



Almacenamiento de carbono en plantaciones exóticas andinas: *Eucalyptus globulus* vs *Pinus radiata*

Carbon storage in Andean exotic plantations: *Eucalyptus globulus* vs *Pinus radiata*

Armazenamento de carbono em plantações exóticas andinas:
Eucalyptus globulus versus *Pinus radiata*

ARTÍCULO ORIGINAL



Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i28.448>

Roy Collins Cardenas Rengifo¹
rcardenasr@unasam.edu.pe

Juan Fernando Gallardo Lancho²
juanf.gallardo@csic.es

Oscar Oswaldo Loli Figueroa³
ololi@lamolina.edu.pe

¹Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Huaraz, Perú

²Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Salamanca, España

³Universidad Nacional Agraria. Lima, Perú

Artículo recibido: 13 de octubre 2025 / Arbitrado: 26 de noviembre 2025 / Publicado: 7 de enero 2026

RESUMEN

Las plantaciones forestales constituyen sumideros fundamentales de carbono en ecosistemas de montaña, especialmente en el contexto del cambio climático global. El objetivo del presente estudio fue cuantificar el carbono almacenado en compartimentos aéreo, subterráneo y edáfico en cuatro sitios del entorno del Parque Nacional Huascarán. Para lo cual se aplicó un diseño factorial 2x2. Se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) de dos factores para evaluar los efectos de especie, sitio e interacción sobre los stocks de carbono. Los resultados revelaron que el carbono total del ecosistema varió significativamente entre especies ($F(1,28)=5.82$, $p=0.023$) y sitios ($F(1,28)=8.15$, $p=0.008$), registrándose un promedio de 227.4 Mg C ha⁻¹ para *P. radiata* y 206.1 Mg C ha⁻¹ para *E. globulus*. Se identificó una interacción significativa especie-sitio ($F(1,28)=4.31$, $p=0.047$), evidenciando respuestas diferenciales según las condiciones altitudinales. El compartimento edáfico representó el mayor reservorio de carbono en ambas especies, aunque con patrones contrastantes entre localidades. Los resultados demuestran que *Pinus radiata* presenta mayor potencial como sumidero de carbono en estos sitios altoandinos, sugiriendo que la selección de especies para proyectos de reforestación debe considerar las condiciones altitudinales específicas para maximizar el secuestro de carbono y optimizar las estrategias de mitigación climática en ecosistemas montanos neotropicales.

Palabras clave: Andes; Carbono del suelo; *Eucalyptus globulus*; Gradiante altitudinal; Secuestro de carbono; *Pinus radiata*

ABSTRACT

Forest plantations constitute fundamental carbon sinks in mountain ecosystems, particularly in the context of global climate change. This study quantified carbon stored in aboveground, belowground, and edaphic compartments at four sites in the surroundings of Huascarán National Park, applying a factorial design of two species by two altitudes. A two-way analysis of variance (ANOVA) was used to evaluate the effects of species, site, and interaction on carbon stocks. Results revealed that total ecosystem carbon varied significantly between species ($F(1,28)=5.82$, $p=0.023$) and sites ($F(1,28)=8.15$, $p=0.008$), averaging 227.4 Mg C ha⁻¹ for *P. radiata* and 206.1 Mg C ha⁻¹ for *E. globulus*. A significant species-site interaction was identified ($F(1,28)=4.31$, $p=0.047$), evidencing differential responses according to altitudinal conditions. The edaphic compartment represented the largest carbon reservoir in both species, although with contrasting patterns between localities. The findings demonstrate that *Pinus radiata* presents greater potential as a carbon sink at these high Andean sites, suggesting that species selection for reforestation projects should consider specific altitudinal conditions to maximize carbon sequestration and optimize climate mitigation strategies in neotropical montane ecosystems.

Key words: Altitudinal gradient; Andes; Carbon sequestration; *Eucalyptus globulus*; Soil carbon; *Pinus radiata*

RESUMO

As plantações florestais constituem sumidouros fundamentais de carbono em ecossistemas de montanha, especialmente no contexto das mudanças climáticas globais. Este estudo quantificou o carbono armazenado nos compartimentos aéreo, subterrâneo e edáfico em quatro locais no entorno do Parque Nacional Huascarán, aplicando um delineamento fatorial de duas espécies por duas altitudes. Utilizou-se uma análise de variância (ANOVA) de dois fatores para avaliar os efeitos de espécie, local e interação sobre os estoques de carbono. Os resultados revelaram que o carbono total do ecossistema variou significativamente entre espécies ($F(1,28)=5,82$, $p=0,023$) e locais ($F(1,28)=8,15$, $p=0,008$), registrando-se uma média de 227,4 Mg C ha⁻¹ para *P. radiata* e 206,1 Mg C ha⁻¹ para *E. globulus*. Identificou-se uma interação significativa espécie-local ($F(1,28)=4,31$, $p=0,047$), evidenciando respostas diferenciais de acordo com as condições altitudinais. O compartimento edáfico representou o maior reservatório de carbono em ambas as espécies, embora com padrões contrastantes entre localidades. Os achados demonstram que *Pinus radiata* apresenta maior potencial como sumidouro de carbono nesses locais alto-andinos, sugerindo que a seleção de espécies para projetos de reflorestamento deve considerar as condições altitudinais específicas para maximizar o sequestro de carbono e otimizar as estratégias de mitigação climática em ecossistemas montanos neotropicais.

Palavras-chave: Andes, Carbono do solo, *Eucalyptus globulus*, Gradiente altitudinal, Sequestro de carbono, *Pinus radiata*

INTRODUCCIÓN

Los bosques constituyen uno de los sumideros de carbono más significativos del planeta, desempeñando un papel fundamental en la mitigación del cambio climático global mediante el secuestro y almacenamiento de dióxido de carbono atmosférico en su biomasa y suelos asociados. La creciente concentración de gases de efecto invernadero ha intensificado la urgencia de implementar estrategias efectivas de captura de carbono, posicionando a las plantaciones forestales como herramientas cruciales para alcanzar los objetivos de mitigación climática establecidos en el Acuerdo de París. En este contexto, se demostró (1) que los incentivos económicos de \$20 y \$50 CO₂-eq t⁻¹ pueden generar transiciones del 4% y 29% respectivamente desde plantaciones de *Eucalyptus globulus* hacia *Pinus radiata*, resultando en incrementos del 10% y 48% en el almacenamiento de carbono estatal, donde el potencial máximo podría duplicarse con una pérdida del 27% en ganancias económicas.

