

Artículo

Evaluación de un sistema forestal análogo perteneciente al sector San Ignacio, cantón Cumandá

Assessment of a similar forest system in the San Ignacio sector, Cumandá cantón

Brayan David Cusquillo-Quispillo ^{1*}, Myriam Soledad Llumitasig-Quinatoa ², Mercedes Susana Carranza-Patiño ³, David Orlando Agualzaca-Caisaguano ⁴ y Erika Yeseña Guaman-Guaman ⁵

1 Investigador Independiente, Ecuador, Riobamba; <https://orcid.org/0009-0002-2030-3546>

2 Investigador Independiente, Ecuador, Riobamba; <https://orcid.org/0009-0008-6615-2628>;
mlumitasig@uteq.edu.ec

3 Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador, Quevedo; <https://orcid.org/0000-0002-0917-0415>; mcarranza@uteq.edu.ec

4 Investigador Independiente, Ecuador, Riobamba; <https://orcid.org/0009-0001-6873-4874>;
daqualzacac@uteq.edu.ec

5 Investigador Independiente, Ecuador, Latacunga; <https://orcid.org/0009-0001-8110-7373>;
guamanerika30@gmail.com

* Correspondencia: bcusquilloq@uteq.edu.ec

Cita: Cusquillo-Quispillo, B. D., Llumitasig-Quinatoa, M. S., Carranza-Patiño, M. S., Agualzaca-Caisaguano, D. O., & Guaman-Guaman, E. Y. (2026). Evaluación de un sistema forestal análogo perteneciente al sector San Ignacio, cantón Cumandá. *Multidisciplinary Collaborative Journal*, 4(2), 187-201. <https://doi.org/10.70881/mcj/v4/n2/159>

Recibido: 20/04/2026
Revisado: 03/06/2026
Aceptado: 08/06/2026
Publicado: 11/06/2026



Copyright: © 2026 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional. (CC BY-NC).

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

 <https://doi.org/10.70881/mcj/v4/n2/159>

Resumen: La explotación maderera y la deforestación en los bosques tropicales del Ecuador demandan alternativas productivas sostenibles. Los sistemas forestales análogos constituyen modelos de restauración asistida socioeconómicamente viables que emulan la estructura y funcionalidad de un bosque natural. El objetivo del estudio fue evaluar el sistema forestal análogo «Don Ramón», ubicado en el sector San Ignacio del cantón Cumandá, analizando su composición, diversidad florística, salud vegetativa y valoración económica del volumen maderable en pie. Se aplicó un diseño no experimental de corte transversal sobre 9,94 hectáreas; se delimitaron 5 transectos de 1000 m² para la identificación florística en tres estratos y 25 parcelas circulares de 500 m² para la cuantificación del volumen comercial. La salud de la cobertura vegetal se determinó mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) calculado con imágenes Sentinel-2 procesadas en Google Earth Engine. Se registraron 49 especies distribuidas en 43 familias botánicas, con predominio de *Ureca baccifera*, *Theobroma cacao* y *Cordia alliodora*. El área albergó taxones amenazados y con aprovechamiento prohibido como *Swietenia macrophylla* y *Cedrela odorata*. El índice de Simpson evidenció una diversidad media-alta y el NDVI registró un valor máximo de 0,89, indicativo de un estado fitosanitario óptimo. Se cuantificó un volumen maderable aprovechable de 128,64 m³, con una valoración económica de 15 286,39 USD. Los hallazgos sugieren que el sistema forestal análogo evaluado contribuye a la conservación de la biodiversidad y la sostenibilidad económica del productor rural, constituyendo un modelo replicable de restauración productiva.

Palabras clave: forestería análoga; NDVI; Sentinel-2; diversidad florística; valoración económica forestal

Abstract: Logging activities and deforestation in Ecuadorian tropical forests demand sustainable productive alternatives. Analog forest systems constitute socioeconomically viable assisted-restoration models that emulate the structure and functionality of natural forests. The objective of this study was to evaluate the "Don Ramón" analog forest system, located in the San Ignacio sector of Cumandá canton, analyzing its composition, floristic diversity, vegetative health, and economic valuation of standing timber volume. A non-experimental cross-sectional design was applied over 9.94 hectares; five 1000 m² transects were delimited for floristic identification across three strata, and 25 circular plots of 500 m² were established to quantify the commercial volume. The health of the vegetation cover was determined through the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) calculated from Sentinel-2 imagery processed in Google Earth Engine. A total of 49 species distributed in 43 botanical families were recorded, with predominance of *Urera baccifera*, *Theobroma cacao* and *Cordia alliodora*. The area harbored threatened and prohibited-harvest taxa such as *Swietenia macrophylla* and *Cedrela odorata*. The Simpson index evidenced medium-to-high diversity and NDVI reached a maximum value of 0.89, indicating optimal phytosanitary status. A harvestable timber volume of 128.64 m³ was quantified, with an economic valuation of 15,286.39 USD. The findings suggest that the evaluated analog forest system contributes to biodiversity conservation and the economic sustainability of rural producers, constituting a replicable model of productive restoration.

