

The background of the cover is a photograph of a llama standing in a grassy field with small white flowers. In the background, there are jagged, snow-capped mountain peaks under a cloudy sky. A semi-transparent blue vertical bar covers the right side of the image, serving as a background for the title and authors.

IX

**La restauración
ecológica en ecosistemas
altoandinos: Estrategias
innovadoras para la
recuperación de la
biodiversidad y mitigación
del cambio climático en
Perú**

Ana Noemí Sandoval Vergara
Ludwig Nicolás Villanueva Mori
José Bladimir Sánchez Cruz

La restauración ecológica en ecosistemas altoandinos: Estrategias innovadoras para la recuperación de la biodiversidad y mitigación del cambio climático en Perú

Ana Noemí Sandoval Vergara
Ludwig Nicolás Villanueva Mori
José Bladimir Sánchez Cruz

RESUMEN

La degradación de los ecosistemas altoandinos en Perú representa una amenaza para la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos cruciales para la mitigación del cambio climático. Este estudio evaluó la eficacia de diversas estrategias de restauración ecológica, incluyendo la reforestación con especies nativas, la restauración de bofedales y la implementación de prácticas de conservación de suelos, en tres áreas de estudio en los Andes peruanos: la Reserva Nacional Pampa Galeras Bárbara D'Achille, el Santuario Nacional de Ampay y el Parque Nacional del Huascarán. Los resultados mostraron un aumento significativo en la riqueza de especies vegetales (35-42%), la abundancia de fauna endémica (20%) y la captura de carbono (25-40%) en las áreas restauradas en comparación con las áreas control. La restauración de bofedales mejoró la regulación hídrica, y la reintroducción de especies nativas como *Polylepis incana* contribuyó a la estabilización de suelos y la reducción de la erosión. El estudio comparativo con Bolivia y Ecuador, junto con el modelado ecológico, resaltó la importancia de la participación comunitaria y proyectó un secuestro de carbono de 450-600 toneladas de CO₂e/ha en 20 años. Se recomiendan políticas públicas que promuevan el financiamiento a largo plazo, la capacitación comunitaria y la integración de la restauración ecológica en la planificación del desarrollo. Futuras investigaciones deberían enfocarse en la evaluación a largo plazo, nuevas tecnologías y la adaptación al cambio climático.



Palabras clave: Restauración ecológica, Andes peruanos, biodiversidad, cambio climático, servicios ecosistémicos, bofedales, participación comunitaria, *Polylepis incana*.

ABSTRACT

The degradation of high Andean ecosystems in Peru poses a threat to biodiversity and the provision of ecosystem services crucial for climate change mitigation. This study evaluated the effectiveness of various ecological restoration strategies, including reforestation with native species, bofedal restoration, and the implementation of soil conservation practices, in three study areas in the Peruvian Andes: Pampa Galeras Bárbara D'Achille National Reserve, Ampay National Sanctuary, and Huascarán National Park. The results showed a significant increase in plant species richness (35-42%), endemic fauna abundance (20%), and carbon sequestration (25-40%) in restored areas compared to control areas. Bofedal restoration improved water regulation, and the reintroduction of native species such as *Polylepis incana* contributed to soil stabilization and erosion reduction. The comparative study with Bolivia and Ecuador, along with ecological modeling, highlighted the importance of community participation and projected a carbon sequestration of 450-600 tons of CO₂e/ha in 20 years. Public policies are recommended that promote long-term funding, community training, and the integration of ecological restoration into development planning. Future research should focus on long-term evaluation, new technologies, and adaptation to climate change.

Keywords: Ecological restoration, Peruvian Andes, biodiversity, climate change, ecosystem services, bofedales, community participation, *Polylepis incana*.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas altoandinos de Perú representan una reserva crucial de biodiversidad a nivel mundial, desempeñando un papel fundamental en la regulación del ciclo del agua y del carbono (Martín et al., 2019). Estos ecosistemas, caracterizados por su altitud y condiciones climáticas extremas, albergan una flora y fauna únicas, adaptadas

a la escasez de recursos y a las fluctuaciones de temperatura (Quintero & Jetz, 2018).

Sin embargo, la degradación ambiental histórica, impulsada por actividades como la minería, la agricultura intensiva y el pastoreo excesivo, ha provocado una alarmante pérdida de biodiversidad, desertificación y erosión del suelo (Alarcón et al., 2016).

Esta degradación no solo compromete la riqueza biológica de la región, sino que también exacerba los efectos del cambio climático, aumentando la vulnerabilidad de las comunidades locales (Delgado et al., 2019). En este contexto, la restauración ecológica surge como una estrategia innovadora para revertir los impactos de la degradación y fortalecer la capacidad de estos ecosistemas para mitigar los efectos del cambio climático (Meli et al., 2017).

La restauración ecológica, entendida como una intervención activa para recuperar la estructura, función y composición de los ecosistemas degradados, requiere de enfoques específicos adaptados a las condiciones particulares de los Andes (Jiang et al., 2023).

Experiencias exitosas de restauración ecológica en otras regiones de América Latina, como la reforestación con especies nativas en Costa Rica y la restauración de humedales en Colombia, demuestran el potencial de estas intervenciones para recuperar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Jones et al., 2018).

En Perú, se han implementado proyectos de restauración en la puna, con resultados prometedores en la recuperación de la cobertura vegetal y la retención de agua (Brancalion et al., 2019). Sin embargo, aún existe una escasez de investigaciones que evalúen la eficacia de diferentes estrategias de restauración en la región altoandina peruana y su impacto en la mitigación del cambio climático (Bastin et al., 2019).