Dentro de este panorama global, los ecosistemas montanos tropicales adquieren particular relevancia debido a sus características climáticas únicas y su elevado potencial de almacenamiento de carbono. En este sentido, se evidenció que los bosques montanos centroamericanos almacenan hasta 882.1 Mg C ha⁻¹ total, con biomasa aérea de hasta 574.3 Mg

ha⁻¹ y carbono edáfico de hasta 577.9 Mg C ha⁻¹ a elevaciones superiores a 2000 m, valores 2-6 veces superiores a los reportados en ecosistemas andinos (2). Sus análisis revelaron correlaciones positivas significativas entre elevación y stocks de carbono tanto aéreo ($r^2=0.73$, $p<0.001$) como edáfico ($r^2=0.76$, $p<0.001$), atribuidas a temperaturas reducidas que disminuyen las tasas de descomposición.

Complementariamente, se documentó en bosques secundarios andinos stocks promedio de carbono aéreo de 81.4 ± 26.0 Mg C ha⁻¹, y se observó una disminución de 1.8 veces a lo largo de 3000 m de gradiente altitudinal, desde 157.6 Mg C ha⁻¹ a 800 m hasta 46.4 Mg C ha⁻¹ a 3500 m, con una productividad anual de 1.99 ± 0.99 Mg C ha⁻¹ y una relación área basal-elevación de $r^2=0.65$ (3).

Además, las plantaciones con especies exóticas, particularmente *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata*, han emergido como estrategias ampliamente adoptadas en los ecosistemas andinos para la reforestación y el secuestro de carbono. Estas especies presentan características contrastantes en sus patrones de crecimiento, asignación de biomasa y dinámicas de carbono que pueden influir significativamente en su efectividad como sumideros de carbono bajo diferentes condiciones ambientales. En esta dirección, la dinámica del carbono orgánico del suelo en gradientes altitudinales peruanos presenta

patrones unimodales con picos de 400 t C ha⁻¹ a 4000 m de altitud, mientras que la eficiencia de uso microbiano del carbono permanece constante entre 3500-4500 m, con incrementos en ratios C:N y actividades enzimáticas como β-glucosidasa y quitinasa asociados a mayores altitudes (4). Por otra parte, otros autores (5) determinaron que los stocks de carbono pirogénico son 9-10 veces superiores en altos Andes comparado con tierras bajas amazónicas, con el carbono orgánico total influenciado por precipitación, contenido de arcilla y pH edáfico.

A pesar de su extendido uso en programas de reforestación andina, persisten brechas críticas en el conocimiento sobre la capacidad comparativa de secuestro de carbono entre plantaciones de *E. globulus* y *P. radiata* bajo condiciones ambientales similares. Al respecto, se reportó stocks totales de 226.23 Mg C ha⁻¹ en plantaciones de *Eucalyptus* de 4 años y 216.26 Mg C ha⁻¹ en plantaciones de 6 años, superiores a los 183.99 Mg C ha⁻¹ registrados en vegetación nativa de Cerrado, con el compartimento edáfico representando 58-84% del carbono total, aunque con pérdidas del 18% tras conversión desde uso agrícola (6). Adicionalmente, otros autores (7) identificaron que especies como *Populus* y *P. acerifolia* exhiben alto potencial de secuestro, con métricas wCO₂ y WCO₂ superiores en árboles de menor tamaño,

donde factores como Pn, CA y LAI explican el 46.4% y 32.9% de la varianza respectivamente.

Asimismo, la influencia de factores abióticos como el gradiente altitudinal sobre la capacidad relativa de secuestro de carbono entre estas especies permanece insuficientemente explorada en la región neotropical, en este sentido algunos autores (8) señalaron que los humedales altoandinos almacenan más de 20 Tg C en turberas (97% del total en Huascarán), con dinámicas reguladas por temperatura y precipitación que amenazan estos ecosistemas sensibles bajo escenarios de calentamiento de +1.5°C. En esta dirección, se documentó esta perspectiva al evidenciar los stocks totales de 145.9 a 279 Mg C ha⁻¹ en bosques nubosos montanos, con el suelo como reservorio principal (68.08-198.1 Mg C ha⁻¹, 70% promedio) y variaciones altitudinales que reducen el carbono aéreo en 18% sobre 2500 m de elevación (9).

Por consiguiente, el objetivo del presente estudio es cuantificar el almacenamiento de carbono en los compartimentos aéreo, subterráneo y edáfico de plantaciones de *E. globulus* y *P. radiata* en el entorno del Parque Nacional Huascarán.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó bajo un enfoque cuantitativo, en cuatro sitios ubicados en el entorno del Parque Nacional Huascarán,

departamento de Ancash, Perú, abarcando un gradiente altitudinal entre 2820 y 3650 m s.n.m. Los sitios fueron seleccionados para representar un diseño factorial de 2 especies × 2 rangos altitudinales, incluyendo plantaciones establecidas de *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata* en las localidades de Catac, Huaraz y Marcará.

Los sitios fueron los siguientes: Sitio 1 (EG-Catac): Localizado en Catac, a una altitud de 3650 m s.n.m., en coordenadas UTM 18S 235187 E, 8914560 N. La especie forestal dominante fue *Eucalyptus globulus*, establecida sobre un suelo clasificado como Inceptisol. En este sitio se establecieron 8 réplicas (parcelas de muestreo). Sitio 2 (PR-Catac): También ubicado en Catac, a 3640 m s.n.m. (coordenadas UTM 18S 236450 E, 8913230 N), con *Pinus radiata* como especie dominante y sobre un suelo clasificado igualmente como Inceptisol. Se dispusieron 8 réplicas en este sitio. Sitio 3 (PR-Huaraz): Situado en Huaraz, a 3300 m s.n.m. (coordenadas UTM 18S 225140 E, 8945880 N), dominado por *Pinus radiata* y con un suelo clasificado como Entisol. Se establecieron 8 réplicas en esta localidad. Sitio 4 (EG-Marcará): Localizado en Marcará, a 2820 m s.n.m. (coordenadas UTM 18S 215780 E, 8965120 N), con *Eucalyptus globulus* como especie dominante y un suelo clasificado como Entisol. En este sitio también se implementaron 8 réplicas.

