

USO DEL BIOCARBÓN EN LA RESTAURACIÓN DEL ECOSISTEMA FORESTAL DEGRADADO POR MINERÍA ALUVIAL EN MADRE DE DIOS

Use of biochar in the restoration of the forest ecosystem degraded by alluvial mining in Madre de Dios

Alberto Mamani Cahuana¹ y José Eloy Cuellar Bautista ¹

¹Universidad Nacional Agraria La Molina

REGISTROS

Recibido el 16/02/2026
Aceptado el 22/04/2026
Publicado el 12/05/2026



PALABRAS CLAVE

Biocarbón,
restauración forestal,
ecosistema degradado,
minería aluvial,
Ceiba pentandra,
Erythrina ulei.

KEYWORDS

Biochar,
forest restoration,
degraded ecosystem,
alluvial mining,
Ceiba pentandra,
Erythrina ulei.

RESUMEN

El uso del biocarbón en plantaciones forestales constituye una alternativa innovadora ante el desafío ecológico y socioeconómico de restaurar ecosistemas forestales degradados por minería aluvial en la Amazonía peruana. En la presente investigación se evaluó el efecto de enmiendas de biocarbón sobre la sobrevivencia y el crecimiento temprano de *Ceiba pentandra* y *Erythrina ulei* en una parcela de 0,5 ha establecida con un distanciamiento de 3 × 3 m bajo un diseño experimental completamente al azar. A los 12 meses de instalada la plantación de restauración, bajo los tratamientos de biocarbón enriquecido (T3), biocarbón puro (T2) y testigo sin enmienda (T1), la sobrevivencia temprana de ambas especies superó el 80 % en T2 y T3, categoría «muy buena» según el criterio de Centeno (1993). Los mayores valores de crecimiento en altura y diámetro basal correspondieron a T3: 84,56 cm y 1,00 cm para *C. pentandra*, y 258,25 cm y 3,88 cm para *E. ulei*. El análisis de varianza del crecimiento en altura y diámetro basal resultó altamente significativo ($p < 0,001$) para los tres tratamientos en ambas especies. Las comparaciones de medias mediante la prueba t de Student indicaron que T3 presentó el mayor efecto sobre el crecimiento temprano respecto a T2 y T1 ($p < 0,001$). Estos resultados son relevantes para el escalamiento de esfuerzos de restauración de ecosistemas forestales degradados por minería aluvial y pueden ser adoptados mediante programas de difusión dirigidos a los actores involucrados.

ABSTRACT

The use of biochar in forest plantations constitutes an innovative alternative to the ecological and socioeconomic challenge of initiating restoration processes of forest ecosystems degraded by alluvial mining in the Peruvian Amazon. In the present research, the effect of biochar amendments on the survival and early growth of *Ceiba pentandra* and *Erythrina ulei* installed in a 0,5 ha plot with a distance of 3 × 3 m was evaluated following a completely randomized experimental design. After 12 months of the restoration plantation, installed under treatments of enriched biochar (T3), pure biochar (T2) and control (T1), it was evident that the early survival of the species was greater than 80 %, categorized as very good, for treatments T3 and T2. Likewise, the highest growth values in height and basal diameter were recorded for treatment T3 with 84,56 cm and 1,00 cm for *C. pentandra* and 258,25 cm and 3,88 cm for *E. ulei*. The analysis of variance of growth in height and basal diameter of the studied species was highly significant ($p < 0,001$) for the applied treatments. Furthermore, in the comparative analysis of treatment means, using the T-Student test, it was found that treatment T3 has a greater significant effect ($p < 0,001$) on the early growth of the species, compared to T2 and T1. This information is relevant for the scaling and replication of restoration efforts of the forest ecosystem degraded by alluvial mining, it can be adopted and disseminated through the actors involved and applicable regulatory provisions.

1. Introducción

La Amazonía posee un gran potencial para la extracción de minerales —especialmente oro, estaño, níquel, bauxita, cobre, manganeso y hierro (Sonter et al., 2017)—, lo que ha impulsado la expansión de la minería, tanto formal como ilegal. Un análisis reciente identificó 2 312 sitios de extracción ilegal de oro con más de 500 000 mineros informales activos en seis países sudamericanos: Perú, Brasil, Bolivia, Venezuela, Ecuador y Colombia (RAISG, 2019).

En Madre de Dios, la minería informal e ilícita se expandió aceleradamente desde principios del año 2000, transformando grandes extensiones de bosques primarios en terrenos abandonados y contaminados con mercurio (Asner et al., 2013). Se estima que 100 000 ha de bosques tropicales han sido deforestadas y sus suelos removidos por la minería aurífera aluvial en esta región (Caballero et al., 2018). Los suelos resultantes —ácidos, arenosos y de baja fertilidad— presentan desafíos adicionales para la recuperación del ecosistema forestal en comparación con suelos no perturbados (Ilunga et al., 2015).

La mayoría de los proyectos de reforestación en los trópicos fracasan por un conocimiento insuficiente sobre la elección de especies, sus tasas de crecimiento y sobrevivencia en condiciones edáficas adversas, así como sobre las necesidades de fertilización en áreas degradadas por la extracción de oro (Cooke y Johnson, 2002). En este contexto, las decisiones de instalar y manejar plantaciones con fines de restauración dependerán de la tolerancia de las especies a suelos extremadamente perturbados y de la disponibilidad de insumos para aplicar tratamientos silvícolas apropiados (Román-Dañobeytia et al., 2015).

El biocarbón (*biochar*) —producto sólido rico en carbono obtenido mediante pirólisis de biomasa vegetal en condiciones de oxígeno limitado— ha emergido como enmienda edáfica con capacidad de mejorar la fertilidad, la estructura y la retención hídrica de suelos degradados (Glaser et al., 2002; Thomas y Gale, 2015). Sin embargo, en la Amazonía peruana existen escasos estudios que evalúen su efecto en plantaciones forestales de restauración sobre suelos perturbados por minería aluvial, constituyendo una brecha de conocimiento que limita la formulación de protocolos de restauración basados en evidencia.

