

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIA ANIMAL
EN MANEJO DE VIDA SILVESTRE



PAISAJE SONORO EN BOSQUES DE MONTAÑA
DE GUATEMALA

PABLO RAFAEL BOLAÑOS SITTLER

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIA ANIMAL



PAISAJE SONORO EN BOSQUES DE MONTAÑA
DE GUATEMALA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

PAISAJE SONORO EN BOSQUES DE MONTAÑA
DE GUATEMALA

TESIS

Presentada al Comité Evaluador de Tesis de la Escuela de Estudios de Postgrado
en cumplimiento con los requisitos establecidos por el Sistema de Estudios de
Postgrado y la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad de
San Carlos de Guatemala

POR

Licenciado en Biología Pablo Rafael Bolaños Sittler

Como requisito para optar al grado académico de

Maestro en Ciencias

DEDICATORIA

A MIS PADRES

Johanna, por su alegría constante, necesaria para lograr cualquier gran meta.
Rafael, por haber creído en mí.

A MIS HERMANAS

Mireille y Alejandra por ser un ejemplo para mí.

A MI ESPOSA

Margarita por creer en mis sueños, compartir el amor por la naturaleza y por su ayuda en la creación de los mapas.

A MIS HIJOS

Marcos y Juan Diego por su alegría, amor y paciencia.

A LA FAMILIA VIDES E IRVING

Por su apoyo para cumplir mis metas.

A MI ASESOR

Federico Villatoro, por compartir sus conocimientos.

A MIS PROFESORES

Dennis Guerra, David Morán y Federico Villatoro, por su paciencia e importante labor docente.

A LA ESCUELA DE POSTGRADO DE LA FMVZ

En especial a Ligia Ríos, por su valioso apoyo para la realización de este trabajo.

ÍNDICE

Resumen	1
Introducción	1
Métodos.....	3
Área de estudio:	3
Grabación de paisaje sonoro	6
Estimación de la estructura del hábitat	6
Descripción del paisaje sonoro	6
Métodos de Análisis	8
Resultados.....	9
Discusión	10
Agradecimientos.....	17
Referencias	17
Anexos.....	20

CUADROS

Cuadro 1: Descripción de las áreas de grabación de paisaje sonoro.....	5
Cuadro 2: Promedio de los valores obtenidos para los índices en cada área.....	9
Cuadro 3: Valores de R^2 para cada índice, obtenidos por medio del NMDS (estrés = 0.09533).....	9
Cuadro 4: Análisis de uso del suelo en los sitios de grabación de paisaje sonoro.	16

FIGURAS

Figura 1: Ubicación de los sitios de grabación de paisaje sonoro.	4
Figura 2: gráficas de caja para los índices de 06:00 a 8:00 h durante 4 días (n=48)	11
Figura 3: Espectrogramas de los paisajes sonoros de los sitios de grabación.	12
Figura 4: Gráfica de análisis de NMDS para los índices evaluados.	14

ANEXOS

Anexo 1: Fotografías de los sitios de grabación de paisaje sonoro.....	20
Anexo 2: Mapas de uso del suelo en un radio de 300 m alrededor de los sitios de grabación.....	23

PRESENTACIÓN

El presente trabajo de tesis titulado “paisaje sonoro en bosques de montaña de Guatemala”; está redactado en formato de artículo científico, tal como lo establece el Normativo de Tesis de Maestría en Ciencias de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia; y apto para ser remitido a una revista científica indexada.

PAISAJE SONORO EN BOSQUES DE MONTAÑA DE GUATEMALA

Pablo Rafael Bolaños Sittler¹, Federico Villatoro Paz²

¹Universidad del Valle de Guatemala, Departamento de Biología, 11 calle 15-79 zona 15, Vista Hermosa III. pbolanoss@gmail.com

²Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Ciudad Universitaria zona 12. fvillatoropaz@gmail.com

RESUMEN

Una de las tareas más importantes en biología de la conservación es la estimación de la biodiversidad. La mayoría de métodos para esto son costosos y requieren de meses o años para obtener resultados. El estudio de los animales por medio de los sonidos que emiten, es una metodología que se ha desarrollado en los últimos años. Esto ha permitido poder estudiar especies de una manera no invasiva y menos costosa que otros métodos, como el trampeo o el marcaje. Otro método con grandes avances es el estudio del “paisaje sonoro”, que consiste en evaluar todas las señales sonoras en conjunto. Diversas investigaciones indican que cada especie animal emite sonidos que ocupan un lugar único en el “espacio” sonoro, y evitan el traslape con otros sonidos animales. Por lo tanto se puede decir, que en un paisaje en donde existen más sonidos distintos, existe mayor biodiversidad que otro en donde haya menos. Además, dependiendo del tipo de sonidos que existan, se puede determinar qué tan perturbado podría estar un sitio. En este trabajo se describen cinco áreas, utilizando grabaciones de paisaje sonoro. Se hizo una descripción de los sitios por medio de seis índices acústicos y se determinó el uso del suelo en las áreas de grabación. Esta investigación es un paso importante para el desarrollo de metodologías menos costosas para el monitoreo de biodiversidad en Guatemala y constituye el primer estudio de paisaje sonoro en el país.

INTRODUCCIÓN

La estimación de la biodiversidad es un tema central en biología de la conservación, no solo para determinar la riqueza de especies (diversidad α) sino también para evaluar diferencias en la composición de especies entre comunidades, en diferentes áreas o a través del tiempo (diversidad β) (Magurran, 2004; Ludwig & Reynolds, 1988; Ralph & S. Droege, 1995; Sayre, 2000; Sutton, 1999). Algunos métodos para calcular la diversidad requieren de la creación de inventarios de especies, lo cual es costoso, necesita de la participación de taxónomos expertos (Sueur, Pavoine, Hamerlynck, & Duvail, 2008) y muchos requieren de técnicas invasivas como la colecta o manipulación de individuos. La estimación de la biodiversidad se complica en regiones muy grandes o muy diversas, tal es el caso de las regiones tropicales (Villanueva-Rivera, Pijanowski,

Doucette, & Pekin, 2011). Debido a que es muy difícil realizar un inventario de todas las especies de un ecosistema, muchos estudios se basan solamente en uno o unos cuantos taxa para inferir la diversidad de un área; debido a esto se han desarrollado varios índices de diversidad los cuales buscan la extrapolación de datos basados en inventarios limitados (Magurran, 2004); sin embargo éstos índices aún necesitan de un gran esfuerzo de muestreo para producir estimaciones certeras (Sueur, Pavoine, Hamerlynck, & Duvail, 2008; Ström, 2013). Otra alternativa es la realización de evaluaciones rápidas de biodiversidad, las cuales pueden llevarse a cabo por parataxónomos quienes solamente identifican morfoespecies, sin embargo éstos métodos también requieren de muestreo y trabajo de identificación muy costoso (Sayre, 2000).

Una alternativa más rápida y económica para determinar biodiversidad, es analizar el sonido que emiten muchas especies de animales como aves, mamíferos, anfibios, peces y artrópodos, ya sea al moverse o deliberadamente para comunicarse o para detectar su medio ambiente (ecolocación) (Ranft, 2004). Las emisiones acústicas pueden ser grabadas fácilmente por medio de equipo especializado y pueden ser analizadas posteriormente. Uno de los intentos para el análisis de la diversidad por medio de grabaciones de audio, ha sido el enfoque en un grupo taxonómico (por ejemplo aves o anfibios) y la posterior identificación por expertos, o por medio de software para reconocer especies (Acevedo & Villanueva-Rivera, 2006; Agranat, 2007). Sin embargo la identificación auditiva es lenta y requiere de mucha práctica; por otro lado la detección automática de especies aún tiene algunas limitantes, por ejemplo requiere de estudios preliminares exhaustivos para la creación de reconocedores (Ström, 2013) y dichos reconocedores pueden no funcionar efectivamente en toda el área de distribución, debido a que hay variación en los sonidos emitidos en distintas regiones geográficas. Además aún presenta problemas, especialmente en ambientes en donde hay muchos sonidos diferentes (Obrist, y otros, 2010; Townsey, Wimmer, Williamson, & Roe, 2013), tal es el caso de las regiones como los trópicos y subtrópicos.

Otro enfoque para analizar los sonidos es a nivel de “paisaje sonoro” (del inglés *soundscape*), definido como todas las señales acústicas en un paisaje (Schäfer, 1977). Según la Hipótesis del Nicho Acústico el espectro sonoro es un recurso limitado y las especies han evitado el traslape de los sonidos que emiten, con los sonidos de otras especies (Krause, 1987) o sea que entre mayor variedad de sonidos en un paisaje sonoro, se puede inferir que hay mayor cantidad de especies en el hábitat en donde fue grabado. Por medio de un análisis global a nivel de paisaje sonoro, se han creado algunos índices basados en la diversidad de sonidos presentes (Farina, 2014). Uno de estos índices, es el desarrollado por Sueuret *al.* (2008) el cual se basa en el índice de *Shannon*, al que llamaron Entropía Acústica (H); éste mide la heterogeneidad a través del espectro de frecuencia y la variación en la amplitud a través del tiempo. El índice H ha sido correlacionado exitosamente con simulaciones de diversidad (Sueur, Pavoine, Hamerlynck, & Duvail, 2008). También se han realizado algunas modificaciones a éste índice (Villanueva-Rivera, Pijanowski, Doucette, & Pekin, 2011; Depraetere, y otros, 2012) y además se han desarrollado algunos para

medir la diversidad β y diversidad filogenética (Depraetere, y otros, 2012; Gasc, y otros, 2013) e incluso algunos enfocados en un grupo de fauna, como las aves (Pieretti, Farina, & Morri, 2011).

