



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**PATRONES TEMPORALES EN EL PAISAJE
ACÚSTICO DEL ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA
Y FAUNA NAHÁ, CHIAPAS; MÉXICO**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGA

P R E S E N T A:

SAMANTHA ORDÓÑEZ FLORES



**DIRECTOR DE TESIS:
DRA. LETICIA MARGARITA OCHOA OCHOA**

**Ciudad Universitaria, Ciudad de México
2019**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno	
Apellido paterno	Ordóñez
Apellido materno	Flores
Nombre	Samantha
Teléfono	75939498
Universidad	Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad	Facultad de Ciencias
Carrera	Biología
Número de cuenta	312516112
2. Datos del tutor	
Grado	Dra.
Nombre(s)	Leticia Margarita
Apellido paterno	Ochoa
Apellido materno	Ochoa
3. Datos del sinodal 1	
Grado	Presidente
Nombre(s)	Dr.
Apellido paterno	Ivan Vladimir
Apellido materno	Meza Ruíz
4. Datos del sinodal 2	
Grado	Vocal
Nombre(s)	Dr.
Apellido paterno	José Roberto
Apellido materno	Sosa López
5. Datos del sinodal 3	
Grado	Suplente 1
Nombre(s)	Biol.
Apellido paterno	Alejandro
Apellido materno	Gordillo Martínez
6. Datos del sinodal 4	
Grado	Suplente 2
Nombre(s)	M. en C.
Apellido paterno	Everardo Gustavo
Apellido materno	Robredo Esquivelzeta
7. Datos del trabajo escrito	
Título	Patrones temporales del paisaje acústico del Área de Protección de Flora y Fauna Nahá, Chiapas, México
Número de páginas	69 p
Año	2019

Dedicatorias

Llena de felicidad y orgullo, me gustaría dedicar este trabajo a todas esas personas que me han acompañado a lo largo de este camino, pero en especial:

A mis padres, Araceli y Lorenzo, por el infinito amor y por el esfuerzo que han realizado para formarnos a mi hermana y a mí como personas de bien. Gracias por todo el apoyo que me han brindado para cumplir mis sueños locos y para ayudarme a levantar cuando no se han logrado como planeaba.

A mi hermana, Kenya, por su sinceridad y apoyo. Gracias por no dejarme tirar la toalla y siempre tener palabras de aliento a la mano.

A Camilo, por su incansable paciencia e incondicional amor a pesar de la distancia. Gracias por no cortarme las alas y volar conmigo. Lo lograremos, amor.

A mis amigos, Tania y Daniel, por acompañarme estos cinco años de carrera y por convertirse en parte de mi familia. Tan, gracias por las risas y las pláticas de corazón. Dan, gracias por tu incondicionalidad, tu compañía en las clases de la tarde y las asesorías express. Sin ustedes no podría decir que esta ha sido la mejor etapa de mi vida.

A mis abuelos, en especial a mi abuela Lucha. Yo sé que estarías muy orgullosa de mí y lamento que no estés aquí para poder verlo. Te extraño.

También quiero agradecer a todos los profesores que han contribuido en mi formación, y en particular:

A Maru y a todos los del Taller de Plantas I y II quienes me acogieron desde mi segundo semestre y desde entonces han estado presentes. Gracias por las oportunidades y el cariño que me han brindado.

A César Ríos, por haber sido un excelente profesor y haberse convertido en un buen amigo. Gracias por tus oportunos comentarios y tus sabios consejos. Y, sobre todo, gracias por haberme presentado a Leti.

A Leticia Ochoa. Gracias por ser una gran asesora, persona y amiga. Gracias por haberme abierto las puertas cuando lo necesitaba y por haber confiado en mí para trabajar en un tema nuevo para ambas. Gracias por las oportunidades y el apoyo durante estos dos años. Me gustaría algún día ser tan buena investigadora como tú.

Agradecimientos

Este trabajo representó uno de los retos más grandes de mi vida hasta ahora. Por fin concluyó y no pudo haber sido de mejor manera. Sin embargo, no fue trabajo de una sola persona, es por eso por lo que agradezco profundamente a quienes me ayudaron a lograrlo.

En especial, gracias al M. en C. Everardo Robredo por toda la asesoría que me brindó desde el inicio y sobre todo por la ayuda para desarrollar los códigos utilizados en este trabajo, además del apoyo para realizar figuras y comprender conceptos matemáticos. Sin ti no hubiese sido posible esto. Gracias también por haberte convertido en mi mentor y un buen amigo.

Gracias al M. en G. Julián Equihua quien me asesoro sobre el tema y quien siempre estuvo dispuesto a resolver mis dudas.

Por supuesto, gracias a la Facultad de Ciencias y la máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México, por la formación que me brindaron y por el apoyo económico para poder cumplir mi sueño de estudiar en el extranjero.

Agradezco el otorgamiento de la beca PAPIIT por el proyecto con clave IA206518.

“Our problem is that sound is not important in our culture. We know the world from the visual, not from the other senses. I had to be taught other ways of understanding.”

Bernie Krause

Índice General

1. Índice general	5
2. Índice de figuras	7
3. Índice de tablas	8
4. Resumen/ Abstract	9
5. Introducción	10
5.1.1. Generalidades del sonido.....	10
5.1.2. El papel del sonido en la Biología.....	11
5.1.3. La contaminación auditiva y sus efectos.....	12
5.1.4. La ecología del paisaje acústico, una ciencia emergente: origen y definición.....	13
6. Antecedentes	16
7. Justificación	19
8. Objetivos	21
8.1.1. General.....	21
8.1.2. Particulares.....	21
9. Métodos	21
9.1.1. Área de estudio.....	21
9.1.2. Análisis acústicos.....	24
9.1.2.1. Obtención de datos.....	25
9.1.2.2. Cálculo de índices acústicos.....	27
9.1.2.3. Identificación de variaciones en los paisajes acústicos.....	31

10. Resultados	34
10.1.1. Obtención de datos.....	34
10.1.2. Índices acústicos.....	38
10.1.3. Identificación de variaciones en los paisajes acústicos.....	40
11. Discusión	50
11.1.1. Índices acústicos: su interpretación y futuro en la ecología.....	50
11.1.2. Patrones espaciotemporales en los paisajes acústicos de Nahá, Chiapas.....	53
11.1.3. Los paisajes acústicos como herramientas para la ecología y la conservación.....	56
11.1.4. Importancia de los paisajes acústicos: perspectivas éticas, legales y culturales.....	58
12. Conclusiones	59
13. Referencias	60

Índice de Figuras

Figura 1. Clasificación de diferentes tipos de ondas de sonido de acuerdo con su frecuencia.	10
Figura 2. Rango audible para humanos representado en decibeles y sonidos asociados.....	11
Figura 3. Mapa del Área de Protección de Flora y Fauna Nahá, Chiapas.....	24
Figura 4. Tipos de vegetación representativos de los sitios de colecta de las grabaciones.....	25
Figura 5. Ejemplo de la obtención de los índices <i>max</i> y TAIL.....	31
Figura 6. Diagrama de flujo que ejemplifica el procesamiento de las grabaciones y la obtención de los índices acústicos.....	33
Figura 7. Espectrogramas del paisaje acústico del APFF Nahá, Chiapas.....	36
Figura 8. Cambios mensuales en temperatura promedio y precipitación durante los años 2013 y 2014 registrados por la estación meteorológica de Yaquintela, Chiapas.....	37
Figura 9. Cambios en a) temperatura promedio y b) precipitación durante las temporadas de lluvias y secas registrados por la estación meteorológica de Yaquintela, Chiapas.....	38
Figura 10. Espectrogramas diagnóstico construidos con los valores de estadística descriptiva (media y desviación estándar) para los datos procesados por la STFT de las variables sitio, año y temporada.....	39
Figura 11. Histogramas diagnóstico de los coeficientes por índice.....	40
Figura 12. Diferencias en la variación del paisaje acústico de Nahá, Chiapas por a) sitio, b) temporada y c) año utilizando los coeficientes obtenidos para el índice CORE.....	42
Figura 13. Diferencias en la variación del paisaje acústico de Nahá, Chiapas por a) sitio, b) temporada y c) año utilizando los coeficientes obtenidos para el índice TAIL.....	43
Figura 14. Diferencias en la variación del paisaje acústico de Nahá, Chiapas por a) sitio, b) temporada y c) año utilizando los coeficientes obtenidos para el índice EXAG.....	45

Figura 15. Diferencias en la variación del paisaje acústico de Nahá, Chiapas por a) sitio, b) temporada y c) año utilizando los coeficientes obtenidos para el índice LOUD.....47

Figura 16. Diferencias en la variación del paisaje acústico de Nahá, Chiapas por a) sitio, b) temporada y c) año utilizando los coeficientes obtenidos para el índice CORE.48

Figura 17. Diferencias en la variación del paisaje acústico de Nahá, Chiapas por a) sitio, b) temporada y c) año utilizando los coeficientes obtenidos para el índice POW.....49

Figura 18. Frecuencias de emisión de sonido comúnmente ocupadas por antropofonías, geofonías y biofonías.....54

Índice de Tablas

Tabla 1. Principales teorías bioacústicas.....15

Tabla 2. Datos con los que se crearon los espectrogramas de paisaje.....26

Tabla 3. Descripción de las variables usadas en los Modelos Lineales Generalizados de Efectos Mixtos.....32

Tabla 4. Número de grabaciones obtenidas por sitio, temporada y año.....35

Resumen

El estudio de la biología ha estado enfocado en conocer cómo el ser humano y otros organismos perciben su entorno de forma visual. Sin embargo, en los últimos años, las líneas de investigación se dirigen a comprender al mundo a partir de otros sentidos. La importancia del sonido ha llamado mucho la atención gracias a los grandes descubrimientos en materia de bioacústica y de contaminación auditiva. En México es necesario tomar en cuenta las áreas emergentes en monitoreo y conservación a nivel ecosistémico y de paisaje ya que las estrategias tradicionales tienden a ser muy costosas y tardadas. En este trabajo se plantea a la ecología del paisaje acústico como una disciplina capaz de identificar las variaciones y consistencias en los niveles de actividad acústica en el paisaje nocturno de dos sitios en el Área de Protección de Flora y Fauna de Nahá, Chiapas, a través de seis índices acústicos y la aplicación de modelos lineales generalizados. Se encontró que existen diferencias en la actividad acústica entre las tres variables estudiadas: sitios, temporadas y años. Sin embargo, se identificaron patrones uniformes asociados a los coros de amanecer y atardecer en las tres variables. También se reconocieron bandas de frecuencia dominantes consistentes con las descritas en la literatura para biofonías y geofonías. Con este trabajo se pretende sentar el primer antecedente a nivel nacional de cómo los paisajes acústicos pueden tener severas implicaciones en el estudio de la ecología de áreas altamente vulnerables como es el caso del APFF Nahá en la selva Lacandona de Chiapas, México.

Abstract

In Biology, most of the research done has been focused on how human beings and other organisms perceive their environment through sight. However, in the past few years, research has been directed to understand the world through other senses. The importance of sound has been brought to attention thanks to outbreaking discoveries in the fields of Bioacoustics and noise pollution. In Mexico, it is necessary to address new procedures for the monitoring and conservation of ecosystems and landscapes because the traditional methodologies that are commonly applied are expensive and time-consuming. In this study, we propose the Soundscape Ecology as a discipline able to identify variations and consistencies in of the nocturnal soundscape activity levels in two sampling sites within the Area for the Protection of Flora and Fauna Nahá, Chiapas, Mexico using acoustic indices and generalized linear models. We found differences in the acoustic activity between the two states of each one of the three variables used: site, season and year. Despite the remarkable differences between variables, we were able to identify temporal patterns through all the examined soundscapes. These patterns are associated to the dawn and dusk choruses. We also recognized dominant frequencies that match with those described on the literature for biophonies and geophonies. With this study, we pretend to establish the first national background on how Soundscape Ecology can aid in future monitoring and conservation studies of highly vulnerable areas such as the APFF Nahá in the lacandon rainforest in Chiapas, Mexico.

Introducción

Generalidades del sonido

Desde el punto de vista físico, el sonido se define como un conjunto de ondas que se propagan a través de un medio como consecuencia de la vibración de un objeto (Halliday et al. 2009, Farina 2014, Obrist et al. 2015). La frecuencia (f ; Figura 1.) es la forma más común de medir el sonido (Hz) y se obtiene mediante la cuantificación del número de ciclos que ocurren en un segundo ($f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\lambda v}$; Halliday et al. 2009, Obrist et al. 2015). Las características físicas de una onda son la longitud (λ), la amplitud (A) y el período (T) y son las que le dan identidad (Halliday et al. 2009). También existen otras unidades para cuantificar el sonido como son los decibeles (dB) o los pascales (Pa; Halliday et al. 2009, Farina 2014, Merchant et al. 2015, Obrist et al. 2015). Los decibeles son la unidad de medida de la intensidad del sonido y están basados en la escala logarítmica (Figura 2; Halliday et al. 2009, Farina 2014, Merchant et al. 2015). En el ser humano el rango audible comprende desde los 20 hasta los 20kHz (Farina 2014), sin embargo, la mayoría de los organismos, como algunas serpientes y ballenas, escuchan frecuencias mucho menores o mayores a las del ser humano. Estas frecuencias de baja y alta energía se conocen como infrasonido y ultrasonido, respectivamente (Farina 2014, Obrist et al. 2015). Esto es importante ya que muchos de los programas y estudios que existen, utilizan estos términos para establecer rangos estándar de frecuencia (Aide et al. 2013, Kight y Swaddle 2015, Feng et al. 2006).

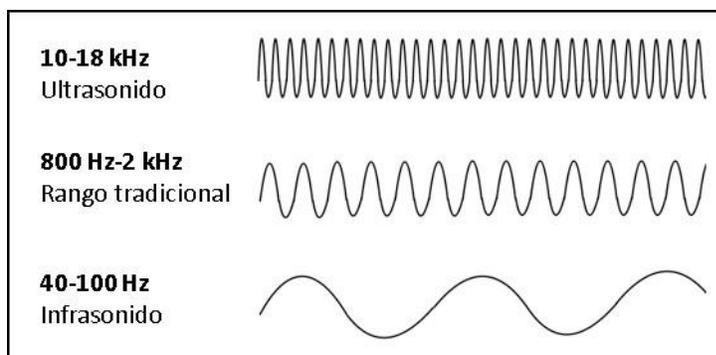


Figura 1. Clasificación de diferentes tipos de ondas de sonido de acuerdo con su frecuencia.



Figura 2. Rango audible para humanos representado en decibeles y sonidos asociados a dichas intensidades. Modificado de: (La Voz Argentina 2018)¹

El papel del sonido en la Biología

A pesar de que el sonido es un fenómeno físico, también tiene una connotación biológica (Farina 2014, Lomolino et al. 2015, Obrist et al. 2015). Un gran número de organismos, incluido el ser humano, utilizan el sonido como un medio de comunicación inter- e intraespecífico (e.g. defensa territorial y reproducción) o para orientarse (Kacelnik y Krebs 1983, Kroodsma y Byers 1991, Brown y Handford 2003, Marler y Slabbekoorn 2004, Slabbekoorn y den Boer-Visser 2006, Vélez y Bee 2013, Farina y James 2016). Según Pijanowski y colaboradores (2011), para que la comunicación se pueda llevar a cabo se requieren tres componentes esenciales: fuente, propagación y receptor. La fuente es aquella que produce la señal, en este

¹<https://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/un-proyecto-para-bajar-los-decibeles>, último acceso: 2019-01-29.

caso el sonido, y no necesariamente tiene que ser un organismo, puede ser un componente abiótico del ecosistema; la propagación consiste en la dispersión del sonido a través de un medio; mientras que el receptor es idealmente un organismo ya que este último componente de la comunicación requiere de una interpretación de la señal (Farina 2014, Kroodsma y Byers 1991b, Marler y Slabbekoorn 2004).

Varias ramas de la ciencia se especializan en el estudio del sonido y su relación con los organismos, tal es el caso de la bioacústica, la biosemiótica y la ecología acústica (Pijanowski, Farina, et al. 2011, Lomolino et al. 2015, Obrist et al. 2015). La bioacústica estudia todo lo relacionado a la producción y dispersión del sonido en animales y abarca desde la morfología de los órganos productores y receptores de sonido hasta la comunicación entre individuos y la selección sexual a través de vocalizaciones (Farina 2014, Lomolino et al. 2015). Por otro lado, la biosemiótica se enfoca en el estudio de los signos y códigos en la comunicación entre animales no humanos (Santilli 2004). Mientras Truax (1978) define la ecología acústica como “el estudio de los efectos que el medio acústico genera en los organismos que habitan en él”. Sin embargo, el enfoque de estas áreas tiende a ser orgánmica o poblacional más no estudia los efectos a nivel comunidad, ecosistema o paisaje (Pijanowski, Villanueva-Rivera, et al. 2011).

La contaminación auditiva y sus efectos

De la importancia de los efectos del sonido en los organismos se deriva uno de los términos más importantes utilizados para su estudio desde la perspectiva biológica: la contaminación auditiva. La contaminación auditiva se define como la presencia de un estresor conocido como ruido (Stansfeld y Matheson 2003). El ruido es todo aquel sonido no deseado, generalmente producto de la actividad humana, aunque también puede ser de origen ambiental (Stansfeld y Matheson 2003, Kunc et al. 2016). A pesar de que el término “contaminación auditiva” originalmente se utilizó para definir el exceso de ruido en las ciudades (Buxton et al. 2017), hoy en día el estudio de los efectos de ésta se ha expandido a otras áreas (Francis et al. 2012, Kuehne et al. 2013, McClure et al. 2013, Kunc et al. 2016, Bunkley et al. 2017). Actualmente se sabe que la contaminación auditiva tiene efectos tanto a escala

micro como a escala macro. En la escala micro, se expresa como daños y alteraciones a la salud de los organismos (Lohr et al. 2003, Stansfeld y Matheson 2003, Basner et al. 2014, Basner et al. 2015, Peng et al. 2016), mientras que en la escala macro se pueden identificar modificaciones a nivel de poblaciones, comunidades e incluso ecosistemas (Pijanowski, Farina, et al. 2011, Pijanowski, Villanueva-Rivera, et al. 2011, Francis et al. 2012, McClure et al. 2013, Kunc et al. 2016, Bunkley et al. 2017).

Aunque la mayoría de los efectos en la salud ocasionados por la contaminación auditiva se han estudiado en humanos, muchos animales presentan las mismas respuestas fisiológicas. De acuerdo con *Stansfeld y Matheson (2003)* y *Basner y colaboradores (2014)* algunos de estos efectos incluyen: molestia o incomodidad, pérdida de agudeza auditiva, alteraciones en los patrones de sueño, en el desempeño y en la concentración, así como padecimientos cardiovasculares como presión alta y desajustes endocrinológicos; e incluso puede llegar a provocar afecciones psiquiátricas. Por otro lado, están los efectos a nivel macro que sí han tenido una aproximación más amplia en cuanto al número de taxa estudiados. Diversas investigaciones han demostrado que la exposición a la contaminación auditiva genera cambios en la distribución y abundancia, así como modificaciones en los patrones reproductivos de los animales en un ecosistema (Slabbekoorn y den Boer-Visser 2006, Goutte et al. 2013, Ware et al. 2015, Derryberry et al. 2016, Kunc et al. 2016, Nelson et al. 2017).

La ecología del paisaje acústico, una ciencia emergente: origen y definición

La ecología del paisaje acústico se ha desarrollado exponencialmente en la última década y se especializa en estudiar los sonidos que conforman un paisaje (Pijanowski, Farina, et al. 2011, Pijanowski, Villanueva-Rivera, et al. 2011, Farina 2014). El conocimiento del paisaje facilita la descripción de los patrones y componentes de los paisajes acústicos (Mullet et al. 2016), es por esto que la ecología del paisaje acústico se basa en los principios de la ecología del paisaje. Dichos principios se basan en los patrones e interacciones de los ecosistemas y cómo esto afecta los procesos ecológicos y la heterogeneidad del paisaje (Begon

et al. 2006, William Clark 2010). Para lograr esto, la ecología del paisaje estudia los componentes bióticos (tipo de vegetación), los geofísicos (ríos, montañas, valles) y los humanos (cambio de uso de suelo, urbanización, deforestación) que hacen de un paisaje un medio heterogéneo (William Clark 2010, International Association for Landscape Ecology 2017).

El término de paisaje acústico fue utilizado por primera vez en 1969 por un urbanista de apellido Southworth, pero no fue sino hasta 1977 cuando Murray Schafer lo utilizó como una forma de llamar la atención sobre la importancia de los sonidos de la naturaleza y su conservación (Southworth 1969, Schafer 1977, Pijanowski, Villanueva-Rivera, et al. 2011, Truax y Barrett 2011). En 2002, Krause definió al paisaje acústico como “todos los sonidos presentes en un ambiente en un momento determinado”, mientras que *Pijanowski y colaboradores* (2011) lo definen como “*un complejo arreglo de sonidos provenientes de diferentes fuentes que crean patrones acústicos en un tiempo y espacio determinado*”. De acuerdo a *Pijanowski y colaboradores* (2011), el paisaje acústico cuenta con cuatro propiedades medibles: los patrones temporales, que reflejan acontecimientos biológicos dentro del paisaje y se conocen como *ritmos de la naturaleza* (e.g. coros de atardecer); la composición acústica, que se refiere a la frecuencia y amplitud de todos los sonidos de un lugar y tiempo determinado; la variabilidad espacial, que se deriva de la composición biofísica del paisaje; y las interacciones acústicas que se forman entre los componentes acústicos del paisaje.