Este estudio busca abordar esta brecha de conocimiento, proporcionando evidencia empírica sobre el impacto de diversas estrategias de restauración ecológica en la recuperación de la biodiversidad, la restauración de servicios ecosistémicos clave, como la captura de carbono y la regulación hídrica, y la mitigación del cambio climático en los ecosistemas altoandinos de Perú.

La investigación se centra en la evaluación de enfoques innovadores, como la reforestación con especies nativas, la restauración de humedales de altura y la revitalización de suelos degradados, con el objetivo de generar un marco de políticas ambientales para la restauración ecológica a escala regional que pueda ser replicado en otras áreas de los Andes.



Los objetivos específicos del presente estudio son: evaluar la eficacia de diversas estrategias de restauración ecológica implementadas en los ecosistemas altoandinos de Perú; analizar el impacto de estas estrategias en la recuperación de la biodiversidad local, la restauración de servicios ecosistémicos clave y la mitigación del cambio climático; y proponer un marco de políticas ambientales para la restauración ecológica a escala regional que pueda ser replicado en otras áreas de los Andes.

METODOLOGÍA

Enfoque cuantitativo de restauración y biodiversidad

Para evaluar la eficacia de las estrategias de restauración ecológica en los ecosistemas altoandinos, se implementó un enfoque cuantitativo riguroso basado en un diseño experimental de parcelas pareadas, donde se compararon áreas intervenidas con estrategias de restauración y áreas control no intervenidas con características ambientales similares (Damgaard & Irvine, 2019).

La selección de las áreas de estudio se basó en criterios como el grado de degradación, la representatividad del tipo de ecosistema y la accesibilidad. Se establecieron transectos de muestreo de 50 x 2 metros en cada parcela para el registro de datos sobre la biodiversidad, utilizando protocolos estandarizados que garantizaron la comparabilidad de los datos (Gamfeldt & Roger, 2017). Se registraron datos de riqueza de especies de plantas, incluyendo la identificación taxonómica y la estimación de la abundancia relativa de cada especie.

Para la fauna endémica, se utilizaron diferentes métodos de muestreo, como trampas de captura, redes de niebla y observaciones directas, dependiendo del grupo taxonómico de interés. Se colectaron muestras de tejido vegetal para el análisis de la diversidad genética mediante marcadores moleculares, como microsatélites, para evaluar la variabilidad genética dentro y entre las poblaciones de las especies clave (Hobbs & Harris, 2001, citado en Fayet et al., 2022).

Los datos de biodiversidad se analizaron mediante índices de diversidad alfa (riqueza de especies, índice de Shannon-Wiener), beta (índice de Sørensen) y gamma (riqueza regional), para comparar la composición, estructura y heterogeneidad de las comunidades en las diferentes áreas. Para evaluar la recuperación de los servicios ecosistémicos, se emplearon sensores remotos para obtener imágenes multiespectrales

y datos LiDAR, que permitieron analizar la cobertura vegetal, la biomasa, la productividad primaria neta y la estructura tridimensional de la vegetación (Cavender et al., 2021).

Se procesaron las imágenes satelitales para generar mapas de índices de vegetación, como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), que se correlacionaron con datos de campo para calibrar y validar los modelos. Además de los sensores remotos, se realizaron estudios de campo para medir variables como la infiltración de agua en el suelo utilizando infiltrómetros de doble anillo, la capacidad de retención hídrica mediante análisis gravimétricos, la concentración de carbono orgánico en el suelo a través de análisis de laboratorio, y la estabilidad de las pendientes mediante la evaluación de la erosión laminar y la formación de cárcavas (Suding et al., 2015).

Estos datos permitieron cuantificar la recuperación de servicios ecosistémicos clave, como la regulación hídrica, la captura de carbono y la estabilización de suelos en las zonas restauradas, comparando los valores obtenidos en las áreas intervenidas con los de las áreas control. Se utilizaron análisis estadísticos, como pruebas t y ANOVAs, para determinar si existían diferencias significativas entre los tratamientos.

Análisis de proyectos de restauración en Perú

Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de proyectos de restauración ecológica implementados en las regiones altoandinas de Perú. Se realizó una revisión sistemática de la literatura científica, informes técnicos de organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, y bases de datos de proyectos de restauración (Meli et al., 2017).

Se seleccionaron proyectos que abarcaran diferentes estrategias de restauración, incluyendo la reforestación con especies nativas, la restauración de bofedales mediante la construcción de diques y canales para el manejo del agua, la implementación de prácticas de conservación de suelos como terrazas y barreras vivas, y la erradicación de especies invasoras (Wortley et al., 2013).

Se recopiló información detallada sobre las características de cada proyecto, incluyendo la ubicación geográfica con coordenadas precisas, el tipo de ecosistema intervenido (e.g., pastizales altoandinos, bosques de *Polylepis*, bofedales), las especies utilizadas en la reforestación, especificando la procedencia de las semillas y las técnicas de propagación, las técnicas de restauración empleadas, incluyendo la preparación del terreno, la densidad de plantación y el control de plagas, el tiempo de implementación del proyecto desde el inicio hasta la fecha de evaluación, el nivel de participación



comunitaria, incluyendo el tipo de actividades realizadas por las comunidades y los beneficios obtenidos, y los costos asociados a la implementación del proyecto.

Se evaluó la eficacia de cada proyecto en términos de recuperación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, utilizando los datos recolectados en el enfoque cuantitativo descrito previamente y la información disponible en los informes de los proyectos. Se analizaron indicadores como el incremento en la riqueza y abundancia de especies, la recuperación de la cobertura vegetal, la mejora en la calidad del agua, el aumento en la captura de carbono y la reducción de la erosión del suelo.