Un análisis acústico de la comunidad animal puede ser utilizado para realizar una evaluación rápida de la diversidad animal local, lo cual ha sido sugerido con los resultados de algunos estudios (Depraetere, y otros, 2012; Pieretti, Farina, & Morri, 2011). Como es un método muy reciente, se ha recomendado que los índices sean probados en diferentes tipos de hábitat y comparados con evaluaciones de varios grupos de fauna (Sueur, Pavoine, Hamerlynck, & Duvail, 2008; Ström, 2013; Pieretti, Farina, & Morri, 2011). En Guatemala existe un gran potencial para el uso de índices acústicos, ya que son útiles en áreas con gran diversidad de animales o cuando los recursos para estudios por medio de los métodos usuales son limitados.

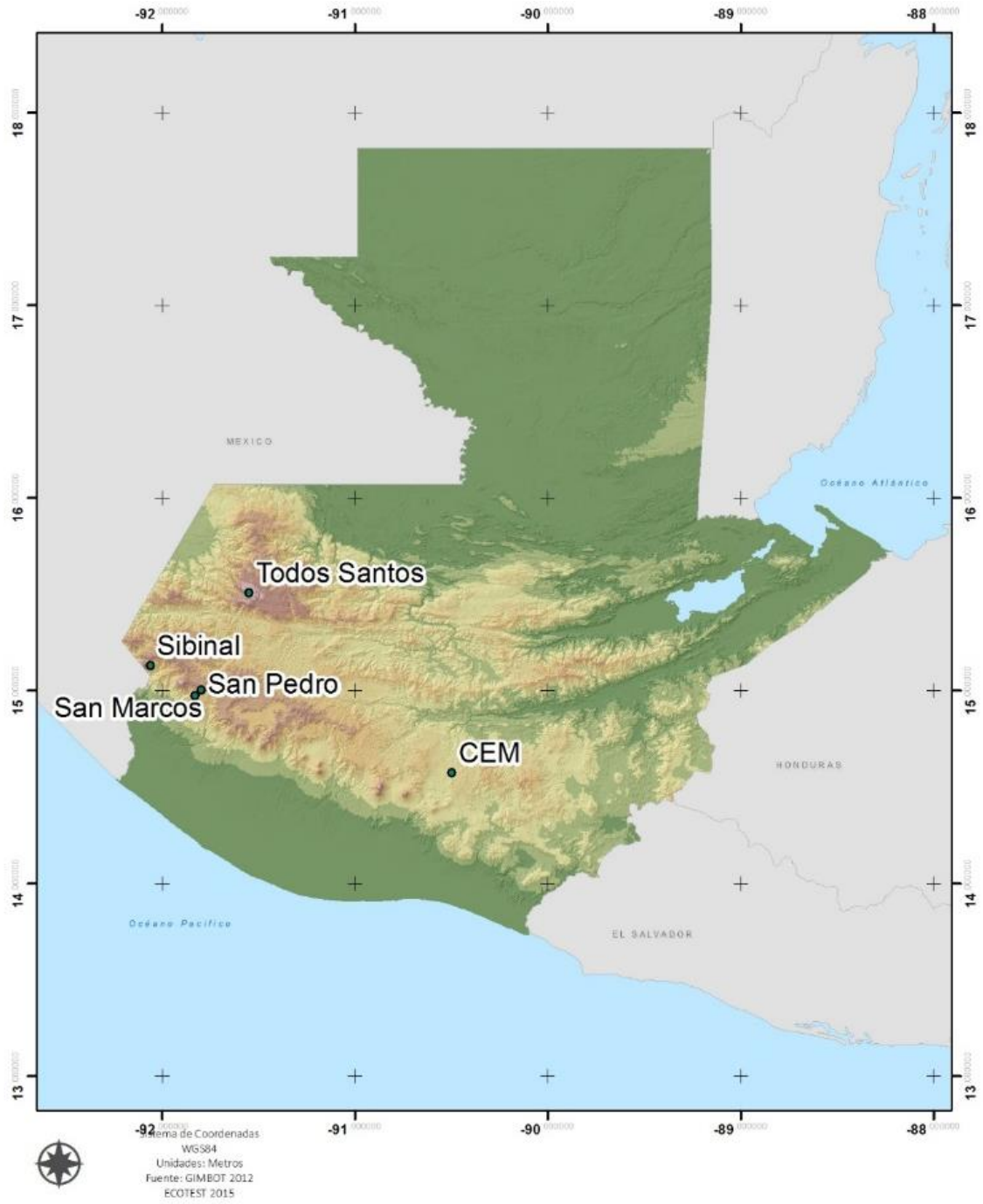
Como un primer paso, para la utilización de esta metodología en Guatemala, se realizaron grabaciones de paisaje sonoro en cuatro áreas protegidas en regiones de montaña, localizadas en el occidente del país y un área de la ciudad capital. Se realizó una descripción del paisaje sonoro por medio del cálculo de seis diferentes índices acústicos, a partir de grabaciones realizadas por medio de equipo autónomo programable. También se realizó un análisis de uso del suelo para determinar el estado del hábitat y degradación, método utilizado en otros trabajos como el de Pijanowski *et al.* (2011). Los índices reflejaron una mayor diversidad en las áreas menos perturbadas, tal como en otros estudios (Krause, 1987; Sueur, Pavoine, Hamerlynck, & Duvail, 2008; Depraetere, y otros, 2012). Este trabajo constituye una base para que se realicen más investigaciones sobre paisaje sonoro en Guatemala, método que posee un gran potencial para el estudio y monitoreo ambiental en el país.

MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO:

Las grabaciones de paisaje sonoro se realizaron en cinco áreas protegidas, tres se localizan en la cadena volcánica occidental, una en la Sierra de los Cuchumatanes y otra en el Cinturón Ecológico Metropolitano (CEM) (Figura 1). El área de los Cuchumatanes es muy diferente a las otras ya que su bosque es más disperso y el sitio del CEM es un área perturbada, también muy diferente a las otras cuatro zonas de estudio. El Cinturón Ecológico Metropolitano se ubica en la ciudad capital y las grabaciones se hicieron en el borde del barranco localizado entre la zona 14 y el municipio de Santa Catarina Pinula. En el Cuadro 1 se muestra la ubicación, zona de vida y tipo de bosque de cada área de grabación.

Figura 1: Ubicación de los sitios de grabación de paisaje sonoro.



CEM: Cinturón Ecológico Metropolitano.

Cuadro 1: Descripción de las áreas de grabación de paisaje sonoro.

Nombre	Coordenadas y altitud	Zona de Vida	Estado de conservación del área y especies vegetales características
Cinturón Ecológico Metropolitano	15.6920 -91.3019 1519 msnm	Bosque muy húmedo montano bajo subtropical	Muy perturbado <i>Quercusspp</i> <i>Bambusaspp</i> (introducido)
Canjulá, Sibinal	15.13388 -92.0624 2685 msnm	Transición entreBosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical y Bosque Muy Húmedo Montano Subtropical	Buen estado de conservación <i>Cupressus lusitánica</i> <i>Abiesguatemalensis</i> <i>Pinus ayacahuite</i> <i>Pinusrudis</i> <i>Quercusspp</i>
Astillero de San Marcos	14.97611 -91.8314 2753 msnm	Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical Con menor presencia de Bosque Muy Húmedo Montano Subtropical	Excelente estado de conservación <i>Cupressus lusitánica</i> <i>Oreopanaxalapensis</i> <i>Pinus ayacahuite</i>
Astillero de San Pedro	15.00619 -91.7986 3076 msnm	Bosque Muy Húmedo Montano Subtropical. Ecotono entre Bosques de Montaña y Selva de Montaña.	Buen estado de conservación <i>Cupressus lusitánica</i> <i>Abiesguatemalensis</i> <i>Alnuspp</i> <i>Pinusrudis</i>
Todos Santos Cuchumatán	15.51094 -91.5512 3685 msnm	Bosque Montano Alto Subtropical	Buen estado de conservación <i>Pinushartwegii</i> <i>Juniperusstandleyi</i>

PRM: Parque Regional Municipal. Fuente: (Bolaños, Grajeda, Secaira, & López, en prensa)(De la Cruz 1976). El estado de conservación se cuantificó por medio de un análisis de uso del suelo en 300 m alrededor de las grabadoras, en cada parque.

GRABACIÓN DE PAISAJE SONORO

Se utilizaron grabadoras automáticas modelo SM-III Wildlifeacoustics® instaladas en árboles a una altura de dos metros (Fotografía 1). Se tomó datos de un sitio de grabación en cada área, obteniendo grabaciones estéreo, durante cuatro días. Las grabadoras se programaron para grabar un minuto cada 10 minutos, método que ha sido utilizado en estudios similares (Ström, 2013). En total se obtuvieron 144 grabaciones en cada uno de los primeros tres días y al cuarto día se obtuvieron 140, lo que totalizó 572 grabaciones. El formato de grabación fue .wav, a una tasa de muestreo de 48 kHz en stereo (24 kHz para cada canal) y 16 bits de resolución. La grabadora se aseguró por medio de una cadena con candado. Las grabaciones se realizaron durante el mismo período (enero-febrero 2015) lo que permitió reducir al máximo las posibles diferencias causadas por los cambios en la tasa de vocalización a lo largo del año. Para el análisis posterior se utilizaron solamente las grabaciones entre las 6:00 y 8:00 h, por ser una hora de alta actividad vocal.

ESTIMACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL HÁBITAT

Para describir el hábitat se realizó una cuantificación del uso del suelo en los sitios por medio de sistemas de información geográfica (SIG) utilizando imágenes satelitales de 2012 (GIMBOT, 2014). Este proceso se hizo en un círculo con un radio de 300 m alrededor de la grabadora, método utilizado por Pijanowski et al. (2011). Los diferentes usos del suelo fueron clasificados como: bosque, guamil, espacios abiertos, pastizal y urbano, según la clasificación establecida en el mapa de referencia utilizado (GIMBOT, 2014).