La presente investigación tiene como objetivo determinar el efecto del biocarbón —en sus formulaciones pura y enriquecida— sobre la sobrevivencia y el crecimiento temprano de *Ceiba pentandra* (Gaertn.) y *Erythrina ulei* Harms, dos especies forestales nativas instaladas en un ecosistema degradado por minería aluvial en Madre de Dios.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

La investigación se desarrolló en la concesión minera Paolita, ubicada en el distrito de Laberinto, provincia de Tambopata, departamento de Madre de Dios, Perú (432 051 E; 8 598 045 N, datum WGS84; altitud 200 m s. n. m.). Se estableció una plantación forestal de 0,5 ha (denominada sitio 4) sobre un suelo previamente intervenido por minería aurífera aluvial.

2.2. Características del sitio

El clima es tropical cálido y húmedo, con temperatura media anual de 25 °C y precipitación anual de entre 2 200 y 2 400 mm; las temperaturas máximas oscilan entre 31 °C y 33 °C, y las mínimas entre 19 °C y 21 °C; la precipitación mensual varía entre 190 y 650 mm (SENAMHI, 2021). El suelo del sitio experimental, caracterizado por (CINCIA, 2022), presentó reacción ácida, baja fertilidad, deficiencias en drenaje, fósforo disponible y materia orgánica, y textura predominantemente arenosa.

2.3. Diseño experimental

La plantación se estableció en enero de 2017 en una parcela de 0,5 ha con distanciamiento de 3 m × 3 m, bajo un diseño experimental completamente al azar (DCA). Se instalaron 30 plantas por tratamiento y por especie (90 plantas por especie; 180 plantas en total).

2.4. Tratamientos

Los tratamientos del experimento fueron:

- **T1** (testigo): sin enmienda edáfica.
- **T2** (biocarbón puro): aplicación de 1 kg de biocarbón en forma radial a 20 cm de cada planta al momento del trasplante.
- **T3** (biocarbón enriquecido): mezcla de 1 kg de biocarbón puro + 90 ml de biol + 18 ml de microorganismos eficientes (ME) activados + 90 g de fertilizante NPK por planta, aplicada al momento del trasplante.

La dosificación de biocarbón equivalió a aproximadamente 1,1 Mg ha⁻¹, nivel considerado bajo según la literatura (Glaser et al., 2002), de manera que no restringiera el crecimiento temprano.

2.5. Preparación del biocarbón

El biocarbón fue elaborado por CINCIA a partir de cáscaras de castaña (*Bertholletia excelsa*), un residuo agroforestal local, mediante la tecnología de combustión Top-Lit Updraft (TLUD), en la que la ignición se inicia desde la parte superior y desciende. El producto obtuvo la certificación de calidad premium según el estándar europeo Biochart Certificate (Lefebvre et al., 2019).

2.6. Variables de estudio

Las variables de respuesta fueron: (a) sobrevivencia (variable binaria: 1 = vivo, 0 = muerto), evaluada a los 12 meses mediante conteo de individuos vivos por especie y tratamiento; (b) crecimiento en altura (cm), medido con wincha desde el nivel del suelo hasta el ápice; y (c) crecimiento en diámetro basal (cm), medido con vernier en la base del tallo. El crecimiento se calculó como la diferencia entre la medición final (2018) y la medición inicial (2017), conforme a (Hoffmann y Poorter, 2002).

Las fórmulas de crecimiento aplicadas fueron:

$$\text{CRH} = [\text{altura final en 2018} - \text{altura inicial en 2017}]$$

$$\text{CRDAB} = [\text{diámetro final en 2018} - \text{diámetro inicial en 2017}]$$

2.7. Análisis estadístico

Los análisis se realizaron con el programa estadístico R. La sobrevivencia se analizó mediante la prueba de proporciones de chi-cuadrado. Las variables continuas de crecimiento se describieron con estadísticas de posición y dispersión (media ± desviación estándar) y se visualizaron mediante diagramas de caja. Los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas se verificaron antes del ANOVA de un factor. Las comparaciones entre pares de tratamientos se realizaron mediante la prueba t de Student con corrección de Bonferroni para comparaciones múltiples.

3. Resultados

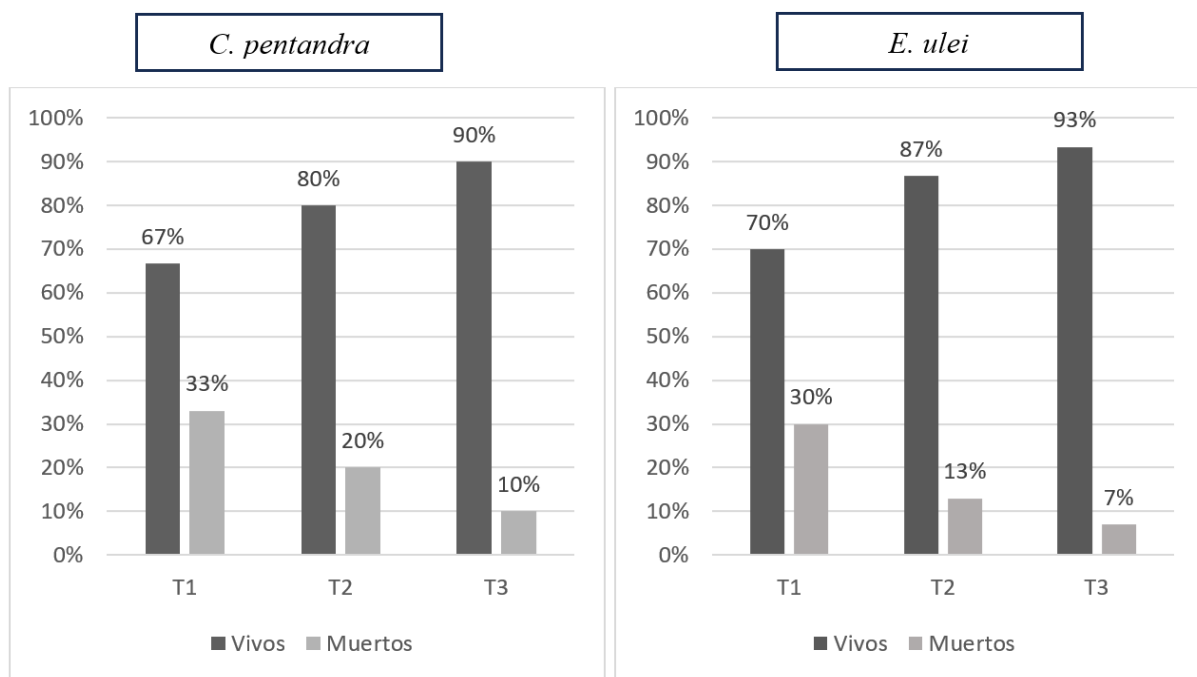
Sobrevivencia temprana de *Ceiba pentandra* y *Erythrina ulei*