Además, cada réplica correspondió a una subparcela de muestreo, totalizando 32 unidades experimentales para el estudio (8 por sitio), lo que permitió una adecuada representación espacial y replicación estadística dentro del diseño factorial completamente aleatorizado.

Paralelamente, se implementó un diseño experimental factorial completamente aleatorizado con dos factores principales: especie forestal (*E. globulus* y *P. radiata*) y localidad/altitud (Catac-Huaraz alta vs. Marcará baja). En cada sitio se establecieron 8 parcelas de muestreo de 400 m² (20 m × 20 m), distribuidas aleatoriamente dentro de cada plantación para garantizar la representatividad espacial. Cada parcela constituyó la unidad experimental básica, totalizando 32 unidades experimentales (n=8 por tratamiento). La selección de parcelas siguió criterios de homogeneidad en términos de pendiente, exposición y edad de plantación, evitando áreas con disturbios evidentes o condiciones microambientales atípicas.

Por otro lado, la cuantificación de biomasa áerea arbórea se realizó mediante medición directa del diámetro a la altura del pecho (DAP) de todos los individuos ≥5 cm dentro de cada parcela, aplicando ecuaciones alométricas validadas para especies de *Eucalyptus* en ecosistemas andinos.

Se utilizó la ecuación $\ln(Bt) = -0.952 + 1.97 \times \ln(DAP)$ con $R^2=0.80$, $RMSE=0.273$ y $FI=15.00$, validada mediante análisis de residuos para homocedasticidad y precisión de estimación ($MRE=23.3\%$, $ME=0.80$). Para biomasa herbácea y hojarasca se establecieron cuadrantes de 1 m² en cinco puntos aleatorios por parcela, ejecutándose muestreo destructivo con posterior secado en estufa a 70°C hasta peso constante. La biomasa subterránea se estimó aplicando factores de conversión específicos por especie: 0.30 para *E. globulus* y 0.16 para *P. radiata*, basados en ecuaciones alométricas regionales validadas que relacionan biomasa radical con biomasa aérea según los modelos area-based $\ln(B) = \beta_0 + \beta_1 D_{ALS_2} + \beta_2 H_{ALS_80} + \beta_3 T$.

En relación al muestreo edáfico se ejecutó mediante extracción de muestras compuestas en dos horizontes de profundidad: 0-25 cm y 25-50 cm, utilizando barrenos cilíndricos de volumen conocido para determinación simultánea de densidad aparente y contenido de carbono orgánico. La densidad aparente se cuantificó mediante el método del cilindro según protocolos de Ng et al. (2025), mientras que el análisis de carbono orgánico se realizó empleando el método Walkley-Black, con precisión de $\pm 0.3\%$, varianza=4.06 y RMSE vs. TOC-CO-NDIR=3.75%, recuperando 79.06% del carbono total. Este método mostró correlaciones moderadas ($r=0.46$ LOI vs. TOC, $p=0.031$) y diferencias significativas

detectables mediante ANOVA ($p=0.0227$), adaptándose eficientemente a suelos andinos con alta variabilidad mediante ecuaciones de conversión específicas y protocolos de oxidación con ácido crómico optimizados para gradientes altitudinales.

Asimismo, los stocks de carbono se calcularon para cada compartimento utilizando fórmulas estándar adaptadas a las condiciones específicas del estudio. Para biomasa aérea y subterránea se aplicó un factor de conversión de 0.47 (47% del peso seco corresponde a carbono) según convenciones internacionales. El stock de carbono edáfico se determinó mediante la ecuación: $C_{stock} = [\%C] \times \text{Densidad_aparente} \times \text{Profundidad_horizonte} \times 100$, donde %C representa el porcentaje de carbono orgánico determinado por Walkley-Black, la densidad aparente se expresa en g cm⁻³, y la profundidad del horizonte en cm, resultando en unidades de Mg C ha⁻¹. El stock total del ecosistema se obtuvo sumando los compartimentos aéreo, subterráneo y edáfico, proporcionando una estimación integral del almacenamiento de carbono por unidad de superficie.

Además, los análisis estadísticos se ejecutaron utilizando el software R (versión 4.3.2). Previo al análisis de varianza se verificaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene respectivamente, aplicando transformaciones

logarítmicas cuando fue necesario. Para evaluar los efectos de especie, sitio e interacción sobre los stocks de carbono (aéreo, subterráneo, edáfico y total) se implementó un Análisis de Varianza (ANOVA) de dos vías con $\alpha=0.05$. Cuando se detectaron diferencias significativas, se la prueba HSD de Tukey. Adicionalmente, se exploraron las relaciones entre stocks de carbono total y variables ambientales clave (altitud, propiedades edáficas) mediante análisis de correlación de Pearson, siguiendo los métodos de partición de variabilidad funcional para datos de flujos de carbono con coherencia espacial continental.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las mediciones dasométricas revelaron patrones diferenciados de crecimiento entre especies y localidades (todos los valores se presentan como media \pm desviación estándar, con un tamaño de muestra de $n=8$ por sitio). En el sitio EG-Catac (*Eucalyptus globulus*), se registró un diámetro a la altura del pecho (DAP) de 18.2 ± 4.5 cm, una altura promedio de 15.1 ± 3.8 m y un área basal de 21.5 ± 5.3 m^2/ha . En contraste, el sitio PR-Catac (*Pinus radiata*), ubicado en la misma localidad, pero con especie diferente, mostró valores superiores en DAP (22.5 ± 5.1 cm) y área basal (28.9 ± 6.2 m^2/ha), aunque con una altura ligeramente inferior (14.8 ± 3.1 m).