DESCRIPCIÓN DEL PAISAJE SONORO

Para describir el paisaje sonoro se estimaron diversos índices, los cuales se calcularon por medio del programa *R* con los paquetes “*seewave*”(Sueur, Aubin, & Simonis, 2014) y “*soundecology*” (Villanueva-Rivera, Pijanowski, Doucette, & Pekin, 2011). Para poder estimar el índice para varios archivos de sonido, se utilizó el paquete *soundecology*(Villanueva-Rivera, Pijanowski, Doucette, & Pekin, 2011). A continuación se describe cada índice utilizado.

Índice de Entropía (*H*)

Se basa en la teoría de *Shannon*, que mide la información presente en un espectrograma, éste índice fue desarrollado por Sueur et al. (2008). Está compuesto por dos subíndices, el índice de entropía temporal y el índice de entropía espectral ($H = H_t \times H_f$). Se cuantifica la heterogeneidad de la energía a través del tiempo, en una sección de grabación y la heterogeneidad de la energía por frecuencias en la misma sección. El índice de entropía ha sido probado en varios tipos de ecosistemas, pero se recomienda realizar más estudios comparándolo con otros sistemas de medición de diversidad, según reportan algunos científicos (Farina, 2014). La explicación matemática del índice de entropía se puede consultar en el trabajo de Sueuret al.(2008).

Fotografía 1: Instalación de grabadora automática SM-III Wildlifeacoustics® en Todos Santos Cuchumatán.



Índice de Diversidad Acústica (ADI)

El índice de Diversidad Acústica (ADI) (Villanueva-Rivera, Pijanowski, Doucette, & Pekin, 2011) determina la proporción de valores de dB sobre un umbral de amplitud en cada banda de frecuencia. Ström(2013) llamó a éste índice, de Diversidad de Bandas (BD), el cálculo de los valores, también se basa en el índice de *Shannon*.

Índice de Complejidad Acústica (ACI)

El índice de Complejidad Acústica (ACI) (Pieretti, Farina, & Morri, 2011) produce una cuantificación directa y rápida de la estructura del paisaje sonoro. El ACI se basa en la hipótesis de que muchas biofonías¹, tal como las vocalizaciones de las aves, se caracterizan por una variación temporal intrínseca en su amplitud, en cambio muchas geofonías² y antropofonías³ presentan amplitudes constantes. El ACI calcula la diferencia absoluta entre dos valores adyacentes de amplitud espectral en una misma frecuencia. En otras palabras lo que mide éste índice es la complejidad del sonido, tomando en cuenta que los sonidos provocados por el hombre (autos, aviones, motosierras) son mucho más simples que los sonidos producidos por los animales. Para mayor detalle sobre los cálculos matemáticos, consultar el trabajo de Pieretti *et al.* (2011).

¹Biofonía: sonido en un paisaje sonoro, emitido seres vivos (Pijanowski, y otros, 2011)

²Geofonía: sonido emitido por fenómenos geológicos tal como el viento, la lluvia, etc.

³Antropofonía: sonido proveniente de actividades del ser humano, como automóviles, aviones, etc.

Índice de equidad (*evenness*)

Este mide la distribución del índice ACI, a través de cada clase de frecuencia. Se basa en el índice de equidad de *Gini*, ampliamente utilizados en ecología para calcular la biodiversidad de un sitio. Este índice mide qué tan equitativamente distribuidos se encuentran los sonidos biofónicos en una grabación. El índice de equidad argumenta que si todas las especies en una muestra presentan la misma abundancia, el índice usado para medir la equidad debería ser mínimo y debería aumentar a medida que las abundancias relativas se hagan menos equitativas. Para este caso el índice toma las especies como biofonía en diversas frecuencias, tomando en cuenta frecuencias, en lugar de especies. Para obtener una explicación detallada de los principios matemáticos de éste índice, consultar el trabajo de Villanueva-Rivera *et al.*(2011).

Índice Bioacústico

Se calcula como el área bajo de cada curva que incluye todas las bandas de frecuencia asociadas al “valor de dB mayor que al mínimo valor de dB para cada curva”. Por lo tanto los valores de área son una función del nivel de sonido y del número de bandas de frecuencia utilizadas por la avifauna. Para obtener una explicación detallada consultar el trabajo de Boelman, *et al.*(2007).

Índice de diferencias normalizadas en el paisaje sonoro (NDSI)

Fue desarrollado por Kasten *et al.*(2012) y consiste en realizar un cálculo del nivel de perturbación antropogénica en el paisaje sonoro, por medio de un análisis de la proporción de antropofonía con respecto a la biofonía. Los sonidos generados por el hombre como los motores generan frecuencias predominantemente bajas, en cambio los sonidos de animales predominan en frecuencias más altas, es por eso que es posible calcular estas proporciones y así determinar la perturbación en el sitio (Pijanowski, y otros, 2011). Para una explicación detallada y su base matemática, consultar el trabajo de Kasten *et al.* (2012).

MÉTODOS DE ANÁLISIS

Se promediaron los índices de los dos canales de cada grabación estéreo, se seleccionaron 48 grabaciones obtenidas entre las 6:00 y las 8:00 h, por cuatro días (n=48), con las cuales se realizó un escalamiento multidimensional no-métrico (NMDS), utilizando el índice de similitud de *BrayCurtis*. Esto permitió determinar el grado en que influye cada índice obtenido para representar a cada sitio. Se realizó una prueba de *ShapiroWilk* para determinar si existía normalidad en los datos, luego se realizó un test de *Kruskal Wallis* para determinar si había diferencia significativa entre los datos obtenidos para cada lugar con cada índice acústico. Los análisis fueron realizados por medio de los programas R (R Core Team, 2014) y Past.

RESULTADOS

La distribución de los datos no fue normal, según el test de *ShapiroWilk* ($H p=2.2e-16$, $ADI p=2.474e-16$, $ACI p=2.2e-16$, $Evennessp=2.352e-09$, $Bioacoustic p=6.812e-09$, $NDSI p<1.214e-09$).

El test de *KruskaWallis*, mostró diferencias significativas entre sitios ($H p=2.2e-16$, $ADI p=2.2e-16$, $ACI p=2.2e-16$, $Evenness2.2e-16$, $Bioacoustic p<6.891e-06$, $NDSI p<2.2e-16$, $n=48$).

En el Cuadro 2 se presenta el promedio de los valores obtenidos para cada área y en la Figura 2 se muestran las gráficas de caja generadas para los índices obtenidos.

El análisis de NMDS muestra que entre los índices calculados, el NDSI, el índice Bioacústico y el ADI son los que permiten diferenciar mejor los sitios por medio del paisaje sonoro. En el Cuadro 3 se muestran los valores de R^2 obtenidos para cada índice, dato que representa el grado de asociación, o representatividad de los índices para poder describir a los paisajes sonoros.

El análisis de uso del suelo para cada sitio de grabación se presenta en el Cuadro 4. El sitio mejor conservado es San Marcos, luego San Pedro y Sibinal. El sitio de grabación ubicado en Todos Santos está en excelente estado, pero su bosque es disperso de forma natural. El sitio más perturbado es el CEM, debido a que cuenta también con urbanización

Cuadro 2: Promedio de los valores obtenidos para los índices en cada área

Lugar	H	ADI	Evenness	Bioacoustic	ACI	NDSI
San Marcos	0.770195	1.934881	0.391218	3.311737	1805.896	0.523412
Sibinal	0.744892	1.786801	0.468799	2.725179	1805.741	0.408118
San Pedro	0.724229	1.459622	0.546145	2.434465	1812.161	0.457124
CEM	0.693095	1.729762	0.52705	2.918697	1809.272	-0.15944
Todos Santos	0.677047	0.773142	0.711965	0.585318	1794.785	0.565346

CEM: Cinturón Ecológico Metropolitano. Los tonos más oscuros indican mayor diversidad acústica y mayor calidad ambiental, el blanco representa la menor diversidad acústica y calidad ambiental.

Cuadro 3: Valores de R^2 para cada índice, obtenidos por medio del NMDS (estrés=0.09533).

Índice	Eje 1	Eje 2
H	0.05154	-0.51673
ADI	-0.40935	-0.59726
ACI	-0.32382	-0.34512
Evenness	0.21628	0.55520

Índice	Eje 1	Eje 2
Bioacoustic	-0.54197	-0.72241
NDSI	0.90732	-0.19796

Los valores más altos de R^2 (asociación) indican que los índices describen mejor a cada sitio.

