

## EFFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CRECIMIENTO INICIAL DE DOS ESPECIES FORESTALES EN SUELOS DEGRADADOS POR MINERÍA AURÍFERA, MADRE DE DIOS.

*Effect of biochar on the initial growth of two forest species in soils degraded by gold mining, Madre de Dios.*

Arminda Inés López Valladares<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional Agraria La Molina

### REGISTROS

Recibido el 26/11/2025  
Aceptado el 17/02/2026  
Publicado el 12/05/2026



### PALABRAS CLAVE

biocarbón,  
Inga edulis,  
Copaifera officinalis,  
crecimiento,  
suelo degradado,  
minería aurífera.

### KEYWORDS

Biochar,  
Inga edulis,  
Copaifera officinalis,  
growth,  
degraded soil,  
gold mining.

### RESUMEN

La degradación del suelo generada por la minería aurífera en los bosques tropicales exige estrategias de restauración ecológica basadas en especies forestales nativas con alto valor ecológico, económico y capacidad de crecimiento acelerado. El presente estudio evaluó el efecto de enmiendas con biocarbón sobre la sobrevivencia y el crecimiento inicial de *Inga edulis* y *Copaifera officinalis* (Fabaceae), establecidas en una parcela de 0,5 ha con distanciamiento de 3 × 3 m bajo un diseño experimental completamente aleatorizado en suelos degradados por minería aurífera en la región amazónica de Madre de Dios, Perú. Se aplicaron tres tratamientos: biocarbón enriquecido, biocarbón puro y un control sin enmiendas. Al primer año de evaluación, la sobrevivencia de *I. edulis* fue de 86 %, 80 % y 77 % para los tratamientos de biocarbón enriquecido, biocarbón puro y control, respectivamente; en *C. officinalis* se registraron valores de 86 %, 84 % y 78 % en los mismos tratamientos, sin diferencias estadísticamente significativas entre ellos ( $\chi^2 = 0,89$ ; gl = 2; p = 0,64). El tratamiento con biocarbón enriquecido presentó los valores más altos de crecimiento promedio: 122,86 cm en altura y 1,68 cm en diámetro para *I. edulis*, y 21,97 cm en altura y 0,68 cm en diámetro para *C. officinalis*. El análisis de varianza reveló diferencias significativas entre tratamientos para ambas variables (p < 0,001). La prueba t de Student confirmó la superioridad del biocarbón enriquecido respecto al biocarbón puro y al control, los cuales no difirieron entre sí. Se identificó una correlación positiva y altamente significativa entre el crecimiento en altura y diámetro, con coeficientes de Pearson de r = 0,43 para *I. edulis* y r = 0,61 para *C. officinalis* (p < 0,001), lo que evidencia una respuesta de crecimiento coordinada bajo condiciones de restauración.

### ABSTRACT

The degradation of soil in tropical forests caused by gold mining requires ecological restoration strategies that incorporate native forest species of high ecological and economic value with fast growth capacity. This study evaluated the effect of biochar amendments on the survival and initial growth of *Inga edulis* and *Copaifera officinalis* (Fabaceae), planted in a 0.5 ha plot with a spacing of 3 × 3 m, under a fully randomized experimental design. The plantation was established on soils degraded by gold mining in the Amazon region of Madre de Dios, Peru, with three treatments applied: enriched biochar, pure biochar, and a control without amendments. In the first year of evaluation, the survival rate of *I. edulis* was 86 %, 80 %, and 77 %, while for *C. officinalis* it was recorded at 86 %, 84 %, and 78 % for the treatments of enriched biochar, pure biochar, and control, respectively, with no statistically significant differences between them. However, the treatment with enriched biochar showed the highest average growth values: 122.86 cm in height and 1.68 cm in diameter for *I. edulis*, and 21.97 cm in height and 0.68 cm in diameter for *C. officinalis*. The analysis of variance revealed statistically significant differences between treatments for both variables (p < 0.001). Additionally, the Student's t-test confirmed that the enriched biochar had a significantly greater effect on growth compared to pure biochar and the control, which did not differ from each other. Finally, a positive and highly significant correlation was identified between height and diameter growth, with coefficients of r = 0.43 for *I. edulis* and r = 0.61 for *C. officinalis* (p < 0.001), demonstrating a coordinated response in the growth of both species under restoration conditions.

## 1. Introducción

El sector minero desempeña un papel fundamental en la economía nacional. Su impacto se manifiesta en la generación de empleo, el impulso a las exportaciones, la recaudación fiscal y su contribución al producto bruto interno (PBI). Entre 2010 y 2019, el PBI minero experimentó un crecimiento promedio anual del 39 %, representó aproximadamente el 10 % del PBI total del país y aportó el 59,26 % del valor total de las exportaciones (IPE, 2021). Perú ocupa el segundo lugar en producción de oro en Latinoamérica; en 2023, la actividad minera registró un crecimiento del 2,8 % (MINEM, 2023).

Aunque la extracción de oro representa una fuente significativa de ingresos, constituye también una causa de graves conflictos sociales y ambientales en distintas regiones de Latinoamérica, Asia y África. A nivel global, esta actividad es la principal responsable de la contaminación por mercurio. En la Amazonía peruana se estima que ha provocado la degradación de entre 6 000 y 10 000 ha de terreno y la liberación anual de aproximadamente 180 t métricas de mercurio al entorno, intensificando problemáticas planetarias como el cambio climático y la pérdida de biodiversidad (Velásquez et al., 2022).

La extracción aurífera en la Amazonía peruana constituye una amenaza creciente para la salud humana y el entorno natural, afectando el paisaje, la vegetación y la fauna silvestre (Sánchez et al., 2017). En la región de Madre de Dios, la minería artesanal tiene una presencia destacada (Mamani et al., 2019) y ha sido identificada como la principal causa de deforestación local con niveles alarmantes de contaminación en agua, sedimentos fluviales, peces y población humana (MINAM, 2011).

