


Artículo Original

Evaluación estructural técnico-financiera de tecnologías de carbonización: implicaciones para la resiliencia económica y la modernización del sector forestal-energético

Structural techno-financial evaluation of charcoal production technologies: implications for economic resilience and sector modernization

César Augusto Alvarado Borjas
Ingeniero Forestal / MSc. en Energía Renovable
Investigador Universidad Nacional de Ciencias Forestales (UNACIFOR)
Siguatepeque, Comayagua, Honduras
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7494-4587>

*Autor corresponsal: cesalbo48andrea@gmail.com

Recepción: abril de 2026. Aceptación: mayo de 2026. Publicación: junio de 2026.

Como citar: Alvarado Borjas, C. A. (2026). Evaluación estructural técnico-financiera de tecnologías de carbonización: implicaciones para la resiliencia económica y la modernización del sector forestal-energético. *TATASCÁN*, 34 (1), 17–30. <https://doi.org/10.5377/tatascn.v34i1.22935>

Resumen: El presente estudio realiza una evaluación técnico-financiera comparativa entre un horno convencional mejorado y una retorta metálica de calentamiento indirecto para la producción de carbón vegetal. Se desarrolló un modelo de flujo de caja descontado a diez años que integra depreciación, carga fiscal del 25 %, capital de trabajo, reinversión intermedia equivalente al 25 % de la inversión inicial en el año 5 y una tasa de descuento del 12 %. Los indicadores financieros calculados incluyeron Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRM), así como análisis de sensibilidad y periodo de recuperación simple. Los resultados muestran que ambas tecnologías son económicamente viables bajo el escenario base; sin embargo, la retorta metálica presenta una generación de valor sustancialmente superior, asociada a su mayor rendimiento gravimétrico y menor consumo específico de biomasa. La diferencia observada no es únicamente cuantitativa, sino estructural: mejoras moderadas en eficiencia térmica producen efectos no lineales en la generación de flujo de caja y resiliencia financiera. El análisis dinámico confirma que la retorta mantiene rentabilidad bajo rangos más amplios de variación en la tasa de descuento, consolidando su superioridad económica incluso bajo supuestos prudentes de reinversión. Se concluye que la eficiencia térmica opera como variable estructural que condiciona la arquitectura económica del sistema productivo, y que la modernización tecnológica puede transformar significativamente la generación de valor en el subsector del carbón vegetal.

Palabras clave: Carbón vegetal, retorta metálica, eficiencia térmica, VAN, TIR, TIRM, resiliencia financiera.

Abstract: This study presents a comparative techno-financial evaluation between an improved conventional kiln and an indirect-heating metallic retort for charcoal production. A ten-year discounted cash flow model was developed incorporating depreciation, a 25% corporate income tax rate, working capital requirements, intermediate reinvestment equivalent to 25% of initial investment in year five, and a 12% discount rate. Financial indicators included Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Modified Internal Rate of Return (MIRR), along with sensitivity analysis and both simple and discounted payback periods. Results indicate that both technologies are economically feasible under the base scenario; however, the metallic retort demonstrates higher value generation due to its superior gravimetric yield and reduced specific biomass consumption. The observed difference is not merely quantitative but structural: moderate improvements in thermal efficiency generate non-linear effects on cash flow accumulation and financial resilience. Dynamic analysis confirms that the retort maintains profitability across wider discount rate ranges, preserving its economic advantage even under conservative reinvestment assumptions. It is concluded that thermal efficiency operates as a structural variable shaping the economic architecture of charcoal production systems, and that technological modernization can significantly transform value generation within the charcoal subsector.

Keywords: Charcoal production, metallic retort, thermal efficiency, NPV, IRR, MIRR, financial resilience.

INTRODUCCIÓN

La producción de carbón vegetal constituye una actividad energética estratégica en múltiples regiones forestales de América Latina, particularmente en países donde la biomasa sólida continúa desempeñando un papel relevante dentro de la matriz energética rural y urbana. Más allá de su función tradicional como combustible doméstico, el carbón vegetal representa un vector energético transformado con mayor densidad calórica, estabilidad de almacenamiento y eficiencia logística respecto a la biomasa sin procesar, lo que amplía su competitividad en mercados formalizados.

Desde la perspectiva de los sistemas de energía renovable descentralizados, el carbón vegetal derivado de biomasa forestal puede considerarse un biocombustible sólido con potencial contribución a la seguridad energética rural y al manejo sostenible del recurso. En este sentido, la eficiencia del proceso de carbonización no solo afecta la rentabilidad económica del productor, sino también la eficiencia global del aprovechamiento energético de la biomasa. La eficiencia en la conversión de biomasa constituye un elemento clave en la viabilidad económica de sistemas de bioenergía, influyendo directamente en los costos operativos y en la sostenibilidad del recurso (IEA Bioenergy, 2020).

En Honduras la actividad de producción y comercialización de carbón vegetal genera flujos económicos significativos y sostiene dinámicas de empleo rural, integrándose a la estructura productiva del sector forestal. Sin embargo, la sostenibilidad económica de esta actividad no depende únicamente de la disponibilidad de materia prima o de la existencia de demanda estable, sino de la eficiencia tecnológica empleada en el proceso de carbonización y de la estructura financiera bajo la cual opera el sistema productivo. Desde el punto de vista técnico, los sistemas tradicionales de carbonización, particularmente los hornos de combustión directa presentan limitaciones asociadas a bajo control térmico, pérdidas energéticas y rendimientos reducidos. En contraste, tecnologías de calentamiento indirecto, como las retortas metálicas, permiten una mayor eficiencia térmica y un uso más racional del recurso biomasa mediante separación de cámaras y mejor control del proceso. La literatura técnica ha documentado estas diferencias en términos de balance energético; no obstante, con frecuencia los análisis comparativos se concentran en indicadores técnicos aislados sin integrar de manera estructural la dimensión financiera.

La decisión tecnológica en emprendimientos de pequeña y mediana escala suele estar condicionada por el monto de inversión inicial, privilegiando alternativas de menor costo de capital aun cuando su eficiencia operativa sea inferior. Este sesgo de decisión puede conducir a elecciones subóptimas desde el punto de vista económico cuando no se consideran adecuadamente variables como depreciación, estructura fiscal, capital de trabajo y sensibilidad ante fluctuaciones de mercado.

En contextos caracterizados por creciente presión sobre la disponibilidad de biomasa, derivada de restricciones ambientales, competencia con otros usos energéticos e incremento del valor relativo de la madera, la eficiencia en el uso del recurso adquiere una dimensión estratégica adicional. Tecnologías con mayor consumo específico de biomasa no solo enfrentan mayores costos variables, sino mayor exposición estructural ante escenarios de escasez o incremento sostenido en el precio de la materia prima.

