



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

USO DE ÍNDICES ECOACÚSTICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL
PAISAJE SONORO SUBMARINO DE LA ENSENADA DE LA PAZ.

T E S I S

Que para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación en Biología Marina)

P r e s e n t a

David Alonso Rosales Chapula

La Paz, Baja California Sur, junio de 2022.

ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 13:28 horas del día 01 del Mes de junio del 2022, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

"Uso de índices ecoacústicos para la evaluación del paisaje sonoro submarino de la Ensenada de La Paz"

Presentada por el alumno:

David Alonso Rosales Chapula

Aspirante al Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN **Biología Marina**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.



LA COMISIÓN REVISORA



Dr. Eduardo Romero Vivas
Director de Tesis



Dra. Patricia Cortés Calva
Co-Tutora de Tesis

Dra. Lorena Viloria Gómora
Co-Tutora de Tesis



Dra. Gracia Alicia Gómez Anduro,
Directora de Estudios de Posgrado y
Formación de Recursos Humanos.

La Paz, Baja California Sur, a 01 de junio de 2022.

Los miembros del comité de tesis del (la) estudiante David Alonso Rosales Chapula del Programa de Maestría en el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales, revisamos el contenido de la tesis y otorgamos el Vo.Bo. dado que la tesis no representa un plagio de otro documento como lo muestra el reporte de similitud realizado:

- Herramienta antiplagio:
Ithenticate
- Filtros utilizados:
Excluir citas
Excluir bibliografía
- Porcentajes de similitud:
Máximo 20% para tesis Posgrado
Se muestra captura de pantalla

Citas excluidas		6%
Bibliografía excluida		SIMILAR
Resumen de Coincidencias		
1	Internet 116 palabras Copiado el 16-Ene-2013 www.cienciasmarinas.com.mx	1%
2	Internet 99 palabras Copiado el 07-Abr-2021 tesis.ipn.mx	1%
3	Internet 69 palabras Copiado el 27-May-2020 esdocs.com	<1%
4	Internet 66 palabras Copiado el 27-Ene-2021 cibnor.repositorioinstitucional.mx	<1%
5	Internet 58 palabras Copiado el 11-Mar-2022 repositorio.una.ac.cr	<1%
6	Internet 34 palabras Copiado el 10-Abr-2018 usir.salford.ac.uk	<1%
7	Internet 26 palabras Copiado el 13-Mar-2022 kipdf.com	<1%

Firmas del comité



Dr. Eduardo Romero Vivas
Director de Tesis



Dra. Patricia Cortés Calva
Co-Tutora de Tesis



Dra. Lorena Viloria Gómora
Co-Tutora de Tesis

Conformación de Comités

Comité Tutorial

Dr. Eduardo Romero Vivas
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Director de Tesis

Dra. Patricia Cortés Calva
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Co-Tutora de Tesis

Dra. Lorena Viloría Gómora
Universidad Autónoma de Baja California Sur
Co-Tutora de Tesis

Comité Revisor de Tesis

Dr. Eduardo Romero Vivas
Dra. Patricia Cortés Calva
Dra. Lorena Viloría Gómora

Jurado de Examen

Dr. Eduardo Romero Vivas
Dra. Patricia Cortés Calva
Dra. Lorena Viloría Gómora

Suplente

Dr. Braulio León López

Resumen

Los ambientes lagunares como la Ensenada de La Paz, México, son ecotonos únicos de gran relevancia ecológica que presentan una gran variedad de sonidos generados por los factores biológicos, geofísicos y antropogénicos. Estos sonidos están integrados a su entorno natural, la suma de dichos sonidos forma el ambiente sonoro; al describir e interpretar sus componentes acústicos se obtiene el paisaje sonoro, que para estudiarlo se ha propuesto el uso de los índices ecoacústicos, sin embargo, al ser desarrollados para ambientes terrestres, su uso en ambientes marinos ha sido limitado y no completamente validado. A partir de una revisión bibliográfica y con base en su uso y eficacia en ambientes costeros, se seleccionaron cuatro índices ecoacústicos: el índice de complejidad acústica (ACI), el índice de entropía acústica (AEI), el índice bioacústico (BI), y el índice diferencial normalizado del paisaje sonoro (NDSI), empleados para caracterizar el ambiente sonoro submarino de la Ensenada de La Paz y con ello conformar el paisaje sonoro. Se utilizaron dos grabaciones de 20:01:34 h realizadas en el mes de julio de 2018, una en el canal de entrada (B19) el día 14 y otra en el interior de la Ensenada (B29) el 17, ambas a 3 m de profundidad. Se clasificaron y cuantificaron los distintos eventos acústicos de acuerdo con su fuente en tres categorías: biofonías, antropofonías y geofonías, de forma visual y auditiva mediante una anotación de referencia, apoyados de espectrogramas en catálogos y por registros en fuentes externas. Los valores obtenidos de los índices (MATLAB y R) se validaron respecto a la anotación y utilizando una correlación biserial puntual. El análisis demuestra que los tres tipos de eventos sonoros considerados tuvieron mayor presencia en la estación B29, donde las biofonías estuvieron un 97.5% del tiempo en el interior y un 20.67% en la entrada, las antropofonías un 59.73% y 25.26%, y las geofonías un 21.42% y 16.22%, demostrando así que las biofonías son el componente principal del interior y las antropofonías de la entrada. Los valores dados por los índices fueron mayores en la B19 (AEI=0.925/0.91, BI=4.5/4.4, NDSI=0.92/0.8), excepto por el ACI (ACI=185/220). Las correlaciones más altas se dieron para las biofonías con los cuatro índices en las dos estaciones, excepto para las antropofonías en la B29 con el NDSI ($b=0.3964$, $a=-0.4079$), mientras que las geofonías tuvieron las correlaciones bajas en todos los casos, con la excepción de las antropofonías en la B19 con el ACI ($a=0.2781$, $g=0.4404$) y el NDSI ($a=-0.0749$, $g=0.0995$). Así, los índices ecoacústicos han demostrado ser herramientas útiles para detectar gran variedad de eventos acústicos en los ambientes estuarinos en sus distintos componentes sonoros.

Palabras clave: *sonido, ecosistema estuarino, diversidad.*

<https://orcid.org/0000-0002-2784-9640>



Dr. Eduardo Romero Vivas
Director de Tesis

Summary

Lagoon environments such as Ensenada de La Paz, Mexico, are unique ecotones with great ecological relevance, presenting a wide variety of sounds generated by biological, geophysical and anthropogenic factors. These are integrated within their natural environment, and together form the acoustic environment; when its acoustic components are described and interpreted the soundscape is obtained, and in order to study it, the use of ecoacoustic indices has been proposed, however, these were developed for terrestrial environments, so their use in marine environments has been limited and not completely validated. After a literature review and based in their use and efficiency in coastal environments, four ecoacoustic indices were chosen: the acoustic complexity index (ACI), the acoustic entropy index (AEI), the bioacoustic index (BI), and the normalized difference soundscape index (NDSI), implemented to characterize the Ensenada de La Paz underwater acoustic environment and thereby shape the soundscape. Two 20:01:34 h recordings from July 2018 were used, one of them at the Ensenada's entrance channel (B19) on day 14th, and the other one at the interior (B29) on day 17th, both at 3 m deep. The different acoustic events were classified and quantified according to their source in three categories: biophonies, anthropophonies and geophonies, visually and aurally in a reference annotation, supported by spectrograms in catalogs and external sources recordings. Obtained indices values (MATLAB and R) were validated against the annotation and using a point biserial connection. Analysis shows that the three considered types of acoustic events had a greater presence at station B29, where biophonies were 97.5% of the time at the interior and 20.67% at the entrance, anthropophonies a 59.73% and 25.26%, and geophonies a 21.42% and 16.22%, demonstrating that biophonies are the main component at the interior and anthropophonies at the entrance. Indices values were higher at B19 (AEI=0.925/0.91, BI=4.5/4.4, NDSI=0.92/0.8), except for the ACI (ACI=185/220). The highest correlations occurred for biophonies with the four indices in both stations, except for the anthropophonies at B29 with the NDSI (b=0.3964, a=-0.4079), while geophonies had the lowest correlations in all cases, with the exception of anthropophonies at B19 with the ACI (a=0.2781, g=0.4404) and NDSI (a=-0.0749, g=0.0995). Thus, ecoacoustic indices have proven to be useful tools for detecting a wide variety of acoustic events in estuarine environments in their different sound components.

Keywords: *sound, estuarine ecosystem, diversity.*

<https://orcid.org/0000-0002-2784-9640>



Dr. Eduardo Romero Vivas
Director de Tesis

Dedicatoria

A mis Padres, Lorena Chapula y José Rosales.

A mi Abuelo y Padrino Toño, QEPD.

Por su motivación, por su cariño.

Por siempre apoyarme de manera incondicional.

Agradecimientos

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. por darme la oportunidad de estudiar este Posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada (no. 744266).

A mi Director de Tesis, Dr. Eduardo Romero Vivas, por aceptarme para trabajar juntos en este proyecto, por su tiempo, sus asesorías y apoyo en los distintos temas de acústica, además de su comprensión y ánimo a través de estos años.

A mis Co-Tutoras de Tesis, Dra. Patricia Cortés Calva y Dra. Lorena Viloría Gómora, por aceptar este compromiso conmigo, por su tiempo, su apoyo y sus explicaciones en los puntos más ecológicos, ayudándome a comprender su integración con la parte acústica.

Al Ing. Carlos Pacheco del grupo de Ecología Pesquera por facilitarme los datos de viento que necesitaba para mejorar mi tesis.

A los profesores que conocí en estos años y que me brindaron sus conocimientos para poder enriquecer más mi trabajo. Así como a la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos y al personal del centro que me apoyaron, particularmente a Horacio Sandoval Gómez, por siempre estar atento ante las necesidades, dudas o problemas que requirieran de su apoyo sin importar el día.

A mis amigos los MC, por haber estado conmigo estos años, creando y compartiendo horas y horas de alegría, risas, pláticas amenas, consejos y palabras de aliento que me llegaron a motivar más de una vez. Por todo esto y muchas cosas más, quiero reiterar mi agradecimiento y mi cariño a cada uno de ustedes: Barbs, Danny, Aldahir, Patty, Jaquie, Giovanni, Aye y Miranda, y claro, a Kevyn también.

Finalmente, solo me queda agradecer a mi familia, por siempre estar ahí para mí, por ser mi fuerza e inspiración para seguir adelante sin importar las dificultades, por estar ahí para mí cuando lo necesitara, y sobre todo, por su cariño, gracias.

Contenido

Resumen	i
Summary	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	v
Lista de figuras	vii
Lista de tablas	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1 Ecología general	3
2.2 Fundamentos de acústica marina	4
2.3 Bioacústica marina	4
2.4 Paisaje sonoro y la diversidad acústica	5
2.5 Índices ecoacústicos	7
2.5.1 Índices ecoacústicos y su aplicación en el mar	7
2.5.1.1 El índice de complejidad acústica (ACI)	8
2.5.1.2 El índice de entropía acústica (AEI)	8
2.5.1.3 El índice bioacústico (BI)	8
2.5.1.4 El índice diferencial normalizado del paisaje sonoro (NDSI)	9
2.6 Sistemas costeros y su importancia ecológica	9
2.7 Antecedentes de estudios de fonías en la Ensenada de La Paz	10
3. JUSTIFICACIÓN	11
4. HIPÓTESIS	12
5. OBJETIVOS	13
5.1 Objetivo general	13
5.2 Objetivos particulares	13
6. MATERIAL Y MÉTODOS	14
6.1 Área de estudio	14
6.2 Trabajo de campo	16
6.3 Anotación de referencia	17
6.3.1 Clasificación de los eventos acústicos	19
6.4 Ocurrencia de los sonidos	20
6.5 Índices	20
6.5.1 Validación por correlaciones	20
6.5.2 Validación por análisis del espectrograma	21
6.6 Comparativa entre estaciones	21
7. RESULTADOS	22
7.1 Factores ambientales	22
7.2 Ocurrencia de los sonidos	22
7.3 Índices	25
7.3.1 Correlaciones	25
7.3.2 Análisis del espectrograma	26
7.4 Comparación de estaciones	44
8. DISCUSIÓN	45

8.1 Factores ambientales	45
8.2 Ocurrencia de los sonidos	46
8.3 Evaluación de los índices	49
8.4 Estaciones de la Ensenada	53
9. CONCLUSIONES	55
9.1 Recomendaciones	56
10. LITERATURA CITADA	57
11. ANEXOS	65
Anexo A. Descripción y ecuación de los cuatro índices ecoacústicos empleados.	65
Anexo B. Descripción y cálculo de la correlación biserial puntual.	67
Anexo C. Respuestas del índice ACI ante dos antropofonías para la estación B19.	68
Anexo D. Respuestas del índice AEI ante dos antropofonías para la estación B29.	69
Anexo E. Respuestas del índice BI ante dos antropofonías para la estación B29.	70
Anexo F. Respuestas del índice NDSI ante dos antropofonías para la estación B19.	71

Lista de figuras

Figura 1. Ensenada de La Paz. Los dos puntos representan los sitios de muestreo, uno en la entrada de la Ensenada (Estación B19 (negro)) y otro dentro de ésta (Estación B29 (gris)).	16
Figura 2. Calendario de mareas para el mes de julio de 2018, que muestra los valores de la pleamar superior (PMS), nivel medio del mar (NMM) y la bajamar (BM), así como las fechas de las fases lunares; tomado de http://predmar.cicese.mx/ .	18
Figura 3. A) Espectrograma de largo plazo donde se destacan los eventos relevantes de peces (Ps), aves (Av), camarón pistola (CP) y embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección de antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul), ambos para la estación B19.	26
Figura 4. Comparativa del A) espectrograma de largo plazo con encuadres de los eventos relevantes de peces (Ps), aves (Av), camarón pistola (CP) y embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección. C) Valores del índice ACI para la estación B19, que incluye sus valores de correlación biserial puntual para antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul).	28
Figura 5. Comparativa del A) espectrograma de largo plazo con encuadres de los eventos relevantes de peces (Ps), aves (Av), camarón pistola (CP) y embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección. C) Valores del índice AEI para la estación B19, que incluye sus valores de correlación biserial puntual para antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul).	30
Figura 6. Comparativa del A) espectrograma de largo plazo con encuadres de los eventos relevantes de peces (Ps) y camarón pistola (CP) y embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección. C) Valores del índice BI para la estación B19, que incluye sus valores de correlación biserial puntual para antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul).	32
Figura 7. Comparativa del A) espectrograma de largo plazo con encuadres de los eventos relevantes de peces (Ps) y camarón pistola (CP) y embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección. C) Valores del índice NDSI para la estación B19, que incluye sus valores de correlación biserial puntual para antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul).	34
Figura 8. A) Espectrograma de largo plazo donde se destacan los eventos relevantes de aves (Av), delfines (Dn), peces (Ps), camarón pistola (CP) y de embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección de antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul), ambos para la estación B29.	35
Figura 9. Comparativa del A) espectrograma de largo plazo con encuadres de los eventos relevantes de aves (Av), delfines (Dn), peces (Ps), camarón pistola (CP) y de embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección. C) Valores del índice ACI para la estación B29, que incluye sus valores de correlación biserial puntual para antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul).	37
Figura 10. Comparativa del A) espectrograma de largo plazo con encuadres de los eventos relevantes de aves (Av), delfines (Dn), peces (Ps), camarón pistola (CP) y de embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección. C) Valores del índice AEI para la estación B29, que incluye sus valores de correlación biserial puntual para antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul).	39

Figura 11. Comparativa del A) espectrograma de largo plazo con encuadres de los eventos relevantes de delfines (Dn), peces (ps), camarón pistola (CP) y de embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección. C) Valores del índice BI para la estación B29, que incluye sus valores de correlación biserial puntual para antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul). .41

Figura 12. Comparativa del A) espectrograma de largo plazo con encuadres de los eventos relevantes de delfines (Dn), peces (Ps), camarón pistola (CP) y de embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección. C) Valores del índice NDSI para la estación B29, que incluye sus valores de correlación biserial puntual para antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul).43

Lista de tablas

Tabla 1. Número y duración de las detecciones de cada tipo de evento acústico ocurrido en ambas estaciones de muestreo.	24
Tabla 2. Valores del coeficiente de correlación biserial puntual (r) para las tres clasificaciones de sonidos en ambas estaciones de muestreo. Índice de complejidad acústica (ACI), índice de entropía acústica (AEI), índice bioacústico (BI) e índice diferencial normalizado del paisaje sonoro (NDSI).	25

1. INTRODUCCIÓN

Los componentes bióticos, abióticos (corrientes de agua/aire, movimientos telúricos, desplazamiento de organismos, depredación, etc.) y el ruido generado por la actividad humana interactúan e influyen entre sí, dando como resultado diversas actividades sonoras que forman parte de un mismo ambiente acústico (Farina y Gage, 2017). La suma de los múltiples sonidos generados por todos los factores biológicos (biofonías), geofísicos (geofonías), y antropogénicos (antropofonías) (Cotter, 2008; Miksis-Olds *et al.*, 2018), en tierra o en agua nos señala lo importante de su variabilidad espacio temporal y como la heterogeneidad acústica afecta su transmisión (Cotter 2008).

La transmisión del sonido puede ser influenciada por la estructura y la batimetría del fondo marino (Urlick, 1983), así como las características fisicoquímicas del agua (Chen y Millero, 1977). Esto implica que el ambiente acústico se ve alterado por varios factores, y por consiguiente influirá en las actividades del componente biológico, produciendo así un posible impacto en el comportamiento acústico de los organismos marinos (Miksis-Olds *et al.*, 2018).

Para determinar el estado en el que se encuentran los ecosistemas, comúnmente se utiliza la medición de la biodiversidad a través de los índices ecológicos resultado del monitoreo presencial (Magurran, 1988); dicha técnica requiere un esfuerzo económico y de monitoreo (Heywood, 1995; Hill *et al.*, 2005). Un método más sencillo es partir de una señal indirecta (sonido) que refleje la diversidad del lugar, debido a que varios organismos producen sonidos de manera directa cuando se comunican, detectan su entorno, o cazan, o bien de manera indirecta al moverse (Bradbury y Vehrencamp, 1998).

La ecoacústica toma ventaja de la presencia y correlación que tienen los sonidos en un ambiente, con los organismos que ahí habitan (Farina y Gage, 2017). Con ello se busca analizar el ambiente acústico de un ecosistema utilizando distintas herramientas, como los espectrogramas de largo plazo y el cálculo de la densidad espectral de potencia (Lindseth y Lobel, 2018). Con la finalidad de describir el paisaje sonoro, se desarrollaron versiones acústicas de los índices de biodiversidad existentes, como el índice modificado de entropía, o índice Shannon (H), sugerido por Sueur *et al.*, (2008).

Los índices ecoacústicos se desarrollaron en un principio para ecosistemas terrestres (Sueur *et al.*, 2008; Pieretti *et al.*, 2011), los cuales presentan características y componentes de propagación sonora muy distinta a los acuáticos (Minello *et al.*, 2021). Para utilizar estos índices en ambientes acuáticos es necesario tener en consideración la variabilidad fisicoquímica, geomorfológica y biológica, ya que los niveles reducidos de pérdida de transmisión de energía acústica en el entorno marino en comparación con el aire dan como resultado mayores rangos de propagación acústica. Esto da como resultado la capacidad de detectar señales acústicas a mayores distancias que compiten con la contribución de energía acústica local. (Cotter 2008)

La relevancia y efectividad de los índices ecoacústicos en el medio marino radica en que el sonido es un indicador efectivo para reconocer lo que sucede en el ambiente, ya que son generados por los organismos durante la realización de sus actividades biológicas (Lindseth y lobel, 2018), y se producen bien de manera inconsciente, o de manera consciente para determinadas actividades vitales (comunicación, depredación, localización, etc.; Sueur y Farina, 2015).

Entre las varias opciones de índices ecoacústicos utilizadas, pocos tienen una aplicación directa en ecosistemas marinos, y todavía menos están diseñados para determinar el paisaje sonoro de ambientes lagunares. Por ello, en este estudio fueron elegidos los índices ecoacústicos que pueden ser empleados en un ambiente lagunar somero y continuo a un centro urbano con tránsito marino y terrestre, y que puedan generar una representación fiel de la diversidad que existe en el área de estudio.

2. ANTECEDENTES

2.1 Ecología general

Los ecosistemas marinos son hábitats complejos conformados por distintos elementos bióticos, abióticos, y sus interacciones (refugio, alimentación, ciclos biogeoquímicos, etc.; Magurran, 1988; Hill *et al.*, 2005). Así, la correlación entre las actividades humanas y los conceptos analíticos de la ecología del ambiente puede proporcionar información sobre el estado ecológico del ambiente y con ello mejorar la toma de decisiones en la gestión de recursos (Aswani y Vaccaro, 2008). Para ello, uno de los estudios que nos ayudan a determinar el estado de un ecosistema es la determinación de la diversidad biológica de dichos ambientes.

