



EVALUACIÓN BIOACÚSTICA DE LA SALUD ECOSISTÉMICA EN LOS BOSQUES PROTECTORES DEL CANTÓN MERA, PASTAZA, ECUADOR

BIOACOUSTIC ASSESSMENT OF ECOSYSTEM HEALTH IN PROTECTED AREAS OF MERA CANTON, PASTAZA, ECUADOR

Daysi Lorena Caiza López^{1*}

E-mail: dl.caizal@uea.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9582-0762>

Juan Carlos Caiza López¹

E-mail: jc.caizal@uea.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3951-0546>

Elsa Flor Ordoñez Bravo²

E-mail: elsa.ordonez@epoch.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2290-9763>

Marco Andrés Quishpe Mejía³

E-mail: mquishpem5@unemi.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7950-4566>

¹Universidad Estatal Amazónica. Puyo, Ecuador.

²Escuela Superior Politécnica del Chimborazo. Riobamba, Ecuador.

³Universidad Estatal de Milagro. Guayaquil, Ecuador.

*Autor para correspondencia.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Caiza López, D. L., Caiza López, J. C., Ordoñez Bravo, E. F., & Quishpe Mejía, M. A. (2026). Evaluación bioacústica de la salud ecosistémica en los bosques protectores del cantón Mera, Pastaza, Ecuador. *Universidad y Sociedad*, 18 (5). e5774.

RESUMEN:

La investigación evaluó la salud ecosistémica de los bosques protectores del cantón Mera mediante análisis bioacústico de paisajes sonoros. Se aplicó un enfoque ecoacústico no invasivo en dos áreas con distinto tipo de gestión: el Bosque Protector Yawa Jee (544.77 ha), bajo custodia comunitaria Kichwa-Shuar, y el Bosque Protector Moravia (603.87 ha), de propiedad privada. Durante siete días del mes de noviembre de 2025, se realizaron grabaciones en tres periodos diarios (amanecer, mediodía y nocturno) en cuatro estaciones por bosque, analizando los registros mediante índices de Entropía Acústica (H), Diversidad Acústica (ADI), Índice Normalizado del Paisaje Sonoro (NDSI) e Índice Bioacústico (BI). Los resultados evidenciaron diferencias significativas: Yawa Jee presentó mayor diversidad acústica (ADI: 2.63 vs 1.89), complejidad (H: 0.81 vs 0.61), dominancia biológica (NDSI: 0.72 vs 0.42) y actividad biológica (BI: 46.9 vs 30.0 dB) comparado con Moravia. El análisis multivariante confirmó correlaciones positivas entre cobertura vegetal e índices acústicos ($r = 0.61-0.82$, $p < 0.01$). La validación manual identificó 47 especies de aves en Yawa Jee versus 31 en Moravia. Se concluyó que la bioacústica constituye una herramienta eficiente para monitorear biodiversidad tropical. El estudio demostró la efectividad de la gestión comunitaria en mantener la integridad ecológica y se

propone incorporar tecnologías acústicas automatizadas en programas de conservación amazónica, representando un aporte metodológico innovador para el monitoreo ambiental y gestión sostenible de ecosistemas tropicales ecuatorianos.

Palabras clave: Bioacústica, Biodiversidad, Bosques, Conservación Ambiental, Monitoreo Ecológico, Amazonía Ecuatoriana.

ABSTRACT:

The research assessed the ecosystem health of protected forests in the canton of Mera through bioacoustic analysis of soundscapes. A non-invasive ecoacoustic approach was applied in two areas with different management regimes: the Yawa Jee Protected Forest (544.77 ha), under Kichwa-Shuar community stewardship, and the Moravia Protected Forest (603.87 ha), under private ownership. Over seven days in November 2025, recordings were conducted during three daily periods (dawn, midday, and night) at four sampling stations per forest. Acoustic data were analyzed using Acoustic Entropy (H), Acoustic Diversity Index (ADI), Normalized Difference Soundscape Index (NDSI), and Bioacoustic Index (BI). The results revealed significant differences between sites: Yawa Jee exhibited higher acoustic diversity (ADI: 2.63

INTRODUCCIÓN

La salud ecosistémica constituye un indicador fundamental de la funcionalidad ambiental y la capacidad de los ecosistemas para mantener sus procesos ecológicos. En el contexto global de acelerada pérdida de biodiversidad, el monitoreo efectivo se ha convertido en una prioridad científica (Colonna et al., 2020). Sin embargo, las metodologías tradicionales basadas en censos directos requieren tiempo, personal especializado y recursos significativos, limitando su aplicación en regiones tropicales de difícil acceso (Gibb et al., 2018). Ante este desafío, la bioacústica ecológica emerge como una alternativa innovadora, no invasiva y costo-efectiva para monitorear la biodiversidad mediante el análisis de paisajes sonoros.

La ecoacústica estudia los paisajes sonoros generados por tres componentes: biofonía (sonidos biológicos), geofonía (sonidos naturales no biológicos) y antropofonía (ruido humano). El análisis de estos componentes permite inferir la composición biológica, el grado de perturbación antrópica y la funcionalidad ecológica del sistema (Do Nascimento et al., 2020). Índices acústicos estandarizados como el Acoustic Diversity Index (ADI), Normalized Difference Soundscape Index (NDSI) y Bioacoustic Index (BI) permiten cuantificar objetivamente la diversidad sonora y relacionarla con parámetros ecológicos tradicionales (Metcalf et al., 2020).

Investigaciones recientes demuestran que estos índices sirven como indicadores confiables del estado de conservación, asociándose valores elevados con bosques primarios, mientras que ambientes degradados presentan paisajes sonoros empobrecidos (Rappaport et al., 2020; Botero-Cañola et al., 2024). En la región amazónica, la ecoacústica ha adquirido especial relevancia por su capacidad para registrar continuamente la actividad biológica en ambientes remotos (Müller et al., 2023).

El cantón Mera, en la Amazonía ecuatoriana, representa una zona de transición ecológica entre los Andes y la Amazonía baja, caracterizada por elevada diversidad biológica. Este territorio alberga bosques protectores que cumplen funciones críticas como corredores de conectividad, regulación hídrica y conservación de especies endémicas (Torres et al., 2023). Sin embargo, enfrenta creciente presión antrópica asociada a tala selectiva, expansión urbana, ganadería y turismo no regulado. A pesar de su importancia, la información científica sobre la salud ecosistémica de estas áreas es escasa.

Dos bosques protectores presentan características contrastantes ideales para estudio: el Bosque Protector Yawa Jee, bajo custodia comunitaria Kichwa-Shuar, y el Bosque Protector Moravia, de propiedad privada. Esta diferencia

ofrece una oportunidad única para evaluar cómo distintas estrategias de conservación influyen en la salud ecosistémica mediante bioacústica. La gestión comunitaria ha demostrado efectividad en otras regiones amazónicas para mantener la cobertura vegetal (Torres et al., 2024), pero su impacto sobre la biodiversidad funcional medida a través de paisajes sonoros no ha sido documentado en la región.