Keywords: analog forestry; NDVI; Sentinel-2; floristic diversity; forest economic valuation

1. Introducción

La producción forestal en Ecuador experimenta un crecimiento económico que supera los 690 millones de dólares anuales provenientes de bosques nativos y plantaciones comerciales (Merizalde et al., 2023). Este auge incrementa la presión sobre los recursos naturales y deriva en una deforestación acelerada que compromete la estabilidad de los ecosistemas, la biodiversidad y la calidad de los hábitats (Tapia et al., 2015). La forestería análoga emerge como una disciplina que busca restaurar ecosistemas degradados mediante diseños que imitan la estructura y las funciones de un bosque natural, con la finalidad de garantizar la autosostenibilidad ambiental y la productividad socioeconómica (Torres et al., 2020).

El país enfrenta un desequilibrio estructural por la ausencia de políticas de restauración y el avance de la frontera agrícola, situación que sitúa a diversas especies nativas en condiciones críticas de vulnerabilidad (Angelsen et al., 2014). En la provincia de Chimborazo, el aprovechamiento forestal constituye un pilar económico; en cantones como Cumandá, la dependencia de especies nativas condicionadas genera un conflicto entre la subsistencia de los pequeños productores y la normativa de conservación (García-Cuevas et al., 2022). El aumento demográfico y la explotación convencional de monocultivos están desplazando a los sistemas arbolados, lo cual compromete la diversidad biológica y la estabilidad financiera del sector rural (Veintimilla et al., 2021).

La literatura científica evidencia un vacío de conocimiento respecto de la validación empírica de modelos forestales análogos en el contexto tropical andino ecuatoriano. Las publicaciones existentes sobre composición florística, salud vegetativa y valoración económica en estos sistemas resultan escasas a nivel nacional (Jiménez et al., 2023); (Veintimilla et al., 2021). Esta brecha justifica la necesidad de validar modelos que

aseguren una cadena productiva continua sin degradar el patrimonio natural, mediante herramientas de precisión como la teledetección satelital (Sánchez, 2021).

El objetivo general de la presente investigación consistió en evaluar el sistema forestal análogo «Don Ramón», ubicado en el sector San Ignacio del cantón Cumandá. Los objetivos específicos fueron: (a) analizar la composición y diversidad florística en los estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo; (b) determinar el estado de salud vegetativa mediante el índice NDVI derivado de imágenes Sentinel-2; y (c) realizar la valoración económica del volumen maderable en pie. La hipótesis de trabajo postula que los sistemas forestales análogos representan hábitats de alta diversidad biológica y son económicamente sustentables para el productor rural en la región subtropical del Ecuador.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio y ubicación

La investigación se desarrolló en el sistema forestal análogo «Don Ramón», de propiedad del Sr. Ramón Encalada, ubicado en el sector San Ignacio, cantón Cumandá, provincia de Chimborazo, Ecuador. El sitio se localiza geográficamente en las coordenadas UTM 17 M; 717 544,15 m E; 9 755 490,52 m S, a una altitud de 345 m s. n. m. El área total de estudio comprendió 9,94 hectáreas, caracterizadas por una precipitación media anual de 2351 mm y una temperatura promedio de 24,3 °C.

2.2. Diseño y tipo de investigación

Se aplicó un diseño no experimental de corte transversal, con enfoque mixto cuantitativo-cualitativo. El alcance de la investigación fue descriptivo, dado que se analizaron las variables florísticas, dasométricas y de reflectancia espectral en un momento único en el tiempo, con el propósito de caracterizar la estructura y el valor del sistema forestal.

2.3. Población y muestra

La población estuvo constituida por los individuos arbóreos, arbustivos y herbáceos presentes en las 9,94 ha del sistema forestal. Se empleó un muestreo estratificado sistemático para garantizar la representatividad, con una intensidad de muestreo aproximada del 5 % del área total. Los criterios de inclusión consideraron individuos con Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) ≥ 10 cm para el inventario forestal comercial; los criterios de exclusión contemplaron árboles con DAP inferior a 10 cm (exceptuando la evaluación de regeneración natural) y especies herbáceas no leñosas fuera de los estratos evaluados.

2.4. Composición y diversidad florística

Se establecieron 5 transectos de 1000 m² (20 m x 50 m) distribuidos estratégicamente para el levantamiento florístico. Las especies se identificaron in situ y mediante la recolección de muestras botánicas procesadas en el Herbario de la Facultad de Recursos Naturales de la ESPOCH. La diversidad alfa se calculó mediante los índices de Shannon-Wiener (H') y Simpson (D), de acuerdo con las formulaciones propuestas por (Mostacedo & Fredericksen, 2000):

$$H' = -\sum (p_i \cdot \ln p_i) \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$D = \sum (p_i)^2 ; 1 - D = 1 - \sum (p_i)^2 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde p_i representa la proporción de individuos de la especie i respecto del total de individuos registrados. Las especies identificadas se catalogaron según su estado de conservación (alta, media y baja vulnerabilidad) con base en el Libro rojo de las plantas endémicas del Ecuador y la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).