La diversidad es un tema recurrente en la ecología, debido a que los patrones y cambios en ésta siempre es un punto de interés y relevancia en el estudio de un ambiente (Heywood, 1995). Los indicadores de diversidad ecológica, tales como la riqueza y abundancia de especies, se consideran como indicadores del bienestar ecosistémico (Magurran, 1988). Para la determinación de la biodiversidad se usa una variedad de herramientas *e.g.* modelo Chao 1 (Chao, 1984) e índice de Simpson (Gregorius y Gillet, 2008). Los modelos son una visión más compleja y detallada del ambiente, mientras que los índices son una forma más práctica, ya que incluyen múltiples variables en un solo valor (Magurran, 1988; Moriarty *et al.*, 2018).

Los índices ecológicos parten del principio de relación del número de especies presentes como de la uniformidad de la distribución de los individuos de cada especie (Izsák y Papp, 2000). A partir de este concepto surgen los índices de Shannon-Wiener (Shannon y Weaver, 1949) y de Gini-Simpson (Simpson, 1949), entre otros.

Sin embargo, para llevar a cabo esta cuantificación de la diversidad biológica, el estudio debe basarse principalmente en inventarios de especies previamente determinados a partir de exhaustivos muestreos visuales que terminan siendo costosos y difíciles de compilar (Heywood, 1995; Hill *et al.*, 2005). Por lo que se requieren métodos que sean fáciles de manejar, menos costosos, que cubran grandes distancias por el mayor tiempo; esto es factible a partir de alguna señal indirecta de diversidad, tal y como es el sonido, ya que los organismos producen sonidos de manera incidental cuando se mueven o intencionalmente cuando se comunican o detectan

su entorno (Bradbury y Vehrencamp, 1998). Aunado a esto, los organismos sonoros requieren de un refugio, un lugar para reproducirse y alimento, por lo que se puede determinar la presencia de organismos no sonoros ambientalmente relacionados a estos (Farina y Gage, 2017).

La aplicación del sonido como una opción para detectar incidencias biológicas resulta viable, y su implementación en los ya existentes índices de diversidad biológica es factible, práctica y de amplio uso (Sueur *et al.*, 2008; Pieretti *et al.*, 2011).

2.2 Fundamentos de acústica marina

El sonido es una perturbación periódica en la presión o densidad del medio que genera un flujo de energía en forma de vibraciones longitudinales en un medio capaz de oscilar (Farina y Gage, 2017; Sueur, 2018). Al ser un fenómeno constituido por ondas mecánicas, es aditivo, donde ondas separadas de distintas fuentes pueden juntarse y formar una sola señal (Farina y Gage, 2017).

Todas las ondas están determinadas por sus parámetros de amplitud, frecuencia, y longitud de onda. La amplitud de la onda se define en decibeles (dB) y es la cantidad de presión sonora que ejerce la vibración en el medio, referenciados a una presión de $1\mu\text{Pa}$; la frecuencia es el número de vibraciones/oscilaciones por segundo, medida en Hertz (Hz); y la longitud de onda es la distancia que recorre una onda en un ciclo, medida en metros (m) (Carey, 1995; Talley *et al.*, 2011). A su vez, la velocidad con la que se desplaza el sonido a través del agua está regida por el calor específico, la densidad y el módulo de elasticidad de Bulk (Romero-Vivas *et al.*, 2021), sin embargo, estas variables se relacionan con tres variables ambientales, la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), la salinidad (PSU), y la profundidad (m), las cuales son más fáciles de medir (Del Grosso, 1974).

2.3 Bioacústica marina

Ya que el sonido es la radiación mejor transmitida bajo el agua (Urlick, 1983), sus aplicaciones por parte de la biota marina son diversas, tanto en su forma de producirlos, como en la frecuencia e intensidad en la que los manejan (Johnson *et al.*, 1947; Skoglund, 1961; Salinas-Zacarías, 2005). Estos sonidos de origen biológico (o biofonía) son altamente variables, tanto en

tiempo, espacio, frecuencia y en potencia (Au y Hastings, 2008; Montgomery y Radford, 2017); también se diferencian dependiendo de su directividad, o bien la forma más común, de acuerdo con su uso: en la comunicación, asociado al forrajeo, navegación, a la depredación o a la reproducción (Au y Hastings, 2008).

Muchos organismos acuáticos, como mamíferos marinos, invertebrados (principalmente crustáceos) y peces, producen sonidos con frecuencias de emisión que varían de infrasonido (<20 Hz) a ultrasonido (>20 kHz). Sus señales están integradas con el entorno natural, formando ambientes sonoros complejos y diversos (Farina y Gage, 2017).

Distintos organismos producen sonidos al realizar sus actividades biológicas, otros emplean el sonido de manera activa para mejorar su éxito de caza/supervivencia. Los crustáceos son un buen ejemplo, tal como el camarón pistola (Alpheidae) que utiliza su quelípedo para producir sonidos de alta energía (115-124 dB) que aturde a sus presas, así como para disputas territoriales (Johnson *et al.*, 1947; Urick, 1983). Algunas especies de peces producen sonidos para mantenerse en contacto con el cardumen y alertar posibles peligros (Popper y Hawkins, 2019), o para intimidar depredadores, como el pez sapo (Batrachoididae), el cual produce sonidos de banda ancha y corta duración (50-100 Hz, 0.1-0.5 s) producidos por la contracción extremadamente rápida de los músculos sónicos intrínsecos en la vejiga natatoria (Skoglund, 1961; Fine *et al.*, 2001). Entre los organismos marinos más estudiados que producen sonidos se encuentran los mamíferos marinos, especialmente los delfines, que presentan sistemas fisiológicos especializados en la producción y recepción de sonidos (Au y Hastings, 2008; Farina y Gage, 2017).

2.4 Paisaje sonoro y la diversidad acústica

El paisaje sonoro es un elemento único y fundamental de un ecosistema, el cual proporciona información sobre las características del ambiente a partir de los sonidos presentes (Cotter, 2008; Pekin *et al.*, 2012). Los sonidos en un paisaje sonoro son atribuidos a un contexto geográfico, lo que conlleva a una identificación de procesos antropogénicos, biológicos y a patrones espectrales y temporales en el ecosistema; por tanto, la complejidad del paisaje sonoro puede estar vinculada al número de especies presentes en el ecosistema (Cotter, 2008;

Pijanowski *et al.*, 2011). Por ello, se puede decir que los paisajes sonoros son ecológicamente relevantes y que proporcionan información importante sobre la dimensión espacial acústica en el que se desarrollan los organismos.

Debido a que el sonido en ecosistemas marinos presenta una eficiente transmisión y poca degradación (Carey, 1995; Talley *et al.*, 2011), se puede considerar que los paisajes sonoros submarinos son dinámicos, y presentan variaciones espacio-temporales influenciados por las condiciones locales y por sonidos generados a grandes distancias; siendo alterado por factores de distintas fuentes, y por consiguiente, influyendo en el comportamiento acústico del componente biológico (Miksis-Olds *et al.*, 2018), y con ello, en los procesos ecológicos del ambiente (Cotter 2008).

Las fuentes acústicas pueden ser abióticas, bióticas y ocasionalmente antropogénicas. Gran parte del sonido ambiental en el mar es generado por fuentes medioambientales, como la actividad meteorológica y geológica (Insley *et al.*, 2017). En aguas someras, el paisaje sonoro se ve afectado por las condiciones de la superficie impulsadas por el viento y las olas (Halliday *et al.*, 2020), por la estructura y la batimetría del fondo marino (Urlick 1983), así como las características fisicoquímicas del agua (Chen y Millero, 1977). Por su parte los sonidos producidos por la presencia de organismos vivos van a variar en función del comportamiento de dichos organismos (McCauley y Cato 2000). Al mismo tiempo, la intrusión antropogénica en los sistemas marinos puede crear problemas con la comunicación animal mayores que en los sistemas terrestres porque con los animales marinos se producen en un entorno más restringido (Farina y Gage, 2017).

De esta forma, resulta relevante analizar el comportamiento acústico de un ecosistema, y para ello primeramente se plantearon herramientas que apoyaran su estudio, como los espectrogramas de largo plazo, que permiten observar la variación del dicho ambiente a través del tiempo y determinando las características de los sonidos (frecuencia, energía, etc.), permitiendo separarlos en bandas de frecuencia (Curtis *et al.*, 1999), así como la densidad espectral de potencia (PSD) que estima la intensidad de las variaciones de energía de dicho ambiente en función de la frecuencia, en lugar del tiempo, que generalmente se usa para caracterizar señales aleatorias de banda ancha (Lindseth y Lobel, 2018). Para el paisaje acústico

se emplean de igual forma la descripción de los espectrogramas de largo plazo, y más recientemente, se han desarrollado los índices ecoacústicos para el estudio de éste (Sueur *et al.*, 2008; Farina y Gage, 2017).

2.5 Índices ecoacústicos

Los índices ecoacústicos permiten caracterizar la complejidad del paisaje sonoro gracias al detalle en la información que proporcionan, así como reportar la diversidad acústica del ecosistema, por lo que han resultado una herramienta útil para este fin (Sueur *et al.*, 2008; Pieretti *et al.*, 2011; Farina *et al.*, 2016). Estos índices son derivados de los índices de diversidad ecológica (α y β) y permiten describir las características, diversidad, complejidad, uniformidad y las proporciones de frecuencias de los sonidos (Sueur *et al.*, 2008; Pekin *et al.*, 2012; Parks *et al.*, 2014).

Si bien la diversidad acústica es un indicador de la diversidad de especies, no puede suplantar completamente a la determinación visual de la diversidad en el ecosistema (Pekin *et al.*, 2012; Gasc *et al.*, 2013), ya que la diversidad acústica no analiza directamente todas las facetas de una comunidad y se enfoca en las especies vocales y móviles, dejando a los no sonoros como una determinación indirecta (Farina y Gage, 2017). Sin embargo, si son bien empleados en comunidades conocidas y estudiadas, son de gran utilidad para estudiar su variabilidad espacio-temporal con un esfuerzo menor y con resultados de gran validez (Gasc *et al.*, 2013).

Aunque se argumenta que los índices en general no son completamente confiables por descuidar la naturaleza multivariada de la biodiversidad (Purvis y Hector, 2000), sin embargo, el desarrollo de un índice es útil porque se sintetiza la biodiversidad en uno o más valores que pueden presentarse fácilmente a los responsables de la formulación de políticas públicas de gestión y de conservación.

2.5.1 Índices ecoacústicos y su aplicación en el mar

Para el estudio de la diversidad alfa (α) y beta (β) se han utilizado Los índices ecoacústicos (21 y siete respectivamente) (Farina *et al.*, 2016; Farina y Gage, 2017); en los ambientes marinos y/o costeros los índices que presentan una amplia base bibliográfica (Buscaino *et al.*, 2016;

Bohnenstiehl *et al.*, 2018), son los índices alfa α , como el índice de complejidad acústica (Pieretti *et al.*, 2011; Anexo A1), el índice de entropía acústica (Sueur *et al.*, 2008; Anexo A2), el índice bioacústico (Boelman *et al.*, 2007; Anexo A3), el índice diferencial normalizado del paisaje sonoro (Kasten *et al.*, 2012; Anexo A4). Estos índices tienen la ventaja de poder ser empleados para el análisis de la diversidad local, evitando la complejidad de considerar los flujos y cambios de la diversidad regional a diferencia de los índices beta (Brown, 2003; Sharma, 2012).

2.5.1.1 El índice de complejidad acústica (ACI)

Es un algoritmo diseñado para cuantificar directamente las complejas vocalizaciones bióticas. Calcula la variabilidad de las intensidades registradas en las grabaciones de audio (a pesar de la presencia constante de ruido generado por humanos). El índice da más importancia a los sonidos con amplitudes moduladas, que en este caso se considera como biofonía; las amplitudes constantes se consideran como antropofonías y geofonías; por tanto, computa la amplitud absoluta promedio entre celdas adyacentes de la matriz generada por el algoritmo en cada banda de frecuencias (Pieretti *et al.*, 2011).

2.5.1.2 El índice de entropía acústica (AEI)

Describe la diversidad alfa (α) de un ecosistema, ya que muestra una correlación logarítmica con el número de especies dentro de la comunidad acústica. Los valores bajos indican los tonos puros y los valores altos indican la presencia de biofonías con bandas de frecuencias numerosas y uniformes, ya que el índice pondera las variaciones de sonidos en tiempo (H_t) y en frecuencia (H_f), diferenciando sonidos seguidos e intermitentes (Sueur *et al.*, 2008).

2.5.1.3 El índice bioacústico (BI)

Consiste en calcular la energía en decibeles y en calcular el área bajo la curva entre dos límites de frecuencia. Los valores de área son, por lo tanto, una función tanto del nivel de sonido como del número de frecuencias bandas utilizadas por los organismos presentes. El índice considera que todo sonido presente es una biofonía, y solo computa aquellos sonidos entre 2 y 8 kHz (Boelman *et al.*, 2007).

2.5.1.4 El índice diferencial normalizado del paisaje sonoro (NDSI)

Busca estimar el nivel de perturbación antropogénica en el paisaje sonoro mediante el cálculo de la proporción de componentes acústicos generados por humanos (antropofonía) y componentes acústicos biológicos (biofonía) encontrados en muestras de sonido del ecosistema; dicho índice considera como antropofonía a los sonidos entre 1 y 2 kHz, y como biofonía a los que están entre 2 y 8 kHz (Kasten *et al.*, 2012).

2.6 Sistemas costeros y su importancia ecológica

Los sistemas costeros se catalogan como el espacio geográfico de interacción entre el medio marino, el terrestre, y el atmosférico, que dan lugar a un conjunto de ecosistemas únicos (Lara-Lara *et al.*, 2008). La complejidad de estos ambientes, sus flujos energéticos y las adaptaciones biológicas le dan a este tipo de sistemas características de estabilidad ecológica, pero frágil a los cambios por influencia antropogénica (Lara-Lara *et al.*, 2008). La productividad se da gracias a numerosos subsidios de energía y a diferentes alternativas programadas de la actividad de los productores primarios y consumidores (Lankford, 1977; Day y Yáñez-Arancibia, 1982). Los sistemas costeros son conocidos como zonas altamente productivas, ecológicamente complejas, con varias funciones ecosistémicas, tales como la formación de detritus, ser áreas de crianza para distintas especies de organismos, exportador de nutrientes, detritus y organismos a los ecosistemas aledaños (Schelske y Odum, 1961; Teal, 1962). A causa de sus bajas profundidades (alrededor de 5 a 10 m en su máxima profundidad), su forma semi-cerrada, y a la gran actividad biótica, abiótica y antropogénica que ocurre en ellos y a sus alrededores (Day y Yáñez-Arancibia, 1982), se puede considerar que estos sistemas costeros presentan ambientes sonoros complejos.

La Ensenada de La Paz, es un sistema estuarino somero (10 m en su parte más profunda), con un sistema de mareas mixto semi-diurno, con giros de corrientes generados por los flujos en la boca (Gómez-Valdés *et al.*, 2002), así como un alto tránsito de embarcaciones grandes de combustóleo o pasajeros en los alrededores de la entrada (API, 2018), o embarcaciones menores de recreación y/o pesca artesanal que transitan por el interior. Aunado a esto y como otros sistemas estuarinos, la Ensenada funciona como un área de refugio, crianza y alimentación

de distintas especies de peces (González-Acosta *et al.*, 1999), invertebrados (Félix-Pico *et al.*, 2000), aves (Becerril y Carmona, 1997), y de delfines nariz de botella (*Tursiops truncatus*) (Salinas-Zacarías, 2005).

2.7 Antecedentes de estudios de fonías en la Ensenada de La Paz

En la Ensenada de La Paz se han descrito y caracterizado diversos componentes acústicos, Gauger *et al.*, (2022), destacan la presencia de las biofonías del delfín nariz de botella del tipo silbido (1.2-35 kHz) a lo largo de todo el canal de la Ensenada, la cual es continua a través del año y se ve afectada por el comportamiento de los organismos (depredación, socialización, etc.) y la distribución de los mismos de acuerdo a factores geofísicos como la temperatura superficial del agua, las fases de la luna, la marea y la hora del día. Para la entrada del canal, ubicado en la Ensenad Gauger *et al.*, (2020) menciona detecciones de silbidos sin distinción de la hora del día y las condiciones ambientales a lo largo del año, siendo en ambos casos un contribuidor constante del ambiente acústico de la zona.

Por su parte León-López *et al.*, (2021) consideran a las biofonías como elementos constantes para la entrada del canal de la Ensenada, e.g. el camarón pistola es una especie típica en el paisaje sonoro de un estuario tropical, cuyos sonidos dominan las bandas de 2.5 a 10 kHz, otras especies sonoras diurnas son los peces de la familia Batrachoididae, que se presentan en la banda de 30 a 1000 Hz y por lo mismo se ven influenciadas y hasta enmascaradas por la presencia de antropofonías de embarcaciones y automóviles (100-2000 Hz) que transitan por las inmediaciones del canal de entrada y el malecón de la ciudad.

Los estudios son escasos sobre las fonías del ambiente de la Ensenada, y si bien se puede hacer inferencia a partir de las detecciones visuales de diversos organismos en la región (Acevedo, 1991b; Abitia-Cárdenas *et al.*, 1994; Félix-Pico *et al.*, 2000), se requieren monitoreos acústicos para un mejor entendimiento y aprovechamiento de la Ensenada.

Este estudio plantea ahondar en la descripción del ambiente acústico de la Ensenada de La Paz, a través del uso de un monitoreo acústico pasivo y la aplicación de índices ecoacústicos, aportando información que pueda servir como una guía sobre su uso en sistemas lagunares-estuarinos, y con ello pueda ayudar en la toma de decisiones de planeación y gestión ambiental, conservación y aprovechamiento de los recursos.

3. JUSTIFICACIÓN

La Ensenada de La Paz es un ecosistema lagunar el cual presenta una relativa baja productividad primaria para un sistema lagunar ($1.19 \text{ g C/m}^2/\text{día}$) (Bustillos-Guzmán y Olivarez-González, 1986), con respecto a otros sistemas estuarinos ($4.32 \pm 3.59 \text{ g C/m}^2/\text{día}$) (Guimarais y González-De Zayas, 2011). Sus áreas de manglar y su baja profundidad, propician que sea una zona de crianza y desarrollo para muchas especies de organismos, lo que significa que es un ecosistema complejo, muy importante para la región de la Bahía de La Paz (Bustillos-Guzmán y Olivarez-González, 1986; Félix-Pico *et al.*, 2000). Con base en los estudios acústicos que se tienen para la región y tomando en consideración que los índices ecoacústicos son útiles para la determinación de la diversidad en los ecosistemas, siendo una herramienta novedosa que puede servir para determinar el estado en el que se encuentra un hábitat de forma sencilla, rápida y sintetizada que los métodos basados en la anotación o en el paisaje sonoro. El desarrollo y uso de estos índices en zonas de importancia biológica que se encuentran en constante cruce con actividades antropogénicas, como lo es la Ensenada de La Paz, es de gran relevancia para su monitoreo. Posteriormente podría ser de utilidad en la toma de decisiones respecto a la conservación y manejo de la zona, como la regulación de la pesca artesanal, o la reducción del tránsito de embarcaciones.

4. HIPÓTESIS

Con base a la geografía y en la escala espaciotemporal en el ambiente lagunar de la Ensenada de La Paz y las diferencias en los sonotipos registrados, los índices ecoacústicos tendrán una correlación mayor con las biofonías que con las antropofonías y geofonías del paisaje sonoro submarino, mostrando que en el área de entrada (sitios con mayor actividad humana), el registro de antropofonías deben ser las representativas, en tanto que al interior de la laguna, predominará el componente de las biofonías.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Caracterizar el paisaje sonoro submarino de la Ensenada de La Paz, a partir de grabaciones pasivas utilizando uno o más índices ecoacústicos.

5.2 Objetivos particulares

1. Identificar y tipificar los componentes acústicos biológicos, geofísicos, y antropogénicos presentes en la región.
2. Evaluar los índices ecoacústicos que sean aplicables con las grabaciones de la Ensenada de La Paz.
3. Aplicar el o los índices aceptados para evaluar la diversidad acústica al interior y a la entrada de la Ensenada.