Con el propósito de reducir estos impactos, se han implementado acciones de restauración en terrenos mineros abandonados, entre las que destacan el establecimiento de plantaciones forestales y la aplicación de enmiendas edáficas —como biocarbón, fertilizantes y abonos orgánicos— para promover la regeneración forestal en áreas altamente degradadas (Ni et al., 2015).

El biocarbón es un material carbonoso de alta porosidad obtenido mediante la pirólisis de biomasa en condiciones de oxígeno limitado. Su aplicación como mejorador del suelo ha ganado relevancia por su potencial para incrementar el almacenamiento de carbono, optimizar las propiedades edáficas y disminuir la biodisponibilidad de metales pesados y sulfatos en suelos contaminados (Purakayastha et al., 2019). La materia prima para su producción es muy variada e incluye lodos residuales, maderas duras, desechos agrícolas, estiércol y restos vegetales; en general, cualquier tipo de biomasa previamente seca y sin tratamiento químico puede emplearse en su elaboración (Kambo y Dutta, 2015).

No obstante, la literatura científica sobre el uso del biocarbón como enmienda en plantaciones forestales dentro de la Amazonía peruana es aún escasa. En ese contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de enmiendas con biocarbón enriquecido, biocarbón puro y un control sin enmiendas sobre la sobrevivencia y el crecimiento inicial en altura y diámetro de *Inga edulis* y *Copaifera officinalis* durante el primer año de establecimiento en suelos degradados por minería aurífera en Madre de Dios, Perú.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en un área de 0,5 ha ubicada dentro de la concesión minera «Paolita», que había culminado su explotación de oro aluvial, en el distrito de Laberinto, provincia de Tambopata, departamento de Madre de Dios, Perú (latitud:  $-12,680254^{\circ}$ ; longitud:  $-69,628651^{\circ}$ ; altitud: 218 m s. n. m.). El área presenta un clima tropical, con una temperatura promedio anual de aproximadamente 25 °C. Los suelos se caracterizan por drenaje limitado, baja fertilidad

natural y deficiencias en fósforo y materia orgánica, los suelos del área de plantación presentan textura predominantemente arenosa y niveles de fertilidad inferiores a los del bosque tropical circundante. La región alberga más de 1 000 especies arbóreas registradas en Madre de Dios.

## 2.2. Diseño experimental

La plantación se instaló en enero de 2017 en un área de 0,5 ha, con un espaciamiento de 3 m × 3 m bajo un diseño completamente aleatorizado (DCA). Se establecieron 89 individuos de *Inga edulis* y 85 de *Copaifera officinalis*, distribuidos aleatoriamente entre los tres tratamientos. Cada unidad experimental consistió en un individuo plantado en una celda de 9 m<sup>2</sup>. Los tratamientos evaluados fueron: (a) biocarbón enriquecido, (b) biocarbón puro y (c) control sin enmiendas (testigo).

Las variables de respuesta cuantitativas fueron el crecimiento en altura (cm) y el crecimiento en diámetro basal (cm). La sobrevivencia se registró como variable binaria dependiente (1 = vivo; 0 = muerto).

## 2.3. Determinación de la sobrevivencia

La tasa de sobrevivencia se calculó a partir del cociente entre el número de individuos vivos al año 2018 y el número de individuos instalados en 2017, expresado como porcentaje:

$$\text{Sobrevivencia (\%)} = \frac{\text{Individuos vivos en 2018}}{\text{Individuos instalados en 2017}} \times 100$$

## 2.4. Determinación del crecimiento en altura y diámetro

La altura de cada planta fue registrada desde la base del tallo hasta el ápice con una cinta métrica graduada al milímetro. El diámetro basal se midió a ras de suelo con un vernier digital. Ambas mediciones se realizaron al momento de la plantación (2017) y al año siguiente (2018). El crecimiento relativo (CR) se calculó como la diferencia entre la medición final y la inicial:

$$\text{CR altura} = \text{altura}_{2018} - \text{altura}_{2017}$$

$$\text{CR diámetro} = \text{diámetro}_{2018} - \text{diámetro}_{2017}$$

## 2.5. Preparación y aplicación de las enmiendas de biocarbón

El biocarbón fue producido por el Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA) mediante el método de cilindro *Top-Lit Updraft* (TLUD), en el que la combustión se inicia desde la parte superior y desciende. Como biomasa se utilizaron cáscaras de castaña (*Bertholletia excelsa*) provenientes de desechos agroforestales locales. El biocarbón producido fue certificado con calidad premium según el estándar europeo *European Biochar Certificate* (EBC) ([Carbon Standards International, 2025](#)).

## 2.6. Métodos estadísticos

Todos los análisis estadísticos se realizaron con la versión 4.4.1 de R (lenguaje y entorno para el cálculo estadístico) ([R Core Team, 2024](#)).

Para la sobrevivencia, se compararon las proporciones entre tratamientos mediante la prueba de chi-cuadrado de Pearson.

Para el crecimiento en altura y diámetro, el análisis exploratorio incluyó estadísticos descriptivos (media, desviación estándar) y diagramas de cajas para identificar la distribución de los datos y la presencia de valores extremos. Previo al análisis de varianza de un factor (ANOVA), se verificó el supuesto de normalidad de los residuos mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la

homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene.

Para la comparación de medias entre tratamientos se aplicó la prueba *t* de Student con corrección de Bonferroni para comparaciones múltiples.

Para cuantificar la asociación lineal entre el crecimiento en altura y el crecimiento en diámetro se calculó el coeficiente de correlación de Pearson, acompañado de su *p*-valor.