2.5. Salud vegetativa (NDVI)

Se utilizaron imágenes satelitales del sensor Sentinel-2 (nivel 2A, resolución espacial de 10 m) adquiridas a través de la plataforma Google Earth Engine, correspondientes al período enero–marzo 2024 con cobertura nubosa inferior al 10 %. Se aplicó la corrección atmosférica Sen2Cor y se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) mediante la formulación clásica de (Fern et al., 2018):

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde NIR corresponde a la banda del infrarrojo cercano (B8, 842 nm) y RED a la banda roja (B4, 665 nm). Los valores obtenidos se categorizaron en el rango -1 a $+1$, considerando umbrales de 0,2 a 0,4 para vegetación escasa, 0,4 a 0,6 para vegetación moderada y $> 0,6$ para vegetación densa con alto vigor fotosintético.

2.6. Valoración económica del volumen maderable

Se instalaron 25 parcelas circulares de 500 m² cada una, con una superficie total muestreada de 12 500 m². En cada unidad muestral se midió el DAP con cinta diamétrica y la altura comercial con un hipsómetro Suunto. El volumen de madera en pie se estimó mediante la fórmula dasométrica estándar (Diéguez Aranda et al., 2003):

$$V = (\pi / 4) \cdot \text{DAP}^2 \cdot h \cdot f \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde V es el volumen en m³; DAP el diámetro a la altura del pecho en metros; h la altura comercial en metros; y f el factor de forma (0,7 para especies latifoliadas). La valoración económica se obtuvo al multiplicar el volumen total por el precio de mercado local (USD/m³), de acuerdo con los listados de precios vigentes del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE).

2.7. Aspectos éticos

El estudio contó con la autorización escrita del propietario del predio mediante consentimiento informado para el ingreso, toma de muestras botánicas y mediciones dasométricas. La investigación no implicó el sacrificio de fauna ni la tala de árboles, limitándose a la medición in situ y a la recolección de muestras foliares bajo los lineamientos académicos de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. El procesamiento de datos se rigió por los principios de integridad científica y transparencia establecidos en el Code of Conduct del Committee on Publication Ethics (Santos et al., 2017).

3. Resultados

Los resultados obtenidos permitieron evaluar de forma integral el sistema forestal análogo «Don Ramón», dando respuesta a los objetivos planteados sobre composición, salud vegetativa y valor económico del rodal.

3.1. Composición y diversidad florística

Se identificaron 49 especies vegetales distribuidas en 43 familias botánicas dentro del área de estudio. La estructura del sistema se caracterizó por la presencia de tres estratos diferenciados: estrato arbóreo con 15 especies; estrato arbustivo con 16 especies; y estrato herbáceo con 23 especies. La suma total de individuos inventariados ascendió a 1321 ejemplares.

3.1.1. Estrato arbóreo

En el estrato arbóreo se registraron 261 individuos con DAP mayor a 10 cm, pertenecientes a 12 familias botánicas, 15 géneros y 15 especies. Las familias con mayor riqueza específica fueron Meliaceae, Lamiaceae y Fabaceae; las familias Cordiaceae, Lamiaceae y Malvaceae destacaron por concentrar la mayor cantidad de individuos.

Tabla 1

Especies arbóreas con mayor número de individuos y su peso ecológico

Espece	Familia	N.º individuos	IVI (%)
<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.)	Cordiaceae	64	20,90
<i>Tectona grandis</i> L. f.	Lamiaceae	44	17,04
<i>Ochroma pyramidale</i> (Cav. ex Lam.)	Malvaceae	39	12,73
Total estrato arbóreo (15 especies)	12 familias	261	100,00

Nota. El índice de Valor de Importancia Ecológica (IVI) se calculó conforme a Mostacedo & Fredericksen (2000).

El índice de Simpson ($1 - D$) registró valores entre 0,61 y 0,84 para el estrato arbóreo, lo que refleja una baja dominancia y una alta diversidad de especies. El índice de Shannon-Wiener (H') osciló entre 1,74 y 3,54, clasificando al sitio como una zona de diversidad media a alta. La especie *C. alliodora* presentó el mayor peso ecológico con un IVI del 20,90 %, seguida de *T. grandis* (17,04 %) y *O. pyramidale* (12,73 %).

3.1.2. Estrato arbustivo

El estrato arbustivo registró 139 individuos distribuidos en 13 familias botánicas, 14 géneros y 16 especies, incluyendo individuos arbóreos que no superaban los 2,5 m de altura. Las familias más diversas fueron Malvaceae y Rutaceae.

Tabla 2*Especies arbustivas con mayor número de individuos y su peso ecológico*

Especie	Familia	N.º individuos	IVI (%)
<i>Theobroma cacao</i> var. fino de aroma	Malvaceae	28	17,60
<i>Theobroma cacao</i> var. Forastero	Malvaceae	28	15,89
<i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck	Rutaceae	18	13,21
Total estrato arbustivo (16 especies)	13 familias	139	100,00

El índice de Simpson ($1 - D$) presentó un rango de 0,72 a 0,97 y el índice de Shannon-Wiener (H') registró valores entre 1,52 y 2,11, cifras que caracterizan al estrato como una zona de diversidad media-alta. La variedad *T. cacao* var. fino de aroma ostentó el mayor peso ecológico (IVI = 17,60 %), asociado a sus características dasométricas y al manejo silvicultural orientado al valor económico de la especie.