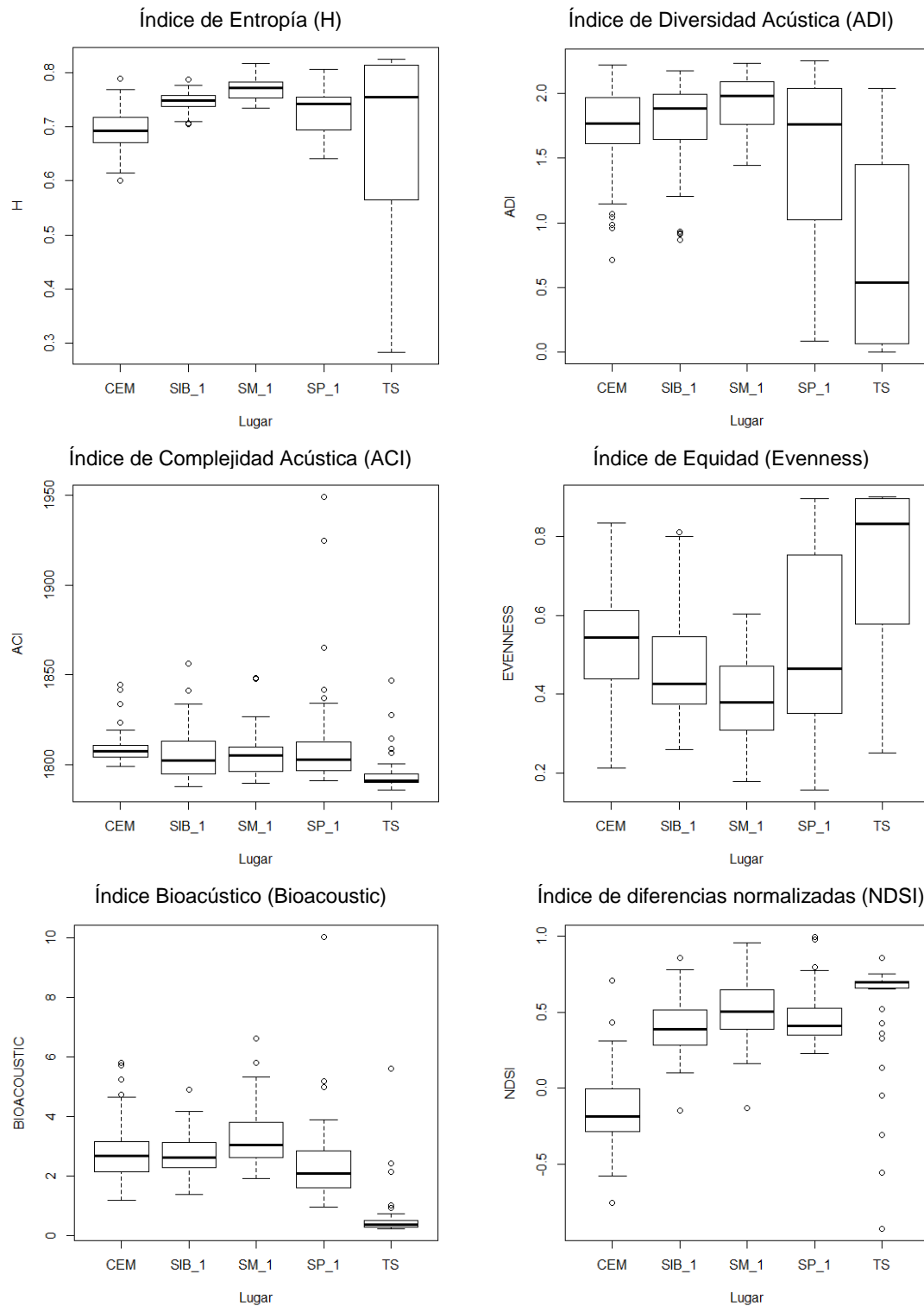
En la Figura 3 se muestran espectrogramas de paisaje sonoro representativos de cada sitio de grabación. Estas gráficas muestran en el eje vertical las frecuencias de los sonidos en kHz y en el eje horizontal se indica el tiempo en s. Los sonidos antropogénicos, como motores de automóviles o industria son graves y constantes en el tiempo, se observan en la parte inferior del espectrograma. La mayoría de las frecuencias de los sonidos de animales como aves, se ubican en un rango entre 1 y 8 kHz.

DISCUSIÓN

Los índices obtenidos muestran una similitud mayor entre San Marcos, Sibinal y San Pedro, que comparados con los sitios de Todos Santos y el CEM, tal como era lo esperado, tomando en cuenta las características ambientales y ecosistémicas de los sitios (ver Cuadro 1). La similitud puede deberse a que los primeros tres sitios tienen una variación de altitud entre sí menor (de 50 a 300 metros); que con los otros dos sitios, el CEM y Todos Santos (600 m abajo y 1000 m arriba de los tres primeros respectivamente). Sibinal, San Marcos y San Pedro poseen tipos de bosque y estados de conservación parecidos, según el análisis de uso del suelo realizado, el sitio de San Marcos tiene un 100% de bosque, San Pedro tiene un 98.11% de bosque y Sibinal tiene 97.76% (Cuadro 4, Anexo 2).

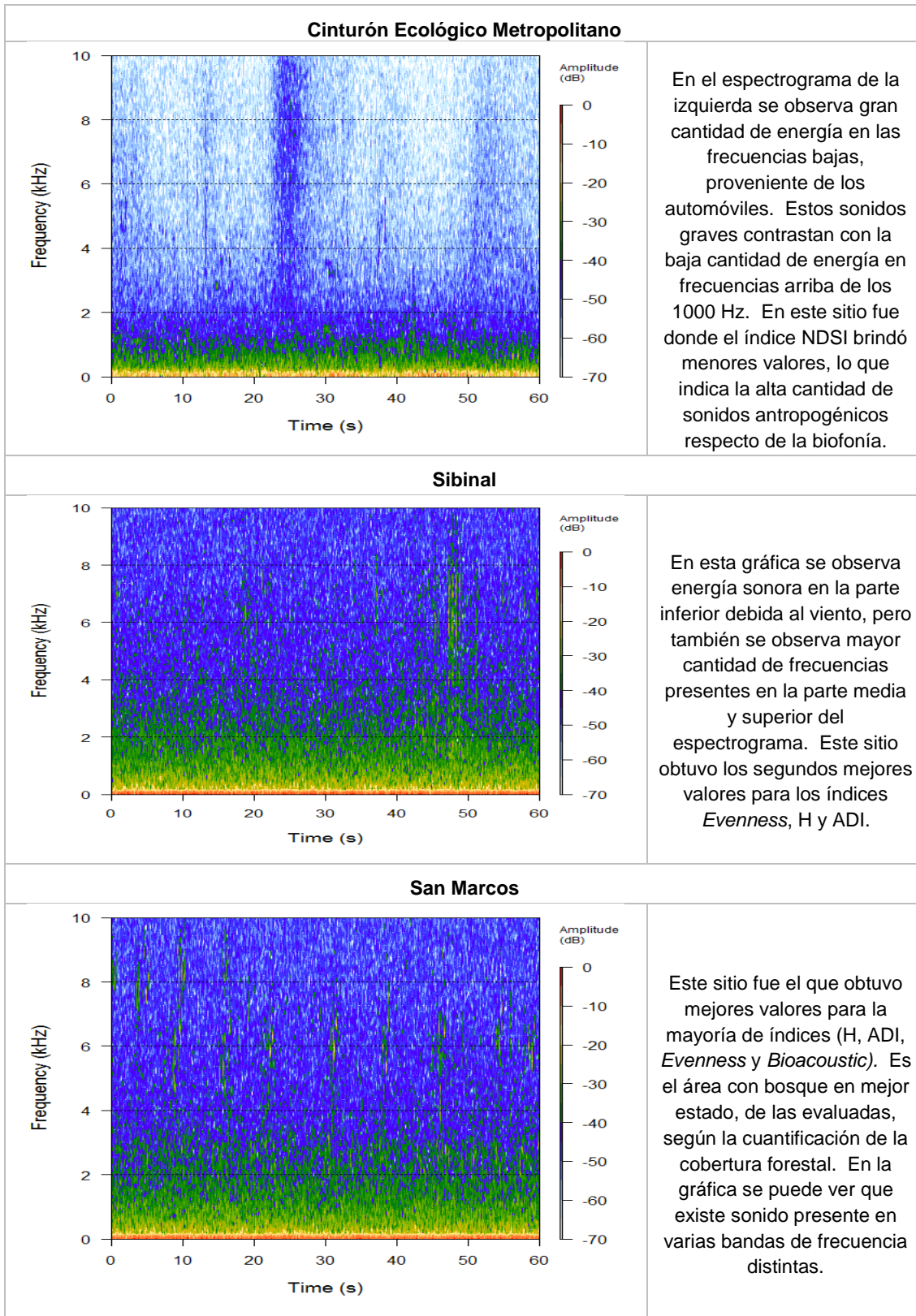
El índice que obtuvo un mayor valor de asociación (R^2), por medio del análisis de NMDS, fue el NDSI (Cuadro 3), éste índice refleja la proporción de sonidos de baja frecuencia, respecto a sonidos de frecuencias más altas (Kasten, Stuart, Gageb, Foxc, & Wooyeong, 2012). Los sonidos de baja frecuencia se asocian a antropofonía, causada principalmente por los sonidos de motores. Éste índice tuvo un resultado mucho menor en el CEM, lo cual es debido al sonido provocado por motores en la ciudad de Guatemala. El análisis de uso del suelo indica que el sitio del CEM solamente tiene 31.96% de cobertura forestal, mientras que 55.36% corresponde a uso urbano y 12.68% es guamil.

Figura 2: Gráficas de caja para los índices de 06:00 a 8:00 h durante 4 días (n=48)

