

**Universidad Nacional
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Escuela de Ciencias Biológicas**

Informe Escrito Final

(PASANTÍA)

Caracterización del paisaje y vegetación en sitios de importancia para la conservación del pájaro campana (*Procnias tricarunculatus*) dentro del Corredor Biológico Amistosa, Costa Rica

Instituto Internacional en Conservación y Manejo de Vida Silvestre

Trabajo Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Gestión de los Recursos Naturales y Conservación de la Biodiversidad


Estudiante: Diego Salas Murillo (402390564)

**Tutora:
M.Sc. Carolina Esquivel Dobles**

**Supervisora:
Ph.D. Mónica Retamosa Izaguirre**

**Campus Omar Dengo
Heredia, Costa Rica
Marzo de 2025**

Este trabajo de graduación fue Aprobado por el Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Biología Tropical.



Dra. Claudia Fernández Zamora
Representante, Decano, quién preside



Dr. Meyer Guevara Mora
Representante de la Dirección de la (ECB)

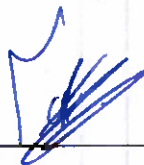


M.Sc. Carolina Esquivel Dobles

Tutora



Ph.D. Mónica Retamosa Izaguirre
Supervisora



M.Sc. Pablo Muñoz Cambroner
Invitado especial

Agradecimiento

Agradezco a la Universidad Nacional de Costa Rica, a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, y a la Escuela de Ciencias Biológicas por brindarme la oportunidad de formarme como profesional y por los recursos proporcionados a lo largo de mi carrera.

Expreso mi más sincero agradecimiento a la profesora Carolina Esquivel Dobles, tutora de esta pasantía, por su paciencia, dedicación y valiosos consejos, los cuales enriquecieron significativamente mi trabajo. De igual manera, agradezco a Mónica Retamosa Izaguirre, mi supervisora, por su guía y apoyo constante, y a Jimmy Barrantes Madrigal, ambos del ICOMVIS, por su acompañamiento y disposición, que fueron fundamentales en este proceso.

A mi familia, por su apoyo incondicional y por creer en mí en cada paso del camino. A mis amigos, por su compañía, motivación y por hacer de este viaje una experiencia inolvidable. En especial, a Allison Centeno Chaves, cuyo inmenso apoyo y acompañamiento durante toda la carrera han sido invaluable.

Este trabajo no solo marca el cierre de una etapa, sino el comienzo de un nuevo camino lleno de desafíos y oportunidades. Me siento profundamente agradecido por todo lo aprendido y por cada persona que, de una u otra forma, hizo posible este logro. Gracias a todos por ser parte de este sueño hecho realidad.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, por estar presente en este camino y por su apoyo a lo largo de los años. A Allison Centeno Chaves, por ser mi mayor pilar, por su compañía inquebrantable y por recordarme siempre que soy capaz de alcanzar mis metas. Su paciencia, aliento y confianza en mí han sido fundamentales en este proceso.

Y al pájaro campana, cuya voz ha acompañado esta investigación. Aunque aún no he tenido el privilegio de verlo, sé que, en algún rincón del bosque, sigue resonando su canto. Espero que, algún día, nuestros caminos se crucen.

Índice

Miembros del tribunal	II
Agradecimiento.....	III
Dedicatoria	IV
Índice	V
Índice de cuadros	VI
Índice de figuras	VII
Abreviaturas	VIII
Resumen	IX
1. Introducción	1
1.1 Historia de la institución y actividades económica a la que se dedica	1
1.2 Justificación de la pasantía	2
2. Objetivos de la pasantía	5
3. Actividades realizadas	5
3.1. Área de estudio	5
3.2. Caracterización de la vegetación	6
3.3. Modelo de distribución potencial	8
3.4. Índices de paisaje	9
3.5. Análisis de datos	9
3.6. Apoyo al proyecto	9
4. Resultados obtenidos de la pasantía	10
4.1. Caracterización de la vegetación	10
4.2. Modelo de distribución potencial	12
4.3. Índices de paisaje	17
4.4. Apoyo al proyecto	20
5. Discusión de resultados	20
6. Relevancia de la pasantía en su perfil profesional y conocimientos adquiridos de la experiencia	23
7. Conclusiones y recomendaciones	24
8. Referencias bibliográficas	24

Índice de cuadros

Cuadro 1. Valores promedio, máximo y mínimo para los índices MIG y GAP en los sitios donde se encontraban instaladas las grabadoras en ambos sectores del Corredor Biológico Amistosa.....	10
Cuadro 2. Porcentaje de contribución de las variables ambientales al modelo de distribución potencial para <i>P. tricarunculatus</i>	13
Cuadro 3. Índices de paisaje para los sitios donde se encontraban las grabadoras en el Corredor Biológico Amistosa.	18

Índice de figuras

Figura 1. Sitios dentro del Corredor Biológico Amistosa donde se encontraban instaladas las grabadoras.	6
Figura 2. Diagrama de la toma de fotografías en cada sitio donde se encontraban las grabadoras.	7
Figura 3. Histograma de frecuencias para el índice MIG estructural en los sitios donde se encontraban instaladas las grabadoras en ambos sectores del Corredor Biológico Amistosa.	11
Figura 4. Histograma de frecuencias para el índice GAP estructural en los sitios donde se encontraban instaladas las grabadoras en ambos sectores del Corredor Biológico Amistosa.	11
Figura 5. Modelo de distribución potencial para <i>P. tricarunculatus</i> en la zona del Corredor Biológico Amistosa, Puntarenas, Costa Rica.	12
Figura 6. Prueba de Jackknife sobre la importancia de las variables ambientales en el modelo de distribución potencial de <i>P. tricarunculatus</i> . La simbología de las variables es la siguiente: elevación (elev), huella humana (humanb), rango de influencia de lauráceas (lauraceae), precipitación (prec), radiación solar (srad), temperatura máxima (tmax), temperatura mínima (tmin), temperatura promedio (tprom), presión de vapor de agua (vapr) y viento (wind). El color azul representa la ganancia del modelo solamente utilizando esa variable, el color turquesa representa la ganancia del modelo con todas las variables ambientales y excluyendo esa variable, y el color rojo representa el modelo con todas las variables ambientales.	13
Figura 7. Valores MIG en los sitios donde se ubican los equipos de grabación en ambos sectores del Corredor Biológico Amistosa.	14
Figura 8. Valores del Índice GAP en los sitios donde se ubican los equipos de grabación en ambos sectores del Corredor Biológico Amistosa.	15
Figura 9. Valores del modelo de distribución potencial (MaxEnt) en los sitios donde se ubican los equipos de grabación en ambos sectores del Corredor Biológico Amistosa. .	15
Figura 10. Relación entre la probabilidad de presencia del modelo de distribución potencial y el índice de MIG para cada sitio en el que se encontraban un equipo de grabación.	16
Figura 11. Relación entre la probabilidad de presencia del modelo de distribución potencial y el índice GAP para cada sitio en el que se encontraban un equipo de grabación.	17
Figura 12. Tipos de cobertura forestal en el área del Corredor Biológico Amistosa para el 2021.	18

Abreviaturas

ICOMVIS	Instituto Internacional en Conservación y Manejo de Vida Silvestre
CBA	Corredor Biológico Amistosa
SINAC	Sistema Nacional de Áreas de Conservación
IAF	Índice de Área Foliar
MIG	Mean Information Gain
GAP	Proporción de Apertura del Dosel
TELESIG	Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica
LADICIEN	Laboratorio de Didáctica de las Ciencias Exactas y Naturales
LABITROP	Laboratorio de Biología Tropical
LABTEC	Laboratorio de Teledetección de Ecosistemas
GBIF	Global Biodiversity Information Facility

Resumen

El pájaro campana tricarunculado (*Procnias tricarunculatus*), especie vulnerable endémica de Centroamérica, realiza migraciones altitudinales durante su época reproductiva, por lo que depende de la conectividad ecológica y la disponibilidad de recursos clave como árboles de la familia Lauraceae. Esta pasantía se desarrolló en el Corredor Biológico Amistosa (CBA), Costa Rica, con el objetivo de caracterizar el paisaje y la vegetación en sitios de muestreo acústico y su relación con la presencia de la especie. Se evaluó la complejidad estructural del hábitat mediante fotografías digitales, calculando el Mean Information Gain (MIG) y la proporción de apertura del dosel (GAP). También se analizaron variables ambientales como cobertura de Lauraceae, velocidad del viento y huella humana. Con estos datos, se construyó un modelo de distribución potencial en MaxEnt, que alcanzó un valor AUC de 0.873, considerado como un rendimiento alto según la métrica (donde 1 indica predicción perfecta y 0.5 una aleatoria). Los resultados indican que la complejidad estructural del hábitat no influye significativamente en la distribución del pájaro campana, mientras que variables como Lauraceae, viento y huella humana son más determinantes. El modelo identificó zonas prioritarias para la especie, especialmente en áreas protegidas como el Parque Internacional La Amistad y el Parque Nacional Piedras Blancas, caracterizadas por alta cobertura forestal, menor intervención humana y presencia de recursos tróficos. Los índices de paisaje evidenciaron diferencias en fragmentación y conectividad a escala regional, aunque sin correlación directa con la presencia de la especie. Se concluye que su conservación requiere un enfoque multifactorial, enfocado en la protección de recursos específicos y la conectividad funcional del hábitat. Futuras investigaciones deben incluir datos sobre oferta alimenticia y variables microclimáticas que podrían influir en su distribución.

Palabras clave: Complejidad estructural, MaxEnt, Cotingidae, Corredores biológicos.

1. Introducción

1.1 Historia de la institución y actividades económica a la que se dedica

En 1984, la Universidad Nacional estableció el Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre para Mesoamérica y el Caribe (PRMVS), con el respaldo del Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos de América. El propósito de este programa fue formar a profesionales y promover la investigación en el campo de la conservación y el manejo de la vida silvestre, con el objetivo de liderar la toma de decisiones en esta área en la región Mesoamericana.

En el año 2005, el PRMVS evolucionó y se convirtió en el Instituto Internacional en Conservación y Manejo de Vida Silvestre (ICOMVIS), consolidándose como una unidad más sólida. Además de la formación de profesionales a nivel de maestría, el ICOMVIS lleva a cabo investigaciones, actividades de extensión, producción científica y programas de educación continua que respaldan la conservación de la vida silvestre en el ámbito neotropical.

El ICOMVIS imparte la maestría académica en Conservación y Manejo de Vida Silvestre, la cual ha graduado a más de 190 profesionales de diversos países. Además, también ofrece el diplomado en Conservación y Manejo de Áreas Protegidas para Guardaparques.

Ubicación en el país de la empresa

El ICOMVIS se encuentra en la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar, dentro de la Universidad Nacional de Costa Rica, Campus Omar Dengo, Heredia.

Visión

El Instituto Internacional de Conservación y Manejo de Vida Silvestre (ICOMVIS) será el referente nacional e internacional en el campo de la conservación y el manejo de la

vida silvestre, en áreas tradicionales y emergentes, con acciones innovadoras que incorporan y adaptan nuevas tecnologías. Establecerá y consolidará alianzas estratégicas que potencien la investigación, la docencia, la producción y la extensión para su sostenibilidad a largo plazo, y así contribuirá a diagnosticar, analizar y proponer soluciones participativas a los retos en conservación y manejo de la vida silvestre que enfrenta la sociedad.