En este marco, el presente estudio propone una evaluación técnico-financiera comparativa entre un horno convencional mejorado y una retorta metálica de calentamiento indirecto, bajo un enfoque integrado de flujo de caja descontado que incorpora depreciación, carga tributaria, capital de trabajo y análisis dinámico de sensibilidad. Más allá de contrastar niveles absolutos de rentabilidad, el objetivo central consiste en determinar si la diferencia tecnológica se traduce en una brecha estructural de resiliencia financiera frente a variaciones en el costo de capital y en el precio del carbón vegetal.

La hipótesis que guía el estudio plantea que la retorta metálica no solo incrementa la eficiencia productiva, sino que transforma la arquitectura económica del proyecto, reduciendo su vulnerabilidad relativa ante escenarios adversos y consolidando una ventaja financiera sistémica respecto al horno convencional mejorado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño metodológico y marco analítico

El estudio se desarrolló bajo un enfoque comparativo de evaluación técnico-financiera estructural, integrando análisis productivo, contable y económico dentro de un modelo de flujo de caja descontado (Discounted Cash Flow, DCF). A diferencia de aproximaciones parciales que se limitan a contrastar rendimientos físicos o márgenes operativos simples, el presente diseño metodológico incorpora explícitamente la interacción entre desempeño técnico y arquitectura financiera del proyecto.

El horizonte temporal de análisis se estableció en diez años, período coherente con la vida útil económica estimada de los activos principales y compatible con estándares de evaluación de proyectos agroindustriales de pequeña escala. La tasa de descuento adoptada (12 %) representa una aproximación al costo promedio del capital para inversiones productivas con riesgo moderado en economías latinoamericanas con limitada profundización financiera.

La estructura analítica se organizó en cuatro dimensiones integradas:

1. **Dimensión técnica-productiva:** capacidad instalada, duración del ciclo, rendimiento gravimétrico y producción anual.
2. **Dimensión operativa:** estructura de costos variables y fijos derivados del consumo específico de biomasa y de la intensidad de operación.
3. **Dimensión contable-fiscal:** depreciación lineal de activos y aplicación de impuesto sobre la renta corporativo.
4. **Dimensión financiera:** incorporación de capital de trabajo, recuperación al final del horizonte y evaluación mediante indicadores dinámicos (VAN, TIR, punto de equilibrio y análisis de sensibilidad).

Este marco metodológico permite evaluar no solo la rentabilidad esperada bajo condiciones estáticas, sino la resiliencia estructural de cada alternativa tecnológica ante variaciones en variables críticas. En consecuencia, el estudio trasciende una comparación de eficiencia térmica para examinar cómo las diferencias técnicas se traducen en transformaciones en el perfil de riesgo económico del proyecto.

La modelación fue determinística, manteniendo constantes los parámetros técnicos y de mercado bajo el escenario base, y posteriormente sometiéndolos a análisis de sensibilidad discreta y dinámica. Este procedimiento facilita identificar rangos de viabilidad financiera y estimar la elasticidad relativa de los indicadores frente a cambios en el entorno económico.

Modelación técnica-productiva

La modelación técnico-productiva se estructuró a partir de parámetros operativos homogéneos que permitieran aislar el efecto estrictamente tecnológico sobre el desempeño económico. Con este propósito, ambas alternativas, horno convencional mejorado y retorta metálica de calentamiento indirecto, fueron evaluadas bajo una capacidad instalada equivalente de 4 toneladas de biomasa por ciclo productivo y un calendario anual de 300 días efectivos de operación.

El supuesto de capacidad equivalente permite que las diferencias observadas en producción anual y consumo específico de biomasa respondan exclusivamente a la eficiencia intrínseca del sistema de carbonización y no a variaciones en escala física. Esta decisión metodológica fortalece la comparabilidad estructural entre tecnologías.

La variable crítica del modelo técnico es el rendimiento gravimétrico, definido como la relación porcentual entre la masa de carbón producido y la masa de biomasa alimentada al sistema. El horno convencional mejorado se modeló con un rendimiento del 25 %, valor representativo de sistemas de combustión directa optimizados, mientras que la retorta metálica se configuró con un rendimiento del 35 %, consistente con tecnologías de calentamiento indirecto con mayor control térmico.

Adicionalmente, se incorporó la duración del ciclo productivo como variable determinante de la intensidad anual de operación. El horno convencional presenta ciclos promedio de siete días, mientras que la retorta metálica opera con ciclos de cuatro días. Esta diferencia incide directamente en el número de ciclos anuales y, por lo tanto, en el volumen total de producción.

Para efectos de la simulación financiera se adoptó una tasa efectiva de impuesto sobre la renta del 25 % y una tasa de descuento del 12 %, representativa del costo de oportunidad del capital bajo condiciones nacionales.

Bajo estos supuestos, los parámetros consolidados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1.

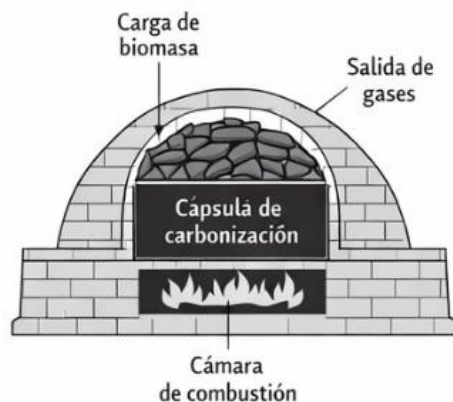
Parámetros técnico-productivos utilizados en la modelación comparativa

Parámetro	Horno convencional	Retorta metálica
Capacidad por ciclo	4 t biomasa	4 t biomasa
Duración del ciclo	7 días	4 días
Rendimiento gravimétrico	25 %	35 %
Ciclos anuales estimados	43	75
Producción anual de carbón	43 t	105 t

Nota. Elaboración propia

Figura 1.

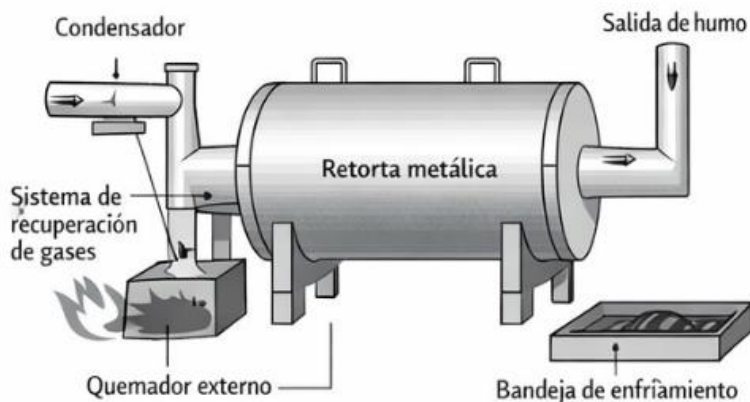
Esquema técnico del horno



Nota. Convencional mejorado

Figura 2.

