manera impacta la cobertura vegetal en la recarga de acuíferos? Por ello, el objetivo general consiste en analizar el impacto de la cobertura vegetal sobre los procesos de recarga hídrica subterránea, mediante una revisión documental sistemática orientada a identificar patrones, factores críticos y estrategias de conservación en contextos andinos similares.

Para comprender la recarga de acuíferos en ecosistemas altoandinos resulta imprescindible adoptar una perspectiva interdisciplinaria que articule la dinámica hidrológica del suelo, las características de la vegetación y las interacciones entre el uso del territorio y los factores climáticos. La cobertura vegetal, bajo esta mirada, emerge como un regulador natural clave: facilita la infiltración, reduce la escorrentía y favorece el almacenamiento subterráneo del agua (Castillo et al., 2025). De hecho, las microcuencas de montaña presentan gran sensibilidad ante los cambios en el uso del suelo, por lo que resulta fundamental comprender los componentes ecológicos que inciden en la recarga hídrica para avanzar hacia un manejo sostenible de los recursos (Siddik et al., 2022).

Por otra parte, la cobertura vegetal puede definirse como el conjunto de especies que cubren la superficie terrestre, cuya presencia no solo contribuye a la estabilidad ecológica, sino que es fundamental para la regulación hídrica (Ivanova et al., 2025). Su estructura, densidad y estado de conservación influyen directamente en la capacidad del suelo para retener humedad y permitir la percolación hacia capas subterráneas más profundas (Yifru et al., 2021). Distintos autores coinciden en que la pérdida de vegetación en áreas estratégicas reduce la capacidad de filtración de los suelos, favoreciendo la compactación, la erosión y la pérdida de materia orgánica, lo que disminuye la recarga efectiva de los acuíferos (Khalil et al., 2021).

En este sentido, uno de los conceptos clave del presente estudio es la tasa de recarga, entendida como la cantidad de agua que se incorpora al sistema subterráneo en un periodo determinado. Este valor está condicionado por la textura y topografía del suelo, la evapotranspiración y el tipo de vegetación predominante. Según Mengistu et al. (2022), los ecosistemas con cobertura arbustiva o boscosa bien conservada muestran mayores tasas de infiltración respecto a terrenos alterados por agricultura intensiva o degradados. Asimismo, la profundidad de recarga—que indica hasta qué nivel el agua penetra en el subsuelo—depende en gran medida de las características geológicas del área y es determinante para el tiempo de renovación de los acuíferos.

Además, la calidad del agua recargada es un aspecto esencial en la sostenibilidad de los acuíferos. La presencia de contaminantes originados por actividades agrícolas o la escorrentía urbana puede modificar las propiedades fisicoquímicas del agua infiltrada, comprometiendo su potabilidad y la salud del ecosistema subterráneo (Negese, 2021). Es importante señalar que la geología de la microcuenca también condiciona el

proceso de infiltración: los materiales porosos o fracturados favorecen la recarga, mientras que las capas impermeables la dificultan (Custodio & Llamas, 1996; Freeze & Cherry, 1979; Domenico & Schwartz, 1990). Así, caracterizar el perfil geológico de áreas como la microcuenca Ccasapata Kcucho – Marcaconga, en donde se localiza la REPANA, resulta fundamental para identificar los mecanismos naturales de recarga y promover una gestión eficiente del agua subterránea.

Tampoco debe desestimarse el impacto de la erosión en la capacidad de recarga de los suelos. La pérdida del horizonte superficial, provocada por agua o viento y agravada por la escasez de vegetación, disminuye la porosidad del suelo y restringe la infiltración del agua al subsuelo (Holz et al., 2015; Al Kaysi, 2000). Esto a su vez aumenta la escorrentía, ocasiona pérdida de nutrientes y mayor sedimentación en los cuerpos de agua, lo que repercute directamente en la sostenibilidad hídrica a escala local (Kafando et al., 2022).

En síntesis, el marco teórico que fundamenta esta investigación reconoce que la cobertura vegetal, bajo distintas formas y grados de conservación, incide de manera decisiva sobre los procesos de recarga de acuíferos. Al analizar variables como la tasa y profundidad de infiltración, la calidad del agua, la geología del terreno, el estado de los ecosistemas y el papel de la REPANA, se establece una base conceptual robusta para comprender el funcionamiento hidrológico de la microcuenca Ccasapata Kcucho – Marcaconga. Tal comprensión resulta indispensable para diseñar estrategias de manejo territorial y restauración ecológica que garanticen la seguridad hídrica en las vulnerables zonas altoandinas.