6. MATERIAL Y MÉTODOS

6.1 Área de estudio

El presente estudio se realizó en la Ensenada de La Paz ($24^{\circ}7'26''$ N, $110^{\circ}23'30''$ W), la cual se localiza al sureste de la Bahía de La Paz, Baja California Sur, México. Es una cuenca de aproximadamente 45 km^2 , conectada a la bahía por un canal de mareas en su parte noreste, de 4 km de longitud, 1 km de ancho, y con profundidades de 10 m. Existe un canal principal que recorre el centro de la laguna que disminuye su profundidad a 4 m en su región más interna, y en esta zona, en las partes noroeste y suroeste, se observan dos cuencas profundas y el resto de la laguna es somero.

La Ensenada presenta el tipo de marea mixta semidiurna con una amplitud media de 1.02 m, velocidades de corrientes de hasta 0.46 m/s en la boca, con un tiempo de renovación de 4.02 ciclos de marea (Félix, 1976). La circulación de las corrientes ocurre mediante dos flujos que se funden en uno al final del canal de entrada. A su vez, una corriente se dirige hacia el sur de la laguna; la corriente remanente en el canal principal continúa de frente hacia el oeste de la zona, con un giro a la izquierda, internándose también en el sur de la Ensenada. Finalmente, un último flujo se dirige hacia el noroeste. En el reflujó solo hay una dirección de salida, el cual va de oeste a este, y cuenta con una circulación por la parte sur de la Ensenada y otra por el canal principal. Estos flujos se juntan antes de la boca para salir por los canales ahí existentes. Entre pleamar media superior y bajamar media inferior, se evacúan $31,000,000 \text{ m}^3$ (Morales-G. y Cabrera-Muro, 1982). La precipitación y escurrimientos en la zona son escasos y ocurren en la temporada de agosto a diciembre, con una precipitación media anual de 150 mm a 250 mm (Banqueiro-Cárdenas *et al.*, 1981).

De acuerdo a las características oceanográficas y biológicas se seleccionaron dos estaciones de muestreo, la boya de navegación #19 (B19) ($24^{\circ}10'11''$ N, $110^{\circ}18'52''$ W), y la boya #29 (B29) ($24^{\circ}8'40''$ N, $110^{\circ}21'14''$ W) (Fig. 1).

La estación B19 se caracteriza por ser un ambiente lagunar con influencia marina y antropogénica, dando como resultado un corredor de fondos arenosos, con corrientes y giros más pronunciados (Gómez-Valdés *et al.*, 2002), y con una constante presencia de

embarcaciones. A su vez, presenta escasas áreas de florecimiento de macroalgas en esta región, que pueden servir de refugio para algunas especies (Chávez-Sánchez, 2012), lo que genera pequeños puntos de alimentación. La proximidad e influencia con la ciudad, hace que las especies marinas que llegan a habitar en la Ensenada, solo utilizan ésta zona como un camino de paso entre las zonas de manglar al interior de la Ensenada, y la Bahía de La Paz (Salinas-Zacarías, 2005).

Por su parte la estación B29 tiene un ecosistema de laguna y marisma, flujos de corriente similares a la estación B19, pero de menor intensidad y con un solo giro en su parte más interna, además de una menor influencia antropogénica (Gómez-Valdés *et al.*, 2002). Dicha estación presentan hábitats de manglar y humedales, suelos arenosos y fangosos, que son el hogar de diversas especies de organismos, entre los cuales destacan las cerca de 17 especies de aves locales y migratorias (Carmona-Islas, 1997; Mendoza-Salgado *et al.*, 2011), una población semi-residente de delfín nariz de botella (*Tursiops truncatus*) (Salinas-Zacarías, 2005), la ictiofauna, principalmente asociada a sus zonas de crianza en los manglares y a las poblaciones residentes de la Bahía de La Paz, que consisten en 390 especies de 251 géneros (Abitia-Cárdenas *et al.*, 1994; González-Acosta *et al.*, 1999), y crustáceos como el cangrejo violinista (*Uca (Leptuca) crenulata*) (Leija-Tristán *et al.*, 1990), o el camarón pistola (Alpheidae).

La Paz es una ciudad con un puerto de importancia pesquera y turística, con un tránsito de aproximadamente 61 embarcaciones por día con un tiempo de presencia promedio de 1.41 minutos, compuestas principalmente por embarcaciones menores (lanchas de pescadores) y en menor medida por embarcaciones mayores (barcos comerciales) (León-López, 2021).

El malecón de la ciudad es un espacio utilizado para diversas actividades todo el año; estas actividades recreativas son de distintos tipos: deporte, expresiones artísticas, culturales, sociales, comerciales y de ocio (Enríquez-Moreno, 2019), por lo que es factible asumir una aportación sonora del malecón hacia la Ensenada.

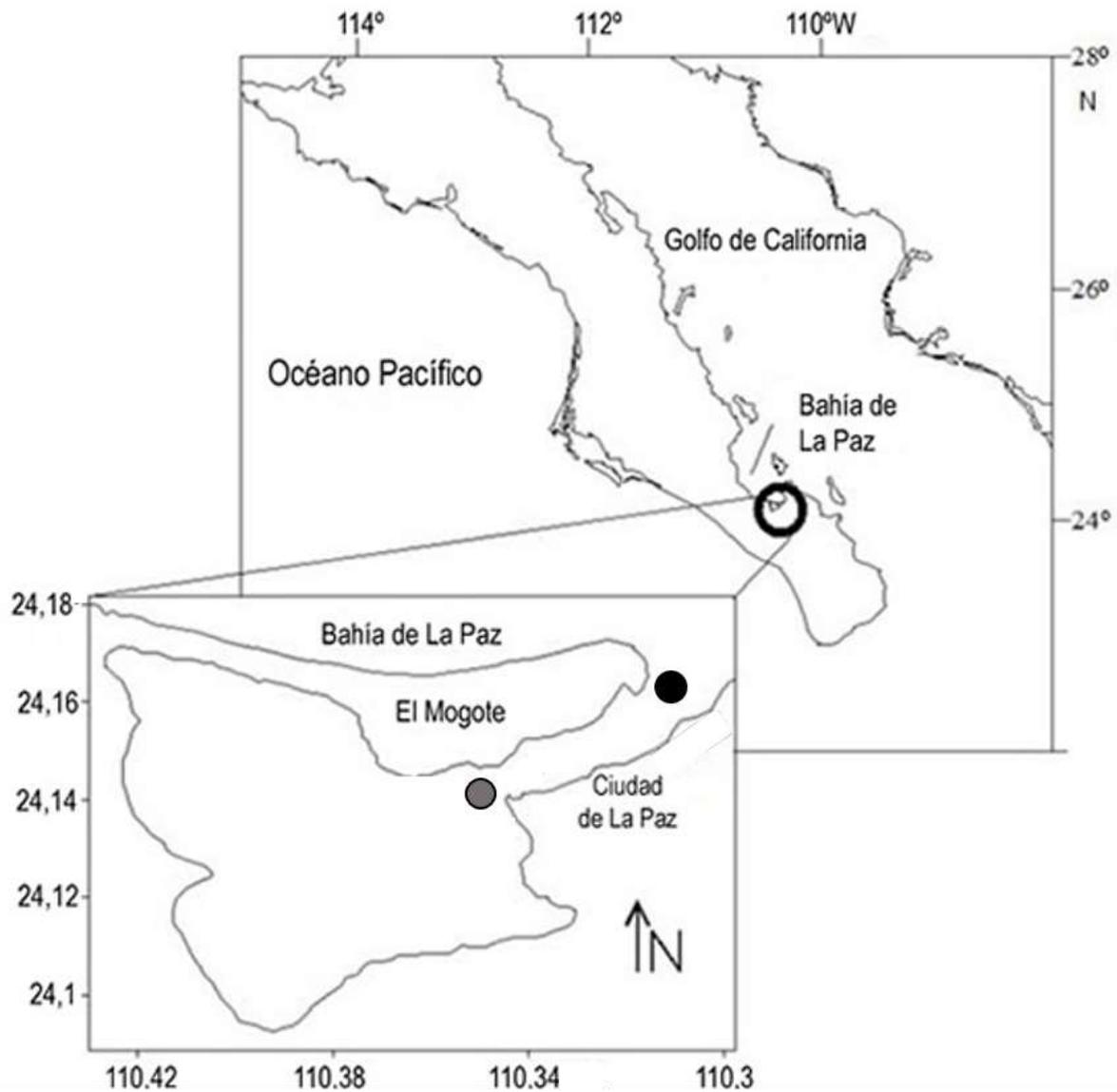


Figura 1. Ensenada de La Paz. Los dos puntos representan los sitios de muestreo, uno en la entrada de la Ensenada (Estación B19 (negro)) y otro dentro de ésta (Estación B29 (gris)).

6.2 Trabajo de campo

Durante el 2018 fueron realizadas dos grabaciones continuas en el mes de julio en dos estaciones de muestreo (Fig. 1), una dentro de la Ensenada (B29), iniciando el día 17 de julio a las 08:33:00 hora local (14:33:00 UTC), y otra en la entrada de la misma (B19), iniciando el 14 de julio a las 16:57:00 hora local (22:57:00 UTC); ambas consistiendo en 20:01:34 horas de grabación.

En cada estación se colocó un sistema de grabación autónoma, el cual contenía una grabadora digital (SONY ICD-PX470) con una frecuencia de muestreo de 48 kHz, y un hidrófono omnidireccional calibrado (micrófono E1 electroLAER) con una sensibilidad de -193 dB ref@1V/ μ Pa (Bustamante *et al.*, 2017).

Los sistemas fueron fijados con una línea a las boyas 19 y 29 (pertenecientes a la Administración Portuaria Integral de la ciudad de La Paz) a 3 m de profundidad.

6.3 Anotación de referencia

Con la finalidad de evaluar los índices con respecto a las estaciones del estudio, se desarrollaron representaciones del paisaje sonoro para cada grabación del muestreo utilizando el software MATLAB (versión 2017b); dichas representaciones son los espectrogramas de largo plazo (representación gráfica de la frecuencia de los sonidos) para ambas estaciones (ventana Hanning 1s, traslape del 50%, promediado en tiempo 60s, en bloques de 300s).

La anotación de los paisajes acústicos se efectuó a través de dos mecanismos de análisis simultáneos: a) espectrogramas que se generaron y revisaron de manera visual, permitiendo medir su energía, frecuencia y duración; b) revisión auditiva con el programa Adobe Audition (versión 3.0), para determinar con mayor precisión la duración de los eventos y la detección de traslapes en el espectrograma.

Para cada evento sonoro detectado se registró la fecha, hora del día y la duración, además de clasificarse conforme a la fuente (ver 6.3.1.). Respecto a la calidad del sonido (en una escala de 1 a 3, donde 1 es la peor calidad y 3 la mejor), esta clasificación se determinó por la energía que presentó el sonido por encima del nivel de ruido natural, siendo así el tipo 1 (10 dB), el 2 (25 dB) y el tipo 3 (35 dB).

Además, se consideró el calendario de mareas del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) del mes de julio 2018, para el registro de la estación B19 los días 14 y 15, una contribución importante como evento acústico a los cambios de marea de al menos 5 cm cada 15 minutos, si los flujos eran menores, no se les consideró relevantes para éste día. Mientras que para los días 17 y 18, del registro de la estación B29, se consideraron relevantes los cambios de al menos 2.5 cm cada 15 minutos. Estos valores de

cambio de marea se determinaron a partir del gradiente máximo y mínimo observado para cada día. Posteriormente se discretizó en una matriz de 0 y 1, dividiendo el día en lapsos de 15 minutos y considerando como presente el evento de marea (valores iguales o mayores a la razón determinada) con un 1, y su no detección con un 0.

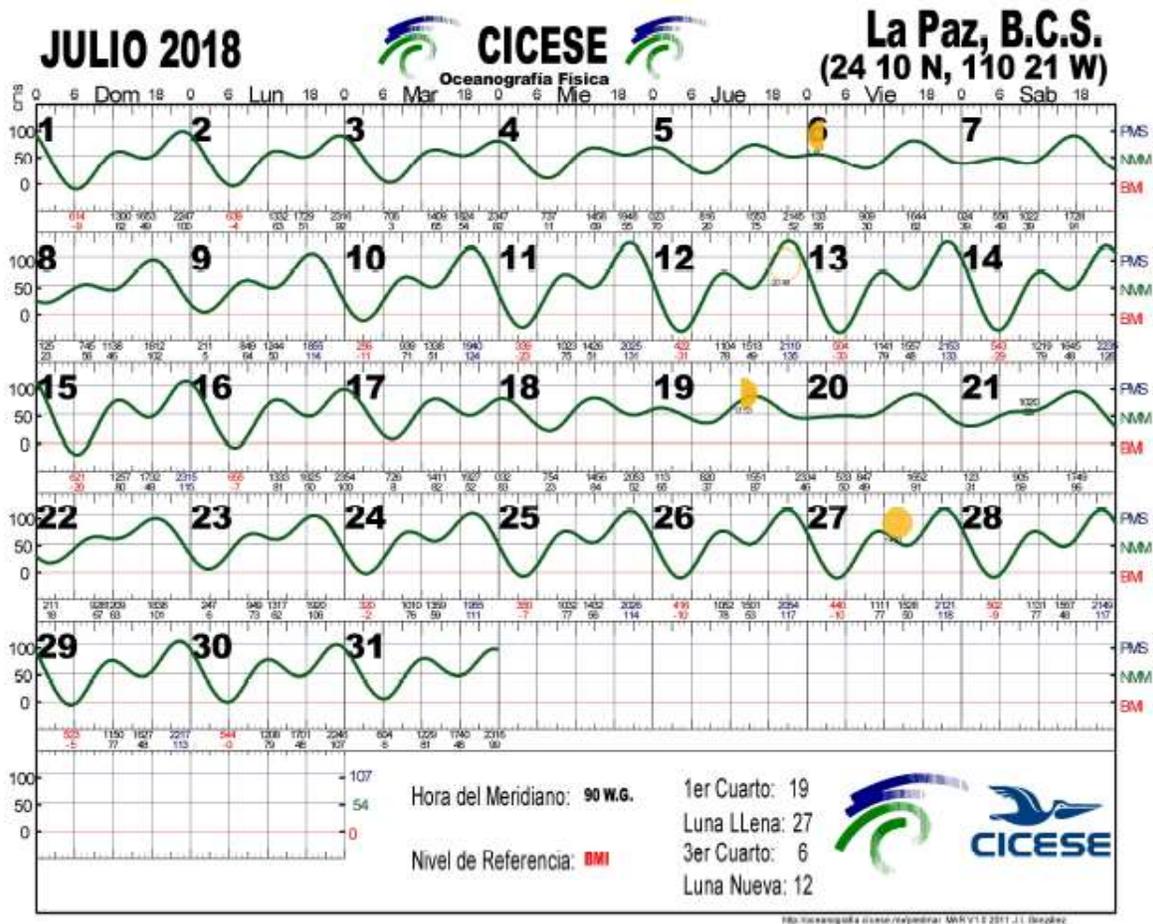


Figura 2. Calendario de mareas para el mes de julio de 2018, que muestra los valores de la pleamar superior (PMS), nivel medio del mar (NMM) y la bajamar (BM), así como las fechas de las fases lunares; tomado de <http://predmar.cicese.mx/>.

Así mismo, se obtuvieron los valores de dirección y velocidad del viento de la estación meteorológica del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) (24°8'8.971" N, 110°25'24.762" W). Debido a complicaciones técnicas solo se pudieron conseguir los valores para después de las 5 p.m. del día 17 de julio, por lo que no se pudo determinar la presencia del viento para los días 14 y 15, respectivos del estudio de la estación B19.

Para este parámetro se consideró como una magnitud relevante un valor igual o superior a 4 m/s de acuerdo con lo mencionado por Cato y Tavener (1997) para ambientes con mayor cantidad de sonidos no dependientes del viento; esto para el registro del día en periodos de 15 minutos. Se discretizó en una matriz de presencia/no detección de ceros y unos.

6.3.1 Clasificación de los eventos acústicos

Los sonidos registrados en las grabaciones se clasificaron en tres grandes grupos de acuerdo con su origen: biofonías, geofonías, y antropofonías.

Las biofonías fueron subclasificadas en los grupos taxonómicos a los que pertenece el organismo que produce el sonido, siendo estos cuatro grupos: mamíferos marinos, aves, peces e invertebrados. Las geofonías se dividieron en tres subgrupos: atmosféricas (vientos, lluvia), marinas (corrientes, oleaje), y terrestres (movimientos de tierra). Las antropofonías se clasificaron en dos subgrupos: marinas (embarcaciones de pesca, comercio y recreación), y terrestres (automóviles, actividades sociales). Si un sonido perteneciente a un mismo subgrupo generó sonidos dentro de una ventana de 10 minutos entre cada señal, se le consideró como un mismo evento, si el tiempo fue mayor se tomó como un evento distinto.

Para conseguir la identificación de estos eventos acústicos se utilizaron catálogos e inventarios de sonidos, provenientes de diversos estudios en acústica marina (Ryan *et al.*, 2016; Lindseth y Lobel, 2018; Siddagangaiyah *et al.*, 2019; León-López *et al.*, 2021), así como registros sistemáticos de eventos geofísicos por parte de instituciones académicas y gubernamentales (calendario de mareas-CICESE, registro de vientos-CIBNOR, registro de terremotos-SSN). Por su parte, los eventos acústicos que no presentaran información específica para una identificación directa se clasificaron de acuerdo con la similitud que tuviera el sonido no identificado con alguno de los distintos modelos revisados.

De los sonidos detectados, debido su presencia constante e ininterrumpida, las biofonías del camarón pistola no fueron consideradas para los análisis, con la finalidad de poder resaltar el resto de biofonías.

6.4 Ocurrencia de los sonidos

Tras la clasificación y agrupación de los sonidos conforme a su origen, se cuantificó la duración total de cada tipo de evento acústico en ambas estaciones y las veces que fueron detectados utilizando sus registros en las anotaciones de referencia y las inferencias hechas a partir de bases de datos de otras instituciones.

6.5 Índices

La caracterización y cuantificación de los componentes del paisaje sonoro de la Ensenada se obtuvo mediante la utilización de los índices ecoacústicos. Estos fueron elegidos después de una revisión bibliográfica, donde se tomaron primero aquellos índices que hayan sido probados como útiles en ambientes marinos; posteriormente se le dio prioridad a los que fuesen probados en ambientes lagunares o en su defecto costeros, siempre y cuando sean someros.

Los índices seleccionados para el análisis son el índice de complejidad acústica (ACI, Pieretti *et al.*, 2011), el índice de entropía acústica (AEI, Sueur *et al.*, 2008), el índice bioacústico (BI, Boelman *et al.*, 2007), y el índice diferencial normalizado del paisaje sonoro (NDSI, Kasten *et al.*, 2012), a los cuales se les aplicaron pruebas comparativas para determinar la confiabilidad de su análisis con ayuda del software RStudio (versión 1.2.5001), utilizando las funciones de los cuatro índices (ACI(), H(), bioacoustic_index(), y ndsi()) pertenecientes a las librerías “seewave”, “tuneR”, y “soundecology” (Villanueva-Rivera y Pijanowski, 2016). Estos valores se obtuvieron para de ambas grabaciones en segmentos de 15 minutos, ajustado a una ventana Hanning con tamaño de 512 puntos, sin traslape, y suavizado.

6.5.1 Validación por correlaciones

Con los valores obtenidos de los índices ecoacústicos se realizó una comparativa de las estaciones de muestreo para determinar los valores más altos de diversidad acústica, considerando que los índices se basan en la actividad biológica, de ruido natural y de ruido antropogénico.

Debido a que la anotación de los eventos detectados en ambas estaciones se discretizó como una serie de matrices de presencia/no detección y los índices son valores continuos que varían con el tiempo, se optó por validar los índices obtenidos mediante el uso del coeficiente de correlación biserial puntual (Gupta, 1960) (Anexo B) para ambas estaciones, dada su practicidad al analizar las relaciones entre variables continuas y discretas, y simplificando la representación de la eficacia de los índices con valores entre -1 a 1, donde los valores más cercanos al -1 indican un claro efecto negativo del sonido sobre los índices, los más cercanos al 1 un efecto positivo, y al 0 que el sonido no influye de ninguna forma sobre los índices. Todo esto fue realizado en el programa MATLAB (versión 2017b). Las correlaciones se clasificaron como bajas (0-0.3), medias (0.3-0.7) y altas (0.7-1) de acuerdo a los criterios de Ratner (2009).

6.5.2 Validación por análisis del espectrograma

Se realizó una comparativa entre los valores obtenidos de cada índice para biofonías, antropofonías y geofonías a través del tiempo respecto al espectrograma de largo plazo de cada estación, detectando si el comportamiento del índice corresponde a lo mostrado por el espectrograma, validando su respuesta utilizando los gráficos de presencia/no detección.

6.6 Comparativa entre estaciones

Finalmente se analizó la diferencia entre las dos estaciones respecto a los valores de los cuatro índices, la respuesta de los sonidos conforme a las correlaciones, y la cantidad de tiempo de cada evento acústico, y con ello poder determinar los principales eventos acústicos que ocurren entre las dos.