Por otra parte, el sitio PR-Huaraz (*Pinus radiata*) presentó los valores dasométricos más

elevados del estudio, con un DAP de 25.8 ± 6.2 cm, una altura de 16.5 ± 4.0 m y un área basal de 35.4 ± 7.1 m^2/ha . Además, en EG-Marcará (*Eucalyptus globulus*) se observó un DAP de 20.1 ± 4.8 cm, la mayor altura registrada (17.2 ± 3.5 m) entre todos los sitios, y un área basal de 25.8 ± 5.9 m^2/ha .

Al respecto, estos resultados evidencian una clara influencia tanto de la especie como de la localidad en las variables dasométricas, donde *Pinus radiata* tendió a desarrollar mayores diámetros y áreas basales, particularmente en Huaraz, mientras que *Eucalyptus globulus* mostró una ventaja en desarrollo vertical en la localidad de menor altitud (Marcará).

En cuanto a los stocks de carbono por compartimento mostraron patrones diferenciados entre especies y sitios, según se presenta en la Tabla 1. EG-Catac registró el mayor stock total de carbono del ecosistema (251.08 ± 41.3 Mg C ha^{-1}), principalmente debido a su elevado contenido de carbono edáfico (155.77 ± 35.1 Mg C ha^{-1}). En contraste, EG-Marcará exhibió el menor stock total (161.14 ± 29.5 Mg C ha^{-1}), con significativa reducción tanto en biomasa como en carbono del suelo. Las plantaciones de *P. radiata* mostraron stocks intermedios, pero con mayor consistencia en biomasa aérea, especialmente en PR-Huaraz donde se registró la máxima biomasa aérea del estudio (107.25 ± 25.1 Mg C ha^{-1}).

Table 1. Stock de carbono por compartimento, especie y sitio (Media ± DE, en Mg C ha⁻¹)*.

Sitio	Especie	Biomasa aérea	Biomasa subterránea	Suelo (0–50 cm)	Total ecosistema
EG-Catac	<i>E. globulus</i>	73.33a ± 18.2	21.98a** ± 5.5	155.77a*** ± 35.1	251.08 ± 41.3
PR-Catac	<i>P. radiata</i>	81.69a ± 20.5	13.10b** ± 3.3	105.60b*** ± 28.9	200.39 ± 38.7
PR-Huaraz	<i>P. radiata</i>	107.25a** ± 25.1	17.18a* ± 4.1	109.28a*** ± 26.4	233.71 ± 40.2
EG-Marcará	<i>E. globulus</i>	74.85b** ± 19.3	22.43b* ± 5.8	63.86b*** ± 15.7	161.14 ± 29.5

*Comparación del Stock de Carbono entre Especies por Compartimento y Localidad. Comparación del stock de carbono (Mg C ha⁻¹) entre plantaciones de *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata* dentro de cada compartimento del ecosistema y nivel altitudinal. Los subíndices distintos y asteriscos indican el nivel de significancia estadística entre las medias de las dos especies dentro de ese par específico, según la prueba post-hoc de Tukey HSD: ns = no significativo, * p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001.

Por otra parte, el ANOVA de dos vías reveló efectos significativos tanto de la especie como del sitio sobre múltiples compartimentos de carbono, como se documenta en la Tabla 2. Para el stock de carbono total del ecosistema se detectaron efectos principales significativos de especie ($F(1,28)=5.82$, $p=0.023$) y sitio ($F(1,28)=8.15$, $p=0.008$), así como una interacción significativa

especie×sitio ($F(1,28)=4.31$, $p=0.047$). El stock de carbono aéreo mostró efectos significativos de especie ($F(1,28)=4.95$, $p=0.034$) y sitio ($F(1,28)=6.78$, $p=0.015$), mientras que el carbono edáfico exhibió efectos altamente significativos del sitio ($F(1,28)=11.24$, $p<0.001$) e interacción especie×sitio ($F(1,28)=5.01$, $p=0.033$).

Table 2. Resultados del ANOVA de dos vías para los efectos de especie, sitio y su Interacción sobre los Stocks de Carbono.

Fuente de Variación	gl*	Stock C Aéreo	Stock C Suelo	Stock C Total
		F (valor p)	F (valor p)	F (valor p)
Especie	1	4.95 (0.034*)	3.51 (0.071)	5.82 (0.023*)
Sitio (Localidad)	1	6.78 (0.015*)	11.24 (<0.001***)	8.15 (0.008**)
Especie × Sitio	1	2.13 (0.155)	5.01 (0.033*)	4.31 (0.047*)
Residuales	28			

*gl = grados de libertad. Los valores p significativos se indican con asteriscos: * p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001.

Las comparaciones post-hoc de Tukey HSD para el stock total de carbono revelaron diferencias significativas entre múltiples combinaciones de tratamientos, según se detalla en la Tabla 3. La comparación más contrastante se observó entre EG-Catac y EG-Marcará (diferencia de medias = $-89.94 \text{ Mg C ha}^{-1}$, $p<0.001$), seguida

por EG-Marcará vs PR-Huaraz ($-72.57 \text{ Mg C ha}^{-1}$, $p=0.001$). Estas diferencias evidencian tanto efectos de especie como de localidad, con patrones complejos de interacción que reflejan respuestas diferenciadas de cada especie a las condiciones ambientales específicas de cada sitio.

Tabla 3. Comparaciones múltiples Post-Hoc (Tukey HSD) para el stock de carbono total del ecosistema (Mg C ha^{-1}).

Comparación	Diferencia de medias	Error est.	Valor p
PR-Catac vs EG-Catac	-50.69	19.8	0.015*
PR-Huaraz vs EG-Catac	-17.37	19.8	0.386
EG-Marcará vs EG-Catac	-89.94	19.8	<0.001***
PR-Huaraz vs PR-Catac	33.32	19.8	0.098
EG-Marcará vs PR-Catac	-39.25	19.8	0.054
EG-Marcará vs PR-Huaraz	-72.57	19.8	0.001**

*Se muestran las comparaciones entre los cuatro grupos experimentales, $p < 0.05$ indica diferencia estadísticamente significativa.