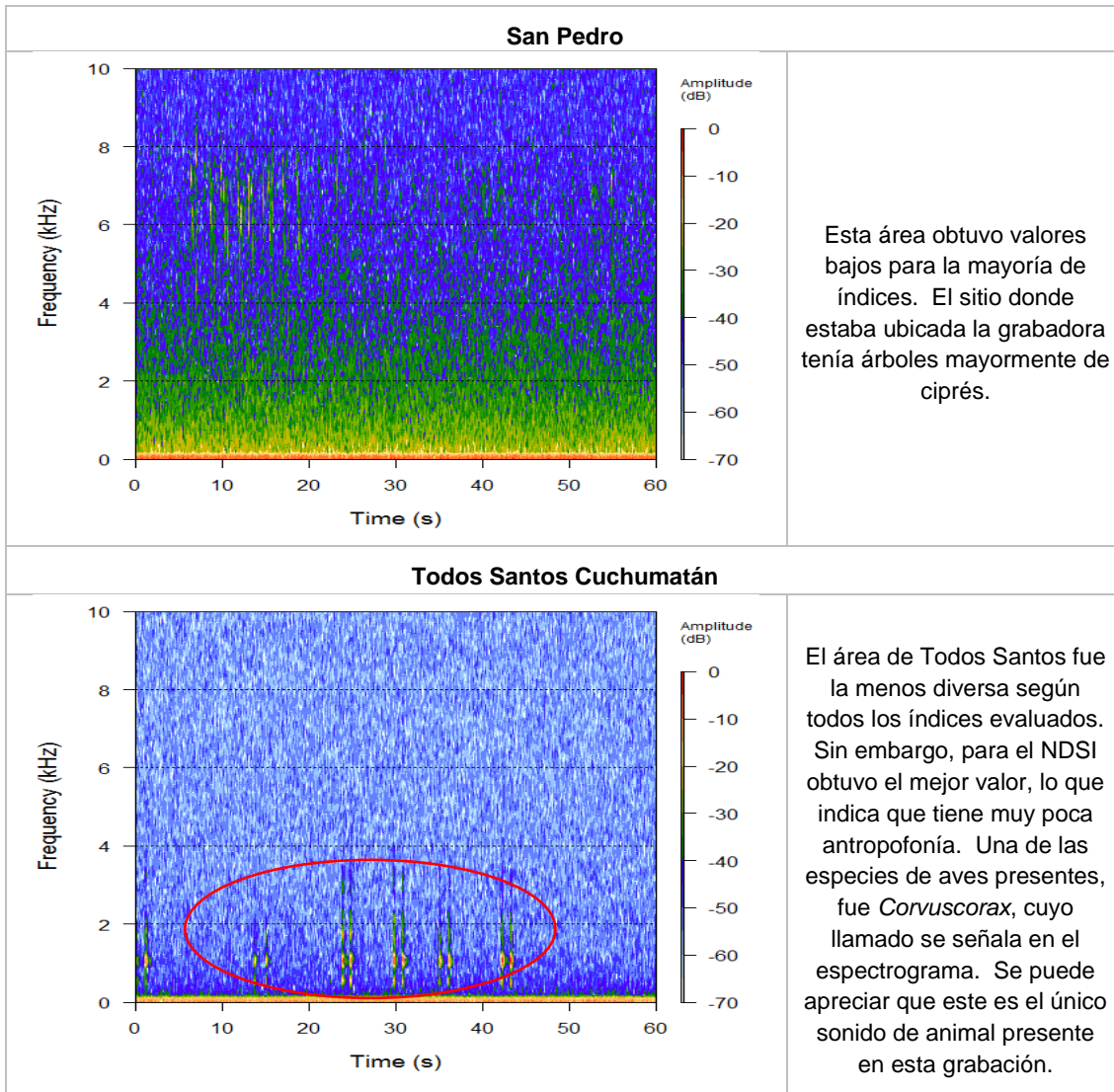


CEM: Cinturón Ecológico Metropolitano, SIB_1: Sibinal, SM_1: San Marcos, SP: San Pedro, TS: Todos Santos.

Figura 3: Espectrogramas de los paisajes sonoros de los sitios de grabación.



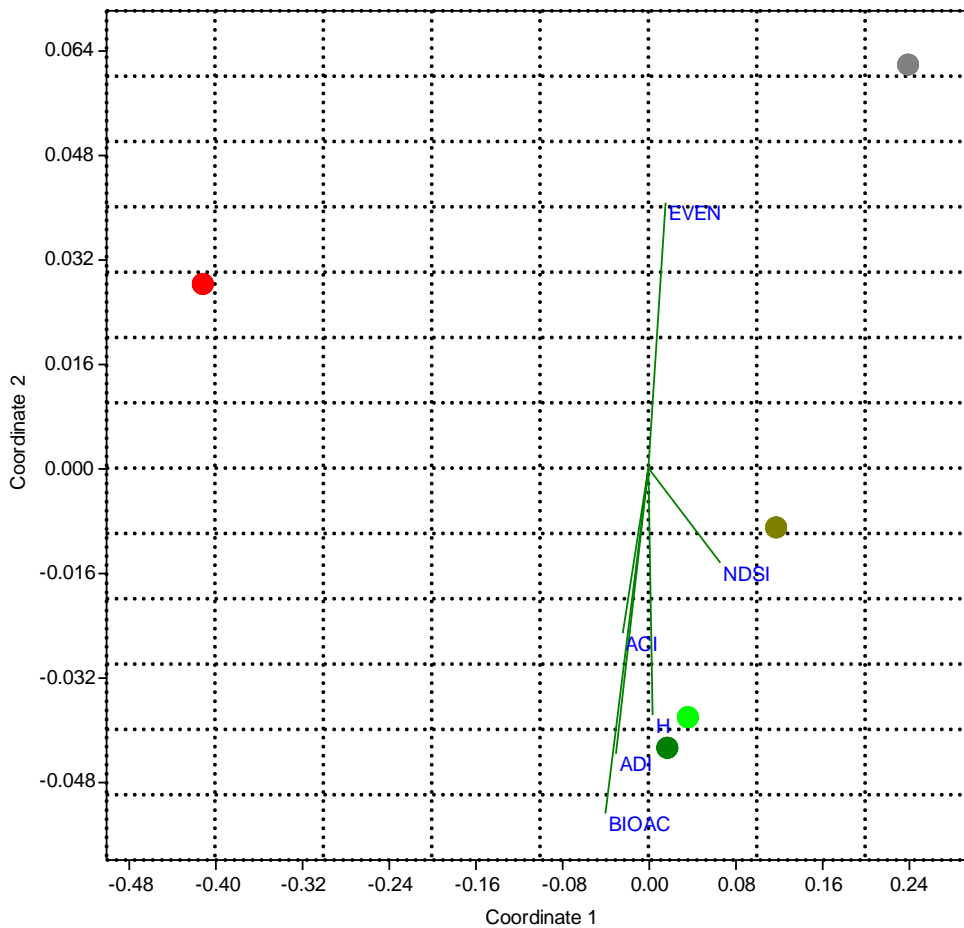
Espectrogramas creados por medio del programa R, con el paquete *Seewave*. 512 FFT. Los sonidos con mayor energía (más volumen) se observan de color rojo, en amarillo y verde se observan los intermedios, en azul los de baja energía y el blanco indica la ausencia de sonido.



Espectrogramas creados por medio del programa R, con el paquete *Seewave*. 512 FFT. Los sonidos con mayor energía (más volumen) se observan de color rojo, en amarillo y verde se observan los intermedios, en azul los de baja energía y el blanco indica la ausencia de sonido.

Otro índice cuya asociación fue alta según el análisis de NMDS fue el Bioacústico, éste índice mide la cantidad de energía o sonidos en las bandas de frecuencia mayormente abarcadas por las vocalizaciones de la avifauna (Boelman, Asner, Hart, & Martin, 2007). Este índice fue mayor en el área de San Marcos, sitio que también resultó ser el que posee bosque en mejor estado de conservación según las observaciones en campo y se refleja también en la cuantificación de la cobertura por medio de SIG, con un 100% de bosque (Cuadro 4).

Figura 4: Gráfica de análisis de NMDS para los índices evaluados.



Los colores corresponden a los sitios: CEM, Sibinal, San Marcos, San Pedro, Todos Santos

El siguiente índice con mayor asociación según el análisis de NMDS, fue el ADI, el cual tuvo un menor valor en Todos Santos (Anexo 1), este sitio es el de mayor elevación de los cinco evaluados, el tipo de bosque ha sido considerado como subalpino (Villar-Anleu, 1998) y durante las grabaciones se registraron temperaturas mínimas de -4° C. El bosque del área se compone mayormente de árboles de la especie *Pinushartwegi*y de arbustos de la especie *Juniperusstandleyi*, muy espaciados entre sí. Las condiciones ambientales del área y características del bosque podrían provocar que la diversidad de fauna sea baja (Bolaños, Grajeda, Secaira, & López, en prensa) lo cual se refleja en el bajo valor en el ADI. El siguiente sitio con menor valor ADI fue el CEM, lo cual era lo esperado ya que el área se encuentra bastante perturbada e intervenida y se ubica en los alrededores de la ciudad de Guatemala. Los sitios con mayores valores de ADI son San Marcos, Sibinal y San Pedro, en orden de mayor a menor, esto era lo esperado ya que de estos tres, San Pedro y Sibinal son sitios con un estado de conservación parecido (98.11% y 97.76% de bosque respectivamente). El sitio en donde se ubicó la grabadora

en San Pedro es una plantación de ciprés, en Sibinalla grabadora se ubicó en un bosque natural y el sitio de San Marcos es el que se encuentra en mejor estado de conservación.

El tercer índice en representar mejor las diferencias entre sitios según el análisis NMDS, fue el *Evenness*(equidad). Este índice también mostró resultados coherentes de acuerdo a los demás índices ya que San Marcos fue el sitio con mayor Equidad según este índice, el cual mide la cantidad de energía correspondiente a animales vocalizando en cada banda de frecuencia, entre más cercano a cero es el valor, existe una mayor equidad. Entre más equidad hay en un ecosistema, quiere decir que el ecosistema está en mejores condiciones (Villanueva-Rivera, Pijanowski, Doucette, & Pekin, 2011). Los valores obtenidos muestran que el sitio más diverso es San Marcos, luego Sibinal, después San Pedro, luego el CEM y por último Todos Santos. El sitio de Todos Santos, tiene una cobertura de 99.94% de espacios abiertos con bosque o sin bosque, según la cuantificación de uso del suelo(GIMBOT, 2014); esto se debe a que el ecosistema allí es un bosque montano alto subropical, que ha sido catalogado incluso como bosque subalpino, parecido al de mayores latitudes (Villar-Anleu, 1998). Por sus características este sitio es el que tiene menor diversidad entre los ecosistemas evaluados, aunque su estado de conservación es bueno.

El índice de entropía (H) no mostró valores de asociación elevados para poder describir el paisaje sonoro de los sitios según el NMDS. En la Figura 2 se evidencia que los valores obtenidos con éste índice tienen una variación más alta para el sitio de Todos Santos, en cambio para los demás lugares la variación no fue tan elevada; el sitio con mayor diversidad fue nuevamente San Marcos, luego Sibinal, después San Pedro y de último el CEM. Según este índice Todos Santos sería el segundo lugar con más diversidad entre los sitios, pero la alta variación en los datos generados, podría indicar que este índice no es apto para establecer conjeturas sobre la diversidad en este lugar. Según Sueuret *al.* (2008) la entropía en las frecuencias no es adecuada para grabaciones realizadas en bosques de lugares templados, en donde la actividad acústica es baja y con ruido ambiental. El bosque de las partes altas de Todos Santos, tal como donde se realizaron las grabaciones, muestra características típicas de ecosistemas de mayores latitudes, esta podría ser la razón de la elevada variación que mostraron los datos del índice de entropía en este sitio.