7. RESULTADOS

7.1 Factores ambientales

En la entrada de la Ensenada (Estación B19), los flujos de marea tuvieron un dinamismo relacionado a la sicigia de luna nueva ocurrida en los días previos, con una amplitud de 1.02 m (135 cm de pleamar superior y -33 de bajamar inferior), mientras en la estación ubicada al interior de la Ensenada (B29), los valores de la corriente fueron constantes a lo largo del día a causa de la cuadratura en cuarto creciente que se acercaba, con una amplitud de 0.41 m (87 cm de pleamar superior y 46 de bajamar inferior; Fig. 2).

Respecto a los valores de dirección y velocidad del viento, solo se pudo registrar la información para la estación localizada en el interior de la Ensenada (B29), la que presentó una velocidad cambiante (1.69 a 5.47 m/s), presentando su mayor flujo durante el periodo de las 6 a 8 p.m. La dirección de dichos vientos fue de Norte-Noroeste entre las 5 p.m. a las 12 a.m., para posteriormente cambiar hacia el Oeste entre las 2 a las 4 a.m.

Durante el monitoreo, de acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional, no se registraron movimientos telúricos que pudieran registrarse durante las fechas de muestreo (<http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>).

7.2 Ocurrencia de los sonidos

De las 20:01:34 horas totales de grabación, el tiempo acumulado de las biofonías fue de 04:08:19 horas para la estación de la entrada (B19) y se componen en su mayoría por sonidos de peces, a pesar de que las aves presentaran mayor número de detecciones (10 y 12 respectivamente), y no se detectaron mamíferos marinos. En la estación del interior (B29) las biofonías tuvieron una ocurrencia de 19:31:29 horas, presentando vocalizaciones de aves en casi la totalidad de este tiempo, siendo así el principal componente de las biofonías en esta estación, seguido por las vocalizaciones de mamíferos marinos, y los peces tuvieron el menor tiempo (Tabla 1).

Las antropofonías registradas tuvieron una duración acumulada de 05:03:33 horas en la estación B19 y 11:57:42 horas en la B29. El sonido de embarcaciones fue el componente principal en ambos sitios de estudio (B19= 97.14% y B29= 99.8% del tiempo de antropofonías), el tiempo restante correspondió a sonidos de automóviles (Tabla 1).

Con relación a las geofonías, el tiempo acumulado fue de 03:14:56 horas (estación B19) y 04:17:19 horas (estación B29; Tabla 1).

Tabla 1. Número y duración de las detecciones de cada tipo de evento acústico ocurrido en ambas estaciones de muestreo.

Estación	Sonido	Fuente	Número de detecciones	Tiempo
Entrada (B19)	Biofonías	Peces	10	03:52:09.7910
		Aves	12	00:49:42.7605
		Mamíferos marinos	0	00:00:00.0000
		Tota/Acumulado	22	04:08:19.5610
	Antropofonías	Barcos	54	04:54:53.5735
		Autos	2	00:08:40.3151
		Tota/Acumulado	56	05:03:33.8887
	Geofonías	Marea ¹	5	03:14:56.4059
		Viento ²	-----	-----
		Tota/Acumulado	5	03:14:56.4059
Interior (B29)	Biofonías	Peces	3	01:12:38.5182
		Aves	7	19:23:31.6038
		Mamíferos marinos	17	04:25:06.0516
		Tota/Acumulado	27	19:31:29.9343
	Antropofonías	Barcos	27	11:56:19.1670
		Autos ³	4	00:01:26.1304
		Tota/Acumulado	31	11:57:42.2637
	Geofonías	Marea ¹	4	00:02:19.2482
		Viento ¹	4	04:15:00.0000
		Tota/Acumulado	8	04:17:19.2482

Notas: ¹Eventos inferidos a partir de bases de datos. ²Ausencia de información. ³Clasificados como tal por su similitud a los de la estación B19.

7.3 Índices

7.3.1 Correlaciones

La determinación de la diversidad acústica de cada sitio de estudio fue analizada a través del coeficiente de correlación biserial puntual. En el interior de la Ensenada (estación B29), los valores con mayor correlación correspondieron a las biofonías, mientras que en la entrada de la Ensenada (estación B19) solo el ACI tuvo un valor de correlación medio (-0.4527), lo que implica diferencias en la composición biótica de ambas estaciones.

Con relación a las antropofonías, en el interior de la Ensenada (B29), los valores de correlación variaron de -0.2458 (ACI) a 0.4079 (NDSI). En la estación de entrada a la Ensenada (B19) los valores de correlación fueron menores (-0.0749 a 0.2781), teniendo así mayor correlación con embarcaciones recreativas que con barcos comerciales.

Las geofonías tuvieron los valores de correlación menor en ambos sitios de estudio, solo el ACI en la estación B19 tuvo un valor más alto (0.4404), indicando que los eventos de marea son mejor reconocidos que los de viento.

Tabla 2. Valores del coeficiente de correlación biserial puntual (r) para las tres clasificaciones de sonidos en ambas estaciones de muestreo. Índice de complejidad acústica (ACI), índice de entropía acústica (AEI), índice bioacústico (BI) e índice diferencial normalizado del paisaje sonoro (NDSI).

Índice/Estación		Coeficiente		
		Biofonías	Antropofonías	Geofonías
ACI	B19	-0.4527	0.2781	0.4404
	B29	0.4680	-0.2458	0.1267
AEI	B19	0.2022	0.0938	0.0713
	B29	0.4589	-0.3692	0.2748
BI	B19	0.2235	0.1263	0.0806
	B29	-0.5258	0.3348	-0.1284
NDSI	B19	0.2318	-0.0749	0.0995
	B29	0.3964	-0.4079	0.2589

7.3.2 Análisis del espectrograma

Utilizando los espectrogramas de largo plazo y las detecciones de los distintos tipos de eventos sonoros en la estación B19 (Fig. 3), se describe la presencia de biofonías de camarón pistola (CP) durante toda la grabación, con un aumento a la mitad del registro, los coros de peces (Ps) y aves (Av) durante la noche, además de antropofonías de embarcaciones (E) en distintos momentos del día; las geofonías por marea no se lograron diferenciar en el espectrograma.

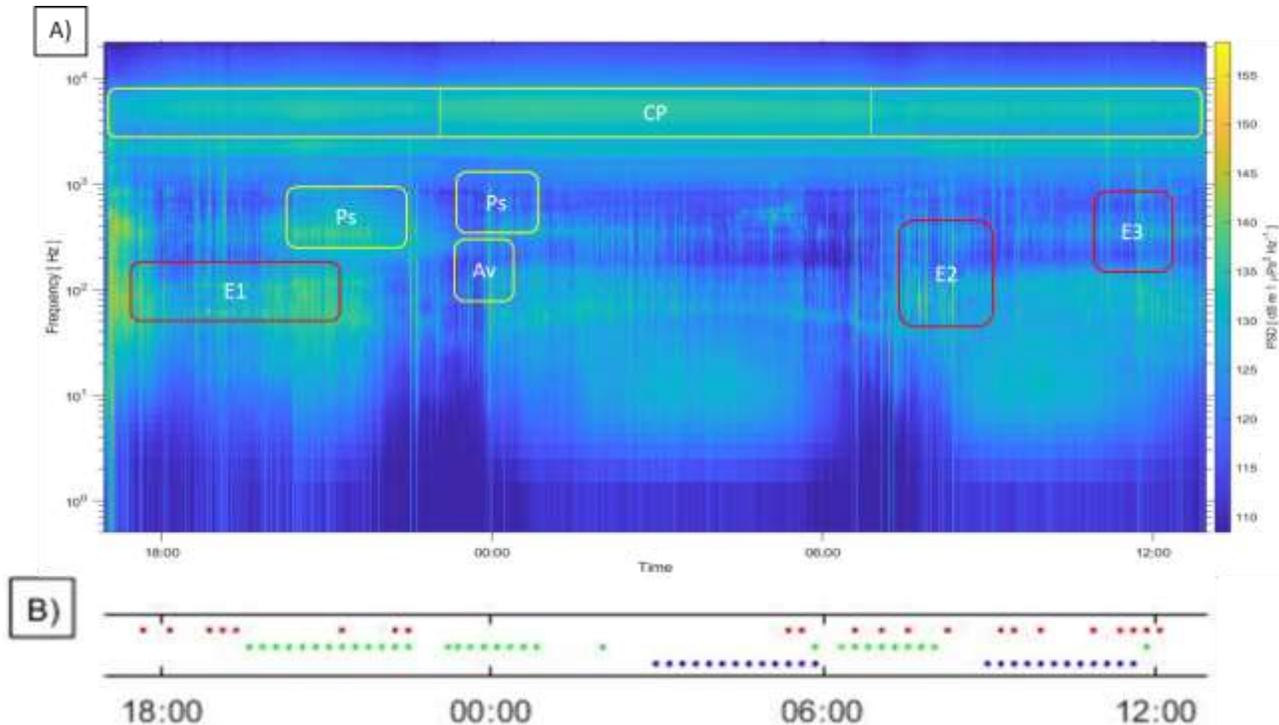


Figura 3. A) Espectrograma de largo plazo donde se destacan los eventos relevantes de peces (Ps), aves (Av), camarón pistola (CP) y embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección de antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul), ambos para la estación B19.

Los resultados obtenidos con el índice de complejidad acústica (ACI; Fig. 4), destaca los eventos de antropofonía (con los que su correlación es de 0.2781) de barcos en la banda de 100 a 500 Hz (E1), dando valores de 205. Para el periodo comprendido entre las 6 p.m. y la medianoche, el índice disminuye al encontrarse con antropofonías mezcladas con detecciones de biofonías (E1 y Ps), así, éste continúa llegando a su punto más bajo (170) a la medianoche que es cuando se presentan un conjunto de biofonías, principalmente de peces y aves (Ps y Av) con las cuales su correlación es de -0.4527, además de la presencia constante de camarón pistola (CP); poco después, el índice aumenta al encontrarse con geofonías por flujos de marea, dado por su

correlación de 0.4404 con estos eventos. En las últimas horas del registro correspondiente, los valores del índice aumentan, y se mantienen sin cambios mayores debido al aumento de la variedad en sonidos de las bandas de los 100, los 800 Hz, 2 y 5-6 kHz, yendo de embarcaciones transitorias (E2 y E3), y biofonías de altas frecuencias (CP).

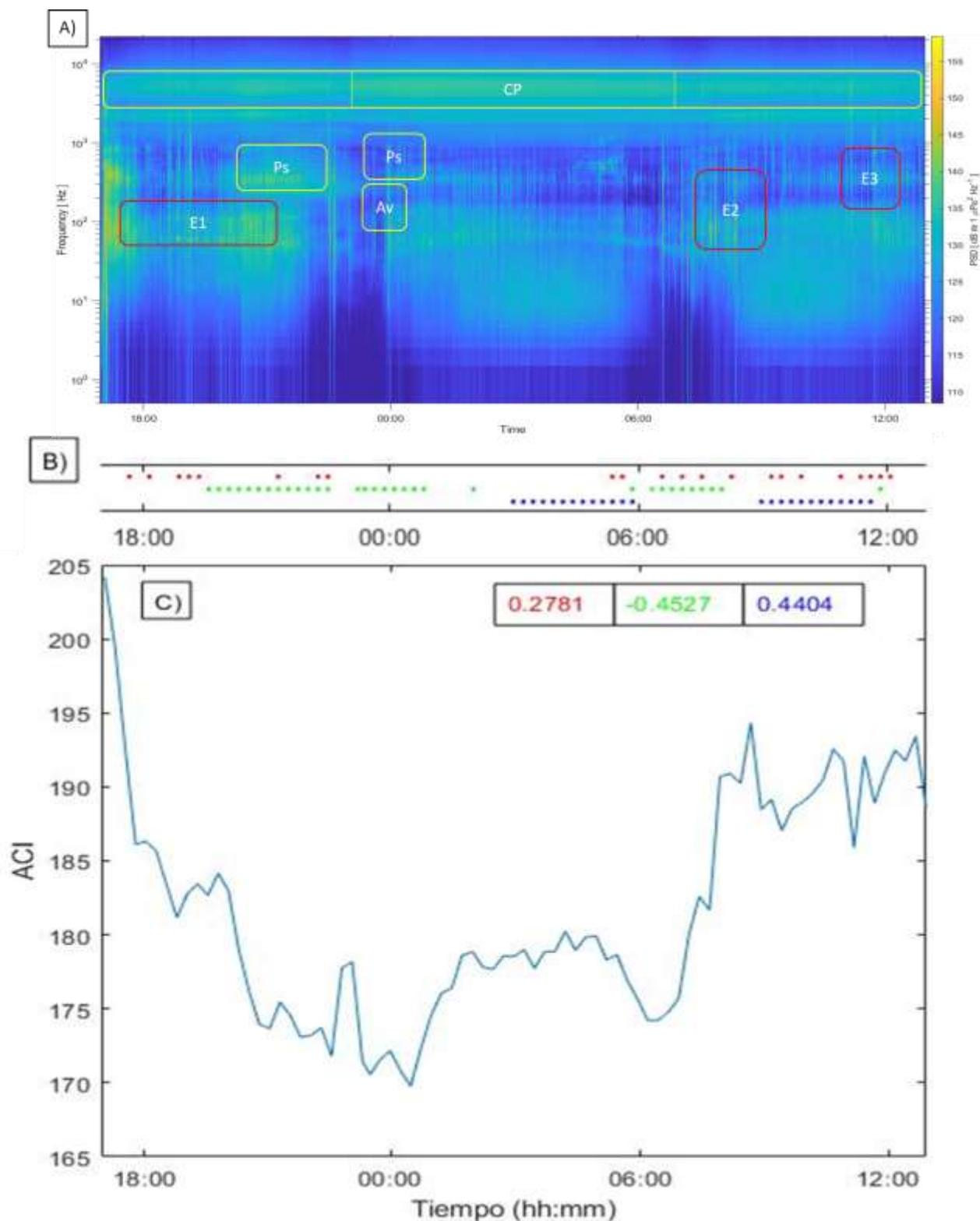


Figura 4. Comparativa del A) espectrograma de largo plazo con encuadres de los eventos relevantes de peces (Ps), aves (Av), camarón pistola (CP) y embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección. C) Valores del índice ACI para la estación B19, que incluye sus valores de correlación biserial puntual para antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul).

Con el índice de entropía acústica (AEI; Fig. 5) se obtuvieron valores que oscilan en promedio 0.9 durante todo el tiempo registrado, estos valores están relacionados con la alta detección de biofonías en la zona. En el inicio, se observan los valores más bajos del índice para este día (0.895) a la par de unas antropofonías (E1), donde los cambios ligeros ante las embarcaciones se asocian a su baja correlación con este tipo de eventos (0.0938). Posterior a esto, aumenta sus valores a 0.92-0.93, con la ocurrencia de sonidos en distintas bandas de frecuencia, desde los 80 y 200 Hz hasta los 2 y 6 kHz, asociados a las biofonías de peces y aves (Ps, Av), con las que tiene una correlación de 0.2022, así como de camarón pistola (CP), y las ligeras disminuciones se asocian a la presencia de geofonías de marea, cuya correlación es baja (0.0713). Por el resto de la grabación el índice AEI sigue mostrando valores altos y constantes alrededor de 0.92, sin importar la presencia de embarcaciones (E2 y E3), debido a la poca influencia que tienen estos eventos sobre el índice.

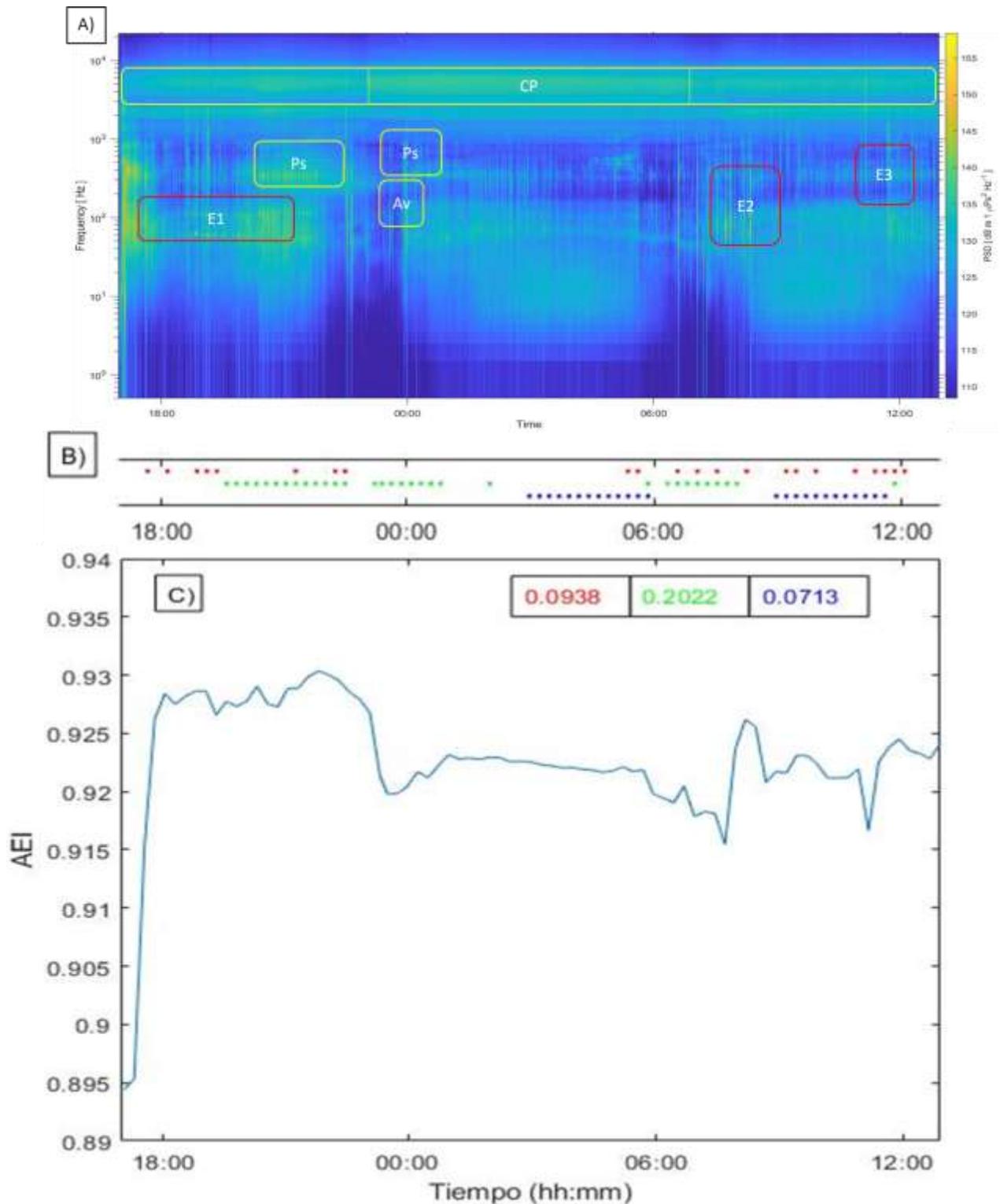


Figura 5. Comparativa del A) espectrograma de largo plazo con encuadres de los eventos relevantes de peces (Ps), aves (Av), camarón pistola (CP) y embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección. C) Valores del índice AEI para la estación B19, que incluye sus valores de correlación biserial puntual para antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul).

En cuanto al índice bioacústico (BI; Fig. 6), se obtuvieron valores alterantes, entre 5 a 3.5, comenzando con valores de 3.5, mientras ocurren antropofonías de 100-500 Hz (E1), sin embargo debido a la formulación del índice que no toma frecuencias menores a 1kHz y la baja correlación (0.1263), es probable que el efecto de las antropofonías sea indirecto por alteración de las biofonías. Cuando las antropofonías disminuyen, el índice empieza a aumentar a valores de 4.5, 5 y hasta un máximo de 5.5, debido a que en el mismo periodo de la tarde y noche empiezan a aumentar las biofonías de peces (Ps), con las que tiene una correlación de 0.2235, así como la presencia de camarón pistola en frecuencias de 500 Hz-6 kHz (CP). Posterior a alcanzar su máximo, el índice cae hasta su mínimo (3.2) y manteniendo valores bajos durante la mañana (02:30-09:00 a.m.) mientras se presentan las geofonías (correlación de 0.0806) y antropofonías de frecuencias alrededor de 100 Hz (E2 y E3), aplicando la misma consideración que las antropofonías previas. Al final del registro, el índice vuelve a aumentar a valores de 4 a 4.5 cuando ya se presentan menos antropofonías y prevalece el camarón pistola.