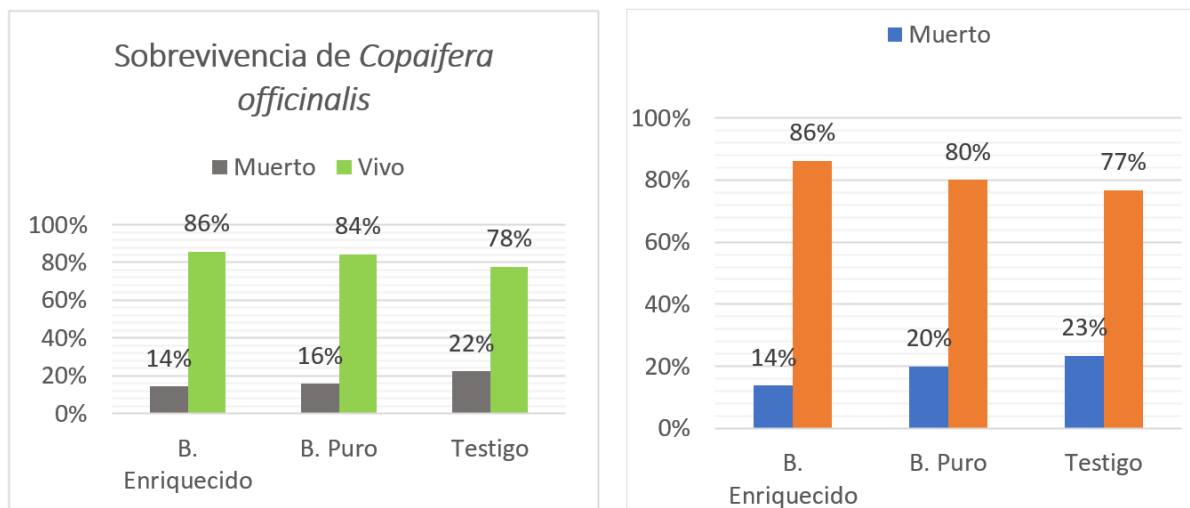
### 3. Resultados

#### 3.1. Supervivencia de *Inga edulis* y *Copaifera officinalis*

Al primer año de establecimiento, la tasa de supervivencia de *I. edulis* fue de 86 % en el tratamiento con biocarbón enriquecido, 80 % en el tratamiento con biocarbón puro y 77 % en el control (tabla 1). Para *C. officinalis*, los porcentajes correspondientes fueron de 86 %, 84 % y 78 %. La prueba de chi-cuadrado no detectó diferencias estadísticamente significativas entre los tres tratamientos para ninguna de las dos especies ( $\chi^2 = 0,89$ ; *gl* = 2; *p* = 0,64), lo que indica que el tipo de enmienda no influyó de forma significativa en la supervivencia durante el primer año.

**Figura 1**

*Sobrevivencia de Inga edulis y Copaifera officinalis por tratamientos.*

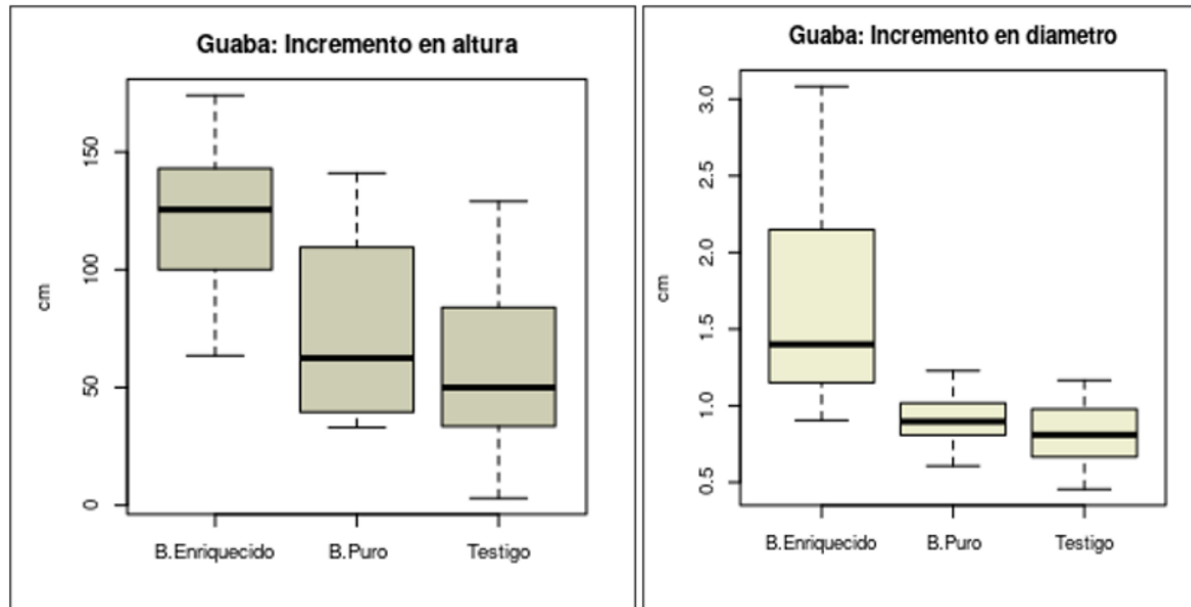


Nota: Elaboración propia.

En términos absolutos, los datos presentados en la figura 1 muestran que el tratamiento con biocarbón enriquecido registró los valores más altos de supervivencia tanto para *Inga edulis* como para *Copaifera officinalis*. Sin embargo, al aplicar la prueba de chi-cuadrado para la comparación de proporciones entre tratamientos, se obtuvo un valor del estadístico de 0,89 con 2 grados de libertad, y un valor *p* de 0,64. Este resultado indica que no existen diferencias estadísticamente significativas en las tasas de supervivencia entre los tres tratamientos evaluados.

#### 3.2. Crecimiento en altura y diámetro de *Inga edulis*

El análisis exploratorio mediante diagramas de cajas (figura 2) reveló que el tratamiento con biocarbón enriquecido presentó la mediana más alta tanto en altura como en diámetro, seguido del biocarbón puro y, finalmente, el control. La variabilidad entre tratamientos fue similar para la altura; en el diámetro, el tratamiento con biocarbón enriquecido mostró mayor dispersión.

**Figura 2**Crecimiento en altura y diámetro de *Inga edulis*

Nota: Elaboración propia.