El índice que mostró representar menos las características del paisaje sonoro de los sitios evaluados fue el ACI, según el análisis de NMDS. Este índice fue creado para evaluar la diversidad de sonidos generados por aves, respecto del ruido antropogénico. Según los resultados de este estudio, el sitio con una mayor diversidad fue el CEM, luego San Marcos, después Sibinal y de último Todos Santos. Este último sitio fue el que presentó menores valores, lo cual es lógico tomando en cuenta la baja diversidad de aves en el sitio (Bolaños, Grajeda, Secaira, & López, en prensa); sin embargo no concuerda con los demás índices de diversidad (excepto NDSI) los cuales mostraron que San Marcos era el sitio con mayor diversidad. Podría ser que la altitud influya ya

que a menor altitud se sabe que hay una mayor diversidad de aves y el CEM es el sitio con menor altitud de todos los evaluados.

Se pudo observar que los índices ADI, H, *Bioacoustic* y *Evenness*, muestran resultados que concuerdan entre sí, ya que indican que el sitio de San Marcos es el más diverso. El ACI muestra que San Marcos es el segundo en diversidad, luego del CEM, pero al igual que con los otros índices, Todos Santos es el que tiene menor valor, lo cual era lo esperado. Por último, el índice NDSI indica que el sitio con mayor ruido antropogénico es el CEM, lo cual es coherente ya que este sitio es el más perturbado de todos, debido a que se encuentra en la ciudad de Guatemala.

Se puede concluir que el análisis de paisaje sonoro es eficiente para describir el estado y biodiversidad en los ecosistemas. Mientras que algunos índices muestran representar mejor los paisajes sonoros, todos brindaron diferencias estadísticamente significativas entre los sitios evaluados. Debido a la variabilidad mostrada en la respuesta de algunos índices, se recomienda utilizar varios puntos de grabación en cada sitio. Así mismo para un análisis de diversidad biológica, el uso de los índices puede brindar resultados complementarios entre sí y se recomienda utilizar varios para tal efecto, en lugar de uno solo, ya que todos tienen ventajas y desventajas respondiendo diferente según las características de los diferentes hábitats. La utilización de estos índices resultó ser rápida y económica comparada con otros métodos, con la ventaja añadida de ser no invasivo. Este trabajo representa el primer estudio de paisaje sonoro en el país y se recomienda realizar más investigaciones de este tipo en sitios y hábitats diferentes.

Cuadro 4: Análisis de uso del suelo en los sitios de grabación de paisaje sonoro.

Sitio	Uso	m ²	%
CEM	Bosque	90,264.52	31.96
	Urbano	156,380.80	55.36
	Matorral o guamil	35,823.84	12.68
	Pastizales	0.00	0.00
	Total	282,469.20	100.00
Sibinal	Bosque	276,021.60	97.76
	Urbano	0.00	0.00
	Matorral o guamil	6,300.19	2.23
	Pastizales	25.00	0.01
	Total	282,346.80	100.00
San Marcos	Bosque	282,561.20	100.00
	Urbano	0.00	0.00
	Matorral o guamil	0.00	0.00
	Pastizales	0.00	0.00
	Total	282,561.20	100.00

Sitio	Uso	m ²	%
San Pedro	Bosque	277,015.40	98.11
	Urbano	0.00	0.00
	Matorral o guamil	5,335.53	1.89
	Pastizales	0.00	0.00
	Total	282,351.00	100.00
Todos Santos	Bosque ¹	282,313.40	99.94
	Urbano	0.00	0.00
	Matorral o guamil	166.50	0.06
	Pastizales	0.00	0.00
	Total	282,479.90	100.00

¹ El bosque de Todos Santos está clasificado en el mapa de referencia (GIMBOT, 2014) como “espacios abiertos con poco o sin bosque”, sin embargo hay que tomar en cuenta que así es el hábitat natural del área (Villar-Anleu, 1998).

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo fue posible gracias a la asesoría de Federico Villatoro, quien compartió sus conocimientos en estadística y ecología. También gracias a la ayuda de Margarita Vides para la creación de los mapas. El equipo de grabación fue proporcionado por Ecotest de Guatemala.

REFERENCIAS

- Acevedo, M., & Villanueva-Rivera, L. (2006). Using Automated Digital Recording Systems as Effective Tools for the Monitoring of Birds and Amphibians. *BioOne*, 34(1):211-214.
- Agranat, I. (2007). Automatic Detection of Cerulean Warblers. *Wildlife Acoustics*, 13.
- Alianza para la Conservación de los Bosques de Pino-Encino de Mesoamérica. (2008). *Plan de Conservación de los Bosques de Pino-Encino de Centroamérica y el Ave Migratoria Dendroica chrysoparia*. Fundación defensores de la Naturaleza y The Nature Conservancy. Guatemala: E.S. Pérez, E. Secaira, C. Macías, S. Morales e I. Amezcua.
- Boelman, N., Asner, G., Hart, P., & Martin, R. (2007). Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: bioacoustics, field surveys and airborne remote sensing. *Ecological Applications*, 17:2137-2144.
- Bolaños, P., Grajeda, L., Lopez, E., & Secaira, S. (en prensa). *Línea base, diseño e implementación de una estrategia de monitoreo de especies indicadoras y programa de capacitación para implementar los monitoreos en áreas piloto. Producto 7, Fase II. Análisis del contexto socio-cultural e Informe sobre contacto y apo*. Guatemala: CONAP.

- Bolaños, P., Grajeda, L., Secaira, S., & López, E. (en prensa). *Línea Base, Diseño e Implementación de una Estrategia de Monitoreo de Especies Indicadoras y Programa de Capacitación para Implementar los Monitoreos en Áreas Piloto. Producto 6, Fase II, Reconocimiento de Campo y Línea Base*. Guatemala: CONAP.
- CDC-CECON. (1999). *Fauna en peligro de extinción: Estudios de biodiversidad*. Centro de Datos para la Conservación; Centro de Estudios Conservacionistas -USAC-. Guatemala: SENACYT.
- CONAP. (2013). *Terminos de Referencia para el proyecto "Línea base, diseño e implementación de una estrategia de monitoreo de especies indicadoras y programa de capacitación para implementar los monitoreos en áreas piloto del proyecto"*. Guatemala: Consejo Nacional de Areas Protegidas.
- CONAP. (20 de agosto de 2014). Obtenido de www.conap.gob.gt
- Depraetere, M., Pavoine, S., Jiguet, F., Gasc, A., Duvail, S., & Sueur, J. (2012). Monitoring animal diversity using acoustic indices: Implementation in a temperate woodland. *Ecological Indicators*, 13 (2012) 45-54.
- Farina, A. (2014). *Soundscape Ecology*. Urbino, Italy: Springer.
- Gasc, A., Sueur, J., Jiguet, F., V., D., Grandcolas, P., Burrow, C., . . . Pavoine, S. (2013). Assessing biodiversity with sound: Do acoustic diversity indices reflect phylogenetic and functional diversities of bird communities. *Ecological Indicators*, 25 (2013) 279-287.
- GIMBOT. (2014). *Mapa de Bosques y Uso de la Tierra 2012*. Guatemala: Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra.
- Kasten, E., Stuart, A., Gageb, H., Foxc, J., & Wooyeong, J. (2012). *The Remote Environmental Assessment Laboratory's Acoustic Library*. Michigan: REAL.
- Krause, B. (1987). *The Niche Hypothesis: How Animals Taugh Us to Dance and Sing*.
- Ludwing, J., & Reynolds, J. (1988). *Statistical Ecology*. United States: Wiley-Interscience publication.
- Magurran, A. E. (2004). *Measuring Biological Diversity*. Malden, MA.
- Obrist, M., Pavan, G., Sueur, J., Riede, K., Llusia, D., & Márquez, R. (2010). Bioacoustics approaches in biodiversity inventories. *Abc Taxa*.
- Pielou, E. (1966). The Measurement of Diversity in Different Types of Biological Collections. *J. Theoret. Biol*, 13, 131-144.
- Pieretti, N., Farina, A., & Morri, D. (2011). A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI) . *Ecological Indicators* , 868-873.
- Pijanowski, B., Villanueva-Rivera, L., Dumyahn, S., Farina, A., Krause, B., Napoletano, B., . . . Pieretti, N. (2011). Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape. *BioScience*, 61: 203-216.
- R Core Team. (2014). *R: A language and environment for statistical Computing*. Vienna, Austria. Obtenido de <http://www.R-project.org>

- Ralph, C. J., & S. Droege, J. S. (1995). *Managing and monitoring birds using point counts: Standards and applications*. United States: Pacific Southwest Research Station.
- Ranft, R. (2004). Natural Sound Archives: past present and future. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 76(2): 455-465.
- Sayre, R. (2000). *Un enfoque en la naturaleza: evaluaciones ecológicas rápidas*. USA: The Nature Conservancy.
- Schäfer, R. (1977). *Tuning of the world*. NY: Alfred Knopf.
- SGO. (2006). *Áreas de Aves Endémicas (EBA) y Áreas de Importancia para la Conservación de Aves (IBA)*. Guatemala: Asociación Guatemalteca de Ornitología.
- Ström, C. (2013). Rapid biodiversity assessment of a Neotropical rainforest using soundscape recordings. *Degree Thesis in Ecology*, 32. Umea, Suecia: Umea Universitet.
- Sueur, J., Aubin, T., & Simonis, C. (02 de Julio de 2014). Package "Seewave". Paris: Musee National D'Histoire Naturelle.
- Sueur, J., Pavoine, S., Hamerlynck, O., & Duvail, S. (2008). Rapid Acoustic Survey for Biodiversity Appraisal. *PLoS ONE*, 3(12): e4065. doi:10.1371/journal.pone.0004065.
- Sutton, D. (1999). *Fundamentos de Ecología*. México D.F.: Editorial Limusa, S.A. de C.V.
- Townsey, M., Wimmer, J., Williamson, I., & Roe, P. (2013). The use of acoustic indices to determine avian species richness in audio-recordings of the environment. *Ecological informatics*, 10.
- Villanueva-Rivera, L., Pijanowski, B., Doucette, J., & Pekin, B. (2011). A primer of acoustic analysis for landscape ecologists. *Landscape Ecology*, 26:1233-1246.
- Villar-Anleu, L. (1998). *La Flora silvestre de Guatemala*. Guatemala: Editorial Universitaria.