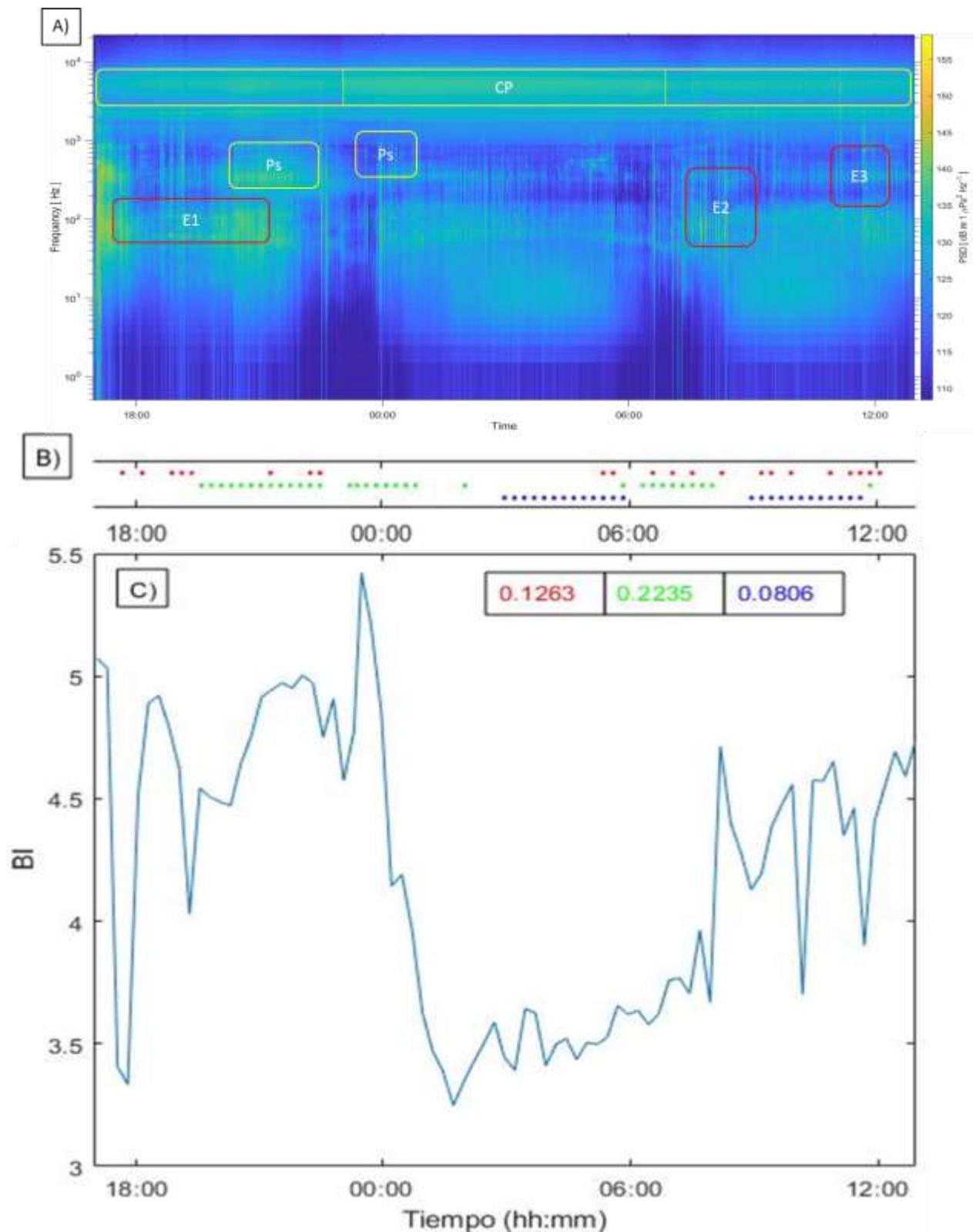


Figura 6. Comparativa del A) espectrograma de largo plazo con encuadres de los eventos relevantes de peces (Ps) y camarón pistola (CP) y embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección. C) Valores del índice BI para la estación B19, que incluye sus valores de correlación biserial puntual para antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul).

El índice diferencial normalizado del paisaje sonoro (NDSI) en la estación B19 (Fig. 7), tiene un comportamiento constante en términos generales, exceptuando el inicio de la grabación, en donde presenta su mínimo (0.62) por las antropofonías (E1) con las que tiene una correlación de -0.0749. Poco después se observa que su tendencia es a aumentar con algunos puntos de caída, ocurriendo cuando se presentan biofonías de peces (Ps) cuya correlación es algo baja (0.2318), y camarones (CP), y algunas antropofonías de barcos (E1). A mitad del registro (entre 12 y 6 a.m.) el índice alcanza su máximo de 0.96 al aumentar la presencia de las biofonías de camarón con frecuencias que superan los 2 kHz (CP), disminuye gradualmente conforme las biofonías dejan de registrarse y surgen las geofonías, a pesar de su baja correlación (0.0995). En las últimas horas, el índice se reduce a valores de 0.9 y una caída a 0.8 cuando comienzan a haber más antropofonías ocasionales (E2 y E3), así como menos eventos de biofonías.

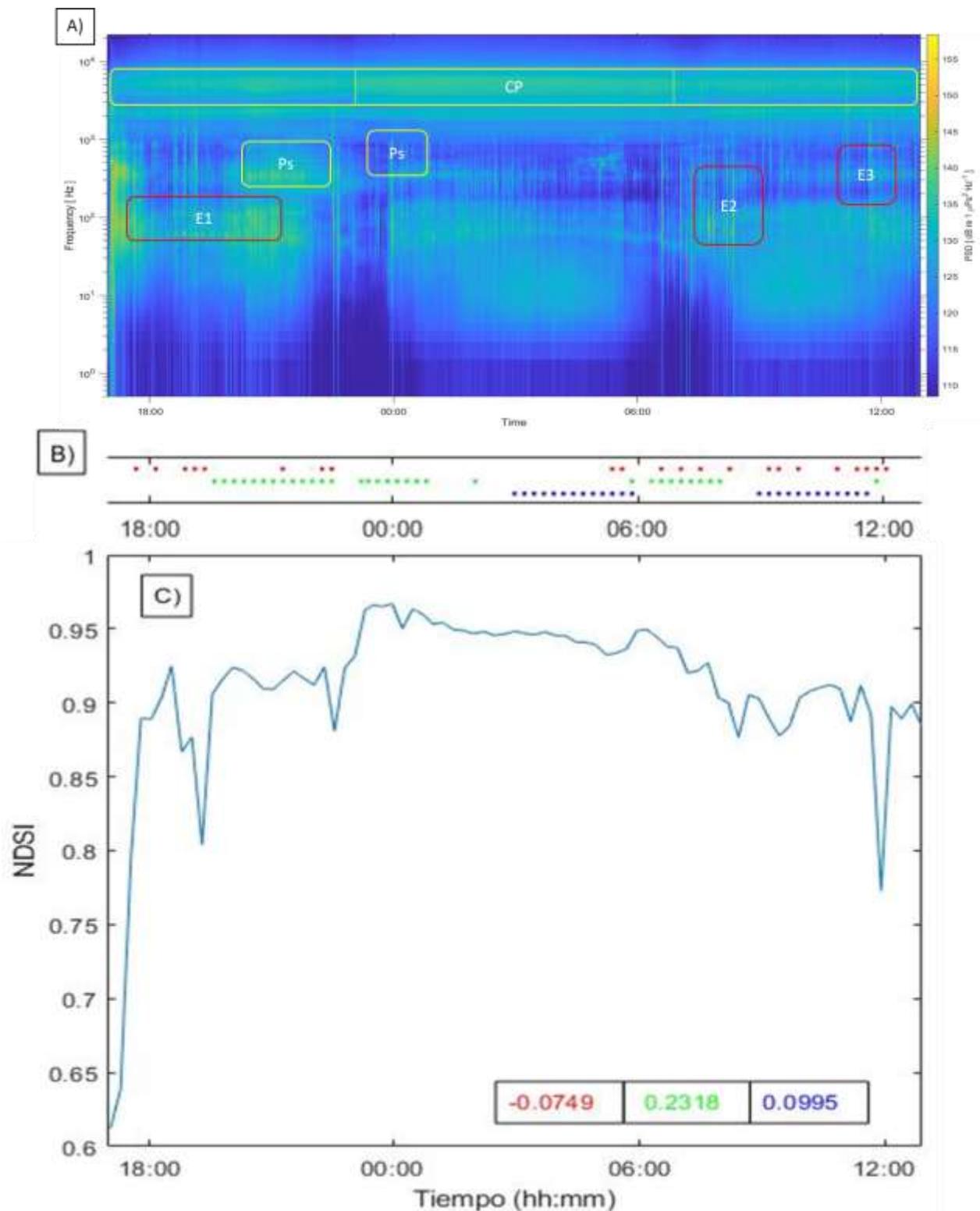


Figura 7. Comparativa del A) espectrograma de largo plazo con encuadres de los eventos relevantes de peces (Ps) y camarón pistola (CP) y embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección. C) Valores del índice NDSI para la estación B19, que incluye sus valores de correlación biserial puntual para antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul).

Los eventos sonoros destacados de la estación B29 (Fig. 8) fueron la presencia de peces (Ps) delfines (Dn) y aves (Av), así como de embarcaciones (E) a lo largo del día. Al igual que en la estación B19, la presencia de camarón pistola (CP) se registró todo el tiempo, y las geofonías (en este caso de vientos) no se lograron diferenciar en el espectrograma.

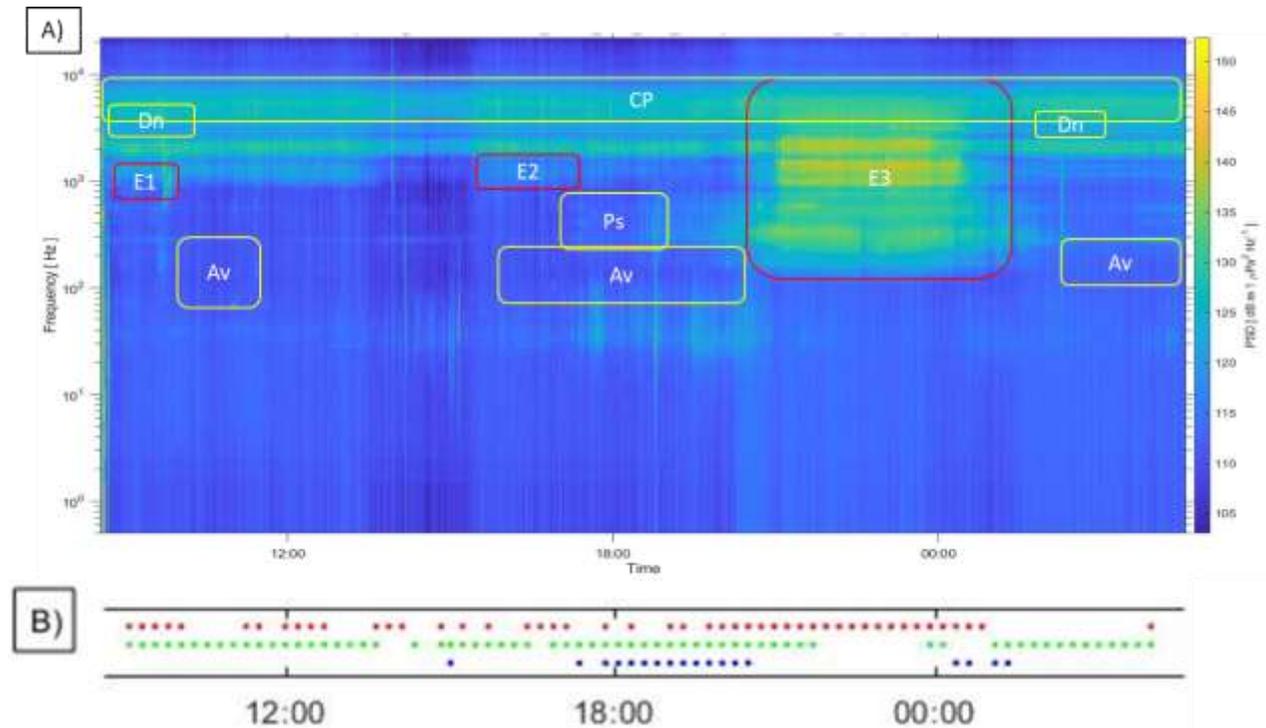


Figura 8. A) Espectrograma de largo plazo donde se destacan los eventos relevantes de aves (Av), delfines (Dn), peces (Ps), camarón pistola (CP) y de embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección de antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul), ambos para la estación B29.

En cuanto a los valores y correlaciones de los índices, el ACI (Fig. 9), sus valores comienzan altos alrededor de 235 debido a la correlación media que tiene con las biofonías (0.4680), así los camarones, aves y delfines (CP, Av y Dn) que están presentes en este periodo de 8 a.m. a 2 p.m. hacen al índice aumentar; a la par que tiene ligeras caídas en sus valores, asociado a la detección de algunas antropofonías (E1) y a su correlación de -0.2458. Posteriormente, del mediodía a las 6 p.m., el índice cae hasta su mínimo (190) y mantiene los valores más bajos con aumentos ocasionales, ya que ocurren eventos de antropofonías (E2) y biofonías de aves, camarones y peces (Av, CP, Ps). Después de esto, las antropofonías de embarcaciones comienzan a aumentar, ocupando un gran intervalo de frecuencias desde 100 Hz hasta casi 3 kHz (E3), así como el aumento en la ocurrencia de geofonías de viento, cuya correlación es baja

(0.1267), y mientras se mantienen las biofonías de camarón y aves, por lo que el índice registra valores menores y fluctuantes en este periodo (~215). A finales del registro las antropofonías dejan de estar presentes, y reaparecen las biofonías al final (Av y Dn), por lo que el índice vuelve a aumentar a ~235 al final.

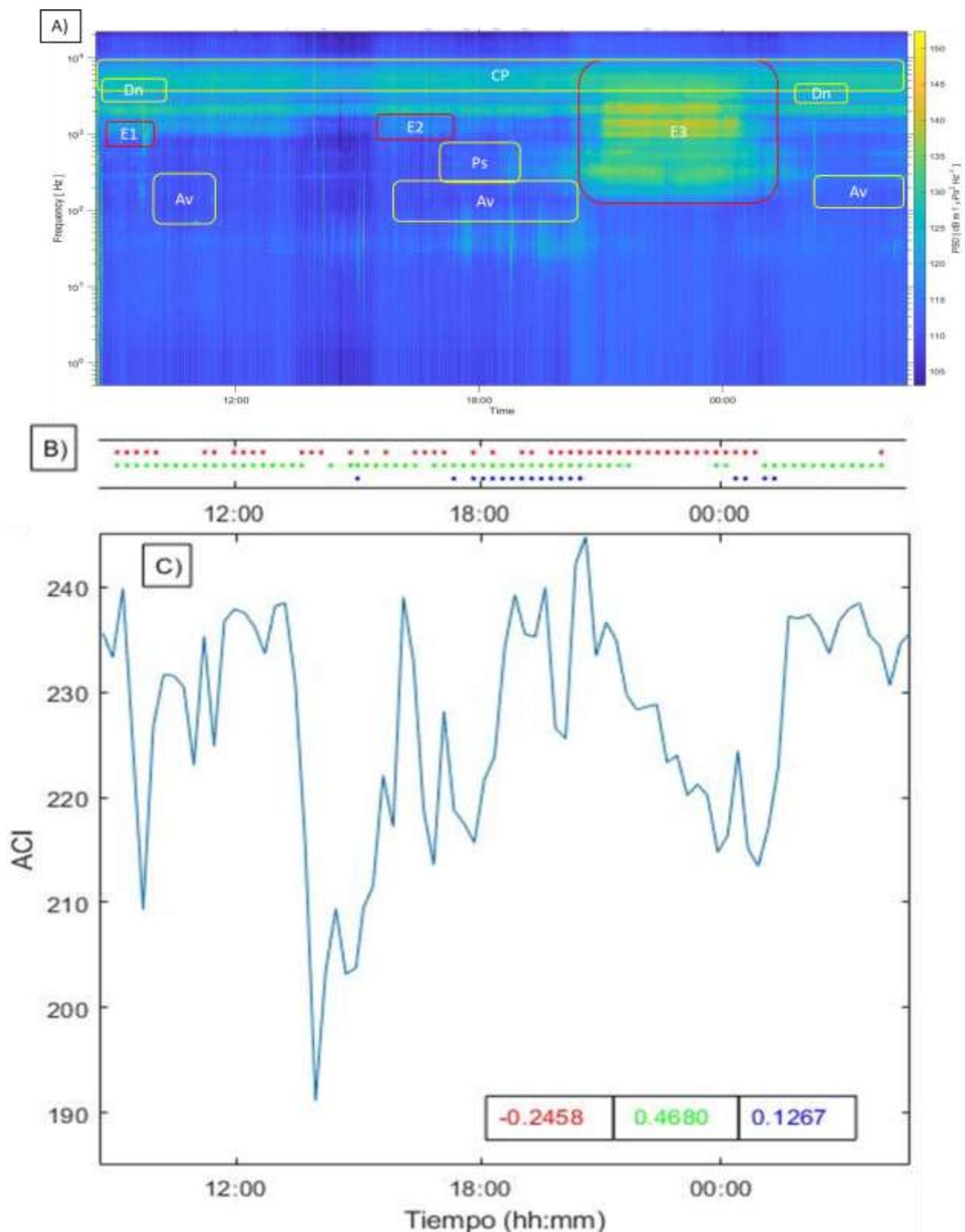


Figura 9. Comparativa del A) espectrograma de largo plazo con encuadres de los eventos relevantes de aves (Av), delfines (Dn), peces (Ps), camarón pistola (CP) y de embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección. C) Valores del índice ACI para la estación B29, que incluye sus valores de correlación biserial puntual para antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul).

En el caso del índice AEI (Fig. 10), los valores rondan el 0.91 durante la primera mitad del registro con la presencia de biofonías de delfines, aves, y peces (Dn, Av, y Ps), con las que tiene una correlación media de 0.4589, así como de camarón pistola (CP), además de registrar ligeras disminuciones ante la presencia de antropofonías (E1 y E2), ya que su correlación es negativa (-0.3692). Poco después (alrededor de las 8 p.m.), se observa una disminución del índice hasta 0.83, que coincide con el aumento de antropofonías en un amplio intervalo de frecuencias, así como de geofonías de viento, lo que debió aumentar ligeramente el índice por su correlación (0.2748), posteriormente, las biofonías de aves y delfines vuelven a hacerse presentes (Av y Dn) los valores del índice regresan a 0.91 y continúa así el resto de la grabación.

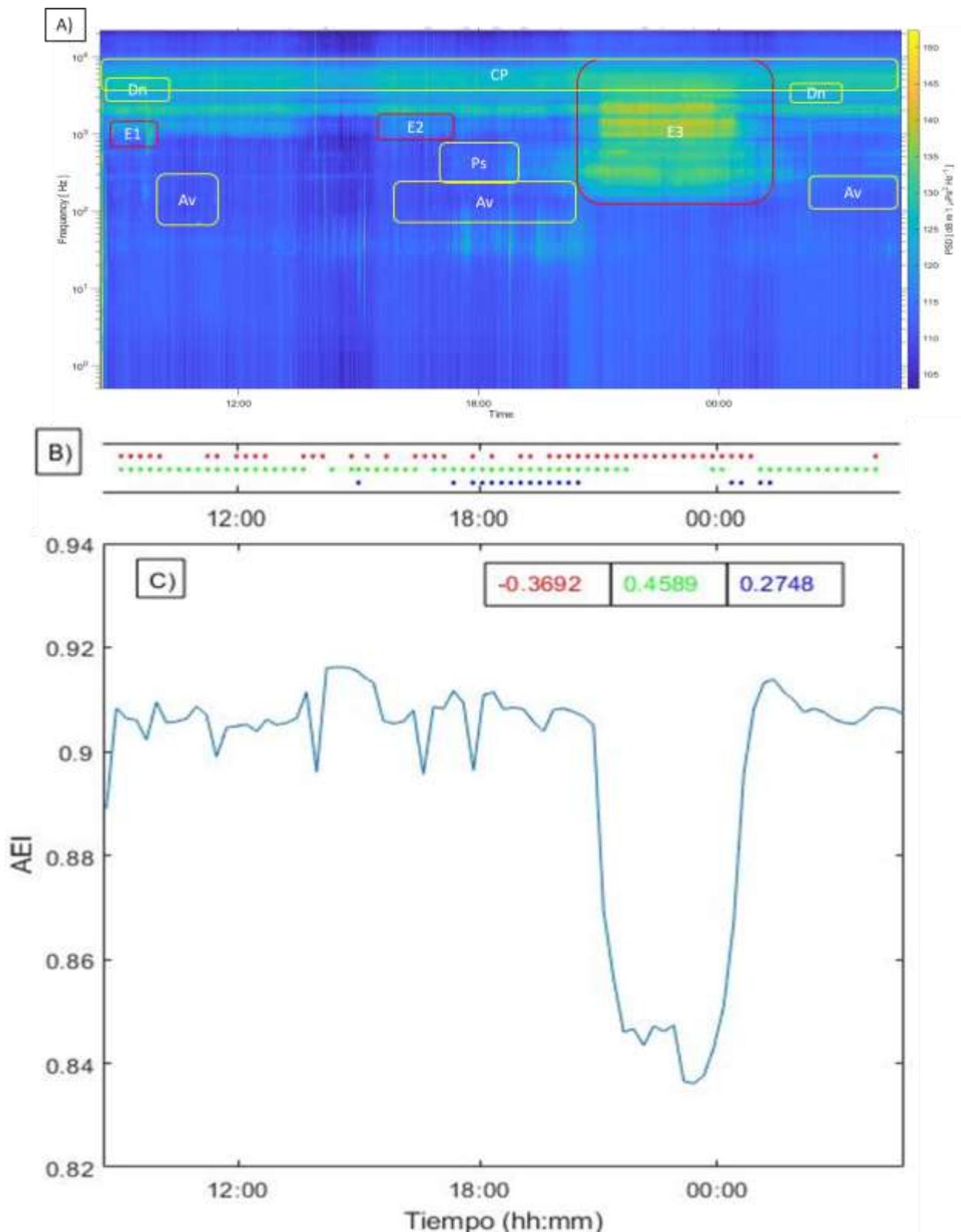


Figura 10. Comparativa del A) espectrograma de largo plazo con encuadres de los eventos relevantes de aves (Av), delfines (Dn), peces (Ps), camarón pistola (CP) y de embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección. C) Valores del índice AEI para la estación B29, que incluye sus valores de correlación biserial puntual para antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul).