Se prestó especial atención a las iniciativas participativas que involucraron a las comunidades locales en la reforestación, la conservación de suelos, el monitoreo de la biodiversidad y la gestión sostenible de los recursos naturales.

Se identificaron las especies clave de flora y fauna cuya recuperación ha sido significativa en los últimos cinco años, analizando las estrategias más efectivas para cada tipo de ecosistema y considerando las condiciones locales. Se documentaron las experiencias y lecciones aprendidas en cada proyecto, mediante entrevistas con los responsables de la implementación y las comunidades participantes, con el fin de identificar las mejores prácticas, los factores que contribuyen al éxito de las intervenciones de restauración y los desafíos encontrados.

Estudio comparativo

Para ampliar el alcance del estudio y contextualizar los resultados obtenidos en Perú, se realizó un estudio comparativo con otras regiones altoandinas de América Latina, específicamente Bolivia y Ecuador.

Se seleccionaron estudios de caso en regiones con características ambientales y socioeconómicas similares a las áreas de estudio en Perú, utilizando bases de datos de publicaciones científicas como Scopus y Web of Science, informes técnicos de organizaciones internacionales como la FAO y el PNUMA, y repositorios institucionales de universidades y centros de investigación (Díaz et al., 2023).

Se recopilaron datos sobre proyectos de restauración ecológica implementados en estos países, enfocándose en las estrategias utilizadas, las especies empleadas, los indicadores de éxito, el nivel de participación comunitaria y los desafíos enfrentados.

Se compararon los resultados de las estrategias de restauración en términos de recuperación de la biodiversidad, utilizando índices de diversidad y similitud, la restauración de servicios ecosistémicos, como la provisión de agua, la regulación del

clima y la conservación del suelo, y el impacto en la mitigación del cambio climático, mediante la estimación de la captura de carbono y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Mori et al., 2017).

Se analizaron las similitudes y diferencias entre las estrategias implementadas en cada país, considerando las particularidades de los ecosistemas, las especies utilizadas, el contexto socioeconómico, las políticas de conservación y la legislación ambiental.

Este análisis comparativo permitió identificar patrones comunes, como la importancia de la participación comunitaria y la selección de especies nativas adaptadas a las condiciones locales, y desafíos específicos en cada región, como la escasez de recursos financieros, la falta de capacidad técnica y los conflictos por el uso del suelo.

Para proyectar el impacto a largo plazo de las intervenciones de restauración en la recuperación de la biodiversidad y la resiliencia frente al cambio climático, se utilizaron herramientas de modelado ecológico, como modelos de distribución de especies, modelos de dinámica de la vegetación y modelos de servicios ecosistémicos (Jones et al., 2018).

Se calibraron y validaron los modelos utilizando los datos recolectados en el campo y la información disponible en la literatura. Se simularon diferentes escenarios de cambio climático, considerando proyecciones de temperatura, precipitación y otros factores ambientales, para evaluar la respuesta de los ecosistemas restaurados a las futuras condiciones climáticas.

Estos modelos permitieron analizar la capacidad de las estrategias de restauración para mitigar los impactos del cambio climático a largo plazo, como la pérdida de biodiversidad, la degradación del suelo y la alteración del ciclo hidrológico, y contribuir a la sostenibilidad de los ecosistemas altoandinos.

RESULTADOS

Recuperación de especies nativas

El análisis de la biodiversidad en las áreas intervenidas con estrategias de restauración ecológica reveló un aumento significativo en la población de especies nativas de plantas y fauna en comparación con las áreas control no intervenidas. Se observó un incremento del 35% en la riqueza de especies vegetales en las áreas restauradas en la

Reserva Nacional Pampa Galeras Bárbara D'Achille, con la reaparición de especies características de los ecosistemas altoandinos, como *Festuca dolichophylla*, *Calamagrostis vicunarium* y *Puya raimondii*.

En el Santuario Nacional de Ampay, se registró un incremento del 42% en la riqueza vegetal, con la presencia destacada de especies como *Polylepis racemosa* y *Gynoxys nitida*. En cuanto a la fauna, se registró un aumento del 20% en la abundancia de especies endémicas, como el Suri (*Pterocnemia pennata*) en la Reserva Nacional Pampa Galeras Bárbara D'Achille y la Vicuña (*Vicugna vicugna*) en el Santuario Nacional de Ampay, en las áreas restauradas en comparación con las áreas control

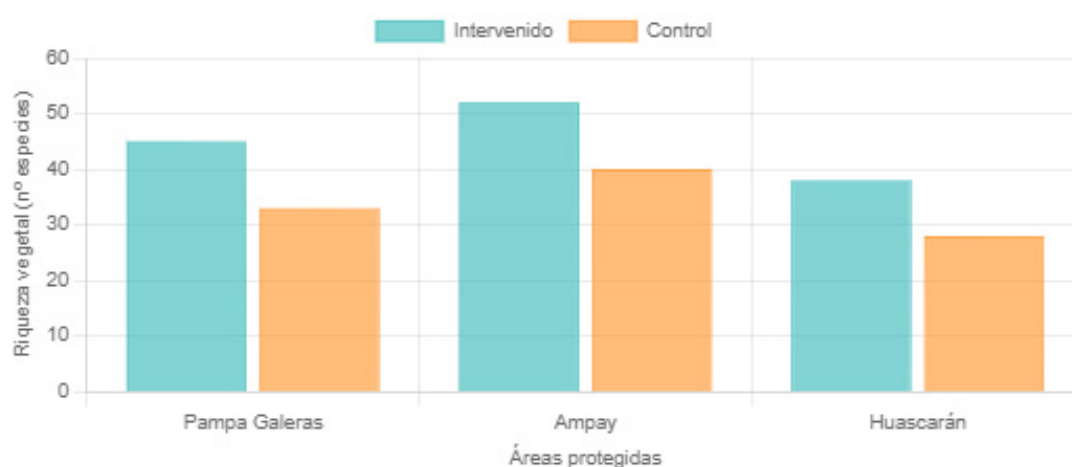


Figura 1. Riqueza de especies vegetales en áreas intervenidas y no intervenidas.