El promedio anual de crecimiento en altura alcanzó  $122,86 \pm 29,96$  cm para el biocarbón enriquecido,  $73,21 \pm 36,53$  cm para el biocarbón puro y  $58,91 \pm 36,97$  cm para el control. El crecimiento en diámetro fue de  $1,68 \pm 0,67$  cm,  $0,92 \pm 0,18$  cm y  $0,82 \pm 0,22$  cm, respectivamente (tabla 1). El ANOVA confirmó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos tanto para la altura ( $F = 22,96$ ;  $p < 0,001$ ; tabla 2) como para el diámetro ( $F = 29,96$ ;  $p < 0,001$ ; tabla 3). La prueba  $t$  de Student evidenció que el biocarbón enriquecido fue significativamente superior al biocarbón puro y al control en ambas variables de crecimiento, mientras que estos dos últimos no difirieron entre sí (tablas 4 y 5; figura 3).

**Tabla 1**Valores promedio anual del crecimiento en altura y diámetro de *Inga edulis*

Tratamiento	N° plántones	Altura (cm) $\pm$ DE	Diámetro (cm) $\pm$ DE
Biocarbón enriquecido	25	$122,86 \pm 29,96$	$1,68 \pm 0,67$
Biocarbón puro	24	$73,21 \pm 36,53$	$0,92 \pm 0,18$
Testigo	23	$58,91 \pm 36,97$	$0,82 \pm 0,22$

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado al crecimiento en altura de *Inga edulis* reveló diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados. El valor de F obtenido fue de 22,96, con un p-valor inferior a 0,001, lo cual indica un efecto significativo del tipo de enmienda aplicada sobre esta variable (véase tabla 2). De igual manera, el análisis de varianza realizado para el crecimiento en diámetro mostró un resultado significativo, con un valor F de 29,96 y un p-valor  $< 0,001$ , confirmando que los tratamientos también influyen de forma significativa en el desarrollo del diámetro basal (véase tabla 3).

**Tabla 2***Análisis de varianza del crecimiento en altura de Inga edulis*

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr(>F)
Tratamiento	2	54 768	27 384	22,96	2,277 e-08***
Residuales	69	116 739	1 692	-	-

**Tabla 3***Análisis de varianza del crecimiento en diámetro de Inga edulis*

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr(>F)
Tratamiento	2	10,82	5,41	29,96	4,317 e-10***
Residuales	69	12,46	0,18	-	-

El análisis comparativo entre tratamientos, realizado mediante la prueba *t* de Student, evidenció que la enmienda con biocarbón enriquecido tuvo un efecto significativamente superior en el crecimiento tanto en altura como en diámetro de *Inga edulis*, en comparación con los tratamientos de biocarbón puro y el testigo. En contraste, no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre el biocarbón puro y el tratamiento control. Estos resultados se presentan en detalle en las tablas 4 y 5.

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

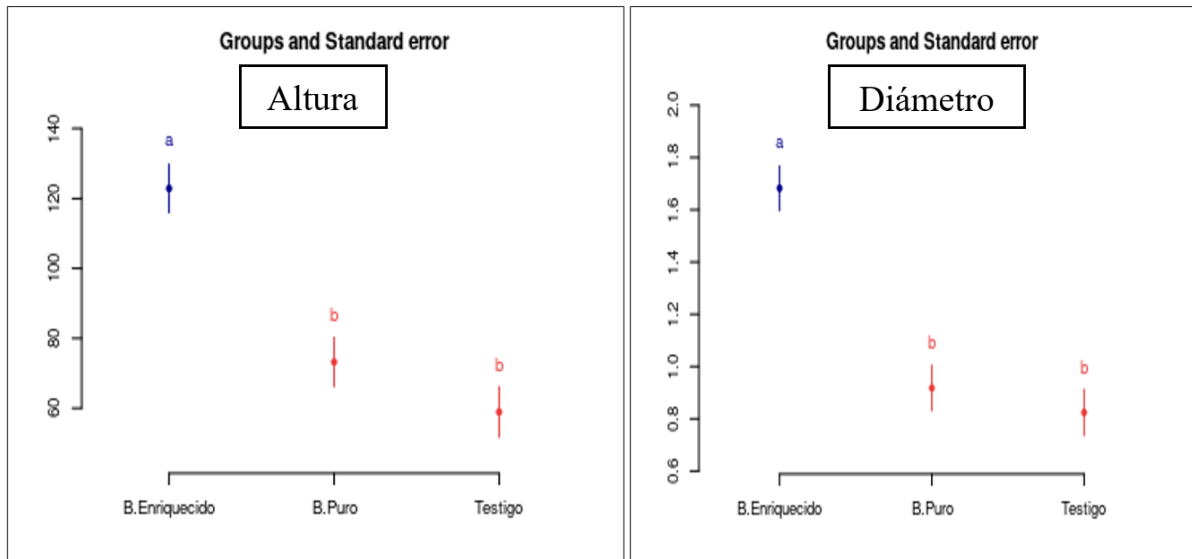
Comparación de tratamientos	Diferencia	p-valor	Significancia	LC inferior	LC superior
B. enriquecido - B. puro	49,65	0,00	***	29,96	69,34
B. enriquecido - Testigo	63,95	0,00	***	44,04	83,85
B. puro - Testigo	14,30	0,16	-	-5,81	34,40

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

Comparación de tratamientos	Diferencia	p-valor	Significancia	LC inferior	LC superior
B. enriquecido - B. puro	0,76	0,00	***	0,52	1,01
B. enriquecido - Testigo	0,86	0,00	***	0,61	1,10
B. puro - Testigo	0,09	0,45	-	-0,15	0,34

**Figura 3**

Comparación del efecto de los tratamientos en el crecimiento en altura y diámetro de *Inga edulis*



Nota: Elaboración propia.