En cuanto al índice BI (Fig. 11), de inicio a fin tiene valores cambiantes entre cuatro y cinco, esto debido a la presencia de biofonías de delfines y peces (Dn y Ps), que por su correlación (-0.5258), lo harían disminuir, así como la ocurrencia camarón pistola (CP), y de las geofonías de viento que presentan una baja correlación (-0.1284), mientras que las antropofonías (E1 y E2) le harían aumentar (correlación de 0.3348). Poco después de la mitad del registro, se presenta un periodo con los valores más altos de este índice (7.5), que se relaciona con la disminución de la ocurrencia de biofonías y al aumento en las antropofonías con frecuencias que superan los 2 kHz (E3). Al terminar la presencia de las antropofonías y solo quedar las biofonías de camarón y de delfines (CP y Dn), el valor del índice se reduce hasta valores entre cuatro y cinco.

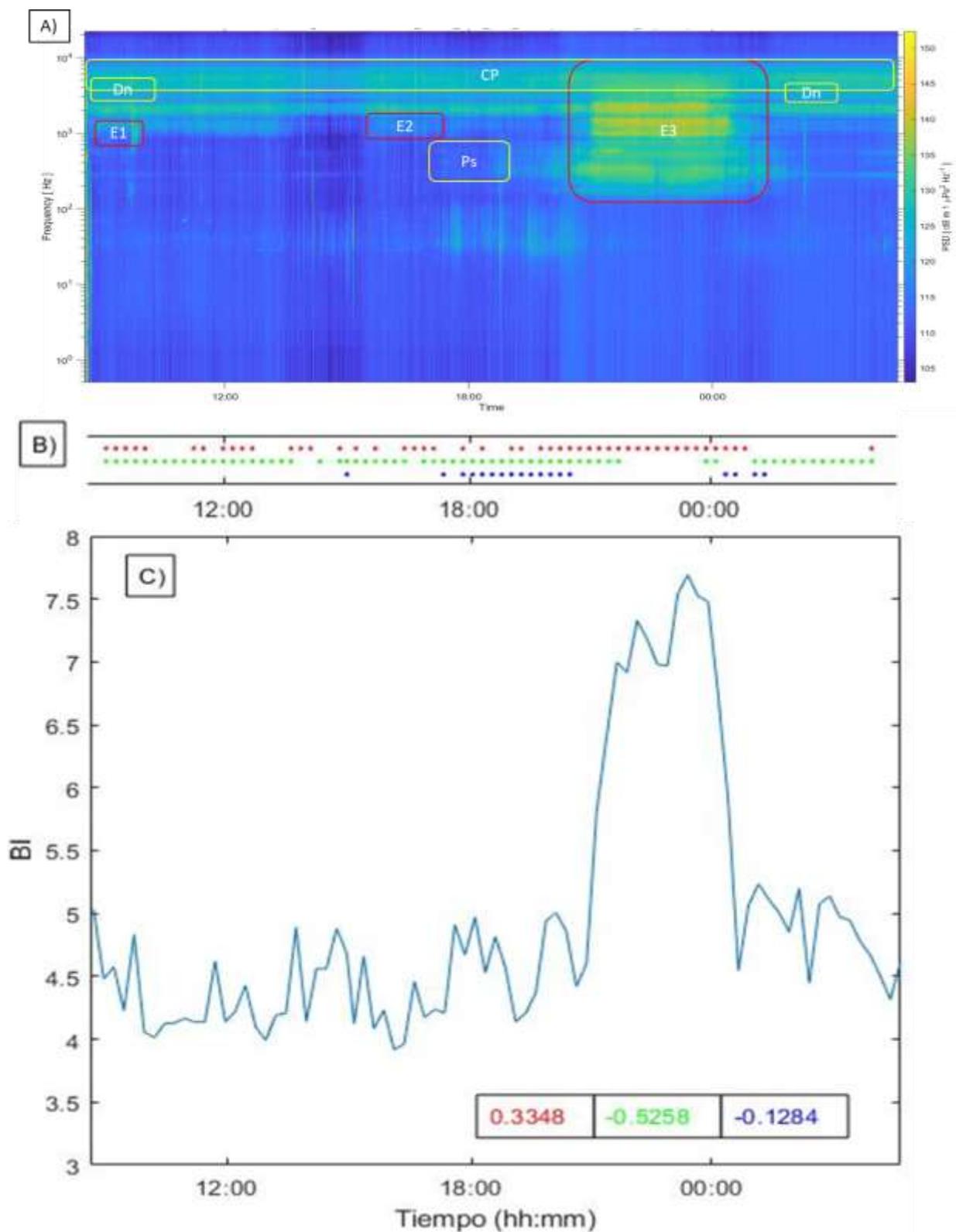


Figura 11. Comparativa del A) espectrograma de largo plazo con encuadres de los eventos relevantes de delfines (Dn), peces (ps), camarón pistola (CP) y de embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección. C) Valores del índice BI para la estación B29, que incluye sus valores de correlación biserial puntual para antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul).

El índice NDSI (Fig. 12) comienza con valores de 0.75 mientras se presentan antropofonías de embarcaciones con frecuencias de 1 kHz (E1) con las cuales tiene una correlación media de -0.4079, y cuando dejan de estar presentes y aumenta la presencia de biofonías (Dn y Ps) cuya correlación es de 0.3964, de camarón pistola (CP), y las geofonías de viento con una correlación de 0.2589, sus valores empiezan a aumentar entre 0.8 y 0.9, con un máximo de 0.92, y presentando ligeras variaciones por antropofonías ocasionales (E2). Sin embargo, avanzado el tiempo poco después de la mitad del registro acústico, se presenta una caída de sus valores hasta 0.3, ya que al considerar el rango de 1-2 kHz como antropofonías, que es la banda con más energía, éste lo reconoce como las embarcaciones que efectivamente están presentes (E3) y reduce de esta forma el valor del índice. Al final, cuando las antropofonías ya no se detectan y solo quedar biofonías de camarón y delfines (CP y Dn), el índice vuelve a aumentar sus valores a 0.9.

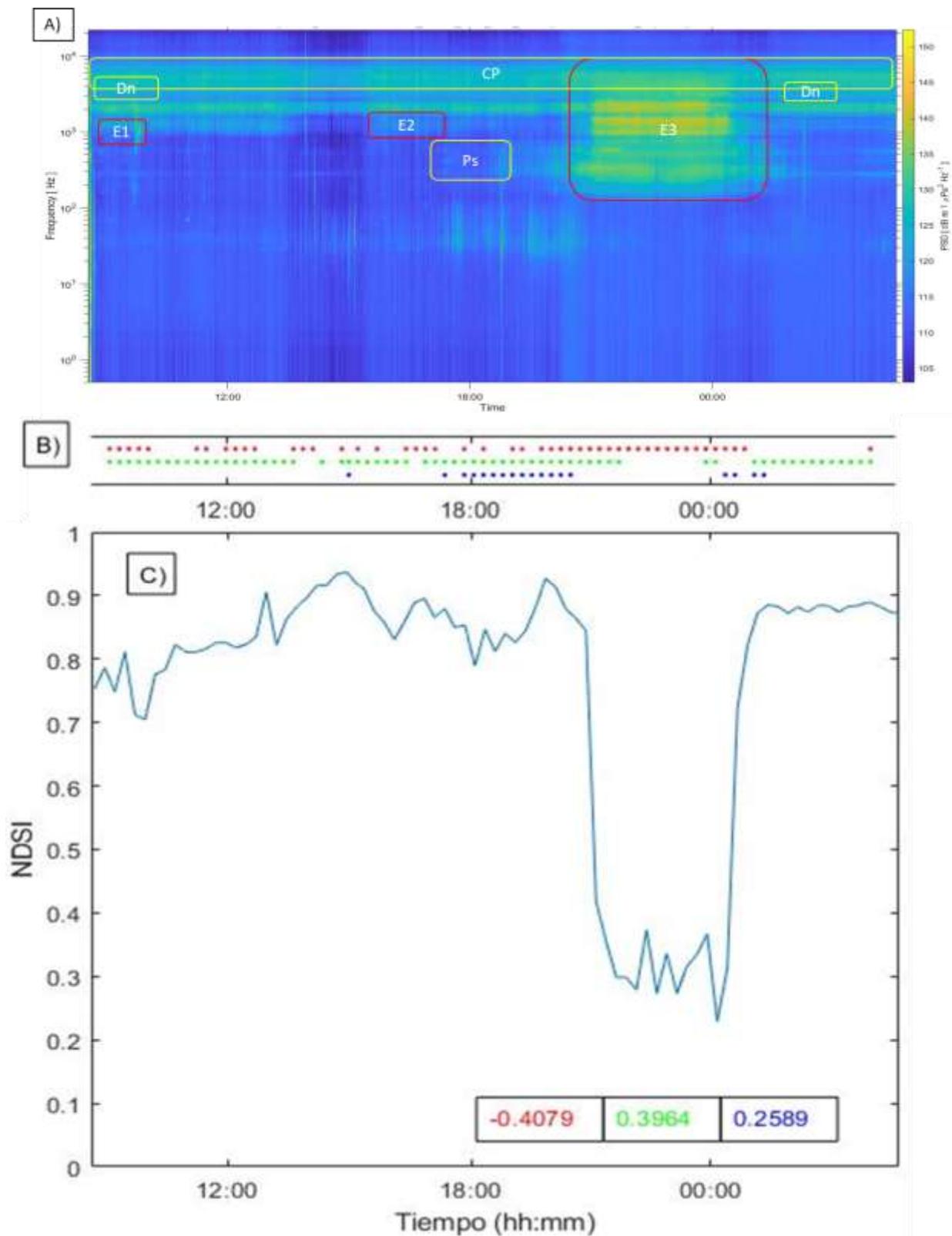


Figura 12. Comparativa del A) espectrograma de largo plazo con encuadres de los eventos relevantes de delfines (Dn), peces (Ps), camarón pistola (CP) y de embarcaciones (E). B) Gráfico de presencia/no detección. C) Valores del índice NDSI para la estación B29, que incluye sus valores de correlación biserial puntual para antropofonías (rojo), biofonías (verde) y geofonías (azul).

7.4 Comparación de estaciones

Sobre el total de 20:01:34 horas, la estación B29 presentó una mayor ocurrencia de los tres tipos de eventos sonoros que en la estación B19, donde las biofonías estuvieron presentes un 76.83%, las antropofonías un 34.47%, y las geofonías un 5.2% más de tiempo que en la B19. Además de esto, el número de eventos sigue el mismo patrón, excepto por las antropofonías, donde en la entrada de la Ensenada hubo 25 eventos más. Esta diferencia es asociada al hecho de que la entrada es una zona de paso para las embarcaciones, por lo que más embarcaciones transitan por ahí, pero por un tiempo menor al que lo harían en el interior.

Los eventos que ocurren en ambas estaciones son esencialmente los mismos, debido a la proximidad entre éstas, pero aun así las fuentes sonoras varían en su proporción debido a las características de cada estación, dando en la entrada detecciones mayoritariamente compuestas por biofonías de peces, antropofonías de embarcaciones grandes, y geofonías de flujos de marea, mientras que en el interior predominaron las biofonías de aves y delfines, las antropofonías de embarcaciones pequeñas, y las geofonías de viento.

Los componentes de cada tipo de eventos sonoros es lo que genera una diferencia en la correlación de los índices entre estaciones, ya que las biofonías en la entrada tuvieron correlaciones mayormente bajas, y en el interior siempre fueron medias, lo que se asocia a su diseño original enfocado en aves, así como por la presencia de más tipos de biofonías que en la entrada. Las antropofonías de embarcaciones pequeñas fueron más fáciles de detectar por los índices debido a sus frecuencias más altas, por lo que también se presentaron correlaciones medias en su mayoría en el interior, y bajas en la entrada, donde predominaron las embarcaciones grandes. Por su parte las geofonías en general dieron correlaciones bajas para ambas estaciones, por lo que es el componente que tiene mayor similitud en presencia entre las dos.

8. DISCUSIÓN

En la presente investigación se evaluó la eficacia de cuatro índices ecoacústicos para describir dos zonas de un mismo ambiente lagunar, la estación del interior (B29) con características ambientales mayormente estuarinas (suelos fangosos, bajas profundidades, presencia de manglar, marismas y algas, escorrentías de tierra y menor influencia del mar), y la entrada (B19) con características mayormente marinas (suelos arenosos, mayores profundidades, baja o nula presencia de vegetación, sin aportes de escorrentías, y una alta influencia del mar abierto).

En principio, todos los índices evaluados probaron ser efectivos para la detección de eventos acústicos, sin embargo, los cuatro índices en ocasiones fallaron al detectar o clasificar los eventos sonoros, donde unos no computaron biofonías presentes (el índice BI no reconoce las biofonías de las bandas de frecuencia menores a 2 kHz) o bien, que respondieron de forma errónea ante ciertas antropofonías (Anexo C, Fig. 11).

8.1 Factores ambientales

Los efectos de los eventos ambientales (viento, corrientes, movimientos telúricos) en este caso se podrían considerar bajos, siendo los flujos de agua el que más pudo afectar, mientras que las geofonías terrestres (movimientos telúricos) no estuvieron presentes.

El calendario de mareas de CICESE pudo aportar información relevante sobre el flujo de mareas que no se pudieron determinar con exactitud en la anotación de referencia y mostró la diferencia en flujo entre los días de ambas estaciones. Sin embargo, también se debe considerar que como mencionan Morales-G. y Cabrera-Muro (1982), los flujos y corrientes que transitan dentro de la Ensenada son mayores en la entrada, y que la formación de giros y la batimetría del interior ralentizan dichos movimientos, por lo que la falta de mediciones de corrientes *in situ* pudo haber contribuido a su no detección en la anotación.

Por su parte, las geofonías atmosféricas no se pudieron registrar en gran parte del tiempo de muestreo, y en el tiempo restante estuvieron ausentes en los registros acústicos. De esta forma, los vientos tuvieron en general una presencia menor durante ese día de muestreo, siendo que solo mostró valores considerables (≥ 4 m/s; Cato y Tavener, 1997) durante un par de horas. Este comportamiento es lo común para la temporada de verano, ya que en ésta se reportan las

menores velocidades a lo largo del año (Anónimo, 1978), con valores promedio de 3-4 m/s. Sin embargo, la dirección de los vientos fue distinta, dado que comúnmente en verano tienen un flujo desde el Sur-Suroeste, y en este estudio fue del Norte-Oeste. Posiblemente esta diferencia sea casual de un solo día, ya que la dirección promedio es respecto al mes, y de tener información de otros días se notaría la dirección predominante de esta temporada.

Así, se considera que la principal causa de la baja detección de ciertas geofonías teóricamente presentes, fue la superposición de otros sonidos (principalmente antropofonías por compartir bandas de frecuencias), o bien al clasificar geofonías como si fueran parte de una antropofonía, sin embargo, los eventos que cumplen con dicha característica son pocos.

8.2 Ocurrencia de los sonidos

La presencia y proporción de cada tipo de sonido a lo largo de los registros acústicos de ambas estaciones mostraron comportamientos distintos (Tabla 1). En la entrada de la Ensenada, se registraron poco más de cuatro horas de biofonías, de las cuales fueron los peces los que generaron casi la totalidad de ese tiempo, y al compararlo con las detecciones de peces en la Ensenada mostradas por León-López *et al.*, (2021) en sus gráficos de presencia/no detección, los peces están presentes en mayor parte del día, demostrando que el canal de entrada de la Ensenada es una zona utilizada por estos organismos. Aunado a esto, hubo varios registros de aves pero con poco tiempo de vocalización detectado, además de que no se encontraron rastros de ningún sonido de mamíferos marinos, a pesar de que, de acuerdo a Acevedo (1991b) y Gauger *et al.*, (2020), la presencia de delfines en la zona es bastante común en la temporada de verano, incluso Gauger *et al.*, (2020) menciona que no hay un horario en específico en que estuvieran presentes o ausentes, por lo que se podría considerar que tienen una presencia continua en la zona; así, la falta de detecciones de estos organismos en el muestreo de la estación B19 se puede deber a que por su comportamiento ese día limitaron su desplazamiento en otras zonas de la región, no vocalizaron (Acevedo, 1991a), o por una superposición de antropofonías (Farina y Gage, 2017).

Las antropofonías estuvieron presentes alrededor de cinco horas del muestreo, y consistieron casi en su totalidad en tránsito de embarcaciones con un alto número de detecciones (54),

donde cada evento tuvo una corta duración, dado que la entrada es una zona de paso tanto para las embarcaciones recreativas y de pesca en el interior de la Ensenada, de las embarcaciones comerciales, y de pasajeros en las proximidades (API, 2018). Estos valores son similares a los obtenidos por León-López *et al.* (2021), ya que las detecciones de embarcaciones que obtuvieron fueron 61 y la duración fue bastante corta (81.65 minutos en un día), y dado que sus registros también pertenecen a la boya B19, se reafirma la idea de que la entrada de la Ensenada es solo una zona de paso para las embarcaciones. Al compararlo con un ecosistema marino somero cercano a puntos de actividad antropogénica, el archipiélago St. Pierre-et-Miquelon, Canadá, Nguyen *et al.*, (2021) obtuvieron en promedio cuatro horas de antropofonías de embarcaciones de pesca al día, siendo en ambos estudios, la actividad pesquera la que origina la mayor parte de las antropofonías, sin embargo, sus efectos en el ambiente no quedan claros, debido a su baja correlación biserial con estos eventos sonoros para el índice ACI ($r < 0.1$). El resto de antropofonías fueron por el tránsito de automóviles, asociados a la zona del malecón de la ciudad de La Paz por proximidad, las cuales se ha demostrado tienen un efecto en la detección de biofonías de peces (León-López *et al.*, 2021).

Los eventos ambientales fueron los eventos con menor tiempo en el muestreo, siendo poco más de tres horas de flujos de marea (corrientes, oleaje, giros; Gómez-Valdés *et al.*, 2002) y con solo cinco eventos estimados. Las mareas fueron el menor componente para la estación B19, y su presencia es confirmada por el calendario de mareas (Fig. 2) más que la anotación de referencia, sin embargo, al ser la anotación una revisión visual/auditiva y el calendario un registro hecho con herramientas diseñadas para su detección, se considera aceptable usarlo como sustituto sobre la ocurrencia de eventos de marea, con el único inconveniente de no poder precisar más en la duración de estos flujos. Si bien se considera que los flujos de agua pueden generar sonidos submarinos (Tonolla *et al.*, 2009), a una escala marina, las geofonías de este tipo no tienen mucha presencia en el ambiente sonoro (Erbe *et al.*, 2015), lo cual quedó evidenciado en este estudio, que, a pesar de su teórica presencia, los registros acústicos y las correlaciones con estos eventos fueron despreciables.