Por todo lo expuesto, el presente estudio tiene como objetivo principal evaluar la salud ecosistémica de los bosques protectores del cantón Mera, provincia de Pastaza, Ecuador, mediante el análisis bioacústico de paisajes sonoros y la aplicación de índices acústicos multivariados. Específicamente, se buscó caracterizar la diversidad y complejidad acústica de los bosques protectores Yawa Jee y Moravia mediante los índices de Entropía Acústica (H), Diversidad Acústica (ADI), Índice Normalizado del Paisaje Sonoro (NDSI) e Índice Bioacústico (BI); comparar los patrones temporales de actividad biológica entre ambos bosques en tres periodos diarios (amanecer, mediodía y nocturno); determinar la relación entre los índices acústicos y variables ambientales como cobertura vegetal, temperatura y humedad relativa; y evaluar las diferencias en la salud ecosistémica entre dos modelos de gestión de áreas protegidas: custodia comunitaria indígena y propiedad privada.

Los resultados obtenidos constituirán una herramienta científica de apoyo para la toma de decisiones en conservación y manejo ambiental, contribuyendo al cumplimiento de los objetivos nacionales e internacionales de biodiversidad y proporciona así, evidencia científica para la planificación territorial en la Amazonía ecuatoriana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio: el estudio se realizó en dos bosques protectores del cantón Mera, provincia de Pastaza, Ecuador: Yawa Jee (parroquia Madre Tierra) y Moravia (parroquia Shell). Ambas áreas forman parte de la zona de transición andino-amazónica, caracterizadas por elevada diversidad biológica y función como corredores de conectividad.

El Bosque Protector Yawa Jee de 544.77 ha, está bajo custodia comunitaria Kichwa-Shuar, con prácticas basadas en conocimientos tradicionales. Presenta vegetación siempreverde montana baja entre 950-1,150 m.s.n.m. El Bosque Protector Moravia (603.87 ha) es de propiedad privada (familia Kubes), con bosques húmedos primarios y secundarios entre 996-1,006 m.s.n.m., enfrenta así, amenazas de invasión y fragmentación por presión antrópica.

Ambas áreas comparten condiciones climáticas similares (precipitaciones >4,000 mm/año, temperatura 23-26°C), ello favorece alta productividad biológica y densas comunidades de aves, anfibios, mamíferos e insectos (Müller et al., 2023). La Tabla 1 compara las características de ambos bosques.

Tabla 1: Características comparativas de los bosques protectores estudiados.

Variable	Yawa Jee	Moravia
Extensión (ha)	544.77	603.87
Altitud (m s.n.m.)	950-1,150	996-1,006
Tipo de gestión	Comunitaria (Kichwa-Shuar)	Privada (familia Kubes)
Tipo de vegetación	Siempreverde montana baja	Bosque húmedo primario-secundario
Topografía	Pendientes medias	Ondulada
Tipo de suelo	Adepticos	Variable
Precipitación anual	>4,000 mm	>4,000 mm
Temperatura media	23-26 °C	23-26 °C
Amenazas principales	Presión limitada por custodia	Invasión, fragmentación periférica
Accesibilidad	Moderada, control comunitario	Relativamente alta

Fuente: Elaboración propia con datos de campo y de Elaboración propia a partir de datos de campo y del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Mera (2025)

Localización de estaciones acústicas

En cada bosque se establecieron cuatro estaciones acústicas fijas, georreferenciadas mediante coordenadas UTM bajo el sistema de referencia WGS 84, zona 17S, con la garantía de precisión espacial y replicabilidad del estudio. En el Bosque Protector Moravia, las cuatro estaciones de muestreo acústico se ubicaron entre los 996 y 1,006 m.s.n.m., cuya localización y distribución espacial se ilustran en la Figura 1a. En particular, las estaciones fueron georreferenciadas mediante coordenadas UTM de la siguiente manera: Estación 1 (X = 826 248,95; Y = 9 836 923,13), Estación 2 (X = 826 625,72; Y = 9 836 705,11), Estación 3 (X = 827 316,28; Y = 9 836 415,12) y Estación 4 (X = 827 558,82; Y = 9 835 651,18).

En el Bosque Protector Yawa Jee, las estaciones de muestreo acústico se establecieron en cuatro puntos georreferenciados, definidos mediante coordenadas UTM, a saber: Estación 1 (X = 837 907,28; Y = 9 816 938,31), Estación 2 (X = 839 369,10; Y = 9 819 114,51), Estación 3 (X = 839 861,32; Y = 9 818 825,55) y Estación 4 (X = 840 526,08; Y = 9 818 365,83), cuya disposición espacial se presenta de manera sintética en la Figura 1b.

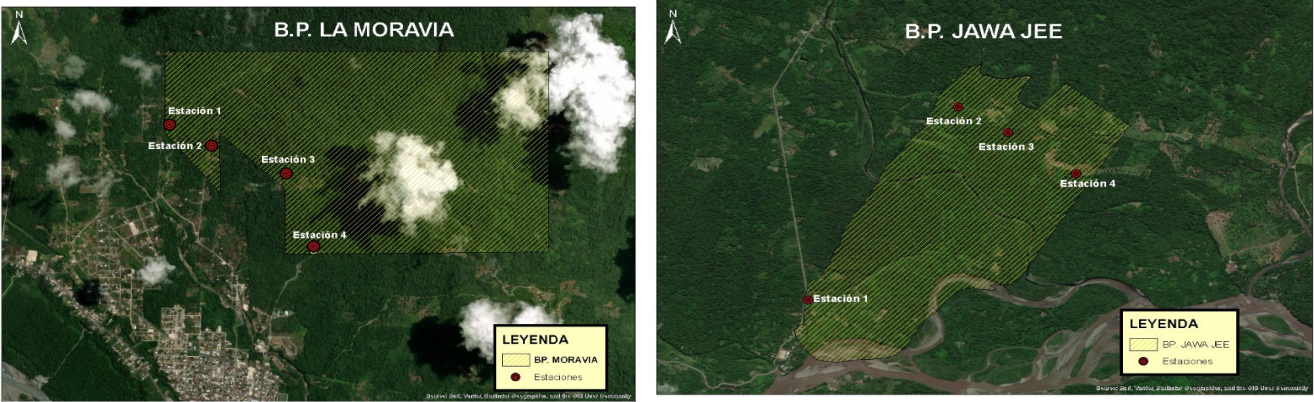


Fig 1: a) Estaciones del Bosque Protector Moravia y b) Estaciones del Bosque Protector Yawa Jee

La selección de las estaciones consideró criterios de accesibilidad, representatividad del hábitat, gradientes de cobertura vegetal y distintos niveles de perturbación antrópica, siguiendo recomendaciones metodológicas para monitoreo acústico pasivo en ecosistemas tropicales (Hoefer et al., 2023).