3.1.3. Estrato herbáceo

La cobertura herbácea agrupó la mayor densidad poblacional del bosque análogo, con 921 individuos correspondientes a 18 familias, 22 géneros y 23 especies. Las familias más representativas fueron Urticaceae, Balsaminaceae, Araceae y Thelypteridaceae.

Tabla 3*Especies herbáceas con mayor número de individuos y su peso ecológico*

Especie	Familia botánica	N.º individuos	IVI (%)
<i>Urera baccifera</i> (L.) Gaudich. ex Wedd	Urticaceae	200	10,14
<i>Impatiens walleriana</i> Hook.f.	Balsaminaceae	176	8,71
<i>Spigelia anthelmia</i> L.	Loganiaceae	98	5,96
Total estrato herbáceo (23 especies)	18 familias	921	100,00

El índice de Simpson ($1 - D$) varió entre 0,79 y 0,96 y el índice de Shannon-Wiener (H') entre 1,39 y 2,00. La especie *Urera baccifera* presentó el mayor peso ecológico dentro del sistema ($IVI = 10,14 \%$), atribuido a su amplia abundancia y distribución espacial en el sotobosque.

3.2. Estado de conservación de la flora evaluada

De acuerdo con los listados de la UICN y el Apéndice II de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES), la estructura del bosque análogo preservó especies con distintos grados de amenaza ecológica.

Tabla 4

Condición actual de especies arbóreas amenazadas

Espece	Familia	Categoría UICN
<i>Swietenia macrophylla</i> King.	Meliaceae	En peligro (EN)
<i>Cedreia odorata</i> L.	Meliaceae	Vulnerable (VU)
<i>Handroanthus chrysanthus</i> (Jacq.) S.O.Grose	Bignoniaceae	Preocupación menor (LC)

Nota. Categorización conforme a UICN (2024) y CITES (Apéndice II). Las tres especies se encuentran protegidas por el Código Orgánico del Ambiente del Ecuador (Art. 121).

El taxón *S. macrophylla* y *C. odorata* se encuentran catalogados en la Lista Roja de la UICN y protegidos por el Código Orgánico del Ambiente del Ecuador. Ambas especies pertenecen al Apéndice II de CITES. Bajo este marco normativo y las resoluciones del MAATE, la especie *S. macrophylla* está clasificada en peligro de extinción, condición que implica la prohibición estricta de su aprovechamiento comercial y su exclusión en la aprobación de licencias forestales. La preservación de estos taxones dentro del área de estudio incrementa la resiliencia del ecosistema y posiciona al sistema forestal análogo como un reservorio genético de importancia regional.

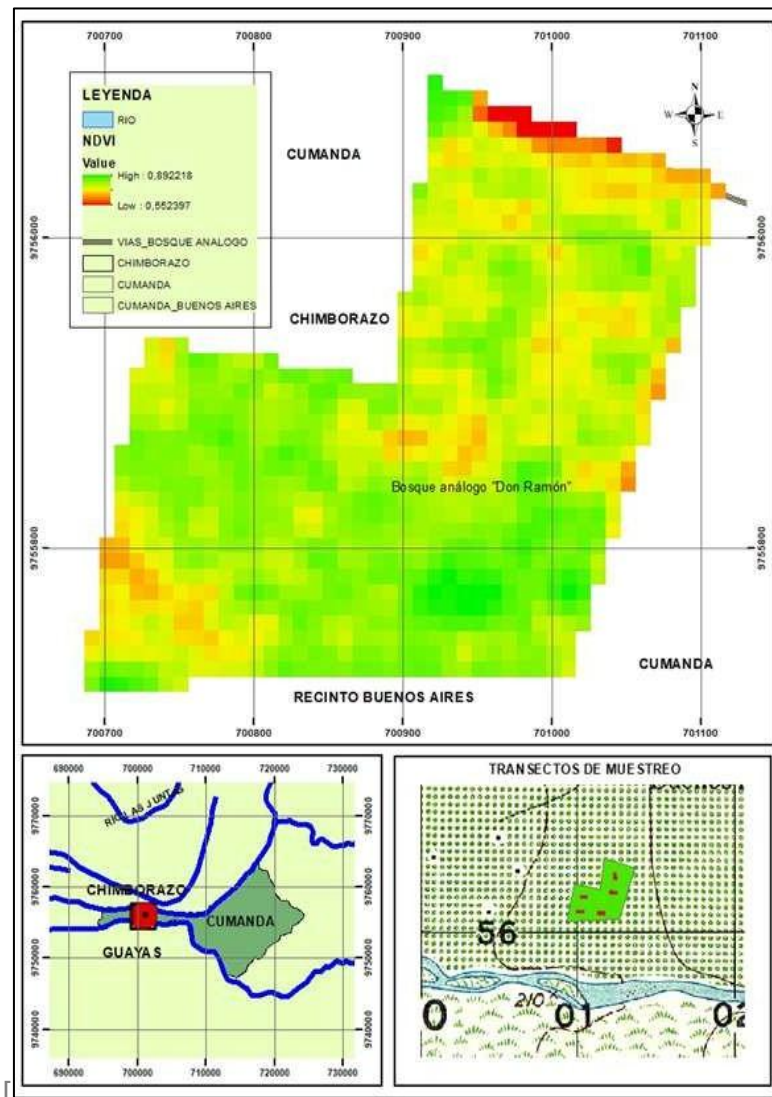
Los estratos arbustivo y herbáceo no registraron especies bajo categorías de amenaza UICN. Estos estratos cumplen una función ecológica fundamental como soporte estructural y funcional del sistema, al regular el microclima, la humedad edáfica y el reclutamiento de regeneración natural.