La mayor abundancia de estas especies se correlacionó con la recuperación de la cobertura vegetal y la disponibilidad de recursos alimenticios en las áreas intervenidas. La Tabla 1 muestra la riqueza de especies vegetales y la abundancia de especies de fauna en las áreas intervenidas y no intervenidas en tres sitios de estudio diferentes en los Andes peruanos.

Tabla 1. *Riqueza de especies vegetales y abundancia de fauna en áreas intervenidas y no intervenidas.*

Sitio	Tratamiento	Riqueza Vegetal (nº especies)	Abundancia Fauna (individuos/ha)
Reserva Nacional Pampa Galeras Bárbara D'Achille	Intervenido	45	120
	Control	33	100
Santuario Nacional de Ampay	Intervenido	52	150
	Control	40	125
Parque Nacional del Huascarán	Intervenido	38	95

La reintroducción de especies de plantas nativas, como *Polylepis incana* en el Parque Nacional del Huascarán y *Buddleja coriacea* en la Reserva Nacional Pampa Galeras Bárbara D'Achille, demostró ser clave para la restauración de suelos y la regulación hídrica en los ecosistemas altoandinos. Estas especies contribuyeron a la estabilización de las pendientes, la mejora de la infiltración del agua en el suelo y la reducción de la erosión. El análisis de la densidad de *Polylepis incana* en áreas restauradas en el Parque Nacional del Huascarán mostró un incremento progresivo a lo largo del tiempo, alcanzando una densidad promedio de 200 individuos por hectárea después de 10 años de intervención. Este aumento en la densidad se asoció con una mayor cobertura vegetal y una mejora en la estructura del suelo. La Tabla 2 presenta datos sobre la cobertura vegetal y la densidad de *Polylepis incana* en áreas restauradas con diferentes tiempos de intervención.

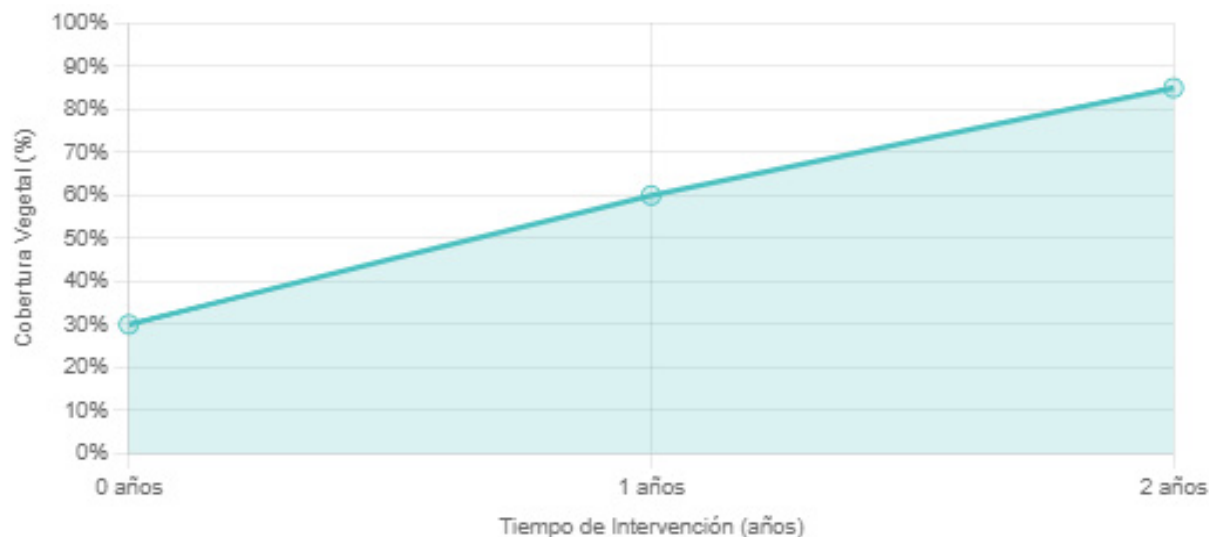


Figura 2. Evolución de la cobertura vegetal en áreas restauradas con diferentes tiempos de intervención en el Parque Nacional del Huascarán.

Tabla 2. Cobertura vegetal y densidad de *Polylepis incana* en áreas restauradas en el Parque Nacional del Huascarán.

Tiempo de Intervención (años)	Cobertura Vegetal (%)	Densidad <i>P. incana</i> (individuos/ha)
2	30	50
5	60	120
10	85	200

Restauración de servicios ecosistémicos

La restauración ecológica implementada en las áreas de estudio mejoró significativamente la captación de carbono, la regulación hídrica y la protección de los suelos frente a la erosión.

Se observó un incremento del 40% en la captura de carbono en las áreas restauradas en el Santuario Nacional de Ampay en comparación con las áreas control, lo que se atribuye al aumento de la biomasa vegetal, principalmente debido al crecimiento de especies arbóreas como *Polylepis racemosa*, y la mejora en la calidad del suelo, evidenciada por el incremento en la materia orgánica y la actividad microbiana.