El análisis de correlación de Pearson entre variables clave del ecosistema reveló asociaciones significativas entre múltiples componentes, como se presenta en la Tabla 4. Se identificó una correlación negativa significativa entre altitud y carbono aéreo ($r=-0.48$, $p<0.05$), mientras que el

carbono edáfico mostró una correlación positiva con altitud ($r=0.62$) aunque no alcanzó significancia estadística. La correlación más fuerte se observó entre carbono edáfico y carbono total ($r=0.89$), confirmando la importancia del comportamiento edáfico en el stock total del ecosistema.

Tabla 4. Matriz de correlación de Pearson entre variables claves del ecosistema ($n = 32$).

Variable	1. Altitud	2. C Aéreo	3. C Subterráneo	4. C Suelo	5. C Total
1. Altitud	–				
2. C Aéreo	-0.48*	–			
3. C Subterráneo	0.55	-0.21	–		
4. C Suelo	0.62	-0.35	*0.41	–	
5. C Total	0.29	0.51	0.33	0.89	–

*Valores con * indican correlación significativa ($p < 0.05$). C = Carbono.

La Figura 1, revela la distribución del stock total de carbono en los cuatro sitios de estudio mediante una visualización Raincloud. Esta figura integra la densidad de probabilidad, diagramas de caja y datos brutos ($n=8$ por sitio), mostrando una clara variabilidad inter-sitio. EG-Catac (*E. globulus*) presenta la mediana más elevada y mayor dispersión, indicando alto potencial de almacenamiento, pero con inconsistencia. PR-Huaraz (*P. radiata*) exhibe una distribución más concentrada y estable, reflejando menor varianza. En contraste, EG-Marcará (*E. globulus*) registra la mediana más baja y menor dispersión, sugiriendo limitaciones ambientales en altitud baja.

Adicionalmente, el análisis de frecuencia evidencia que los sitios con *P. radiata* (PR-Catac y PR-Huaraz) presentan distribuciones más simétricas y compactas, indicando respuestas consistentes al gradiente altitudinal. Por el contrario, *E. globulus* muestra distribuciones bimodales o asimétricas, particularmente en EG-Catac, donde la amplia

dispersión sugiere alta sensibilidad a factores microambientales no controlados. La superposición parcial de rangos intercuartílicos entre PR-Huaraz y EG-Catac resalta que, en condiciones específicas, *E. globulus* puede igualar el rendimiento de *P. radiata*, aunque su media general es inferior. Esta variabilidad corrobora la interacción especie-sitio reportada en el ANOVA.

Además, los patrones visuales confirman la superioridad de *P. radiata* en almacenamiento total y estabilidad, especialmente en altitudes medias (PR-Huaraz). La notable diferencia entre EG-Catac y EG-Marcará subraya la fuerte dependencia del carbono edáfico con la altitud en *E. globulus*. Estos resultados enfatizan que la selección de especies para reforestación debe considerar no solo el potencial promedio de secuestro, sino también la variabilidad espacial y la resiliencia ante heterogeneidad ambiental, aspectos críticos para optimizar estrategias de mitigación climática en ecosistemas montanos dinámicos.

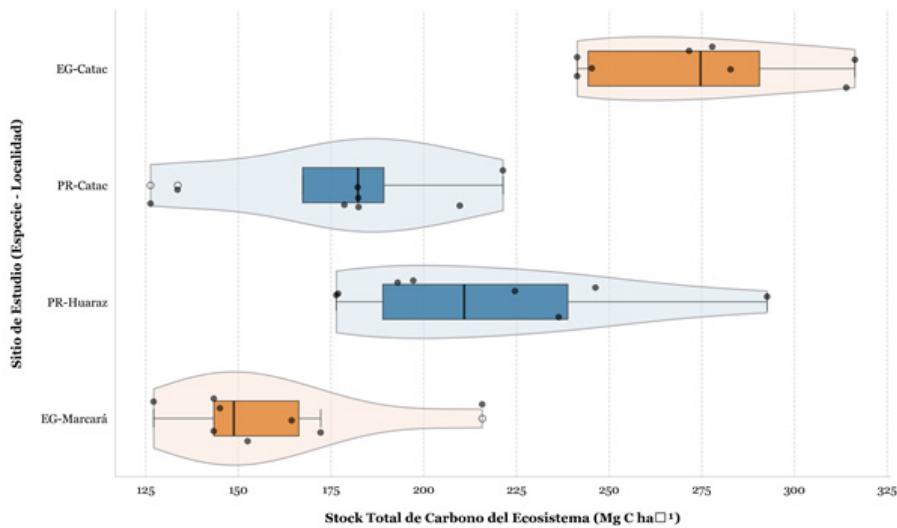


Figura 1. Distribución del Stock Total de Carbono por Sitio de Estudio.

*Distribución del stock total de carbono del ecosistema ($Mg C ha^{-1}$) en los cuatro sitios de estudio. La visualización Raincloud integra tres componentes para cada grupo: (i) una distribución de densidad de probabilidad (la nube), que muestra la forma de la distribución de los datos; (ii) un diagrama de caja y bigotes que resume la mediana, los cuartiles y el rango intercuartílico; y (iii) los puntos de datos individuales (la lluvia, $n=8$ por grupo), que revelan la dispersión real de las mediciones. El color indica la especie dominante en cada sitio.

Por último, el análisis de las propiedades físico-químicas del suelo en la capa superficial (0-25 cm) mostró variaciones notables entre los sitios de estudio. Los suelos presentaron un rango de pH desde condiciones moderadamente ácidas hasta ligeramente ácidas, con el valor más bajo registrado en EG-Catac (5.2 ± 0.3) y el más alto en PR-Huaraz (6.1 ± 0.4).

Adicionalmente, se identificaron diferencias claras en la textura del suelo entre las localidades de mayor y menor altitud. Tanto EG-Catac como PR-Catac, ubicados por encima de los 3600 m s.n.m., presentaron textura franco-arenosa, mientras que PR-Huaraz y EG-Marcará, en altitudes menores, mostraron textura franco-arcillosa.