Los paisajes acústicos se componen por tres elementos: la biofonía, la antropofonía y la geofonía (Pijanowski, Villanueva-Rivera, et al. 2011, Farina 2014). La biofonía es todo aquel sonido proveniente de los organismos que les sirva para comunicarse, ubicarse, cazar o reproducirse, ya sea por estridulación o vocalización, principalmente (Krause 2008, Sueur et al. 2008, Laiolo 2010, Farina 2014, Marler y Slabbekoorn 2004). Los sonidos provenientes del medio biofísico como el viento, los truenos, la lluvia, derrumbes o el movimiento de las hojas componen la geofonía (Pijanowski, Farina, et al. 2011, Pijanowski, Villanueva-Rivera, et al. 2011, Farina 2014). Mientras que todos aquellos sonidos resultantes de la actividad humana se denominan antropofonía (Pijanowski, Farina, et al. 2011,

Farina 2014, Lomolino et al. 2015). La antropofonía puede ser resultado directo de la actividad humana (voces) o de la maquinaria tecnológica desarrollada por el ser humano (tecnofonía: fábricas, máquinas, carreteras, balazos y tráfico aéreo, entre otros).

De acuerdo a Farina (2014) en la ecología del paisaje acústico existen cuatro teorías fundamentales que ayudan a explicar los fenómenos sonoros que ocurren en un lugar determinado. Aunque estas hipótesis tienen distintos contextos biológicos, han ayudado a entender la dinámica y estructura de los paisajes acústicos y sus componentes, principalmente biológicos. En la tabla 1 se encuentra el nombre, una breve descripción y el autor que propuso cada una de estas hipótesis.

Tabla 1. Principales teorías bioacústicas.

Hipótesis	Descripción	Referencia
Adaptación morfológica	El tamaño corporal determina la frecuencia de emisión de cada especie.	Bennet-Clark (1998)
Adaptación acústica	Modificación de las emisiones acústicas debido a restricciones ambientales.	Morton (1975)
Nicho acústico	Los procesos de competencia interespecífica determinan en qué frecuencia se posicionan las especies.	Hutchinson (1959)
Reconocimiento de especies	Especies simpátricas evitan utilizar las mismas bandas de frecuencia para evitar el enmascaramiento de señales.	Farina y Belgrano (2006)

El fundamento integral de los paisajes acústicos hace de esta disciplina una excelente aproximación para la biología de la conservación y el monitoreo de la restauración (Pijanowski, Farina, et al. 2011, Pijanowski, Villanueva-Rivera, et al. 2011, Gasc et al. 2017). La facilidad de utilizar los sonidos como una herramienta para la percepción remota, coloca la investigación de los paisajes acústicos como una gran opción para el monitoreo (Farina y Pieretti 2012, Kasten et al. 2012, Aide et al. 2013, Romero et al. 2016). Así mismo, el conocimiento de la composición de

un paisaje acústico a lo largo de un periodo temporal prolongado facilita la identificación de alteraciones en patrones de este favoreciendo tanto el monitoreo ecológico como la conservación (Penone et al. 2013, Buscaino et al. 2016, Buxton et al. 2016, Burivalova et al. 2017). De igual manera, es importante resaltar que el precio de realizar un monitoreo o esfuerzo de conservación a través de paisajes acústicos es mucho menor que realizar uno tradicional (Krause 2008, Towsey 2013, Farina 2014, Farina et al. 2014, Towsey et al. 2014, Gasc et al. 2017, Zhang et al. 2013) aunque el esfuerzo de procesamiento y los recursos humanos invertidos aún son elevados, el auge de esta disciplina ha promovido el desarrollo de nuevas técnicas más rápidas y eficientes (Cottman-Fields et al. 2013, Digby et al. 2013, Towsey 2013, Wimmer et al. 2013, Zhang et al. 2013, Burivalova et al. 2017, Robredo-Esquivelzeta, códigos no publicados).

Antecedentes

El acercamiento al estudio de los sonidos se ha llevado a cabo desde distintas perspectivas como lo son la planificación urbana, la biológica y la médica, por mencionar algunos (Gasc et al. 2013, Vianna et al. 2015, Brumm y Zollinger 2017). Tal es el caso del estudio del sonido en la biología donde la mayoría de la investigación se ha centrado en el área de bioacústica (Vélez y Bee 2013, Hart et al. 2015, Brumm y Zollinger 2017).

Muchos de estos estudios se han enfocado en aves (Lohr et al. 2003, Francis et al. 2012, McClure et al. 2013, Hart et al. 2015) y en hábitats marinos (McWilliam y Hawkins 2013, Williams et al. 2015, Buscaino et al. 2016, Peng et al. 2016, Wiggins et al. 2016, McDonald et al. 2017, Pieretti et al. 2017), por la facilidad de trabajo con ambos. Algunos de estos han sido dirigidos a identificar problemáticas que existen en la producción y propagación de los sonidos naturales en presencia de sonidos antropogénicos. Por ejemplo, Slabbekoorn y den von Boer-Visser (2006) evaluaron las diferencias en el canto un ave passeriforme, *Parus major*, en distintos bosques y ciudades de Europa y notaron que los cantos de las aves residentes de zonas boscosas son más prolongados y largos que aquellos de los que habitan en zonas

urbanas. De manera semejante, Luther y Baptista (2010) estudiaron a otra especie passeriforme, *Zonotrichia leucophrys*, durante 30 años y se dieron cuenta que las antropofonías de baja frecuencia generaron una presión de selección que derivó en la aparición de nuevos dialectos en las zonas urbanas que estudiaron. Así mismo, Kight y Swaddle (2015) notaron que los machos de otra ave cantora, *Sialia sialis*, aumentaban el tono y volumen de sus cantos en zonas urbanas con respecto a zonas silenciosas debido a la presencia de sonidos antropogénicos en las primeras.

Estos resultados demostraron que las aves presentan una gran plasticidad a la interferencia por sonidos antropogénicos. Sin embargo, muchos autores sugieren que esto, lejos de ser una ventaja es un problema puesto que se cree que existen nichos acústicos en los ecosistemas y, por lo tanto, el desplazamiento de una especie conllevaría a un desajuste en la ocupación de los demás nichos y que, a la larga, puede llevar a la pérdida de biodiversidad (Pijanowski, Villanueva-Rivera, et al. 2011, Farina 2014). Un ejemplo de ello es el caso de las cigarras y las aves de un bosque tropical costarricense donde *Hart y colaboradores* (2015), encontraron que tanto cigarras como aves buscan evitar el traslape de sus cantos, sin embargo, cuando llegan a cantar simultáneamente, lo hacen en diferentes frecuencias para no enmascararse unas a otras.

Por otro lado, algunas líneas de investigación se han enfocado en las aplicaciones de la bioacústica, en la realización de inventarios de biodiversidad y en la conservación. Por ejemplo, *Sueur y colaboradores* (2008) realizaron una evaluación de la biodiversidad a través de un análisis acústico rápido (*Rapid Acoustic Survey*) de dos bosques en Tanzania con las mismas condiciones excepto por el grado de perturbación. Ellos encontraron que existen diferencias significativas en la composición acústica de ambos y que la utilización de los análisis acústicos rápidos es menos invasiva que una evaluación de biodiversidad tradicional. Más tarde, *Gasc y colaboradores* (2013) analizaron las propiedades acústicas de tres comunidades montañas en la isla de Nueva Caledonia para detectar diferencias en la composición de las comunidades. Por otro lado, *Aide y colaboradores* (2013) desarrollaron un software y propusieron una metodología para facilitar el monitoreo

y la identificación de especies en tiempo real utilizando como sitios de estudio bosques tropicales de Puerto Rico y Costa Rica.

En años recientes se han llevado a cabo un número considerable de investigaciones con eje principal en los paisajes acústicos a nivel internacional. Algunos de ellos son los que realizaron *Mullet y colaboradores* (2016) y *Buscaino y colaboradores* (2016). *Mullet y colaboradores* (2016) hicieron una descripción de las variaciones espacio temporales del invierno en un área natural protegida en Alaska y encontraron que dicho paisaje acústico está dominado por geofonías y que, a pesar de que las biofonías fueron mínimas, éstas no coincidían ni en espacio ni en tiempo con las antropofonías. Un año después, *Buscaino y colaboradores* (2016) estudiaron las variaciones diarias y estacionales en un paisaje acústico marino en el Mediterráneo y determinaron que en invierno los sonidos de bajas frecuencias (1 kHz) como el de las olas son más frecuentes mientras que en verano, los sonidos de frecuencias altas (4 kHz) producidos por camarones dominan el paisaje. Estos estudios sientan un antecedente importante ya que demuestran que los paisajes acústicos son variables y resilientes hasta cierto punto.

A pesar del gran desarrollo que esta disciplina ha tenido en otros países, en México solo existe un estudio enfocado en el paisaje acústico marino y en el efecto que la contaminación acústica producida por disparos tiene en él (Wiggins et al. 2016). Sin embargo, sí existen antecedentes relacionados con la bioacústica y el efecto indirecto del incremento del ruido en especies como los cachalotes (McDonald et al. 2017). Aunque pocas, también existen aproximaciones más específicas como la que presentó Serrano (2016) en la Revista Mexicana de Biodiversidad, donde describe las características acústicas del canto de una rana endémica del Pedregal de San Ángel, Ciudad de México. Por otro lado, se están haciendo esfuerzos por ampliar el acervo bioacústico en el país como es el caso de la creación de la Biblioteca de Sonidos de Anfibios de México (sin publicar) y la Biblioteca de Sonidos de Aves del Museo de Zoología “Alfonso L. Herrera” de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (Gordillo-Martínez et al. 2010), por dar un par de ejemplos.

Justificación

El sonido siempre ha formado parte de la naturaleza, sin embargo, el papel que juega en los ecosistemas y zonas urbanas se convirtió en un foco de atención a partir de la Revolución Verde cuando se advirtió la desaparición del canto de las aves de una comunidad agrícola estadounidense como consecuencia de la introducción de pesticidas químicos (Carson 1962). Poco después, Schafer (1977) y Krause (2002) notaron una dramática disminución en los sonidos naturales de diversos paisajes. Ellos dedicaron gran parte de sus vidas a grabar la mayor cantidad de paisajes acústicos posibles y referían que sus grabaciones iniciales contenían “maravillosas sinfonías” pero que, en los últimos años del siglo XX, estas sinfonías se habían ido apagando. Ellos identificaron que la causa de estas disminuciones iba en relación con el aumento de los sonidos producidos por máquinas y caminos que se comenzaban a expandir cada vez más hacia los hábitats inexplorados a causa del aumento en la demanda de recursos naturales (Lomolino et al. 2015, Buxton et al. 2017, Schafer 1977, Krause 2002).

Durante la última década, diversos estudios han logrado identificar cambios en los patrones de canto de varias especies de aves y anfibios como consecuencia del incremento de sonidos de origen humano (Luther y Baptista 2010, Kight y Swaddle 2015, Buxton et al. 2016). Muchos de estos sonidos refieren que esto se debe a un efecto conocido como enmascaramiento. El enmascaramiento ocurre cuando dos sonidos se traslapan en un tiempo o espacio determinado (Lohr et al. 2003, Bee y Micheyl 2008). Este enmascaramiento genera una competencia/necesidad por encontrar rangos de frecuencia no ocupados, lo cual se refleja en modificaciones en los patrones de canto de aves, insectos y anfibios (Lohr et al. 2003, Bee y Micheyl 2008, Goutte et al. 2013, Villanueva-Rivera 2014, Derryberry et al. 2016).

Los efectos que genera la intrusión de las antropofonías en los hábitats han sido documentados principalmente en ambientes marinos. Kunc, McLaughlin y Schmidt (2016) realizaron una revisión de los efectos fisiológicos, de desarrollo y de comportamiento que la contaminación auditiva genera en varias especies marinas

y encontraron que este tipo de contaminación es especialmente dañina en ambientes acuáticos debido a la facilidad de propagación del sonido en el agua. También se han documentado alteraciones en procesos ecológicos como es el caso del cambio en la distribución y abundancia de ciertos géneros y familias de artrópodos como consecuencia de los sonidos producidos por la introducción de maquinaria para extracción de gas natural en su hábitat (Bunkley et al. 2017). De igual manera, se han descrito modificaciones en interacciones bióticas como la polinización y la dispersión debido a la presencia de sonidos de origen humano (Francis et al. 2012). En 2017, *Burivalova y colaboradores (2017)* evaluaron el efecto del cambio de uso de suelo en los coros de anochecer y amanecer a través de un gradiente de perturbación en Papúa Nueva Guinea. Ellos identificaron un cambio significativo en la saturación de los coros en zonas con cobertura vegetal conservada contra las zonas deforestadas, lo que se traduce como que las comunidades vocales se representan mejor en las primeras. Los autores hacen hincapié en la propuesta del uso de los paisajes acústicos como una herramienta de bajo costo y alta practicidad para el monitoreo y la conservación de zonas tropicales (Burivalova et al. 2017).

El estudio de esta nueva rama de la ecología nos permite explorar nuevas perspectivas y tener aproximaciones económicamente más accesibles para conocer, proteger, monitorear y conservar zonas de difícil acceso y/o de alta diversidad.

Objetivos

General

- Identificar si existen variaciones espaciotemporales en el paisaje acústico nocturno del área de Protección de Flora y Fauna (APFF) Nahá, Chiapas, México.

Particulares

- Calcular seis índices acústicos del APFF Nahá por año, por temporada y por sitio.
- Identificar variaciones en el paisaje acústico nocturno del APFF Nahá entre sitio, año y temporada a través de modelos lineales generalizados de efectos mixtos.

Métodos

Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la parte noroeste de la selva Lacandona, Chiapas, dentro del territorio de la comunidad de Nahá. Nahá es un área natural protegida (ANP) que, según los registros de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), se encuentra registrada como Área de Protección de Flora y Fauna desde 1998 (Hernández-Nava 2003, CONANP-SEMARNAT 2006). La UNESCO la declaró Reserva de la Biosfera Mundial Nahá-Metzabok en el 2010 (SEMARNAT 2016, UNESCO 2017) y también es considerado un sitio de humedales de importancia internacional por la RAMSAR (Hernández-Nava 2003). Concretamente el área de estudio se restringe a los límites territoriales de la Reserva de Nahá, por lo tanto, la descripción de las características se centrará en esta.

El ANP Nahá se localiza en el municipio de Ocosingo en el estado de Chiapas, en el sureste de México (Hernández-Nava 2003, CONANP-SEMARNAT 2006;). Se encuentra entre los 16.9447 a 17.0116 N y los -91.5477 a -91.628611 O (Figura 3; CONANP-SEMARNAT 2006). Nahá cuenta con una extensión de 3,

847.41 ha y el promedio de altitud está entre los 910 y los 1100 msnm (Hernández-Nava 2003). Se ubica dentro de los límites del sistema endorreico Lacandón y pertenece a la subcuenca del Río Lacanjá, que forma parte del parteaguas de la cuenca del Río Lacantún (CONANP-SEMARNAT 2006). Esta ANP está conformada por un sistema lagunar compuesto por 9 cuerpos de agua permanentes, donde los principales son los lagos el Ocotilito y Nahá; además tiene zonas inundables que se cubren de agua en temporada de lluvias (Hernández-Nava 2003). El tipo de clima de esta región corresponde a un tropical subhúmedo con lluvias en verano y la temperatura media anual es de 23.4°C (CONANP-SEMARNAT 2006). Los meses más cálidos son mayo y junio con una temperatura promedio de 25.6°C, mientras que el mes más frío es enero con una temperatura promedio de 20.9°C (CONANP-SEMARNAT 2006). La precipitación promedio al año es de 1860 mm y las lluvias comienzan en marzo con la canícula, aunque la mayor precipitación se presenta de mayo a diciembre (CONANP-SEMARNAT 2006).

El tipo de vegetación de esta zona es dominado por bosque tropical perennifolio² (68%), sin embargo, también presenta bosque mesófilo de montaña³ (3.6%), bosque de coníferas (5.7%), pastizal (0.17%) y vegetación secundaria (22.5%; CONANP-SEMARNAT 2006). El resto de la cobertura corresponde a asentamientos humanos (19 ha), agricultura (161 ha) y cuerpos de agua (127 ha; CONANP-SEMARNAT 2006). Se tienen registradas 779 especies de flora y 327 especies de fauna (Hernández-Nava 2003, CONANP-SEMARNAT 2006). Nahá es un área biogeográfica compleja y de una diversidad poco conocida aún.

Esta área es habitada por la etnia maya-lacandona hach-winik cuya población ascendía a 198 habitantes hasta el 2010, de los cuales 96 son mujeres y 102 hombres (Hernández-Nava 2003, CONANP-SEMARNAT 2006, Figueroa Díaz Escobar 2014). Esta región es considerada por el INEGI como una zona de alta marginación municipal y con un grado de rezago social medio (Figueroa Díaz

² Algunos autores lo nombran también como selva alta perennifolia (Miranda y Hernández X 1963), selva alta subperennifolia (Miranda y Hernández X 1963, INEGI 1988) o selva mediana subperennifolia (INEGI 1988). Para evitar confusiones, en todo el texto se referirá como Bosque Tropical Perennifolio (Rzedowski 1978).

³ Se referirá como bosque mesófilo de montaña de acuerdo con la clasificación de Rzedowski (1996) aunque algunos autores lo refieren como bosque de niebla o bosque nublado (Aldrich et al. 2000).

Escobar 2014). La zona cuenta con caminos de terracería utilizados para comunicar a la comunidad y que en siglos pasados sirvieron como entrada a las compañías chicleras, de petróleo y madereras (CONANP-SEMARNAT 2006, Figueroa Díaz Escobar 2014). La comunidad se dedica a actividades primarias de autoconsumo como la pesca, la agricultura, la caza y la recolección de frutos (CONANP-SEMARNAT 2006, Figueroa Díaz Escobar 2014). Sin embargo, su principal actividad económica es la producción y venta de artesanías para el turismo alternativo que acude a la zona (CONANP-SEMARNAT 2006, Figueroa Díaz Escobar 2014). El aumento en la demanda del turismo en la región, así como la necesidad de comunicar la comunidad y mejorar sus servicios ha promovido la creación y el mejoramiento de las vías de acceso no solo dentro del ANP, sino a nivel estatal (Excélsior 2014).

Análisis acústicos

En este estudio se pretende identificar y comparar, en caso de existir, los patrones espaciotemporales presentes en el paisaje acústico del APFF Nahá, Chiapas. Aunque en muchos textos se cita el uso de los índices acústicos como herramienta de monitoreo, aún existe un debate sobre cuál es la interpretación biológica de los resultados de dichos índices. En este trabajo proponemos un nuevo método de procesamiento, análisis e interpretación de grabaciones enfocado a la identificación de patrones espaciotemporales en los paisajes acústicos de zonas tropicales con el fin de facilitar el monitoreo en el país.

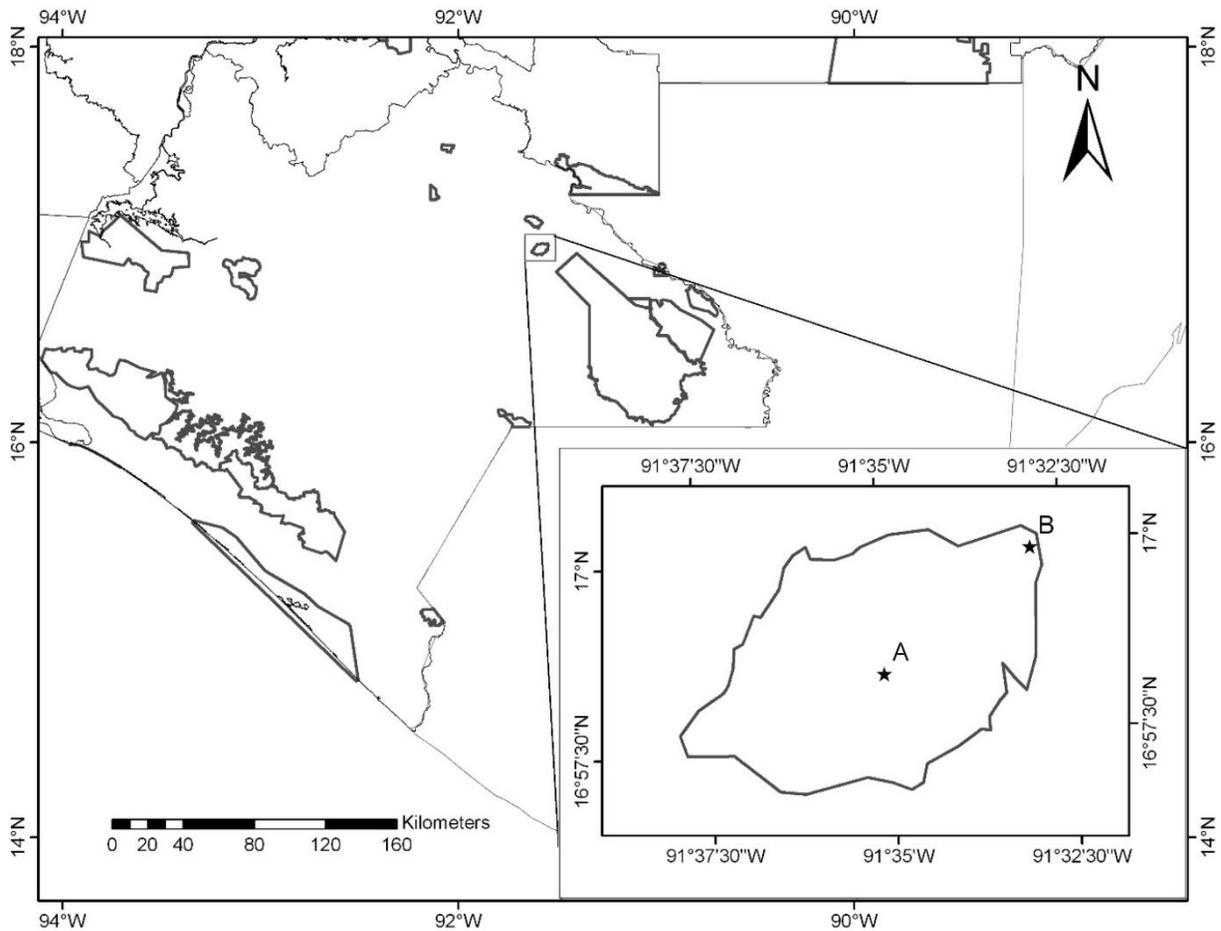


Figura 3. Área de Protección de Flora y Fauna Nahá, Chiapas. El sitio A corresponde a la grabadora colocada en el bosque mesófilo mientras que la del sitio B está en vegetación correspondiente a bosque tropical perennifolio.