Misión

El Instituto Internacional de Conservación y Manejo de Vida Silvestre (ICOMVIS) genera y transfiere conocimiento y forma recurso humano mediante la investigación, educación y extensión en el campo de la conservación y manejo de vida silvestre y su relación con el ser humano en el Neotrópico, a través de acciones inter y multidisciplinarias que integran aspectos teóricos y prácticos para la conservación de la vida silvestre.

1.2 Justificación de la pasantía

Identificar y caracterizar los hábitats utilizados por el pájaro campana tricarunculado (*Procnias tricarunculatus*) dentro del Corredor Biológico Amistosa (CBA) es fundamental para orientar acciones de conservación basadas en evidencia, y constituye el eje central de esta pasantía. Esta especie vulnerable, endémica de Centroamérica (BirdLife International, 2021), depende de la conectividad ecológica para completar su ciclo de vida, ya que realiza migraciones altitudinales a lo largo del año, desplazándose generalmente entre los 1200 y 2300 metros sobre el nivel del mar. Durante su época reproductiva, se concentra en estos rangos altitudinales, mientras que en otros periodos migra hacia tierras bajas de las vertientes del Pacífico y el Caribe (Powell & Bjork, 2004). Una característica distintiva de los machos es su canto único, que consiste en una serie de combinaciones de dos notas, semejante al tañido de campanas, descrito como un sonido metálico y resonante. Estos cantos pueden escucharse hasta a 500 metros de distancia desde las copas de los árboles, donde pasan la mayor parte del tiempo (Stiles & Skutch, 2007). Esta especie habita desde el este de Honduras hasta el oeste de Panamá (Stiles et al., 1995). En Costa Rica, se pueden diferenciar dos poblaciones por sus cantos: una en Monteverde, que se ubica en la Cordillera de Tilarán,

y otra en la Cordillera de Talamanca, en el sureste del país y oeste en la frontera de Panamá (Papeş et al., 2012). Es en esta última región donde se encuentra el CBA.

El objetivo principal del CBA es restaurar la interconexión altitudinal entre el Parque Internacional La Amistad, el Parque Nacional Piedras Blancas y el Refugio de Vida Silvestre Mixto Gollito. Esta conectividad es fundamental para facilitar las migraciones del pájaro campana, una especie que requiere de hábitats continuos y diversos para sobrevivir. Además, la conectividad ecológica es esencial para muchas otras especies de aves, incluyendo otros miembros de la familia Cotingidae, ya que permite el movimiento entre fragmentos de bosque, favorece el flujo genético y reduce el riesgo de extinción local (Powell & Bjork, 2004; Puebla et al., 2020). El CBA también busca mejorar la calidad ambiental del paisaje agrícola, fortalecer la conectividad funcional y estructural, y potenciar los servicios ecosistémicos que benefician a las comunidades locales dentro del corredor (Sistema Nacional de Áreas de Conservación [SINAC], 2018). El mantenimiento de esta conectividad es particularmente crucial para el pájaro campana, ya que facilita sus desplazamientos estacionales y le permite cumplir su rol ecológico como dispersor de semillas, especialmente de plantas de la familia Lauraceae (Hamilton et al., 2018).

La definición de la complejidad de un bosque varía según el contexto y requiere mediciones robustas que reflejen de forma realista el estado de los ecosistemas (Proulx & Parrott, 2009). Tradicionalmente, los estudios han utilizado indicadores como el Índice de Área Foliar (IAF), el cierre del dosel, el diámetro de la copa, el área basal, la densidad de troncos y la altura de los árboles (Pasher & King, 2011). Sin embargo, con el avance de nuevas técnicas, ahora es posible evaluar esta complejidad estructural de manera más rápida y eficiente. Entre estas herramientas innovadoras destaca el uso de fotografías digitales, que permiten generar indicadores ecológicos sensibles a las características del hábitat a nivel de comunidad, y que resultan accesibles, económicos y aplicables a distintas escalas espaciales y temporales (Proulx & Parrott, 2008). Ejemplos de estos indicadores incluyen el índice de “Mean Information Gain” (MIG), propuesto por Proulx & Parrott (2008), y el índice de Proporción de Apertura del Dosel (GAP), desarrollado por Macfarlane (2011), los cuales permiten caracterizar la estructura de la vegetación tanto en su disposición horizontal como vertical. Por lo tanto, más que desarrollar nuevas métricas, resulta clave fomentar su aplicación, validación y adaptación en diversos contextos ecológicos, de modo que puedan integrarse efectivamente en programas de monitoreo y conservación de bosques.

Otro enfoque metodológico ampliamente utilizado en ecología espacial es el modelado de la distribución potencial de especies dentro de un rango geográfico definido. Este tipo de análisis se basa en la integración de tres componentes clave que determinan la distribución de una especie: el espacio geográfico accesible, las condiciones abióticas, y las interacciones bióticas (Soberón, 2010). A diferencia de los modelos estrictos de nicho ecológico, los enfoques modernos incorporan además factores como la limitación en la dispersión, incertidumbres en la calibración del modelo y, en algunos casos, la inclusión de ausencias supuestas, aunque estas últimas resultan difíciles de validar y su uso es objeto de debate, ya que distinguir una ausencia real de un falso negativo puede ser metodológicamente complejo. Entre las herramientas más utilizadas para este tipo de análisis se encuentra el método de entropía máxima (MaxEnt; Phillips et al., 2006), que permite estimar la distribución potencial o la idoneidad del hábitat para una especie a partir de registros de presencia y variables ambientales. Su popularidad radica en su robustez estadística y facilidad de implementación, ya que no requiere datos de ausencia confirmada y permite evaluar la contribución relativa de cada variable ambiental al modelo (Olivero et al., 2016).

Este trabajo se llevó a cabo en colaboración con el Proyecto Académico 0076-22, titulado 'Detección acústica automatizada como herramienta para el monitoreo biológico y la gestión ambiental participativa: caso del pájaro campana en el Corredor Biológico Amistosa'. El proyecto tiene como objetivo principal emplear técnicas de detección acústica automatizada para monitorear la biodiversidad y fomentar la participación comunitaria en la gestión ambiental del CBA. En este contexto, los métodos de muestreo remoto, como las grabadoras remotas, se presentan como una valiosa alternativa en los estudios poblacionales, entre otros, permitiendo capturar y registrar sonidos del entorno natural a lo largo de periodos de tiempo más extensos que los muestreos físicos. La flexibilidad en la recolección de datos y el bajo mantenimiento de estas grabadoras las convierten en una opción accesible y eficaz para los investigadores (Abrahams & Geary, 2020). La utilización de estas tecnologías y metodologías novedosas en el marco del proyecto permiten un enfoque más completo en el monitoreo del pájaro campana dentro del CBA, contribuyendo a una gestión ambiental efectiva y a la conservación de esta especie emblemática.

La conservación del pájaro campana en el CBA depende de la interacción entre la conectividad ecológica, la complejidad estructural del bosque y el uso de herramientas

innovadoras para su monitoreo. Esta especie realiza migraciones altitudinales en busca de alimento y sitios de canto, por lo que la conectividad entre fragmentos es crucial para garantizar su desplazamiento y acceso a recursos clave. Aunque podría sobrevivir en áreas con alimento disponible, la pérdida de conectividad puede restringir su rango y afectar su éxito reproductivo, como se ha observado en especies similares. Métodos como el análisis de imágenes, modelos de distribución y detección acústica automatizada permiten comprender mejor su ecología y orientar estrategias de conservación más efectivas.

2. Objetivos de la pasantía

Objetivo General

Caracterizar el paisaje y vegetación de los sitios de muestreo acústico dentro del Corredor Biológico Amistosa y su relación con la presencia del pájaro campana.

Objetivos Específicos

- Calcular la complejidad del hábitat donde se encontraban las grabadoras mediante un análisis de estructura de vegetación a través de fotografías digitales.
- Identificar áreas prioritarias para la conservación del pájaro campana dentro del Corredor Biológico Amistosa, mediante la construcción de un modelo de distribución potencial.

3. Actividades realizadas

3.1. Área de estudio

La pasantía se realizó en colaboración con el Proyecto Académico 0076-22 Detección acústica automatizada como herramienta para el monitoreo biológico y la gestión ambiental participativa: caso del pájaro campana en el Corredor Biológico Amistosa, llevado a cargo por distintos entes de la Universidad Nacional (Laboratorios TELESIG-ICOMVIS, LADICIEN, LABITROP y LABTEC-UNA). Este proyecto se llevó a cabo dentro del CBA

y áreas protegidas colindantes, ubicado en el cantón de Puntarenas y abarcando los cantones de Buenos Aires, Corredores, Coto Brus y Golfito (SINAC, 2018).

En el marco de este proyecto, se dispusieron un total de 45 grabadoras Song Meter Digital Field Recorder (SM4 y Mini; Wildlife Acoustics Inc.), que se distribuyeron a lo largo del CBA. Esta ubicación se dividió en dos áreas geográficas: 24 grabadoras en la zona norte y 21 en la zona sur del CBA, como se muestra en la Figura 1. En cada grabadora se instalaron dos micrófonos omnidireccionales, registrando en dos canales. Se usó una frecuencia de muestreo de 44.1 kHz y 16 bits de resolución. Las grabadoras se programaron para capturar continuamente durante los picos de actividad de aves (5:00 h - 8:00 h y 15:00 h - 18:00 h) y en intervalos de 5 minutos cada 20 minutos el resto del día. Se realizaron cambios de baterías y tarjetas de memoria cada dos meses para asegurar un registro continuo de datos.

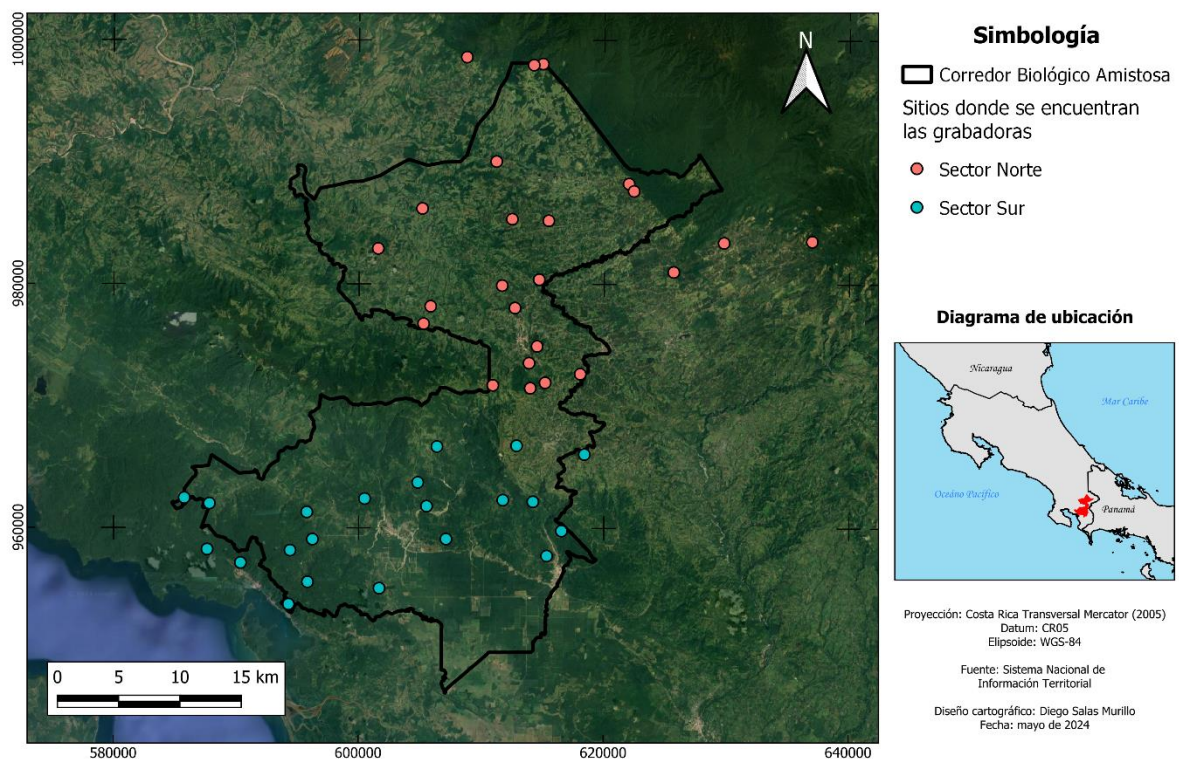


Figura 1. Sitios dentro del Corredor Biológico Amistosa donde se encontraban instaladas las grabadoras.