También, el contenido de carbono orgánico disminuyó con la altitud, registrándose el valor máximo en EG-Catac ($3.15 \pm 0.6\%$) y el mínimo en EG-Marcará ($1.88 \pm 0.4\%$). Paralelamente, el nitrógeno total mostró una tendencia similar, con valores que oscilaron entre $0.28 \pm 0.05\%$ en EG-Catac y $0.17 \pm 0.03\%$ en EG-Marcará.

Por otro lado, la densidad aparente mostró valores relativamente homogéneos entre sitios, variando desde $0.97 \pm 0.10 \text{ g/cm}^3$ en EG-Marcará hasta $1.10 \pm 0.09 \text{ g/cm}^3$ en PR-Catac. Todos los valores se presentan como media \pm desviación estándar, con un tamaño de muestra de $n = 8$ por sitio.

Discusión

Los resultados obtenidos confirman parcialmente que las diferencias en almacenamiento de carbono entre *P. radiata* y *E. globulus* son significativas pero complejas, moduladas por factores ambientales específicos de cada localidad. Al respecto, autores como Villat y Nicholas (10), reportaron tasas de secuestro de $0.95 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para sistemas agroforestales y $1.22 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para prácticas combinadas de cobertura vegetal sin labranza, con valores superiores en perennes (1.10) comparados con anuales (0.76), los presentes resultados muestran stocks totales promedio de $227.4 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para *P. radiata* versus $206.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para *E. globulus*.

En esta dirección, la diferencia de aproximadamente $21.3 \text{ Mg C ha}^{-1}$ a favor de *P. radiata* se alinea con los patrones de especies perennes como Zhongsang 1302 exhiben mayor capacidad de secuestro y liberación de oxígeno (CSOR) correlacionada positivamente con la fotosíntesis neta (Pn) y el índice de área foliar (LAI) (11), factores clave en la eficiencia de uso del agua (WUE) con significancia estadística (ANOVA $p<0.05$). La superioridad de especies perennes, ejemplificada por valores de $18.0024 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ en siempreverdes versus especies caducifolias, coincide con nuestras observaciones donde *P. radiata*, como conífera perennifolia, demuestra

mayor estabilidad en la acumulación de carbono a través del gradiente altitudinal estudiado.

Además, la interacción especie-sitio significativa ($F(1,28)=4.31, p=0.047$) se identificó en el presente análisis. Lo cual encuentra respaldo en los resultados de otros autores (12) quienes reportaron que las estructuras espaciales dispersas favorecen mayor secuestro de carbono, donde la proporción árboles-arbustos representa un factor crítico, aunque no lineal en la efectividad de captura. Sus resultados sobre la importancia del microclima como prerrequisito para optimización del secuestro se corresponden con nuestras observaciones respecto a la influencia de factores edáficos como el pH (rango 5.2-6.1 en nuestros sitios) sobre los patrones de almacenamiento diferencial entre especies.

Complementariamente, Ali et al. (13), demostraron en plantaciones maduras de *Larix principis-rupprechtii* que prácticas de manejo como raleo y poda pueden incrementar los stocks de carbono hasta un 25%, con análisis de varianza revelando interacciones significativas ($F=9.2, p<0.01$) entre tratamientos de manejo y mecanismos de asignación de biomasa, donde aproximadamente 60% se destina a componentes leñosos. Aunque nuestro estudio no evaluó intervenciones de manejo, estos resultados sugieren que las diferencias observadas entre *P. radiata* y *E. globulus* podrían potenciarse

mediante prácticas silviculturales específicas, especialmente considerando la mayor tendencia de *P. radiata* hacia asignación leñosa persistente que fundamenta nuestra hipótesis H1.

Por otra parte, el efecto significativo de la localidad sobre el stock total de carbono ($F(1,28)=8.15, p=0.008$) y particularmente sobre el carbono edáfico ($F(1,28)=11.24, p<0.001$) refleja la importancia de factores ambientales asociados al gradiente altitudinal en la determinación de la capacidad de secuestro de estos ecosistemas. Al respecto, otros autores (14) proporcionan un marco interpretativo relevante al demostrar que la altura de las plantas funciona como indicador para el secuestro de carbono alpino y la respuesta ecosistémica al calentamiento, con correlaciones positivas entre altura de copa ponderada por la comunidad (CWH) y la productividad primaria neta (NEP), así como incrementos del 0.25% en carbono edáfico bajo escenarios de alto calentamiento.

Sin embargo, los resultados de esta investigación contrastan parcialmente con estos patrones, ya que observamos una correlación negativa entre altitud y carbono aéreo ($r=-0.48, p<0.05$), lo cual sugiere que, en el contexto de plantaciones exóticas andinas, las mayores elevaciones imponen limitaciones de crecimiento que reducen la acumulación de biomasa aérea, contrario a los picos de NEP en elevaciones

intermedias para ecosistemas alpinos naturales (14).

Paralelamente, la heterogeneidad observada entre sitios encuentra explicación adicional en otros trabajos (15), donde se utilizó modelos de aprendizaje automático para demostrar que el tipo de rodal forestal y las características edáficas determinan el almacenamiento de carbono orgánico del suelo en regiones montañosas. Sus resultados mostraron diferencias dramáticas entre rodales mixtos de cedro-roble (252 t C ha^{-1}) comparados con áreas sin cobertura arbórea (35 t C ha^{-1}), con modelos GBM alcanzando $R^2=0.99$ versus $R^2=0.44$ para Random Forest. Aunque nuestro estudio registra valores intermedios entre estos extremos, la variabilidad observada entre EG-Catac ($251.08 \text{ Mg C ha}^{-1}$) y EG-Marcará ($161.14 \text{ Mg C ha}^{-1}$) confirma la influencia determinante del sustrato y las condiciones microambientales específicas.

Adicionalmente, El Mderssa et al. (15), reportó una incertidumbre del 39% en sus estimaciones de carbono edáfico se corresponde con las limitaciones inherentes al uso de ecuaciones alométricas generales identificadas en nuestro análisis, sugiriendo la necesidad de desarrollar modelos predictivos más sofisticados que integren tanto variables dasométricas como edáficas para optimizar las estimaciones de carbono en gradientes altitudinales andinos.