Diseño de muestreo

Se aplicó un diseño de muestreo estratificado con cuatro estaciones acústicas por bosque durante noviembre 2025. Cada estación fue equipada con smartphones Samsung Galaxy de diversos modelos (n=6) y Xiaomi Redmi Note 9 y 11 Pro (n=2), calibrados previamente (1 kHz a 94 dB SPL, variación ± 2 dB), utilizando la aplicación "Easy Voice Recorder Pro" (v2.7.5). La elección se fundamentó en su accesibilidad, bajo costo y validación científica para estudios ecoacústicos (Gili et al., 2024).

Las grabaciones (formato WAV: 44.1 kHz, 16 bits) se realizaron durante siete días consecutivos en tres periodos diarios: amanecer (05:00–07:00 h), mediodía (12:00–14:00 h) y nocturno (18:00–20:00 h), captura así, la variación diel de actividad biológica. Cada periodo consistió en grabaciones continuas de 2 horas, generando 6 horas diarias por estación y 168 horas totales por bosque.

Equipamiento técnico y protocolos de campo

Los smartphones fueron protegidos con fundas impermeables de sellado hermético ante condiciones extremas (humedad >90%, precipitaciones frecuentes) y fijados a troncos de árboles a 1.5 m de altura mediante cinchos plásticos resistentes, con micrófonos orientados horizontalmente para optimizar la captación sonora. Los investigadores realizaron la colocación, verificación y retiro diario, contando con apoyo logístico de moradores locales capacitados en Yawa Jee para facilitar acceso y supervisión.

La alimentación eléctrica se gestionó mediante retiro periódico y recarga convencional de los dispositivos desde domicilios de investigadores o colaboradores locales, ello garantiza operatividad continua. Los smartphones se programaron con tareas automatizadas en Easy Voice Recorder Pro para iniciar y finalizar grabaciones sin intervención humana directa. Los archivos de audio se descargaron a discos duros externos vía USB, asegurando integridad y respaldo de la información.

Registro y preprocesamiento acústico

Los archivos de audio se organizaron en una base de datos estructurada con nomenclatura estandarizada (BosqueID_EstaciónID_FechaAAAAMMDD_PeriodoID.wav). Se excluyeron grabaciones con precipitaciones intensas (>30 mm/h) por interferencias acústicas (Sethi et al., 2021). De 336 grabaciones totales, se excluyeron 28 (8.3%), resultando en 308 grabaciones válidas.

Los archivos se procesaron con filtrado de banda 1-10 kHz mediante Audacity (v3.2.5, filtro Butterworth de cuarto orden) para reducir ruidos de baja frecuencia, aplicando normalización de amplitud para estandarizar niveles de

presión sonora. El análisis acústico se realizó con Raven Pro 1.6 y el paquete soundecology (v1.3.3) en R (v4.3.1), se genera así, espectrogramas con resolución de 512 puntos FFT y 50% de solapamiento, adecuada para visualizar vocalizaciones de aves, anfibios e insectos.

Medición de variables ambientales

En cada estación de muestreo se registraron variables ambientales que potencialmente influyen en la actividad biológica y el paisaje sonoro. La temperatura (°C) y humedad relativa (%) fueron medidas cada hora durante los periodos de grabación mediante dataloggers HOBO U23 Pro v2, instalados junto a los dispositivos de grabación dentro de refugios de radiación. La cobertura vegetal (%) fue estimada mediante el método de proyección vertical con la utilización de un densitómetro esférico convexo, se toma así, cuatro mediciones en direcciones cardinales desde el centro de cada estación y promediando los valores obtenidos. Adicionalmente, se caracterizó la estructura del dosel mediante fotografías hemisféricas analizadas con el software ImageJ, calculando el índice de área foliar (LAI) y el porcentaje de apertura del dosel.

Cálculo de índices acústicos

Las grabaciones se segmentaron en unidades temporales de 1 minuto, consideradas unidades independientes de análisis. Sobre cada segmento se calcularon índices acústicos ampliamente validados, los cuales permiten caracterizar distintas dimensiones del paisaje sonoro. Los cálculos se realizaron utilizando funciones del paquete soundecology en R, con los siguientes parámetros específicos:

• Índice de Entropía Acústica (H)

La entropía acústica integra la variabilidad temporal y espectral del sonido. En primer lugar, se calculó la entropía temporal, definida en la ecuación (1):

$$H_t = - \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i) \quad (1)$$

donde p_i es la proporción de energía acústica registrada en el intervalo temporal i , y n corresponde al número total de intervalos temporales analizados dentro de cada segmento de un minuto.

Posteriormente, se estimó la entropía espectral, expresada en la ecuación (2):

$$H_s = - \sum_{j=1}^m q_j \ln(q_j) \quad (2)$$

donde q_j corresponde a la proporción de energía en la

banda de frecuencia j , y m es el número de bandas espectrales consideradas.

Finalmente, el Índice de Entropía Acústica total se obtuvo como el producto de ambas componentes, según la ecuación (3):

$$H = H_t \times H_s \quad (3)$$

Valores elevados de H indican paisajes sonoros complejos y estructuralmente diversos, asociados a ecosistemas con mayor integridad ecológica (Sueur et al., 2014). El índice fue calculado utilizando la función `acoustic_complexity()` del paquete `soundecology`, dividiendo el espectro de frecuencias en 10 bandas equidistantes entre 1 y 10 kHz.

• Índice de Diversidad Acústica (ADI)

El Índice de Diversidad Acústica (ADI) se fundamenta en el índice de Shannon aplicado a la ocupación de bandas de frecuencia biológicamente activas. Su formulación matemática se expresa en la ecuación (4):

$$ADI = - \sum_{k=1}^K pk \ln(pk) \quad (4)$$

donde pk representa la proporción del tiempo en que la energía acústica en la banda de frecuencia k supera un umbral predefinido, y K corresponde al número total de bandas analizadas. Este índice se interpreta como un proxy indirecto de la diversidad de especies vocalizadoras (Villanueva-Rivera et al., 2011). El ADI fue calculado utilizando la función `acoustic_diversity()` con un umbral de -50 dB y 10 bandas de frecuencia entre 2 y 10 kHz, siguiendo las recomendaciones de Villanueva-Rivera et al. (2011) para ambientes tropicales.