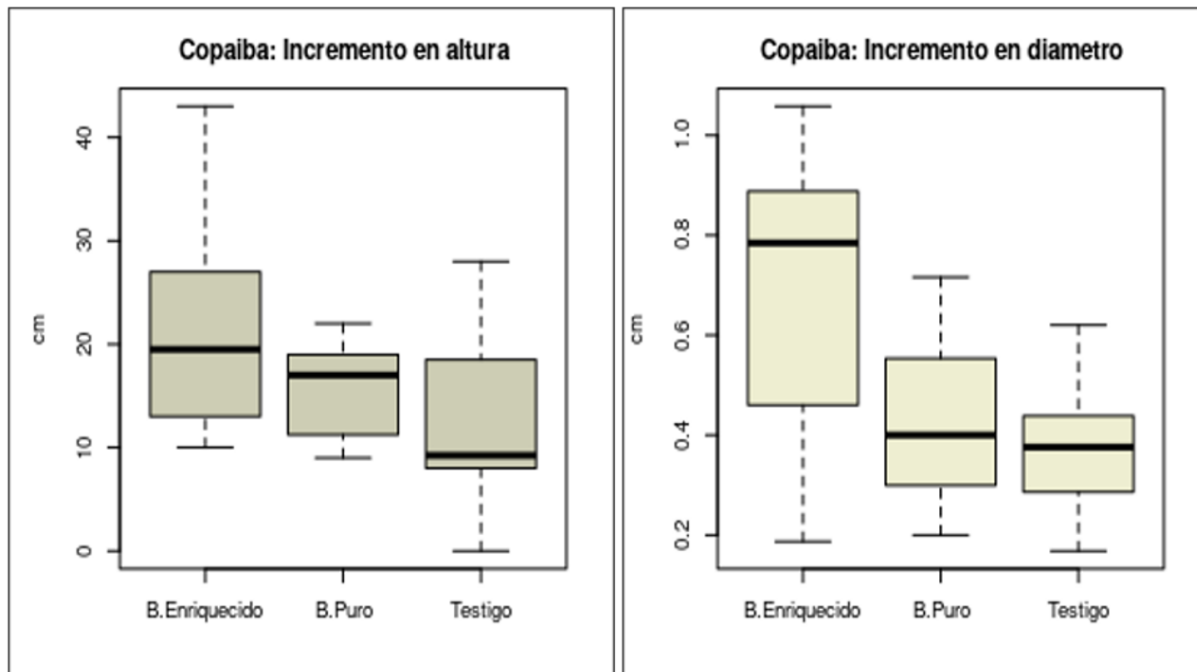
### 3.3. Crecimiento en altura y diámetro de *Copaifera officinalis*

Para *C. officinalis*, el análisis exploratorio mediante diagramas de cajas (figura 4) mostró el mismo patrón: la mediana del tratamiento con biocarbón enriquecido fue la más alta tanto en altura como en diámetro, seguida del biocarbón puro y, finalmente, del testigo con la menor mediana. En cuanto a la variabilidad, los tres tratamientos mostraron niveles similares en ambas variables.

**Tabla 6**

Valores promedio anual del crecimiento en altura y diámetro de *Copaifera officinalis*

Tratamiento	N° plantones	Altura (cm) ± DE	Diámetro (cm) ± DE
Biocarbón enriquecido	30	21,97 ± 10,38	0,68 ± 0,26
Biocarbón puro	27	15,28 ± 4,13	0,44 ± 0,17
Testigo	28	12,11 ± 7,92	0,38 ± 0,12

**Figura 4**Crecimiento en altura y diámetro de *Copaifera officinalis*

Nota: Elaboración propia.

Los promedios anuales de crecimiento en altura fueron de  $21,97 \pm 10,38$  cm,  $15,28 \pm 4,13$  cm y  $12,11 \pm 7,92$  cm para biocarbón enriquecido, biocarbón puro y control, respectivamente; los incrementos en diámetro correspondientes fueron de  $0,68 \pm 0,26$  cm,  $0,44 \pm 0,17$  cm y  $0,38 \pm 0,12$  cm. En el análisis de la variable altura se encontró que los tratamientos produjeron diferencias significativas, con un valor F calculado de 11,51 ( $p$ -valor  $< 0,001$ ), como se muestra en la tabla 7. En la variable diámetro también resultaron significativos los tratamientos, con un valor F calculado de 19,43 ( $p$ -valor  $< 0,001$ ), como se indica en la tabla 8.

**Tabla 7**Análisis de varianza del crecimiento en altura de *Copaifera officinalis*

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr(>F)
Tratamiento	2	1 476,4	738,22	11,51	3,919 e-05***
Residuales	82	5 257,8	64,12	-	-

**Tabla 8**Análisis de varianza del crecimiento en diámetro de *Copaifera officinalis*

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Pr(>F)
Tratamiento	2	1,48	0,74	19,43	1,236 e-07***
Residuales	82	3,12	0,04	-	-

El análisis comparativo entre tratamientos, utilizando la prueba  $t$  de Student, evidenció que las enmiendas con biocarbón enriquecido produjeron un efecto significativamente mayor en el crecimiento en altura y diámetro de *Copaifera officinalis*, en comparación con los tratamientos

de biocarbón puro y el testigo. Estos últimos no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre sí, indicando un efecto similar en ambas variables de crecimiento. Los resultados detallados se presentan en la tabla 9 y la tabla 10, mientras que la figura 5 ilustra gráficamente las diferencias observadas entre tratamientos.