En otra dirección, la dominancia del compartimento edáfico en el stock total de carbono, evidenciada por la fuerte correlación entre carbono del suelo y carbono total ($r=0.89$), encuentra sustento teórico en los mecanismos de flujo de carbono disuelto hacia carbono orgánico particulado (16), estos procesos incrementan el secuestro edáfico en 53.52%, compensando subestimaciones previas en modelos de carbono, con contribuciones de carbono de biomasa microbiana a carbono orgánico particulado (MBC-POC) del 20-30% en ecosistemas montanos.

En esa misma línea, la proporción notificada por el autor anterior (16) coincide con las observaciones hechas en la presente investigación donde *P. radiata* exhibe stocks totales superiores (227.4 vs $206.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para *E. globulus*), sugiriendo que los mecanismos de transferencia de carbono desde compartimentos vegetales hacia reservorios edáficos más estables podrían explicar las diferencias interespecíficas observadas. La interacción significativa especie \times sitio para carbono edáfico ($F(1,28)=4.31$, $p=0.047$) refuerza la importancia de considerar estos procesos biogeoquímicos en la evaluación de plantaciones forestales como sumideros de carbono a largo plazo.

De igual manera, los patrones de asignación de carbono entre compartimentos se enriquecen con los métodos de medición del secuestro forestal

de carbono, destacando limitaciones de precisión que varían según la escala de aplicación (17). Estos análisis confirman que el uso combinado de ecuaciones alométricas y métodos como Walkley-Black, empleados en nuestro estudio, representa una aproximación apropiada para estudios comparativos, aunque señalan brechas persistentes en la cuantificación de biomasa aérea que enfatizan las limitaciones temporales inherentes a estudios transversales.

Al respecto, Liu et al. (18), complementan la perspectiva anterior al demostrar que árboles perennifolios almacenan significativamente más carbono ($18.0024 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) comparados con especies caducifolias ($9.9796 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), con diferencias estadísticamente significativas entre tipos y estaciones (ANOVA $p<0.001$). Estos resultados apoyan las observaciones de la presente investigación sobre la superioridad de *P. radiata* como especie perennifolia, sugiriendo que estrategias de densificación poblacional podrían maximizar el potencial de secuestro en ecosistemas altoandinos, alineándose con las implicaciones prácticas derivadas de nuestros resultados para el manejo forestal regional.

Del mismo modo, los resultados obtenidos sugieren que para proyectos de reforestación en altitudes superiores a 3500 m en la región estudiada, *P. radiata* constituye una alternativa más efectiva para el secuestro de carbono

comparada con *E. globulus*, particularmente cuando se consideran objetivos de mitigación climática a largo plazo. Esta recomendación encuentra respaldo en los análisis funcionales de varianza (19) desarrollados para estimaciones de flujos de carbono mediante datos de sensores remotos, quienes demostraron que errores σ_ϵ son mayores en rangos espaciales cortos ($\lambda_\epsilon < 200 \text{ km}$), mientras que los efectos de modelos mantienen coherencia continental ($\lambda_\alpha \approx 800 \text{ km}$).

Análogamente, las limitaciones de replicación espacial en la presente investigación, análogas a las identificadas por Hobbs et al. (19), en sus análisis alométricos, sugieren que la integración de datos de sensores remotos podría mejorar significativamente el monitoreo de dinámicas temporales de carbono en ecosistemas andinos, especialmente para validar las proyecciones derivadas de los presentes resultados transversales.

Sin embargo, es crucial reconocer las limitaciones metodológicas inherentes a este estudio que condicionan la extrapolación de resultados y recomendaciones de manejo. El uso de ecuaciones alométricas generales, aunque validadas regionalmente con precisión aceptable ($MRE=23.3\%$, $ME=0.80$) (20), introduce incertidumbre en las estimaciones de biomasa que podría afectar las comparaciones interespecíficas.

Adicionalmente, el carácter transversal del estudio no captura la dinámica temporal de acumulación de carbono (10). La ausencia de mediciones de flujos de carbono y la concentración geográfica en el entorno del Parque Nacional Huascarán restringen la generalización de resultados a otras regiones andinas con condiciones edafoclimáticas diferentes. Futuras investigaciones deberían enfocarse en desarrollar ecuaciones alométricas específicas para especies en gradientes altitudinales andinos, establecer parcelas permanentes para monitoreo temporal de tasas de secuestro, e integrar mediciones de flujos de CO₂ edáfico para validar los mecanismos de transferencia de carbono entre compartimentos identificados en este estudio.

CONCLUSIONES

Este estudio proporciona evidencia empírica fundamental sobre los patrones de almacenamiento de carbono en plantaciones de especies exóticas a lo largo de gradientes altitudinales andinos, contribuyendo significativamente al conocimiento sobre la efectividad comparativa de *E. globulus* y *P. radiata* como sumideros de carbono en ecosistemas de montaña neotropicales. Los resultados confirman que, si bien ambas especies funcionan como sumideros efectivos de carbono, *P. radiata* demuestra una capacidad de almacenamiento total superior, particularmente en sitios de mayor

altitud, mientras que *E. globulus* exhibe mayor acumulación relativa en el compartimento edáfico en elevaciones intermedias, evidenciando un trade-off especie-ambiente que debe ser considerado en las estrategias regionales de reforestación y mitigación climática.

Paralelamente, la principal contribución teórica de esta investigación reside en la demostración de una interacción significativa entre especie y gradiente altitudinal que modifica los patrones de secuestro de carbono, rechazando paradigmas simplificados de selección de especies basados únicamente en tasas de crecimiento. Al proporcionar la primera comparación empírica directa del stock de carbono total entre estos taxa bajo condiciones de campo controladas en ecosistemas altoandinos, este estudio llena una brecha crítica en la literatura sobre secuestro de carbono en plantaciones de montaña.

Además, las implicaciones prácticas para gestores forestales y diseñadores de políticas públicas en Perú incluyen la recomendación de implementar criterios altitudinales específicos en la selección de especies para proyectos de reforestación, priorizando *P. radiata* en elevaciones superiores a 3500 m y evaluando *E. globulus* para sitios de menor altitud donde su mayor contribución edáfica puede ser ventajosa para objetivos de conservación del suelo.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de intereses para la publicación de este artículo.