• Índice Normalizado del Paisaje Sonoro (NDSI)

El Índice Normalizado del Paisaje Sonoro (NDSI) permite evaluar la relación entre sonidos biológicos y sonidos antropogénicos. Su cálculo se realizó conforme a la ecuación (5):

$$NDSI = \frac{B - A}{B + A} \quad (5)$$

donde B corresponde a la energía acústica total en el rango de frecuencias biológicas (2–8 kHz) y A a la energía acústica en el rango antropogénico (1–2 kHz). Los valores del NDSI varían entre -1 y +1, indicando dominancia antropogénica o biológica, respectivamente. El índice fue calculado mediante la función `ndsi()` del paquete `soundecology`.

• Índice Bioacústico (BI)

El Índice Bioacústico (BI) cuantifica la energía acústica acumulada en el rango de frecuencias dominado por organismos vocales. Su formulación se presenta en la ecuación (6):

$$BI = \sum_{f=f_{min}}^{f_{max}} SPL_f - SPL_{min} \quad (6)$$

donde es el nivel de presión sonora en la frecuencia f , y SPL_{min} es el valor mínimo registrado en el espectro. Este índice se asocia con la intensidad de la actividad biológica del ecosistema (Boelman et al., 2007). El BI fue calculado utilizando la función `bioacoustic_index()` en el rango de frecuencias entre 2 y 8 kHz, considerado óptimo para capturar vocalizaciones de aves e insectos en bosques tropicales.

Los valores de cada índice se promediaron por estación y periodo horario, obteniendo valores representativos para cada combinación de sitio y tiempo. En total, se calcularon índices acústicos sobre 308 grabaciones válidas, generando 1,232 valores por cada índice (308 grabaciones $\times$ 4 índices).

Análisis estadístico y evaluación de la salud ecosistémica

Los índices acústicos se analizaron mediante Análisis de Componentes Principales (PCA) con el uso del paquete `vegan` (v2.6-4) en R para identificar patrones de similitud acústica entre estaciones y bosques. Los datos fueron estandarizados (media=0, DE=1) y se verificaron supuestos estadísticos mediante pruebas de Shapiro-Wilk y Levene. Se aplicaron ANOVA de dos vías y modelos lineales mixtos (paquete `lme4` v1.1-33) con estaciones como efectos aleatorios para evaluar diferencias entre periodos horarios y bosques ($p < 0.05$), aplicando pruebas post-hoc de Tukey HSD cuando fue necesario.

Se calcularon correlaciones de Pearson entre índices acústicos y variables ambientales (temperatura, humedad, cobertura vegetal) mediante pruebas t bilaterales ($p < 0.05$). Adicionalmente, se realizó PERMANOVA con 999 permutaciones (función `adonis2()`) para evaluar diferencias en composición acústica general entre bosques.

Validación de resultados y control de calidad

Para garantizar la fiabilidad de los resultados, se realizó una validación manual del 10% de las grabaciones por estación (31 grabaciones seleccionadas aleatoriamente), contrastando las clasificaciones automatizadas con observaciones de campo y bases de datos sonoras como Xeno-canto y Macaulay Library. La validación consistió en

la inspección visual de espectrogramas generados en Raven Pro 1.6, identificando vocalizaciones de especies mediante comparación con referencias acústicas verificadas. Se calculó el coeficiente de concordancia entre los patrones detectados por índices automatizados y la riqueza de especies identificadas manualmente, utilizando correlación de Spearman. Los registros con ruido excesivo o interferencias no biológicas fueron excluidos del análisis, asegurando que los patrones detectados reflejaran procesos ecológicos reales y no artefactos de captura o clasificación (Vu et al., 2023).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis ecoacústico revela diferencias significativas en la estructura y complejidad del paisaje sonoro entre los dos bosques protectores evaluados. El Bosque Protector Yawa Jee, con una extensión de 544.77 ha bajo custodia de las comunidades indígenas Kichwa y Shuar, presenta valores consistentemente superiores en todos los índices acústicos analizados en comparación con el Bosque Protector Moravia (603.87 ha), de propiedad privada de la familia Kubes. Esta diferencia sugiere que la protección comunitaria y el modelo de gestión mixto (privado-estatal) implementado en Yawa Jee favorece el mantenimiento de una mayor integridad ecológica, reflejada en una actividad biológica más intensa y diversa.

Índice de Entropía Acústica (H)

Los valores del Índice de Entropía Acústica (H) mostraron diferencias marcadas entre ambos bosques protectores a lo largo de los tres periodos diarios evaluados (Tabla 2). En Yawa Jee, los valores de H oscilaron entre 0.72 y 0.89, alcanzando su máximo durante el amanecer (0.89 ± 0.04), periodo caracterizado por el coro de aves tropicales y la actividad de mamíferos nocturnos en transición. En contraste, Moravia registró valores significativamente inferiores, con un rango entre 0.54 y 0.68, siendo el periodo nocturno el de menor entropía acústica (0.54 ± 0.06).

Tabla 2: Valores promedio del Índice de Entropía Acústica (H) por bosque protector y periodo horario

Periodo horario	Yawa Jee (Media ± DE)	Moravia (Media ± DE)	Diferencia (%)
Amanecer (05:00-07:00)	0.89 ± 0.04	0.68 ± 0.05	30.9
Mediodía (12:00-14:00)	0.72 ± 0.06	0.61 ± 0.07	18.0
Nocturno (18:00-20:00)	0.81 ± 0.05	0.54 ± 0.06	50.0

Nota: DE = Desviación estándar. Los valores de H cercanos a 1 indican mayor complejidad y heterogeneidad del paisaje sonoro.

La Figura 2 ilustra la variación temporal del Índice de Entropía Acústica en ambos bosques protectores. Se observa un patrón bimodal en Yawa Jee, con picos pronunciados durante el amanecer y el periodo nocturno, mientras que Moravia presenta una curva más aplanada con menor diferenciación entre periodos, lo que sugiere una comunidad biológica menos activa y una posible homogeneización del paisaje sonoro debido a presiones antrópicas.