Obtención de datos

Para llevar a cabo este trabajo, se utilizaron las grabaciones tomadas en el APFF Nahá durante dos años de muestreo (2013 y 2014). La colecta de datos fue realizada con dos grabadoras a prueba de agua, Songmeter 2.0 de dos canales (Wildlife Acoustics Inc⁴), a una tasa de muestreo de 96 kHz. Ambas grabadoras fueron programadas para registrar sonidos por 5 min cada hora a partir del atardecer (1800) hasta el amanecer (0600) a lo largo de todo el año. Las grabaciones obtenidas se guardaron en tarjetas de memoria Kingston™ de 64 Gb en formato .wav. Una de las grabadoras fue colocada en vegetación de tipo bosque mesófilo de montaña a 971 msnm (coordenadas 16.9986 N y -91.5486 O, Figuras 3 y 4a) y

⁴ <http://www.wildlifeacoustics.com/products/song-meter-sm2-birds>; último acceso: 2018-07-14.

la otra a 850 msnm en vegetación de tipo bosque tropical perennifolio (coordenadas 16.9730 N y -91.5838 O; Figuras 3 y 4b). La construcción de la base de datos se realizó en dos fases: la primera en Excel y la segunda en MongoDB®. La primera fase consistió en la depuración de los datos, detectando y eliminando archivos dañados, duplicados y vacíos. De igual manera se etiquetaron las grabaciones con la fecha, hora y sitio de colecta. La segunda fase se basó en la integración de la base de datos en MongoDB® para poder acceder directamente a los archivos originales anclados a la base. Debido a cuestiones ajenas a esta investigación, la información está incompleta por lo cual se seleccionaron los meses mejor representados en ambos sitios y años. Los meses escogidos corresponden a la temporada de secas (abril) y a la temporada de lluvias (agosto). Por último, se promediaron los valores de los dos canales (0 y 1) y se redujo la ventana de frecuencia a 10000 Hz puesto que la mayor parte de las biofonías y geofonías de interés se encuentran por debajo de los 8820 Hz (Towsey 2013).



Figuras 4. Tipos de vegetación representativos de los sitios de colecta de las grabaciones: a) bosque mesófilo de montaña y b) bosque tropical perennifolio.

Como parte de la previsualización de los paisajes se construyeron ocho espectrogramas con las grabaciones originales de los dos sitios de colecta con la información como se explica en la tabla 2. Dichas grabaciones se escogieron con el propósito de mostrar los paisajes de la forma visual más representativa posible. Además, se descargaron los registros de temperatura promedio y precipitación de la estación meteorológica más cercana al APFF Nahá con el propósito de describir las posibles variaciones temporales en el paisaje acústico. Dicha estación se encontraba en Yaquintela, Chiapas a aproximadamente 100km de nuestra área de estudio. A pesar de la distancia, la elevación y el tipo de vegetación de Yaquintela es similar al de Nahá. La información se descargó de la Base de Datos Climatológica Nacional (Sistema CLICOM) en formato separado por comas (.csv; CICESE 2015). Se seleccionaron los datos correspondientes a los años 2013 y 2014 y se realizaron gráficos de caja y bigote con el paquete ggplot2 (Wickham, Chang, et al. 2019) de R para presentar de forma visual las diferencias entre años y temporadas. De igual manera se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para determinar si existen diferencias significativas entre las variables ambientales entre años y entre temporadas.

Tabla 2. Datos con los que se crearon los espectrogramas de paisaje.

Grabadora	Año	Temporada	Hora
A	2013	Secas	1900
		Lluvias	1900
	2014	Secas	1900
		Lluvias	1900
B	2013	Secas	1900
		Lluvias	1900
	2014	Secas	0600
		Lluvias	0600

Cálculo de índices acústicos

A lo largo de la historia de la ecología de los paisajes acústicos se han utilizado un sinnúmero de índices para el análisis de éstos, sin embargo, muchos estudios reportan que los índices más estandarizados no cumplen con las características para estudiar los paisajes acústicos ya que presentan sesgos de grupo y de zona de estudio (Fuller et al. 2015, Mullet et al. 2016, Ferreira et al. 2018, Jorge et al. 2018). Tal es el caso del Índice de Diversidad Acústica (ADI por sus siglas en inglés) propuesto por Villanueva-Rivera y colaboradores (2011). Este índice es una medida de la frecuencia de un sonido en una banda traducida como abundancia. Este se obtiene calculando el índice de diversidad de Shannon por banda y se considera que un paisaje es diverso cuando hay muchas bandas activas y su actividad es más o menos homogénea. Bajo este principio un paisaje con ruido en todas las bandas (e.g. lluvia o ruido blanco) tendría mayor diversidad que uno con marcas de sonido diversas (e.g. coro de amanecer). Algo parecido sucede con el índice de complejidad acústica (ACI por sus siglas en inglés) que pretende identificar biofonías y funciona bajo el supuesto de que las biofonías presentan intensidades fluctuantes mientras las geofonías y las antropofonías son constantes (Pieretti et al. 2011). El problema con este índice es que las marcas de sonido no son universales y puede presentar sesgos de zona de estudio. Por otro lado, está el índice de entropía acústica (AEI, por sus siglas en inglés; Villanueva-Rivera et al. 2011), el cual calcula la cantidad de actividad por bin⁵ de frecuencia a partir del coeficiente de Gini. Este busca identificar qué tan uniforme es la distribución de la ocupación de los bins. Entre más se acerque a 1 el valor de AEI, más heterogénea es la comunidad (Ferreira et al. 2018), sin embargo, la incorrecta identificación y filtración del ruido de fondo puede arrojar resultados de compleja interpretación biológica. Otros índices comúnmente usados son el de entropía (H), el de riqueza acústica (AR), índice de diferencia normalizada de paisaje acústico (NDSI) y el índice bioacústico (BIO) pero no serán descritos a detalle en este trabajo. Sin embargo, se puede obtener más información consultando *Seur y colaboradores (2008)*; *Kasten*

⁵ Para este trabajo definiremos bin como un segmento de energía ubicada en una celda específica del espectrograma en banda:hora.

y colaboradores (2012), *Depraetere y colaboradores* (2012), y también *Boelman y colaboradores* (2007).

Por todo lo anterior, se decidió trabajar con dos índices propuestos en la literatura cuyo enfoque es más ecosistémico que el de los índices antes mencionados. Los índices seleccionados fueron BGN y POW (Burivalova et al. 2017). Además de los dos índices de *Burivalova y colaboradores* (2017), nosotros proponemos cuatro índices nuevos (CORE, TAIL, EXAG y LOUD). Estos últimos son modificaciones a los de la literatura y nuevas propuestas realizadas por el M. en C. Everardo Robledo que buscan reducir la incertidumbre en la interpretación biológica de la información analizada.

Nuestro índice CORE es el equivalente al índice BGN de *Burivalova y colaboradores* (2017), mientras que nuestro índice EXAG es una modificación de su índice POW. Los primeros buscan identificar sonidos continuos y de alta energía, lo que usualmente se considera como ruido. Sin embargo, BGN sólo toma en cuenta una moda en toda la distribución sin importar si existen más. Por otro lado, CORE incluye todas las modas ubicadas a menos del 10% de distancia de la moda más alta. Esto puede considerarse como un cambio insignificante, sin embargo, CORE puede resultar mucho más informativo en el caso de un paisaje muy saturado en diferentes bandas, lo cual BGN no podría percibir. Por ejemplo, imaginemos un coro de atardecer con el sonido persistente de grillos, lluvia leve y un coro de anfibios; todas las fuentes de sonido mencionadas anteriormente podrían ser clasificadas como ruido de fondo, sin embargo, es muy posible que BGN solo identifique como ruido de fondo a una de estas fuentes. Mientras tanto, CORE, filtraría mejor el conjunto de sonidos componentes del ruido de fondo.

Por otro lado, POW y EXAG son índices que se enfocan en identificar sonidos de alta energía que resalten sobre el fondo. Imaginemos el mismo paisaje, pero con una o dos especies de aves vocalizando. Estos índices son capaces de discriminar el sonido de fondo de estas vocalizaciones. Sin embargo, EXAG, lo hace de forma más fina al considerar un mayor rango de inclusión que POW (se usa el índice TAIL para calcular EXAG en lugar de un único valor como el índice *max* para POW). Además de los índices anteriores, nosotros proponemos el índice LOUD como una

forma de obtener una medida más estable ante la existencia de fluctuaciones anómalas. Sirve para identificar inconsistencias muy evidentes en el paisaje. Este índice busca identificar pulsos y sonidos indefinidos y si su coeficiente cambia de forma quiere decir que dichos sonidos son muy marcados.

Para la obtención de los seis índices seleccionados, se tomaron cada una de las grabaciones en formato *.wav* y se convirtieron en espectrogramas con ayuda de la Transformada de Fourier en Tiempo Corto (Figura 6; Osgood 2018). Se consideró que la información conservó sus propiedades de acuerdo con el Teorema de relación de energía de Parseval, el cual dice que un producto escalar corresponde al dominio transformado del mismo (Arfken y Weber 2001). Posteriormente se dividieron las grabaciones en segmentos de 60 segundos sin solapamiento para evitar anidamiento por remuestreo. Por último, se dividió cada segmento en diez bandas de 1000Hz cada una y se obtuvieron los seis índices:

BGN.- Se usa la moda de la distribución transformada a decibeles. Se estima a partir del método de onda envolvente propuesto por *Lamel y colaboradores* (1981) modificado por *Towsey y colaboradores* (2014). Pretende identificar los sonidos clasificados como ruido de origen no humano para después eliminarlos de las grabaciones (Burivalova et al. 2017).

$$BGN = Mo(dB_{cf})$$

POW.- Se expresa en decibeles y se obtiene de la diferencia entre el valor máximo y el coeficiente de BGN (Burivalova et al 2017). *Burivalova y colaboradores* (2017) lo comparan con el radio señal-ruido de una señal acústica con respecto a un bin de frecuencia. Busca evidenciar los sonidos de alta energía considerando el contexto del ruido de fondo.

$$POW = \max(dB_{cf}) - BGN_f$$

En esta fórmula, los autores usan *max* como el índice encargado de representar la energía acumulada en el último decil y se define como el único valor obtenido a partir de la selección del valor más alejado de la media (figura 5).

CORE.- Es la energía promedio del decil que contiene a la moda (M_o) expresada en decibeles. Considera a todas las modas que estén a menos de 10% de distancia de la moda más alta. Luego se obtienen los deciles que contienen estas modas y se calcula el promedio de estos. La información que se obtiene de este índice se parece a BGN pero es más estable. Si este índice es alto por lo general indica sonidos de fondo con alta energía (como grillos o lluvia fuerte). Este índice se calculó de la siguiente manera:

$$CORE = \frac{M_{o_1} + M_{o_2} + \dots + M_{o_n}}{n_{M_o}}$$

TAIL.- Es la energía promedio del último decil expresada en decibeles. Resalta los picos de energía, pero de forma estable. Casi siempre representa sonidos definidos y de alta energía como cantos de insectos, aves y anfibios. Para su cálculo se utilizó la siguiente fórmula:

$$TAIL = \frac{\sum \frac{k \cdot N}{10}}{n}$$

Donde:

k se refiere al intervalo de clase.

N es el número total de datos.

n se refiere al número entre el cual se va a promediar el decil.

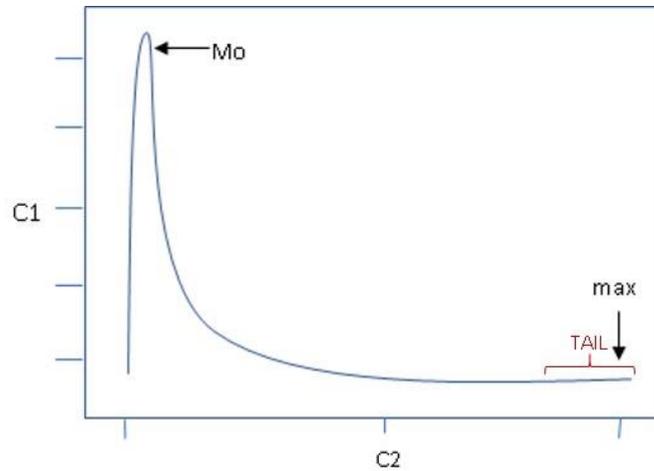


Figura 5. Ejemplo de la obtención de los índices max y TAIL.

EXAG.- En teoría, esta medida es mejor que TAIL para representar los pulsos porque considera el contexto de fondo, es decir, si esta medida es elevada quiere decir que los picos son realmente más altos que el ruido general. Se expresa en decibeles. Calculado así:

$$EXAG = TAIL - CORE$$

LOUD.- Con este índice se busca lidiar mejor con la idea de saturación. Es una medida que intenta tomar en cuenta pulsos y sonidos indefinidos al mismo tiempo. Se obtiene antes de transformar a decibeles utilizando esta fórmula:

$$LOUD = 10 \cdot \log_{10}(EXAG_{pre} + CORE_{pre})$$

Identificación de variaciones en los paisajes acústicos

Se utilizó la función *plotQQMany* en el programa R para determinar el tipo de distribución de los coeficientes por índice, hora y banda. Se diagnosticaron los datos buscando un ajuste a una distribución gamma usando histogramas y gráficos de cuantil-cuantil. Se determinó que la mayoría de los datos se ajustaban a la distribución gamma. Aunque hubo algunos casos aberrantes, éstos fueron pocos, por lo cual se decidió estandarizar los análisis subsecuentes a pruebas para variables con distribución gamma.

Se desarrollaron Modelos Lineales Generalizados de Efectos Mixtos (*Generalized Linear Mixed-effects Models*, GLMM, por sus siglas en inglés) ajustados con la función de enlace logarítmica para distribuciones gamma. El modelo nulo incluyó únicamente las variables de efectos aleatorios:

$$y \sim \log(1|day/orid)$$

Mientras que el modelo completo se formuló con las variables de efectos aleatorios y las variables de efectos fijos:

$$y \sim \log(site + season + (1|day/orid))$$

Las variables son explicadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Descripción de las variables usadas en los Modelos Lineales Generalizados de Efectos Mixtos.

	Variable	Estados	Tipo de variable
	Año	2013, 2014	Categórica
Efectos fijos	Sitio	Bosque tropical perennifolio; Bosque mesófilo de montaña	Categórica
	Temporada	Secas, Lluvias	Categórica
Efectos aleatorios	Orid	Grabación de origen (e.g. NAHA1_20140410_010012.wav)	Categórica
	Día	Fecha en la que se tomó la grabación	Categórica

Una vez definido los modelos nulo y completo, se procedió a evaluar el ajuste de estos modelos por índice usando las funciones *fitBinModels* y *fitGLMM*. Se utilizó el criterio de información de Akaike (Akaike Information Criterion, AIC, por sus siglas en inglés) como prueba de ajuste. Por último, con la función *plotEffectMatrix*, se elaboraron los correlogramas por sitio, hora y temporada, utilizando los valores de T obtenidos en el paso anterior. Además se obtuvieron los correlogramas de delta AIC por punto hora:banda.

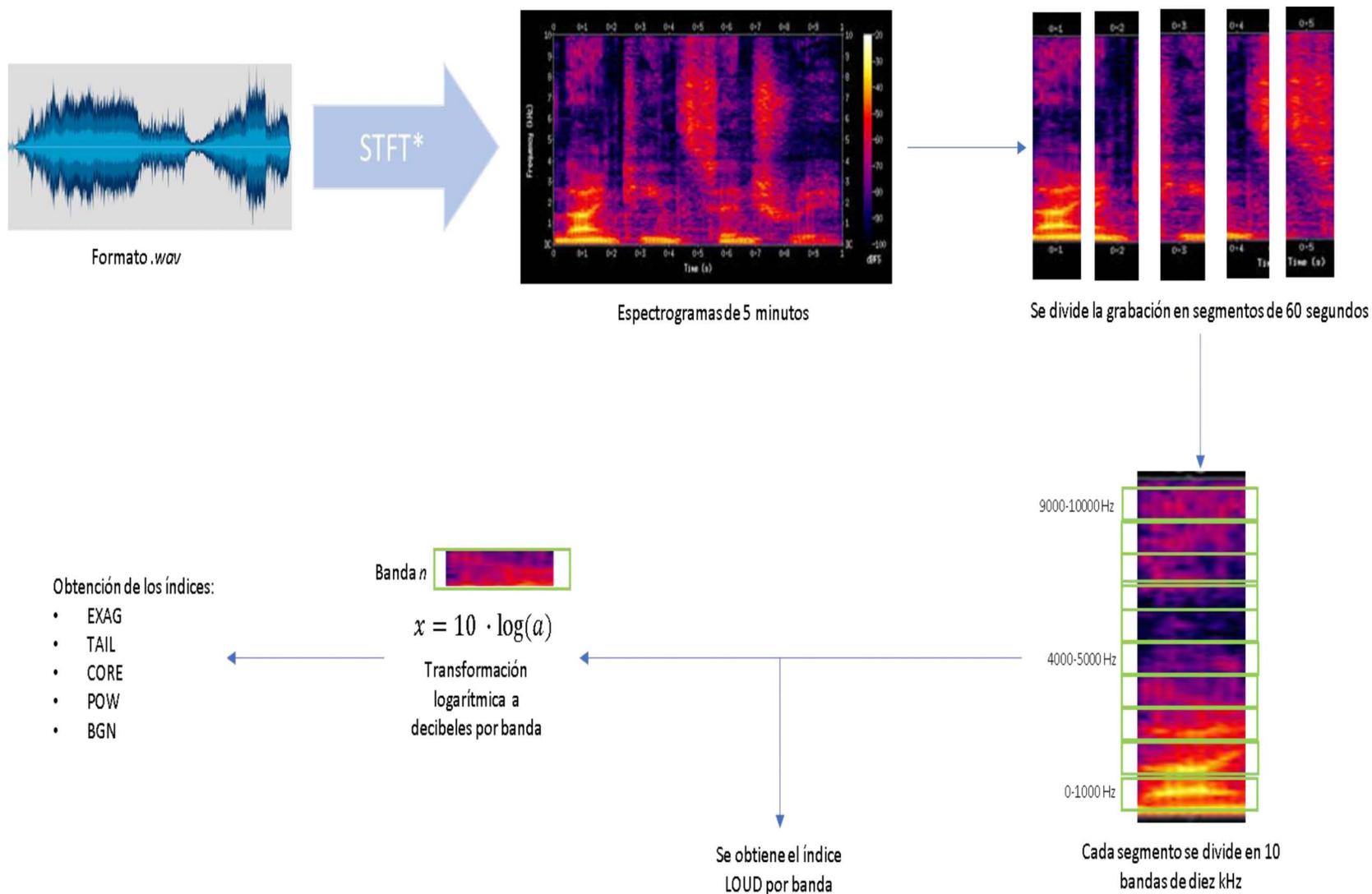


Figura 6. Diagrama de flujo que ejemplifica el procesamiento de las grabaciones y la obtención de los índices acústicos. *STFT son las siglas en inglés para la Transformada de Fourier en Tiempo Corto.