A los 12 meses de instalada la plantación, la sobrevivencia fue mayor en T3 que en T2 y T1 para ambas especies (figura 1). Según la escala de (Centeno, 1993), los tratamientos T2 y T3 alcanzaron la categoría «muy buena» (80–100 %) en ambas especies, mientras que T1 se ubicó en la categoría «buena» (60–79 %).

La prueba de chi-cuadrado sobre proporciones de sobrevivencia arrojó, para *C. pentandra*, un estadístico de $\chi^2 = 4,94$ (gl = 2, $p = 0,08$), valor que no alcanzó significación estadística a $\alpha = 0,05$, lo que indica que no se detectaron diferencias estadísticamente significativas en la sobrevivencia de esta especie entre los tres tratamientos. Para *E. ulei*, el estadístico fue $\chi^2 = 6,24$ (gl = 2, $p = 0,04$), revelando diferencias significativas entre tratamientos en la sobrevivencia de esta especie.

Figura 1

Sobrevivencia de *Ceiba pentandra* y *Erythrina ulei* por tratamientos.



Nota. Porcentaje de sobrevivencia temprana de *Ceiba pentandra* y *Erythrina ulei* a los 12 meses de instalada la plantación forestal, bajo tres tratamientos de enmienda de biocarbón (T1: testigo; T2: biocarbón puro; T3: biocarbón enriquecido). Madre de Dios, Perú, 2018. Elaboración propia.

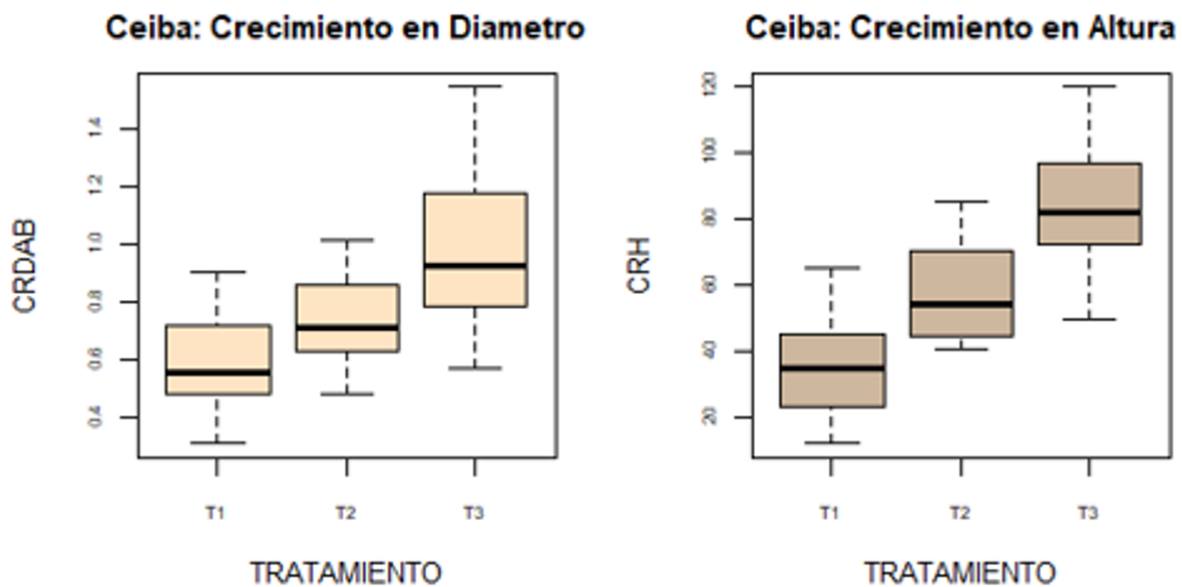
3.1. Crecimiento temprano en altura y diámetro de *Ceiba pentandra*

El análisis exploratorio del crecimiento temprano de *C. pentandra*, a los 12 meses de instalada la plantación forestal, según las estadísticas promedio y su desviación estándar (Tabla 1) así como el diagrama de cajas (Figura 2) las enmiendas de biocarbón mejoraron el crecimiento de esta especie, así la altura promedio para T3 (84,56 cm) fue superior a T2 (57,71 cm) y T1 (35,15 cm); similar comportamiento se observó para el crecimiento en diámetro basal, así para T3 (1,00 cm) resultó superior a T2 (0,74 cm) y T1 (0,60 cm).