3.3. Salud vegetativa del sistema forestal análogo

El cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) a partir de imágenes Sentinel-2 permitió evaluar el bienestar de la masa vegetal del rodal.

Figura 1

Análisis de la salud vegetativa del sistema forestal análogo «Don Ramón» mediante NDVI (Sentinel-2)



Nota. Distribución de la reflectancia vegetal en el área de estudio (9,94 ha). Elaboración propia con base en imágenes Sentinel-2A, período enero–marzo 2024; procesamiento en Google Earth Engine con corrección atmosférica Sen2Cor.

El análisis de vigorosidad vegetal en el bosque análogo «Don Ramón» registró un rango de reflectancia NDVI de 0,552 a 0,892. Las zonas con salud moderada (NDVI = 0,552) coincidieron espacialmente con áreas de aprovechamiento forestal selectivo, factor que justifica la disminución local del índice. Los valores máximos (NDVI = 0,892), predominantes en el área de estudio, evidencian un estado fitosanitario excepcional del rodal. Los resultados indican que la gestión silvicultural aplicada preserva la integridad ecológica del sistema.

3.4. Valoración económica del volumen maderable en pie

La cuantificación dasométrica se ejecutó sobre una superficie muestreada de 12 500 m², con un volumen total aprovechable de 128,64 m³. El aporte volumétrico varió significativamente entre las especies comerciales, destacando a *C. alliodora* como la de mayor contribución.

Tabla 5

Resumen del volumen aprovechable de especies comerciales clave

Especie forestal	N.º árboles	Volumen total (m ³)	IVI (%)
<i>C. alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken	138	49,27	20,90
<i>T. grandis</i> L.f.	92	31,48	17,04
<i>O. pyramidale</i> (Cav. ex Lam.) Urb	67	18,81	12,73
<i>Anacardium excelsum</i> (Bertero & Balb. ex Kunth) Skeels	42	11,24	9,55
<i>Simira cordifolia</i> (Hook.f.) Steyerm	35	7,82	6,42
<i>S. macrophylla</i> King.	22	5,78	4,81
<i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) S.F. Blake	10	1,95	2,15
<i>C. odorata</i> L.	8	1,92	1,98
<i>G. arborea</i> Roxb. ex Sm.	4	0,38	0,85
Total general	418	128,64	—

Nota. Los valores de IVI corresponden al peso ecológico de cada especie dentro del estrato arbóreo del sistema.

El inventario forestal cuantificó un volumen total aprovechable de 128,64 m³, cifra que evidencia el potencial productivo del bosque análogo «Don Ramón» bajo un esquema de manejo sostenible. La especie *C. alliodora* (laurel) presentó el mayor número de individuos (138) y el volumen más alto (49,27 m³), consolidándose como la especie dominante del sistema. *T. grandis* (teca) se posicionó como segunda especie de mayor representatividad maderable (92 individuos; 31,48 m³). Las especies de alto valor comercial pero menor densidad poblacional, como *S. macrophylla* y *C. odorata*, aportaron volúmenes significativamente menores, sumando entre ambas 7,70 m³.

Se evaluaron 418 árboles maderables que cumplían con los parámetros silviculturales de aprovechamiento (DAP > 10 cm y edades estimadas superiores a 10 años), de los cuales se obtuvo una estimación de 427 trozas. La evaluación morfológica in situ

permitió clasificar la madera rolliza según su calidad, variable que influye directamente en el valor comercial final al cruzarse con los precios actuales del mercado local.

Tabla 6

Clasificación de trozas por calidad y valoración económica del patrimonio forestal

Parámetro de evaluación	Detalle / categoría	Cantidad / valor
Calidad de trozas	Calidad 1	289 trozas
	Calidad 2	68 trozas
	Calidad 3	46 trozas
	Calidad 4	24 trozas
Total de trozas estimadas	—	427 trozas
Valoración económica	Valor real ajustado	17 227,15 USD
	Valor real aprovechable	15 286,39 USD

Nota. El valor real aprovechable incluye los descuentos aplicados por la calidad morfológica de las trozas. Precios del mercado local conforme a listados del MAATE (2024).