Todos los análisis se realizaron con el lenguaje de programación R versión 3.5.2.(R Core Team 2018) para los GLMM y para el cálculo de los criterios de información de Akaike se utilizaron los paquetes lme4 (Bates et al. 2019), lmerTest (Kuznetsova et al. 2019) y bbmle (Bolker 2017). Para la visualización y edición de gráficos y tablas se usaron los paquetes corrplot (Wei et al. 2017), tidyr (Wickham y Henry 2019), fitdistrplus (Delignette-Muller et al. 2019), sjPlot (Lüdecke y Shcwemmer 2018), broom (Robinson et al. 2019), ggplot2 (Wickham, Chang, et al. 2019) y dplyr (Wickham, Francois, et al. 2019). En el caso de la evaluación de normalidad de las variables ambientales y de las grabaciones se usaron los paquetes nortest (Gross y Ligges 2015), e1071 (Meyer et al. 2019), goft (Gonzalez-Estrada and Villasenor-Alva 2017) y moments (Komsta y Novomestky 2015). Las funciones fitGLMM, fitBinModels, plotQQMany, plotEffectMatrix, fueron desarrolladas por el M. en C. Everardo Robredo y aún no están publicadas.

Resultados

Obtención de datos

Se obtuvo un total de 3,363 grabaciones agrupadas a las variables como se muestra en la Tabla 4. Se recopilaron un total de 2532 horas de grabaciones para este trabajo. Con las grabaciones se obtuvieron 27,453 valores por índice por banda, dando un total de 1,647,240 coeficientes.

Se seleccionaron 8 grabaciones representativas del paisaje acústico de Nahá y se construyó un espectrograma para cada grabación (Figura 7). En el eje x se representa el tiempo en segundos; mientras que en el eje y se muestran las bandas de frecuencia. El color representa la intensidad de la señal en decibeles. Se puede observar que para ambos sitios hay diferencias entre temporadas. Del mismo modo se puede apreciar que existen cambios entre años y sitios respaldando el supuesto de que cada paisaje es único en el espacio y el tiempo.

Tabla 4. Número de grabaciones obtenidas por sitio, temporada y año.

Estado de variables	Número de grabaciones	Periodo
Bosque mesófilo de montaña; secas; 2013	269	1-21 abril
Bosque mesófilo de montaña; lluvias; 2013	493	1-31 agosto
Bosque mesófilo de montaña; secas; 2014	361	8-30 abril
Bosque mesófilo de montaña; lluvias; 2014	552	5-31 agosto
Bosque tropical perennifolio; secas; 2013	312	1-26 abril
Bosque tropical perennifolio; lluvias; 2013	514	1-31 agosto
Bosque tropical perennifolio; secas; 2014	396	7-30 abril
Bosque tropical perennifolio; lluvias; 2014	466	4-31 agosto
TOTAL	3363	

Mediante la prueba de Kruskal-Wallis se obtuvo que las variables de temperatura promedio (Figura 8a) y precipitación (Figura 8b) no presentaron diferencias significativas entre 2013 y 2014 ($X^2=2.9407$, $df=1$, $p= 0.08637$ y $X^2=2.6584$, $df=1$, $p= 0.103$, respectivamente). Sin embargo, en la figura 9b se puede observar que hubo un ligero cambio en el régimen de precipitación de un año al otro. Es decir que en 2014 llovió considerablemente menos que en 2013 durante los meses de enero, junio, julio, agosto, noviembre y diciembre, pero se presentaron más días con conteos de precipitación muy elevados lo cual niveló la precipitación total anual. Por otro lado, la temperatura promedio entre temporadas fue distinta ($X^2= 5.2956$, $df = 1$, $p= 0.021$; Figura 9a). Así mismo, la cantidad de lluvia precipitada entre temporadas fue significativamente diferente ($X^2= 23.381$, $df = 1$, $p= 1.329e-06$; Figura 9b).

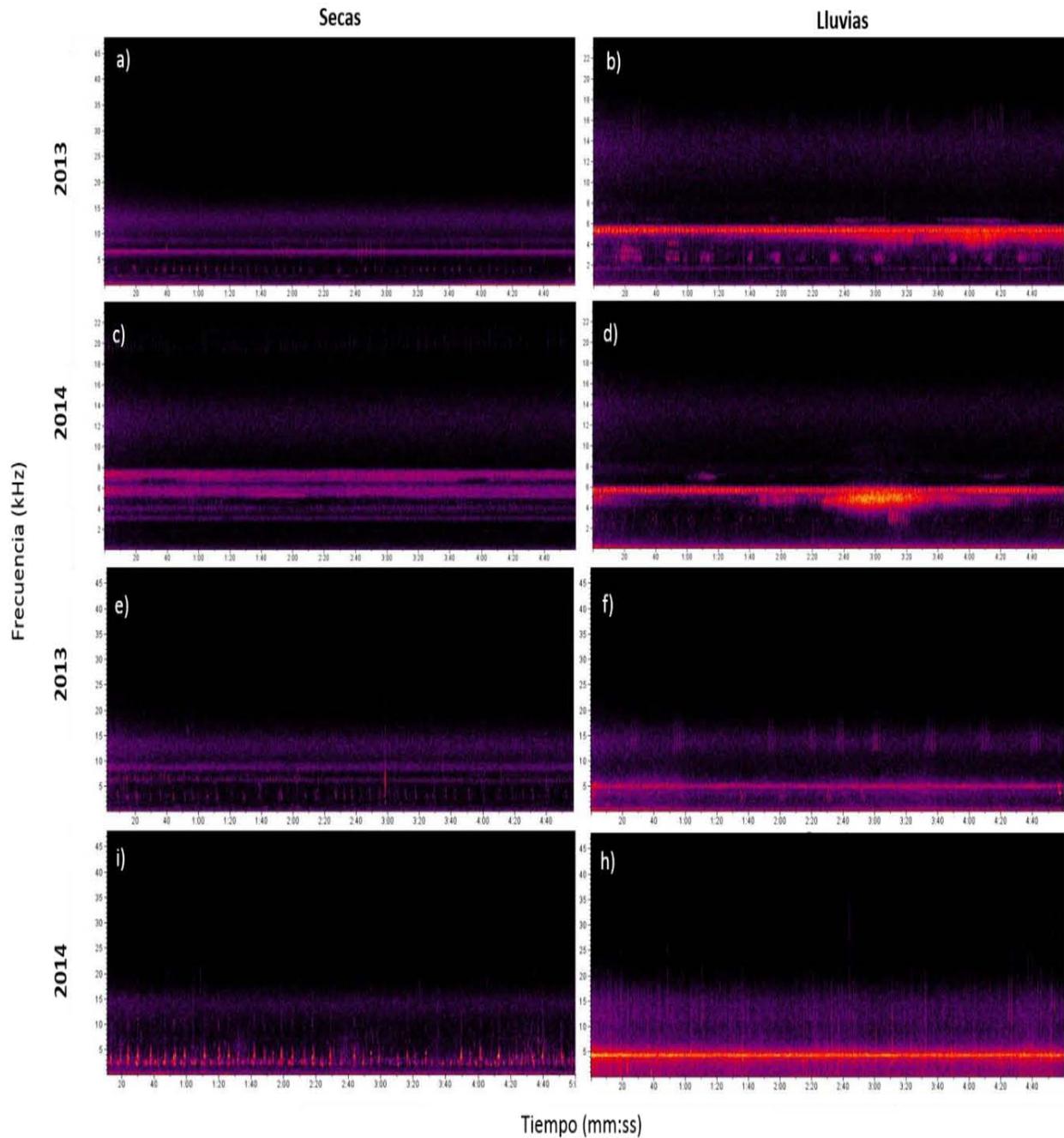


Figura 7. Espectrogramas del paisaje acústico del APFF Nahá, Chiapas. Los espectrogramas a-d corresponden al bosque tropical perennifolio mientras que los de la e-h son de bosque mesófilo de montaña

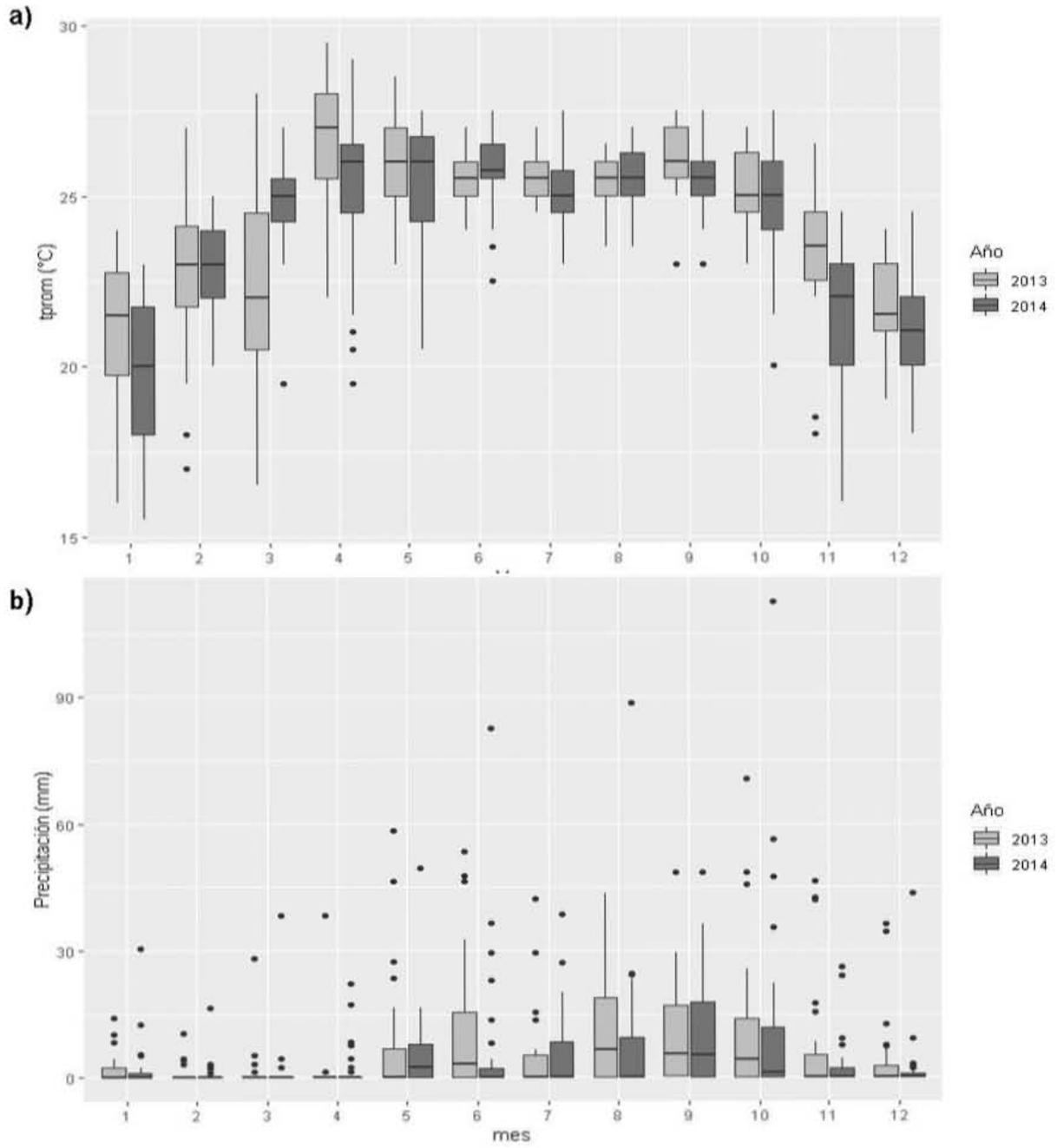


Figura 8. Cambios mensuales en a) temperatura promedio y b) precipitación durante los años 2013 y 2014 registrados por la estación meteorológica de Yaquintela, Chiapas.

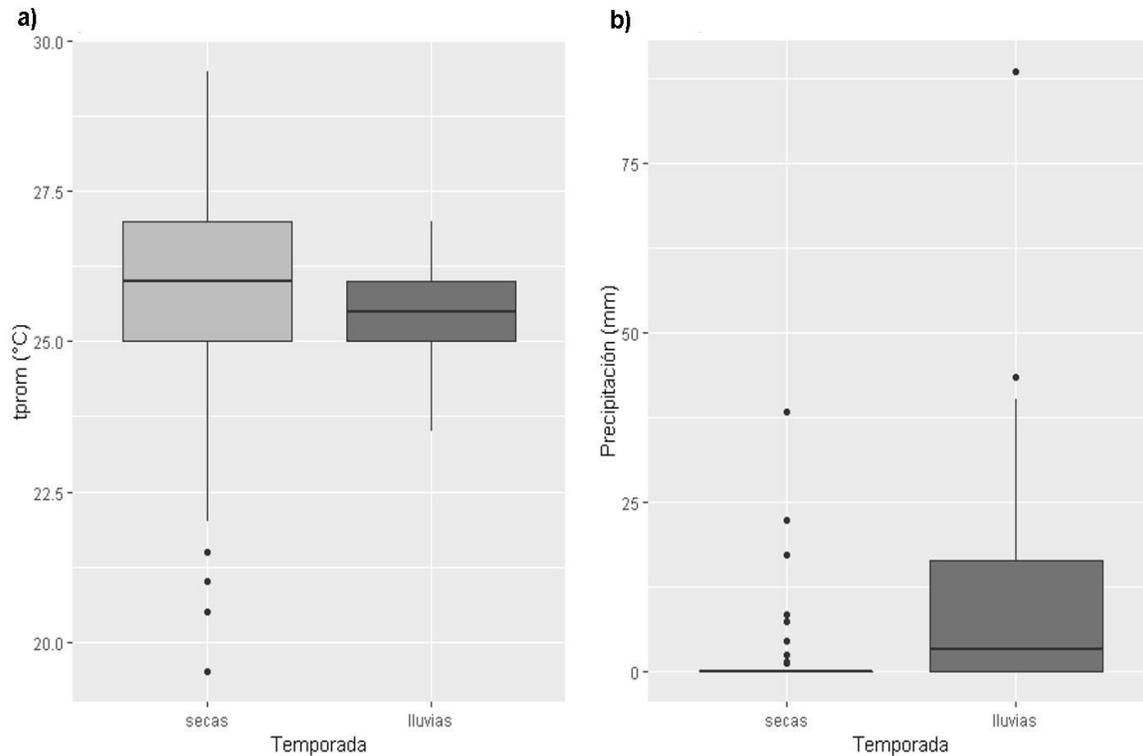


Figura 9. Cambios en a) temperatura promedio y b) precipitación durante las temporadas de lluvias y secas registrados por la estación meteorológica de Yaquintela, Chiapas.

Índices acústicos

Con los valores resultantes de la transformación de los formatos *.wav* con la STFT, se graficaron 12 espectrogramas de la energía de Parseval para visualizar los datos antes de obtener los coeficientes de los índices. Dichos espectrogramas corresponden a media y desviación estándar (Figura 10).

Con los coeficientes de los índices se construyeron 6 histogramas que muestran de manera visual, el tipo de distribución de los coeficientes de cada índice, así como la media y la desviación estándar (Figura 10). Cada histograma fue construido con 274,540 coeficientes correspondientes. En la figura 111 se puede observar que la distribución de todos los índices se ajusta a la distribución gamma.

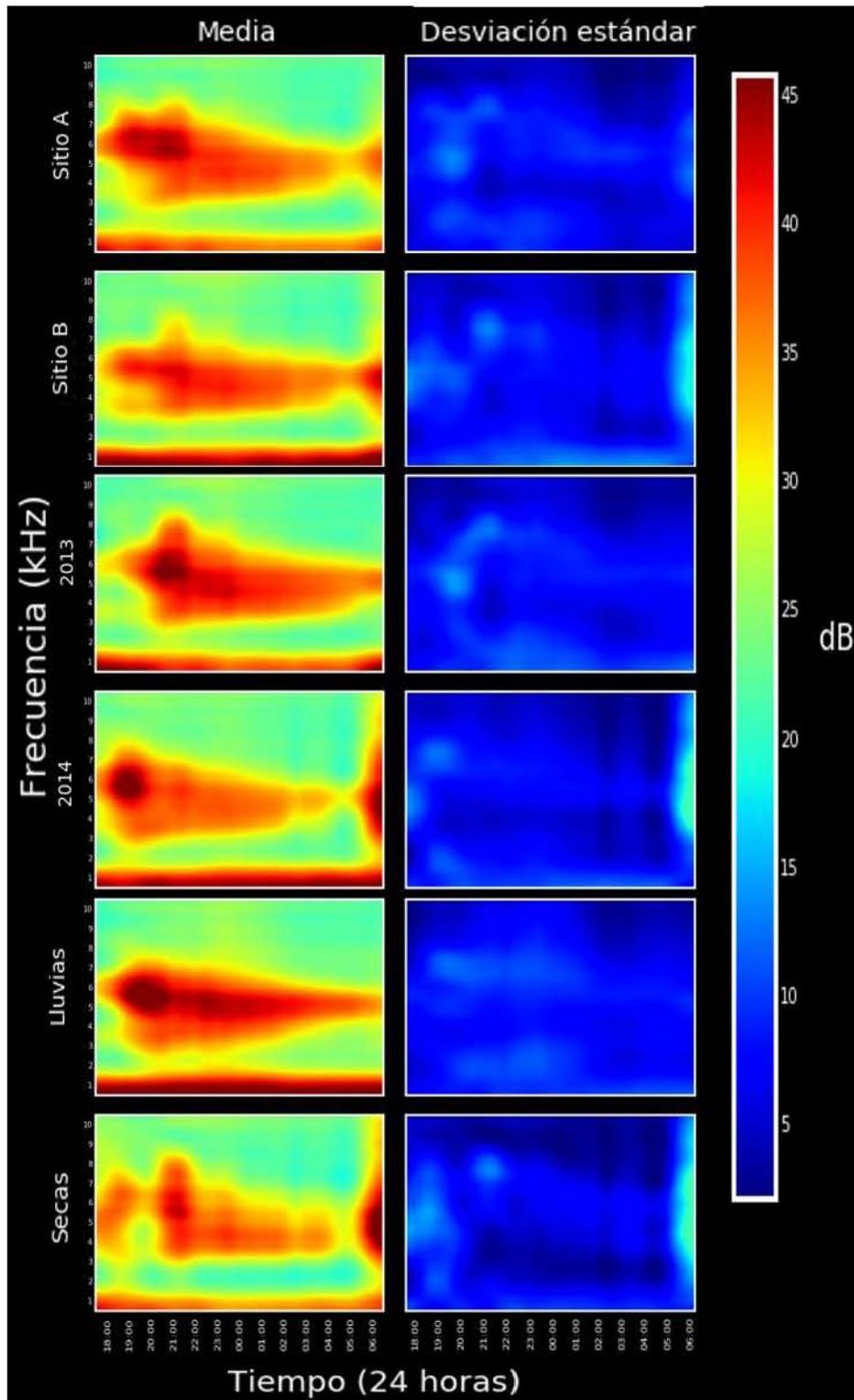


Figura 10. Espectrogramas diagnóstico construidos con los valores de estadística descriptiva (media y desviación estándar) para los datos procesados por la STFT de las variables sitio, año y temporada (de arriba hacia abajo). El tiempo está dado en el formato 24 horas y abarca de las 1800-0600 h.

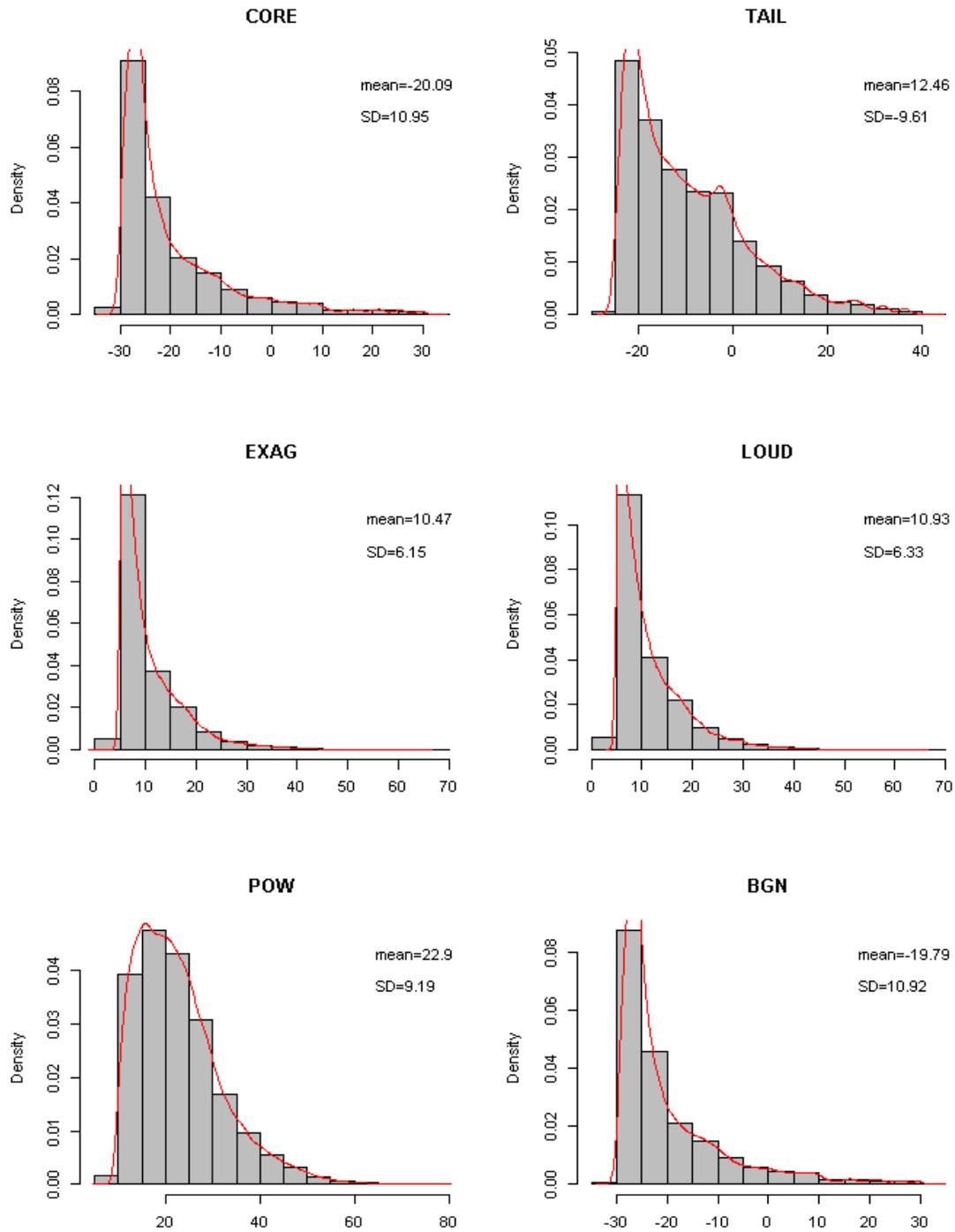


Figura 11. Histogramas diagnóstico de los coeficientes por índice. La línea roja muestra la distribución de los datos.