Metodología

Esta investigación adopta un enfoque cualitativo, orientado a lograr una comprensión profunda de la relación entre la cobertura vegetal y los procesos de recarga de acuíferos en ecosistemas altoandinos. Para ello, se empleó un diseño metodológico basado en una revisión sistemática, que permite recopilar, analizar e interpretar de manera crítica los hallazgos relevantes provenientes de estudios previos. Estos trabajos abordan dicha interacción en contextos geográficos y ecológicos semejantes al de la microcuenca Ccasapata Kcucho – Marcaconga, donde se encuentra ubicada la Reserva de Patrimonio Natural (REPANA) en la región Cusco.

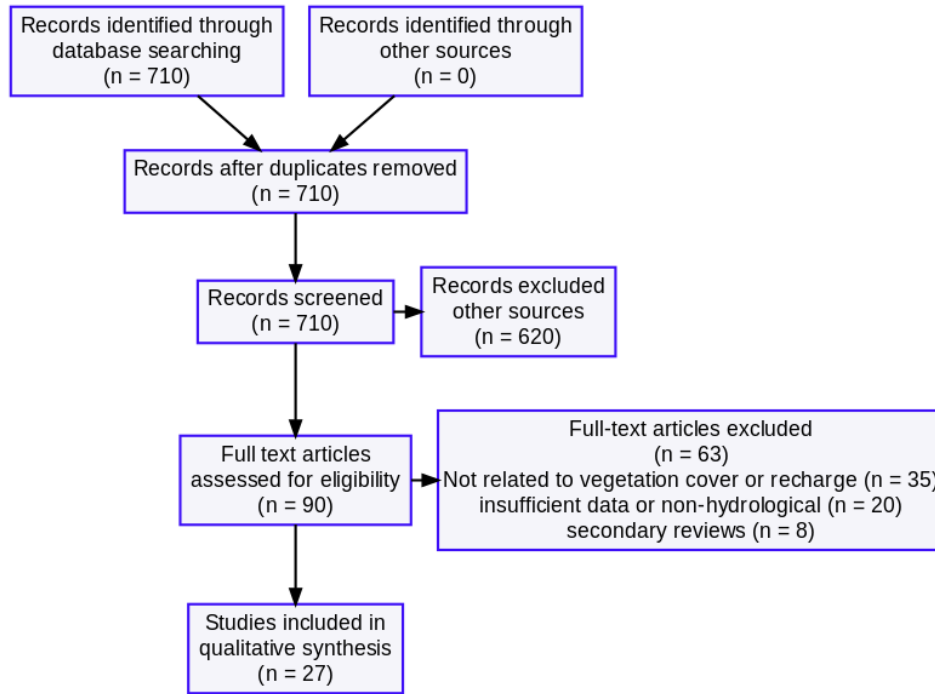
El proceso de revisión se llevó a cabo siguiendo las directrices del protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), que aporta una guía clara para asegurar la transparencia y exhaustividad durante la selección y análisis de literatura científica. Este protocolo fue adaptado a los objetivos específicos del estudio a través de la definición de criterios concretos de inclusión y exclusión, el diseño de una estrategia de búsqueda planificada y la utilización de herramientas para organizar y contrastar los resultados obtenidos.

La búsqueda documental se efectuó entre febrero de 2020 y marzo de 2025, utilizando la base de datos Scopus, reconocida por su fiabilidad académica. Los términos empleados en la búsqueda avanzada fueron: *TITLE-ABS-KEY ("vegetation cover" OR "land use change" OR "land cover change") AND TITLE-ABS-KEY ("groundwater recharge" OR "aquifer recharge" OR "subsurface infiltration") AND TITLE-ABS-KEY ("watershed" OR "catchment" OR "micro-basin" OR "mountain basin") AND PUBYEAR > 2018 AND DOCTYPE (ar) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENVI")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Land Use")) AND (LIMIT-TO (OA, "all"))*

En una primera instancia, se identificaron 736 artículos. No obstante, tras aplicar filtros relacionados con el área temática (ciencias ambientales, hidrología, ecología), la antigüedad (últimos cinco años) y la pertinencia directa con el tema, se seleccionaron finalmente 27 documentos que cumplieran con los criterios establecidos.