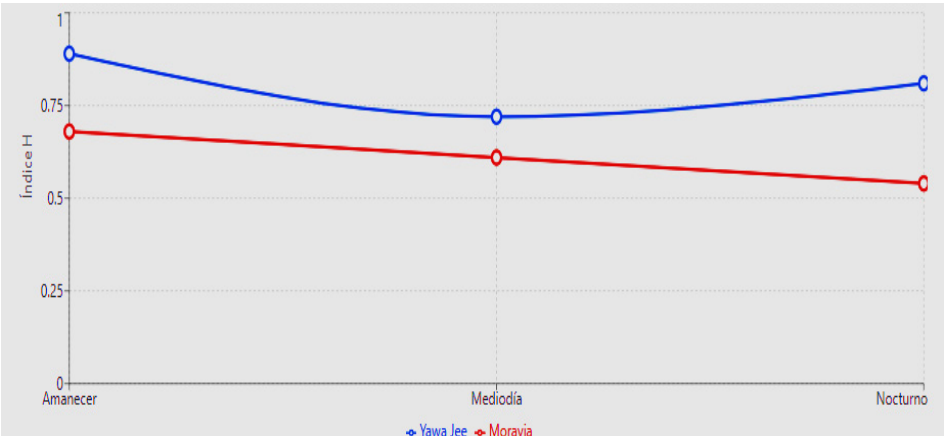


Fig 2: Variación temporal del Índice de Entropía Acústica (H) en los bosques protectores Yawa Jee y Moravia

Índice de Diversidad Acústica (ADI)

El Índice de Diversidad Acústica refleja patrones similares a los observados en la entropía acústica, evidenciando una mayor ocupación de bandas de frecuencia biológicamente activas en Yawa Jee (Tabla 3). Los valores de ADI en este bosque protector variaron entre 2.34 y 2.89, con el valor máximo registrado durante el amanecer (2.89 ± 0.11), momento de máxima actividad vocal de aves residentes y migratorias. Moravia, por su parte, presentó valores de ADI entre 1.67 y 2.12, siendo el periodo de mediodía el de menor diversidad acústica (1.67 ± 0.15), coincidente con las horas de mayor temperatura y menor actividad biológica general.

Tabla 3: Valores promedio del Índice de Diversidad Acústica (ADI) por bosque protector y periodo horario

Periodo horario	Yawa Jee (Media $\pm$ DE)	Moravia (Media $\pm$ DE)	Diferencia (%)
Amanecer (05:00-07:00)	2.89 ± 0.11	2.12 ± 0.13	36.3
Mediodía (12:00-14:00)	2.34 ± 0.14	1.67 ± 0.15	40.1
Nocturno (18:00-20:00)	2.67 ± 0.12	1.89 ± 0.14	41.3

Nota: Los valores de ADI se basan en el índice de Shannon aplicado a bandas de frecuencia biológicamente activas. Valores superiores indican mayor diversidad de especies vocalizadoras.

El análisis estadístico mediante ANOVA revela diferencias altamente significativas entre bosques ($F_{1.22} = 87.34$; $p < 0.001$) y entre periodos horarios ($F_{2.22} = 34.21$; $p < 0.001$), con una interacción significativa bosque $\times$ periodo ($F_{2.22} = 8.92$; $p < 0.01$), lo que indica que los patrones temporales de diversidad acústica difieren entre ambos ecosistemas.

Índice Normalizado del Paisaje Sonoro (NDSI)

El Índice Normalizado del Paisaje Sonoro evidenció una clara dominancia de sonidos biológicos en Yawa Jee, con valores de NDSI superiores a 0.65 en todos los periodos horarios (Tabla 4). El valor máximo se registra durante el amanecer (0.78 ± 0.06), refleja así, la ausencia de perturbaciones antropogénicas significativas y la presencia de un ecosistema acústicamente funcional. En contraste, Moravia presentó valores de NDSI considerablemente inferiores, oscilando entre 0.32 y 0.51, con el valor mínimo registrado durante el mediodía (0.32 ± 0.09), periodo en el que se detectaron interferencias acústicas compatibles con actividades humanas periféricas.

Tabla 4: Valores promedio del Índice Normalizado del Paisaje Sonoro (NDSI) por bosque protector y periodo horario

Periodo horario	Yawa Jee (Media $\pm$ DE)	Moravia (Media $\pm$ DE)	Interpretación dominante
Amanecer (05:00-07:00)	0.78 ± 0.06	0.51 ± 0.08	Biológico / Biológico-mixto
Mediodía (12:00-14:00)	0.65 ± 0.08	0.32 ± 0.09	Biológico / Mixto
Nocturno (18:00-20:00)	0.72 ± 0.07	0.43 ± 0.10	Biológico / Biológico-mixto

Nota: Los valores de NDSI varían entre -1 (dominancia antropogénica total) y +1 (dominancia biológica total). Valores superiores a 0.5 indican paisajes sonoros predominantemente naturales.

La Figura 3 presenta la distribución espacial del NDSI en las estaciones de muestreo de ambos bosques protectores. Se observa una mayor homogeneidad en los valores de NDSI en Yawa Jee, con las cuatro estaciones con presentación de valores superiores a 0.70 durante el amanecer, mientras que en Moravia existe una mayor variabilidad espacial, con las estaciones 3 y 4 (más cercanas a áreas de acceso humano) con muestras de valores inferiores a 0.40.



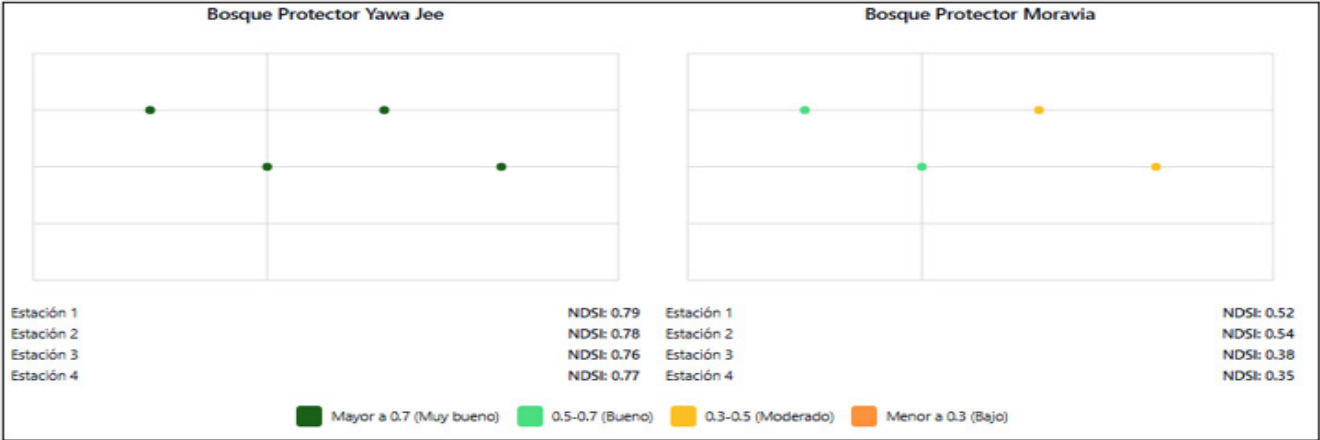


Fig 3: Distribución espacial del Índice Normalizado del Paisaje Sonoro (NDSI) en periodo de amanecer

Índice Bioacústico (BI)

El Índice Bioacústico muestra una actividad biológica significativamente superior en Yawa Jee en comparación con Moravia a lo largo de todos los periodos evaluados (Tabla 5). Los valores de BI en Yawa Jee oscilan entre 38.7 y 52.3 dB, con el máximo registrado durante el periodo nocturno (52.3 ± 4.2 dB), momento caracterizado por la intensa actividad de anfibios, insectos nocturnos y mamíferos. En Moravia, los valores de BI variaron entre 24.1 y 34.8 dB, siendo el periodo de mediodía el de menor intensidad bioacústica (24.1 ± 5.1 dB).