Identificación de variaciones en los paisajes acústicos

Con los coeficientes por índice se construyeron cuatro correlogramas correspondientes a: sitio, temporada, año y ajuste según AIC (Figuras 12-17), dando

un total de 18 figuras. Los correlogramas fueron graficados con los datos para el año 2014, la temporada de secas y el sitio de muestreo correspondiente a bosque mesófilo de montaña. Esto quiere decir que la información representada en ellos muestra las variaciones con respecto a dichos estados de las variables. A pesar de ser llamados correlogramas, estas gráficas no reflejan correlación sino informatividad de los delta AIC para cada punto hora:banda y diferencias entre los estados de las variables. El tamaño y la intensidad del color hacen referencia a esto. Para poder interpretar la información contenida en los correlogramas es necesario tener presente que el color azul indica variación positiva, mientras que el rojo señala variación negativa. Por último, la ausencia de círculo indica la falta de convergencia del modelo, sin embargo, el tache nos dice que el modelo no fue significativo para ese punto hora:banda en específico.

En la figura 12d, se puede apreciar la informatividad de los delta AIC de los modelos nulo y completo para el índice CORE, así como las diferencias entre estados de variable dictadas por el valor de T resultante de los GLMMs. El modelo completo resultó ser más informativo que el modelo nulo en las bandas de 1 y 2 kHz en un periodo de 1900-0600 h, de 1800 a 1900 h en las bandas 7-10 y de 1900-2000 h en las bandas 3 a 5 (Figura 12d). Para la variable de sitio (Figura 12a), se puede observar una tendencia al alta en las bandas 1 y 2 de 1900 a 0600 h, al igual que en las bandas 4 y 5 a las 1900 h. Por otro lado, se percibe una tendencia a la baja en las bandas 4, 7, 8, 9 y 10 a las 1800 h en el bosque mesófilo con respecto al bosque tropical. En cuanto a la temporada (Figura 12b) se puede apreciar una tendencia general a la baja en el paisaje de la temporada de secas con respecto a la de lluvias, especialmente para las bandas 1 y 2 de 2100-0600 h y de 1900-2000 h en las bandas 3-5. Por último, en la variable año se puede apreciar aumento en la energía de las bandas 6-8 a entre las 1900-2000 h en el año 2014 con respecto al año anterior (Figura 12c). Sin embargo, en las bandas 1 y 2 en el periodo de 0200 a 0600 h se puede percibir una ligera tendencia a la baja.

CORE

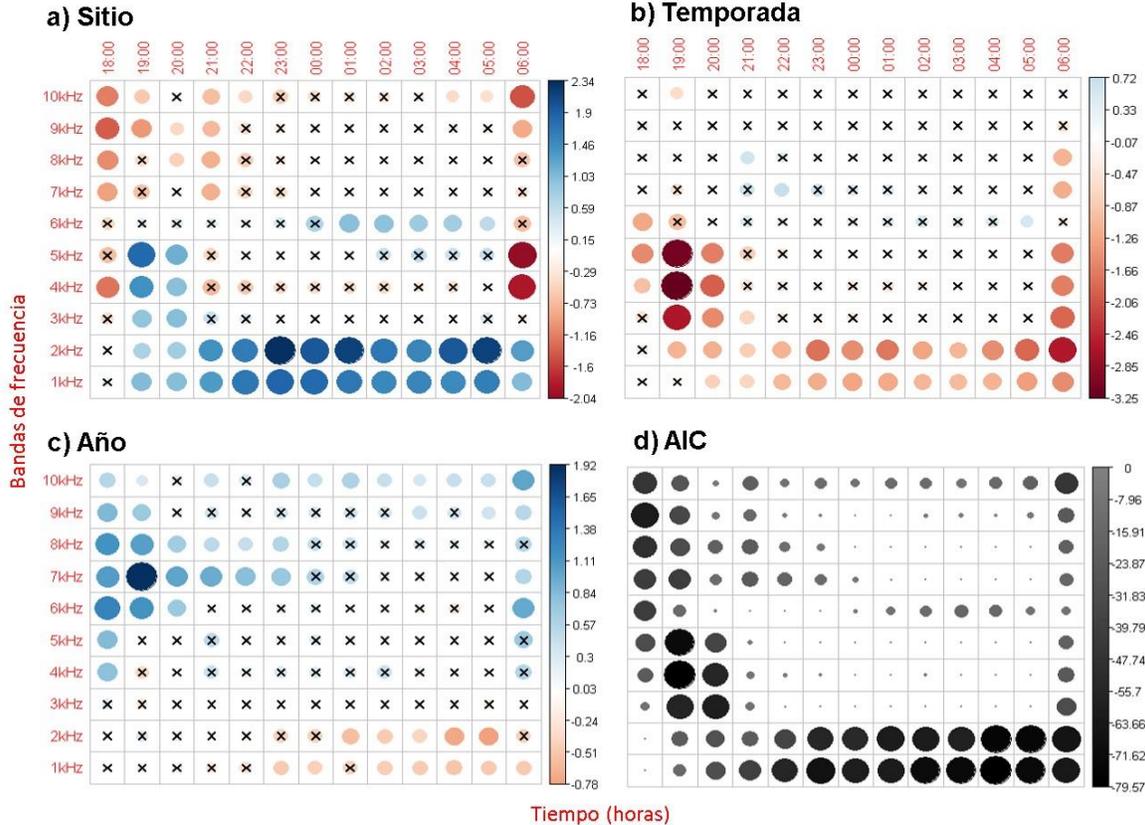


Figura 12. Diferencias en la variación del paisaje acústico de Nahá, Chiapas por sitio (a), temporada (b) y año (c) utilizando los coeficientes obtenidos para el índice CORE. También se puede observar la informatividad de los modelos con los deltas de los criterios de información de Akaike (d). El color rojo indica diferencias negativas con respecto al valor de la variable graficada, mientras que el color azul simboliza las diferencias positivas. Tanto el tamaño del círculo como la intensidad del color representan el nivel de ajuste del modelo. La ausencia de círculo representa la falta de convergencia del modelo, mientras que el tache indica que el modelo fue considerado no significativo. ***Más detalles en el texto.**

Para el índice TAIL, el correlograma de deltas AIC (Figura 13d) nos indica un alto grado de explicatividad en las bandas 7-10 a las 1800,1900 y 0600 h y en la banda 2 de 2300-0600 h. También en las bandas de 4 y 5 kHz entre 1900 y 2000 h y a las 0600 h en las bandas 1-5. Toda la banda 1 es altamente informativa. En el caso de la variable de sitio (Figura 13a) se puede observar como la energía en el bosque mesófilo tiende a aumentar de forma general en la banda 1 y de 2300 a 0600 h en la banda 2 con respecto al bosque tropical perennifolio. Por el contrario, a las 1800 h se observa un descenso en la energía de las bandas 7-10. Así mismo, hay una tendencia a la baja en las bandas 4,5,9 y 10 a las 0600 h. Para la temporada

de secas se puede apreciar una tendencia a la baja general más marcada en las bandas 1 y 2 de 2300 a 0600 h y en las bandas 3-10 a las 0600 h con respecto a la temporada de lluvias (Figura 13b). También hay algunos puntos específicos donde se pueden observar descensos de energía en secas como es en los canales 4,5 y 10 a las 1900 h y en la banda 6 a la 1800. Para terminar, en el año 2014 se aprecia una tendencia al alta en las bandas superiores a los 5 kHz especialmente entre las 1800 y las 1900 h y a las 0600 h (Figura 13c). Por otro lado, en las bandas 1 y 2 se pueden apreciar puntos de descenso en la energía particularmente entre las 1800-2100 h y 0400-0500 h.

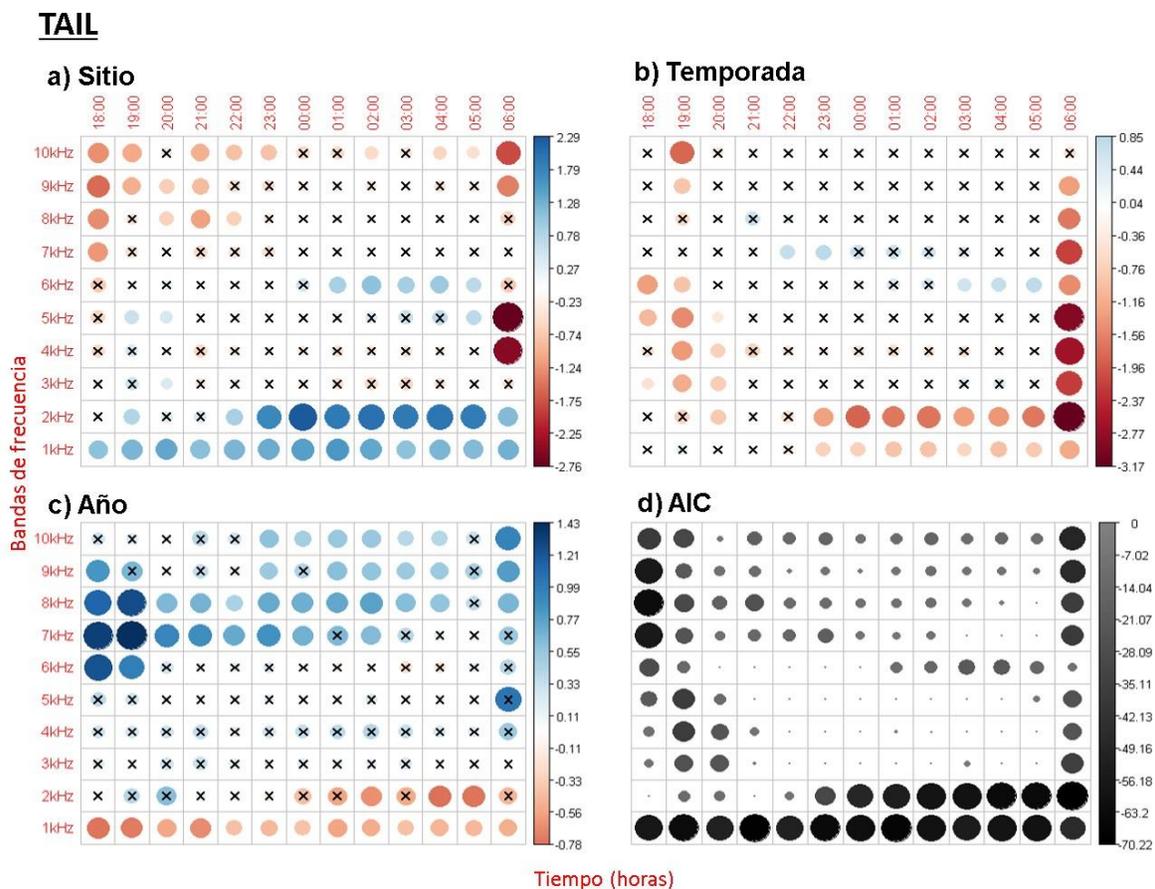


Figura 13. Diferencias en la variación del paisaje acústico de Nahá, Chiapas por sitio (a), temporada (b) y año (c) utilizando los coeficientes obtenidos para el índice TAIL. También se puede observar la informatividad de los modelos con los deltas de los criterios de información de Akaike (d). El color rojo indica diferencias negativas con respecto al valor de la variable graficada, mientras que el color azul simboliza las diferencias positivas. Tanto el tamaño del círculo como la intensidad del color representan el nivel de ajuste del modelo. La ausencia de círculo representa la falta de convergencia del modelo, mientras que el tache indica que el modelo fue considerado no significativo. ***Más detalles en el texto**

En el caso del índice EXAG (Figura 14d), los delta AIC más informativos corresponden a los períodos entre las 1800-2300 h en la banda 10, de 1800-2000 h en la banda 9 y de 0200-0600 h en la banda 3. También presentan alta informatividad las 1800 y las 0600 h en las bandas 7-10 y de 2000-2100 h en la banda 5. El bosque mesófilo tiende a tener disminuciones de energía con respecto al bosque tropical perennifolio en las bandas 7,8 ,9 y 10 a las 1800 h y de 2000-2300 h y a las 0600 h en la banda 10, así como en la banda 3 de 0200-0500 h (Figura 14a). A pesar de ser pocos los puntos en los que se presentan aumentos de energía, si hay algunos significativos como lo son la banda 2 en el periodo de 0200-0400 h y la banda 1 a las 1800 h. En la temporada de secas se presentó tanto disminución como aumento de la energía con respecto a la temporada de lluvias (Figura 14b). Esto se puede observar especialmente a las 0600 h en las bandas 2, 3, 7, 8 y 9 y a las 1900 h en las bandas 9 y 10, donde se aprecia una tendencia a la baja. La disminución de la energía se puede observar en la banda 3 de 0200-0500 h y a las 2100 h en la banda 2. Por último, en el año 2014 se muestra una ligera tendencia a la baja en las bandas 9 y 10 entre las 1900 y 2100 h con respecto al 2013 (Figura 14c). Pero entre las 2000-2100 en la banda 5 y a las 1800 h en las bandas 7 y 8 se observa un aumento de la energía.

EXAG

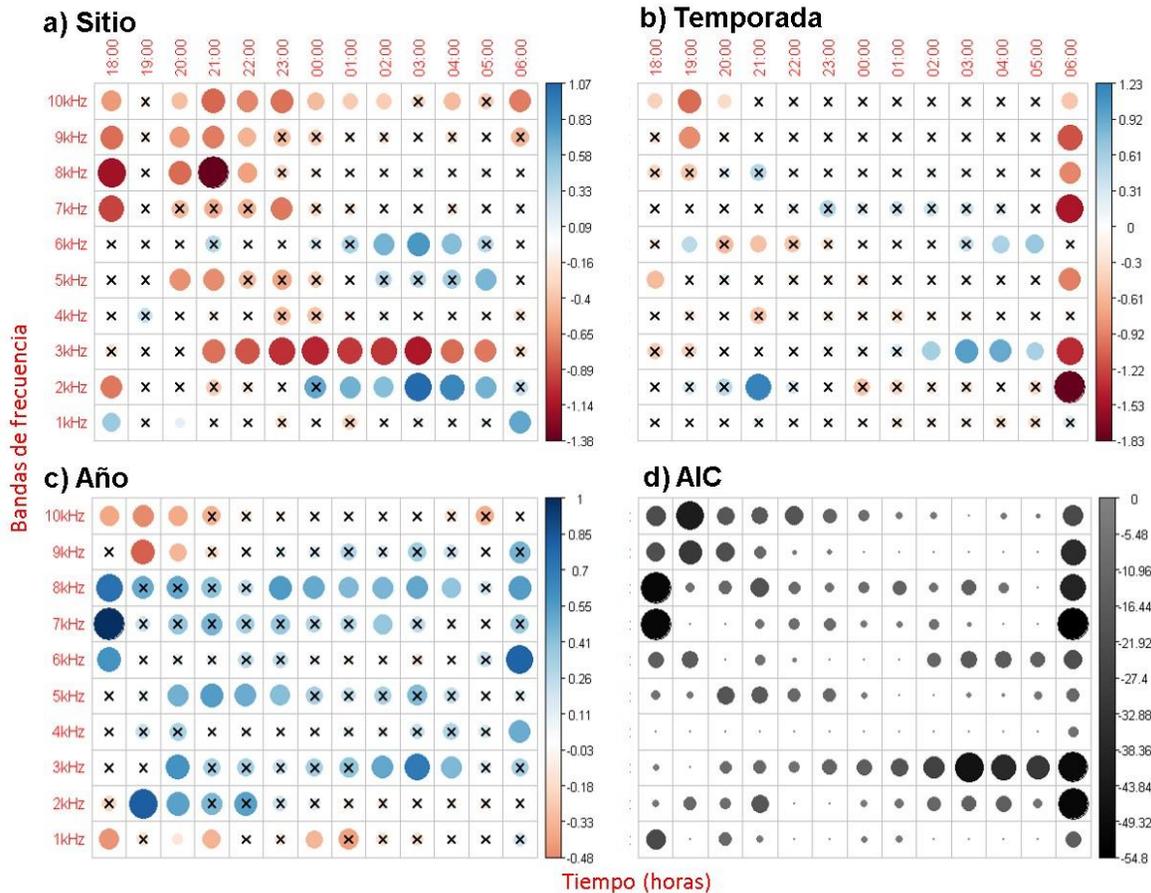


Figura 14. Diferencias en la variación del paisaje acústico de Nahá, Chiapas por sitio(a), temporada (b) y año(c) utilizando los coeficientes obtenidos para el índice EXAG. También se puede observar la informatividad de los modelos con los deltas de los criterios de información de Akaike (d). El color rojo indica diferencias negativas con respecto al valor de la variable graficada, mientras que el color azul simboliza las diferencias positivas. Tanto el tamaño del círculo como la intensidad del color representan el nivel de ajuste del modelo. La ausencia de círculo representa la falta de convergencia del modelo, mientras que el tache indica que el modelo fue considerado no significativo. ***Más detalles en el texto.**

Los delta AIC para el índice LOUD reflejan un alto grado de informatividad para las bandas 2-10 a las 0600 h, las bandas 7-10 a las 1800 h, en la banda 1a las 1800 h, a las 2100 h en las bandas 2 y 8, a las 2000 en la banda 5, de 0100-0500 h en la banda 3 y entre las 1900-2100 h en las bandas 9 y 10 (Figura 15d). Se puede apreciar una ligera tendencia al alta en la banda 1 a las 1800 h y a las 0600 h, mientras que en la banda 3 de medianoche a 0500 h y de la banda 7-10 a las 1800 h se observa una fuerte tendencia a la baja (Figura 15d). Esto mismo ocurre en la banda 8 a las 2100 h y en la banda 10 a las 0600 h. Para la variable de sitio se

puede observar una tendencia a la baja en las bandas 7-10 a las 1800 h y de 0100-0500 h en la banda 3 (Figura 15a). También a las 2100 h en la banda 8 y a las 0600 h en las bandas 4 y 10. Además se puede apreciar una ligera tendencia al alta en la banda 1 a las 1800 y a las 0600. En la temporada de secas la energía tiende a descender uniformemente en las bandas 2-10 a las 0600 y en las bandas 9 y 10 a las 1900 pero aumenta en la banda 2 a las 2100, en la banda 3 de 0100 a 0500 h y de 0400-0500 h en la banda 6 (Figura 15b). Para terminar, en el correlograma para la variable de año se puede observar una ligera tendencia a la baja en las bandas 9 y 10 a las 1900 h y en la banda 1 a las 1800 h (Figura 15c). Por otro lado, se puede ver una fuerte tendencia al alza muy localizada en las bandas 7 y 8 a las 1800 h y en la banda 6 a las 0600 h.

Los deltas AIC para el índice BGN (Figura 16d) indican un alto nivel de informatividad para las bandas 1 y 2 a partir de las 1900 h y hasta las 0600 h. De la banda 5-10 entre las 1800 h y las 1900 h, así como de las 1900 h a las 2000 h en las bandas 3-5. Para la variable de sitio (Figura 16a), se observa una fuerte tendencia al alta en las bandas 1 y 2 entre las 2000-0600 h y en las bandas 4 y 5 entre 1900 h y 2000 h. Mientras que a las 1800 en las bandas 7-10 y a las 1900 h en las bandas 9 y 10 se aprecia un descenso de la energía del bosque mesófilo con respecto al bosque tropical perennifolio. Por otro lado, en la temporada de secas la energía tiende a disminuir casi de manera general con respecto a la época de lluvias, pero especialmente entre 1900 h y 2000 h en las bandas 3-5 y en las bandas 1 y 2 entre 2200 y 0600 (Figura 16b). También en dos puntos específicos correspondientes a las 1800 h en las bandas 5 y 6 y a las 0600 h en la banda 3. Por último, en el año 2014 se aprecia un aumento en la energía en las bandas 5-10 entre las 1800-1900 h con respecto al año previo (Figura 16c). En la banda 1 entre la 0100 h y las 0600 h.