Tabla 1Valores promedio anual del crecimiento en altura y diámetro de *Ceiba pentandra*

Tratamiento	N° plantas	Diámetro ± Std	Altura ± Std
T1	20	0,60 ± 0,18	35,15 ± 14,97
T2	24	0,74 ± 0,15	57,71 ± 14,99
T3	27	1,00 ± 0,29	84,56 ± 19,44

Nota. Elaboración propia.

Figura 2Crecimiento en altura y diámetro de *Ceiba pentandra*

Nota. Diagramas de caja del crecimiento en altura (cm) y diámetro basal (cm) de *Ceiba pentandra* a los 12 meses de plantación, por tratamiento (T1: testigo; T2: biocarbón puro; T3: biocarbón enriquecido). Las líneas centrales representan la mediana; los límites de la caja, los cuartiles Q1 y Q3; los bigotes, $1,5 \times IQR$; y los puntos, valores atípicos. Elaboración propia.

En el análisis de la varianza del crecimiento en altura de *C. pentandra* se encontró que los tratamientos son importantes a raíz del valor F calculado de 50,47 (p valor $< 0,001$), como se visualiza en la Tabla 2. Asimismo, el ANOVA en el crecimiento en diámetro basal resultó significativo los tratamientos con un valor F calculado de 20,56 (p valor $< 0,001$), como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 2Análisis de varianza del crecimiento en altura de *C. pentandra*

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr(>F)
Tratamiento	2	28 583	14 291,6	50,47	3,645 e-14***
Residuales	68	19 254	283,1	-	-

Nota. ***: $p < 0,001$; **: $p < 0,01$; *: $p < 0,05$; ns: no significativo.

Tabla 3*Análisis de varianza del crecimiento en diámetro de Ceiba pentandra*

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr(>F)
Tratamiento	2	1,99	0,99	20,56	1,03 e-07***
Residuales	68	3,30	0,05	-	-

Nota. ***: p <0,001; **: p <0,01; *: p <0,05; ns: no significativo.

En el análisis comparativo de medias de los tratamientos, mediante la prueba T-Student, se halló que el tratamiento biocarbón enriquecido (T3) tiene mayor efecto significativo (p valor < 0.001) en el crecimiento de la altura respecto al tratamiento biocarbón puro (T2) y al testigo (T1), similar efecto resultó en el crecimiento en diámetro basal, ver Tabla 4, Tabla 5 y Figura 3.

Tabla 4*Prueba de comparación de T-Student de los tratamientos en crecimiento de altura de Ceiba pentandra*

Comparación de tratamientos	Diferencia	P value	Significancia	IC 95 % inf.	IC 95 % sup.
T2 - T1	22,55	0	***	32,72	12,39
T3 - T1	49,40	0	***	59,31	39,49
T3 - T2	26,84	0	***	36,26	17,42

Nota. ***: p <0,001; **: p <0,01; *: p <0,05; ns: no significativo.

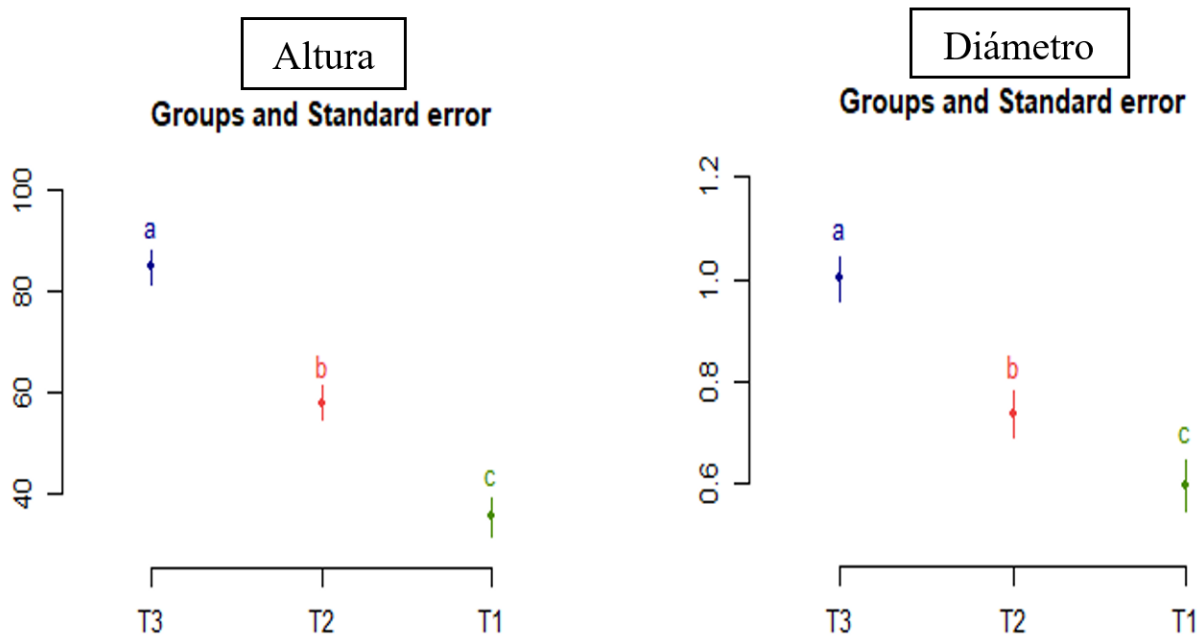
Tabla 5*Prueba de comparación de T-Student de los tratamientos en crecimiento del diámetro de Ceiba pentandra*

Comparación de tratamientos	Diferencia	P value	Significancia	IC 95 % inf.	IC 95 % sup.
T2 - T1	0,13	0,04	***	0,27	0,005
T3 - T1	0,40	0,00	***	0,53	0,27
T3 - T2	0,26	0,00	***	0,38	0,14

Nota. ***: p <0,001; **: p <0,01; *: p <0,05; ns: no significativo.