Esquema técnico de retorta metálica de calentamiento indirecto



La diferencia productiva anual, aproximadamente 144 % superior en la retorta, surge de la combinación simultánea de mayor rendimiento gravimétrico y menor duración del ciclo. Este efecto compuesto genera una expansión significativa del volumen anual de producción sin modificar la capacidad física por carga.

Desde el punto de vista estructural, la modelación evidencia que pequeñas variaciones en rendimiento y tiempo de ciclo pueden amplificarse de manera no lineal a lo largo del año operativo, produciendo brechas sustanciales en generación potencial de ingresos. Esta característica constituye el puente analítico entre eficiencia térmica y rentabilidad financiera, desarrollado posteriormente en el análisis de flujo de caja.

Para efectos de clasificación, la configuración evaluada corresponde a una unidad productiva de pequeña escala, caracterizada por operación cíclica, inversión moderada y limitada

Supuestos de mercado y estructura de costos

La estimación de ingresos y costos se estructuró bajo un enfoque coherente con la lógica técnico-productiva previamente definida, asegurando consistencia entre rendimiento físico, consumo específico de biomasa y estructura económica del proyecto.

El precio base de venta del carbón vegetal se fijó en US\$ 1,300.00 por tonelada, valor representativo de mercados urbanos formalizados en Honduras, donde el producto empacado alcanza mayores niveles de valorización en comparación con mercados informales rurales. Este supuesto constituye la variable central de ingresos dentro del modelo y es posteriormente sometido a análisis de sensibilidad dinámica.

El costo de la materia prima, madera destinada a carbonización, se estableció en US\$ 220.00 por tonelada de biomasa. Dado que el rendimiento gravimétrico difiere entre tecnologías, el consumo específico de biomasa por tonelada de carbón producido también varía, generando diferencias estructurales en el costo variable unitario.

El consumo específico (CE) se definió como:

$$CE = \frac{1}{\text{Rendimiento}}$$

En consecuencia:

- Horno convencional (25 %): $CE = \frac{1}{0.25} = 4 \text{ t}^1 \text{ biomasa} / \text{t carbón}$
- Retorta metálica (35 %): $CE = \frac{1}{0.35} \approx 2.86 \text{ t biomasa} / \text{t carbón}$

Esta diferencia implica que la retorta requiere aproximadamente 28.5 % menos biomasa por tonelada producida, reduciendo proporcionalmente el costo variable asociado a materia prima.

El costo variable unitario (CVu) se determinó multiplicando el consumo específico por el costo de la biomasa:

$$CVu = CE \times \text{Precio biomasa}$$

De esta forma, la ventaja tecnológica en rendimiento se traduce directamente en una ventaja económica estructural, ya que la biomasa constituye el principal componente del costo variable total.

Es importante destacar que esta relación introduce un mecanismo de amplificación financiera: cualquier incremento en el precio de la madera impacta con mayor intensidad a la tecnología menos eficiente, aumentando su vulnerabilidad ante escenarios de escasez o presión de mercado. Este efecto será examinado posteriormente en el análisis de sensibilidad.

La estructura de costos adoptada distingue claramente entre:

- Costos variables dependientes del volumen de producción.
- Costos fijos asociados a operación y mantenimiento.

¹ t = tonelada

- Componentes contables y fiscales incorporados en la modelación financiera.

Este enfoque permite evitar simplificaciones excesivas y garantiza que las diferencias observadas en rentabilidad respondan a fundamentos técnico-económicos reales y no a supuestos arbitrarios.

Supuestos financieros y estructura contable

La evaluación financiera se estructuró bajo un enfoque empresarial integral, incorporando explícitamente los efectos contables, fiscales y de liquidez operativa sobre la generación de valor del proyecto. Este planteamiento busca aproximar el análisis a condiciones reales de decisión de inversión, superando modelos simplificados basados únicamente en diferencias entre ingresos y costos directos.

Se adoptó una tasa de impuesto sobre la renta corporativa del 25 %, representativa de regímenes fiscales aplicables a actividades productivas en nuestras economías. La inclusión del componente tributario responde a la necesidad de evitar sobreestimaciones de rentabilidad, dado que la omisión de impuestos tiende a inflar artificialmente indicadores como la Tasa Interna de Retorno (TIR), particularmente en proyectos con alta relación flujo/inversión.

Los activos productivos fueron depreciados bajo el método lineal en un horizonte de diez años, coherente con la vida útil económica estimada de la infraestructura evaluada. La depreciación, aunque no representa una salida efectiva de caja, se incorporó como escudo fiscal, reduciendo la base imponible y afectando el flujo neto disponible para el inversionista.

Adicionalmente, se incluyó capital de trabajo equivalente al 10 % de los costos operativos anuales. Este componente refleja la necesidad de financiar inventarios de biomasa, producción en proceso y requerimientos mínimos de liquidez para garantizar continuidad operativa. El capital de trabajo fue considerado como una inversión inicial adicional y recuperado íntegramente al final del horizonte de evaluación.

Este capital de trabajo (KT) se incorpora como parte de la inversión inicial debido a que representa los recursos necesarios para garantizar la continuidad operativa del proyecto, incluyendo la adquisición de biomasa, inventarios y requerimientos mínimos de liquidez. A diferencia de los costos operativos, el capital de trabajo no constituye un gasto, sino una asignación temporal de recursos que permanece dentro del ciclo productivo durante la vida del proyecto. En consecuencia, al finalizar el horizonte de evaluación y cesar las operaciones, estos recursos se liberan y se recuperan íntegramente, incorporándose como flujo de entrada en el último periodo. Este tratamiento permite reflejar de manera más realista la dinámica financiera del sistema productivo y evitar distorsiones en la estimación de la rentabilidad. El modelo se desarrolló bajo el supuesto de ausencia de apalancamiento financiero, es decir, sin considerar deuda ni costos asociados al financiamiento externo. Esta decisión metodológica permite aislar el desempeño económico intrínseco de cada tecnología, evitando distorsiones derivadas de estructuras de capital específicas.

La tasa de descuento utilizada fue del 12 %, seleccionada como aproximación al costo promedio del capital para proyectos productivos de riesgo moderado en contextos con acceso limitado a mercados financieros profundos. Esta tasa funciona como referencia para evaluar la creación de valor económico real en términos presentes.

La integración conjunta de depreciación, impuesto sobre la renta y capital de trabajo permite capturar tres efectos fundamentales:

1. Impacto fiscal sobre utilidades operativas.
2. Efecto protector de la depreciación como escudo tributario.
3. Restricción de liquidez asociada a la operación continua.