LOUD

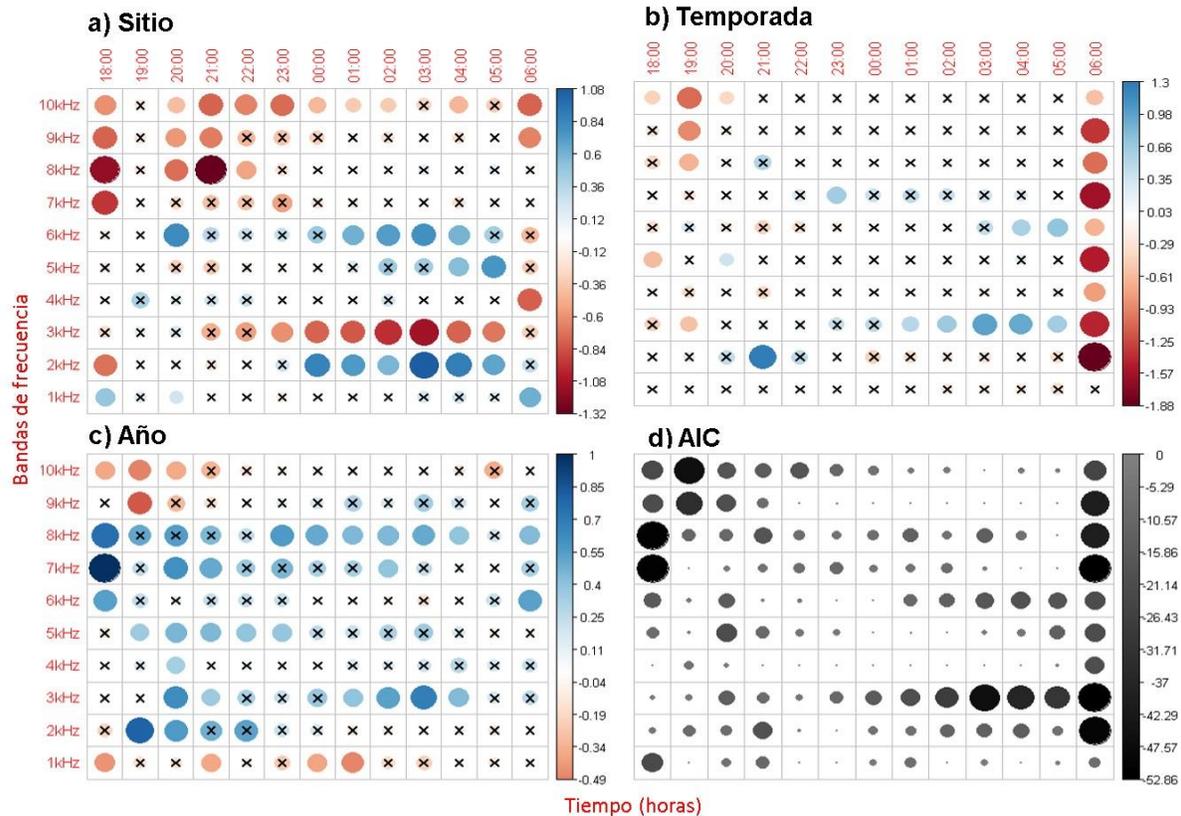


Figura 15. Diferencias en la variación del paisaje acústico de Nahá, Chiapas por sitio (a), temporada (b) y año (c) utilizando los coeficientes obtenidos para el índice LOUD. También se puede observar la informatividad de los modelos con los deltas de los criterios de información de Akaike (d). El color rojo indica diferencias negativas con respecto al valor de la variable graficada, mientras que el color azul simboliza las diferencias positivas. Tanto el tamaño del círculo como la intensidad del color representan el nivel de ajuste del modelo. La ausencia de círculo representa la falta de convergencia del modelo, mientras que el tache indica que el modelo fue considerado no significativo. ***Más detalles en el texto.**

Para terminar, en el índice POW se puede apreciar que las bandas y las horas más informativas de acuerdo a los delta AIC son la banda 1 en el periodo de 1800-2100 h y de 0000 a 06000 h, la banda 2 de 1900-2100 y de 0100-0600, la banda 5 de 1900-0300 h, la banda 8 a las 1800 h y de 2300-0400 h y en la banda 10 de 1800-2300 h y a las 0600 h (Figura 17d). También es muy explicativo en la banda 6 a las 1900 h y a las 2100 h, en la banda 7 a las 1800 h y a las 0600 h y en la banda 9 a las 0600. Para la variable de sitio (Figura 17a) existen tendencias al alta en la banda 1 de 1800-2100 h y de medianoche a las 0600 h, así como en la banda 6 a las 2100 h. En la banda 10 se aprecia una baja en la energía a las 1800

h y entre las 2000-2300 h. Entre las 2000-2300 h en la banda 5 y entre 0100-0300 h en la banda 3 también. A las 1800 hay un descenso en las bandas 7 y 8. En el caso de la temporada (Figura 17b), se aprecia un leve cambio positivo en la energía en la banda 1 de 1900-2200 h y en la banda 3 de 0200-0400 h, también en las bandas 5 y 6 a las 1900 h. Por el contrario, en la banda 10 se observa un descenso de la energía de 1900-2000, en la banda 5 a las 2100 h y a las 0600 h en las bandas 2, 3 y 7. Por último, en el año 2014 se observan tendencias al alta a partir de la banda 2 (Figura 17c). En especial en la banda 5 de 2000-0300, en la banda 8 a las 1800 h y de 2300-0400 h, a las 1800 h en la banda 7 y a las 0600 h en las bandas 8, 9 y 10. A pesar de apreciarse casi como una tendencia general, en la banda 1 la energía tiende a disminuir de 1800-2100 h y de medianoche a 0500 h.

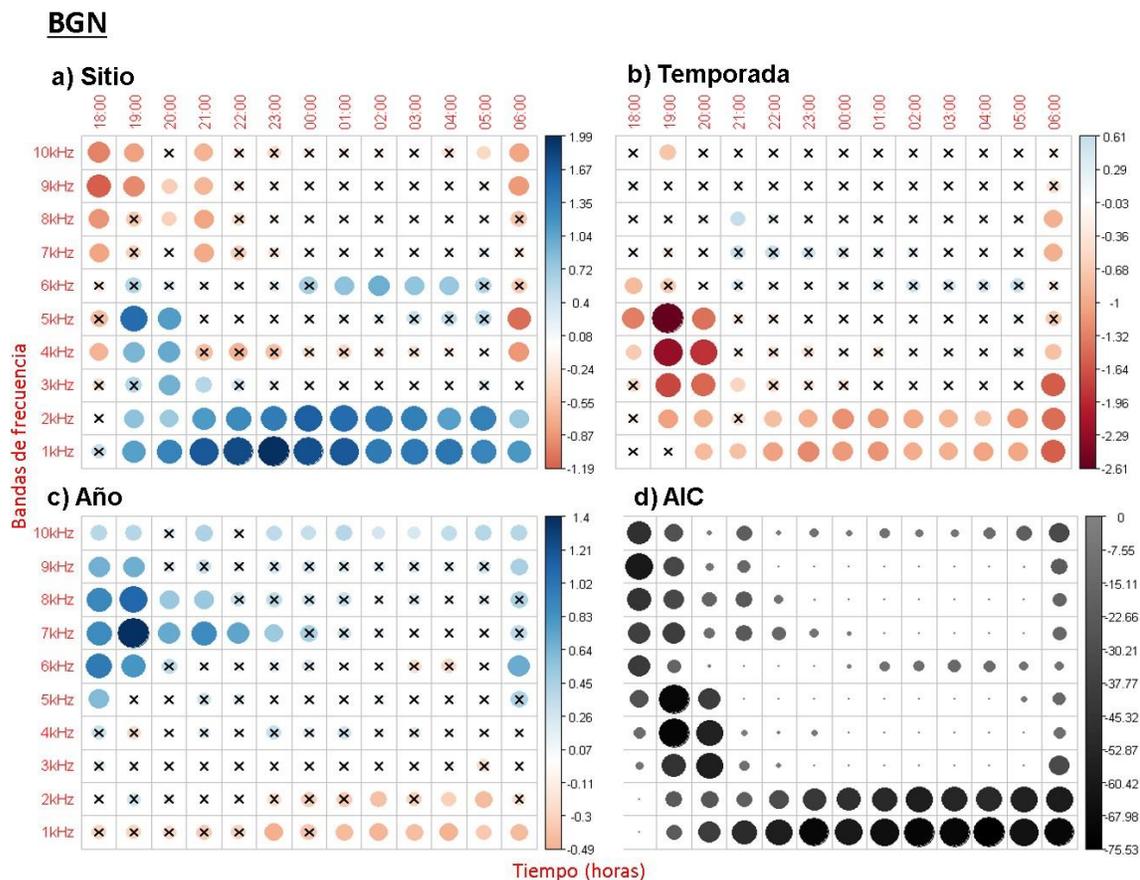


Figura 16. Diferencias en la variación del paisaje acústico de Nahá, Chiapas por sitio(a), temporada (b) y año (c) utilizando los coeficientes obtenidos para el índice CORE. También se puede observar la informatividad de los modelos con los deltas de los criterios de información de Akaike (d). El color rojo indica diferencias negativas con respecto al valor de la variable graficada, mientras que el color azul simboliza las diferencias positivas. Tanto el tamaño del círculo como la intensidad del color representan el nivel de ajuste del modelo. La ausencia de círculo representa la falta de convergencia del modelo, mientras que el tache indica que el modelo fue considerado no significativo. ***Más detalles en el texto.**

POW

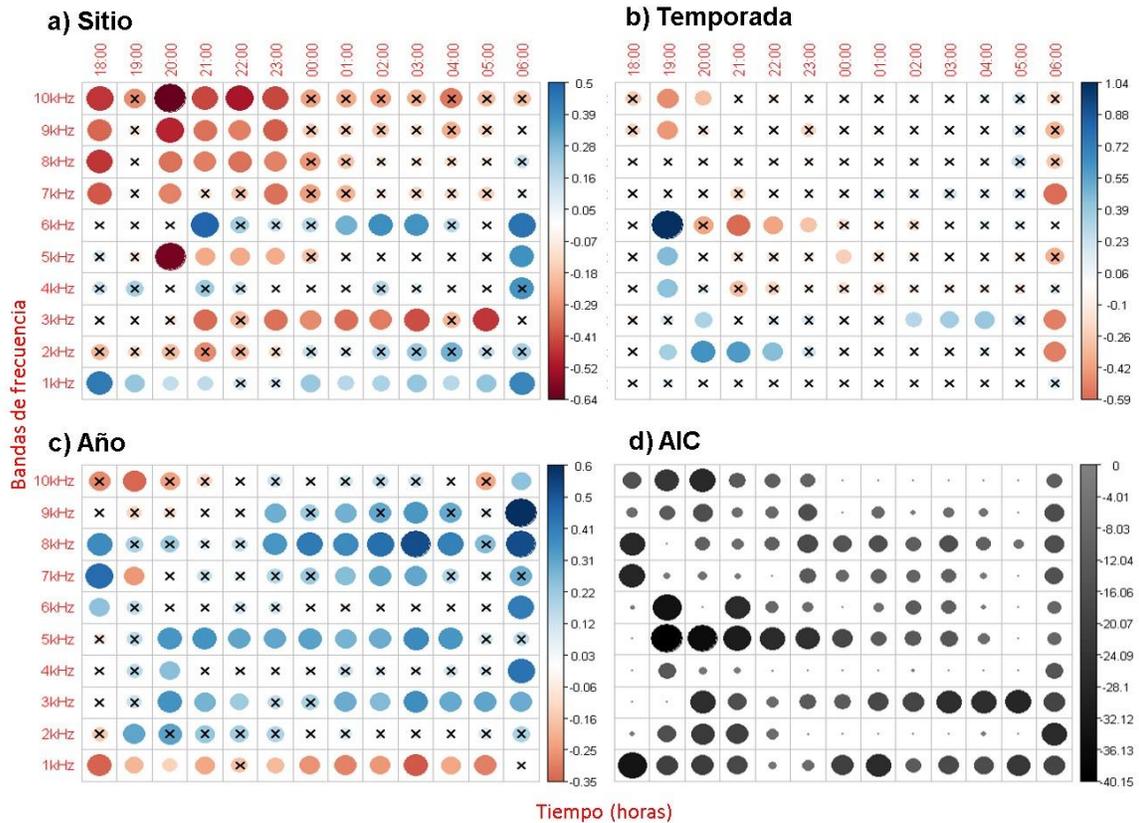


Figura 17. Diferencias en la variación del paisaje acústico de Nahá, Chiapas por sitio(a), temporada (b) y año(c) utilizando los coeficientes obtenidos para el índice POW. También se puede observar la informatividad de los modelos con los deltas de los criterios de información de Akaike (d). El color rojo indica diferencias negativas con respecto al valor de la variable graficada, mientras que el color azul simboliza las diferencias positivas. Tanto el tamaño del círculo como la intensidad del color representan el nivel de ajuste del modelo. La ausencia de círculo representa la falta de convergencia del modelo, mientras que el tache indica que el modelo fue considerado no significativo. ***Más detalles en el texto.**

Aunque cada índice se comporta de forma diferente y explica cosas distintas, se pueden apreciar patrones generales en ellos. Tal es el caso de los cambios de energía entre las 1800 y las 2000 h y a las 0600 h que corresponden a los periodos asociados a los coros de atardecer y amanecer respectivamente sin tomar en cuenta la variable (Figuras 12-17). De igual forma, para los índices CORE, TAIL y BGN (Figuras 13b, 13b y 16b) se puede apreciar una tendencia general a la disminución de la energía en la temporada de secas. Mientras que en el año 2014 se puede observar una tendencia al alza de la banda 5 a la 10 en todo el paisaje excepto en los índices EXAG, LOUD y POW en los cuales se atenúa un poco en las últimas bandas donde la energía tiende a disminuir (Figuras 12c-17c). Por el

contrario, en el caso de la variable de sitio se observa que la tendencia de aumento de la energía se concentra en las bandas 1 y 2 mientras que el resto de las bandas tienden a disminuir en mayor o menor medida (Figuras 12a-17a). A esta variación le denominaremos de aquí en adelante: efecto mixto. En el caso de los delta AIC (Figuras 12d-17d) se observó que los modelos más informativos coincidieron con las bandas 1 y 2 y con los periodos correspondientes a los coros en casi todas las bandas de frecuencia.

Discusión

La importancia del estudio y conservación de la biodiversidad a todos los niveles se ha incrementado exponencialmente en las últimas décadas debido al ritmo al cual se han estado explotando los recursos en el planeta (Hughes 2000, Achard et al. 2002, Ewers 2006, Botkin et al. 2007, Achard et al. 2014, Jorge et al. 2018). Los métodos convencionales en ecología ya no son suficientes para satisfacer la demanda de estudios y medidas en contra de los cambios globales. Por esta razón, nuevos e innovadores métodos se han abierto camino como es el caso de la ecología del paisaje acústico (Dumyahn y Pijanowski 2011, Pijanowski, Farina, et al. 2011, Farina et al. 2014, Moscoso-Rosero 2018; Robledo-Esquivelzeta, *datos no publicados*).

Índices acústicos: su interpretación y futuro en la ecología

En el área de la Bioacústica se utiliza un gran número de índices con diferentes enfoques y propósitos, no obstante, muchos trabajos enfocados en paisajes acústicos no utilizan los índices adecuados para estudiarlos. En este apartado discutiremos las diferencias encontradas entre nuestros índices y aquellos de la literatura y la importancia de utilizar los métodos adecuados para el estudio del paisaje acústico.

A pesar de sus diferencias, nuestros índices y los de *Burivalova y colaboradores* (2017) son mucho más informativos a nivel paisaje que otros índices usados en ecología acústica ya que buscan analizar el paisaje sin sesgar el cálculo hacia un solo grupo. Sin embargo, nuestros resultados muestran diferencias en la

sensibilidad entre nuestros índices y los de *Burivalova y colaboradores (2017)*. Esto se puede apreciar en las figuras 13d y 17d donde se observa que la informatividad provista por los delta AIC de TAIL es mayor que aquella del índice POW. Esta diferencia en informatividad nos indica que la modificación que se realizó a TAIL con respecto a POW fue efectiva ya que filtra mejor el ruido de fondo proveniente de fuentes distintas. En términos biológicos, TAIL podría ayudarnos a identificar coros de anfibios e insectos en días lluviosos con mayor facilidad, al igual que asistiría en la identificación de posibles asociaciones entre las condiciones ambientales con ciertos fenómenos biológicos como las temporadas reproductivas. Así mismo, en las figuras 12 y 16 se pueden percibir que los delta AIC de CORE son ligeramente más altos que los de BGN, indicando una mayor informatividad del primero. Las diferencias entre estos índices indican una sensibilidad mayor a los ruidos de fondo como condiciones ambientales de lluvia y viento. Es importante discriminar de forma correcta todos los componentes del ruido de fondo para así poder identificar sonidos de alta energía e importancia biológica como vocalizaciones o estridulaciones. Parece ser que nuestros índices proveen más información a nivel paisaje que los de *Burivalova y colaboradores (2017)* al haber diferencias significativas en los delta AIC, sin embargo, es necesario realizar más estudios bajo otras condiciones para corroborar lo anterior.

Con respecto a la adecuada selección de métodos en Bioacústica aún no existe un consenso dentro de la comunidad acústica sobre si el uso de índices está bien implementado o no, pero lo que resaltan algunos autores es que la selección del o de los índices a usar debe de hacerse cuidadosamente y siempre considerando el objetivo principal del estudio (Fuller et al. 2015, Burivalova et al. 2017, Ferreira et al. 2018, Jorge et al. 2018). Esto debido a que la ineficacia de los índices muchas veces recae en la inadecuada selección de estos para el tipo de estudio propuesto. Por ejemplo, el caso de *Ferreira y colaboradores (2018)* quienes evaluaron el desempeño de seis índices acústicos en una sabana brasileña y concluyeron que ADI y ACI no son índices confiables para monitorear la riqueza ni realizar estudio de paisaje ya que están sesgados a aves y dejan fuera valiosa información aportada por anfibios e insectos. De igual manera, *Fuller y*

colaboradores (2015) analizaron seis índices (AEI, H, NDSI, ACI, ADI y BIO) y determinaron que ACI y BIO no son adecuados para paisaje ni para atributos de biodiversidad ya que tienen un sesgo de grupo (aves). También encontraron picos de actividad en el periodo nocturno y resaltan la importancia de estudiar este periodo. Concluyeron que los tres índices que mejor representaron el paisaje acústico fueron H, NDSI y AEI. *Burivalova y colaboradores* (2017) lograron identificar los picos de actividad (coros de amanecer y atardecer) en un gradiente de perturbación en Papúa Nueva Guinea utilizando los índices BGN y POW para paisajes de 24 horas. Nuestros resultados respaldan encontrado por *Burivalova y colaboradores* (2017) ya que tanto POW como BGN identificaron los picos de actividad del APFF Nahá de forma correcta. Nuestros índices CORE y TAIL, al ser modificaciones de los de la literatura, también identificaron correctamente los coros de amanecer y atardecer. Por otro lado, EXAG logró identificar sonidos de alta energía con ruido de fondo persistente. Este índice es importante ya que filtra sonidos de alta intensidad. Por último, el índice LOUD nos permite identificar paisajes acústicos que resalten sobre otros ya que los valores que se obtienen son más estables que los de los otros índices. Un ejemplo de esto sería un estudio anual en el cual se evaluarán las diferencias entre las temporadas o los meses y donde se pudieran observar los cambios más evidentes a lo largo del año con los valores de LOUD.

Considerando lo anterior, es importante escoger el o los índices adecuados para el estudio que se llevará a cabo basándose en los objetivos planteados ya que una mala elección del método puede resultar en errores de interpretación de la información lo cual se traduciría en un incorrecto entendimiento de los fenómenos biológicos ocurridos. Cabe mencionar que este problema no es único de la Bioacústica y que también se presenta en la ecología tradicional (Cousins 1991, Jost, Lou & González-Oreja 2012, Morris et al. 2014, Prati et al. 2014). Nuestros resultados respaldan los resultados de *Burivalova y colaboradores* (2017) sobre el uso de POW y BGN para el estudio del paisaje acústico ya que demostraron tener una alta sensibilidad a los cambios. Del mismo modo, nuestros índices resultaron ser eficientes para el estudio de los paisajes acústicos al demostrar alta sensibilidad

en la identificación de sonidos de alta energía (asociados con biofonías) y discriminación de ruido de fondo (asociado a geofonías y antropofonías). Para poder tener un acercamiento completo y real a un paisaje acústico los estudios, idealmente, deben de obtener grabaciones de 24 h ya que el paisaje nocturno ha resultado ser muy informativo según nuestros resultados y como lo reportan *Fuller y colaboradores (2015)* y *Ferreira y colaboradores (2018)*. También encontramos que los periodos nocturnos son altamente informativos y que la investigación acústica en grupos vocales como anfibios e insectos, es muy reducida y no contemplarlos representa un sesgo en los estudios de paisaje acústico (Fuller et al. 2015, Ferreira et al. 2018, Jorge et al. 2018). Por último, coincidimos con que se deben realizar estudios en diversos tipos de ecosistemas ya que los resultados de los índices varían mucho con la localidad y en algunas pueden no ser tan útiles como en otras (Fuller et al. 2015).