3.2. Caracterización de la vegetación

La caracterización de las zonas de muestreo se realizó mediante el análisis de fotografías digitales de campo para reflejar la complejidad de la vegetación. Estas fotografías se tomaron en 5 puntos donde se encontraban ubicadas las grabadoras: en el centro de la

parcela y a una distancia de 10 metros hacia los 4 puntos cardinales. En cada uno de los 5 puntos, se tomaron dos fotografías a una altura promedio de 170 cm: una de la vegetación horizontal con un ángulo de 0° y otra de la vegetación vertical con un ángulo de 45° en dirección a cada uno de los puntos cardinales, ambos con respecto al suelo. Esto dio un total de 40 fotografías por punto, 20 de la vegetación horizontal y 20 del dosel (Figura 2). Este proceso tardó entre 20 y 30 minutos entre la toma de las fotografías en cada punto y la anotación de la información de cada fotografía en una libreta física. A partir de estas imágenes, se calcularon dos índices, promediando las 20 imágenes en cada ángulo para obtener un valor por sitio. Con las fotografías de la vegetación horizontal, se calculó el índice MIG, que mide la heterogeneidad espacial de una imagen. Este índice varía entre 0 y 1, donde 0 corresponde a una imagen completamente homogénea y 1 representa una imagen con variaciones aleatorias (Proulx & Parrott, 2008). En este contexto, el MIG refleja la complejidad estructural horizontal, ya que cuantifica la diversidad y disposición espacial de los elementos en el plano horizontal. Por otro lado, a partir de las fotografías de la vegetación vertical, se obtuvo el índice GAP, que mide la proporción de píxeles de cielo en relación con el total de píxeles de la imagen (Macfarlane, 2011). Este índice está directamente relacionado con la complejidad estructural vertical, ya que cuantifica la apertura y disposición de los elementos en el dosel vegetal, como la densidad de ramas y hojas en la vertical. El cálculo de ambos índices se realizó por medio del lenguaje de programación R (v4.3.0; R Core Team, 2021) mediante los paquetes *raster* (v3.6.20; Hijmans, 2023), *rdgal* (v1.6.6; Bivand et al., 2023), *LAI* (v0.0.0.9005; Martin, 2015b), *EXIFr* (v0.0.0.9004; Martin, 2015a) e *imagemetrics* (v1.0; Massicotte, 2014).

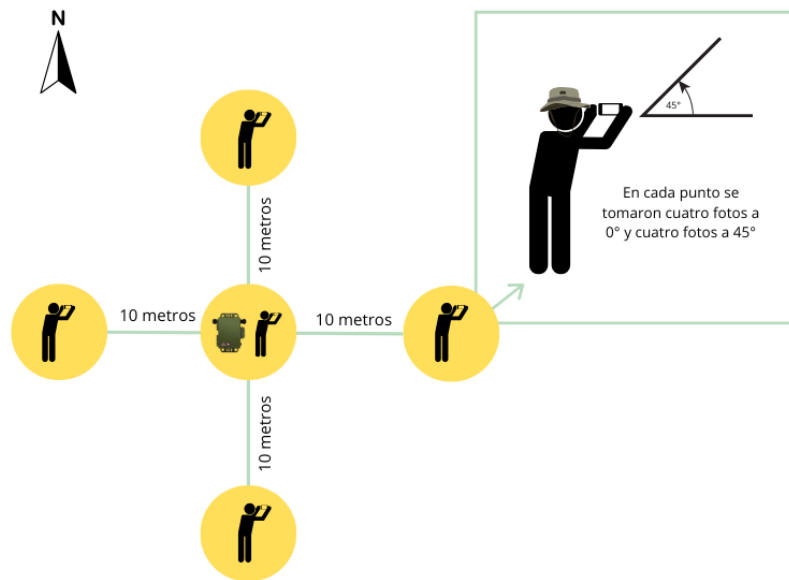


Figura 2. Diagrama de la toma de fotografías en cada sitio donde se encontraban las grabadoras.

3.3. Modelo de distribución potencial

Se desarrolló un modelo de distribución potencial para el pájaro campana en todo CBA utilizando MaxEnt, un modelo de entropía máxima que emplea variables ambientales y datos de presencia para estimar la idoneidad potencial del hábitat. Este enfoque es ampliamente reconocido por su robustez predictiva y estabilidad, como se ha señalado en estudios previos (Zhang et al., 2019). El modelo incluyó características Lineales, Cuadráticas y de tipo Hinge, además de utilizar pruebas Jackknife para evaluar la importancia relativa de las variables ambientales (Pearson et al., 2006). Se configuró con un multiplicador de regularización de 1, realizó 10 réplicas promediadas, usó un máximo de 5000 puntos de referencia y activó la opción de semilla aleatoria para reproducibilidad, así como la opción para generar predicciones de referencia. El resto de las configuraciones se mantuvo en sus valores predeterminados, incluyendo la opción de remover registros de presencia duplicados.

Se utilizaron las variables climáticas temperatura promedio, máxima y mínima; precipitación, velocidad del viento, altitud, radiación solar, y presión de vapor de agua disponibles en WorldClim (Fick & Hijmans, 2017); una capa de huella humana como variable ambiental para representar la presión antrópica acumulada sobre el paisaje. Este índice combina ocho indicadores de impacto humano directo, incluyendo infraestructura,

uso del suelo, densidad poblacional y accesibilidad (Sanderson et al., 2002). Y, por último, una capa de rango influencia de especies de lauráceas, principal fuente de alimento del pájaro campana (Hamilton et al., 2018); en la zona del CBA, creada a partir de datos obtenidos de Global Biodiversity Information Facility (GBIF). Esta última capa fue creada mediante un ráster indicando la distancia a cada registro de lauráceas hasta un máximo de 1 km. Todas las capas utilizadas tuvieron una resolución de 30 segundos, así como el modelo final.

Los registros de presencia se obtuvieron de GBIF y se sometieron a un proceso de depuración para eliminar observaciones dudosas, como registros con las mismas coordenadas, o registros con coordenadas sobre el Golfo Dulce. Se recopiló todos los registros disponibles en el área del CBA, con un total de 2488 registros, tanto de Costa Rica como de Panamá, debido a su proximidad; para la creación del modelo, los cuales abarcan desde el año 2000 al año 2022, el cual se aplicó a toda la región, generando un mapa de la distribución potencial utilizando la plataforma de código abierto QGIS 3.28.3. Finalmente, con base en este modelo, se identificaron las áreas prioritarias para la conservación de esta especie dentro del CBA.

Se evaluó el rendimiento del modelo Maxent mediante el AUC (Área bajo la curva ROC), que varía de 0 a 1. Un valor de 0.5 indica un rendimiento aleatorio; de 0.7–0.9 se considera razonable-moderado; y > 0.9 indica un excelente poder de discriminación (Phillips & Dudík, 2008). En presencia de datos sólo de ocurrencia y fondo, AUC refleja la probabilidad de que un punto de presencia tenga una puntuación mayor que uno de fondo.

3.4. Índices de paisaje

Para caracterizar los sitios donde se encontraban las grabadoras, se calcularon índices de paisaje. Primero, se creó un área de buffer con un radio de 500 metros alrededor de cada grabadora utilizando QGIS 3.28.3. Luego, empleando una capa de cobertura forestal del Sistema Nacional de Información Territorial del año 2021, se calcularon las métricas de número de parches, área del parche, conectividad, y borde total. Estos cálculos se realizaron con el paquete *landscapemetrics* (v2.1.2; Hesselbarth et al., 2019) del lenguaje de programación R.

3.5. Análisis de datos

Se calcularon los valores promedio, máximos, mínimos y la desviación estándar de los índices de complejidad estructural en los sectores norte y sur del CBA. Además, se realizaron pruebas de Wilcoxon para determinar si existen diferencias significativas entre los índices de complejidad estructural en ambos sectores, y una prueba t de Student para evaluar las diferencias en los valores de probabilidad de ocurrencia del modelo de distribución. También se generaron histogramas de frecuencia para analizar la distribución de estos valores en cada sector. Para investigar la relación entre los índices de complejidad estructural horizontal y vertical y los valores de probabilidad de presencia del modelo de distribución potencial, se aplicó una correlación de Pearson. Todos los análisis se realizaron utilizando el lenguaje de programación R (v4.3.0; R Core Team, 2021) con un nivel de significancia del 95 %.

3.6. Apoyo al proyecto

Por último, se brindó apoyo en las giras para la colocación y mantenimiento de las grabadoras que se colocaron en los sitios de muestreo ya seleccionados durante todo el tiempo que duró la pasantía. Esto conlleva el aprendizaje de técnicas de muestreo remoto de la biodiversidad por medio del monitoreo acústico pasivo, permitiendo registrar y almacenar una gran cantidad de datos (Abrahams & Geary, 2020), y aumentando la temporalidad en la que se pueden recolectar datos, ya que estas se pueden programar para grabar periódicamente (Shaw et al., 2021).

4. Resultados obtenidos de la pasantía

4.1. Caracterización de la vegetación

Los valores más altos de ambos índices de complejidad estructural fueron registrados en el sector sur del CBA. En el Cuadro 1 se muestran los valores de los índices de complejidad estructural horizontal y vertical para el CBA, diferenciados por el sector norte y el sector sur. Además, las Figuras 3 y 4 ilustran la distribución de frecuencias de estos valores en ambos sectores.

Cuadro 1. Valores promedio, máximo y mínimo para los índices MIG y GAP en los sitios donde se encontraban instaladas las grabadoras en ambos sectores del Corredor Biológico Amistosa.