Adicionalmente, se incorporó una reinversión equivalente al 25 % del valor inicial de los activos en el año 5 del horizonte de evaluación, correspondiente a mantenimiento estructural mayor y reposición parcial de componentes críticos. Esta consideración responde a la vida útil técnica diferenciada de elementos sometidos a altas temperaturas y ciclos térmicos repetidos. La inclusión de esta reinversión intermedia permite evitar sobreestimaciones de rentabilidad derivadas de supuestos de operación continua sin intervenciones significativas.

En conjunto, estos elementos configuran una arquitectura financiera que refleja con mayor fidelidad las condiciones bajo las cuales se tomaría una decisión real de inversión en el sector forestal-energético.

Indicadores financieros utilizados en la evaluación económica

Con el propósito de evaluar la viabilidad económica de los sistemas de producción analizados, se emplearon indicadores financieros estándar utilizados en evaluación de proyectos. Estos permiten medir rentabilidad operativa, generación de flujo de efectivo y conveniencia de inversión bajo distintos escenarios tecnológicos.

Para efectos de claridad, se definen previamente las siguientes variables:

- **Io**: Inversión inicial en activos fijos.
- **KT**: Capital de trabajo requerido al inicio del proyecto.
- **T**: Tasa efectiva de impuesto sobre la renta aplicada a la utilidad operativa.
- **i**: tasa de descuento representativa del costo de oportunidad del capital.
- **n**: Horizonte de evaluación del proyecto, expresado en años.
- **FCt**: Flujo de caja correspondiente al año t.

Utilidad antes de Intereses e Impuestos (UAI)

La Utilidad antes de Intereses e Impuestos (UAI) representa el resultado operativo del proyecto antes de considerar gastos financieros e impuestos. Permite medir la rentabilidad productiva independiente de la estructura de financiamiento

Se calcula como:

$$UAI = Ingresos - Costos - GastosOperativos$$

Los gastos operativos incluyen la depreciación de los activos productivos.

Flujo de caja operativo

El flujo de caja representa el efectivo real generado por el proyecto en cada periodo. Se calcula a partir de la utilidad operativa después de impuestos, adicionando nuevamente la depreciación debido a que no constituye una salida real de efectivo.

$$FC_t = UAI(1 - T) + Depreciación$$

donde:

- T corresponde a la tasa de impuesto sobre la renta.
- La depreciación se suma nuevamente porque, aunque reduce la base imponible, no representa desembolso de efectivo.

La tasa T corresponde al impuesto aplicado sobre la utilidad operativa, y su inclusión permite estimar el flujo de caja después de impuestos, que es el flujo relevante para la evaluación financiera.

Inversión inicial y capital de trabajo

El proyecto requiere una inversión inicial compuesta por activos fijos y capital de trabajo:

$$Inversion\ Inicial = I_o + KT$$

donde:

- I_o corresponde a activos fijos.
- KT corresponde al capital de trabajo necesario para iniciar operaciones.

En el año 0:

$$FC_0 = -(I_o + KT)$$

El capital de trabajo se recupera íntegramente al finalizar el horizonte de evaluación, incorporándose como ingreso en el último año del proyecto.

Valor Actual Neto (VAN)

El Valor Actual Neto (VAN) permite determinar el valor presente de los flujos futuros descontados a una tasa i .

$$VAN = -(I_o + KT) \sum \left[\frac{F_t}{(1+i)^n} \right]$$

donde:

- I_o = Inversión inicial en activos fijos
- KT = Capital de trabajo requerido al inicio del proyecto
- i = tasa de descuento (12%)
- n = horizonte de evaluación (10 años)

La tasa i representa el costo de oportunidad del capital o tasa mínima aceptable de rendimiento utilizada para descontar los flujos futuros.

Un VAN positivo indica que el proyecto genera valor económico por encima del costo de oportunidad del capital.

Tasa Interna de Retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno se define como la tasa (TIR) que satisface:

$$0 = -(I_o + KT) + \sum \left[\frac{F_t}{(1+TIR)^n} \right]$$

La TIR representa la rentabilidad porcentual implícita del proyecto y permite compararlo con otras alternativas de inversión.

Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRM)

Dado que la TIR convencional supone la reinversión de los flujos intermedios a la misma tasa interna calculada, lo cual puede sobreestimar la rentabilidad en proyectos con recuperación temprana de inversión, se incorporó adicionalmente la Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRM). Este indicador asume que los flujos positivos se reinvierten a la tasa de descuento adoptada (12 %), proporcionando una estimación más conservadora y financieramente realista de la rentabilidad estructural del proyecto.

Se calcula como:

$$TIRM = \left(\frac{VF_{\text{flujos positivos}}}{-VP_{\text{flujos negativos}}} \right)^{1/n} - 1$$

Donde:

- Los flujos positivos se capitalizan a la tasa de descuento (12 %).
- Los flujos negativos se descuentan al presente.

La TIRM ofrece una estimación más conservadora y realista de la rentabilidad cuando existen diferencias entre tasa de financiamiento y tasa de reinversión.

Estructura del flujo de caja utilizado

El flujo de caja utilizado en la evaluación financiera se estructuró con base en los siguientes componentes:

Año 0:

$$FC_0 = -(I_0 + KT)$$

donde I_0 corresponde a la inversión en activos fijos y KT al capital de trabajo requerido al inicio del proyecto.

Años 1 a n:

$$FC_t = UAI(1 - T) + \text{Depreciación}$$

Este flujo representa el efectivo generado por la operación después de impuestos, adicionando nuevamente la depreciación por no constituir salida real de efectivo.

Último año:

$$FC_n = \text{Flujo operativo} + \text{Recuperación de } KT$$

El capital de trabajo se recupera íntegramente al finalizar el horizonte de evaluación, incorporándose como entrada de efectivo.

Esta estructura garantiza coherencia entre los flujos operativos y los indicadores financieros calculados (VAN, TIR y TIRM), evitando duplicaciones contables y asegurando consistencia metodológica.

Tabla 4.

Esquema estructural del flujo de caja utilizado en la evaluación financiera

Año	Componente	Expresión estructural
0	Inversión inicial	$-(I_0 + KT)$
1 a $n-1$	Flujo operativo anual	$UAI(1 - T) + \text{Depreciación}$
n (último año)	Flujo operativo + recuperación de KT	$UAI(1 - T) + \text{Depreciación} + KT$

Nota. Elaboración propia

Análisis de sensibilidad

La evaluación financiera no se limitó a la estimación de indicadores bajo un escenario base estático, sino que incorporó un análisis de sensibilidad destinado a examinar la estabilidad estructural del proyecto frente a variaciones en variables críticas. Este procedimiento permite estimar el grado de exposición al riesgo económico y comparar la resiliencia relativa de cada tecnología.