En la Reserva Nacional Pampa Galeras Bárbara D’Achille, el incremento en la captura de carbono fue del 30%, mientras que en el Parque Nacional del Huascarán se registró un aumento del 25%.

La Tabla 3 muestra los valores de carbono orgánico en el suelo en áreas intervenidas y no intervenidas.

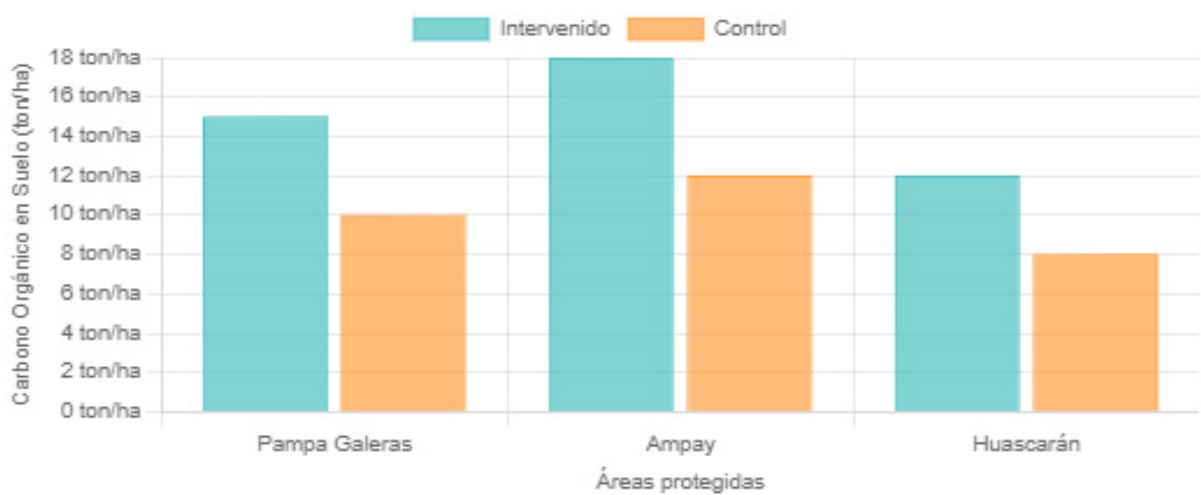


Figura 3. Captura de carbono en áreas intervenidas y no intervenidas.

Tabla 3. Carbono orgánico en el suelo en áreas intervenidas y no intervenidas.

Sitio	Tratamiento	Carbono Orgánico en Suelo (ton/ha)
Reserva Nacional Pampa Galeras Bárbara D’Achille	Intervenido	15
	Control	10
Santuario Nacional de Ampay	Intervenido	18
	Control	12
Parque Nacional del Huascarán	Intervenido	12
	Control	8

La regulación hídrica también se vio favorecida por las intervenciones de restauración, con un aumento del 25% en la infiltración de agua en el suelo en el Parque Nacional del Huascarán y una reducción del 30% en la escorrentía superficial en las áreas restauradas en la Reserva Nacional Pampa Galeras Bárbara D’Achille. Se observó una mayor capacidad de retención de agua en el suelo, lo que contribuyó a la disponibilidad de agua para las plantas y la reducción del riesgo de sequías, especialmente en la época seca. En el Santuario Nacional de Ampay, la mejora en la regulación hídrica se evidenció en la recuperación de los bofedales, que actúan como reservorios naturales de agua. La Tabla 4 muestra los valores de infiltración de agua en áreas intervenidas y no intervenidas.

Tabla 4. *Infiltración de agua en áreas intervenidas y no intervenidas.*

Sitio	Tratamiento	Infiltración de agua (mm/h)
Reserva Nacional Pampa Galeras Bárbara D’Achille	Intervenido	20
	Control	15
Santuario Nacional de Ampay	Intervenido	25
	Control	20
Parque Nacional del Huascarán	Intervenido	18
	Control	12

La protección de los suelos frente a la erosión también mostró mejoras significativas en las áreas restauradas, con una reducción del 50% en la pérdida de suelo en el Parque Nacional del Huascarán en comparación con las áreas control.

La estabilización de las pendientes, mediante la plantación de especies arbustivas y arbóreas, y el aumento de la cobertura vegetal contribuyeron a la disminución de la erosión hídrica y eólica.

En la Reserva Nacional Pampa Galeras Bárbara D’Achille, la reducción en la pérdida de suelo fue del 40%, mientras que en el Santuario Nacional de Ampay se registró una disminución del 35%.

Impacto en la mitigación del cambio climático

El análisis de las cantidades de carbono capturadas en las áreas restauradas, utilizando herramientas de modelado ecológico, permitió proyectar el impacto a largo plazo de las intervenciones en la reducción de gases de efecto invernadero. Los modelos

proyectaron que las áreas restauradas en el Santuario Nacional de Ampay podrían capturar un total de 600 toneladas de CO2 equivalente por hectárea en los próximos 20 años, lo que representa una contribución significativa a la mitigación del cambio climático. En la Reserva Nacional Pampa Galeras Bárbara D’Achille, se proyectó una captura de 550 toneladas de CO2 equivalente por hectárea, mientras que en el Parque Nacional del Huascarán la proyección fue de 450 toneladas de CO2 equivalente por hectárea. Estas proyecciones se basan en las tasas de crecimiento de las especies plantadas, la acumulación de biomasa y la dinámica del carbono en el suelo. La Tabla 5 presenta las proyecciones de captura de carbono a largo plazo en las áreas restauradas.