Con el propósito de sistematizar la información, se diseñó una matriz de análisis que contempló variables como autor y año, país, tipo de cobertura vegetal estudiada, indicadores hidrológicos analizados, metodología aplicada y principales hallazgos. Esta herramienta facilitó la comparación de patrones comunes, la identificación de divergencias y la generación de categorías emergentes relevantes para la discusión. Adicionalmente, se otorgó especial atención a aquellos estudios que proporcionaban datos sobre tasas de infiltración, calidad del agua recargada, características geológicas y efectos de la erosión, dado que estas variables resultan fundamentales para interpretar el comportamiento de los acuíferos en relación con el paisaje vegetal.

Figura 1
 Diagrama de flujo PRISMA del proceso de selección de estudios



Nota. Contenido generado desde <https://hollyhartman.shinyapps.io/PRISMAFlowDiagram/>

Es importante resaltar que la revisión incluyó también estudios realizados en regiones con condiciones edafoclimáticas similares a los ecosistemas altoandinos peruanos, tales como algunas áreas del continente africano y Asia Central (Doost & Yaseen, 2023; Warku et al., 2021).

Para asegurar la calidad de los estudios seleccionados, se llevó a cabo una evaluación cualitativa del riesgo de sesgo, aplicando los criterios del instrumento CASP para investigaciones observacionales. Esta valoración consideró aspectos esenciales como la claridad en la formulación de objetivos, el diseño metodológico, la validez de los datos, la transparencia en la presentación de resultados y la coherencia en las conclusiones. De los 27 estudios analizados, 21 mostraron un bajo riesgo de sesgo, 5 presentaron un riesgo moderado y solo 1 fue clasificado con alto riesgo. Esta etapa robusteció el análisis y facilitó la identificación con mayor confianza de las tendencias relevantes para la gestión de la REPANA Marcaconga.

Finalmente, la interpretación de los resultados se abordó desde una perspectiva hermenéutica-descriptiva, con el fin de comprender los significados implícitos en los datos cualitativos y generar reflexiones aplicables a la gestión territorial en el contexto peruano. Este enfoque posibilitó no solo reconocer patrones conceptuales, sino también proponer lineamientos para una gestión sostenible del recurso hídrico subterráneo, basada en la restauración y manejo adecuado de la cobertura vegetal.

Resultados de la revisión sistemática

El análisis sistemático de 27 estudios confirma que la cobertura vegetal constituye un factor hidrológico clave para la recarga de acuíferos, al regular la infiltración hacia las zonas saturadas del subsuelo. En el marco del cambio climático, esta función ecológica se vuelve aún más relevante, especialmente en sistemas altoandinos caracterizados por pendientes pronunciadas, patrones pluviométricos estacionales y un estrés hídrico creciente. Variables como la estructura del suelo, la cobertura del terreno y la distribución temporal de las precipitaciones condicionan la efectividad del proceso de recarga. Aunque la mayor parte de la evidencia proviene de regiones como África oriental, Asia meridional y América Latina, la limitada representación de microcuencas altoandinas en la literatura científica revela una brecha importante de conocimiento frente a escenarios de vulnerabilidad climática.

Entre los indicadores hidrológicos más frecuentemente analizados figuran la tasa de recarga, la escorrentía superficial, el almacenamiento subterráneo y la calidad del agua infiltrada. Las metodologías utilizadas con mayor recurrencia incluyen modelos hidrológicos como SWAT, análisis espaciales mediante sistemas de información geográfica (SIG) y simulaciones ecohidrológicas. Esta variedad metodológica permitió identificar cómo variables tales como la densidad de vegetación, el tipo de cobertura y el estado de conservación influyen en la capacidad de infiltración del suelo. En particular, se constató que los suelos franco-arenosos y limosos con buena estructura presentan mayores tasas de infiltración, sobre todo cuando están cubiertos por vegetación forestal o sistemas agroforestales densos. Por el contrario, los suelos compactados o erosionados —a menudo asociados a pastizales degradados o zonas de agricultura intensiva— mostraron una reducción significativa en la infiltración y un incremento en la escorrentía superficial.