El análisis se desarrolló en dos niveles complementarios: sensibilidad discreta unidimensional y sensibilidad dinámica continua.

Sensibilidad discreta unidimensional

En una primera aproximación, se evaluaron variaciones puntuales de $\pm 10\%$ en dos variables consideradas determinantes del flujo de caja operativo:

- Precio de venta del carbón vegetal (P)
- Costo unitario de biomasa (P_b)

Estas variables fueron seleccionadas por su impacto directo sobre el margen de contribución y, por consiguiente, sobre la generación de flujo operativo anual. El procedimiento consistió en modificar una variable a la vez, manteniendo constantes los demás parámetros, con el objetivo de aislar su efecto individual sobre el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Este enfoque permite identificar la sensibilidad marginal de cada tecnología ante perturbaciones moderadas del entorno de mercado, así como detectar posibles umbrales de pérdida de viabilidad financiera.

Sensibilidad dinámica continua

En una segunda etapa, se analizó el comportamiento funcional del VAN bajo variaciones continuas de dos parámetros estratégicos:

1. Tasa de descuento (i), en un rango de 8 % a 25 %.
2. Precio de venta del carbón (P), en un intervalo de ± 20 % respecto al escenario base.

La relación funcional evaluada puede expresarse como:

$$\text{VAN} = f(i, P)$$

Este análisis dinámico permite observar no solo cambios puntuales, sino la pendiente y curvatura de la función VAN respecto a cada variable, proporcionando una medida más completa de estabilidad financiera.

En el caso de la tasa de descuento, el objetivo fue evaluar la elasticidad del VAN frente a variaciones en el costo de oportunidad del capital, asociadas a cambios en percepción de riesgo o condiciones macroeconómicas.

En el caso del precio del carbón, el análisis busca estimar la capacidad de cada tecnología para absorber fluctuaciones de mercado sin comprometer su viabilidad económica.

Interpretación estructural de la resiliencia

Más allá de identificar si el VAN permanece positivo o negativo, el análisis de sensibilidad se interpretó desde una perspectiva estructural. Una menor pendiente relativa del VAN frente a variaciones en variables críticas implica menor vulnerabilidad financiera y mayor margen de seguridad económica.

En este sentido, la comparación entre tecnologías no se limita a contrastar magnitudes absolutas de rentabilidad, sino a evaluar diferencias en el perfil de riesgo asociado a cada arquitectura productiva.

Este enfoque permite trascender la lógica tradicional de “mayor TIR = mejor proyecto”, incorporando el concepto de resiliencia financiera como criterio adicional de decisión tecnológica.

Modelo estructural de transmisión técnica-financiera

Con el propósito de sintetizar la relación entre desempeño técnico y generación de valor económico, se formuló un modelo estructural que representa la cadena de transmisión mediante la cual la eficiencia térmica impacta los indicadores financieros del proyecto.

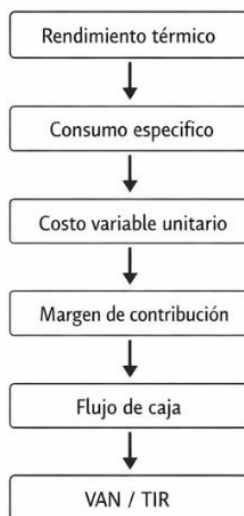
El modelo parte del rendimiento gravimétrico del proceso de carbonización como variable técnica primaria. Una mejora en el rendimiento reduce el consumo específico de biomasa por tonelada producida, lo cual disminuye el costo variable unitario. Esta reducción incrementa el margen de contribución y, en consecuencia, fortalece el flujo de caja operativo anual.

La acumulación descontada de estos flujos determina el Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno, configurando finalmente el nivel de resiliencia financiera del sistema frente a variaciones en el entorno económico.

La Figura 3 presenta de manera esquemática esta estructura de transmisión técnico-financiera, que constituye el eje analítico del estudio.

Figura 3.

Modelo estructural técnico-financiero



Nota. Elaboración propia

RESULTADOS

Características Químicas de los Biofertilizantes

El compost de pulpa de café presentó concentraciones mayores que el Biol en todos los macronutrientes y en la mayoría de los micronutrientes analizados (Tabla 1). El zinc fue el único elemento más concentrado en el Biol (5.2 ppm) que en el Compost (0.4 ppm).

Tabla 1
 Composición química del biol y el compost utilizados como biofertilizantes

Nutriente	Concentración	
	Biol	Compost
N (%)	0.19	1.68
P (%)	0.01	0.11
K (%)	0.07	1.50
Ca (%)	0.11	1.87
Mg (%)	0.02	0.17
Fe (ppm)	532.8	1319.9
Mn (ppm)	12.0	239.4
Zn (ppm)	5.2	0.4
Cu (ppm)	4.7	33.4

Nota. Los valores corresponden al análisis químico de laboratorio; ppm = partes por millón.

Sobrevivencia

La Tabla 2 muestra que no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre la probabilidad de sobrevivencia de *Gliricidia sepium* del tratamiento ($\chi^2(2) = 1.67, p = .435$), del tiempo ($\chi^2(3) = 3.66, p = .301$) ni de la interacción Tratamiento \times Tiempo ($\chi^2(6) = 1.90, p = .929$). Los tratamientos registraron tasas superiores al 98 % durante todo el período, con probabilidades estimadas que oscilaron entre 0.983 y 1.000 (Figura 2). Al cierre del ensayo, el Compost mostró una mayor proporción observada (99.38 %, EE = 0.0036), sin que estas diferencias alcanzaran significancia estadística (Tabla 3).

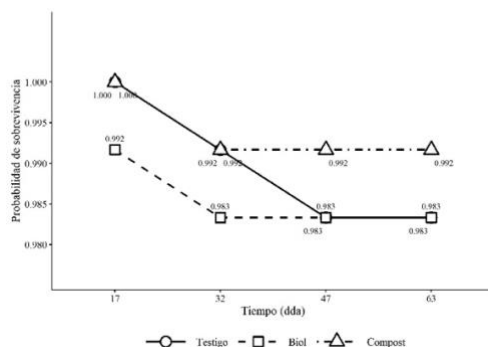
Tabla 2
 Efecto de los factores del modelo sobre la sobrevivencia de *Gliricidia sepium*

Fuente de variación	χ^2	gl	p
Tratamiento	1.67	2	.435
Tiempo	3.66	3	.301
Tratamiento \times Tiempo	1.90	6	.929

Nota. Resultados obtenidos mediante un modelo lineal generalizado binomial. Prueba chi-cuadrado de Wald Tipo II.