ANEXOS

Anexo 1: Fotografías de los sitios de grabación de paisaje sonoro.

Cinturón Ecológico Metropolitano



Canjulá, Sibinal



Fotografías: Pablo Bolaños (2015)

Astillero de San Marcos



Astillero de San Pedro



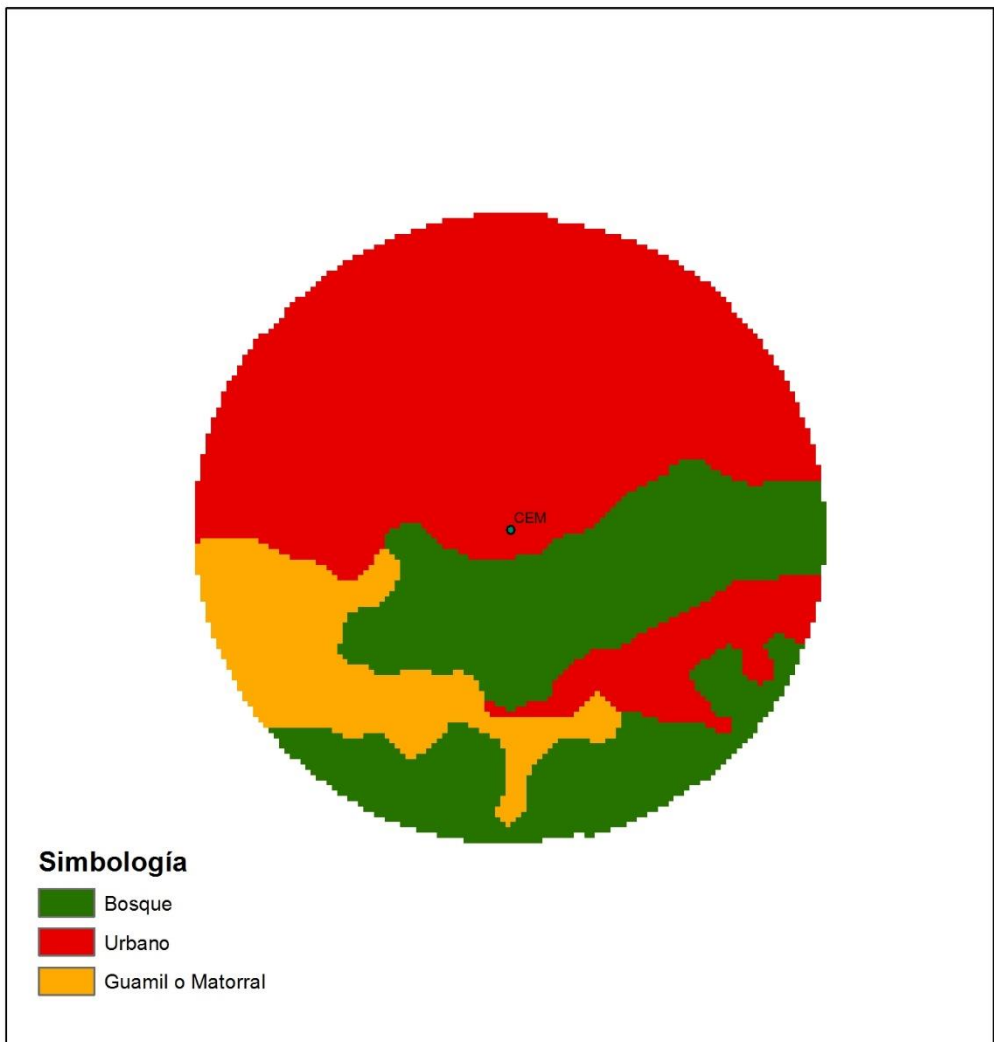
Fotografías: Pablo Bolaños (2015)

Todos Santos Cuchumatán



Fotografía: Pablo Bolaños (2015)

Cobertura y Uso de la Tierra en 300 mt de radio CEM

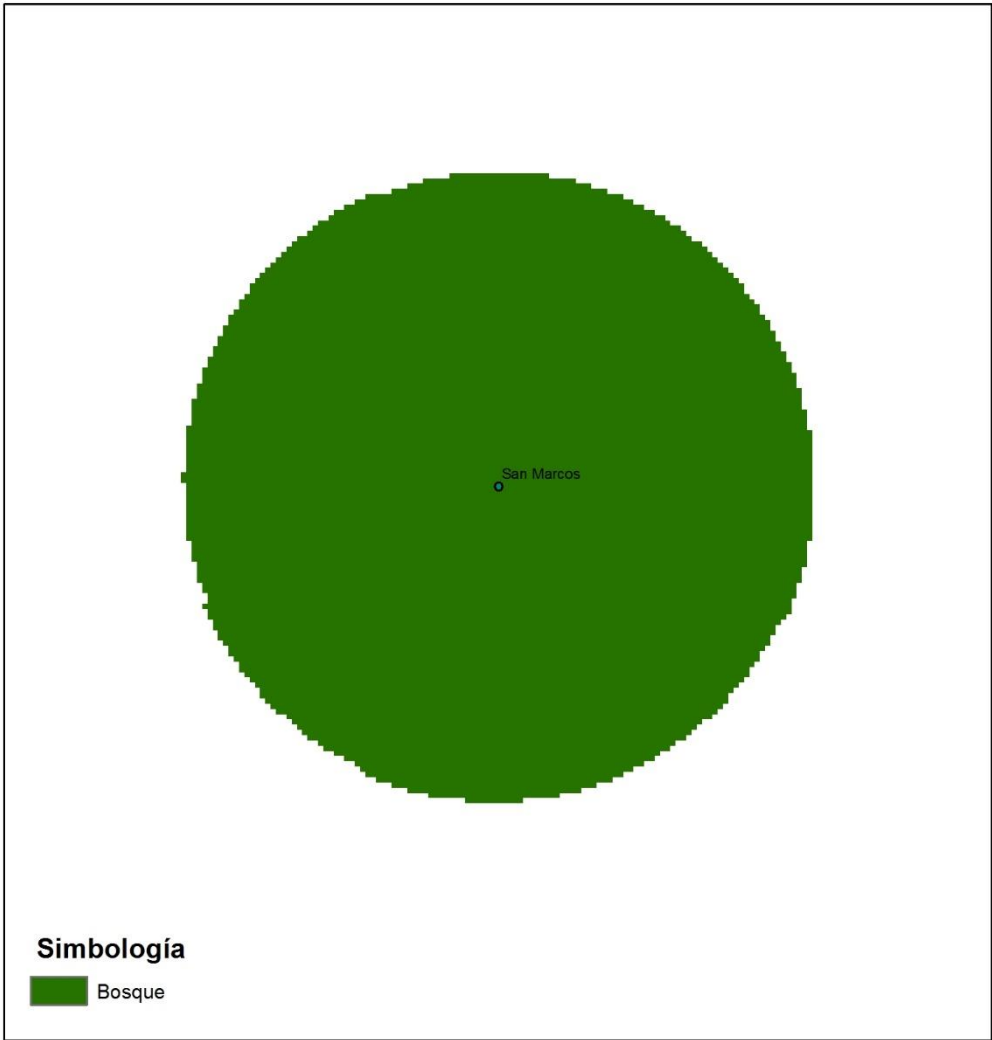


CEM		
Uso	Mts Cd	%
bosque	90,264.5	32.0
urbano	156,380.8	55.4
matorral o guamil	35,823.8	12.7
	282,469.2	100.0


 Sistema de Coordenadas
 WGS84
 Unidades: Metros
 Fuente: GIMBOT 2012
 ECOTEST 2015