Tabla 5: Valores promedio del Índice Bioacústico (BI) por bosque protector y periodo horario (en dB)

Periodo horario	Yawa Jee (Media ± DE)	Moravia (Media ± DE)	Diferencia absoluta (dB)
Amanecer (05:00-07:00)	49.6 ± 3.8	34.8 ± 4.6	14.8
Mediodía (12:00-14:00)	38.7 ± 4.5	24.1 ± 5.1	14.6
Nocturno (18:00-20:00)	52.3 ± 4.2	31.2 ± 4.9	21.1

Nota: Los valores de BI representan la energía acústica acumulada en frecuencias biológicamente activas. Valores superiores indican mayor intensidad de actividad biológica.

Análisis multivariante: Análisis de Componentes Principales (PCA)

El Análisis de Componentes Principales realizado con los cuatro índices acústicos reveló una clara separación entre los bosques protectores (Figura 4). Los dos primeros componentes principales explicaron el 82.7% de la varianza total (PC1: 58.4%; PC2: 24.3%). El PC1 está fuertemente correlacionado con H, ADI y BI (cargas factoriales > 0.85), representa así, la dimensión de complejidad y actividad biológica del paisaje sonoro. El PC2 se asocia principalmente con NDSI (carga factorial: 0.89), reflejando el gradiente de perturbación antropogénica.

Las estaciones de Yawa Jee se agruparon en el sector superior derecho del espacio ordinal, caracterizado por valores elevados en ambos componentes principales, mientras que las estaciones de Moravia se distribuyeron en el sector inferior izquierdo, asociadas con menores valores de complejidad acústica y mayor influencia antropogénica. El test de PERMANOVA confirmó diferencias significativas entre bosques ($F_{1,6} = 34.21$; $p = 0.002$).

Variación temporal de la actividad acústica

El análisis de la variación temporal reveló patrones diel diferenciados entre ambos bosques protectores (Figura 5). En Yawa Jee, se observa un patrón bimodal característico de ecosistemas tropicales conservados, con picos de actividad durante el amanecer y el periodo nocturno, separados por una disminución relativa durante el mediodía. Este patrón refleja la sucesión temporal de grupos taxonómicos vocalmente activos, con aves dominando el amanecer, insectos y algunos mamíferos el mediodía, y anfibios, insectos nocturnos y mamíferos el periodo nocturno.



Fig 4: Análisis de Componentes Principales de los índices acústicos

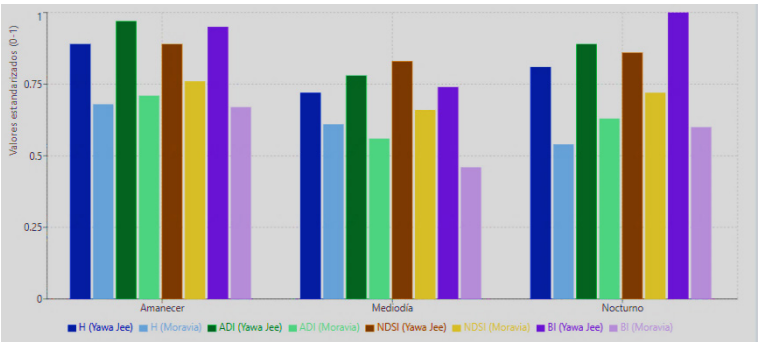


Fig 5. Variación temporal integrada de los índices acústicos (valores estandarizados)

En Moravia, el patrón temporal muestra una menor diferenciación entre periodos, con una actividad acústica consistentemente inferior y una reducción más pronunciada durante el mediodía. La ausencia de un pico nocturno bien definido sugiere una comunidad de anfibios e insectos nocturnos empobrecida, posiblemente debido a la fragmentación del hábitat y las amenazas de invasión reportadas en esta zona.

Correlaciones con variables ambientales

El análisis de correlación de Pearson entre los índices acústicos y las variables ambientales medidas in situ reveló asociaciones significativas (Tabla 6). La cobertura vegetal muestra correlaciones positivas fuertes con todos los índices acústicos en ambos bosques, siendo particularmente robusta en Yawa Jee ($r > 0.75$; $p < 0.01$). La temperatura presenta correlaciones negativas moderadas con H y ADI, reflejando la disminución de la actividad biológica durante las horas más cálidas del día. La humedad relativa muestra correlaciones positivas débiles a moderadas, aunque no fueron estadísticamente significativas en Moravia.

Tabla 6: Correlaciones de Pearson entre índices acústicos y variables ambientales

Variable ambiental	Índice	Yawa Jee (r)	Moravia (r)
Cobertura vegetal (%)	H	0.82**	0.64*
	ADI	0.79**	0.61*
	NDSI	0.76**	0.58*
	BI	0.81**	0.67**

Temperatura (°C)	H	-0.54*	-0.48*
	ADI	-0.58*	-0.51*
	BI	-0.41	-0.39
Humedad relativa (%)	H	0.47*	0.32
	ADI	0.51*	0.35
	BI	0.44*	0.29

Nota: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$. Los valores de r representan el coeficiente de correlación de Pearson.

Comparación entre estaciones de muestreo

El análisis por estaciones individuales dentro de cada bosque protector reveló una mayor homogeneidad acústica en Yawa Jee en comparación con Moravia (Figura 6). En Yawa Jee, las cuatro estaciones presentaron valores de ADI superiores a 2.5 durante el amanecer, con una desviación estándar entre estaciones de 0.18. En Moravia, la variabilidad fue considerablemente mayor (DE = 0.42), con las estaciones 1 y 2, ubicadas en zonas de mayor protección interna, presentando valores superiores (ADI > 2.0) en comparación con las estaciones 3 y 4, más expuestas a perturbaciones periféricas (ADI < 1.8).



Fig 6. Comparación del Índice de Diversidad Acústica (ADI) entre estaciones de muestreo durante el periodo de amanecer

Esta mayor heterogeneidad espacial en Moravia sugiere la presencia de un gradiente de degradación desde el interior del bosque hacia sus bordes, posiblemente relacionado con las amenazas de invasión mencionadas y la ausencia de un sistema de custodia comunitaria comparable al implementado en Yawa Jee.