Figura 3

Comparación del efecto de los tratamientos en el crecimiento en altura y diámetro de *Ceiba pentandra*



Nota. Altura (izquierda) y Diámetro (derecha). Comparación de medias del crecimiento en (a) altura y (b) diámetro basal de *Ceiba pentandra* entre tratamientos (T1, T2, T3), mediante la prueba t de Student. Barras con letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,001$).

3.2. Crecimiento temprano en altura y diámetro de *Erythrina ulei*

El análisis exploratorio del crecimiento temprano de la *E. ulei*, a los 12 meses de instalada la plantación forestal, según las estadísticas promedio y su desviación estándar (Tabla 6) así como el diagrama de cajas (Figura 4) las enmiendas de biocarbón mejoraron el crecimiento de esta especie, así la altura promedio para T3 (258,25 cm) fue superior a T2 (161,12 cm) y T1 (108,05 cm); similar comportamiento se observó para el crecimiento en diámetro basal, así para T3 (3,88 cm) resultó superior a T2 (3,04 cm) y T1 (1,52 cm).

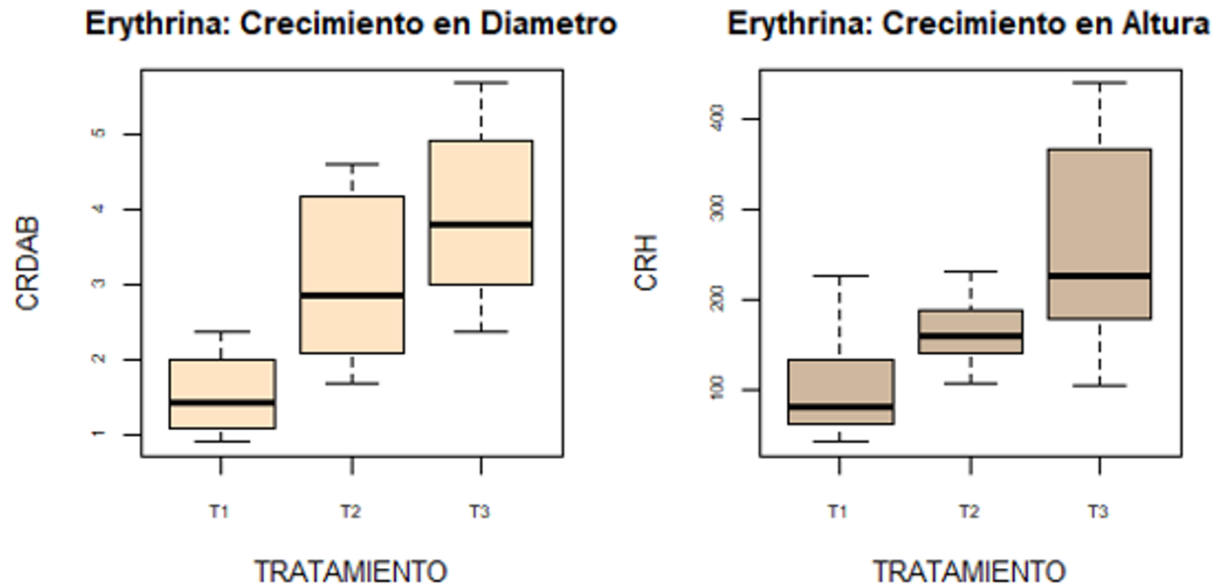
Tabla 6

Valores promedio anual del crecimiento en altura y diámetro de *Erythrina ulei*

Comparación de tratamientos	Diferencia	P value	Significancia	IC 95 % inf.	IC 95 % sup.
T2 - T1	0,13	0,04	***	0,27	0,005
T3 - T1	0,40	0,00	***	0,53	0,27
T3 - T2	0,26	0,00	***	0,38	0,14

Nota. Elaboración propia.

Figura 4
Crecimiento en altura y diámetro de *Erythrina ulei*



Nota. Diagramas de caja del crecimiento en altura (cm) y diámetro basal (cm) de *Erythrina ulei* a los 12 meses de plantación, por tratamiento (T1: testigo; T2: biocarbón puro; T3: biocarbón enriquecido). Las líneas centrales representan la mediana; los límites de la caja, los cuartiles Q1 y Q3; los bigotes, 1,5 × IQR; y los puntos, valores atípicos. Elaboración propia.

En el análisis de la varianza del crecimiento en altura de *E. ulei* se encontró que los tratamientos son importantes a raíz del valor F calculado de 26,70 (p valor < 0,001), como se muestra en la Tabla 7. Asimismo, en el crecimiento diámetro basal resultó significativo los tratamientos con un valor F calculado de 42,70 (p valor < 0,001) como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 7
Análisis de varianza del crecimiento en altura de *Erythrina ulei*

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr(>F)
Tratamiento	2	288 962	144 481	26,70	2,11 e-09***
Residuales	72	389 561	5 411	-	-

Nota. ***: p < 0,001; **: p < 0,01; *: p < 0,05; ns: no significativo.

Tabla 8
Análisis de varianza del crecimiento en diámetro de *Erythrina ulei*

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr(>F)
Tratamiento	2	67,54	33,77	42,70	5,89 e-13***
Residuales	72	56,93	0,79	-	-

Nota. ***: p < 0,001; **: p < 0,01; *: p < 0,05; ns: no significativo.

En el análisis comparativo de medias de los tratamientos con la prueba T-Student, se determinó que el tratamiento biocarbón enriquecido (T3) tiene mayor efecto significativo (p valor < 0,001) en el crecimiento de la altura respecto al tratamiento biocarbón puro (T2) y al testigo (T1), similar efecto resultó en el crecimiento en diámetro basal, ver Tabla 9, Tabla 10 y Figura 5.