Patrones espaciotemporales en los paisajes acústicos de Nahá, Chiapas

Nuestros resultados coinciden con los presentados en la literatura (Mullet et al. 2016, Deichmann et al. 2017, Buscaino et al. 2016) ya que comprobamos que los paisajes son distintos entre sí a pesar de las consistencias identificadas en el año, el sitio o la temporada confirmando la teoría de que cada paisaje es único en el espacio y el tiempo (ver Figura 7). Los periodos de mayor actividad vocal en Nahá corresponden a las 0500-0700 h y de 1800-2030 h (Figuras 12-17). Estas consistencias temporales coinciden con lo reportado como coros de amanecer y atardecer y las bandas dominantes de biofonías (bandas de 3-4 kHz; Saunders 1947, Kacelnik and Krebs 1983, Ord 2008, Mullet et al. 2016, Deichmann et al. 2017). También encontramos un alto grado de ocupación en las bandas 1 y 2 en el periodo intermedio (2100-0400 h) correspondiente a geofonías como lluvia ligera y viento (Figura 18; Pijanowski, Villanueva-Rivera, et al. 2011). Se teoriza que las horas de mayor actividad son concurridas gracias a la baja atenuación que sufren las vocalizaciones debido a condiciones particulares del ambiente (Kacelnik y Krebs 1983, Brown y Handford 2003), factores ecofisiológicos (e.g. disminución del éxito de forrajeo; Kacelnik y Krebs 1983, Begon et al. 2006) y conductuales (e.g. defensa

de territorio; Kacelnik y Krebs 1983, Ord 2008). Se ha comprobado que tanto las variables ambientales como la duración del día también modifican la temporalidad de los coros. La lluvia puede retrasar el coro de amanecer y adelantar el de atardecer (Saunders 1947, Silva et al. 2014, Da Silva et al. 2015), mientras que la luz artificial puede prolongar el inicio de los coros de amanecer (Silva et al. 2014, Da Silva et al. 2015). Esto último puede ser importante en condiciones de luz natural ya que en regiones con estacionalidad marcada se produce un recorte o un alargamiento del fotoperiodo que puede conducir a modificaciones del reloj circadiano y por ende modificar la temporalidad de los coros (Earnest y Turek 1985, Letelier et al. 2004).

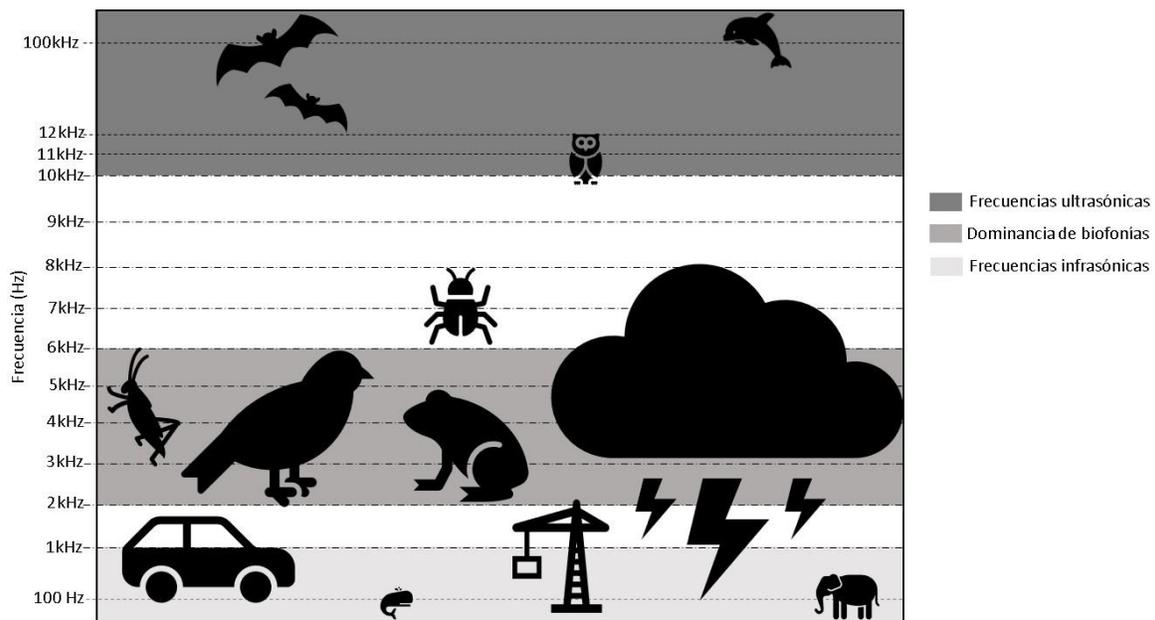


Figura 18. Frecuencias de emisión de sonido comúnmente ocupadas por antropofonías, geofonías y biofonías. El símbolo representa el grupo que emite en cierta frecuencia mientras que el tamaño indica en qué rango aproximado se ubica dicho símbolo.

En el caso de la variable de sitio se encontró que en el bosque mesófilo de montaña hubo una tendencia general a la alta en las bandas 1 y 2 con respecto al bosque tropical perennifolio (Figuras 12a-17a). Mientras que en las bandas 3-10 se observa en mayor o menor medida un descenso de actividad en el mesófilo con especial enfoque en las bandas 7-10 a las 1800 h y a las 0600 h (Figuras 12a-17a). Esto puede estar relacionado con la composición y la estructura de cada uno de los

tipos de vegetación muestreados. El bosque tropical perennifolio tiene una mayor cantidad de especies y se piensa que las especies de áreas cálidas vocalizan más que aquellas de regiones templadas y frías donde las señales visuales son más utilizadas que las acústicas debido a la baja cobertura vegetal (Begon et al. 2006, Áreas de Protección de Flora y Fauna Nahá y Metzabok 2011, Figueroa Díaz Escobar 2014, Farina y James 2016). Sin embargo, en las principales bandas de biofonías (3-6 kHz) un cambio en la actividad de sitio a sitio no es tan evidente. Esto se puede deber a que el cambio de tipo de vegetación no es tan conspicuo en la zona donde se colocaron las grabadoras (ver Figura 4) y puede estar ocurriendo un intercambio de especies dentro del APFF Nahá.

Para todos los índices se percibió un decremento en la actividad entre temporadas correspondiente con la hora pico del coro de amanecer (0600) y de 1900-2000 h en las bandas 2-6 para los índices CORE, TAIL y BGN en la temporada de secas (Figuras 12b, 13b y 16b). Esto significa que todos los índices detectaron un descenso en la tendencia de actividad del coro de amanecer en la temporada de secas con respecto a la de lluvias. Esto podría estar ligado a la fenología reproductiva de aves y anfibios, ya que se ha reportado que los periodos reproductivos coinciden con los meses de lluvias (*e.g. explosive breeders*; Pijanowski, Villanueva-Rivera, et al. 2011, Todd et al. 2011, Plenderleith et al. 2018). El único caso distinto fue POW (Figura 17b), donde se observó un aumento de la actividad en secas en la banda 2 de 1900-2200 h y en las bandas 4-6 a las 1900 h. El cambio de actividad también puede estar relacionado con la saturación en las bandas de baja frecuencia (1 y 2 kHz) debido a la lluvia en el mes de agosto.

En el caso de la variable de año es necesario tomar en cuenta que en 2014 se inició un ciclo del fenómeno meteorológico “El Niño” (Pereyra-Díaz et al. 2004, Ludescher et al. 2014), periodo que concluyó en 2016. Este fenómeno sucede cuando corrientes de agua caliente suben a la superficie provocando graves sequías en el hemisferio norte (Pereyra-Díaz et al. 2004, Ludescher et al. 2014). A pesar de que no hubo una diferencia significativa entre la cantidad de lluvia precipitada del 2013 al 2014 es importante resaltar que el 2014 fue el inicio de este fenómeno que duró dos años, por lo cual la actividad de los años siguientes pudo haberse visto

afectada. Del mismo modo, cabe señalar que el régimen de lluvias no fue el mismo de un año al otro (ver figura 10b). En el caso del mes de mayo, la diferencia no fue evidente, mientras que en agosto si hubo un descenso en la precipitación promedio en 2014. CORE y BGN son los encargados de identificar sonidos de fondo por lo que una tendencia a la baja nos indica que hubo una menor cantidad de actividad en el año 2014 con respecto al año anterior. Por otro lado, los sonidos de alta energía en especial entre las bandas 6-9 de 1800-2000 h tendieron a aumentar en 2014 (Figuras 12c y 17c). Estos sonidos pueden estar relacionados con insectos, pero no se determinó el origen de estos para este trabajo. Así mismo puede ser que los cambios en la actividad se hayan presentado por cambios en la composición y/o abundancia de las comunidades de anfibios (Duellman 2011). No obstante, esto no está confirmado y se requerirían hacer muestreos tradicionales de anfibios e insectos para determinar si existen fluctuaciones en la composición y la abundancia de las comunidades a lo largo de los años.

Los paisajes acústicos como herramientas para la ecología y la conservación

Los resultados de este estudio proveen evidencia de cómo el uso de índices acústicos puede ayudar no sólo a describir sino a monitorear y conservar la biodiversidad en áreas remotas. Nuestros datos permitirán estudiar los cambios en el estado de conservación de Nahá en los próximos años ya que se han construido caminos en los últimos años, lo cual pudo haber incrementado el sonido antropogénico en la región (Excélsior 2014, Gobierno Federal y Estatal 2016). Esto puede provocar un desplazamiento en la comunidad acústica bajo la hipótesis del nicho acústico. Laiolo (2010) hizo una revisión de artículos sobre bioacústica e intrusión antropofónica y concluyó que la existencia de variación acústica en una comunidad puede evidenciar perturbaciones en estados tempranos que serían potencialmente graves si éstas persisten. Recordemos que el ruido y la contaminación auditiva son efectos colaterales del desarrollo humano y son un tipo de contaminación ampliamente distribuida y relativamente poco estudiada. Por ello, es necesario considerar métodos que tomen en cuenta este tipo de perturbación asociada al desarrollo humano. Conocer las características de las comunidades

acústicas en regiones con prospección de desarrollo y alto grado de conservación ayudaría a planear mejor la creación áreas naturales protegidas y de vías de comunicación. Por ejemplo, en 2018, Herrera-Montes propuso el uso de los paisajes acústicos para determinar la efectividad de las zonas buffer en parques naturales. Ella identificó que en la zona núcleo se presentaban más especies endémicas y raras, pero casi ninguna especie introducida. Mientras tanto la zona buffer registro una mayor riqueza asociada a especies generalistas e introducidas. Por otro lado, el nivel de antropofonías fue mucho mayor en las zonas recreativas y buffer que en la zona núcleo por lo cual la autora propone el uso del paisaje acústico como herramienta auxiliar para el monitoreo del estado de las áreas naturales protegidas (Herrera-Montes 2018).

Varios autores señalan la importancia de preservar pruebas del estado conservado de un ecosistema, sin embargo, muchas veces lo único que queda del ecosistema original son los remanentes y estos suelen diferir en la estructura y funcionabilidad de los ecosistemas originales (Bender et al. 1998, Hughes 2000, Prugh et al. 2007, Farina y James 2016). Grabar los paisajes acústicos sanos puede ser la mejor opción para preservar pruebas del estado original de los ecosistemas ya que en ellos se puede apreciar tanto la estructura como parte de la función de los componentes del lugar, además las grabaciones son fáciles de almacenar a diferencia de colecciones de material biológico que requiere preservación y mucho espacio (Dumyahn y Pijanowski 2011, Deichmann et al. 2018, Ferreira et al. 2018, Krause 2002). Los datos utilizados en este estudio pueden contribuir al conocimiento del estado de conservación del APFF Nahá si se comparan con datos actuales de los sitios. Nuestros índices pueden ser útiles para el estudio de la ecología, la conservación y el monitoreo en un contexto macro ecológico.

Este enfoque es de especial relevancia para Nahá ya que esta región de la selva Lacandona está expuesta a la deforestación, cambio de uso de suelo y construcción de vías de comunicación (Excélsior 2014, Gobierno Federal y Estatal 2016). Por eso la importancia del presente trabajo de describir las condiciones del área como un antecedente del estado de conservación de la localidad.

Importancia de los paisajes acústicos: perspectivas éticas, legales y culturales

Aunado a la importancia ecológica de los paisajes acústicos está la importancia social. Pero ¿por qué son importantes para el ser humano? Krause menciona que el poder apreciar los paisajes acústicos naturales es un derecho de todo ser humano. Así mismo, los sonidos naturales han moldeado nuestras culturas en forma de bailes, cantos y vocablos (Krause 2002). También menciona que gracias a la bioacústica se ha logrado entender la importancia de los sonidos naturales en nuestro desarrollo social, personal y cultural y compara la relevancia de los paisajes acústicos sanos con la del agua potable y el aire limpio. Las declaraciones de Krause y otros científicos han puesto sobre la mesa el tema de la protección legal de los sonidos naturales. Un ejemplo de un primer acercamiento es el trabajo de *Thorne y colaboradores* (Thorne y Shepherd 2013). Ellos revisaron el concepto de silencio como un valor ambiental relacionado a las características de un área para proveer paz, tranquilidad y relajamiento en Australia y Nueva Zelanda. Mencionan que, en ambos países, este valor se legisló con el propósito de disminuir los efectos negativos del ruido en los seres humanos y para garantizar el bienestar de éstos (Thorne y Shepherd 2013). También mencionan que haber legislado la importancia de un ambiente libre de ruido ha sido un paso importante, sin embargo, aún existen lagunas legales asociadas a la interpretación antropocéntrica de los efectos del ruido y las entidades que proponen las leyes. Desde el punto de vista cultural, Sinamai (2018) propone el uso del paisaje acústico como coadyuvante para la preservación cultural en Zimbabue. Sinamai hace hincapié que cada cultura define ruido y sonido de forma particular y que en este contexto no es apropiado generalizar un significado. Él menciona que un paisaje cultural no está completo sin los sonidos que las personas que lo componen aprecian y veneran. Sinamai (2018) no solo señala la importancia del paisaje acústico natural, sino que también resalta la necesidad de comprender la relación entre los paisajes culturales, los sonidos naturales y las comunidades. Otro ejemplo de la relación de los sonidos naturales con la cultura es la contribución que tienen en la creación, la difusión y la preservación de costumbres y tradiciones. Tal es el caso de la danza del cardenal guajiro de los indígenas wuayuu en Colombia (Bleakney 2019). Esta danza está

basada en el canto y conducta del cardenal, *Cardinalis phoeniceus*, y simboliza la fertilidad y la sangre. En su documental, Bleakney (2019) logra retratar la estrecha relación de los sonidos animales (en especial de aves) con la creación musical contemporánea dándonos un ejemplo de que los sonidos naturales son aún el origen de la inspiración de muchos artistas.

Los paisajes acústicos naturales son recursos finitos y merecedores de protección. Según Dumyahn y Pijanowski (2011), los paisajes acústicos poseen valores que se pueden resumir en: significado cultural, sentimiento de pertenencia, estética, interacciones con el paisaje y bienestar humano/animal. Los paisajes acústicos se deben proteger no solo por todos los servicios ecosistémicos y culturales que aportan sino por el simple hecho de existir.

Conclusiones

A pesar de que los materiales y métodos en acústica han evolucionado rápidamente, la interpretación de la información obtenida aún es complicada por el requerimiento de gran capacidad de procesamiento y almacenamiento. Sin embargo, todos los años surgen nuevos métodos o se perfeccionan técnicas y equipos con el fin de reducir esta brecha y facilitar el uso de esta herramienta. Este es el caso del presente trabajo donde comprobamos que tanto los índices de *Burivalova y colaboradores* (2017) como los nuestros tienen un enfoque más ecosistémico que otros usados en la literatura. Por esto mismo, hacemos hincapié en la importancia de poner especial atención en la selección de los índices para cada estudio y que no se deben de generalizar los resultados ni las interpretaciones de estos. Los correlogramas mostraron patrones distintivos por variable, lo cual nos lleva a pensar que sí existen patrones espacio temporales en el paisaje nocturno del APFF Nahá. Por esta razón, sugerimos el método empleado en este trabajo como un auxiliar en el monitoreo y la conservación a largo tiempo en ANPs y localidades de difícil acceso. También resaltamos la importancia de este trabajo para realizar futuros estudios como identificación de especies y descripción de sonidos de interés ya que se pueden localizar los picos de actividad de forma

puntual y así reducir el tiempo de análisis de grabaciones economizando así la inversión de tiempo y recurso humano.

Nuestros resultados presentaron datos de actividad nocturna relevante asociada a insectos y anfibios, además de picos de actividad al amanecer y al atardecer. Por esta razón, urgimos la realización de futuros estudios bioacústicos que sean más inclusivos tanto en rangos de grabación (horas de grabación) como en grupos taxonómicos (anfibios e insectos) ya que información útil puede ser pasada por alto.

Por último, nos gustaría que nuestro trabajo promueva el estudio de los paisajes acústicos tanto marinos como terrestres en el país con fines de conservación. Así como que se dé a conocer al público general la importancia de reconocer el papel que las sinfonías de la naturaleza juegan en los ámbitos ecológico y sociocultural.

Referencias

- Achard, F., Bechle, R., Mayaux, P., et al. (2014) Determination of tropical deforestation rates and related carbon losses from 1990 to 2010. *Global Change Biology* 20, 2540–2554.
- Achard, F., Eva, H.D., Stibig, H.-J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T. & Malingreau, J.-P. (2002) Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. *Science (New York, N.Y.)* 297, 999–1002.
- Aide, Tm., Corrada-Bravo, C., Campos-Cerqueira, M., Milan, C., Vega, G. & Alvarez, R. (2013) Real-time bioacoustics monitoring and automated species identification. *PeerJ* 1, e103.
- Aldrich, M., Bubb, P., Hostettler, S. & van de Wiel, H. (2000) Bosques nublados tropicales montanos. *Tiempo para la acción W.I.T.W.C. Union (ed.)*, Cambridge, Inglaterra.
- Áreas de Protección de Flora y Fauna Nahá y Metzabok (2011) Monitoreo de aves en las Áreas de Protección de Flora y Fauna Nahá y Metzabok, Ciudad de México.
- Arfken, G. & Weber, H. (2001) *Mathematical methods for Physicists*, Harcourt/Academic Press.
- Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S. & Stansfeld, S. (2014) Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet* 383, 1325–1332.
- Basner, M., Brink, M., Bristow, A., et al. (2015) ICBEN review of research on the biological effects of noise 2011-2014. *Noise & health* 17, 57–82.
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., et al. (2019) *Linear Mixed-Effects Models using “Eigen” and S4.* , 123.
- Bee, M.A. & Micheyl, C. (2008) The cocktail party problem: What is it? How can it be solved? And why should animal behaviorists study it? *Journal of Comparative Psychology* 122, 235–251.
- Begon, M., Townsend, C. & Harper, J. (2006) *Ecology, from Individuals to Ecosystems Fourth.*, United Kingdom: Blackwell Publishing.
- Bender, D., Contreras, T. & Fahrig, L. (1998) Habitat loss and population decline: a meta-analysis of the patch size effect. *Ecology* 79, 517–533.
- Bleakney, G. (2019) *The birders: a melodic journey through Northern Colombia*, Colombia: Colombiatravel.
- 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.
- Bolker, B. (2017) *Tools for General Maximum Likelihood Estimation.*
- Botkin, D., Saxe, H., Araújo, M., et al. (2007) *Articles* Forecasting the effects of global warming on biodiversity. *BioScience* 57, 227–236.