Los resultados destacan que la pérdida de cobertura vegetal, especialmente en áreas con pendientes pronunciadas, disminuye la recarga efectiva. Por ejemplo, algunos estudios reportan reducciones de hasta un 45 % en la recarga en zonas deforestadas (Ware et al., 2024) y aumentos en la escorrentía superiores al 35 %. En contraparte, la reforestación con especies nativas o la implementación de sistemas agroforestales ha demostrado mejorar la infiltración en más del 25 %. De igual manera, prácticas agrícolas intensivas y la expansión urbana contribuyen de manera significativa a la impermeabilización del suelo, reduciendo la capacidad natural de recarga hasta en un 30 %, dependiendo de las condiciones hidrológicas y geomorfológicas locales.

Con base en el análisis de los estudios seleccionados, se elaboró la siguiente matriz comparativa que sintetiza los principales hallazgos relacionados con la relación entre cobertura vegetal y recarga de acuíferos:

Tabla 1
Matriz de análisis de estudios sobre cobertura vegetal y recarga de acuíferos

Autor y año	Indicadores Hidrológicos	Metodología Aplicada	Conclusión Destacada
Anand et al. (2025)	NDVI, LST, SAVI	Post-clasificación en ArcMap	Reducción del 17 % de vegetación en áreas periurbanas, sin conexión con recarga.
Agbelade (2025)	NDVI, LST	Cálculo NDVI	Cobertura urbana <30 % no vinculada a recarga.
Mohammed & Scholz (2024)	Permeabilidad, zonas de recarga	AHP + SIG	Áreas óptimas con >60 % de permeabilidad; vegetación ponderada hasta 0.5.
Blevins et al. (2024)	Balance hídrico	Modelado económico + simulación hidrológica	Recarga >80 mm/año en suelos conservados; reducción de déficit estacional (23 %).
Luo et al. (2024)	Almacenamiento hídrico	Monitoreo ecohidrológico	Vegetación densa retuvo hasta 40 % más agua en sequías.
Kumar et al. (2024)	Componentes del balance hídrico	Calibración SWAT	Cobertura forestal redujo escorrentía 35 % y aumentó recarga 25 %.
Faunt et al. (2024)	Recarga, subsidencia	Modelado de flujo subterráneo	Vegetación natural reduce subsidencia (<5 cm vs. 28 cm en áreas degradadas).
Han et al. (2024)	Escorrentía, recarga artificial	Modelo hidrológico + módulo de infiltración	Infraestructura de recarga incrementó infiltración 30–45 %.
Zarei et al. (2024)	Balance hídrico, escorrentía	SIG espaciotemporal	Pérdida de vegetación redujo balance hídrico hasta 22 %.
Ware et al. (2024)	Respuesta hidrológica	SWAT	Deforestación aumentó escorrentía 45 % y redujo recarga 30 %.
Feng et al. (2024)	Depleción del acuífero	Simulación de riego	Riego eficiente disminuyó presión sobre acuífero en 37 %.

Arsiso & Mengistu (2023)	Escorrentía, abastecimiento	Simulación hidrológica	Sabanas incrementaron retención en embalses hasta 15 % en temporada seca.
Kambombe et al. (2023)	Régimen de flujo	Impacto + series temporales	Caudal base disminuyó 26 % por degradación vegetal.
Segura-Millán & Pérez (2023)	Conservación hídrica	Evaluación de servicios ecosistémicos	PSE conservó 12,000 ha con aumento de cobertura vegetal del 19 %.
Andualem et al. (2023)	NDVI, infiltración	Sensores remotos	Infiltración aumentó 34 % tras manejo integral de microcuencas.
Mengistu et al. (2022)	Recarga, escorrentía	SWAT + GIS	Deforestación elevó escorrentía 39 %, redujo recarga 28 %.
Ashraf et al. (2022)	Recarga, escorrentía base	Modelo uso del suelo – clima	Agricultura intensiva redujo recarga 30 %.
Abraham et al. (2022)	Sensibilidad de recarga	Hidrología con énfasis en humedales	Humedales aumentaron infiltración hasta 120 mm/año.
Rivas-Tabares et al. (2022)	Dinámica hidrológica	Mapeo participativo	Comunidad priorizó zonas de alta recarga, sin datos cuantitativos.
Bremer et al. (2021)	Áreas prioritarias de recarga	Planificación espacial	Se identificaron zonas con recarga >300 mm/año bajo bosque nativo.
Oke & Alowo (2021)	Sostenibilidad del acuífero	Modelado predictivo	Acuífero proyectado a agotarse en 25 años sin cobertura arbórea.
Afzal et al. (2021)	Disponibilidad de agua	Escenarios climáticos	Pérdida de vegetación podría reducir recarga 15–30 % (2050–2080).
Barua et al. (2021)	Recarga	Modelado + trazadores	Cobertura boscosa mantuvo recarga >120 mm/año; deforestación bajó a <80 mm/año.
Cristiano et al. (2020)	Escorrentía urbana	Modelo ecohidrológico urbano	Vegetación urbana redujo escorrentía 35 % e incrementó infiltración 18 %.
Dibaba et al. (2020)	Respuesta de cuenca	SWAT + cambio de uso del suelo	Escorrentía aumentó 41 %; infiltración cayó 32 % por deforestación.
Larbi et al. (2020)	Balance hídrico	Simulación de cambio de cobertura	Pérdida vegetal redujo balance hídrico en 25–40 %.