Tabla 9

Prueba T-Student comparación de los tratamientos en crecimiento de altura de Erythrina ulei

Comparación de tratamientos	Diferencia	P value	Significancia	IC 95 % inf.	IC 95 % sup.
T2 - T1	53,06	0,01	*	96,08	10,04
T3 - T1	150,20	0,00	***	192,53	107,87
T3 - T2	97,13	0,00	***	137,07	57,19

Nota. ***: p <0,001; **: p <0,01; *: p <0,05; ns: no significativo.

Tabla 10

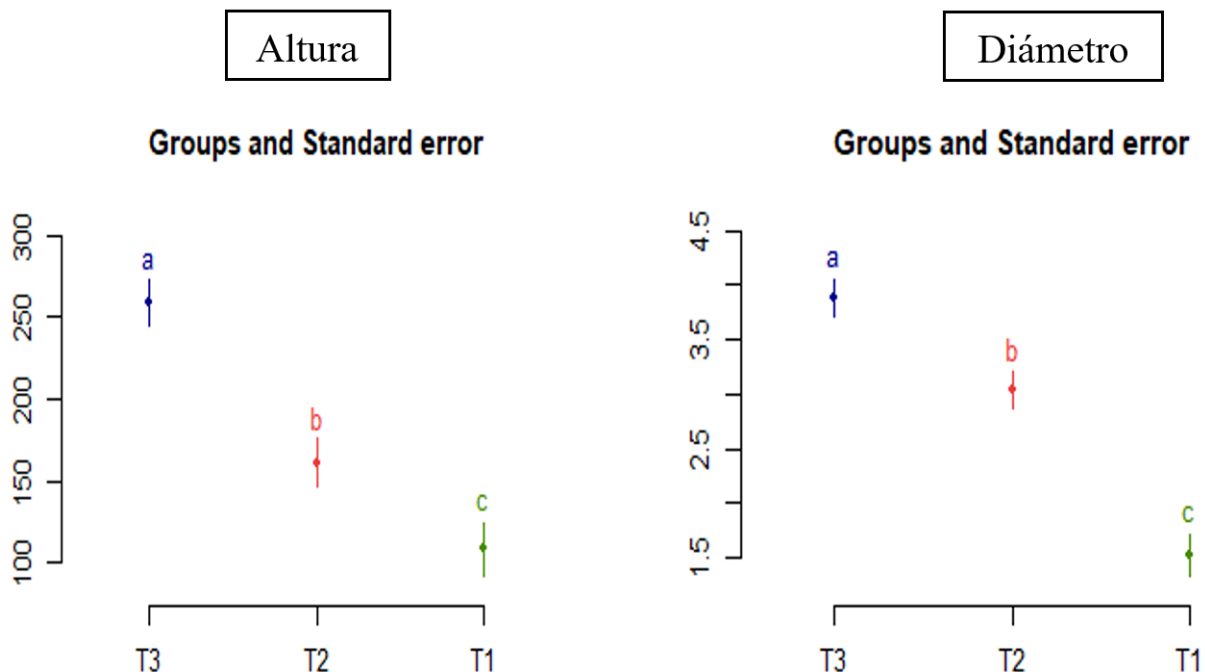
Prueba T-Student comparación de los tratamientos en crecimiento del diámetro de Erythrina ulei

Comparación de tratamientos	Diferencia	P value	Significancia	IC 95 % inf.	IC 95 % sup.
T2 - T1	1,52	0e+00	***	2,04	1,01
T3 - T1	2,36	0e+00	***	2,87	1,90
T3 - T2	0,83	<0,001	***	1,32	0,40

Nota. ***: p <0,001; **: p <0,01; *: p <0,05; ns: no significativo.

Figura 5

Comparación del efecto de los tratamientos en el crecimiento en altura y diámetro de Erythrina ulei



Nota. Diámetro (izquierda) y Altura (derecha). Comparación de medias del crecimiento en (a) altura y (b) diámetro basal de *Erythrina ulei* entre tratamientos (T1, T2, T3), mediante la prueba t de Student. Barras con letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas (p < 0,001). Elaboración propia.

4. Discusión

Este trabajo evalúa el efecto del biocarbón sobre la sobrevivencia y el crecimiento temprano de *Ceiba pentandra* y *Erythrina ulei* en suelos degradados por minería aluvial, aportando evidencia empírica relevante para protocolos de restauración en la Amazonía peruana.

En términos de sobrevivencia, las enmiendas de biocarbón mejoraron los porcentajes registrados respecto al testigo sin enmienda, aunque la diferencia solo fue estadísticamente significativa para *E. ulei* ($p = 0,04$). La respuesta diferenciada entre especies es consistente con la heterogeneidad reportada por (Thomas y Gale, 2015) para distintas especies forestales ante enmiendas con biocarbón. (Furtado et al., 2016) señalan que la adición de biocarbón puede atenuar la germinación deficiente y el crecimiento limitado inducidos por atributos edáficos pobres, mecanismo que explicaría los valores elevados de sobrevivencia en T2 y T3. (Román-Dañobeytia et al., 2021) reportaron, en un ensayo con 51 especies en áreas degradadas por minería artesanal en la misma región, valores de sobrevivencia de entre 50 y 75 % para *C. pentandra* y *E. ulei* al año de plantación con tratamientos de biocarbón; los valores obtenidos en el presente estudio ($>80\%$ en T2 y T3) son superiores, posiblemente por la combinación de biocarbón con microorganismos eficientes y fertilizante NPK en T3.