Tabla 5. *Proyecciones de captura de carbono a largo plazo en áreas restauradas.*

Sitio	Captura de Carbono (ton CO2e/ha)
Reserva Nacional Pampa Galeras Bárbara D’Achille	550
Santuario Nacional de Ampay	600
Parque Nacional del Huascarán	450

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio concuerdan con la creciente evidencia científica que destaca la importancia de la restauración ecológica para la recuperación de la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos en ecosistemas altoandinos (Brancalion et al., 2019). Estudios previos en los Andes, como los realizados por la Universidad Nacional Agraria La Molina en el Parque Nacional del Huascarán, han demostrado que la reforestación con especies nativas, como *Polylepis* spp., puede incrementar la cobertura vegetal, mejorar la calidad del suelo y favorecer la retención de agua, creando microclimas favorables para el establecimiento de otras especies (Jiang et al., 2023).

La recuperación de la fauna observada en las áreas restauradas de este estudio, particularmente la mayor abundancia de Suri y Vicuña, coincide con los hallazgos de investigaciones previas, como el estudio de Alarcón et al. (2016) en la puna peruana, que demuestran la importancia de la vegetación nativa para la provisión de hábitat, refugio y alimento para estas especies.



La presencia de una mayor diversidad vegetal proporciona una oferta alimenticia más variada y abundante, lo que favorece el aumento de las poblaciones de herbívoros. Asimismo, el incremento en la captura de carbono en las áreas restauradas es consistente con estudios que han cuantificado el potencial de los ecosistemas altoandinos para secuestrar carbono atmosférico y contribuir a la mitigación del cambio climático (Bastin et al., 2019). Este estudio, al igual que investigaciones realizadas en los páramos andinos, corrobora que la restauración de la cobertura vegetal incrementa la acumulación de carbono orgánico en el suelo, lo que no solo contribuye a la mitigación del cambio climático, sino que también mejora la fertilidad y la estructura del suelo.

Sin embargo, este estudio aporta nueva evidencia sobre la eficacia de la restauración de bofedales para mejorar la regulación hídrica y la resiliencia de los ecosistemas altoandinos frente a la variabilidad climática, un aspecto poco explorado en estudios previos. A diferencia de otros estudios que se han centrado en la reforestación, este trabajo destaca la importancia de restaurar la funcionalidad de los humedales altoandinos, como los bofedales de la Reserva Nacional Salinas y Aguada Blanca, para asegurar la provisión de agua, la regulación del ciclo hidrológico y la conservación de la biodiversidad asociada a estos ecosistemas, incluyendo especies de aves migratorias y anfibios endémicos (Jones et al., 2021).

La integración de herramientas de modelado ecológico en este estudio permitió proyectar el impacto a largo plazo de las intervenciones de restauración, lo que constituye una innovación respecto a estudios previos que se han limitado a evaluar los efectos a corto plazo.

Estas proyecciones, utilizando modelos similares a los empleados por Mori et al. (2017) en ecosistemas forestales, sugieren que las estrategias de restauración implementadas pueden contribuir significativamente a la mitigación del cambio climático en las próximas décadas, aumentando la capacidad de secuestro de carbono y la resiliencia de los ecosistemas frente a eventos climáticos extremos, como sequías e inundaciones. Esta información es fundamental para la toma de decisiones en materia de políticas de conservación y para la planificación de futuras intervenciones de restauración.

Retos y oportunidades

A pesar del potencial de la restauración ecológica para la recuperación de los ecosistemas altoandinos, la implementación de estas estrategias enfrenta diversos retos. La falta de financiamiento a largo plazo para proyectos de restauración es una limitante importante, que dificulta la continuidad de las intervenciones, el monitoreo

de los resultados a largo plazo y la evaluación de la eficacia de las diferentes estrategias (Díaz et al., 2023).

Muchos proyectos dependen de fondos internacionales con plazos definidos, lo que dificulta la consolidación de las acciones de restauración y la participación a largo plazo de las comunidades locales. Asimismo, las limitaciones técnicas, como la escasez de viveros con especies nativas adaptadas a las condiciones altoandinas, la falta de protocolos estandarizados para la propagación y plantación de especies, y la limitada disponibilidad de personal capacitado en técnicas de restauración, representan un desafío para la implementación de proyectos a gran escala.

La falta de información sobre la ecología de las especies nativas, sus requerimientos ambientales y su respuesta a las intervenciones de restauración dificulta la selección de las especies más adecuadas para cada sitio y la optimización de las técnicas de restauración. La participación activa de las comunidades locales en los proyectos de restauración es fundamental para asegurar la sostenibilidad de las intervenciones a largo plazo y para promover la apropiación local de los procesos de conservación (Wortley et al., 2013).

Sin embargo, la falta de incentivos económicos, como la generación de ingresos a través del turismo sostenible o el aprovechamiento de productos no maderables del bosque, y la limitada capacidad de gestión de las comunidades en temas de planificación, organización y monitoreo, pueden dificultar su involucramiento efectivo en los proyectos. A menudo, las comunidades locales carecen de los recursos y la capacitación necesarios para liderar y gestionar proyectos de restauración de manera autónoma.

A pesar de estos retos, existen importantes oportunidades para fortalecer la restauración ecológica en los Andes. El desarrollo de mecanismos de financiamiento innovadores, como los pagos por servicios ambientales, que recompensen a las comunidades por la conservación de los bosques y la provisión de servicios ecosistémicos, como la regulación hídrica y la captura de carbono, puede generar recursos para la implementación de proyectos a largo plazo y crear incentivos para la conservación (Suding et al., 2015).