Sector	MIG			GAP		
	Promedio ± Desviación estándar	Máximo	Mínimo	Promedio ± Desviación estándar	Máximo	Mínimo
Norte	0,45 ± 0,10	0,55	0,26	0.11 ± 0,05	0,33	0,06
Sur	0,49 ± 0,09	0,55	0,42	0.13 ± 0.06	0,25	0,06

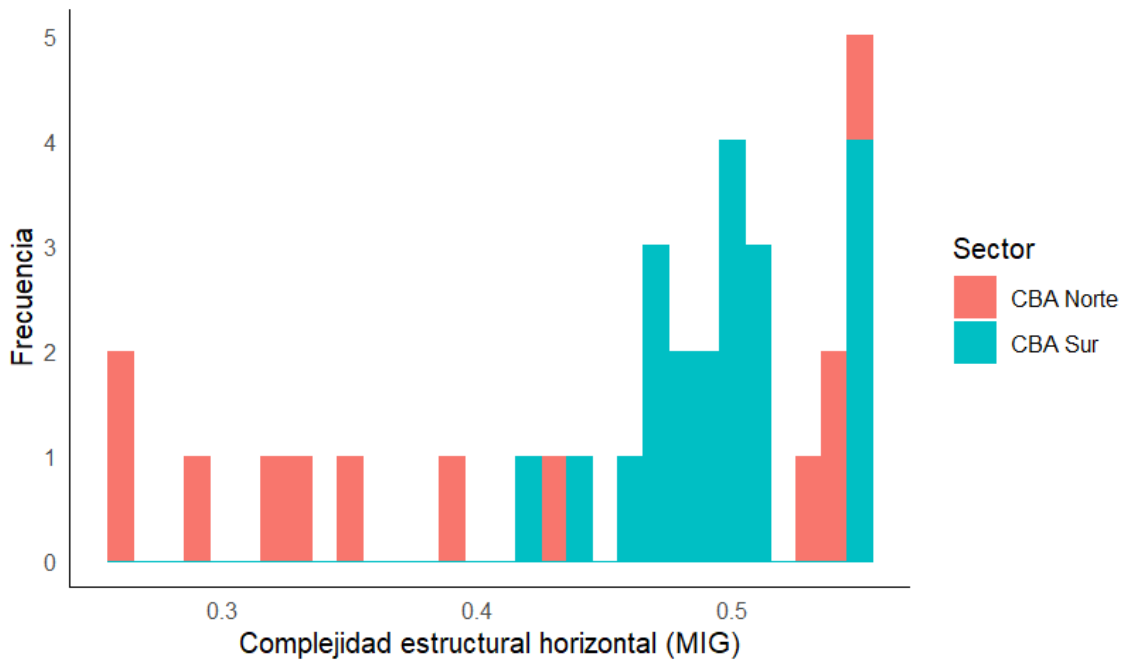


Figura 3. Histograma de frecuencias para el índice MIG en los sitios donde se encontraban instaladas las grabadoras en ambos sectores del Corredor Biológico Amistosa.

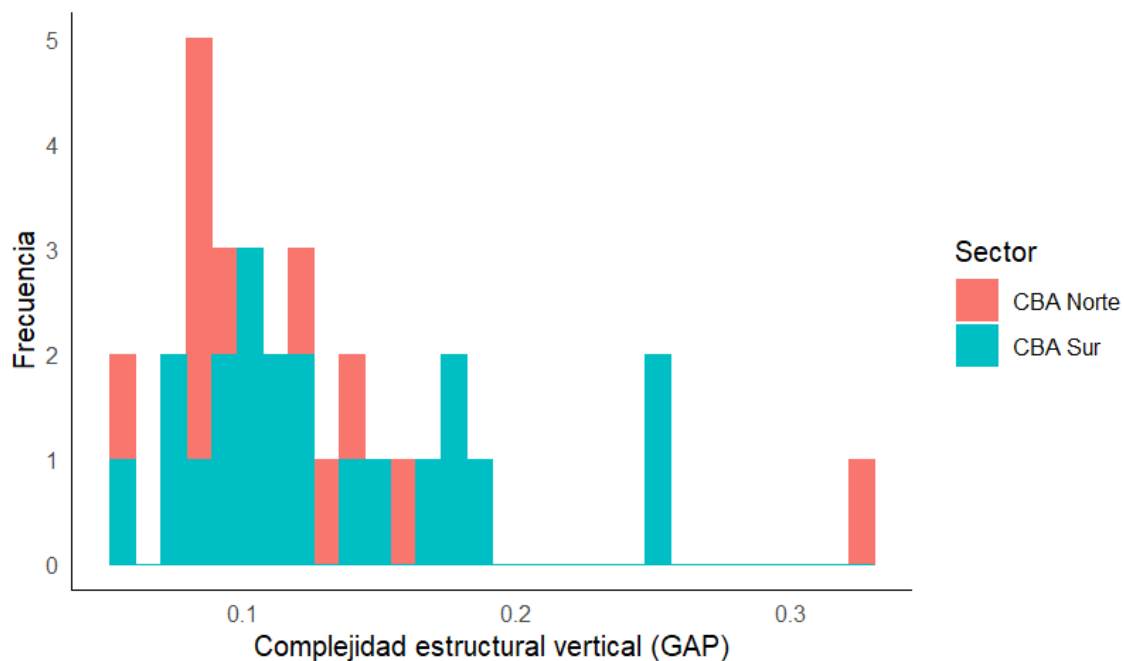


Figura 4. Histograma de frecuencias para el índice GAP en los sitios donde se encontraban instaladas las grabadoras en ambos sectores del Corredor Biológico Amistosa.

4.2. Modelo de distribución potencial

Se identificaron tres regiones clave, tanto dentro como fuera del CBA, donde es probable encontrar al pájaro campana (Figura 5): en el norte, en partes del Parque Internacional La Amistad y la Zona Protectora Las Tablas; en el centro del CBA, entre los poblados de San Vito y Agua Buena; y en el sur, en el Parque Nacional Piedras Blancas y el Refugio Nacional de Fauna Silvestre Golfito. El modelo de distribución potencial mostró un buen rendimiento, con un valor de AUC de 0,873 y una desviación estándar de 0.032.

En cuanto a las variables ambientales que influyen en la presencia de esta especie, las más significativas en el modelo son el rango de influencias de lauráceas, el viento y la huella humana (Cuadro 2). Finalmente, la prueba Jackknife de importancia de las variables revela que el rango de influencias de lauráceas es la variable que genera mayor ganancia cuando se utiliza de forma aislada, mientras que la omisión del viento provoca la mayor reducción de la ganancia, proporcionando la mayor información no presente en otras variables (Figura 6).

Costa Rica, modelo de distribución potencial de *Procnias tricarunculatus* en la zona del Corredor Biológico Amistosa

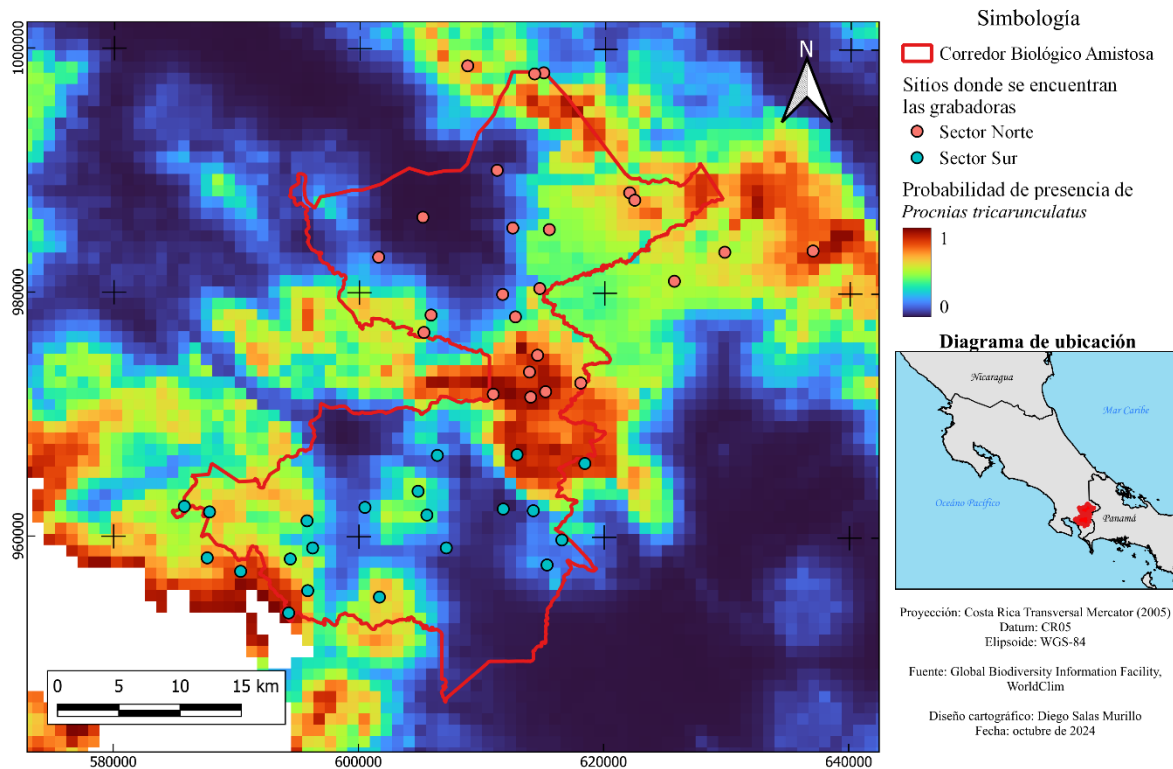


Figura 5. Modelo de distribución potencial para *P. tricarunculatus* en la zona del Corredor Biológico Amistosa, Puntarenas, Costa Rica.

Cuadro 2. Porcentaje de contribución de las variables ambientales al modelo de distribución potencial para *P. tricarunculatus*.

Variable ambiental	Porcentaje de contribución (%)
Lauráceas	43,3
Viento	16,1
Huella humana	14,7
Radiación solar	14,4
Temperatura máxima	6
Precipitación	1,6
Presión de vapor de agua	1,6
Elevación	1,5
Temperatura promedio	0,5

Variable ambiental	Porcentaje de contribución (%)
Temperatura mínima	0,1

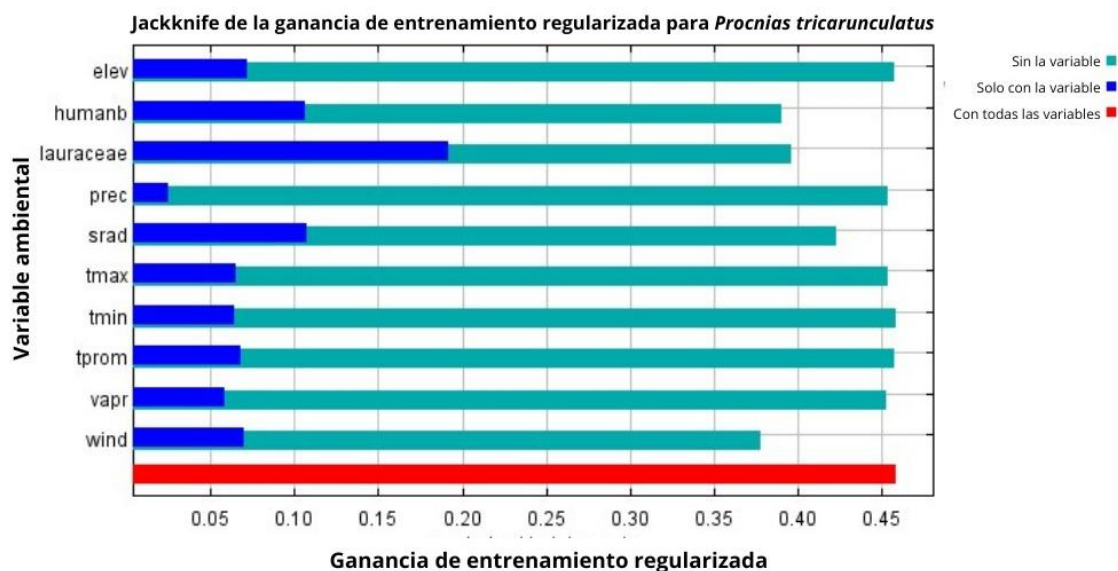


Figura 6. Prueba de Jackknife sobre la importancia de las variables ambientales en el modelo de distribución potencial de *P. tricarunculatus*. La simbología de las variables es la siguiente: elevación (elev), huella humana (humanb), rango de influencia de lauráceas (lauraceae), precipitación (prec), radiación solar (srad), temperatura máxima (tmax), temperatura mínima (tmin), temperatura promedio (tprom), presión de vapor de agua (vapr) y viento (wind). El color azul representa la ganancia del modelo solamente utilizando esa variable, el color turquesa representa la ganancia del modelo con todas las variables ambientales y excluyendo esa variable, y el color rojo representa el modelo con todas las variables ambientales.