El crecimiento temprano en altura y diámetro basal fue significativamente superior en T3 para ambas especies ($p < 0,001$), lo que confirma el efecto sinérgico de la combinación de biocarbón, biol, microorganismos eficientes y fertilizante mineral. Este hallazgo es coherente con (Furtado et al., 2016), quienes documentan que la aplicación conjunta de bacterias y biocarbón estimula el desarrollo vegetal y la eficiencia en el uso de nutrientes. (Singh et al., 2022) destacan que, en suelos ácidos, el biocarbón mejora el suministro de nutrientes esenciales y acelera la actividad microbiana, condiciones que habrían favorecido el crecimiento en el sitio experimental, caracterizado por suelo ácido, arenoso y de baja fertilidad.

Los efectos positivos del biocarbón sobre el crecimiento en suelos arenosos son igualmente coherentes con (Haider et al., 2015), quienes documentan incrementos en la tasa fotosintética y en la relación agua-planta-suelo bajo condiciones de buen drenaje. La dosis empleada ($\approx 1,1 \text{ Mg ha}^{-1}$) se ubica dentro del rango de dosis bajas que, según (Glaser et al., 2002) y (Hunt et al., 2010), producen efectos positivos sin los riesgos fitotóxicos asociados a dosis superiores a 40 Mg ha^{-1} .

El destacado crecimiento de *E. ulei* en T3 (258,25 cm de altura al año) puede explicarse parcialmente por su condición de leguminosa fijadora de N_2 : (Batterman et al., 2013) demostraron que la inclusión de especies fijadoras de nitrógeno en plantaciones forestales tropicales acelera el ciclo del nitrógeno y potencia la capacidad de secuestro de CO_2 a lo largo de la sucesión. Este atributo funcional añade valor estratégico a *E. ulei* en diseños de restauración que busquen recuperar simultáneamente la productividad primaria y el almacenamiento de carbono.

Desde una perspectiva de manejo adaptativo, los resultados de este estudio, junto con los de (Román-Dañobeytia et al., 2021), proporcionan una base empírica para estandarizar protocolos de restauración con biocarbón en Madre de Dios. No obstante, se requieren estudios con mayor duración temporal (≥ 3 años) y mayor número de especies para establecer relaciones dosis-respuesta robustas y evaluar la persistencia del efecto del biocarbón en suelos tropicales degradados.

5. Conclusiones

- A los 12 meses de la plantación forestal de restauración, la sobrevivencia temprana de *Erythrina ulei* presentó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($\chi^2 = 6,24$; $p = 0,04$), con valores superiores al 80 % para los tratamientos de biocarbón puro (T2) y

biocarbón enriquecido (T3), categorizados como «muy buenos». Para *Ceiba pentandra*, aunque los valores de sobrevivencia superaron el 80 % en T2 y T3, las diferencias entre tratamientos no fueron estadísticamente significativas ($p = 0,08$).

- Los mayores valores de crecimiento en altura y diámetro basal al año de plantación correspondieron al tratamiento de biocarbón enriquecido (T3): $84,56 \pm 19,44$ cm y $1,00 \pm 0,29$ cm para *C. pentandra*, y $258,25 \pm 101,69$ cm y $3,88 \pm 1,01$ cm para *E. ulei*. Las diferencias respecto a T2 y T1 fueron estadísticamente significativas ($p < 0,001$) para ambas variables y ambas especies.
- Las enmiendas de biocarbón, especialmente la formulación enriquecida con biol, microorganismos eficientes y fertilizante NPK, tuvieron un efecto significativo ($p < 0,001$) en el crecimiento temprano en altura y diámetro basal de *C. pentandra* y *E. ulei* en condiciones de suelo ácido, arenoso y de baja fertilidad.
- El uso del biocarbón en plantaciones forestales de restauración constituye una alternativa promisoriosa ante el desafío ecológico y socioeconómico de recuperar ecosistemas degradados por minería aluvial en la Amazonía peruana, aunque se requieren estudios de seguimiento a mediano y largo plazo para evaluar la persistencia de sus efectos.
- Estudios futuros deberían examinar el efecto del biocarbón en métricas ecosistémicas más amplias, como la diversidad de la comunidad microbiana del suelo y el stock de carbono, para cuantificar la contribución de estas plantaciones a la recuperación integral del ecosistema.» El autor evaluará si incorpora esta conclusión y en qué forma.
- Se recomienda utilizar las parcelas experimentales establecidas por CINCIA en Madre de Dios como plataformas demostrativas para promover la adopción del biocarbón en programas de restauración de ecosistemas forestales degradados por la minería aluvial, articulando la difusión con los marcos normativos vigentes.

Agradecimientos

Mi gratitud a los profesores, José Cuellar, Salomón Helfgot, Felipe Mendiburú y Gilberto Domínguez, por sus asesoramientos durante el desarrollo de esta investigación.

Conflicto de intereses

Los autores no declaran haber tenido conflicto de intereses.

Referencias

- Asner, G. P., Llactayo, W., Tupayachi, R., y Luna, E. R. (2013). Elevated rates of gold mining in the Amazon revealed through high-resolution monitoring. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(46), 18454–18459. <https://doi.org/10.1073/pnas.1318271110>
- Batterman, S. A., Hedin, L. O., van Breugel, M., Ransijn, J., Craven, D. J., y Hall, J. S. (2013). Key role of symbiotic dinitrogen fixation in tropical forest secondary succession. *Nature*, 502(7470), 224–227. <https://doi.org/10.1038/nature12525>
- Caballero, J., Messinger, M., Román-Dañobeytia, F., Ascorra, C., Fernandez, L., y Silman, M. (2018). Deforestation and forest degradation due to gold mining in the Peruvian Amazon: a 34-year perspective. *Remote Sensing*, 10(12), 1903. <https://doi.org/10.3390/rs10121903>
- Centeno, M. (1993). *Inventario nacional de plantaciones forestales en Nicaragua* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio UNA. <https://repositorio.una.edu.ni/id/eprint/877> (Nota: se recomienda citar solo de forma secundaria —Centeno, 1993, citado en Cueva y Herrera, 2023— y omitir la entrada de la lista de referencias si no se accedió al documento original.)