Figura 1

Probabilidad de sobrevivencia estimada de *Gliricidia sepium* por tratamiento en el tiempo



Nota. dda = días después de la aplicación de los tratamientos. Los puntos representan las probabilidades estimadas mediante un modelo lineal generalizado binomial (GLM, enlace logit). Los valores sobre los puntos indican dichas probabilidades.

Tabla 3
 Estadísticos descriptivos de la sobrevivencia observada de *Gliricidia sepium* por tratamiento

Tratamiento	n	Sobrevivencia (%)	EE	IC 95 %
Testigo	480	98.96	0.0046	[98.1, 100]
Biol	480	98.54	0.0055	[97.5, 100]
Compost	480	99.38	0.0036	[98.7, 100]

Nota. n = número total de plantas evaluadas por tratamiento durante todo el período; sobrevivencia (%) = proporción observada al cierre; EE = error estándar binomial; IC del 95% = intervalo de confianza (método de Wald).

Altura

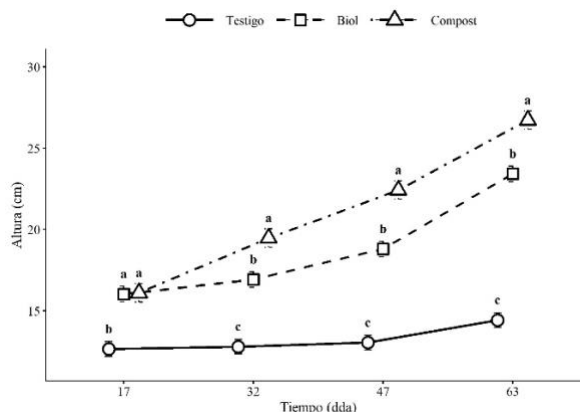
El efecto de los tratamientos sobre la altura de *Gliricidia sepium* varió en función del tiempo de evaluación (Tabla 4; Figura 3). A los 17 dda, Biol (16.03 cm) y Compost (16.11 cm) superaron al Testigo (12.65 cm) sin mostrar diferencias entre sí. A partir de los 32 dda las diferencias entre los biofertilizantes comenzaron a acentuarse, de modo que a los 63 dda el Compost alcanzó la mayor altura (26.73 cm), seguido del Biol (23.43 cm) y el Testigo (14.43 cm), mostrando todos los pares de medias diferencias significativas ($p < .05$, Tabla 5).

Tabla 4
 Efecto de los factores del modelo sobre la altura de *Gliricidia sepium*

Fuente de variación	gl num	gl den	F	p	η^2_p
Tratamiento	2	9	102.40	< .001	0.96
Tiempo	3	459	159.28	< .001	0.51
Tratamiento × Tiempo	6	459	37.58	< .001	0.33

Nota. gl num = grados de libertad del numerador; gl den = grados de libertad del denominador; F = estadístico F; p = valor p sin cero inicial; η^2_p = eta cuadrado parcial (IC 95%).

Figura 2
 Evolución de la altura media estimada de *Gliricidia sepium* por tratamiento en el tiempo



Nota. Medias marginales estimadas mediante modelo mixto lineal. Las barras de error representan el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada período (Tukey, $p < .05$).

Tabla 5
 Comparación de la altura de *Gliricidia sepium* entre tratamientos y tiempos

Tratamiento	Tiempo (dda)	Media (cm)	EE	Agrupación de medias
Testigo	17	12.65	0.45	b
Biol		16.03	0.48	a
Compost		16.11	0.57	a
Testigo	32	12.80	0.45	c
Biol		16.93	0.48	b
Compost		19.48	0.57	a
Testigo	47	13.05	0.45	c
Biol		18.80	0.48	b
Compost		22.43	0.57	a
Testigo	63	14.43	0.45	c
Biol		23.43	0.48	b
Compost		26.73	0.57	a

Nota. dda = días después de la aplicación de los tratamientos; Media = media marginal estimada por el modelo mixto lineal; EE = error estándar; agrupación de Tukey: letras distintas indican diferencias significativas ($p < .05$).

DAC

Se encontraron diferencias significativas en la interacción Tratamiento \times Tiempo ($F(6, 459) = 18.49, p < .001, \eta^2_p = .19$), con un efecto de tratamiento de magnitud muy grande ($\eta^2_p = .98$, Tabla 6). A los 17 dda, Biol (3.38 mm) y Compost (3.40 mm) mostraron valores superiores al Testigo (2.10 mm). La diferenciación entre los biofertilizantes surgió a partir de los 47 dda, cuando el Compost (6.03 mm) superó al Biol (4.80 mm) y este al Testigo (3.20 mm), patrón que se consolidó a los 63 dda con valores de 6.93, 5.43 y 3.50 mm, respectivamente (Tabla 7; Figura 4). La diferencia progresiva entre los tres tratamientos fue más pronunciada para el DAC que para la altura, lo que sugiere un efecto diferencial de los biofertilizantes sobre el engrosamiento del tallo.

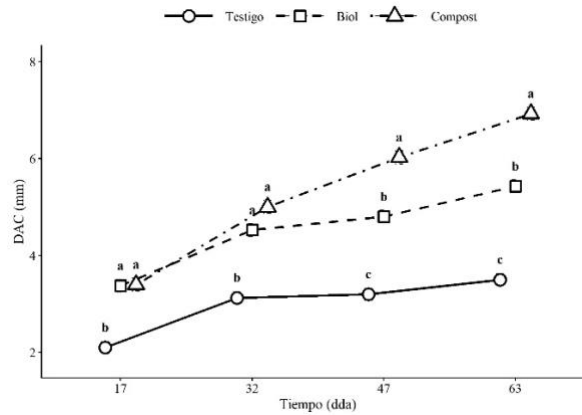
Tabla 6
 Efecto de los factores del modelo sobre el DAC (mm) de *Gliricidia sepium*

Fuente de variación	gl num	gl den	F	p	η^2_p
Tratamiento	2	9	239.35	< .001	0.98
Tiempo	3	459	206.24	< .001	0.57
Tratamiento \times Tiempo	6	459	18.49	< .001	0.19

Tabla 7
 Comparación del DAC de *Gliricidia sepium* entre tratamientos y tiempos

Tratamiento	Tiempo (dda)	Media (mm)	EE	Agrupación de medias
Testigo	17	2.10	0.11	b
Biol		3.38	0.13	a
Compost		3.40	0.13	a
Testigo	32	3.13	0.11	b
Biol		4.53	0.13	a
Compost		5.00	0.13	a
Testigo	47	3.20	0.11	c
Biol		4.80	0.13	b
Compost		6.03	0.13	a
Testigo	63	3.50	0.11	c
Biol		5.43	0.13	b
Compost		6.93	0.13	a

Figura 3
 Evolución del DAC medio estimado de *Gliricidia sepium* por tratamiento en el tiempo