Se realizaron pruebas de Wilcoxon para evaluar si existían diferencias significativas en los índices de complejidad estructural entre los sectores norte y sur del CBA. Los resultados mostraron que la complejidad horizontal no difiere entre ambos sectores ($W=230,5$, $p>0,05$) (Figura 7). Asimismo, no se encontraron diferencias significativas en la complejidad vertical entre los dos sectores ($W=258$, $p>0,05$) (Figura 8). De manera similar, los valores del modelo de distribución potencial no presentaron diferencias significativas entre los sectores norte y sur ($t=-0,42$, $gl=41,88$, $p>0,05$) (Figura 9).

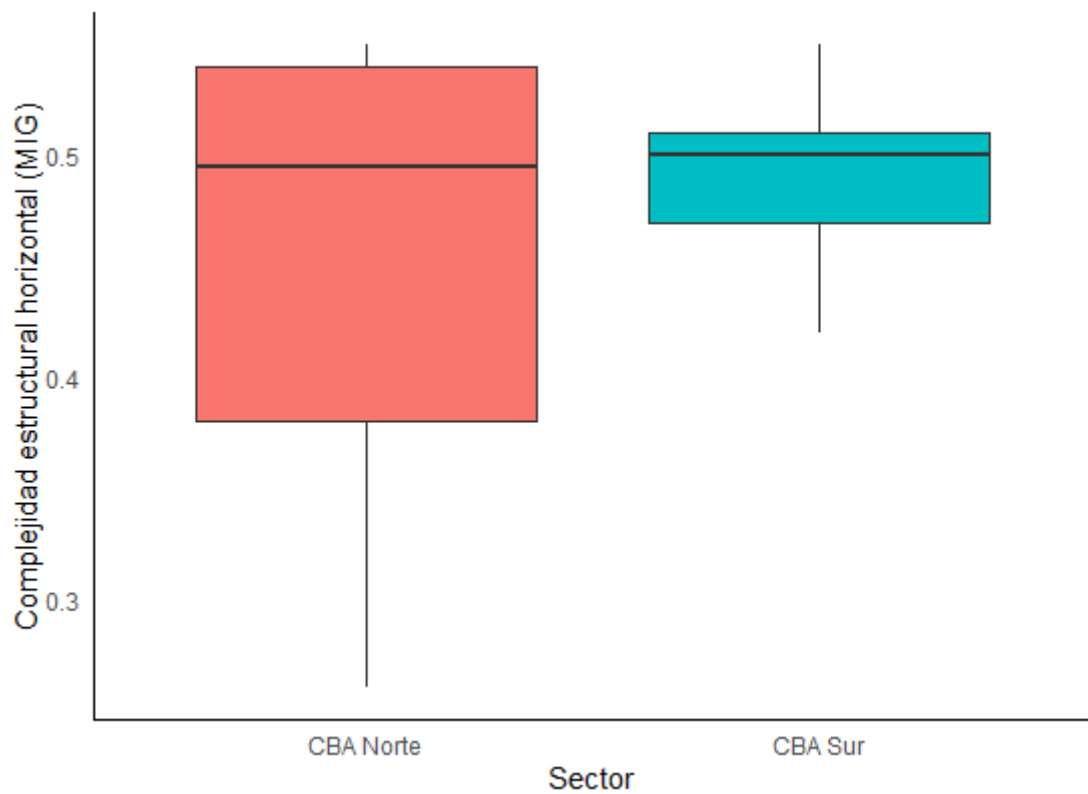


Figura 7. Valores del índice de MIG en los sitios donde se ubican los equipos de grabación en ambos sectores del Corredor Biológico Amistosa.

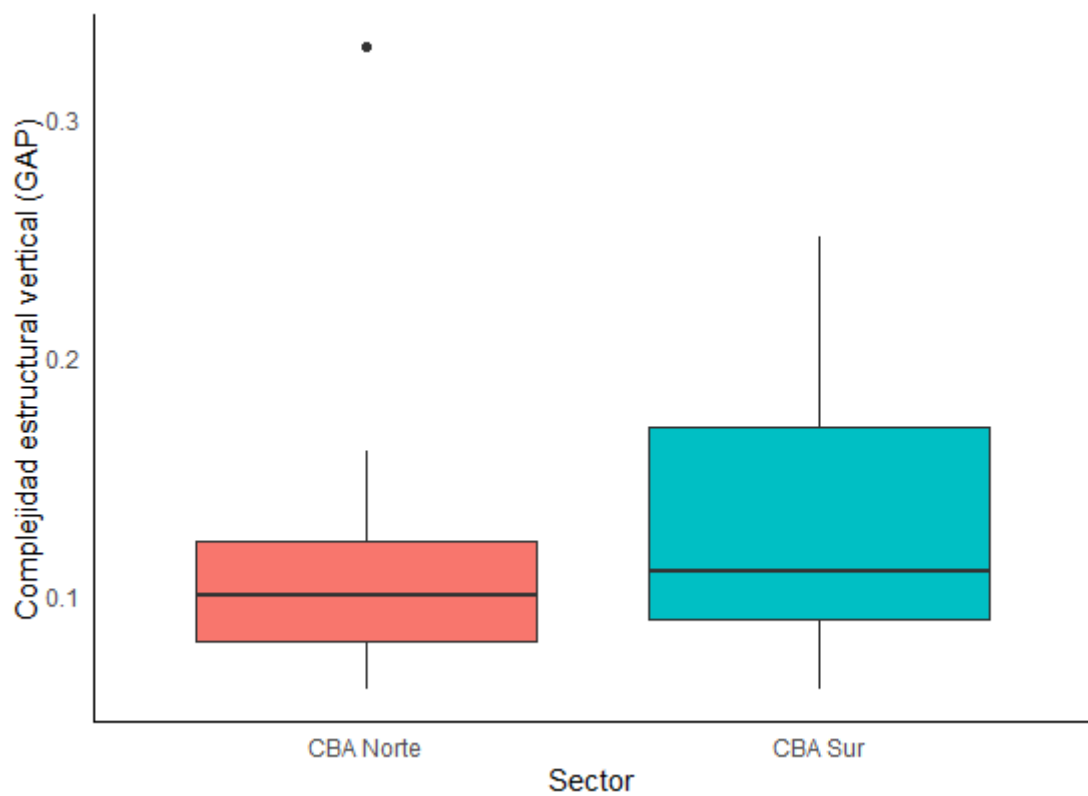


Figura 8. Valores del índice GAP en los sitios donde se ubican los equipos de grabación en ambos sectores del Corredor Biológico Amistosa.

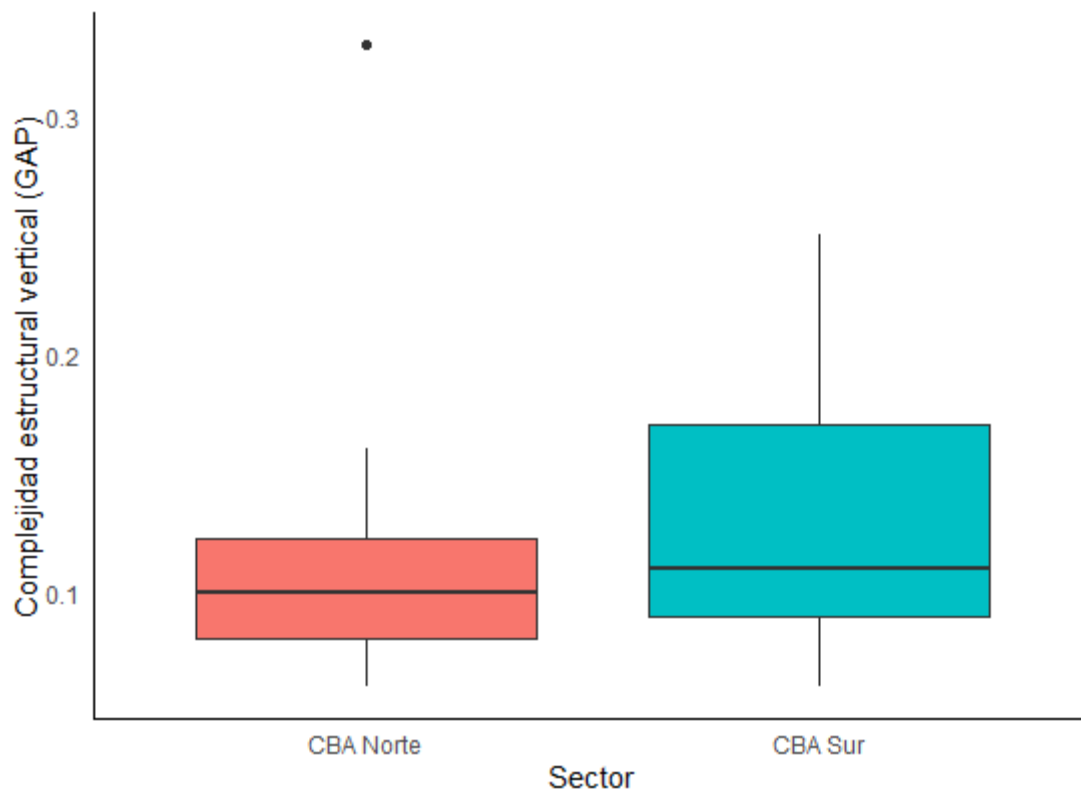


Figura 9. Valores del modelo de distribución potencial (MaxEnt) en los sitios donde se ubican los equipos de grabación en ambos sectores del Corredor Biológico Amistosa.

No se encontró una correlación significativa entre el índice MIG y la probabilidad de presencia según el modelo MaxEnt ($r=-0,03$, $gl=43$, $p>0,05$) (Figura 10), lo que sugiere que la complejidad horizontal del hábitat no influye en la distribución de la especie en el CBA. De igual forma, el índice GAP tampoco mostró una relación significativa con la probabilidad de presencia ($r=-0,07$, $gl=43$, $p>0,05$) (Figura 11). Estos resultados indican que ninguna de las dos variables estructurales, ni la horizontal ni la vertical, parecen ser determinantes en la presencia de la especie según este modelo.