REFERENCIAS

1. Luo L, Gao Y, Regan C, Summers D, Connor J, O’Hehir J, et al. Emissions offset incentives, carbon storage and profit optimization for Australian timber plantations. *For Policy Econ.* 2024;159:103125. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934123002204>
2. Prada C, Heineman K, Pardo M, Piponiot C, Dalling J. Soil and biomass carbon storage is much higher in Central American than Andean montane forests. *Biogeosciences.* 2025;22(14):3615-34. <https://bg.copernicus.org/articles/22/3615/2025/>
3. Pinto E, Cuesta F, Bernardi A, Llerena-Zambrano M, Pérez ÁJ, Sande M van der, et al. Determinants of above-ground carbon stocks and productivity in secondary forests along a 3000-m elevation gradient in the Ecuadorian Andes. *Plant Ecol Divers.* 2023;16(3-4):127-46. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17550874.2023.2274844>
4. Martin A, Sietiö O, Meyer N, Mganga K, Kalu S, Adamczyk S, et al. Microbial carbon use efficiency and soil organic carbon stocks across an elevational gradient in the Peruvian Andes. *Appl Soil Ecol.* 2024;195:105228. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0929139323004262>
5. Montes R, Bird M, da Silva Carvalho L, Serrano J, Quesada C, Feldpausch T. Climatic and Edaphic Drivers of Soil Organic Carbon and Pyrogenic Carbon Stocks Across Elevation and Disturbance Gradients in Colombian Andean Forests. *Glob Change Biol.* 2025;31(7):e70135. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.70135>
6. Ribeiro F, Gatto A, Oliveira A de, Pulrolnik K, Valadão B, Araújo B, et al. Carbon Storage in Different Compartments in Eucalyptus Stands and Native Cerrado Vegetation. *Plants.* 2023;12(14). <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/14/2751>
7. Jin S, Zhang E, Guo H, Hu C, Zhang Y, Yan D. Comprehensive evaluation of carbon sequestration potential of landscape tree species and its influencing factors analysis: implications for urban green space management. *Carbon Balance Manag.* 2023;18(1). <https://doi.org/10.1186/s13021-023-00238-w>
8. Vento B, Cuesta F, Cavieres L. Editorial: Carbon sequestration and climate change in crops, natural vegetation, and wetland dynamics in the high Andes. *Front Plant Sci.* 2023;14. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1338577/full>
9. Elizabeth F, Eugenia C, Sergey S, Citlalli L, Velázquez-Rosas N. Carbon storage in mountain cloud forest communities, Jalpan de Serra, Querétaro, México. *Carbon Balance Manag.* 2025;20(1):41. <https://link.springer.com/article/10.1186/s13021-025-00324-1>
10. Villat J, Nicholas K. Quantifying soil carbon sequestration from regenerative agricultural practices in crops and vineyards. *Front Sustain Food Syst.* 2024;7. <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2023.1234108/full>
11. Zhang K, Yang Y, Zhai Z, Fang Y, He M, Cheng J, et al. Evaluation of Carbon Sequestration and Oxygen-Release Potential of Six Mulberry Tree Varieties During Summer. *Forests.* 2024;15(10). <https://www.mdpi.com/1999-4907/15/10/1819>
12. Dong H, Chen Y, Huang X, Cheng S. Multi-scenario simulation of spatial structure and carbon sequestration evaluation in residential green space. *Ecol Indic.* 2023;154:110902. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X23010440>
13. Ali J, Haoran W, Mehmood K, Muhammad B, Hussain W, Hussain K, et al. Evaluating biomass and carbon stock responses to thinning and pruning in mature Larix principis-rupprechtii Mayr stands: a case study from Northern China. *Front For Glob Change.* 2025;8. <https://www.frontiersin.org/journals/forests-and-global-change/articles/10.3389/ffgc.2025.1592009/full>
14. Quan Q, He N, Zhang R, Wang J, Luo Y, Ma F, et al. Plant height as an indicator for alpine carbon sequestration and ecosystem response to warming. *Nat Plants.* 2024;10(6):890-900. <https://www.nature.com/articles/s41477-024-01705-z>

- 15.** El Mderssa M, Elmalki M, Whalen J, Ikraoun H, Aliyat F, Dallahi Y, et al. Forest stand and soil types determine soil organic carbon storage in the Middle Atlas region of Morocco using machine learning models. *Earth.* 2024;36(1):1-10. <https://doi.org/10.1080/27669645.2024.2400432>
- 16.** Si Q, Chen K, Wei B, Zhang Y, Sun X, Liang J. Dissolved carbon flow to particulate organic carbon enhances soil carbon sequestration. *SOIL.* 2024;10(2):441-50. <https://soil.copernicus.org/articles/10/441/2024/>
- 17.** Weifeng W, Yuxi D, Lixin Z, Bo W, Xiaojing LI. Review on forest carbon sequestration counting methodology under global climate change. *J NANJING For Univ.* 2016;40(03):170-6. <http://nldxb.njfu.edu.cn/EN/10.3969/j.issn.1000-2006.2016.03.028>
- 18.** Liu H, Zhang J, Wang Z. Assessing and optimizing the potential for climate change mitigation and carbon sequestration in urban residential green spaces: energizing sustainable cities. *Front Environ Sci.* 2025;13. <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2025.1519297/full>
- 19.** Hobbs J, Katzfuss M, Nguyen H, Yadav V, Liu J. Functional analysis of variance (ANOVA) for carbon flux estimates from remote sensing data. *Geosci Model Dev.* 2024;17(3):1133-51. <https://gmd.copernicus.org/articles/17/1133/2024/>
- 20.** Ramos R, Andrade H, Vera R, Esparza J, Panama P, Segura M, et al. Allometric Models to Estimate Aboveground Biomass of Individual Trees of *Eucalyptus saligna* Sm in Young Plantations in Ecuador. *Int J Plant Biol.* 2025;16(2). <https://www.mdpi.com/2037-0164/16/2/39>