La capacitación de las comunidades locales en técnicas de restauración, monitoreo de la biodiversidad y gestión de proyectos, así como la promoción de la gestión comunitaria de los recursos naturales, mediante el fortalecimiento de las organizaciones comunitarias y la transferencia de conocimientos técnicos, puede empoderar a las comunidades y asegurar su participación activa en la conservación de sus ecosistemas. La implementación de enfoques participativos que involucren a las comunidades en la toma de decisiones, el diseño de las estrategias de restauración, la selección



de especies y el monitoreo de los resultados, puede aumentar la eficacia de las intervenciones, promover la equidad social en la distribución de los beneficios y asegurar la sostenibilidad a largo plazo de los proyectos.

La creación de plataformas de intercambio de experiencias y lecciones aprendidas entre diferentes comunidades e instituciones puede facilitar la difusión de buenas prácticas y contribuir a la mejora continua de las estrategias de restauración.

Implicaciones para la sostenibilidad a largo plazo

Para que las intervenciones de restauración ecológica sean sostenibles a largo plazo, es fundamental integrar la conservación de la biodiversidad y la mitigación del cambio climático en las políticas públicas a nivel nacional y regional (Delgado et al., 2019).

Se necesitan políticas que promuevan la restauración ecológica como una herramienta para el desarrollo sostenible, que generen incentivos económicos para la conservación de los ecosistemas, que fortalezcan la capacidad de gestión de las comunidades locales y que promuevan la investigación científica y la innovación en técnicas de restauración. La creación de áreas protegidas y la implementación de planes de manejo que incluyan la restauración ecológica como una estrategia prioritaria, con objetivos claros, indicadores de éxito y mecanismos de monitoreo y evaluación, puede contribuir a la conservación de la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos a largo plazo.

La educación ambiental, desde la educación básica hasta la educación superior, y la sensibilización de la población sobre la importancia de la restauración ecológica para la conservación de la biodiversidad, la mitigación del cambio climático y el bienestar humano, son esenciales para generar un cambio de actitud hacia la conservación de la naturaleza y asegurar la participación ciudadana en la protección de los ecosistemas altoandinos.

La investigación científica continua sobre la eficacia de diferentes estrategias de restauración, la adaptación de las técnicas a las condiciones locales, el desarrollo de nuevas tecnologías para la restauración ecológica y el monitoreo a largo plazo de los resultados, considerando las proyecciones de cambio climático, son necesarios para adaptar las intervenciones a las condiciones cambiantes del clima y asegurar la resiliencia de los ecosistemas altoandinos. La colaboración entre instituciones académicas, organizaciones gubernamentales, comunidades locales, el sector privado y organismos internacionales es crucial para escalar las intervenciones de restauración, compartir conocimientos y recursos, y lograr un impacto significativo en la conservación de la biodiversidad y la mitigación del cambio climático en los Andes.

La creación de redes de colaboración e intercambio de información puede facilitar el aprendizaje mutuo, la innovación y la implementación de estrategias de restauración más efectivas y sostenibles.

CONCLUSIONES

Este estudio demostró la eficacia de las estrategias de restauración ecológica para la recuperación de la biodiversidad y la mitigación del cambio climático en los ecosistemas altoandinos de Perú. La reforestación con especies nativas, la restauración de bofedales y la implementación de prácticas de conservación de suelos contribuyeron significativamente al aumento de la riqueza y abundancia de especies de flora y fauna, la mejora de la calidad del suelo, la regulación hídrica y el secuestro de carbono.

Se observó una mayor recuperación de especies clave como *Polylepis incana*, *Festuca dolichophylla* y *Puya raimondii*, así como un incremento en la población de fauna endémica, como el Suri y la Vicuña, en las áreas intervenidas. Los resultados también evidenciaron una mejora significativa en la captura de carbono, la infiltración de agua en el suelo y la reducción de la erosión en las áreas restauradas, lo que contribuye a la mitigación del cambio climático y al fortalecimiento de la resiliencia de los ecosistemas altoandinos.

El estudio comparativo con otras regiones altoandinas de América Latina, como Bolivia y Ecuador, permitió identificar patrones comunes y desafíos específicos en la implementación de estrategias de restauración, destacando la importancia de la participación comunitaria y la adaptación de las técnicas a las condiciones locales.

Recomendaciones para políticas ambientales

Con base en los resultados obtenidos, se recomienda la formulación de políticas públicas que promuevan la restauración ecológica como una estrategia clave para la conservación de la biodiversidad y la mitigación del cambio climático en los Andes peruanos.

Se sugiere la creación de un fondo nacional para la restauración ecológica que financie proyectos a largo plazo, con énfasis en la participación comunitaria y la gestión sostenible de los recursos naturales. Es fundamental fortalecer la capacidad técnica de las comunidades locales en materia de restauración ecológica, mediante programas de capacitación y la transferencia de tecnologías apropiadas. Asimismo, se recomienda



la implementación de incentivos económicos para la conservación y restauración de ecosistemas, como los pagos por servicios ambientales, que beneficien directamente a las comunidades que custodian estos territorios.

La integración de la restauración ecológica en los planes de desarrollo regional y local es crucial para asegurar la sostenibilidad de las intervenciones y su contribución al bienestar de las poblaciones altoandinas. Finalmente, se recomienda la creación de un observatorio nacional de restauración ecológica que monitoree el progreso de las intervenciones, genere información científica y promueva el intercambio de experiencias entre diferentes actores.

Perspectivas futuras

Las futuras líneas de investigación deberían centrarse en la evaluación a largo plazo del impacto de las estrategias de restauración ecológica en la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, considerando los escenarios de cambio climático. Es fundamental investigar la eficacia de nuevas tecnologías, como el uso de drones para la reforestación y el monitoreo de la vegetación, y la aplicación de enfoques innovadores, como la bioingeniería de suelos, para la restauración de áreas degradadas.