En el interior de la Ensenada (B29) se registraron 19 horas y media de biofonías, siendo el mayor componente acústico, predominando las aves y presentando los delfines el mayor número de

detecciones. Estos valores de aves se relacionan al uso de la región como zona refugio y alimentación (Chávez-Sánchez, 2012), además que el alto porcentaje de vocalizaciones de aves puede deberse a que varias especies, tanto residentes como migratorias, anidan y ponen huevos durante los meses de verano (Becerril y Carmona, 1997). A pesar de que las detecciones submarinas de aves resultaron abundantes, no se encontraron estudios que utilicen hidrófonos para su análisis, por lo que se propone su uso como otra forma viable para ello y que les considera como parte del ambiente sonoro submarino. Respecto a los delfines, su presencia en la Ensenada descrita por Gauger *et al.*, (2020) fue de 13.6 horas en un registro no continuo de 48 horas en la entrada de la Ensenada a través de varios meses, por lo que se reconoce la constante presencia de estos organismos en la zona, y su ausencia en la estación B19 se asume como una casualidad de ese día. Por otro lado, en un ambiente marino con mayor diversidad de cetáceos (Nguyen *et al.*, 2021), las especies de odontocetos mostraron una presencia de 2 a 4 horas al día en verano y los mysticetos de 4 a 7 horas al día en invierno, ambos en la estación más oceánica, mostrando que la actividad acústica de los cetáceos es parte importante de su interacción diaria, sin importar si son organismos migratorios o residentes de la zona.

Las antropofonías también tuvieron una alta presencia en la estación, con casi 12 horas compuestas en su mayoría por 27 eventos de embarcaciones registrados. Las lagunas costeras tienen una gran relevancia en cuanto a su uso para actividades pesqueras y recreativas (Espino *et al.*, 2013), por lo que a diferencia de la estación B19, las embarcaciones utilizan el espacio y no es solo un punto de paso. Al compararlo con lo descrito por Acevedo (1991a) en tránsito de embarcaciones en la Ensenada de La Paz, podemos afirmar que las embarcaciones detectadas en esta estación son pequeñas (<15 m) de tipo panga y lanchas de pescadores, donde él reporta un total de 97.3% de las embarcaciones detectadas visualmente en tres meses. Por otro lado, no se tiene clara la procedencia de las pocas detecciones de automóviles en esta estación, pero se asume provienen de la barra de arena “el mogote” por su proximidad y su uso por distintos tipos de vehículos a lo largo del día.

Los vientos en la estación B29 estuvieron presentes por poco más de cuatro horas, siendo el componente con menor tiempo en el interior. Al igual que en la estación B19, las geofonías

fueron inferidas a partir de registros hechos con herramientas específicas para ellos, por lo que la duración de los eventos detectados no es exacta, pero resulta útil para determinar la presencia de las mareas y vientos que no se pudieron ver en la anotación de referencia. Si la velocidad de los vientos hubiera sido mayor que los 4 m/s considerados, se vería reflejado en el espectrograma, ya que Erbe *et al.*, (2015) con velocidades de 5-15 m/s detectan sonidos dependientes de viento incluso teniendo su equipo de grabación en un hábitat marino a ~450 m de profundidad, o Nguyen *et al.*, (2021), que presentan velocidades promedio de 14 m/s durante todo su estudio y determinan que el viento es uno de los mayores contribuidores al ambiente sonoro submarino.

8.3 Evaluación de los índices

A pesar de no haber sido diseñados para ambientes lagunares, los índices resultaron ser una herramienta efectiva de detección de eventos acústicos en la Ensenada de La Paz, ya que estos mostraron una relación con los eventos sonoros registrados, donde la mayoría presentó correlaciones mayores a 0.15 (Varma, 2006), mostrando una mejor respuesta que en otros estudios (Nguyen *et al.*, 2021).

Los cuatro índices presentaron las correlaciones más altas del estudio con las biofonías (de 0.2 hasta 0.52), sin embargo, no fue igual con todos los eventos sonoros de la zona. Con los coros de peces (biofonía predominante en la estación B19), el índice que resultó más apto para su detección fue el ACI, ya que al tener una correlación negativa, y funcionar analizando los cambios en amplitudes, los sonidos emitidos fueron poco variados, considerándolo una amplitud constante y disminuyendo ante estas biofonías; mientras tanto el AEI, si bien detecta los cambios en tiempo de estos sonidos, al tener poca variación en frecuencia (que también considera este índice), su detección es menos clara; y por su parte los índices BI y NDSI son los menos aptos para dichos sonidos, debido a que los coros de peces se registran en frecuencias de alrededor 500 Hz, y dichos índices solo funcionan con frecuencias mayores a 2 y 1 kHz, respectivamente.

Para las aves se debe resaltar que los cuatro índices se crearon para la detección de estos organismos, por lo que todos funcionaron para su detección, siendo el BI el que tuvo la mayor correlación y negativa. El resto de índices no tienen problema para detectar y clasificar estos eventos.

En cuanto a las vocalizaciones de delfines, los índices son capaces de detectarlos y clasificarlos como biofonías, debido a que en general, los sonidos de delfines presentan amplitudes moduladas, cambios constantes en tiempo y en frecuencia, así como un rango amplio entre 1 a 4 kHz, por lo que caen dentro de las consideraciones de los cuatro índices.

En cuanto a las antropofonías, sus correlaciones fueron mayoritariamente bajas, con algunas medias. Estas correlaciones están asociadas principalmente a las embarcaciones que transitan en la zona, mostrando una clara diferencia en su respuesta ante sonidos de embarcaciones mayores (comerciales) y menores (recreativas y de pesca). Ante las mayores, los cuatro índices tuvieron problemas para detectarlas, debido a que sus frecuencias generalmente no sobrepasan el 1 kHz, además de que al estar más alejadas de la estación, el espejo de Lloyd (Carey, 2009) que generaban era más amplio, por lo que sus cambios en tiempo y en frecuencia eran más difíciles de detectar. El ACI consiguió representar mejor estos eventos, ya que al solo depender de los cambios en amplitud, las embarcaciones al cambiar velocidades, parar, o bien, asociarse con otros sonidos, generaban estas diferencias necesarias para que el ACI las detectara.

Con las embarcaciones menores hubo una correlación más alta (siendo el componente principal de las antropofonías en la B29) y negativa en general, ya que al presentar frecuencias alrededor del 1kHz, además de tener una amplitud y frecuencia constante, característica de una máquina, el ACI, AEI y el NDSI, las catalogan como antropofonías y disminuyen en su presencia. Solo el BI tuvo una correlación positiva ante éstas, asociado a la simplicidad de su formulación, ya que estas antropofonías llegan a presentar componentes en la banda de hasta 2kHz, así que este índice las toma como una biofonía y aumenta ante ellas.

Los automóviles son algo difícil de determinar si los índices respondieron ante ellos, ya que su presencia es mínima y opacada por las embarcaciones, sin embargo, al tener en cuenta las

características de sus ondas sonoras, amplitudes con pocas variaciones, así como frecuencias bajas (Takechi *et al.*, 2004; León-López *et al.*, 2021), no se considera que los índices funcionen para este tipo de evento sonoro.

Las correlaciones con los factores ambientales fueron bajas para casi todos los casos, y se diferenciaron las fuentes de éstas entre las dos estaciones, asociando los eventos ambientales de la estación B19 a flujos de marea y las de la B29 a vientos. Así, se observa que para los flujos de marea se presentó la mayor de las correlaciones, dada con el índice ACI, el cual aumentaba sus valores ante la presencia de estos eventos debido a que sus amplitudes no se mantienen constantes, ya que la marea que se presenta en la zona tiene varios componentes de marea con distintas amplitudes (Gómez-Valdés *et al.*, 2002). Para los demás índices, al ser una onda que cuyas variaciones se dan a razón de horas, y sus frecuencias rondan los 100-200 Hz (Robinson *et al.*, 2014), su presencia fue prácticamente indetectable (correlaciones <0.1).

Para los vientos, la relación con los índices fue baja, ya que presentaron complicaciones en su detección, aun así fueron mejor representados que los eventos sonoros de mareas. De los cuatro índices, el AEI y el NDSI tuvieron las mejores correlaciones para vientos, que de acuerdo a Ma *et al.*, (2006); Tonolla *et al.*, (2009) estos eventos presentan una amplia banda con frecuencias altas y un flujo más rápido y menos estable, por lo que a pesar de no verse reflejado en el espectrograma, estas características facilitaron su detección por estos dos índices; los otros dos no se correlacionaron con estos eventos debido a lo constante de su amplitud, y a la baja energía asociada a la pérdida por refracción en la fase aire-agua.

Se deben tener en consideración las particularidades de cada uno de los índices y cómo es que funcionan. En el caso del ACI, su rendimiento en esta zona tuvo mayores correlaciones que en una reserva marina somera de acuerdo con lo descrito por Nguyen Hong Duc *et al.*, (2021), con la principal diferencia de ellos tener sus biofonías compuestas por cetáceos. Por su parte, Bohnenstiehl *et al.*, (2018) confirman que los sonidos monótonos no son computados por el índice, ya que es sensible a los cambios en la tasa de producción de las biofonías y de su composición, lo que explica sus bajas correlaciones con las antropofonías y los vientos. Este índice, al ser el más utilizado en ambientes marinos (Minello *et al.*, 2021), ha sido empleado por

varios autores con métodos distintos a los utilizados en este estudio, tales como el uso bandas de octava y filtros de amplitud por Buscaino *et al.*, (2016) para mejorar la correlación linear con biofonías y reducirla con antropofonías y geofonías; el hacer su cálculo por bandas para detectar en que frecuencias funciona mejor, así, Elise *et al.*, (2019) determinó que en arrecifes de coral el ACI en la banda de 1-2 kHz funciona para detectar la alimentación de peces herbívoros. Por lo tanto, se considera que la capacidad de detección del ACI puede mejorarse con la metodología específica para lo que se necesite. El AEI, es menos utilizado que el ACI en ambientes marinos (Minello *et al.*, 2021), sin embargo, se ha demostrado en este estudio que existen eventos sonoros con los que el índice se correlaciona de forma aceptable, y con ciertas consideraciones como la mejora de la resolución de frecuencia (Bohnenstiehl *et al.*, 2018) o utilizar sus componentes espectral y temporal en bandas de frecuencias (Elise *et al.*, 2019) se puede mejorar su uso. En cuanto al BI, por su formulación, simplificó la ocurrencia de eventos en la Ensenada, y se considera que si como Elise *et al.*, (2019), se reduce su banda de frecuencias, se puede emplear para la detección específica de eventos de interés, tal como ellos lo usaron de 1-2 kHz para determinar la abundancia en ocurrencia de biofonías en un arrecife rocoso. Y el NDSI, al tener mayores correlaciones en el interior que en la entrada, demostró que las bandas de frecuencias que se manejen en la determinación de biofonías y antropofonías/geofonías es importante, de esta forma, se puede modificar para poder analizar paisajes sonoros en ambientes fuertemente afectados por antropofonías, tal como Fakiris *et al.*, (2019), que al considerar antropofonías los sonidos <1 kHz (embarcaciones) y >10 kHz (prospecciones sísmicas), presentó valores negativos del índice, propios de una abundancia en antropofonías, lo cual no se llegó a percibir en nuestro estudio, sin ser claro si fue así debido a una correcta predominancia de biofonías, o a una inapropiada banda de frecuencia.

Si bien los índices tienen potencial para la detección de eventos sonoros y el monitoreo acústico en ambientes marinos y estuarinos, su utilidad como indicadores ecológicos está limitada (Minello *et al.*, 2021).

8.4 Estaciones de la Ensenada

Al analizar tanto el número y duración de los eventos acústicos registrados, el comportamiento de los índices a través de cada muestreo, los valores que resultan de esto, y su corroboración con el coeficiente de correlación, se determinó que el interior de la Ensenada de La Paz es la estación con una mayor detección de los eventos sonoros considerados para este estudio, y en general, con las correlaciones más altas de los índices, mientras que los valores de los índices fueron similares entre ambas estaciones para la mayor parte del tiempo, excepto cuando se presentaron las antropofonías, que generaron una diferencia más clara al disminuir en mayor medida los valores de tres de los índices en la B29 respecto a la B19, dado que en la B19 los índices no parecen responder a estos eventos, teniendo así las cuatro correlaciones bajas en este caso, dos de ellas menores a 0.1, mientras que en la estación B29 son tres los que tienen una correlación media, siendo el ACI el único con una correlación baja. Esta falla al considerar las antropofonías de la B19, como se ha mencionado previamente, atribuida al tipo de embarcaciones que transitan normalmente en ambas estaciones (Espino *et al.*, 2013; API, 2018), la forma en que interpretan las señales, y lo que en general consideran como antropofonía (Anexo A), mostrando así que los índices responden mejor a las antropofonías que ocurren en el interior.

En cuanto a las biofonías, queda clara la diferencia entre las dos estaciones, ya que en la estación B19 se presentó un 20.67% del tiempo con biofonías, las cuales eran casi en su totalidad de peces, mientras que en la B29 fue un 97.5% del tiempo, y si bien predominaron las aves, también estuvieron presentes biofonías de peces y de mamíferos marinos, dando así una mayor afluencia de sonidos en el interior. Por su parte los índices tuvieron correlaciones bajas en la entrada (~ 0.2), y solo una correlación media (-0.4527) para el ACI, cuando en el interior todas las correlaciones fueron medias. Por lo que resulta claro que los índices son útiles para la detección de los eventos en ambas estaciones, pero tienen una mejor correlación con los eventos sonoros en el interior de la Ensenada que en el canal de entrada. Esta diferencia concuerda con la idea de la estación B19 de ser un punto de paso para varias especies, y la Ensenada como una zona de refugio y alimentación de especies migratorias, residentes y semi-

residentes (Abitia-Cárdenas *et al.*, 1994; Becerril y Carmona, 1997; González-Acosta *et al.*, 1999; Salinas-Zacarías, 2005; Gauger *et al.*, 2020).

Para las geofonías se tuvieron tiempos similares entre las dos, con un 16.22% de tiempo con eventos ambientales registradas en la B19 y un 21.42% para la B29, lo que se debe a la proximidad de las estaciones, por lo que los eventos geofísicos tienen un efecto similar en ambas, y la ligera diferencia se asocia con los flujos de viento que no se pudieron incluir en el análisis de la B19, a pesar de que la marea tiene mayor influencia en la entrada, así como lo mencionan Gómez-Valdés *et al.*, (2002). Aunado a la similitud en sus tiempos, los índices mostraron comportamientos bajos en las dos estaciones; por un lado en la estación B19 la correlación fue positiva en todos, pero tres de ellos tuvieron correlaciones <0.1 , solo el ACI tuvo una correlación media con estos eventos (0.4404), mientras que en la estación B29, tres índices dieron una correlación positiva y el BI negativa, pero los cuatro mostraron correlaciones bajas, las cuales todas fueron mayores a 0.1, y las del AEI y NDSI fueron las más altas (0.2748 y 0.2589), por lo que comparando el comportamiento de los índices en una estación donde no se consideraron los eventos de viento (B19) y una en la que sí (B29), se considera, tal y como lo mencionan Cato y Tavener (1997) y Ma *et al.*, (2005), que los flujos de viento tienen un efecto a considerar en el paisaje sonoro de un área.

De esta forma, los índices muestran ser fiables para saber lo que está ocurriendo en las estaciones de muestreo, y que si bien en su forma original no están optimizados para este tipo de ambientes, realmente se pueden considerar una representación matemática para poder sustituir a las mediciones directas, sin comprometer el entendimiento del ecosistema, y más específicamente, muestran una respuesta mejor en ambientes completamente lagunares que en aquellos con mayor influencia marina.

9. CONCLUSIONES

La Ensenada de La Paz es un ecosistema con un paisaje sonoro complejo, el cual se compone de gran variedad de biofonías, geofonías y antropofonías, lo cual es un reflejo de las actividades que en ésta ocurren, demostrando así su importancia ecológica (como área de refugio, crianza, o alimentación), económica (por su flujo de embarcaciones comerciales y de pesca) y social (como área de esparcimiento y recreación).

El paisaje sonoro de la Ensenada de La Paz está representado principalmente por biofonías, ya que las mayores correlaciones que se obtuvieron en este estudio fueron para las biofonías con los cuatro índices en las dos estaciones, excepto el NDSI para la B29, donde tuvo mayor correlación con las antropofonías. En la mayoría de los casos, las correlaciones con las geofonías fueron las más bajas, con dos casos donde fueron las antropofonías en la B19 para el ACI y el NDSI.

En la estación del interior de la Ensenada, se presentó la mayor ocurrencia de biofonías, antropofonías y geofonías del estudio, y de estos, las biofonías fueron el principal componente de su paisaje sonoro, dado en su mayor parte por biofonías de aves, si solo se hubieran considerado animales marinos, habrían prevalecido las antropofonías. En el canal de entrada, las antropofonías tuvieron el mayor tiempo acumulado de los tres tipos de eventos.

De esta forma, se podría analizar, estudiar y monitorear de forma efectiva distintos ecosistemas costeros de importancia ecológica, económica y social, para así poder tomar mejores decisiones para el manejo sustentable de estos ambientes. Es posible que en algunas ocasiones puedan ocurrir errores en la clasificación de los sonidos, considerando antropofonías como biofonías, a ignorar biofonías en distintos intervalos de frecuencias, entre otros detalles. Sin embargo, a grandes rasgos se puede ver que los índices muestran una aproximación a lo que ocurre en la zona, por lo que su uso en un ecosistema lagunar se muestra viable.

9.1 Recomendaciones

Se sugiere que se continúe y se extienda la aplicación de las herramientas ecoacústicas para mejorar los registros en un monitoreo ecológico, ya que el estudio y catalogación de la diversidad acústica de la Ensenada de La Paz es importante.

Aunado a ello, se recomienda que, tomando como línea base el presente estudio, se amplíe el periodo de estudio con la finalidad de observar el comportamiento de los eventos acústicos a través del año; y también se propone que se busque una modificación de los índices ecoacústicos, como probar variaciones en los tipos de ventana de suavizado, el porcentaje de traslape de ventana, la integración de más bandas de frecuencia que incluyan más eventos sonoros, entre otras posibles combinaciones; todo esto con el objetivo de mejorar su correlación con los eventos que ocurren en ambientes marinos, y específicamente, estuarinos.

10. LITERATURA CITADA

Abitia-Cárdenas, L. A., Rodríguez-Romero, J., Galván-Magtia, F., De la Cruz-Agüero, J. y Chávez-Ramo, H. (1994) "Lista sistemática de la ictiofauna de Bahía de La Paz, Baja California Sur, México", *Ciencias Marinas*, 20(2), pp. 159-181.

Acevedo, A. (1991a) "Interactions between boats and bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, in the entrance to Ensenada De La Paz, Mexico", *Aquatic Mammals*, 17(3), pp. 120-124.

Acevedo, A. (1991b) "Behaviour and movements of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, in the entrance to Ensenada De La Paz, Mexico", *Aquatic Mammals*, 17(3), pp. 137-147.

Administración Portuaria Integral de Baja California Sur, S.A. de C.V. (2018) *Movimiento Portuario de carga general, petróleo, mineral, pasaje de los puertos de La Paz, San Carlos, Loreto y Santa Rosalía, B.C.S. Estadísticas Portuarias 2018, 3er Trimestre*.

Anónimo (1978) *Derrotero de las costas sobre el Océano Pacífico de México, América Central y Colombia*. Pub. S.M., No. 102, México, D.F.

Aswani, S. y Vaccaro, I. (2008) "Lagoon Ecology and Social Strategies: Habitat Diversity and Ethnobiology", *Hum Ecol*, 36, pp. 325-341.

Au, W. W. L. y Hastings, M. C. (2008) *Principles of marine bioacoustics*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78365-9>

Banqueiro-Cárdenas, E., Peña-R., I. y Masso-R., J. A. (1981) "Análisis de una población sobre-explotada de *Argopecten circularis* en la Ensenada de la Paz, B.C.S., México", *Ciencia Pesquera*, 1(2), pp. 57-65.

Becerril, M. F. y Carmona, R. (1997) "Anidación de aves acuáticas en la Ensenada de La Paz, Baja California Sur, México (1992-1994)", *Ciencias Marinas*, 23(2), pp. 265-271.

Boelman, N. T., Asner, G. P., Hart, P. J. y Martin, R. E. (2007) "Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: Bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensing", *Ecological Applications*, 17(8), pp. 2137-2144.

Bohnenstiehl, D. R., Lyon, R. P., Caretti, O. N., Ricci, S. W. y Eggleston, D. (2018) "Investigating the utility of ecoacoustic metrics in marine soundscapes", *Journal of Ecoacoustics*, 2: #R1156L.

Bradbury, J. W. y Vehrencamp, S. L. (1998) *Principles of animal communication*. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates, p. 882.

Brown, J. H. (2003) *Macroecología*. Fondo de Cultura económica, p. 397.