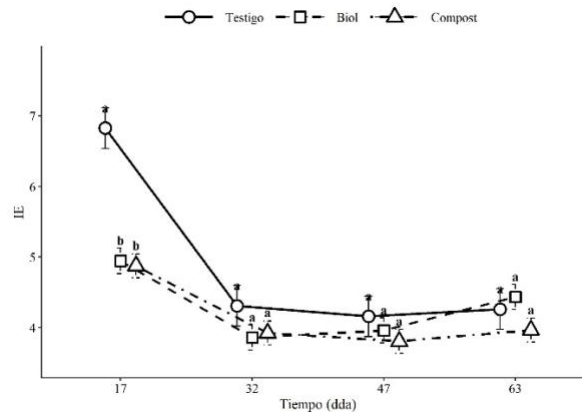
IE

La interacción Tratamiento × Tiempo también fue significativa para el IE ($F(6, 459) = 5.20, p < .001, \eta^2_p = .06$), con un tamaño de efecto mediano — el más modesto de las tres variables continuas evaluadas (Tabla 8). Las diferencias entre tratamientos se concentraron exclusivamente en el primer tiempo de medición: a los 17 dda el Testigo registró un IE (6.83), clasificado como calidad media, significativamente superior al Biol (4.95) y al Compost (4.88), clasificados como alta calidad. La Figura 5 ilustra que los biofertilizantes promovieron un mayor engrosamiento del tallo respecto al crecimiento apical durante las primeras semanas, reduciendo la esbeltez inicial; este efecto se diluyó con el tiempo hasta que los tres tratamientos alcanzaron valores de calidad morfológica similares.

Tabla 8
 Efecto de los factores del modelo sobre el IE de *Gliricidia sepium*

Fuente de variación	gl num	gl den	F	p	η^2_p
Tratamiento	2	9	6.21	.020	0.58
Tiempo	3	459	41.02	< .001	0.21
Tratamiento × Tiempo	6	459	5.20	< .001	0.06

Figura 4
 Evolución del IE medio estimado de *Gliricidia sepium* por tratamiento en el tiempo



DISCUSIÓN

El Compost concentró la mayoría de los macro y micronutrientes en mayor proporción que el Biol (Tabla 1). Esto coincide con lo reportado por Clavijo y Jiménez (2016) y Domínguez y Edwards (2011) para procesos de lombricompostaje, donde la digestión por *Eisenia fetida* estabiliza la materia orgánica y libera nutrientes en formas más biodisponibles. La menor concentración elemental del Biol responde al medio acuoso de la fermentación anaerobia, en el que parte del nitrógeno y otros elementos se pierden por volatilización o quedan ligados a la fracción líquida en bajas proporciones (Granda Granadino & Martínez Torres, 2020). El zinc fue el único elemento más concentrado en el Biol, patrón compatible con la solubilización de este micronutriente bajo condiciones anaerobias y de pH cercano a la neutralidad. Esta divergencia en la composición es relevante para interpretar el desempeño observado, ya que el contenido de potasio, calcio y fósforo del Compost se aproxima a los rangos identificados para *G. sepium* por Alamu et al. (2023), de modo que su aplicación al sustrato proveyó una matriz nutricional cercana a los requerimientos de la especie.

La sobrevivencia se mantuvo por encima del 98 % en los tres tratamientos, sin efecto significativo de la interacción Tratamiento \times Tiempo. Este resultado indica que ninguno de los biofertilizantes resultó fitotóxico en las dosis ensayadas y que las pérdidas de plántulas durante el experimento se debieron a factores ambientales y de manejo más que por la nutrición. Berhe et al. (2024) advierten que la sobrevivencia de plántulas en vivero es un indicador conservador, sensible principalmente a estrés hídrico, plagas o calidad inicial del material. En este ensayo, la uniformidad genotípica del lote semillero y el manejo bajo malla serán explicar los valores altos y similares entre tratamientos.

El crecimiento en altura mostró una respuesta diferencial que se acentuó con el tiempo. A los 17 dda, Biol y Compost ya habían superado al Testigo en cerca de 3 cm sin diferenciarse entre sí, lo que sugiere una ventaja inicial común atribuible a la aplicación de cualquier biofertilizante. Sin embargo, a partir de los 32 dda el Compost se separó del Biol y mantuvo la mayor altura hasta los 63 dda (26.73 cm), patrón consistente con la liberación lenta de nutrientes característica de las enmiendas sólidas (Campos-Rodríguez et al., 2016) frente al efecto puntual de las aplicaciones foliares. El tamaño de efecto de la interacción ($\eta^2_p = .33$) confirma que la diferenciación temporal entre tratamientos no fue trivial.

El DAC presentó una dinámica análoga, pero con una diferenciación progresiva entre los tres tratamientos más marcada que la observada para altura. A los 63 dda, el Compost (6.93 mm) superó al Biol (5.43 mm) y este al Testigo (3.50 mm), con todos los pares significativamente distintos. Este patrón sugiere que los biofertilizantes —y particularmente el Compost— promovieron de manera preferente el engrosamiento del tallo, una variable estrechamente relacionada con la resistencia mecánica y el éxito en plantación a campo (Rueda-Sánchez et al., 2018). El mayor aporte de calcio y potasio del compost es coherente con esta respuesta, dado que ambos elementos participan en la formación de paredes celulares y en la regulación de la turgencia (Marschner, 2012).

El IE integra ambas variables y, por tanto, ofrece la lectura más informativa sobre la calidad morfológica. La interacción significativa, aunque con tamaño de efecto modesto ($\eta^2_p = .06$), reflejó que las diferencias se concentraron en el primer tiempo de medición: a los 17 dda el Testigo se ubicó en la categoría de calidad media (IE = 6.83) mientras que Biol y Compost ya alcanzaban valores de alta calidad (IE = 4.95 y 4.88, respectivamente). Esta ventaja temprana confirma que los biofertilizantes promovieron un desarrollo más equilibrado entre tallo y altura desde las primeras semanas. Con el avance del tiempo los tres tratamientos convergieron dentro de la categoría de alta calidad, debido a que el Testigo creció proporcionalmente menos en altura que en diámetro y los biofertilizantes mantuvieron un balance estable entre ambos crecimientos. Por lo tanto, la utilidad práctica de los biofertilizantes no radica únicamente en obtener plántulas más vigorosas, sino en alcanzar la condición de calidad morfológica adecuada en menor tiempo.

CONCLUSIONES

El Compost presentó concentraciones de macro y micronutrientes superiores a las del Biol, con valores cercanos a los requerimientos nutricionales reportados para *Gliricidia sepium*, lo que respalda su mayor potencial como enmienda silvícola en condiciones de vivero.

Todos los tratamientos, incluido el Testigo, presentaron sobrevivencias superiores al 98 %, lo que confirma la seguridad de las dosis evaluadas para la especie.