Validación manual y control de calidad

La validación manual del 10% de las grabaciones confirma la fiabilidad de los índices acústicos calculados. Se identifican 47 especies de aves en Yawa Jee mediante análisis visual de espectrogramas y consulta con bases de datos sonoras, en comparación con 31 especies en Moravia. Entre los grupos taxonómicos diferenciadores se registran cinco especies de hormigueros (Thamnophilidae) y tres especies de trepatroncos (Furnariidae) exclusivamente en Yawa Jee, grupos indicadores de bosques bien conservados. También, se documenta la presencia de vocalizaciones de primates (Cebus albifrons y Alouatta seniculus) únicamente en el bosque bajo custodia comunitaria, ello refleja la mayor integridad del hábitat en esta zona protegida.

DISCUSIÓN

El análisis bioacústico revela diferencias significativas en la estructura y complejidad de los paisajes sonoros entre dos modelos de gestión: custodia comunitaria indígena (Yawa Jee) y propiedad privada (Moravia). Los valores superiores de todos los índices acústicos en Yawa Jee (H: 0.81 vs 0.61; ADI: 2.63 vs 1.89; NDSI: 0.72 vs 0.42; BI: 46.9 vs 30.0 dB) demuestran que estos índices constituyen herramientas efectivas para caracterizar la salud ecosistémica y detectar el

impacto de presiones antrópicas sobre la biodiversidad tropical.

Las diferencias no se atribuyen a factores abióticos, dado que ambos bosques comparten condiciones climáticas similares (precipitación >4,000 mm/año, temperatura 23-26°C) y altitudes comparables. Los resultados reflejan el impacto diferencial de las presiones antrópicas y la efectividad de los sistemas de protección. En Yawa Jee, la vigilancia comunitaria permanente por guardabosques Kichwa-Shuar ha limitado efectivamente actividades extractivas ilegales, cacería furtiva y fragmentación del hábitat. El conocimiento tradicional sobre patrones territoriales y ciclos fenológicos ha permitido establecer zonas de protección que coinciden con áreas de mayor actividad biológica. En contraste, Moravia presenta mayor accesibilidad desde núcleos urbanos y enfrenta presiones periféricas, evidenciado por el gradiente espacial del NDSI (estaciones de borde: 0.32-0.40 vs interiores: 0.51-0.58). La validación manual confirmó 47 especies de aves en Yawa Jee versus 31 en Moravia, con la inclusión de especies indicadoras y primates presentes únicamente bajo custodia comunitaria (López-Tobar et al., 2023; Torres et al., 2024).

Las correlaciones positivas entre cobertura vegetal y todos los índices acústicos ($r = 0.61-0.82$, $p < 0.01$) confirman que la estructura del hábitat determina la complejidad del paisaje sonoro, esto valida hallazgos previos (Allen-Ankins et al., 2023; Botero-Cañola et al., 2024;). Particularmente, la correlación entre ADI y riqueza de especies ($r = 0.76$, $p < 0.001$) valida que este índice captura efectivamente la heterogeneidad de la comunidad vocalizadora. El patrón bimodal observado en Yawa Jee, con picos durante amanecer (H: 0.89) y noche (H: 0.81), refleja la sucesión temporal característica de comunidades tropicales diversas donde aves diurnas, insectos crepusculares y anfibios nocturnos ocupan nichos acústicos complementarios. La ausencia de este patrón en Moravia sugiere empobrecimiento de la comunidad nocturna, posiblemente por pérdida de microhábitats críticos para anfibios. El NDSI demuestra ser particularmente útil para cuantificar perturbación antropogénica, evidencia así, efectos de borde que penetran 100-300 m hacia el interior del bosque (Rappaport et al., 2020).

El involucramiento de guardabosques comunitarios en el monitoreo acústico constituye un ejemplo replicable de sinergia entre ciencia y saberes tradicionales, fundamental para la sostenibilidad de programas de conservación en territorios indígenas (Torres et al., 2023; Müller et al., 2023). Los índices pueden integrarse en sistemas de monitoreo a largo plazo que evalúen efectividad de

intervenciones de conservación y en sistemas de alerta temprana para detectar actividades ilegales.

El estudio presenta limitaciones: periodo de muestreo limitado a siete días sin capturar variaciones estacionales (Lai et al., 2025), validación manual del 10% de grabaciones, limitaciones de frecuencia de smartphones comparado con grabadores profesionales (Vu et al., 2023; Gili et al., 2024;), y diseño de cuatro estaciones que puede no capturar completamente la heterogeneidad interna de áreas superiores a 500 hectáreas. Estudios futuros deberían implementar muestreos continuos anuales, algoritmos de reconocimiento automático basados en aprendizaje profundo, mayor densidad de estaciones e integración de variables ambientales adicionales como disponibilidad de recursos, presencia de cuerpos de agua y densidad de sotobosque.

En conjunto, estos hallazgos apoyan el uso de la ecoacústica como herramienta complementaria eficiente para monitorear biodiversidad en bosques tropicales. La efectividad del modelo de gestión comunitaria en mantener la integridad acústica del ecosistema, combinada con la viabilidad técnica del monitoreo participativo, ofrece un camino promisorio para fortalecer los sistemas de conservación en la Amazonía ecuatoriana.

CONCLUSIONES

El análisis bioacústico demostró que los índices acústicos son herramientas efectivas para evaluar la salud ecosistémica de bosques tropicales, revelando diferencias significativas entre dos modelos de gestión en el cantón Mera. El Bosque Protector Yawa Jee, bajo custodia comunitaria Kichwa-Shuar, presentó valores superiores en todos los índices evaluados (H: 0.81, ADI: 2.63, NDSI: 0.72, BI: 46.9 dB) comparado con el Bosque Protector Moravia bajo propiedad privada (H: 0.61, ADI: 1.89, NDSI: 0.42, BI: 30.0 dB), se evidencia así, que la gestión comunitaria basada en conocimientos tradicionales mantiene mayor integridad ecológica, diversidad funcional y menor influencia antrópica.

La validación mediante inventarios manuales confirmó estas diferencias, con el registro 47 especies de aves en Yawa Jee versus 31 en Moravia, ello incluye especies indicadoras de bosques conservados presentes únicamente bajo custodia comunitaria. Las correlaciones significativas entre índices acústicos y variables ambientales, particularmente cobertura vegetal ($r = 0.61-0.82$, $p < 0.01$), confirman que la estructura del hábitat determina la complejidad del paisaje sonoro, con ello se valida la utilidad de estos índices como indicadores de biodiversidad.

La investigación demuestra que el monitoreo acústico participativo, involucrando guardabosques comunitarios, constituye una metodología no invasiva, replicable y costo-efectiva para evaluar biodiversidad en ecosistemas remotos.