Análisis de resultados

El análisis de 27 estudios revela una relación directa y significativa entre la cobertura vegetal y la recarga de acuíferos. La pérdida de vegetación se asocia con incrementos en la escorrentía superficial que oscilan entre el 30 % y 45 %, mientras que la restauración puede aumentar la recarga hasta en un 35 %. Se registran tasas de infiltración superiores a los 100 mm/año en suelos forestales, comparado con menos de 60 mm/año en zonas degradadas. Las coberturas vegetales con estructuras complejas, como los bosques nativos y los sistemas agroforestales, favorecen una percolación profunda, en contraste con los paisajes deteriorados. En la microcuenca Ccasapata Kcucho – Marcaconga, dentro de la REPANA, estas dinámicas se reflejan claramente: la reforestación con especies nativas ha contribuido a estabilizar el balance hídrico local. Pese a que modelos hidrológicos como SWAT y herramientas de teledetección como el NDVI han permitido identificar zonas críticas de recarga, aún persiste una brecha importante en la integración de factores socioculturales, limitando la aplicación de enfoques holísticos para la gestión hídrica en microcuencas altoandinas.

Discusión e implicancias locales

Los estudios revisados coinciden en que coberturas vegetales densas, como bosques nativos y agroforestales, impulsan la recarga de acuíferos al favorecer la infiltración y reducir la escorrentía superficial (Kumar et al., 2024; Luo et al., 2024; Ware et al., 2024). Por el contrario, la degradación vegetal y el uso intensivo

del suelo incrementan la escorrentía hasta en un 45 % y disminuyen la recarga efectiva en más del 30 % (Mengistu et al., 2022; Ashraf et al., 2022; Dibaba et al., 2020). Herramientas como el modelo SWAT, los sistemas de información geográfica y el análisis del NDVI han probado ser útiles para evaluar zonas críticas de recarga (Zarei et al., 2024; Cristiano et al., 2020). Igualmente, se destaca la importancia de combinar enfoques ecohidrológicos con la participación comunitaria para promover una gestión hídrica sostenible (Segura-Millán & Pérez-Verdín, 2023; Rivas-Tabares et al., 2022). Estos hallazgos resultan especialmente relevantes para microcuencas altoandinas como Ccasapata – Marcaconga, cuya estructura ecológica y geomorfológica coincide con áreas estudiadas en África oriental y América Latina.

Situada en la región Cusco a más de 3,800 metros sobre el nivel del mar, la microcuenca Ccasapata Kcucho – Marcaconga presenta suelos franco-arenosos, pendientes superiores al 15 % y una cobertura vegetal dominada por pastizales y cultivos de subsistencia. Estas características son semejantes a otras zonas de montaña en América Latina y África oriental, donde se ha demostrado una relación estrecha entre la degradación de la cobertura vegetal y la reducción de la recarga (Dibaba et al., 2020; Mengistu et al., 2022). En la REPANA, se ha observado una mejora reciente en los procesos de infiltración y estabilidad hídrica, atribuida a las acciones de restauración vegetal, lo que subraya la relevancia de promover estrategias basadas en la reforestación con especies nativas, el manejo sostenible del suelo y el monitoreo con herramientas como SIG y NDVI (Cristiano et al., 2020; Segura-Millán & Pérez-Verdín, 2023).