- CINCIA (Centro de Innovación Científica Amazónica, Perú). (2022). *Ficha técnica informativa en la concesión minera Paolita* (14 p.). De próxima publicación.
- Cooke, J., y Johnson, M. (2002). Ecological restoration of land with particular reference to the mining of metals and industrial minerals: a review of theory and practice. *Environmental Reviews*, 10, 41–71.
- Cueva, T., y Herrera, B. (2023). Establecimiento de una plantación de nueve especies forestales con fines de rehabilitación de suelos degradados en la hacienda la Florencia en el Cantón y provincia de Loja. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4), 2036–2051.
- Furtado, G., Helena, L., Chaves, L., Raulino, J., Sousa, M., Nair, H., Arriel, N., Xavier, D., y Lima, G. (2016). Soil chemical properties, growth and production of sunflower under fertilization with biochar and NPK. *Australian Journal of Crop Science*, 10, 418–424. <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.03.p7306>
- Glaser, B., Lehmann, J., y Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review. *Biology and Fertility of Soils*, 35(4), 219–230. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>
- Haider, G., Koyro, H., Azam, F., Steffens, D., Mculler, C., y Kammann, C. (2015). Biochar but not humic acid product amendment affected maize yields via improving plant soil moisture relations. *Plant and Soil*, 395, 141–157. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2294-3>
- Hoffmann, A., y Poorter, H. (2002). Avoiding bias in calculations of relative growth rate. *Annals of Botany*, 90, 37–42.
- Hunt, J., DuPonte, M., Sato, D., y Kawabata, A. (2010). The basics of biochar: A natural soil amendment. *Soil and Crop Management*, 30(7), 1–6.
- IIAP (Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana, Perú). (2002). *Propuesta de Zonificación Ecológica Económica de la Región Madre de Dios*. Puerto Maldonado, Perú. (74 p.)
- Ilunga, E., Mahy, G., Piqueray, J., Séleck, M., Shutcha, M., Meerts, P., y Faucon, M. (2015). Plant functional traits as a promising tool for the ecological restoration of degraded tropical metal-rich habitats and revegetation of metal-rich bare soils: a case study in copper vegetation of Katanga. DRC. *Ecological Engineering*, 82, 214–221.
- Lefebvre, D., Román-Dañobeytia, F., Soete, J., Cabanillas, F., Corvera, R., Ascorra, C., Fernandez, L., y Silman, M. (2019). Biochar effects on two tropical tree species and its potential as a tool for reforestation. *Forests*, 10(8), 678. <https://doi.org/10.3390/f10080678>
- Malhi, Y., y Meir, P. (2002). An international network to understand the biomass and dynamics of Amazonian forests. *Journal of Vegetation Science: Advances in Plant Community Ecology*, 13(3), 439–450.
- Marjenah, M., Kiswanto, K., Purwanti, S., y Sofyan, F. (2016). The effect of biochar, cocopeat and sawdust compost on the growth of two dipterocarps seedlings. *Nusantara Bioscience*, 8(1), 39–44.
- RAISG (Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada). (2019). *Cuatro cosas que debe saber sobre la minería ilegal en la Amazonía*. Mongabay Latam. Recuperado de <https://www.raisg.org/es/radar/cuatro-cosas-que-debe-saber-sobre-la-mineria-ilegal-en-la-amazonia/>
- Reynel, C., Pennington, R., Pennington, T., Flores, C., y Daza, A. (2003). *Árboles Útiles de la Amazonía Peruana: Un Manual con Apuntes de Identificación, Ecología y Propagación de las Especies*. Editorial Breña. Lima, Perú. (509 p.)
- Román-Dañobeytia, F., Huayllani, M., Michi, A., Ibarra, F., Loayza-Muro, R., Vázquez, T., Rodríguez, L., y García, M. (2015). Reforestation with four native tree species after abandoned goldmining in the Peruvian Amazon. *Ecological Engineering*, 85, 39–46.

- Román-Dañobeytia, F., Cabanillas, F., Lefebvre, D., Farfan, J., Alferez, J., Polo, F., Llacsahuanga, J., Vega, C., Ramírez, M., Corvera-Gomringer, R., Condori, E., Ascorra, C., Fernandez, L., y Silman, M. (2021). Survival and early growth of 51 tropical tree species in areas degraded by artisanal gold mining in the Peruvian Amazon. *Ecological Engineering*, 159, 106097.
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, Perú). (2021). *Atlas de Temperaturas del Aire y Precipitación del Perú*. Red Activa Soluciones Graficas S.A.C., Lima, Perú. (129 p.)
- Singh, R., Kumari, T., Verma, P., Singh, B. P., y Raghubanshi, A. S. (2022). Compatible package-based agriculture systems: An urgent need for agro-ecological balance and climate change adaptation. *Soil Ecology Letters*, 4(3), 187–212. <https://doi.org/10.1007/s42832-021-0087-1>
- Solaiman, Z., Blackwell, P., Abbott, L., y Storer, P. (2010). Direct and residual effect of biochar application on mycorrhizal root colonisation, growth and nutrition of wheat. *Soil Research*, 48, 546–554. <https://doi.org/10.1071/sr10002>
- Sonter, L., Herrera, D., Barrett, D., Galford, G., Moran, C., y Soares-Filho, B. (2017). Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature Communications*, 8, 1013. <https://www.nature.com/articles/s41467-017-00557-w.pdf>
- Thomas, S., y Gale, N. (2015). Biochar and forest restoration: a review and meta-analysis of tree growth responses. *New Forests*, 46, 931–946.
- Xu, J., Garcia, A., Lagerkvist, A., Bertilsson, S., Sjöblom, R., y Kumpiene, J. (2015). Sources and remediation techniques for mercury contaminated soil. *Environment International*, 74, 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.09.007>