Cobertura y Uso de la Tierra en 300 mt de radio San Marcos



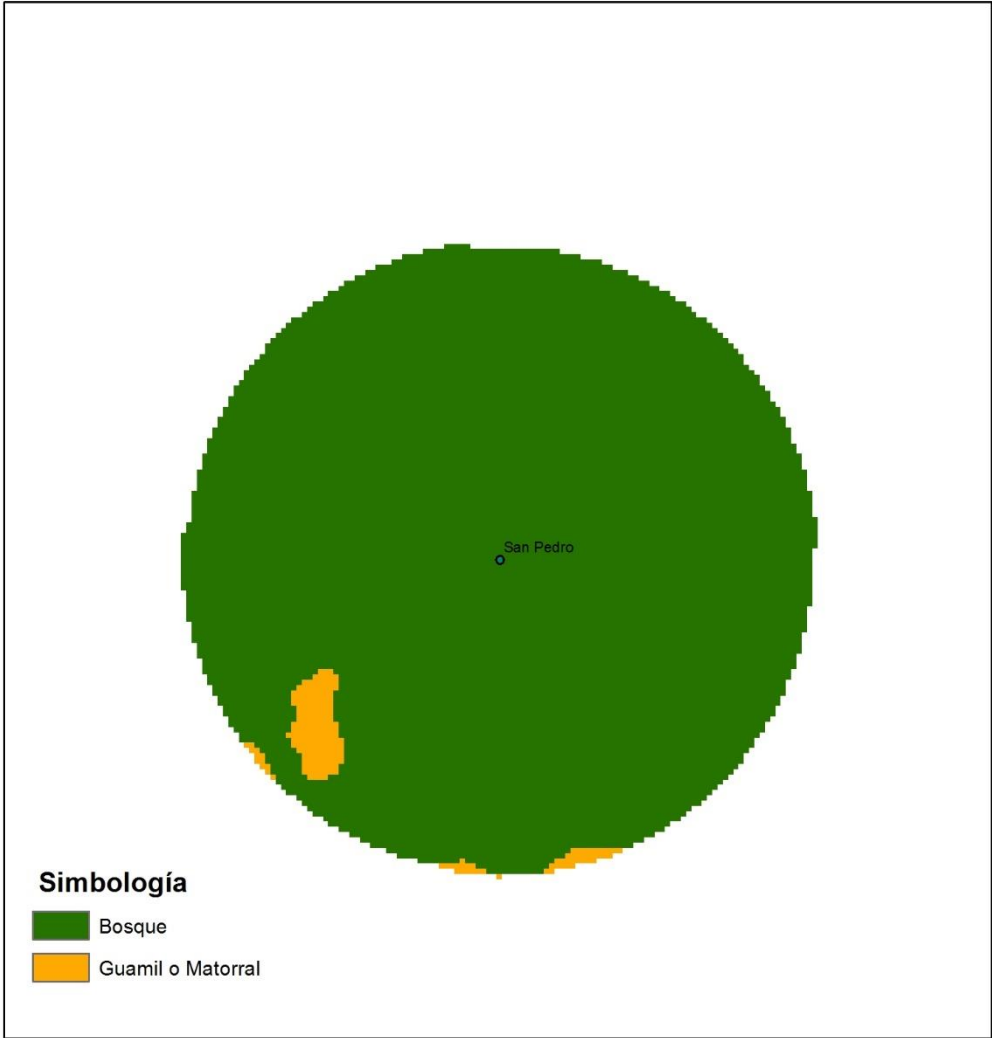
San Marcos		
Uso	Mts Cd	%
Bosque	282,561.2	100



Sistema de Coordenadas
WGS84
Unidades: Metros
Fuente: GIMBOT 2012
ECOTEST 2015



Cobertura y Uso de la Tierra en 300 mt de radio San Pedro

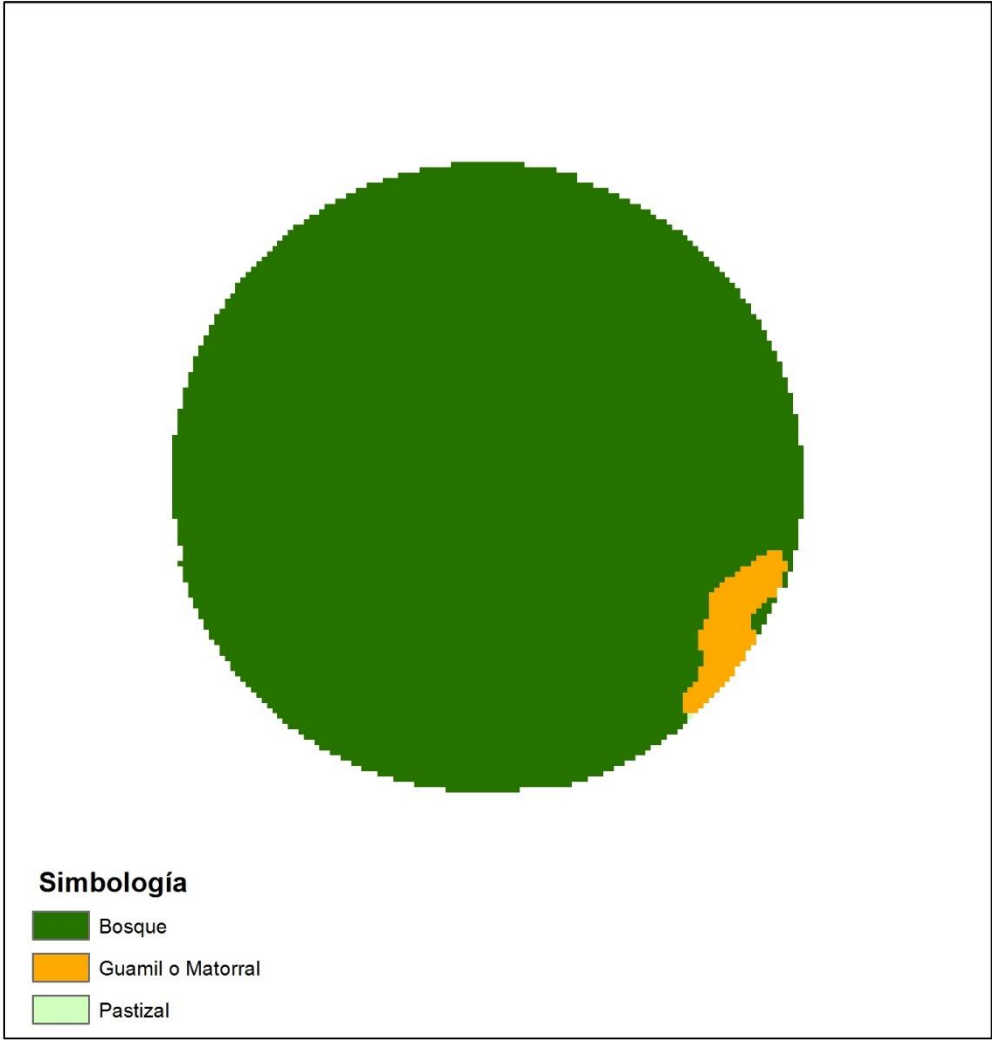


San Pedro		
Uso	Mts Cd	%
matorral o guamil	5,335.5	1.9
bosque	277,015.4	98.1
	282,351.0	100.0


 Sistema de Coordenadas
 WGS84
 Unidades: Metros
 Fuente: GIMBOT 2012
 ECOTEST 2015



Cobertura y Uso de la Tierra en 300 mt de radio Sibinal



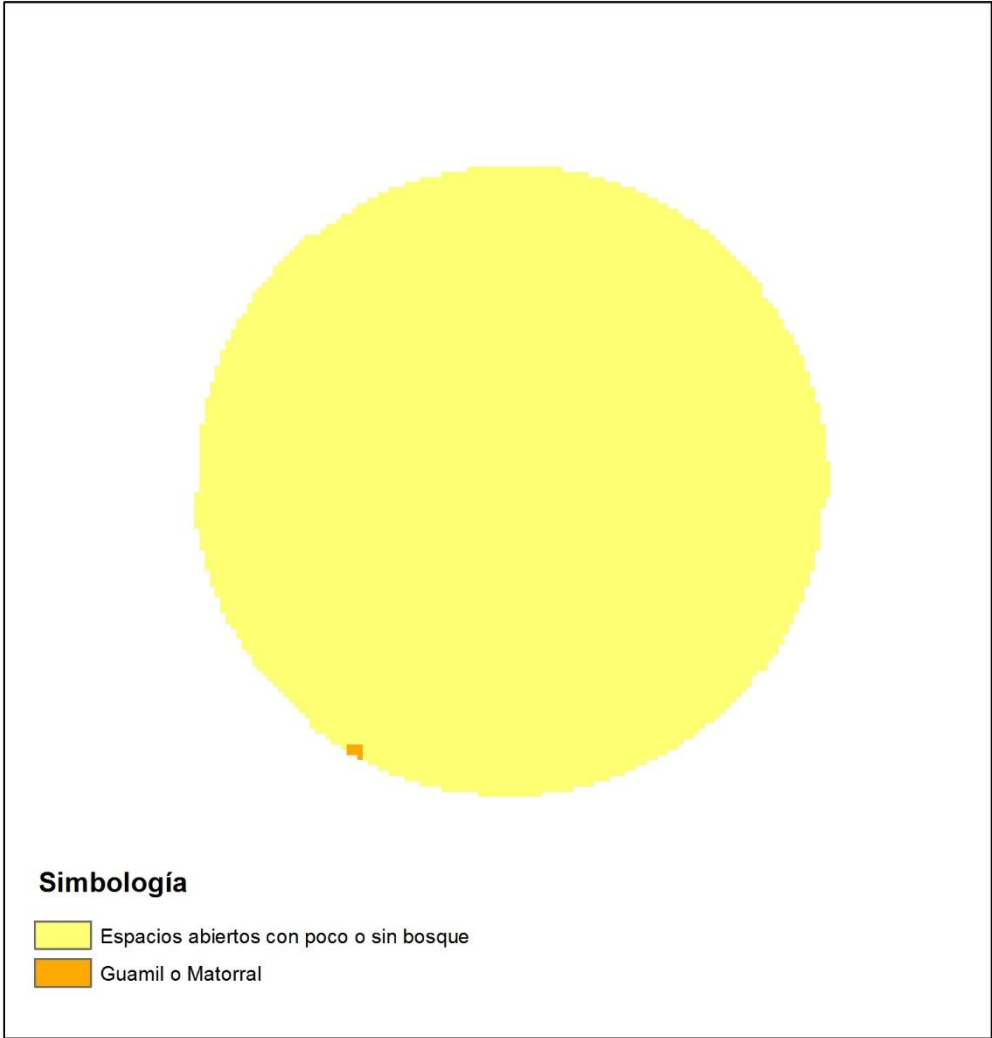
Sibinal		
Uso	Mts Cd	%
bosque	276,021.6	97.8
matorral o guamil	6,300.2	2.2
Pastizales	25.0	0.0
	282,346.8	100.0



Sistema de Coordenadas
WGS84
Unidades: Metros
Fuente: GIMBOT 2012
ECOTEST 2015



Cobertura y Uso de la Tierra en 300 mt de radio Todos Santos Cuchumatán



Todos Santos		
Uso	Mts Cd	%
Guamil o Matorral	166.5	0.1
Espacios abiertos co	282,313.4	99.9
	282,479.9	100.0



Sistema de Coordenadas
WGS84
Unidades: Metros
Fuente: GIMBOT 2012
ECOTEST 2015