Limitaciones del estudio

A pesar de que esta revisión sistemática aporta evidencia valiosa acerca de la relación entre cobertura vegetal y recarga de acuíferos, presenta ciertas limitaciones. En primer lugar, la mayoría de los estudios consultados provienen principalmente de África y Asia, con escasa representación de ecosistemas altoandinos similares al caso peruano, lo que restringe la aplicación directa y generalizable de los resultados. En segundo lugar, existe una importante heterogeneidad metodológica entre los trabajos, particularmente en cuanto a los modelos hidrológicos utilizados y la forma de medir la recarga, lo que complica la comparación cuantitativa precisa entre estudios. Finalmente, no se identificaron investigaciones locales con datos primarios sobre la microcuenca Ccasapata Kcucho – Marcaconga, lo cual limita la posibilidad de validar o contrastar directamente los hallazgos globales con evidencia empírica específica del área de interés.

Conclusiones

La revisión sistemática confirma que la cobertura vegetal desempeña un papel fundamental en la recarga de acuíferos en ecosistemas altoandinos, como es el caso de la microcuenca Ccasapata Kcucho – Marcaconga. Las coberturas densas y bien conservadas, tales como bosques nativos y sistemas agroforestales, mejoran de manera significativa la infiltración del agua y reducen la escorrentía superficial. Por el contrario, la degradación de la vegetación, vinculada a prácticas como la agricultura intensiva y el sobrepastoreo, puede disminuir la recarga hasta en un 45 %. Sin embargo, las intervenciones orientadas a la restauración vegetal han demostrado incrementos en la infiltración superiores al 35 %.

A pesar de la aplicación frecuente de modelos hidrológicos como SWAT, el uso de sensores remotos y análisis mediante sistemas de información geográfica, aún existe una carencia importante en la integración de variables sociales y saberes tradicionales en estas investigaciones. En este sentido, se recomienda impulsar enfoques interdisciplinarios que integren la restauración ecológica, el manejo sostenible del suelo y la participación activa de las comunidades locales, como elementos clave dentro de estrategias integradas para la gestión sostenible del recurso hídrico en cuencas vulnerables.

Referencias

- Abraham, T., Muluneh, A., Girma, R., Hartmann, A., & Tekleab, S. (2022). Quantifying sensitivity of groundwater recharge to land use and land cover changes by improving model performance on the wetland dominated Tikur Wuha Watershed, Ethiopia. *Water Cycle*, 3, 112-125. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2022.08.002>
- Afzal, M., Vavlas, N., & Ragab, R. (2021). Modelling study to quantify the impact of future climate and land use changes on water resources availability at catchment scale. *Journal of Water and Climate Change*, 12(2), 339–361. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.117>
- Agbelade, A. D. (2025). Analyzing the influence of urban vegetation cover on land surface temperature in Southwestern Nigeria. *Discov Environ*, 3, 10. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00186-x>
- Al Kaysi, M. (2000). Soil erosion: An agricultural production challenge. En *Integrated Crop Management Encyclopedia*. Iowa State University. <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/f3279abb-1439-4c44-a5eb-454018e0db68>