**Tabla 9**

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

Comparación de tratamientos	Diferencia	p-valor	Significancia	LC inferior	LC superior
B. enriquecido - B. puro	6,69	0,0023	**	2,46	10,91
B. enriquecido - Testigo	9,86	0,0000	***	5,67	14,05
B. puro - Testigo	3,17	0,1459	-	-1,13	7,47

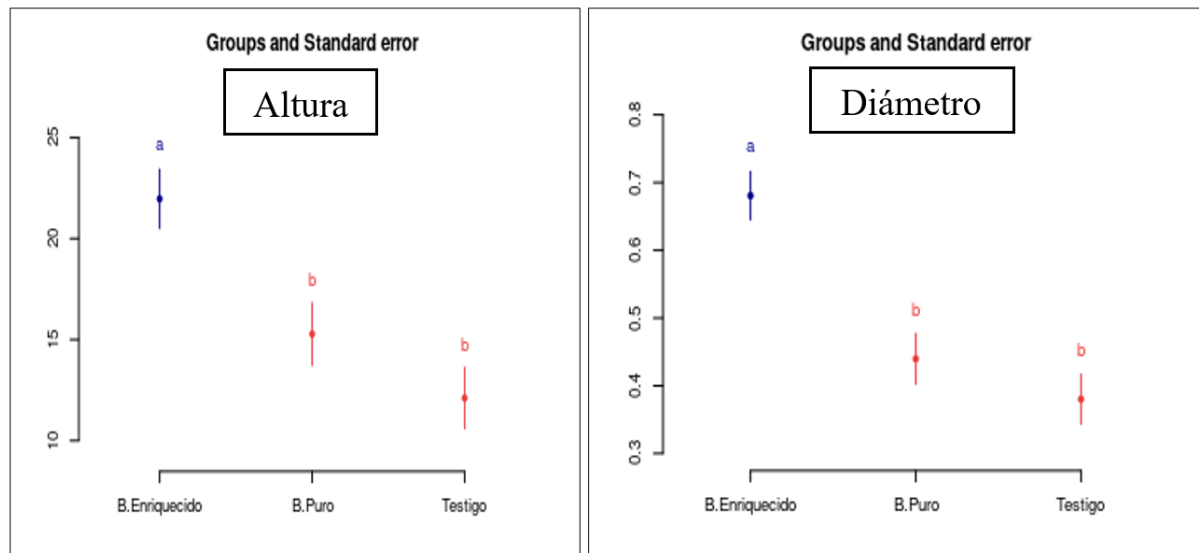
**Tabla 10**

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

Comparación de tratamientos	Diferencia	p-valor	Significancia	LC inferior	LC superior
B. enriquecido - B. puro	0,24	0,000	***	0,14	0,34
B. enriquecido - Testigo	0,30	0,000	***	0,20	0,40
B. puro - Testigo	0,06	0,2608	-	-0,05	0,16

**Figura 5**

Comparación del efecto de los tratamientos en el crecimiento en altura y diámetro de *Copaifera officinalis*



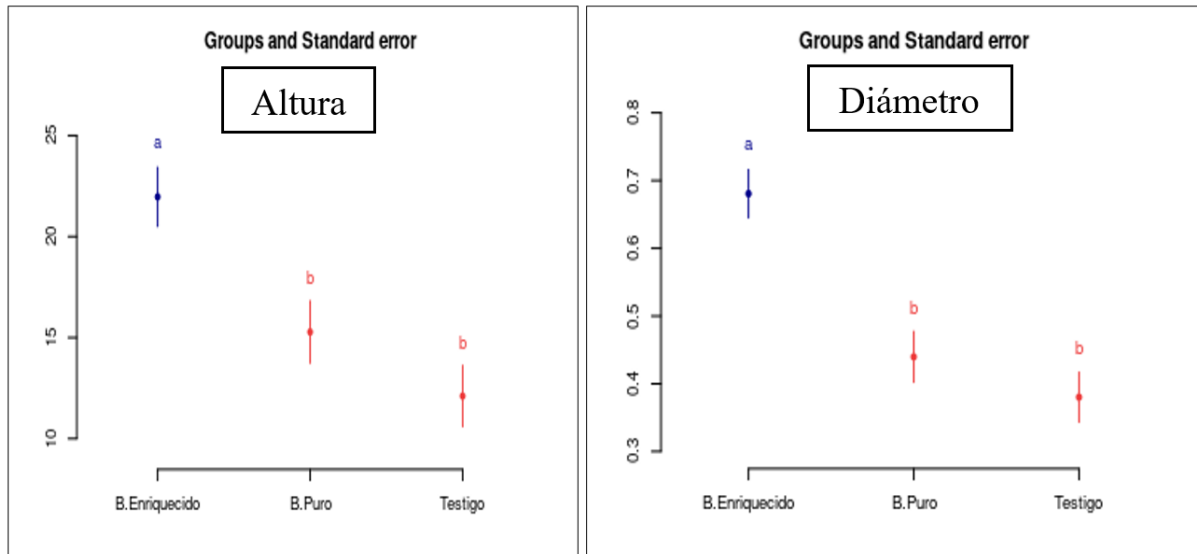
Nota: Elaboración propia.

### 3.4. Análisis de correlación del crecimiento en altura y diámetro de *Inga edulis* y *Copaifera officinalis*

Al año de establecimiento, el coeficiente de correlación de Pearson entre el crecimiento en altura y el crecimiento en diámetro fue de  $r = 0,43$  para *I. edulis* ( $p < 0,001$ ) y de  $r = 0,61$  para *C. officinalis* ( $p < 0,001$ ), indicando una asociación lineal positiva y significativa en ambas especies (figura 6). Por otro lado, respecto a *C. officinalis*, se obtuvo una correlación de Pearson para el crecimiento inicial entre la altura y diámetro resultando lineal positiva con un valor de 0,61 y altamente significativo ( $p$ -valor  $< 0,001$ ).

**Figura 6**

Correlación entre el crecimiento en altura (cm) y en diámetro basal (cm) de *Inga edulis* ( $r = 0,43$ ;  $p < 0,001$ ) y *Copaifera officinalis* ( $r = 0,61$ ;  $p < 0,001$ ) al primer año de establecimiento. La línea continua representa la recta de regresión. Madre de Dios, Perú, 2018.



Nota: Elaboración propia.

## 4. Discusión

El presente estudio evaluó la sobrevivencia, el crecimiento inicial y la correlación entre altura y diámetro de *Inga edulis* y *Copaifera officinalis* al primer año de establecimiento en suelos degradados por minería aurífera, bajo la aplicación de enmiendas con biocarbón.