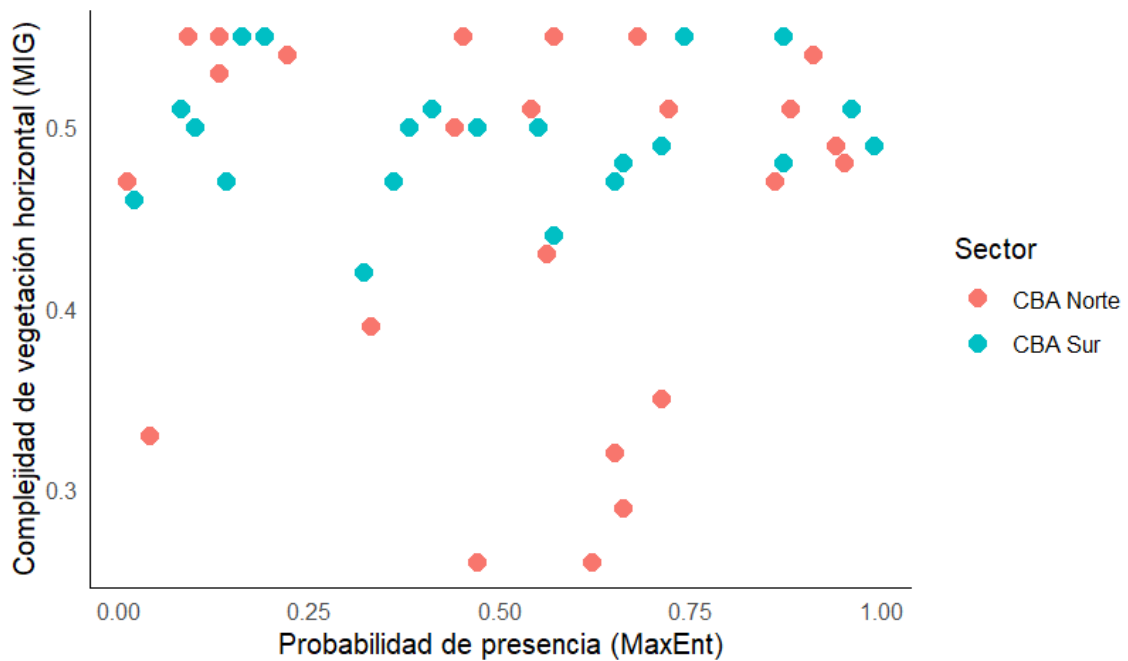


Figura 10. Relación entre la probabilidad de presencia del modelo de distribución potencial y el índice MIG para cada sitio en el que se encontraban un equipo de grabación.

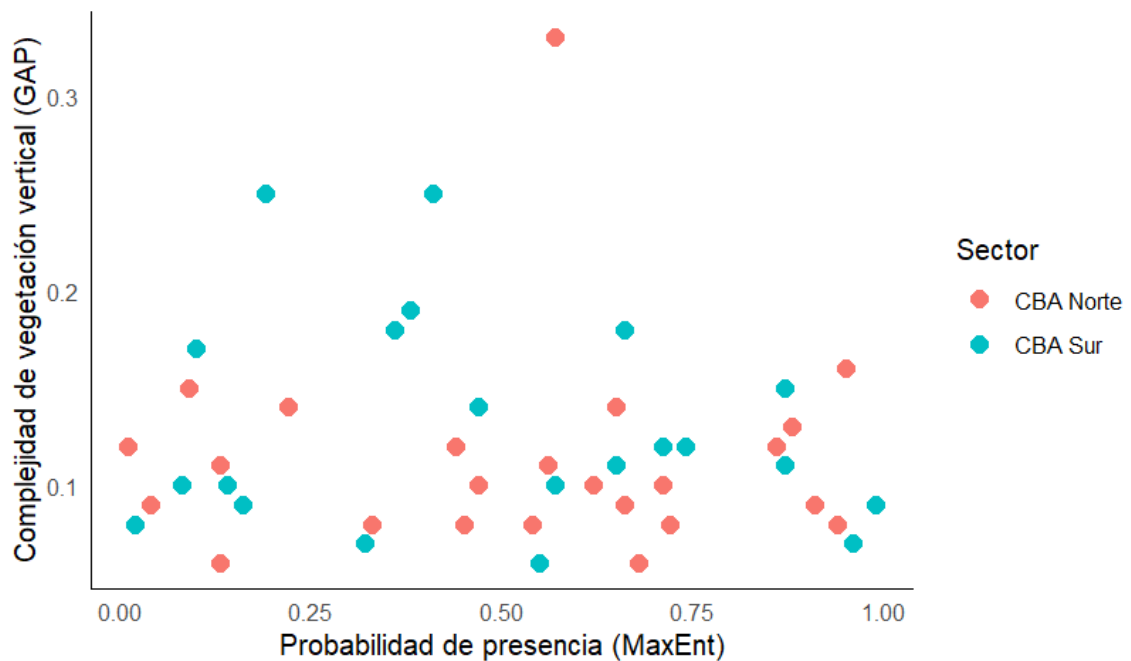


Figura 11. Relación entre la probabilidad de presencia del modelo de distribución potencial y el índice GAP para cada sitio en el que se encontraban un equipo de grabación.

4.3. Índices de paisaje

En la Figura 12 se observa los tipos de cobertura forestal presentes en el área del CBA. El Cuadro 3 presenta los valores de los índices de paisaje para cada uno de los sitios donde se colocaron las grabadoras. Los sitios de Altamira y Los Jilgueros registraron el

mayor número de parches, ambos con 70; mientras que Las Cruces fue el sitio con menos parches, con un total de 7. En cuanto al área de los parches, Las Cruces destacó con la mayor extensión, mientras que Altamira presentó la menor. El Parque Nacional Piedras Blancas, en el sector El Tajo, fue el sitio con mayor conectividad, en contraste con Bonanza, que tuvo la menor conectividad. Nueve sitios (El Encuentro, La Unión de Río Bonito, Subasta, Barranquilla, San Bosco de Sabalito, Parque Nacional Piedras Blancas sector El Tajo, Fila Guinea, La Lucha y Loma Linda) compartieron el mismo valor para el índice de complejidad horizontal, con 0.55. Por otro lado, dos sitios (Pittier Principal y Pittier Cascada) mostraron el menor valor en este índice, con 0.26. En cuanto a la complejidad vertical, La Lucha fue el sitio con el valor más alto (0.33), mientras que tres sitios (Estación Fiona, Fila Méndez y San Bosco de Sabalito) presentaron el valor más bajo, con 0.06. Finalmente, según el modelo de distribución potencial, el sitio con mayor probabilidad de presencia del pájaro campana fue Golfito Torres, mientras que el sitio Bonanza presentó la menor probabilidad.

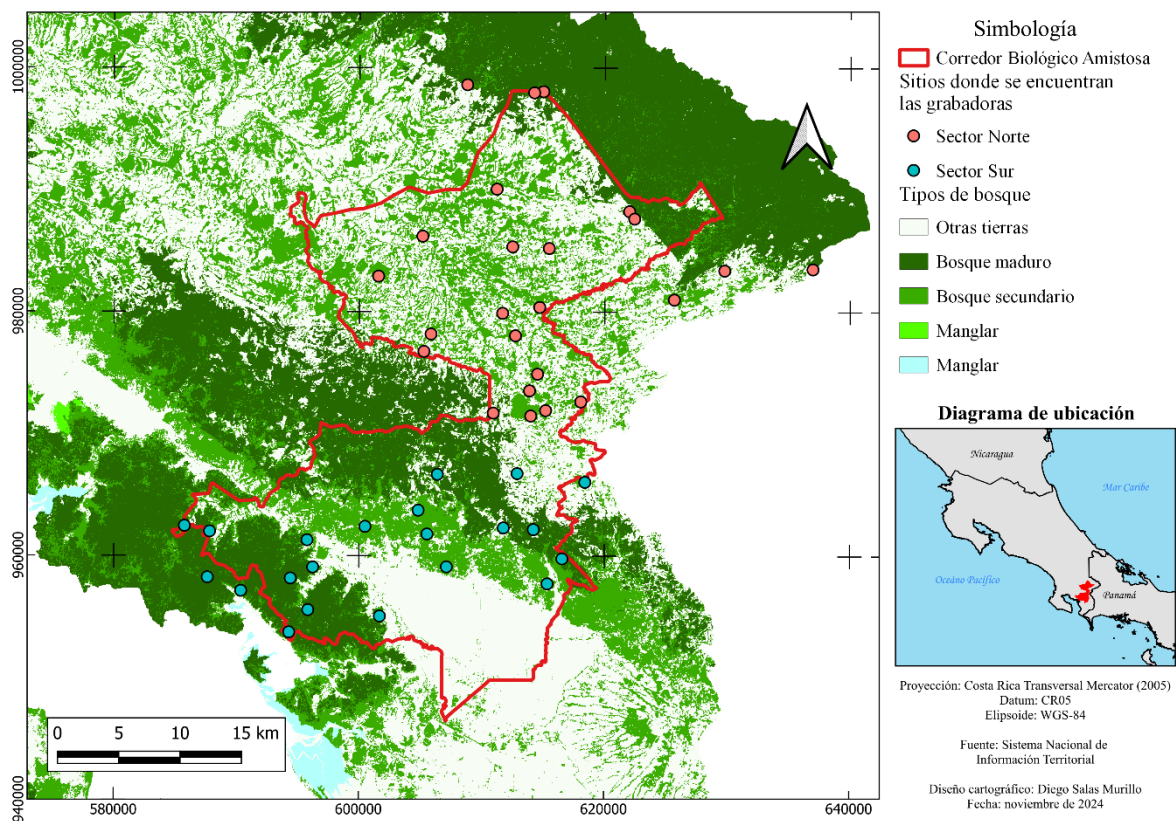


Figura 12. Tipos de cobertura forestal en el área del Corredor Biológico Amistosa para el 2021.

Cuadro 3. Índices de paisaje para los sitios donde se encontraban las grabadoras en el Corredor Biológico Amistosa.

Sector	Nombre del sitio	Número de parches	Área de parches (ha)	Conectividad	Borde total	MIG	GAP	Probabilidad de presencia (MaxEnt)
Corredor Biológico Amistosa Norte	Altamira	70	1,10	43,96	12440	0,29	0,09	0,66
	Bonanza	16	4,84	32,19	10320	0,47	0,12	0,01
	Bosque Río Negro	10	7,73	58,89	2260	0,51	0,08	0,54
	Brus Malí	46	1,68	41,30	11670	0,43	0,11	0,56
	Finca Cantaros	9	8,59	36,91	7120	0,54	0,09	0,91
	Cascata	12	6,44	47,03	5860	0,48	0,16	0,95
	El Encuentro	14	5,53	34,85	8790	0,55	0,15	0,09
	Fila Guinea	16	4,84	33,60	9310	0,55	0,08	0,45
	Fila Méndez	13	5,95	33,69	9430	0,53	0,06	0,13
	Hotel Cuenca de Oro	15	5,14	63,78	4850	0,54	0,14	0,22
	Kamakiri	12	6,43	38,04	6650	0,33	0,09	0,04
	La Lucha	37	2,09	56,19	10560	0,55	0,33	0,57
	La Palmira	56	1,38	41,51	13030	0,35	0,10	0,71
	La Pintada	8	9,66	42,37	5170	0,50	0,12	0,44
	La Troja	13	5,95	40,94	6130	0,39	0,08	0,33
	Las Cruces	7	11,04	59,43	3690	0,49	0,08	0,94
	Los Jilgueros	70	1,11	38,23	14080	0,47	0,12	0,86
	Micelio	13	5,94	37,80	8090	0,51	0,13	0,88
	Palo Hueco	34	1,35	48,80	6290	0,51	0,08	0,72
	Pittier Cascada	35	2,21	86,04	4430	0,26	0,10	0,47
	Pittier Principal	53	1,46	58,99	8440	0,26	0,10	0,62
	Roble Arriba	57	1,36	39,06	13610	0,32	0,14	0,65
	San Bosco de Sabalito	14	5,53	37,42	7510	0,55	0,06	0,68
	Subasta	10	7,73	70,19	3810	0,55	0,11	0,13
	Acueducto Caracol	27	2,86	48,88	9380	0,46	0,08	0,02
	Barranquilla	40	1,93	47,18	9780	0,55	0,09	0,16
	Cavernitas	15	5,15	43,48	6740	0,50	0,19	0,38
	Cherenga1	32	2,42	37,63	11760	0,47	0,11	0,65
	Cherenga2	34	2,27	37,52	12710	0,48	0,18	0,66
	Estación Fiona	25	3,09	87,70	3680	0,50	0,06	0,55
Fernando Los Ángeles	12	6,45	77,43	2900	0,47	0,10	0,14	