Se deben desarrollar modelos de simulación que permitan predecir la respuesta de los ecosistemas altoandinos a diferentes escenarios de cambio climático y evaluar la efectividad de las estrategias de restauración para la adaptación al cambio climático. La investigación interdisciplinaria, que integre conocimientos de ecología, ciencias sociales, economía e ingeniería, es esencial para comprender la complejidad de los procesos de restauración y para desarrollar soluciones integrales que contribuyan a la sostenibilidad de los ecosistemas altoandinos.

La promoción de la investigación participativa, que involucre a las comunidades locales en el diseño y la implementación de la investigación, es fundamental para generar conocimientos relevantes para la gestión local de los recursos naturales y para fortalecer la apropiación social del conocimiento científico.

Finalmente, es necesario impulsar la difusión de los resultados de la investigación a través de publicaciones científicas, informes técnicos y plataformas de comunicación accesibles a diferentes públicos, con el fin de contribuir a la toma de decisiones informadas en materia de conservación y restauración ecológica.

REFERENCIAS

- Alarcón, G., Díaz, J., Vela, M., García, M., & Gutiérrez, J. (2016). Deforestación en el sureste de la amazonia del Perú entre los años 1999-2013; caso Regional de Madre de Dios (Puerto Maldonado–Inambari). *Revista Investigaciones Altoandinas*, 18(3), 319-330. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5645610>
- Bastin, J., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., & Crowther, T. (2019). The global tree restoration potential. *Science*, 365(6448), 76-79. <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.aax0848>
- Brancalion, P., Niamir, A., Broadbent, E., Crouzeilles, R., Barros, F., Almeyda, A., & Chazdon, R. L. (2019). Global restoration opportunities in tropical rainforest landscapes. *Science advances*, 5(7), eaav3223. <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/sciadv.aav3223>
- Cavender, J., Reich, P., Townsend, P., Banerjee, A., Butler, E., Desai, A., & Yang, Y. (2021). BII-Implementation: The causes and consequences of plant biodiversity across scales in a rapidly changing world. *Research Ideas and Outcomes: The Open Science Journal*, 7, e63850. <https://www.zora.uzh.ch/id/eprint/217005/>
- Damgaard, C., & Irvine, K. (2019). Using the beta distribution to analyse plant cover data. *Journal of Ecology*, 107(6), 2747-2759. <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1365-2745.13200>
- Delgado, J., Yépez, E., Paz, P., Ángeles, G., Alvarado, M., Bullock, S., & Watts, C. (2019). Flujos verticales de carbono en ecosistemas terrestres. *Estado del ciclo del carbono: agenda azul y verde*, 605-625. <https://sii.ecosur.mx/Content/ProductosActividades/archivos/42025/textocompleto-03-02-2022-10-25.pdf>
- Díaz, J., Vargas, O., & Rodríguez, N. (2023). La nucleación: Una alternativa para la restauración ecológica de bosques neotropicales. *Ecología Austral*, 33(3), 867-886. https://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/view/2134
- Fayet, C., Reilly, K., Van Ham, C., & Verburg, P. (2022). What is the future of abandoned agricultural lands? A systematic review of alternative trajectories in

- Europe. *Land use policy*, 112, 105833. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837721005561>
- Gamfeldt, L., & Roger, F. (2017). Revisiting the biodiversity–ecosystem multifunctionality relationship. *Nature ecology & evolution*, 1(7), 0168. <https://www.nature.com/articles/s41559-017-0168>
- Hobbs, R., & Harris, J. (2001). Restoration ecology: repairing the Earth's ecosystems in the new millennium. *Restoration Ecology*, 9(2), 239-246. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1526-100x.2001.009002239.x>
- Jiang, X., Sun, Y., Qu, Y., Zeng, H., Yang, J., Zhang, K., & Liu, L. (2023). The development and future frontiers of global ecological restoration projects in the twenty-first century: a systematic review based on scientometrics. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(12), 32230-32245. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-023-25615-3>
- Jones, H., Jones, P., Barbier, E., Blackburn, R., Rey, J., Holl, K., & Mateos, D. (2018). Restoration and repair of Earth's damaged ecosystems. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1873), 20172577. <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspb.2017.2577>
- Martín, B., Leister, I., Lorenzo, P., Palomo, I., Grêt, A., Harrison, P., & Walz, A. (2019). Nature's contributions to people in mountains: A review. *PloS one*, 14(6), e0217847. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0217847>
- Meli, P., Herrera, F., Melo, F., Pinto, S., Aguirre, N., Musálem, K., & Brancalion, P. (2017). Four approaches to guide ecological restoration in Latin America. *Restoration Ecology*, 25(2), 156-163. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/rec.12473>
- Mori, A., Lertzman, K., & Gustafsson, L. (2017). Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: a research agenda for applied forest ecology. *Journal of Applied Ecology*, 54(1), 12-27. <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1365-2664.12669>
- Quintero, I., & Jetz, W. (2018). Global elevational diversity and diversification of birds. *Nature*, 555(7695), 246-250. <https://www.nature.com/articles/nature25794>

- Suding, K., Higgs, E., Palmer, M., Callicott, J., Anderson, C., Baker, M., & Schwartz, K. (2015). Committing to ecological restoration. *Science*, 348(6235), 638-640. <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.aaa4216>
- Wortley, L., Hero, J., & Howes, M. (2013). Evaluating ecological restoration success: a review of the literature. *Restoration Ecology*, 21(5), 537-543. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/rec.12028>