En cuanto a la sobrevivencia, los porcentajes registrados bajo el tratamiento con biocarbón enriquecido y puro (>80 % en ambas especies) se clasifican como «muy buenos» según los criterios propuestos por Centeno (1993, citado en Jiménez Cueva y Palacios Herrera 2023), mientras que los del control (77–78 %) son considerados «buenos». Román et al. (2021), en un estudio comparable realizado en áreas degradadas por minería aurífera en la Amazonía peruana con 51 especies tropicales, reportaron incrementos de sobrevivencia en *I. edulis* del 50 % al 75 % bajo aplicación de biocarbón, valores inferiores a los obtenidos en el presente trabajo, lo que podría asociarse a diferencias en las condiciones del sitio o en las dosis aplicadas. La ausencia de diferencias significativas entre tratamientos en la sobrevivencia ( $p = 0,64$ ) sugiere que, durante los primeros doce meses, esta variable está condicionada principalmente por factores de estrés hídrico y de establecimiento, independientemente del tipo de enmienda utilizada.

El efecto significativo del biocarbón enriquecido sobre el crecimiento en altura y diámetro coincide con lo reportado por Crane-Droesch et al. (2013), quienes atribuyen la mejora en el desempeño de las plantas leñosas a las propiedades edáficas mejoradas por la adición de biocarbón, incluyendo mayor retención de nutrientes, mejora estructural del suelo y aumento de la actividad biológica (Ippolito et al., 2011). La falta de diferencias significativas entre el biocarbón puro y el control en *I. edulis* es coherente con la alta variabilidad de respuesta descrita por Thomas y Gale (2015), atribuible a diferencias en las características del biocarbón, las condiciones del sitio y las particularidades fisiológicas de cada especie.

En cuanto a *C. officinalis*, los valores de crecimiento en altura registrados en el presente estudio (12,11–21,97 cm/año) son notablemente inferiores a los reportados por Huamán (2021) en suelos no degradados a los 36 meses (equivalente a  $\approx 29$  cm/año). Esta diferencia ilustra la magnitud del déficit de crecimiento impuesto por las condiciones edáficas degradadas, aspecto que refuerza la necesidad de enmiendas para aproximar el desempeño de las especies al

observado en condiciones naturales. Arias (2004) y Gonzáles-Rojas et al. (2017) coinciden en que el crecimiento forestal está determinado por la interacción entre la genética de la especie, la calidad del sitio y las prácticas de manejo; estos factores explican también el rango de variación observado en la respuesta al biocarbón puro.

Respecto a la densidad de madera, King et al. (2006) señalan que las especies con densidades medias (0,4–0,7 g/cm<sup>3</sup>) responden mejor a enmiendas que mejoran la disponibilidad de agua y nutrientes. La densidad de *I. edulis* ( $\approx 0,59$  g/cm<sup>3</sup>) se ubica en este rango, lo que explicaría parcialmente su respuesta más pronunciada al biocarbón enriquecido en comparación con *C. officinalis*.

Los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos ( $r = 0,43$  para *I. edulis*;  $r = 0,61$  para *C. officinalis*) indican una asociación lineal positiva moderada entre el crecimiento en altura y en diámetro, consistente con lo argumentado por Gadow et al. (2007) sobre la dependencia del desarrollo arbóreo respecto a factores ambientales. Carreño-Romero et al. (2023) identifican el clima, el tipo de suelo y la edad del árbol como variables determinantes del crecimiento, lo que es congruente con el patrón observado en este estudio bajo condiciones de campo abierto y baja fertilidad.

Una limitación relevante de este trabajo es que el período de evaluación se restringe al primer año de establecimiento, por lo que las tendencias observadas podrían no mantenerse a mediano plazo. Estudios con períodos de seguimiento de tres a cinco años permitirían determinar si el efecto diferencial del biocarbón enriquecido persiste o se diluye conforme las plantas desarrollan sistemas radiculares más profundos. Futuros trabajos deberían incorporar también el análisis de propiedades del suelo antes y después de la aplicación (pH, carbono orgánico, disponibilidad de nutrientes y actividad microbiana) para explicar los mecanismos subyacentes al efecto observado.

## 5. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos durante el primer año de establecimiento de la plantación en suelos degradados por minería aurífera en Madre de Dios, se concluye lo siguiente:

Al primer año de evaluación, las tasas de sobrevivencia de *Inga edulis* fueron de 86 %, 80 % y 77 % para los tratamientos con biocarbón enriquecido, biocarbón puro y control, respectivamente; para *Copaifera officinalis* se registraron 86 %, 84 % y 78 % en los mismos tratamientos. La prueba de chi-cuadrado no detectó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ( $p = 0,64$ ), lo que indica que la sobrevivencia durante el primer año fue independiente del tipo de enmienda aplicada.

El tratamiento con biocarbón enriquecido produjo un efecto positivo y estadísticamente superior en el crecimiento inicial en altura y diámetro de ambas especies, en comparación con el biocarbón puro y el control. El biocarbón puro y el control no presentaron diferencias significativas entre sí, lo que sugiere que el enriquecimiento del biocarbón es el factor determinante para mejorar el rendimiento en suelos degradados por actividad minera.

La correlación entre el crecimiento en altura y en diámetro fue positiva y altamente significativa al primer año de plantación, con coeficientes de Pearson de  $r = 0,43$  para *I. edulis* y  $r = 0,61$  para *C. officinalis* ( $p < 0,001$ ), lo que evidencia una respuesta de crecimiento coordinada en ambas especies. A pesar de las condiciones edáficas limitantes, estas especies mostraron capacidad de adaptación temprana al entorno cuando se aplicaron enmiendas adecuadas.

Los valores de crecimiento registrados en suelos degradados por minería aurífera fueron notablemente inferiores a los reportados para estas especies en condiciones de suelo no degradado, lo que subraya la necesidad de complementar el uso de biocarbón enriquecido con otras intervenciones de rehabilitación edáfica (enmiendas orgánicas, inoculación micorrízica) y

de mantener el seguimiento de la plantación más allá del primer año para validar la persistencia de los efectos observados.