Sector	Nombre del sitio	Número de parches	Área de parches (ha)	Conectividad	Borde total	MIG	GAP	Probabilidad de presencia (MaxEnt)
	Fila de Cal Abajo	58	1,33	40,69	13800	0,42	0,07	0,32
	Fila Manigordo	16	4,83	73,91	4250	0,51	0,10	0,08
	Golfito	32	2,41	41,33	12480	0,48	0,11	0,87
	Guardaparques							
	Golfito Torres	49	1,58	63,86	12150	0,49	0,09	0,99
	La Gamba	37	2,09	39,72	12210	0,44	0,10	0,57
	La Unión de Río Bonito	14	5,53	63,66	4340	0,55	0,25	0,19
	Loma Linda	10	7,72	38,68	6090	0,55	0,15	0,87
	Maritza Monge	22	3,51	46,94	9220	0,51	0,25	0,41
	Omar							
	Enfermero	36	2,15	47,49	8720	0,47	0,18	0,36
	PNPB El Tajo	16	4,82	89,21	1930	0,55	0,12	0,74
	Randall Blanco	41	1,88	60,83	9810	0,49	0,12	0,71
	Reserva							
	Forestal Llano Bonito	17	4,54	70,95	5790	0,50	0,14	0,47
	Santo Domingo	27	2,86	63,71	6710	0,51	0,07	0,96
	Tío Ale	60	1,29	34,91	14900	0,50	0,17	0,10

4.4. Apoyo al proyecto

Entre mayo de 2023 y mayo de 2024, se brindó apoyo en 5 giras de instalación y mantenimiento de grabadoras en el CBA. Estas giras tuvieron una duración de 4 a 5 días, incluyendo el tiempo de traslado al CBA, a San Vito cuando se trabajaba en el sector Norte, o Río Claro cuando se trabajaba en el sector sur; y en ellas se trabajaba de 6:00 a.m. a 2:00 o 3:00 p.m. en los días de actividad. Las tareas incluyeron la navegación hacia los sitios donde se encontraban las grabadoras, su localización en campo, revisión de estado, cambio de espumas de los micrófonos o los propios micrófonos en caso de deterioro ambiental, y reemplazo de baterías y tarjetas de memoria. Por último, durante 3 de estas giras, se realizó la toma de fotografías para el cálculo de los índices de complejidad estructural.

5. Discusión de resultados

Los análisis de los índices de complejidad estructural horizontal y vertical no mostraron relación significativa con la probabilidad de presencia del pájaro campana (*Procnias tricarunculatus*), lo que sugiere que la estructura del dosel y el sotobosque no es un factor determinante en su distribución dentro del Corredor Biológico Amistosa (CBA). Esta ausencia de relación es coherente con la ecología de la especie, que realiza desplazamientos altitudinales drásticos a lo largo de su vida. Se han documentado casos de individuos marcados en Monteverde que fueron localizados posteriormente en Nicaragua (Powell & Bjork, 2004), así como registros de presencia en áreas urbanas alejadas de su hábitat típico, como el caso de un macho joven que colisionó con un edificio en San Pedro de Montes de Oca. Estos eventos reflejan una alta capacidad de movimiento y cierta plasticidad ecológica, por lo que es posible que su distribución responda más a factores como la disponibilidad de recursos alimenticios (Sam et al., 2019), la competencia (Freeman et al., 2022) o la presión de depredación (Menezes & Marini, 2017), que a la complejidad estructural del hábitat. Cabe destacar que el modelo solo consideró parcialmente los recursos alimenticios, específicamente en relación con las lauráceas, pero no incorporó variables directas asociadas a la depredación o la competencia. Es importante considerar las limitaciones de estos resultados, como la representatividad de los sitios de grabación, que podría afectar la posibilidad de generalizar los hallazgos a todo el CBA. Además, las fotografías empleadas para generar los índices de complejidad estructural no siempre fueron tomadas a la misma hora del día, lo que podría afectar la estandarización de los índices y generar variaciones en las mediciones.

El valor de AUC obtenido (0.873) indica que el modelo de distribución para el pájaro campana presenta un buen rendimiento, lo que sugiere una capacidad sólida para predecir las áreas de distribución potencial de la especie en función de las variables ambientales seleccionadas (Jiménez-Valverde, 2011). Este valor refleja una alta discriminación entre las áreas de presencia y ausencia del pájaro campana, lo que refuerza la confiabilidad del modelo como herramienta para la toma de decisiones en conservación (Coxen et al., 2017). Un modelo robusto permite orientar acciones concretas como la priorización de sitios para el monitoreo y la protección de hábitats clave dentro del corredor. En este caso, la identificación de tres zonas de distribución potencial en el norte, en partes del Parque

Internacional La Amistad y la Zona Protectora Las Tablas; en el centro del CBA, entre los poblados de San Vito y Agua Buena; y en el sur, en el Parque Nacional Piedras Blancas y el Refugio Nacional de Fauna Silvestre Golfito, destaca la importancia de fortalecer la conectividad ecológica y gestionar adecuadamente los paisajes intervenidos que rodean estas áreas.

El rango de influencias de lauráceas es un factor clave para la especie, con una contribución de 43.3 % en el modelo. Las lauráceas, una familia de árboles de importancia ecológica en los ecosistemas tropicales, son reconocidos por ofrecer recursos como frutos y perchas para el pájaro campana, siendo los frutos de esta familia una de sus principales fuentes de alimento (Hamilton et al., 2018). La prueba Jackknife respalda esta importancia, mostrando que el modelo tiene la mayor ganancia cuando esta variable se emplea de forma aislada, sugiriendo que las lauráceas aportan información única sobre el hábitat adecuado para la especie. Estos resultados coinciden con el estudio realizado por Morales-Ortiz (2015), donde el rango de influencia de lauráceas fue la variable más importante para construir el modelo de distribución potencial.

El viento y la huella humana también demostraron ser variables influyentes en la distribución del pájaro campana. La importancia del viento, cuya omisión generó la mayor reducción de ganancia en la prueba Jackknife, podría estar asociada a una preferencia de la especie por microhábitats específicos o patrones de vegetación modelados por este factor, particularmente en las zonas montañosas donde habita. Esta relación podría además estar vinculada a la necesidad de áreas con condiciones ventosas que faciliten sus migraciones altitudinales (Pocewicz et al., 2013). La huella humana, definida como la alteración del hábitat por actividades antrópicas como urbanización o agricultura, aparece como un factor influyente en la distribución del pájaro campana según el modelo analizado. Sin embargo, el estudio carece de datos que permitan determinar si esta influencia es positiva o negativa para la especie. Desde una perspectiva técnica, y con base en reportes previos que señalan la sensibilidad del pájaro campana a la fragmentación y pérdida de hábitat (Ocampo-Peñuela et al., 2022), se esperaría un efecto negativo. No obstante, existen registros de la especie en zonas urbanas y periurbanas, similar a otras aves como la harpía (Pascoal et al., 2014), lo que indica que la relación puede ser más compleja. Por tanto, se requiere mayor evidencia para precisar la dirección y magnitud del impacto de la huella humana sobre esta especie.

Los índices de paisaje muestran variaciones en la estructura del hábitat entre los sitios evaluados en el CBA, las cuales parecen estar relacionadas con la distribución del pájaro campana, reflejada en las probabilidades de presencia estimadas. Sin embargo, es importante destacar que no se realizaron análisis estadísticos para evaluar la significancia de estas variaciones, por lo que las interpretaciones deben considerarse descriptivas y no concluyentes. Los sitios de Altamira y Los Jilgueros registraron el mayor número de parches, lo que sugiere un alto grado de fragmentación (Taveria et al., 2022). Por otro lado, Las Cruces mostró un menor número de parches, pero con un área total mayor, lo que indica que el hábitat en esta zona presenta áreas más continuas. Este aspecto es relevante para la biodiversidad (Uroy et al., 2021), ya que áreas más extensas suelen proporcionar recursos y refugio de manera más efectiva (Salviano et al., 2021). La conectividad varió considerablemente entre los sitios. El Parque Nacional Piedras Blancas, en el sector El Tajo, mostró el valor más alto de conectividad, lo que probablemente favorece el movimiento y la dispersión de especies (Kumar et al., 2022). En contraste, Bonanza presentó la menor conectividad, lo que sugiere un hábitat más aislado. Esta condición podría limitar las interacciones entre parches y reducir potencialmente la presencia de ciertas especies, incluyendo el pájaro campana, cuya probabilidad de presencia fue la más baja entre todos los sitios. Cabe mencionar que el análisis de correlación entre los índices de paisaje y la probabilidad de presencia del pájaro campana no mostró resultados significativos, lo que indica que las relaciones observadas deben interpretarse con cautela y no como evidencia concluyente de causalidad.

La complejidad estructural del hábitat no parece influir significativamente en la distribución del pájaro campana en el CBA, la disponibilidad de recursos específicos, como las lauráceas, sí desempeña un papel relevante al proporcionar recursos alimenticios clave para esta especie. Además, los índices de paisaje revelaron una variación en la fragmentación y conectividad entre el área circundante a cada sitio, factores que pueden influir en el movimiento y en la disponibilidad de hábitats adecuados. Estas observaciones subrayan la importancia de considerar tanto la composición del hábitat como la conectividad del paisaje en las estrategias de conservación, asegurando la presencia de recursos críticos y espacios conectados para el mantenimiento de esta y otras especies en el CBA.

6. Relevancia de la pasantía en su perfil profesional y conocimientos adquiridos de la experiencia

Esta pasantía en el ICOMVIS, desarrollada en el CBA, ha sido fundamental para ampliar mis competencias en la implementación de técnicas avanzadas de monitoreo acústico y manejo de datos de biodiversidad. La experiencia adquirida durante las giras de instalación y mantenimiento de grabadoras no solo mejoró mis habilidades en la localización de dispositivos y mantenimiento de equipos en condiciones de campo, sino que también me permitió entender a fondo los desafíos logísticos y técnicos que conlleva este tipo de investigación. La revisión de equipos, reemplazo de componentes deteriorados y manipulación de datos son habilidades que ahora forman parte de mi perfil profesional, integrando así aspectos técnicos y de organización en ambientes complejos.

El aprendizaje en campo fue acompañado de conocimientos técnicos en análisis de datos y modelación de hábitat, habilidades que pude desarrollar gracias a mi participación en el análisis y evaluación de la estructura del hábitat en sitios de grabación acústica para detectar el pájaro campana, otras especies y paisajes sonoros. Esta combinación de trabajo práctico y análisis me preparó mejor para enfrentar desafíos similares en futuras investigaciones y proyectos de conservación.