En la Tabla 6 se observa que el 67,68 % (289) de las trozas corresponde a Calidad 1, lo cual indica un adecuado manejo silvicultural y condiciones favorables de crecimiento. El volumen total generó un valor económico ajustado de 17 227,15 USD para la superficie muestreada. Al aplicar la depreciación correspondiente por calidad morfológica y defectos naturales, el valor real aprovechable se fijó en 15 286,39 USD. Esta cifra representa el capital forestal líquido que el productor puede obtener bajo un esquema de aprovechamiento regulado.

4. Discusión

La composición y diversidad florística del sistema análogo «Don Ramón» demuestra una estructura compleja, con 1321 individuos distribuidos en 49 especies. La identificación de este sitio como un área de diversidad media-alta, según los índices de Simpson y Shannon-Wiener, coincide con los hallazgos reportados por Manzanilla Quijada et al. (2020) para bosques templados estructuralmente complejos. La variabilidad observada presenta una distribución similar a los resultados de (Cárdenas, 2014), quien reporta una riqueza elevada en sistemas forestales densos del Orinoco colombiano (Jiménez et al., 2023) sostienen que la biodiversidad en estos sistemas no es fortuita, sino que depende del manejo antrópico y del aprovechamiento de la sucesión ecológica natural, tesis que los resultados del presente estudio corroboran.

El predominio de *C. alliodora* (IVI = 20,90 %), *T. grandis* (17,04 %) y *O. pyramidale* (12,73 %) en el estrato arbóreo otorga al sistema una robustez estructural que favorece

a los estratos inferiores, particularmente al arbustivo dominado por *T. cacao* (17,60 %). Este patrón de dominancia resulta análogo al reportado por Veintimilla et al. (2021) en sistemas de la misma región, donde las características edafoclimáticas compartidas permiten un desarrollo dasométrico superior. La sinergia entre especies arbóreas y cacao apoya los planteamientos de Jadán et al. (2016); Tegoma et al. (2023), quienes sugieren que la madurez del sistema eleva progresivamente los índices de diversidad.

La estructura florística observada, con dominancia de Cordiaceae y Malvaceae, guarda estrecha relación con el estudio de Solarte et al. (2022) en sistemas agroforestales de Nariño, Colombia. La edad de establecimiento constituye un factor determinante: mientras que el sistema en Nariño posee 50 años, el bosque «Don Ramón» alcanza valores de IVI competitivos con solo 20 años. Este contraste indica que la gestión intensiva acelera la formación vegetativa. La distribución del estrato arbóreo regula eficazmente el crecimiento de especies herbáceas como *U. baccifera*, lo cual optimiza la entrada de luz al cacao dentro de los parámetros descritos por Navarro et al. (2012) y Palacios & Jaramillo (2001).

El uso de teledetección mediante NDVI (0,55 a 0,89) confirma que el manejo sostenible y la alta biodiversidad se traducen en una salud vegetativa destacable. Los valores obtenidos superan los registros de (Rios, 2020) en zonas perturbadas (máximos de 0,81). Los argumentos de Leautaud & López (2017); Carrera & Pacheco (2018) son coherentes con los resultados del presente estudio: un bosque bajo manejo sostenible, con mínima intervención degradante, mantiene una vigorosidad foliar comparable o superior a la de sistemas naturales perturbados.

El potencial productivo constituye uno de los hallazgos más relevantes de la investigación. El volumen de 128,64 m³ en la superficie muestreada supera los 76,49 m³ reportados por Palacios & Jaramillo (2001) en el bosque virgen de Jatun Sacha. Este resultado demuestra que la forestería análoga no solo emula las funciones ecológicas del bosque natural, sino que optimiza el incremento volumétrico y el valor económico en un tiempo menor, lo cual valida los planteamientos de Montaña (2021) sobre el papel primordial que constituye el manejo forestal en el crecimiento arbóreo.

El alcance de esta investigación radica en demostrar la viabilidad económica y ecológica de la forestería análoga como herramienta de restauración productiva en Ecuador. El estudio enfrenta limitaciones que deben reconocerse explícitamente: (a) la naturaleza de caso único (n = 1 sistema), lo cual restringe la generalización de los resultados; (b) la escasa literatura específica sobre forestería análoga a nivel nacional, que dificulta el contraste empírico; (c) la ausencia de tablas de volumen ajustadas para sistemas análogos locales; y (d) el carácter transversal del análisis NDVI, que no permite evaluar la dinámica fenológica anual. Las futuras líneas de investigación deben orientarse al monitoreo multitemporal, la cuantificación de la captura de carbono y el análisis de la dinámica de suelos en estos sistemas.

5. Conclusiones

El estudio del sistema «Don Ramón» evidencia que la forestería análoga constituye una estrategia de restauración productiva con ventajas diferenciales frente a los modelos de explotación convencional. Los resultados confirman que es posible alcanzar una estructura ecosistémica compleja, distribuida en tres estratos funcionales, la cual emula

la fisonomía del bosque natural y alberga una diversidad florística media-alta. Este hallazgo posiciona a los sistemas análogos como reservorios genéticos estratégicos para especies en peligro de extinción, tales como *S. macrophylla* y *C. odorata*, integrando la conservación de taxones amenazados dentro de una matriz productiva activa.