- Anand, S., Kumar, H., Kumar, P., Kumar, M., & Kumar, S. (2025). Analyzing landscape changes and their relationship with land surface temperature and vegetation indices using remote sensing and AI techniques. *Geoscience Letters*, 12(1), 7. <https://doi.org/10.1186/s40562-024-00372-4>
- Anduaem, Z. A., Meshesha, D. T., & Hassen, E. E. (2023). Impacts of watershed management on land use/cover changes and landscape greenness in Yezat Watershed, North West, Ethiopia. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 64377–64398. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26798-5>
- Arsiso, B. K., & Mengistu Tsidu, G. (2023). Land use and land cover change modulates hydrological flows and water supply to Gaborone Dam Catchment, Botswana. *Water*, 15(19), 3364. <https://doi.org/10.3390/w15193364>
- Ashraf, S., Ali, M., Shrestha, S., Hafeez, M. A., Moiz, A., & Sheikh, Z. A. (2022). Impacts of climate and land-use change on groundwater recharge in the semi-arid lower Ravi River basin, Pakistan. *Groundwater for Sustainable Development*, 17, 100743. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100743>
- Barua, S., Cartwright, I., Dresel, P. E., & Daly, E. (2021). Using multiple methods to investigate the effects of land-use changes on groundwater recharge in a semi-arid area. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(1), 89–104. <https://doi.org/10.5194/hess-25-89-2021>
- Blevins, S., Hansen, K. M., Paige, G. B., MacKinnon, A., & Bastian, C. T. (2024). Economic evaluation of water management alternatives in the Upper Green River Basin of Wyoming. *Water*, 16(12), 1685. <https://doi.org/10.3390/w16121685>
- Bremer, L. L., DeMaagd, N., Wada, C. A., & Burnett, K. M. (2021). Priority watershed management areas for groundwater recharge and drinking water protection: A case study from Hawai'i Island. *Journal of Environmental Management*, 286, 111622. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111622>
- Castillo, P., Castellón, J., Caballer, C., & Rodríguez, S. (2025). Análisis de la influencia de la cobertura vegetal en la producción de sedimentos en laderas. *I+D Tecnológico*, 21(1). <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/4130>
- Cristiano, E., Deidda, R., & Viola, F. (2020). EHSMu: A new ecohydrological streamflow model to estimate runoff in urban areas. *Water Resources Management*, 34, 4865–4879. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02696-0>
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1996). *Hidrología subterránea* (Tomo I y II). Ediciones Omega.
- Dibaba, W. T., Demissie, T. A., & Miegel, K. (2020). Watershed hydrological response to combined land use/land cover and climate change in highland Ethiopia: Finchaa Catchment. *Water*, 12(6), 1801. <https://doi.org/10.3390/w12061801>
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1990). *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley & Sons.
- Doost, Z. H., & Yaseen, Z. M. (2023). The impact of land use and land cover on groundwater fluctuations using remote sensing and geographical information system: Representative case study in Afghanistan. *Environment, Development and Sustainability*, 27, 9515–9538. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03111-2>
- Faunt, C. C., Traum, J. A., Boyce, S. E., Seymour, W. A., Jachens, E. R., Brandt, J. T., Sneed, M., Bond, S., & Marcelli, M. F. (2024). Groundwater sustainability and land subsidence in California's Central Valley. *Water*, 16(8), 1189. <https://doi.org/10.3390/w16081189>
- Feng, G., Jin, W., Ouyang, Y., & Huang, Y. (2024). The role of changing land use and irrigation scheduling in groundwater depletion mitigation in a humid region. *Agricultural Water Management*, 291, 108606. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108606>
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.
- Han, Q., Qi, T., & Khanaum, M. M. (2024). Evaluation of the offsets of artificial recharge on the extra run-off induced by urbanization and extreme storms based on an enhanced semi-distributed hydrologic model with an infiltration basin module. *Water*, 16(7), 1032. <https://doi.org/10.3390/w16071032>
- Holz, D. J., Williard, K. W. J., Edwards, P. J., & Schoonover, J. E. (2015). Soil erosion in humid regions: A review. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 154, 48–59. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2015.03187.x>
- Ivanova, Y., Lugo, V. D. H., & Herrera, M. F. P. (2025). Incidencia del cambio de coberturas vegetales sobre la capacidad de regulación hídrica en la Cuenca del Río Cuja, Colombia. *Revista EIA*, 22(43), 4327. <https://revistabme.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/1793>
- Kafando, M. B., Koita, M., Zouré, C. O., Yonaba, R., & Niang, D. (2022). Quantification of soil deep drainage and aquifer recharge dynamics according to land use and land cover in the basement zone of Burkina Faso in West Africa. *Sustainability*, 14(22), 14855. <https://doi.org/10.3390/su142214855>