7. Conclusiones y recomendaciones

Este estudio proporciona una visión valiosa sobre la estructura del hábitat en el CBA y su relación con la distribución del pájaro campana. Aunque la complejidad estructural del hábitat no mostró una correlación significativa con la presencia de la especie, los hallazgos resaltan la importancia de un enfoque multifactorial en los esfuerzos de conservación, especialmente en áreas donde la disponibilidad de recursos específicos, como las lauráceas, influye en la distribución de la fauna. La combinación de herramientas como la detección acústica automatizada y modelos de distribución potencial avanzados ofrecen un camino prometedor para el monitoreo y conservación de la biodiversidad en regiones tropicales.

Futuros estudios deberían incluir datos adicionales sobre la disponibilidad de recursos alimenticios y la dinámica de la vegetación a lo largo del tiempo para mejorar la

comprensión de los factores que afectan la distribución del pájaro campana. Además, ampliar el período de monitoreo para capturar variaciones estacionales y realizar análisis detallados que integren datos microclimáticos y de conectividad del hábitat podría aportar una perspectiva más completa. Esto permitiría mejorar la precisión y eficiencia del monitoreo en el CBA, contribuyendo a una mejor comprensión de la dinámica ecológica en la región.

8. Referencias bibliográficas

- Abrahams, C., & Geary, M. (2020). Combining bioacoustics and occupancy modelling for improved monitoring of rare breeding bird populations. *Ecological Indicators*, 112, 106131. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106131>
- BirdLife International. (2021). *Procnias tricarunculatus*. *The IUCN Red List of Threatened Species* 2021: e.T22700946A174535716. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2021-3.RLTS.T22700946A174535716.en>.
- Bivand, R., Keitt, T., Rowlingson, B. (2023). rgdal: Bindings for the 'Geospatial' Data Abstraction Library. (R package version 1.6-6). <https://CRAN.R-project.org/package=rgdal>.
- Coxen, C. L., Frey, J. K., Carleton, S. A., & Collins, D. P. (2017). Species distribution models for a migratory bird based on citizen science and satellite tracking data. *Global Ecology and Conservation*, 11, 298-311. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2017.08.001>
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Freeman, B. G., Strimas-Mackey, M., & Miller, E. T. (2022). Interspecific competition limits bird species' ranges in tropical mountains. *Science*, 377(6604), 416-420.

<https://doi.org/10.1126/science.ab17242>

- Garnett, S. T., Burgess, N. D., Fa, J. E., Fernández-Llamazares, Á., Molnár, Z., Robinson, C. J., Watson, J. E. M., Zander, K. K., Austin, B., Brondizio, E. S., Collier, N. F., Duncan, T., Ellis, E., Geyle, H., Jackson, M. V., Jonas, H., Malmer, P., McGowan, B., Sivongxay, A., & Leiper, I. (2018). A spatial overview of the global importance of Indigenous lands for conservation. *Nature Sustainability*, *1*(7), 369-374. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0100-6>
- Hamilton, D., Singleton, R., & Joslin, J. D. (2018). Resource tracking and its conservation implications for an obligate frugivore (*Procnias tricarunculatus*, the three-wattled bellbird). *Biotropica*, *50*(1), 146–156. <https://doi.org/10.1111/btp.12502>
- Hesselbarth, M.H.K., Sciaini, M., With, K.A., Wiegand, K., Nowosad, J. (2019). landscapemetrics: an open-source R tool to calculate landscape metrics. *Ecography*, *42*.1648-1657.
- Hijmans R (2023). raster: Geographic Data Analysis and Modeling (R package version 3.6.20). <https://CRAN.R-project.org/package=raster>.
- Jiménez-Valverde, A. (2011). Insights into the area under the receiver operating characteristic curve (AUC) as a discrimination measure in species distribution modelling. *Global Ecology and Biogeography*, *21*(4), 498-507. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00683.x>
- Kovalenko, K. E., Thomaz, S. M., & Warfe, D. M. (2011). Habitat complexity: approaches and future directions. *Hydrobiologia*, *685*(1), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0974-z>
- Kumar, S. U., Turnbull, J., Davies, O. H., Hodgetts, T., & Cushman, S. A. (2022). Moving beyond landscape resistance: considerations for the future of connectivity modelling

- and conservation science. *Landscape Ecology*, 37(10), 2465-2480.
<https://doi.org/10.1007/s10980-022-01504-x>
- Macfarlane, C. (2011). Classification method of mixed pixels does not affect canopy metrics from digital images of forest overstorey. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(7), 833–840. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.01.019>
- Martin CA (2015a). EXIFr: Natively read EXIF tags from R. <https://github.com/cmartin/EXIFr>. DOI:10.5281/zenodo.34691.
- Martin CA (2015b). LAI: Calculate indirect Leaf Area Index (LAI) from images. <https://github.com/cmartin/LAI>. DOI:10.5281/zenodo.34690.
- Massicotte P (2014). imagometrics: Tools to calculate various image metrics. (R package version 1.0).
- Mendes, P., Velazco, S. J. E., Andrade, A. F. A. D., & De Marco, P. (2020). Dealing with overprediction in species distribution models: How adding distance constraints can improve model accuracy. *Ecological Modelling*, 431, 109180. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109180>
- Menezes, J. C. T., & Marini, M. Â. (2017). Predators of bird nests in the Neotropics: a review. *Journal of Field Ornithology*, 88(2), 99-114. <https://doi.org/10.1111/jofo.12203>
- Morales-Ortiz, J. (2015). *Inclusión de relaciones interespecíficas usando Maxent*. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6678>
- Ocampo-Peñuela, N., Suárez-Castro, A. F., Díaz-Timoté, J. J., Gómez-Valencia, B., Olaya-Rodríguez, M. H., Sánchez-Clavijo, L. M., & Correa-Ayram, C. A. (2022). Increased exposure of Colombian birds to rapidly expanding human footprint. *Environmental Research Letters*, 17(11), 114050. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac98da>
- Olivero, J., Toxopeus, A. G., Skidmore, A. K., & Real, R. (2016). Testing the efficacy of

- downscaling in species distribution modelling: A comparison between MaxEnt and Favourability Function models. *Animal Biodiversity and Conservation*, 39(1), 99–114. <https://doi.org/10.32800/abc.2016.39.0099>
- Papeş, M., Peterson, A. T., & Powell, G. V. N. (2012). Vegetation dynamics and avian seasonal migration: Clues from remotely sensed vegetation indices and ecological niche modelling: Regional avian migration and vegetation seasonality. *Journal of Biogeography*, 39(4), 652–664. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2011.02632.x>
- Pascoal W, Souza LBE, Teixeira DR, Paula MJD, Crozariol MA, Dornas T. (2014) Registro do gavião-real, *Harpia harpyja* (Accipitriformes, Accipitridae) em área urbana no bioma Cerrado. *Atualidades Ornitológicas* 177, 13–15.
- Pasher, J., & King, D. J. (2011). Development of a forest structural complexity index based on multispectral airborne remote sensing and topographic data This article is one of a selection of papers from Extending Forest Inventory and Monitoring over Space and Time. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(1), 44–58. <https://doi.org/10.1139/X10-175>
- Pearson, R. G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M., & Peterson, A. T. (2006). Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 34(1), 102–117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3–4), 231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2), 161–175. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>

- Pocewicz, A., Estes-Zumpf, W. A., Andersen, M. D., Copeland, H. E., Keinath, D. A., & Griscom, H. R. (2013). Modeling the Distribution of Migratory Bird Stopovers to Inform Landscape-Scale Siting of Wind Development. *PLoS ONE*, 8(10), e75363. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0075363>
- Powell, G. V. N., & Bjork, R. D. (2004). Habitat Linkages and the Conservation of Tropical Biodiversity as Indicated by Seasonal Migrations of Three-Wattled Bellbirds. *Conservation Biology*, 18(2), 500–509. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00044.x>
- Proulx, R., & Parrott, L. (2008). Measures of structural complexity in digital images for monitoring the ecological signature of an old-growth forest ecosystem. *Ecological Indicators*, 8(3), 270–284. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.02.005>
- Proulx, R., & Parrott, L. (2009). Structural complexity in digital images as an ecological indicator for monitoring forest dynamics across scale, space and time. *Ecological Indicators*, 9(6), 1248–1256. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.03.015>
- Puebla, A. R., Cueto, Y. R., & Álvarez-Amargos, P. M. (2020). Propuesta de rutas de conectividad para la conservación de la biodiversidad en Sierra Maestra, Cuba. *Revista de Ciencias Ambientales*, 54(2), 51-67. <https://doi.org/10.15359/rca.54-2.3>
- R Core Team (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>.
- Salviano, I. R., Gardon, F. R., & Santos, R. F. D. (2021). Ecological corridors and landscape planning: a model to select priority areas for connectivity maintenance. *Landscape Ecology*, 36(11), 3311-3328. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01305-8>
- Sam, K., Koane, B., Bardos, D. C., Jeppy, S., & Novotny, V. (2019). Species richness of birds along a complete rain forest elevational gradient in the tropics: Habitat complexity and food resources matter. *Journal of Biogeography*, 46(2), 279-290.

<https://doi.org/10.1111/jbi.13482>

- Sanderson, E. W., Jaiteh, M., Levy, M. A., Redford, K. H., Wannebo, A. V., & Woolmer, G. (2002). The Human Footprint and the Last of the Wild. *BioScience*, 52(10), 891. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052)
- Shaw, T., Hedes, R., Sandstrom, A., Ruete, A., Hiron, M., Hedblom, M., Eggers, S., & Mikusiński, G. (2021). Hybrid bioacoustic and ecoacoustic analyses provide new links between bird assemblages and habitat quality in a winter boreal forest. *Environmental and Sustainability Indicators*, 11, 100141. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100141>
- SINAC (Sistema Nacional de Áreas de Conservación, CR). 2018. Corredor Biológico Amistosa: Plan de Gestión 2018-2027. (H. Acevedo, Ed.). La Gamba-Costa Rica. 42 p.
- Soberón, J. M. (2010). Niche and area of distribution modeling: A population ecology perspective. *Ecography*, 33(1), 159–167. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.06074.x>
- Stiles, F. G., & Skutch, A. F. (2007). *Guía de aves de Costa Rica* (4th ed). Instituto Nacional de Biodiversidad.
- Stiles, F. G., Skuth, A. F., Gardner, D., & Roselli, L. (1995). *Guía de aves de Costa Rica*. Instituto Nacional de Biodiversidad.
- Taveira, G., Reboulaz, R., Ramos, M., Lagos, X., Bergamino, L., & Inda, H. (2022). Evaluación de la fragmentación del paisaje en la cuenca de la laguna costera Garzón, Uruguay. *INNOTEC*, 23. <https://doi.org/10.26461/23.04>
- Tews, J., Brose, U., Grimm, V., Tielbörger, K., Wichmann, M. C., Schwager, M., & Jeltsch, F. (2003). Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: the

importance of keystone structures. *Journal of Biogeography*, 31(1), 79-92.
<https://doi.org/10.1046/j.0305-0270.2003.00994.x>

Uroy, L., Alignier, A., Mony, C., Foltête, J., & Ernoult, A. (2021). How to assess the temporal dynamics of landscape connectivity in ever-changing landscapes: a literature review. *Landscape Ecology*, 36(9), 2487-2504.
<https://doi.org/10.1007/s10980-021-01277-9>

Zhang, J., Jiang, F., Li, G., Qin, W., Li, S., Gao, H., Cai, Z., Lin, G., & Zhang, T. (2019). Maxent modeling for predicting the spatial distribution of three raptors in the Sanjiangyuan National Park, China. *Ecology and Evolution*, 9(11), 6643–6654.
<https://doi.org/10.1002/ece3.5243>