La validación mediante teledetección evidencia que un manejo silvicultural asistido garantiza una vigorosidad vegetativa destacable. Los índices de reflectancia obtenidos permiten plantear que la intervención humana, cuando se ejecuta mediante extracciones selectivas y planificadas, no compromete la integridad del bosque. El sistema mantiene un estado fitosanitario óptimo comparable al de ecosistemas naturales no perturbados, lo cual sugiere que la gestión antrópica sostenible puede operar como un motor de resiliencia biológica.

Desde la perspectiva socioeconómica, los resultados validan la rentabilidad del modelo para el productor rural. La alta calidad morfológica de las trozas, donde la mayoría alcanza estándares comerciales óptimos (Calidad 1 = 67,68 %), se traduce en un patrimonio forestal líquido de valor significativo. Un sistema de 20 años de establecimiento que logra un volumen maderable comparable al de ciertos bosques tropicales primarios confirma que la forestería análoga acelera el incremento volumétrico y la acumulación de biomasa, ofreciendo una alternativa financiera viable frente a los monocultivos.

El principal aporte científico de este trabajo radica en la validación técnica de la forestería análoga en el contexto ecuatoriano como modelo de restauración productiva. Los resultados sugieren que la aparente disyuntiva entre conservación y subsistencia económica puede resolverse mediante diseños forestales resilientes. La investigación establece una línea base para futuras políticas de manejo orientadas a mitigar la deforestación en el país, evidenciando que la biodiversidad y la rentabilidad no constituyen objetivos excluyentes, sino componentes sinérgicos del patrimonio natural.

Contribución de los autores: Conceptualización y diseño metodológico: Cusquillo Quispillo, B. D.; Llumitasig Quinatoa, M. S. Adquisición de datos de campo: Cusquillo Quispillo, B. D.; Llumitasig Quinatoa, M. S.; Agualzaca Caisaguano, D. O. Análisis estadístico y procesamiento NDVI: Guamán Guamán, E. Y. Redacción del manuscrito original: Cusquillo Quispillo, B. D. Revisión crítica y edición: Carranza-Patiño, M. Todos los autores leyeron y aprobaron la versión final del manuscrito.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses respecto de la publicación del presente manuscrito.

Financiamiento: La presente investigación fue autofinanciada por los autores. No se recibió financiamiento externo de agencias públicas, privadas ni sin fines de lucro.

Agradecimientos: Los autores expresan su reconocimiento al Sr. Ramón Encalada, propietario del predio forestal, por autorizar el ingreso al área de estudio. Se agradece al Herbario de la Facultad de Recursos Naturales de la ESPOCH por la identificación taxonómica de las muestras botánicas.

Referencias Bibliográficas

- Angelsen, A., Jagger, P., Babigumira, R., Belcher, B., Hogarth, N. J., Bauch, S., Börner, J., Smith-Hall, C., & Wunder, S. (2014). Environmental Income and Rural Livelihoods: A Global-Comparative Analysis. *World Development*, 64(S1), S12–S28. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2014.03.006>
- Cárdenas, T. M. A. (2014). Estudio comparativo de la composición florística, estructura y diversidad de fustales en dos ecosistemas del campo de producción 50k cpo-09, llanos del Orinoco Colombiano. *Colombia Forestal*, 17(2), 203. <https://doi.org/10.14483/UDISTRITAL.JOUR.COLOMB.FOR.2014.2.A06>
- Carrera, M. D. S., & Pacheco, G. L. L. (2018). *Analizar los NDVI (índice de vegetación normalizados) con los GNDVI (índice de vegetación diferenciada normalizada verde) mediante imágenes Landsat 8 (satélite de observación terrestre) en la parroquia de Mulaló, Latacunga 2018*. [Universidad Técnica de Cotopaxi]. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/8699>
- Diéguez Aranda, U., Barrio Anta, M., Dorado, F. C., & Murias, M. B. (2003). Estimación del diámetro normal y del volumen del tronco a partir de las dimensiones del tocón para seis especies forestales comerciales de Galicia. In *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For* (Vol. 12, Number 2).
- Fern, R. R., Foxley, E. A., Bruno, A., & Morrison, M. L. (2018). Suitability of NDVI and OSAVI as estimators of green biomass and coverage in a semi-arid rangeland. *Ecological Indicators*, 94, 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.029>
- García-Cuevas, X., Sáenz-Reyes, J. T., Muñoz-Flores, H. J., Hernández-Ramos, A., Rueda-Sánchez, A., Hernández-Ramos, J., & Orozco-Gutiérrez, G. (2022). Aportaciones científicas del Programa de Plantaciones Forestales en el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(70), 3–41. <https://doi.org/10.29298/RMCF.V13I70.1162>
- Jadán, M. O. A., Torres, B., Selesi, D., Peña, D., Rosales, C., & Gunter, S. (2016). Diversidad florística y estructura en cacaotales tradicionales y bosque natural (Sumaco, Ecuador). *Colombia Forestal*, 19(2). <https://doi.org/10.14483/UDISTRITAL.JOUR.COLOMB.FOR.2016.2.A01>
- Jiménez, G. A., Carvajal, N. R. J., Ponce, M. J. A., Cabrera, V. C. A., & Pinargote, C. J. D. los S. (2023). Inventario florístico en dos sistemas agroforestales del recinto San Francisco de la parroquia El Anegado | Revista Cubana de Ciencias Forestales. *CFORES*, 11(1), 772. <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/772>
- Leautaud, V. P., & López, G. J. (2017). Detección de árboles dañados por plaga en bosques de *Abies religiosa* en la Reserva de la Biosfera Mariposa