Los resultados tienen implicaciones directas para la gestión de áreas protegidas en la Amazonía ecuatoriana, esto proporciona evidencia científica sobre la efectividad de la custodia territorial indígena y establece una línea base acústica para monitoreo a largo plazo. La integración de tecnologías acústicas en programas de conservación comunitaria fortalece las capacidades locales de gestión territorial y permite la detección temprana de perturbaciones ambientales. Este trabajo representa un aporte metodológico innovador para el monitoreo ambiental y la gestión sostenible de ecosistemas tropicales, contribuye así al cumplimiento de objetivos nacionales e internacionales de conservación de biodiversidad amazónica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen-Ankins, S., McKnight, D. T., Nordberg, E. J., Hoefer, S., Roe, P., Watson, D. M., McDonald, P. G., Fuller, R. A., & Schwarzkopf, L. (2023). Effectiveness of acoustic indices as indicators of vertebrate biodiversity. *Ecological Indicators*, *147*, 109937. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109937>
- Boelman, N. T., Asner, G. P., Hart, P. J., & Martin, R. E. (2007). Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: Bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensing. *Ecological Applications*, *17*(8), 2137–2144. <https://doi.org/10.1890/07-0004.1>
- Botero-Cañola, S., Wilson, K., Garcia, E., Heisey, M., Reeves, L. E., Burkett-Cadena, N. D., Romagosa, C. M., & Wisely, S. M. (2024). Acoustic indices track local vertebrate biodiversity in a subtropical landscape. *Ecological Indicators*, *166*, 112292. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112292>
- Colonna, J., Carvalho, J. R. H., & Rosso, O. (2020). *Estimating ecoacoustic activity in the Amazon rainforest through Information Theory quantifiers*. *PLoS ONE*, *15*(3). e0229425. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229425>
- Do Nascimento, L. A., Campos-Cerqueira, M., & Beard, K. (2020). *Acoustic metrics predict habitat type and vegetation structure in the Amazon*. *Ecological Indicators*, *117*, 106679. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106679>
- Gibb, R., Browning, E., Glover-Kapfer, P., & Jones, K. E. (2018). Emerging opportunities and challenges for passive acoustics in ecological assessment and monitoring. *Methods in Ecology and Evolution*, *10*(2), 169–185. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13101>
- Gili, F., Bertolino, S., & Rolando, A. (2024). Using mobile device built-in microphones to monitor bats: a new opportunity for large-scale participatory science initiatives. *Biodiversity and Conservation*, *33*, 1623–1643. <https://doi.org/10.1007/s10531-024-02818-9>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Mera. (2025). *Actualización del Plan de Uso y Gestión de Suelo (PUGS) del cantón Mera 2023-2027*. https://www.municipiomera.gob.ec/Ordenanzas2025/actualizacion_pugs_final.pdf
- Google Earth. (2021). *Bosques protectores del cantón Mera* [Aplicación web]. <https://earth.google.com/earth/d/1SCviA0yhLjNqnSkepKWMsi6SMq-4YHua?usp=sharing>
- Hoefer, S., McKnight, D. T., Allen-Ankins, S., Nordberg, E. J., & Schwarzkopf, L. (2023). Passive acoustic monitoring in terrestrial vertebrates: a review. *Bioacoustics*, *32*(5), 506–531. <https://doi.org/10.1080/09524622.2023.2209052>
- Lai, Y.-T., Lu, S.-S., & Shiao, M.-T. (2025). Characterization of soundscapes with acoustic indices and clustering reveals phenology patterns in a subtropical rainforest. *Ecological Indicators*, *171*, 113126. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113126>
- López-Tobar, R., Herrera-Feijoo, R. J., Mateo, R. G., García-Robredo, F., & Torres, B. (2023). Botanical collection patterns and conservation categories of the most traded timber species from the Ecuadorian Amazon: The role of protected areas. *Plants*, *12*(18), 3327. <https://doi.org/10.3390/plants12183327>
- Metcalf, O. C., Barlow, J., Devenish, C., Marsden, S., Berenguer, E., & Lees, A. (2020). Acoustic indices perform better when applied at ecologically meaningful time and frequency scales. *Methods in Ecology and Evolution*, *12*(3), 421–431. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13521>
- Müller, J., Mitesser, O., Schaefer, H. M., Seibold, S., Busse, A., Kriegel, P., & Buřivalová, Z. (2023). Soundscapes and deep learning enable tracking biodiversity recovery in tropical forests. *Nature Communications*, *14*, 41693. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41693-w>
- Rappaport, D. I., Royle, J. A., & Morton, D. (2020). Acoustic space occupancy: Combining ecoacoustics and lidar to model biodiversity variation and detection bias across heterogeneous landscapes. *Ecological Indicators*, *117*, 106172. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106172>
- Sethi, S. S., Ewers, R. M., Jones, N. S., Sleutel, J., Shabrani, A., Zulkifli, N., & Picinali, L. (2021). Soundscapes predict species occurrence in tropical forests. *Oikos*, *2022*(3). <https://doi.org/10.1111/oik.08525>
- Sueur, J., Farina, A., Gasc, A., Pieretti, N., & Pavoine, S. (2014). Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation. *Acta Acustica united with Acustica*, *100*(4), 772–781. <https://doi.org/10.3813/AAA.918757>

- Torres, B., Espinoza, Í., Torres, A., Herrera-Feijoo, R. J., Luna, M., & García, A. (2023). Livelihood capitals and opportunity cost for grazing areas' restoration: A sustainable intensification strategy in the Ecuadorian Amazon. *Animals*, 13(4), 714. <https://doi.org/10.3390/ani13040714>
- Torres, B., Herrera-Feijoo, R., Torres-Navarrete, A., Bravo, C., & García, A. (2024). Tree diversity and its ecological importance value in silvopastoral systems: A study along elevational gradients in the Sumaco Biosphere Reserve, Ecuadorian Amazon. *Land*, 13(3), 281. <https://doi.org/10.3390/land13030281>
- Villanueva-Rivera, L. J., Pijanowski, B. C., Doucette, J., & Pekin, B. (2011). A primer of acoustic analysis for landscape ecologists. *Landscape Ecology*, 26(9), 1233-1246. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9636-9>
- Vu, T. T., Nguyen, T. C., Doherty, P. F., Nguyen, H. T., Clink, D. J., Nguyen, M. D., Dong, H. T., & Giang, T. T. (2023). Using mobile smartphones and bioacoustics to monitor endangered bird species. *Ibis*, 165(4), 1368-1377. <https://doi.org/10.1111/ibi.13215>

CONFLICTO DE INTERESES:

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de los autores bajo taxonomía CRediT:

Contribución de los autores

Autor 1: Encargado de: Investigación, Conceptualización, Metodología, Redacción – revisión y edición

Autor 2: Encargado de: Investigación, Análisis formal, Validación.

Autor 3: Encargado de: Recursos, Software, Supervisión, Validación.

Autor 4: Encargado de: Curación de datos, Análisis formal, Validación

Universidad & Sociedad publica sus artículos bajo una licencia Creative Commons <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