Los biofertilizantes incrementaron el crecimiento en altura y DAC, destacando el efecto superior del Compost a partir de los 32 días después de la aplicación y hasta el final del periodo evaluado.

El Biol y el Compost permitieron alcanzar la categoría de alta calidad morfológica desde la primera medición, mientras que el Testigo lo logró en evaluaciones posteriores. En conjunto, el aprovechamiento de la pulpa de café y las aguas mieles como insumos para la elaboración de biofertilizantes representa una alternativa viable y sostenible para la producción de plántulas de *Gliricidia sepium* con fines dendroenergéticos.

Contribución de los autores

Aguiriano Figueroa diseñó el experimento, ejecutó el trabajo de campo, recolectó los datos y redactó el informe de tesis. Benítez Mendoza, en su calidad de asesor, orientó el diseño experimental, la metodología de campo, la interpretación biológica de los resultados y revisó el informe. Oviedo Ramos ejecutó el reanálisis con modelos lineales mixtos y contribuyó a la redacción de las secciones de metodología y resultados. Los tres autores revisaron y aprobaron la versión final del manuscrito y asumen responsabilidad conjunta por la veracidad, integridad y contenido del estudio.

Conflicto de interés

Los autores establecen que no existe ningún conflicto de intereses que pudieron haber influido en la elaboración o publicación de esta obra.

Financiamiento

El autor principal declara que no recibió financiamiento externo para la realización de esta investigación.

Uso de inteligencia artificial (IA)

La inteligencia artificial se empleó exclusivamente como herramienta de asistencia para la revisión y depuración de scripts en R. Todas las decisiones analíticas, el procesamiento estadístico y la interpretación de resultados fueron realizadas y validadas por los autores, quienes garantizaron la coherencia metodológica y la integridad del estudio.

REFERENCIAS

- Aguiriano Figueroa, E. I. (2025). Efecto de la aplicación de biofertilizantes, en el desarrollo de *Gliricidia sepium* (Jacq.) (Madreado) a nivel de vivero, en San Francisco de la Paz, Olancho, Honduras [Tesis de grado no publicada]. Universidad Nacional de Ciencias Forestales.
- Alamu, E. O., Adesokan, M., Fawole, S., Maziya-Dixon, B., Mehreteab, T., & Chikoye, D. (2023). *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp Applications for Enhancing Soil Fertility and Crop Nutritional Qualities: A Review. *Forests*, 14(3), 635. https://doi.org/10.3390/f14030635?utm_source=chatgpt.com
- Araujo-Abad, S., & Collahuazo-Reinoso, Y. (2019). Producción de Biofertilizantes a Partir de Microalgas. *CEDAMAZ*, 9(2), 81-87. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/648>
- Ben-Shachar, M. S., Lüdtke, D., & Makowski, D. (2020). effectsize: Estimation of effect size indices and standardized parameters. *Journal of Open Source Software*, 5(56), 2815. <https://doi.org/10.21105/joss.02815>
- Berhe, D. H., Gidey, T., Gebregziabher, D., Tesema, T., Anjulo, A., Retta, A. N., Sisay, A., & Okolo, C. C. (2024). Seedling survival and plantation success in the drylands of Northern Ethiopia. *Discover Agriculture*, 2(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00015-4>
- Campos-Rodríguez, R., Brenes-Peralta, L., & Jiménez-Morales, M. F. (2016). Evaluación técnica de dos métodos de compostaje para el tratamiento de residuos sólidos biodegradables domiciliarios y su uso en huertas caseras. *Revista Tecnología en Marcha*, 29(8), 25. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i8.2982>
- Clavijo, N. M., & Jiménez, A. A. R. (2016). Evaluación de diferentes métodos para la transformación de la pulpa de café en abono orgánico en fincas cafeteras. <https://ridum.umanizales.edu.co/server/api/core/bitstreams/0b69551d-27cc-468b-9918-83d6160cd555/content>
- Cohen, J. (2009). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2. ed., reprint). Psychology Press. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9780203771587/statistical-power-analysis-behavioral-sciences-jacob-cohen>
- CONABIO. (2016). *Gliricidia sepium*. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/29-legum19m.pdf
- Domínguez, J., & Edwards, C. (2011). Biology and Ecology of Earthworm Species Used for Vermicomposting. En C. Edwards, N. Arancon, & R. Sherman (Eds.), *Vermiculture Technology* (pp. 27-40). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10453-4>
- Flórez-Delgado, D. F., & Rosales-Asensio, E. (2018). Uso del ensilaje de pulpa de café en alimentación animal. *Mundo FESC*, 8(15), 73-82. <https://doi.org/10.61799/2216-0388.254>
- Fox, J., & Weisberg, S. (2019). *An R companion to applied regression* (3.ª ed.). Sage. <https://www.john-fox.ca/Companion/>
- Granda Granadino, D. C., & Martínez Torres, J. F. (2020). Determinación de parámetros óptimos de anaerobiosis del agua miel de café en la finca cafetalera el Limón del distrito de Chirinos – Cajamarca, 2019 [Tesis de grado, Universidad Nacional de Jaén]. <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/175>
- Kuehl, R. O. (2000). *Design of experiments: Statistical principles of research design and analysis* (2nd ed). Duxbury/Thomson Learning. <https://archive.org/details/designofexperime0000kueh>
- Lenth, R. V., & Piaskowski, J. (2026). emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means [Manual]. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.emmeans>
- Marschner, P. (Ed.). (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed). Elsevier/Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>
- Mexal, J. G., & Landis, T. D. (1990). Target seedling concepts: Height and diameter. En R. Rose, S. J. Campbell, & T. D. Landis (Eds.), *Target seedling symposium: Proceedings, combined meeting of the Western Forest Nursery Associations* (pp. 17-35). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/45098>
- Patiño-Díez, J. F., & Smith-Quintero, R. (2008). Consideraciones sobre la dendroenergía bajo un enfoque sistémico. *Revista Energética*, (39), 19-28. <https://www.redalyc.org/pdf/1470/147020257003.pdf>
- Pinheiro, J., Bates, D., & R Core Team. (2025). nlme: Linear and nonlinear mixed effects models [Manual]. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.nlme>
- R Core Team. (2026). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rueda-Sánchez, A., Benavides-Solorio, J. D. D., Saenz-Reyez, J. T., Muñoz Flores, H. J., Prieto-Ruiz, J. Á., & Orozco Gutiérrez, G. (2018). CALIDAD DE PLANTA PRODUCIDA EN LOS VIVEROS FORESTALES DE NAYARIT. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(22), 58-73. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v5i22.350>
- Verbeke, G., & Molenberghs, G. (2000). *Linear Mixed Models for Longitudinal Data*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0300-6>