- Monarca, mediante fotografías aéreas infrarroja. *Investigaciones Geográficas*, 2017(92), 1–2. <https://doi.org/10.14350/RIG.50249>
- Manzanilla Quijada, G. E., Mata Balderas, J. M., Treviño Garza, E. J., Aguirre Calderón, Ó. A., Alanís Rodríguez, E., Yerena Yamallel, J. I., Manzanilla Quijada, G. E., Mata Balderas, J. M., Treviño Garza, E. J., Aguirre Calderón, Ó. A., Alanís Rodríguez, E., & Yerena Yamallel, J. I. (2020). Diversidad, estructura y composición florística de bosques templados del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(61), 94–123. <https://doi.org/10.29298/RMCF.V11I61.703>
- Merizalde, V. D. C., Vera, V. N. A., Cobo, L. E. T., Maldonado, C. Á. B., & Mata, A. D. D. (2023). La silvicultura y su aporte al crecimiento económico del Ecuador en el periodo 2007-2021. *Polo Del Conocimiento*, 8, 147–169. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9152488>
- Montaño, D. (2021). *Nuevo estudio: en los últimos 26 años Ecuador ha perdido más de 2 millones de hectáreas de bosque*. <https://es.mongabay.com/2021/03/nuevo-estudio-en-los-ultimos-26-anos-ecuador-ha-perdido-mas-de-2-millones-de-hectareas-de-bosque/>
- Mostacedo, B., & Fredericksen, T. S. (2000). *Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal*. <http://www.bionica.info/biblioteca/mostacedo2000ecologiavegetal.pdf>
- Navarro, G. H., Santiago Santiago, A., Musálem-Santiago, M. Á., Vibrans Lindemann, H., & Pérez Olvera, Ma. A. (2012). DIVERSITY OF USEFUL SPECIES AND AGROFORESTRY SYSTEMS. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XVIII(1), 71–86. <https://doi.org/10.5154/R.RCHSCFA.2010.11.124>
- Palacios, W. A., & Jaramillo, N. (2001). *Riqueza florística y forestal de los bosques tropicales húmedos del Ecuador e implicaciones para su manejo*. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/PER01000214949>
- Rios, M. F. A. (2020). *Determinación del impacto de la agroforestería, sobre los bosques de la comunidad nativa de Mairidicai y Santa Mercedes, Loreto - Perú*.
- Sánchez, Z. H. (2021). *Evaluación de estrategias para la restauración ecológica del bosque húmedo montano bajo ubicado en el Parque Comfama Arví*. Universidad de Antioquia.
- Santos, J., Palumbo, F., Molsen-David, E., Willke, R. J., Binder, L., Drummond, M., Ho, A., Marder, W. D., Parmenter, L., Sandhu, G., Shafie, A. A., & Thompson, D. (2017). ISPOR Code of Ethics 2017 (4th Edition). *Value in Health*, 20(10), 1227–1242. <https://doi.org/10.1016/J.JVAL.2017.10.018>
- Solarte, J., Solarte, J., Ballesteros, W., & Calvache, D. (2022). Análisis florístico de los sistemas agroforestales tradicionales de cacao (*Theobroma cacao* L)

- en Nariño. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 14(1), 11–29. <https://doi.org/10.22490/21456453.5648>
- Tapia-Armijos, M. F., Homeier, J., Espinosa, C. I., Leuschner, C., & De La Cruz, M. (2015). Deforestation and forest fragmentation in south Ecuador since the 1970s - Losing a hotspot of biodiversity. *PLoS ONE*, 10(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133701>
- Tegoma, C. A., Blancas, J., García Flores, A., Beltrán-Rodríguez, L., Tegoma Coloreano, A., Blancas, J., García Flores, A., & Beltrán-Rodríguez, L. (2023). Riqueza, estructura y diversidad florística en huertos familiares del sureste del estado de Morelos: una aproximación biocultural. *Polibotánica*, 0(55), 41–65. <https://doi.org/10.18387/POLIBOTANICA.55.4>
- Torres, B., Fischer, R., Vargas, J. C., & Günter, S. (2020). Deforestación en paisajes forestales tropicales del Ecuador: bases científicas para perspectivas políticas. *Serie de Publicaciones Misceláneas Del INABIO*, 15, 172. http://inabio.biodiversidad.gob.ec/wp-content/uploads/2021/01/LAFORET_WEB.pdf
- Veintimilla, R. A. R., MacFarlane, D., & Cooper, L. (2021). The carbon sequestration potential of ‘analog’ forestry in Ecuador: an alternative strategy for reforestation of degraded pastures. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 94(1), 102–114. <https://doi.org/10.1093/FORESTRY/CPAA017>