- Brown, T.J. & Handford, P. (2003) Why birds sing at dawn: The role of consistent song transmission. *Ibis* 145, 120–129.
- Brumm, H. & Zollinger, S. (2017) Vocal plasticity in a reptile. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 284.
- Bunkley, J., McClure, C., Kawahara, A., Francis, C. & Barber, J. (2017) Anthropogenic noise changes arthropod abundances. *Ecology and evolution* 7, 2977–2985.
- Burivalova, Z., Towsey, M., Boucher, T., Truskinger, A., Apelis, C., Roe, P. & Game, E.T. (2017) Using soundscapes to detect variable degrees of human influence on tropical forests in Papua New Guinea. *Conservation Biology* 32, 205–215.
- Buscaino, G., Ceraulo, M., Pieretti, N., et al. (2016) Temporal patterns in the soundscape of the shallow waters of a Mediterranean marine protected area. *Scientific reports* 6, 34230.
- Buxton, R., Brown, E., Sharman, L., Gabriele, C. & McKenna, M. (2016) Using bioacoustics to examine shifts in songbird phenology. *Ecology and evolution* 6, 4697–710.
- Buxton, R., McKenna, M., Mennitt, D., Fristrup, K., Crooks, K., Angeloni, L. & Wittemyer, G. (2017) Noise pollution is pervasive in U.S. protected areas. *Science*, 531–533.
- Carson, R. (1962) *Silent Spring*, Crest Book.
- CICESE (2015) Base de datos climatológica nacional (Sistema CLICOM).
- CONANP-SEMARNAT (2006) Programa de conservación y manejo. Área de Protección de Flora y Fauna Nahá, México: CONANP.
- Cottman-Fields, M., Brereton, M. & Roe, P. (2013) Virtual birding: extending an environmental pastime into the virtual world for citizen science. In: 2013 ACM annual conference on Human factors in computing systems. Paris, France, p. .
- Cousins, S.H. (1991) Species Diversity Measurement: Choosing the Right Index. *Tree* 6, 190–192.
- Deichmann, J., Acevedo-Charry, O., Barclay, L., et al. (2018) It's time to listen: there is much to be learned from the sounds of tropical ecosystems. *Biotropica* 50, 713–718.
- Deichmann, J., Hernández-Serna, A., Delgado C., Ja., Campos-Cerqueira, M. & Aide, Tm. (2017) Soundscape analysis and acoustic monitoring document impacts of natural gas exploration on biodiversity in a tropical forest. *Ecological Indicators* 74, 39–48.
- Delignette-Muller, M., Dutang, C., Pouillot, R., Denis, J. & Siberchicot, A. (2019) Help to Fit of a Parametric Distribution to Non-Censored or Censored Data. , 87.
- 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, 46–54.
- Derryberry, E., Danner, R., Danner, J., Derryberry, G., Phillips, J., Lipshutz, S., Gentry, K. & Luther, D. (2016) Patterns of Song across Natural and Anthropogenic Soundscapes Suggest That White-Crowned Sparrows Minimize

- Acoustic Masking and Maximize Signal Content. *PLoS ONE* 11, e0154456.
- Digby, A., Towsey, M., Bell, B.D. & Teal, P.D. (2013) A practical comparison of manual and autonomous methods for acoustic monitoring.
- Duellman, W.E. (2011) Society for the Study of Amphibians and Reptiles Temporal Fluctuations in Abundances of Anuran Amphibians in a Seasonal Amazonian Rainforest Temporal Fluctuations in Abundances of Anuran Amphibians in a Seasonal Amazonian Rainforest. *Society* 29, 13–21.
- Dumyahn, S. & Pijanowski, B. (2011) Soundscape conservation. *Landscape Ecology* 26, 1327–1344.
- Earnest, D. & Turek, F. (1985) Neurochemical basis for the photic control of circadian rhythms and seasonal reproductive cycles: Role for acetylcholine,
- Ewers, R.M. (2006) Interaction effects between economic development and forest cover determine deforestation rates. *Global Environmental Change* 16, 161–169.
- Excélsior (2014) Construyen en Chiapas red de carreteras.
- Farina, A. (2014) *Soundscape Ecology. Principles, Patterns, Methods and Applications*, Dordrecht: Springer Netherlands.
- Farina, A. & James, P. (2016) The acoustic communities: Definition, description and ecological role. *BioSystems* 147, 11–20.
- Farina, A., James, P., Bobryk, C., Pieretti, N., Lattanzi, E. & McWilliam, J. (2014) Low cost (audio) recording (LCR) for advancing soundscape ecology towards the conservation of sonic complexity and biodiversity in natural and urban landscapes. *Urban Ecosystems* 17, 923–944.
- Farina, A. & Pieretti, N. (2012) The soundscape ecology: A new frontier of landscape research and its application to islands and coastal systems. *Journal of Marine and Island Cultures* 1, 21–26.
- Feng, A., Narins, P., Chun-He, X., Wen-Yu, L., Qiang, Q., Zhi-Min, X. & Jun-Xian, S. (2006) Ultrasonic communication in frogs. *Nature* 440.
- Ferreira, L.M., Oliveira, E.G., Lopes, L.C., Brito, M.R., Baumgarten, J., Rodrigues, F.H. & Sousa-Lima, R.S. (2018) What do insects, anurans, birds, and mammals have to say about soundscape indices in a tropical savanna. *Journal of Ecoacoustics* 2, PVH6YZ.
- Figuroa Díaz Escobar, F.M. (2014) Sistematización del conocimiento sobre las áreas protegidas de la región Lacandona,
- Francis, C., Kleist, N., Ortega, C. & Cruz, A. (2012) Noise pollution alters ecological services: enhanced pollination and disrupted seed dispersal. *Proceedings. Biological sciences* 279, 2727–35.
- Fuller, S., Axel, A.C., Tucker, D. & Gage, S.H. (2015) Connecting soundscape to landscape: Which acoustic index best describes landscape configuration? *Ecological Indicators* 58, 207–215.
- Gasc, A., Francomano, D., Dunning, J. & Pijanowski, B. (2017) Future directions for soundscape ecology: The importance of ornithological contributions. *The Auk. Ornithological Advances* 134, 215–228.

- Gasc, A., Sueur, J., Pavoine, S., Pellens, R. & Grandcolas, P. (2013) Biodiversity sampling using a global acoustic approach: contrasting sites with microendemics in New Caledonia. *PloS ONE* 8, e5311.
- Gobierno Federal y Estatal (2016) Balance de carreteras, Chiapas 2013-2018,
- Gonzalez-Estrada, E. & Villasenor-Alva, J.A. (2017) Tests of Fit for some Probability Distributions. , 21.
- Gordillo-Martínez, A., Sosa-López, J. & Navarro-Sigüenza, A. (2010) Digitalización de la Biblioteca de Sonidos Naturales del Museo de Zoología, Facultad de Ciencias, UNAM. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. EC019, México, D.F.
- Goutte, S., Dubois, A. & Legendre, F. (2013) The importance of ambient sound level to characterise anuran habitat. *PloS ONE* 8, e78020.
- Gross, J. & Ligges, U. (2015) Tests for Normality. , 10.
- Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J. (2009) Fundamentos de Física Cuarta edi., México: Grupo Editorial Patria.
- Hart, P., Hall, R., Ray, W., Beck, A. & Zook, J. (2015) Cicadas impact bird communication in a noisy tropical rainforest. *Behavioral ecology* 26, 839–842.
- Hernández-Nava (2003) Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR), Palenque, Chiapas.
- Herrera-Montes, M.I. (2018) Protected Area Zoning as a Strategy to Preserve Natural Soundscapes, Reduce Anthropogenic Noise Intrusion, and Conserve Biodiversity. *Tropical Conservation Science* 11, 194008291880434.
- Hughes, L. (2000) Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? *Trends in Ecology & Evolution* 15, 56–61.
- INEGI (1988) No Conjunto de las cartas de topografía, geología, uso de suelo y edafología, (escala 1:250000 y 1:50000) de la República Mexicana., Aguascalientes, México.
- International Association for Landscape Ecology, I. (2017) What is landscape ecology?
- Jorge, F.C., Machado, G., Siqueira Da Cunha Nogueira, S. & Gama Nogueira-Filho, L. (2018) The effectiveness of acoustic indices for forest monitoring in Atlantic rainforest fragments. *Ecological Indicators* 91, 71–76.
- Jost, Lou & González-Oreja, J.A. (2012) Midiendo la diversidad biológica : más allá del índice de Shannon. *Acta zoológica lilloana* 56, 3–14.
- Kacelnik, A. & Krebs, J.R. (1983) The Dawn Chorus in the Great Tit (*Parus Major*): Proximate and Ultimate Causes. *Behaviour* 83, 287–308.
- Kasten, E.E.P., Gage, S.S.H., Fox, J. & Joo, W. (2012) The remote environmental assessment laboratory's acoustic library: An archive for studying soundscape ecology. *Ecological Informatics* 12, 50–67.
- Kight, C. & Swaddle, J. (2015) Eastern bluebirds alter their song in response to anthropogenic changes in the acoustic environment. *Integrative and Comparative Biology* 55, 418–431.
- Komsta, L. & Novomestky, F. (2015) Moments, cumulants, skewness, kurtosis and

- related tests. , 15.
- Krause, B. (2008) Anatomy of the soundscape: Evolving perspectives. AES: Journal of the Audio Engineering Society.
- Krause, B. (2002) The loss of natural soundscape. *Earth Island Journal* 17, 27–29.
- Kroodsma, D. & Byers, B. (1991a) The Function(s) of Bird Song. *American Zoology* 31, 318–328.
- Kroodsma, D. & Byers, B. (1991b) The Function(s) of Bird Song. *American Zoology* 31, 318–328.
- Kuehne, L., Padgham, B. & Olden, J. (2013) The soundscapes of lakes across an urbanization gradient. *PloS one* 8, e55661.
- Kunc, H., McLaughlin, K. & Schmidt, R. (2016) Aquatic noise pollution: implications for individuals, populations, and ecosystems. *Proc. R. Soc. B* 283.
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. & Bojesen Christensen, R. (2019) Tests in Linear Mixed Effects Models.
- Laiolo, P. (2010) The emerging significance of bioacoustics in animal species conservation. *Biological Conservation* 143, 1635–1645.
- Lamel, L., Rabiner, L., Rosenberg, A. & Wilpon, J. (1981) An improved endpoint detector for isolated word recognition. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* 29, 777–785.
- Letelier, R., Karl, D., Abbott, M. & Bidigare, R. (2004) Light driven seasonal patterns of chlorophyll and nitrate in the lower euphotic zone of the North Pacific Subtropical Gyre,
- Lohr, B., Wright, T. & Dooling, R. (2003) Detection and discrimination of natural calls in masking noise by birds: estimating the active space of a signal. *Animal Behaviour* 65, 763–777.
- Lomolino, M., Pijanowski, B. & Gasc, A. (2015) The silence of biogeography. *Journal of Biogeography* 42, 1187–1196.
- Lüdecke, D. & Shcwemmer, C. (2018) Data Visualization for Statistics in Social Science. , 103.
- Ludescher, J., Gozolchiani, A., Bogachev, M.I., Bunde, A., Havlin, S. & Schellnhuber, H. (2014) Very early warning of next El Niño. *PNAS* 111, 2064–2066.
- Luther, D. & Baptista, L. (2010) Urban noise and the cultural evolution of bird songs. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 277, 469–473.
- Marler, P. & Slabbekoorn, H. (2004) *Nature’s music: the science of birdsong*, Italy: Elsevier Academic Press.
- McClure, C.J.W., Ware, H.E., Carlisle, J., Kaltenecker, G. & Barber, J.R. (2013) An experimental investigation into the effects of traffic noise on distributions of birds: avoiding the phantom road. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 280, 20132290–20132290.
- McDonald, E., Morano, J., DeAngelis, A. & Rice, A. (2017) Building time-budgets from bioacoustic signals to measure population-level changes in behavior: a case study with sperm whales in the Gulf of Mexico. *Ecological Indicators* 72,

360–364.

- McWilliam, J.N. & Hawkins, A.D. (2013) A comparison of inshore marine soundscapes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 446, 166–176.
- Merchant, N., Fristrup, K., Johnson, M., Tyack, P., Witt, M., Blondel, P. & Parks, S. (2015) Measuring acoustic habitats. *Methods in Ecology and Evolution* 6, 257–265.
- Meyer, D., Dimitriadou, E., Hornik, K., Weingessel, A., Leisch, F., Chang, C.-C. & Lin, C.-C. (2019) Misc Functions of the Department of Statistics, Probability Theory Group (Formerly: E1071), TU Wien. , 63.
- Miranda, F. & Hernández X, E. (1963) Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 28, 29–72.
- Morris, Ek., Caruso, T., Buscot, F., et al. (2014) Choosing and using diversity indices: insights for ecological applications from the German Biodiversity Exploratories. *Ecology and evolution* 4, 3514–24.
- Moscoso Rosero, P. (2018) The use of acoustic analyses to evaluate ecological and social impacts of habitat degradation in contemporary conservation biology. , 213.
- Mullet, T., Gage, S., Morton, J. & Huettmann, F. (2016) Temporal and spatial variation of a winter soundscape in south-central Alaska. *Landscape Ecology* 31, 1117–1137.
- Nelson, D., Klinck, H., Carbaugh-Rutland, A., Mathis, C., Morzillo, A. & Garcia, T. (2017) Calling at the highway: The spatiotemporal constraint of road noise on Pacific chorus frog communication. *Ecology and Evolution* 7, 429–440.
- Obrist, M., Pavan, G., Sueur, J., Riede, K., Lluisa, D. & Márquez, R. (2015) Bioacoustics approaches in biodiversity inventories. In: *Bioacoustics The International Journal Of Animal Sound And Its Recording*. pp. 68–99.
- Ord, T.J. (2008) Dawn and Dusk “Chorus” in Visually Communicating Jamaican Anole Lizards. *The American Naturalist* 172, 585–592.
- Osgood, B. (2018) Lecture Notes for EE 261 The Fourier Transform and its Applications,
- Peng, C., Zhao, X., Liu, S., Shi, W., Han, Y., Guo, C., Jiang, J., Wan, H., Shen, T. & Liu, G. (2016) Effects of anthropogenic sound on digging behavior, metabolism, Ca(2+)/Mg(2+) ATPase activity, and metabolism-related gene expression of the bivalve *Sinonovacula constricta*. *Scientific reports* 6, 24266.
- Penone, C., Le Viol, I., Pellissier, V., Julien, J.-F., Bas, Y. & Kerbiriou, C. (2013) Use of Large-Scale Acoustic Monitoring to Assess Anthropogenic Pressures on Orthoptera Communities. *Conservation Biology* 27, 979–987.
- Pereyra-Díaz, D., Bando, U. & Natividad, M. (2004) Influencia de La Niña y El Niño sobre la precipitación de la ciudad de Villahermosa, Tabasco, Mexico. *Universidad y Ciencia* 20, 33–38.
- 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 11, 868–873.

- Pieretti, N., Lo Martire, M., Farina, A. & Danovaro, R. (2017) Marine soundscape as an additional biodiversity monitoring tool: A case study from the Adriatic Sea (Mediterranean Sea). *Ecological Indicators* 83, 13–20.
- Pijanowski, B., Farina, A., Gage, S., Dumyahn, S. & Krause, B. (2011) What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape Ecology* 26, 1213–1232.
- Pijanowski, B., Villanueva-Rivera, L., Dumyahn, S., Farina, A., Krause, B., Napoletano, B., Gage, S. & Pieretti, N. (2011) Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape. *BioScience* 61, 203–216.
- Plenderleith, T.L., Stratford, D., Lollback, G.W., Chapple, D.G., Reina, R.D. & Hero, J.M. (2018) Calling phenology of a diverse amphibian assemblage in response to meteorological conditions. *International Journal of Biometeorology* 62, 873–882.
- Prati, D., Wurst, S., Caruso, T., et al. (2014) Choosing and using diversity indices: insights for ecological applications from the German Biodiversity Exploratories. *Ecology and Evolution* 4, 3514–3524.
- Prugh, L., Hodges, K., Sinclair, A. & Brashares, J. (2007) Effect of habitat area and isolation on fragmented animal populations,
- R Core Team (2018) R: A language and environment for statistical computing.
- Robinson, D., Gomez, M., Demeshev, B., et al. (2019) Convert Statistical Analysis Objects into Tidy Tibbles. , 253.
- Romero, V., Maffei, L., Brambilla, G. & Ciaburro, G. (2016) Acoustic, Visual and Spatial Indicators for the Description of the Soundscape of Waterfront Areas with and without Road Traffic Flow. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13.
- Rzedowski, J. (1996) Análisis preliminar de la flora vascular de los bosques mesófilos de montaña de México. *Acta Botánica Mexicana* 35, 25–44.
- Rzedowski, J. (1978) *Vegetación de México, Ciudad de México*: Editorial Limusa.
- Santilli, E. (2004) Biosemiótica: una metáfora en la Biología Teórica. Campinas: AFHIC, 165–174.
- Saunders, A. (1947) The Seasons of Bird Song the Beginning of Song in Spring. *The American Ornithologists Union* 64, 97–107.
- Schafer, M. (1977) *The tuning of the world: toward a theory of soundscape design*, University of Pennsylvania Press.
- SEMARNAT (2016) Metzabok, Nahá y Cumbres del Ajusco celebran su designación como Áreas Naturales Protegidas.
- Serrano, J. (2016) El canto de anuncio de la rana endémica del Pedregal de la ciudad de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 87, 535–539.
- Silva, A. Da, Samplonius, J.M., Schlicht, E., Valcu, M. & Kempenaers, B. (2014) Artificial night lighting rather than traffic noise affects the daily timing of dawn and dusk singing in common European songbirds. *Behavioral Ecology* 25, 1037–1047.

- Da Silva, A., Valcu, M. & Kempenaers, B. (2015) Light pollution alters the phenology of dawn and dusk singing in common european songbirds. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370.
- Sinamai, A. (2018) Melodies of God: the significance of the soundscape in conserving the Great Zimbabwe landscape. *Journal of Community Archaeology and Heritage* 5, 17–29.
- Slabbekoorn, H. & den Boer-Visser, A. (2006) Cities Change the Songs of Birds. *Current Biology* 16, 2326–2331.
- Southworth, M. (1969) The sonic environment of cities. *Environment and Behavior* 1, 49–70.
- Stansfeld, S. & Matheson, M. (2003) Noise pollution: non-auditory effects on health. *British Medical Bulletin* 68, 243–257.
- Sueur, J., Pavoine, S., Hamerlynck, O. & Duvail, S. (2008) Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal. *PLoS ONE* 3.
- Thorne, R. & Shepherd, D. (2013) Quiet as an environmental value: a contrast between two legislative approaches. *International journal of environmental research and public health* 10, 2741–59.
- Todd, B., Scott, D., Pechmann, J. & Whitfield Gibbons, J. (2011) Climate change correlates with rapid delays and advancements in reproductive timing in an amphibian community. *Proceedings of the Royal Society* 278, 2191–2197.
- Towsey, M. (2013) Noise removal from waveforms and spectrograms derived from natural recordings of the environment,
- Towsey, M., Zhang, L., Cottman-Fields, M., Wimmer, J., Zhang, J. & Roe, P. (2014) Visualization of Long-duration Acoustic Recordings of the Environment. *Procedia Computer Science* 29, 703–712.
- Truax, B. (1978) the world soundscape project's handbook for acoustic ecology, Vancouver BC: ARC Publications.
- Truax, B. & Barrett, G.W. (2011) Soundscape in a context of acoustic and landscape ecology. *Landscape Ecology* 26, 1201–1207.
- UNESCO (2017) Latin America and the Caribbean | United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Vélez, A. & Bee, M. (2013) Signal recognition by Green Treefrogs (*Hyla cinerea*) and Cope's Gray Treefrogs (*Hyla chrysoscelis*) in Naturally Fluctuating Noise. *Journal of Comparative Psychology* 127, 166–78.
- Vianna, K. de P., Rodrigues, R. & Alves Cardoso, M. (2015) Noise pollution and annoyance: An urban soundscapes study. *Noise and Health* 17, 125.
- Villanueva-Rivera, L.J. (2014) Eleutherodactylus frogs show frequency but no temporal partitioning: implications for the acoustic niche hypothesis. *PeerJ* 2, e496.
- Villanueva-Rivera, L.J., Pijanowski, B.C., Doucette, J. & Pekin, B. (2011) A primer of acoustic analysis for landscape ecologists. *Landscape Ecology* 26, 1233–1246.
- La Voz Argentina (2018) Un proyecto para bajar los decibeles. 19-06-2018.

- Ware, H.E., McClure, C.J.W., Carlisle, J.D. & Barber, J.R. (2015) A phantom road experiment reveals traffic noise is an invisible source of habitat degradation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112, 12105–12109.
- Wei, T., Simko, V., Levy, M., Xie, Y., Jin, Y. & Zemla, J. (2017) Visualization of a Correlation Matrix. , 18.
- Wickham, H., Chang, W., Henry, L., Pedersen, T., Takahashi, K., Wilke, C. & Woo, K. (2019) Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics.
- Wickham, H., Francois, R., Henry, L. & Müller, K. (2019) A Grammar of Data Manipulation. , 88.
- Wickham, H. & Henry, L. (2019) Easily Tidy Data with “spread()” and “gather()” Functions. , 23.
- Wiggins, S., Hall, J., Thayre, B. & Hildebrand, J. (2016) Gulf of Mexico low-frequency ocean soundscape impacted by airguns. *The Journal of the Acoustical Society of America* 140, 176–183.
- William Clark (2010) Principles of Landscape Ecology | Learn Science at Scitable. *Nature Education Knowledge*, 3(10):34.
- Williams, R., Wright, A., Ashe, E., et al. (2015) Impacts of anthropogenic noise on marine life: Publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management. *Ocean & Coastal Management* 115, 17–24.
- Wimmer, J., Towsey, M., Planitz, B., Williamson, I. & Roe, P. (2013) Future Generation Computer Systems Analysing environmental acoustic data through collaboration and automation. *Future Generation Computer Systems* 29, 560–568.
- Zhang, J., Huang, K., Cottman-Fields, M., Truskinger, A., Roe, P., Duan, S., Dong, X., Towsey, M. & Wimmer, J. (2013) Managing and analysing big audio data for environmental monitoring. *Proceedings - 16th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering, CSE 2013*, 997–1004.