- Kambombe, O., Ngongondo, C., Monjerezi, M., & others. (2023). Investigating human-induced threat to hydrological regime of Lake Chilwa Basin, Malawi. *Applied Water Science*, 13, 161. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01965-8>
- Khalil, M. M., Tokunaga, T., Heggy, E., & Abotalib, A. (2021). Groundwater mixing in shallow aquifers stressed by land cover/land use changes under hyper-arid conditions. *Journal of Hydrology*, 598, 126428. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126428>
- Kumar, S. B., Mishra, A., & Dash, S. S. (2024). Response of climate change and land use land cover change on catchment-scale water balance components: A multi-site calibration approach. *Journal of Water and Climate Change*, 15(4), 1750–1771. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.581>
- Larbi, I., Obuobie, E., Verhoef, A., Julich, S., Feger, K. H., Bossa, A. Y., & Macdonald, D. (2020). Water balance components estimation under scenarios of land cover change in the Veia catchment, West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 65(13), 2196–2209. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1802467>
- Luo, S., Tetzlaff, D., Smith, A., & Soulsby, C. (2024). Assessing impacts of alternative land use strategies on water partitioning, storage and ages in drought-sensitive lowland catchments using tracer-aided ecohydrological modelling. *Hydrological Processes*, 38(4), e15126. <https://doi.org/10.1002/hyp.15126>
- Mengistu, T. D., Chung, I.-M., Kim, M.-G., Chang, S. W., & Lee, J. E. (2022). Impacts and implications of land use land cover dynamics on groundwater recharge and surface runoff in East African Watershed. *Water*, 14(13), 2068. <https://doi.org/10.3390/w14132068>
- Mensah, J. K., Ofose, E. A., Yidana, S. M., Akpoti, K., & Kobo-bah, A. T. (2022). Integrated modeling of hydrological processes and groundwater recharge based on land use land cover, and climate changes: A systematic review. *Environmental Advances*, 8, 100240. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100240>
- Mohammed, R., & Scholz, M. (2024). Groundwater potential zone delineation through analytical hierarchy process: Diyala River Basin, Iraq. *Water*, 16(20), 2891. <https://doi.org/10.3390/w16202891>
- Negese, A. (2021). Impacts of land use and land cover change on soil erosion and hydrological responses in Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2021, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2021/5558816>
- Oke, S. A., & Alowo, R. (2021). Groundwater of the Modder River Catchment of South Africa: A sustainability prediction. *Water*, 13(7), 936. <https://doi.org/10.3390/w13070936>
- Rivas-Tabares, D., Tarquis, A. M., De Miguel, Á., Gobin, A., & Willaarts, B. (2022). Enhancing LULC scenarios impact assessment in hydrological dynamics using participatory mapping protocols in semiarid regions. *Science of the Total Environment*, 803, 149906. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149906>
- Salem, A., Abdaljaleel, Y., Dezsó, J., & Lóczy, D. (2023). Integrated assessment of the impact of land use changes on groundwater recharge and groundwater level in the Drava floodplain, Hungary. *Scientific Reports*, 13, 10457. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37782-2>
- Segura-Millán, K., & Pérez-Verdín, G. (2023). The effect of payments for ecosystem services on forest cover, land use, and capacity building in northern Mexico. *Trees, Forests and People*, 11, 100387. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100387>
- Shuler, C., Brewington, L., & El-Kadi, A. I. (2021). A participatory approach to assessing groundwater recharge under future climate and land-cover scenarios, Tutuila, American Samoa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 34, 100796. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100796>
- Siddik, S., Tulip, S. S., Rahman, A., Islam, N., Haghighi, A. T., & Touhidul, S. (2022). Impact of vegetation cover on aquifer recharge. *Journal of Environmental Management*, 315, 115096. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115096>
- Song, G., Huang, J., Ning, B., Wang, J., & Zeng, L. (2021). Effects of groundwater level on vegetation in the arid area of western China. *China Geology*, 4(3), 527–535. <https://doi.org/10.31035/cg2021027>
- Ware, H. H., Chang, S. W., Lee, J. E., & Chung, I.-M. (2024). Assessment of hydrological responses to land use and land cover changes in forest-dominated watershed using SWAT model. *Water*, 16(4), 528. <https://doi.org/10.3390/w16040528>
- Warku, F., Korme, T., & Nedow, D. (2021). Impacts of land use/cover change and climate variability on groundwater recharge for Upper Gibe Watershed, Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 8(2), 45. <https://doi.org/10.1007/s40899-021-00560-y>
- Yifru, B., Chung, M., Kim, M., & Chang, S. (2021). Assessing the effect of land use/land cover and climate change on water yield and groundwater recharge in East African Rift Valley using integrated model. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100918. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100918>

- Zarei, M., Ghazavi, R., Abdollahi, K., Ranzi, R., Teegavarapu, R. S. V., & Barontini, S. (2024). Spatiotemporal variation of water balance components in Mashhad catchment, Iran: Investigating the impact of changes in climatic data and land use. *Water Supply*, 24(2), 397–415. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.018>
- Zhou, Z., & Yaseen, Z. M. (2023). Evaluating the influence of land cover on groundwater fluctuations using RS and GIS: Case study in Afghanistan. *Environment, Development and Sustainability*, 27, 9515–9538. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03111-2>
- Zhou, Z. H., & Zeng, L. (2021). Groundwater interactions in land cover dynamics under arid conditions. *China Geology*, 4(3), 544–555. <https://doi.org/10.31035/cg2021032>