## Agradecimientos

Mi gratitud al equipo del Centro de Innovación Científico Amazónica (CINCIA), en particular a los profesores Felipe Mendiburú y Eloy Cuellar, Gilberto Domínguez, por el asesoramiento durante la elaboración del presente artículo científico.

## Conflicto de intereses

Los autores no declaran haber tenido conflicto de intereses.

## Referencias

- Arias, D. (2004). Estudio de las relaciones altura-diámetro para seis especies maderables utilizadas en programas de reforestación en la zona sur de Costa Rica. *Revista Forestal Kurú*, 1(2), 1–11.
- Carbon Standards International. (2025). *European Biochar Certificate: Standard 10.5E*. <https://www.carbon-standards.com/docs/transfer/4000093EN.pdf>
- Carreño-Romero, A. G., Mora-Alvarez, D. A., y Serpa-Jiménez, A. (2023). Correlación de diámetro altura de árboles en la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta. *Perspectivas*, 8(S1), 259–268.
- Centeno, M. (1993). *Inventario Nacional de Plantaciones Forestales en Nicaragua*. Ingeniería Tesis. Universidad Nacional Agraria, Managua. <https://repositorio.una.edu.ni/877/>
- Crane-Droesch, A., Abiven, S., Jeffery, S., y Torn, M. S. (2013). Heterogeneous global crop yield response to biochar: a meta-regression analysis. *Environmental Research Letters*, 8(4), 044049. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/044049>
- Gadow, K., Sánchez Orois, S., y Álvarez, J. (2007). *Estructura y crecimiento del bosque*. 287 p. Lugo. ISBN: 978-84-690-7535-7.
- González-Rojas, M., Murillo-Cruz, R., Virgilio-Filho, E., y Ávila-Arias, C. (2017). Influencia de factores biofísicos y de manejo en el crecimiento de *Cedrela odorata* L. en asocio con café en Pérez Zeledón, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana KURÚ*, 15(36), 46–58.
- Huamán, H. (2021). Crecimiento inicial de seis especies forestales nativas en el departamento de Cusco, Perú. *Quebracho - Revista de Ciencias Forestales*, 29(2), 102–110. <https://www.re-dalyc.org/journal/481/48172242003/html/>
- IPE (Instituto Peruano de Economía, Perú). (2021). Contribución de la minería a la economía nacional. <https://www.snmpe.org.pe/informes-y-publicaciones/contribucion-de-la-mineria-a-la-economia-nacional.html>
- Ippolito, J., Lentz, M., Novak, K., Spokas, H., y Streubel, J. (2011). Biochar usage: Pros and cons. *Western Nutrient Management Conference*, 9, 93–98. Reno, NV, USA.
- Jiménez Cueva, T., y Palacios 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. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i4.7031](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7031)
- Kambo, H. S., y Dutta, A. (2015). A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 359–378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.050>

- King, D., Davies, S., Tan, S., y Noor, N. (2006). The role of wood density and stem support costs in the growth and mortality of tropical trees. *Journal of Ecology*, 94(3), 670–680. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01112.x>
- León-Sánchez, M. A., Reyes-Pozo, J. L., Herrero-Echevarría, G., y Pérez-León, V. E. (2016). Efecto de la fertilización sobre el crecimiento en diámetro y altura de *Pinus caribaea* en plantaciones del occidente de Cuba. *Madera y Bosques*, 22(3), 87–101.
- Mamani, A., Benavides, J., González, F., Mendoza, R., Calderón, A., y Saavedra, L. (2019). *Restauración de paisajes en el Perú. Sitios prioritarios y evaluación de oportunidades*. Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR).
- MINAM (Ministerio del Ambiente, Perú). (2011). Minería aurífera en Madre de Dios y contaminación con mercurio. [https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/mineria\\_aurifera\\_en\\_madre\\_de\\_dios.pdf](https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/mineria_aurifera_en_madre_de_dios.pdf)
- MINEM (Ministerio de Energía y Minas, Perú). (2023). Anuario Minero. Edición N.º 01-2020 [en línea]. Lima, Perú. <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/5185432-boletin-estadistico-minero-diciembre-2023>
- Ni, R., Bell, W., Grath, D., y Jasper, P. (2015). Role of soil covers in establishment of vegetation on gold oxide refining residues. *Ecological Engineering*, 75, 392–403.
- Purakayastha, T. J., Bera, T., Bhaduri, D., Sarkar, B., Mandal, S., Wade, P., Chauhan, S., Biswas, S., Menon, M., Pathak, H., y Tsang, D. C. W. (2019). A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate change mitigation and global food security. *Chemosphere*, 227, 345–365. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.170>
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing* [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Román, F., Cabanillas, F., Lefebvre, D., Farfán, J., Alferez, J., Polo, F., Llacsahuanga, J., Vega, C., Velásquez, M., Corvera, R., Condori, E., Ascorra, C., Fernández, 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. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857420303852>
- Sánchez, J., Carnero, A., Rivera, E., Rosales, L., Baldeviano, C., Asencios, J., Edgel, K., Vinetz, J., y Lescano, A. (2017). Unstable malaria transmission in the Southern Peruvian Amazon and its association with gold mining, Madre de Dios, 2001–2012. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 96(2), 304–311. <https://www.ajtmh.org/view/journals/tpmd/96/2/article-p304.xml>
- Thomas, S., y Gale, N. (2015). Biochar and forest restoration: a review and meta-analysis of tree growth responses. *New Forests*, 46, 931–946.
- Velásquez, M., Corvera, R., Guerrero, J., Thomas, E., Russo, R., Cusi, E., Becerra, E., Nascimento, P., Muñoz, A., Bardales, J., y Del Castillo, D. (2022). *Guía práctica recuperación de la salud del suelo para la restauración de áreas degradadas por la minería aurífera aluvial en la Amazonía peruana*. Editorial Barreto. 160 p.