Buscaino, G., Ceraulo, M., Pieretti, N., Corrias, V., Farina, A., Filiciotto, F., Maccarrone, V., Grammata, R., Caruso, F., Giuseppe, A. y Mazzola, S. (2016) "Temporal patterns in the soundscape of the shallow waters of a Mediterranean marine protected area", *Sci Rep*, 6(34230).

Bustamante, O., Beristain, S. y Romero-Vivas, E. (2017) "Calibración de un hidrófono de bajo costo en el rango sónico mediante una computadora personal utilizando el método de reciprocidad", 23º Congreso Internacional Mexicano de Acústica. Xalapa, Veracruz. 08/11/2017. 12.

Bustillos-Guzmán, J. y Olivarez-González, E. (1986) "Fitoplancton en tres ecosistemas de manglar de la Bahía de La Paz, B. C. México. II. Producción Primaria bruta, neta, y respiración", *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Univ. Nac. Autón. México*, 13, pp. 307-312.

Carey, W. M. (1995) "Standard definitions for sound levels in the ocean", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 20(2), pp. 109-113.

Carey, W. M. (2009) "Lloyd's mirror-image interference effects," *Acoust. Today*, 3, pp. 14–20.

Carmona-Islas, C. (1997) *Relación entre la abundancia de aves playeras y organismos bentónicos en la playa "El Conchalito", Ensenada de La Paz, B.C.S, durante un ciclo anual. Tesis de Maestría*, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, La Paz, B.C.S., México, vi, 61 h.

Cato, D. H. y Tavener S. (1997) "Ambient Sea Noise Dependence on Local, Regional and Geostrophic Wind Speeds: Implications for Forecasting Noise", *Applied Acoustics*, 51(3), pp. 317-338.

Chao, A. (1984) "Nonparametric estimation of the number of classes in a population", *Scandinavian Journal of Statistics*, 11, pp. 265-270.

Chávez-Sánchez, T. (2012) *Composición y abundancia de especies de florecimientos macroalgales y su relación con variables ambientales en la Ensenada de La Paz, Baja California Sur. Tesis de Maestría*, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.

Chen, C. A. y Millero, F. J. (1977) "Speed of sound in seawater at high pressures", *J. Acoust. Soc. Am.*, 62(5), pp. 1129-1135.

Cotter, A. (2008) *The 'soundscape' of the sea, underwater navigation, and why we should be listening more*, en: Payne, A., Cotter, J. y Potter, T. (eds) "Advances in fisheries science: 50 years on from Beverton and Holt", Blackwell, Oxford, pp. 451–471.

Curtis, K. R., Howe, B. M. y Mercer, J. A. (1999) "Low-frequency ambient sound in the North Pacific: Long time series observations", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(6), pp. 3189–3200.

Day, J. W. y Yáñez-Arancibia, A. (1982) "Coastal lagoons and estuaries: Ecosystem approach", *Ciencia Interamericana. Ciencias del Mar*, OEA, Washington D. C., 22(1-2), pp. 11-26.

Elise, S., Urbina-Barreto, I., Pinel, R., Mahamadaly, V., Bureau, S., Penin, L., Adjeroud, M., Kulbicki, M. y Bruggemann, J. H. (2019) "Assessing key ecosystem functions through soundscapes: A new perspective from coral reefs", *Ecological Indicators*, 107, 105623. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105623>

Enríquez-Moreno, M. A. (2019) *Propuesta para el aprovechamiento responsable de espacios recreativos tradicionales de la ciudad de La Paz*, B. C. S. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California Sur, Departamento Académico de Economía, La Paz, B.C.S., México, 49 h.

Erbe, C., Verma, A., McCauley, R., Gavrilov, A., y Parnum, I. (2015) "The marine soundscape of the Perth Canyon", *Progress in Oceanography*, 137, pp. 38-51.

Espino, G., Ruiz-Luna, A., Fuentes, P., Camacho, V., Blanco, M., Zamorano, P., López-Pérez, R. A., Robles, E., Ortiz, M. A., Penié, I. y Arroyo, R. (2013) "Propuesta metodológica para la valoración económica en sistemas costeros de México", *Revista Investigación Ambiental Ciencia y Política Pública*, 5(1), pp. 7-32.

Fakiris, E., Christodoulou, D., Georgiou, N., Dimas, X., Papatheodorou, G., Blondel, P., Mikionatis, G., Zafiropoulos, G. y Symeonidis, F. (2019) "The soundscape of the Inner Ionian Archipelago as evinced through the West Patraikos Gulf Ambient and Seismic Noise Monitoring Project", UACE-2019, Hersonissos, Greece, 8/07/19 - 12/07/19 pp. 3151-3158.

Farina, A., Pieretti, N., Salutati, P., Tognari, E. y Lombardi, A. (2016) "The Application of the Acoustic Complexity Indices (ACI) to Ecoacoustic Event Detection and Identification (EEDI) Modeling", *Biosemiotics*, 9, pp. 227–246.

Farina, A. y Gage, S. H. (2017) *Ecoacoustics: The Ecological Role of Sounds*. <https://doi.org/10.1002/9781119230724>

Félix, P. E. (1976) *Serie de cinco reportes de la Residencia de Acuicultura en el Estado de Baja California Sur, Bahía Concepción, Estero San Lucas y Ensenada de La Paz. Noviembre de 1975 a Diciembre de 1976*; Dirección General de Acuicultura. Secretaría de Recursos Hídricos: 27.

Félix-Pico, E. F., Holguin-Quiñones, O. E. y Escamilla-Montes, R., (2000) "Macroinvertebrados marinos asociados al manglar", en: Félix-Pico, E. F., Serviere-Zaragoza, E., Riosmena-Rodríguez, R., y León-De la Luz, J. L. (Eds.) *Los Manglares de la Península de Baja California*, Cap. 8, pp. 203 - 232.

Fine, M. L., Malloy, K. L., King, C. B., Mitchell, S. L. y Cameron, T. M. (2001) "Movement and sound generation by the toadfish swimbladder", *Journal of Comparative Physiology Part A*, 187, pp. 371–379.

Gasc, A., Sueur, J., Jiguet, F., Devictor, V., Grandcolas, P., Burrow, C., Depraetere, M. y Pavoine, S. (2013) "Assessing biodiversity with sound: Do acoustic diversity indices reflect phylogenetic and functional diversities of bird communities?", *Ecological Indicators*, 25, pp. 279–287.

Gauger, M. F., Caraveo-Patiño, J. y Romero-Vivas, E. (2020) "Passive acoustic monitoring of the bottlenose dolphin *Tursiops truncatus* to determine continuous presence in Ensenada de La Paz, Mexico", *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 55(3), 238-249.

Gauger, M. F., Romero-Vivas, E., Peck, M. A., Balart, E. F., y Caraveo-Patiño, J. (2022) "Seasonal and diel influences on bottlenose dolphin acoustic detection determined by whistles in a coastal lagoon in the southwestern Gulf of California", *PeerJ*, 10, e13246.

Gómez-Valdés, J., Delgado, J. A. y Dworak, J. A. (2002) "Overtides, compound tides, and tidal-residual current in Ensenada de la Paz lagoon, Baja California Sur", *Geofísica Internacional*, 42(4), pp. 623-634.

González-Acosta, A. F., De la Cruz-Agüero, G., De la Cruz-Agüero, J. y Ruiz-Campos, G. (1999) "Ictiofauna asociada al manglar del estero El Conchalito, Ensenada de La Paz, B.C.S., México", *Oceánidas*, 14(2), pp. 121-131.

Gregorius, H. R. y Gillet, E. M. (2008) "Generalized Simpson-diversity", *Ecological Modelling*, 211(1), pp. 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.08.026>

Guimaraes, M. y González-De Zayas, R. (2011) "Productividad primaria en laguna larga, Cayo Coco, Cuba", *Revista Ciencias Marinas y Costeras*, 3, 10.15359/revmar.3.2.

Gupta, S. D. (1960) "Point biserial correlation coefficient and its generalization", *Psychometrika*, 25, pp. 393–408.

Halliday, W., Scharffenberg, K., Whalen, D., Macphee, S., Loseto, L. e Insley, S. (2020) "The summer soundscape of a shallow-water estuary used by beluga whales in the western Canadian Arctic", *Arctic Science*, 6, 10.1139/AS-2019-0022.

Heywood, V. H. (1995) *Global biodiversity and assessment*. New York: Cambridge University Press, p. 1152.

Hill, D., Fasham, M., Tucker, G., Shewry, M. y Shaw, P. (2005) *Handbook of biodiversity methods: survey, evaluation and monitoring*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 588.

Izsák, J. y Papp, L. (2000) "A link between ecological diversity indices and measures of biodiversity", *Ecological Modelling*, 130(1-3), pp. 151–156.

Insley, S. J., Halliday, W. D. y de Jong, T. (2017) "Seasonal patterns in ocean ambient noise near Sachs Harbour, Northwest Territories", *Arctic*, 70, pp. 239–248. doi: 10.14430/arctic4662.

Johnson, M. W., Everest, A. y Young, R. W. (1947) "The role of snapping shrimp (Crangon and Synalpheus) in the production of underwater noise in the sea", *Biology Bulletin*, 93, pp. 122–138.

Kasten, E. P., Gage, S. H., Fox, G. y Joo, W. (2012) "The remote environmental assessment laboratory's acoustic library: An archive for studying soundscape ecology", *Ecological Informatics*, 12, pp. 50–67.

Lankford, R. R. (1977) "Coastal Lagoons of Mexico. Their Origin and Classification", en: *Estuarine P-s Vol. II. Circulation, Sediments, and Transfer*, Acad. Press. pp. 182 - 215.

Lara-Lara, J. R., Arreola-Lizarraga, J., Calderon-Aguilera, L., Camacho-Ibar, V., Lanza-Espino, D. L. G., Escofet-Giansone, A., Espejel, I., Guzmán-Arroyo, M., Ladah, L., López-Hernández, M., Meling-López, A., Moreno-Casasola-Barceló, P., Reyes-Bonilla, H., Rios-Jara, E. y Zertuche, J. (2008) "Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales", *J. Comp. Capital natural de México*, 1, pp. 109-134.

Leija-Tristan, A., Salaices-Polanco, H., Galindo-Jaramillo, J. M. y Olivarez-González, E. (1990) "Estudio poblacional del cangrejo violinista *Uca (Leptuca) crenulata crenulata* (Lockington, 1877) (Brachyura: Ocypodidae) en la Ensenada de La Paz, B.C.S., México", *Inv. Mar. CICIMAR*, 5, pp. 99-106.

León-López, B., Romero-Vivas, E. y Vilorio-Gómora, L. (2021) "Reduction of roadway noise in a coastal city underwater soundscape during COVID-19 confinement", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 149, pp. 652-659. <https://doi.org/10.1121/10.0003354>

Lindseth, A. V. y Lobel, P. S. (2018) "Underwater Soundscape Monitoring and Fish Bioacoustics: A Review", *Fishes*, 3(3), p. 36.

Ma, B. B., Nystuen, J. A. y Lien, R. C. (2005) "Prediction of underwater sound levels from rain and wind", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117, pp. 3555-3565.

Magurran, A. E. (1988) *Ecological Diversity and Its Measurement*. Princeton University Press, p. 179.

McCauley, R. D. y Cato, D. H. (2000) "Patterns of fish calling in a nearshore environment in the Great Barrier Reef", *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 355, pp. 1289–1293.

Mendoza-Salgado, R. A., Lechuga-Devéze, C. H., Amador, E. y Pedrín-Avilés, S. (2011) "La calidad ambiental de manglares de B.C.S.", en: Felix-Pico, E. F., Serviere-Zaragoza, E., Riosmena-Rodríguez, R., León-de-la-Luz J. L., eds. *Los Manglares de la Península de Baja California*, pp. 9-26.

Miksis-Olds, J. L., Martin, B. y Tyack, P. L. (2018) "Exploring the Ocean Through Soundscapes", *Acoustics Today*, 14(1), pp. 26-34.

Minello, M., Calado, L. y Xavier, F. C. (2021) "Ecoacoustic indices in marine ecosystems: a review on recent developments, challenges, and future directions", *ICES Journal of Marine Science*, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsab193>

Morales-G., E. R. y Cabrera-Muro, H. R. (1982) "Aplicación de un modelo numérico unidimensional a la ensenada de La Paz, B.C.S.", *Ciencias Marinas*, 8(2), pp. 69-89.

Montgomery, J. y Radford, C. (2017). "Marine bioacoustics", *Current Biology*, 27, pp. R502-R507. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.01.041>

Moriarty, P. E., Hodgson, E. E., Froehlich, H. E., Hennessey, S. M., Marshall, K. N., Oken, K. L., Siple, M. C., Ko, S., Koehn, L. E., Pierce, B. D., y Stawitz, C. C. (2018) "The need for validation of ecological indices", *Ecological Indicators*, 84, pp. 546–552.

Nguyen Hong Duc, P., Cazau, D., White, P. R., Gérard, O., Detcheverry, J., Urtizberea, F. y Adam, O. (2021) "Use of Ecoacoustics to Characterize the Marine Acoustic Environment off the North Atlantic French Saint-Pierre-et-Miquelon Archipelago", *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), p. 177.

Parks, S. E., Miksis-Olds, J. L. y Denes, S. L. (2014) "Assessing marine ecosystem acoustic diversity across ocean basins", *Ecological Informatics*, 21, pp. 81–88.

Pekin, B. K., Jung, J., Villanueva-Rivera, L. J., Pijanowski, B. C. y Ahumada, J. A. (2012) "Modeling acoustic diversity using soundscape recordings and LIDAR-derived metrics of vertical forest structure in a neotropical rainforest", *Landscape Ecology*, 27(10), pp. 1513–1522.

Pieretti, N., Farina, A. y Morri, F. D. (2011) "A new methodology to infer the singing activity of an avian community: the acoustic complexity index (ACI)", *Ecol Indic*, 11, pp. 868–873.

Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., Gage, S. H. y Pieretti, N. (2011) "Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape", *BioScience*, 61(3), pp. 203–216.

Popper, A. N. y Hawkins, A. D. (2019) "An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes", *J Fish Biol.*, 94, pp. 692– 713. <https://doi.org/10.1111/jfb.13948>

Purvis, A. y Hector, A. (2000) "Getting the measure of biodiversity", *Nature*, 405, pp. 212–219.
Ratner, B. (2009) "The correlation coefficient: Its values range between +1/-1, or do they?", *Journal of Targeting, Measurement and Analysis for Marketing*, 17, pp. 139-142.

Robinson, S. P., Lepper, P. A. y Hazelwood, R. A. (2014) "Good practice guide for underwater noise measurement", *National Measurement Office, Marine Scotland, The Crown Estate*. NPL Good Practic Guide No. 133.

Romero-Vivas, E., López-Aniceto, M. A. y Bustamante-Palacios, O. (2021) "Comparación de mediciones directas e indirectas de la velocidad del sonido en el agua", 26º Congreso Internacional Mexicano de Acústica. Ciudad de México. 12/11/2021. IM3.

Ryan, J., Cline, D., Dawe, C., McGill, P., Zhang, Y., Joseph, J., Margolina, T., Caillat, M., Fischer, M., DeVogelaere, A., Stimpert, A. y Southall, B. (2016) "New Passive Acoustic Monitoring in Monterey Bay National Marine Sanctuary," *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2016.7761363>

Salinas-Zacarías, M. (2005). *Ecología de los tursiones, Tursiops truncatus, en la Bahía de La Paz, B.C.S. Tesis de Doctorado*, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. <http://repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/14337>

Schelske, C. L. y Odum, E. P. (1961) "Mechanisms maintaining high productivity in Georgia estuaries", *Proc. Gulf and Carib. Fish. Inst.*, 14, pp. 75–80.

Shannon, C. E. y Weaver, W. (1949) *The Mathematical Theory of Communication*. The University of Illinois Press, p. 131.

Sharma, P. D. (2012) *Ecology and Environment*. Rastogi Publications, p. 640.

Siddagangaiah, S., Chen, C. F., Hu, W. C., y Pieretti, N. (2019) "A Complexity-Entropy Based Approach for the Detection of Fish Choruses", *Entropy*, 21(10), pp. 977-996. <https://doi.org/10.3390/e21100977>

Simpson, E. H. (1949) "Measurement of diversity", *Nature*, 163, p. 688.

Skoglund, C. R. (1961) "Functional analysis of swimbladder muscles engaged in sound production of the toadfish", *Journal of Biophysical and Biochemical Cytology*, 10, pp. 187–200.

Sueur, J., Pavoine, S., Hamerlynck, O. y Duvail, S. (2008) "Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal", *PLoS ONE*, 3(12):e4065. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004065>

Sueur, J. y Farina, A. (2015) "Ecoacoustics: the Ecological Investigation and Interpretation of Environmental Sound", *Biosemiotics*, 8, pp. 493–502.

Sueur, J. (2018) *Sound Analysis and Synthesis with R*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77647-7>

Takechi, T., Sugimoto, K., Mandono, T., y Sawada, H. (2004) "Automobile identification based on the measurement of car sounds", In 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004, 2, pp. 1784-1789.

Talley, L., Pickard, G., Emery, W. y Swift, J. (2011) *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction*. Sexta edición. Academic Press, p. 560.

Teal, J. (1962) "Energy Flow in the Salt Marsh Ecosystem of Georgia", *Ecology*, 43(4), pp. 614-624. <https://doi.org/10.2307/1933451>

Tonolla, D., Lorang, M. S., Heutschi, K. y Tockner K. (2009) "A flume experiment to examine underwater sound generation by flowing water", *Aquat. Sci.*, 71, pp. 449–462. <https://doi.org/10.1007/s00027-009-0111-5>

Urlick, R. J. (1983) *Principles of Underwater Sound*. Tercera edición. McGraw-Hill Ryerson, p. 423.
Varma, S. (2006) "Preliminary item statistics using point-biserial correlation and p-values", *Educational Data Systems Inc.: Morgan Hill CA*. Retrieved, 16(07).

Villanueva-Rivera, L. J. y Pijanowski, B. C. (2016) "Soundecology: soundscape ecology", *R package version*, 1(2). <https://CRAN.R-project.org/package=soundecology>

11. ANEXOS

Anexo A. Descripción y ecuación de los cuatro índices ecoacústicos empleados.

1) Índice de complejidad acústica (ACI).

El índice ACI es un algoritmo diseñado para cuantificar directamente las complejas vocalizaciones bióticas, calculando la variabilidad de las intensidades registradas en las grabaciones de audio, a pesar de la presencia constante de ruido generado por humanos. Para ello, el índice da más importancia a los sonidos con amplitudes moduladas, que en este caso se considera como biofonía, y los que presentan amplitudes constantes los considera como antropofonías y geofonías; por tanto, computa la amplitud absoluta promedio entre celdas adyacentes de la matriz generada por el algoritmo en cada banda de frecuencias.

$$ACI_{kji} = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J-1} (|a_{j+1} - a_j| / \sum_{j=1}^J a_j)_{ik}$$

Donde I es el número de ventanas de tiempo, K es el número de frecuencias, J es el número de ventanas de Fourier computadas a través de la señal, y a son los coeficientes de Fourier.

2) Índice de entropía acústica (AEI).

El índice de entropía acústica nos describe la diversidad α de un ecosistema, ya que muestra una correlación logarítmica con el número de especies dentro de la comunidad acústica. Los valores bajos indican los tonos puros y los valores altos indican la presencia de biofonías con bandas de frecuencias numerosas y uniforme, ya que el índice pondera las variaciones de sonidos en tiempo (H_t) y en frecuencia (H_f), diferenciando sonidos seguidos e intermitentes.

$$H = H_t \times H_f; \quad H_t = -\frac{\sum_{i=1}^n a_i \log(a_i)}{\log(n)}; \quad H_f = -\frac{\sum_{i=1}^n f_i \log(f_i)}{\log(n)}$$

Donde H_t es el índice de entropía temporal, H_f es el índice de entropía espectral, a_i es la amplitud envolvente de oscilación, f_i es el espectro de frecuencias, n el número de muestras y H el valor del índice, que se encuentra entre 0 y 1.

3) Índice bioacústico (BI).

El índice bioacústico consiste en calcular el área bajo la curva entre dos límites de frecuencia. Los valores de área son, por lo tanto, una función tanto del nivel de sonido como del número de bandas de frecuencias utilizadas por los organismos presentes. El índice considera que todo sonido presente es una biofonía, y solo considera aquellos sonidos entre 2 y 8 kHz.

$$BI = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}}$$

Donde x es el valor puntual del índice por segundo de muestreo, y N es el número de datos analizados dentro del área seleccionada.

4) Índice diferencial normalizado del paisaje sonoro (NDSI).

Este índice busca estimar el nivel de perturbación antropogénica en el paisaje sonoro mediante el cálculo de la proporción de componentes acústicos generados por humanos (antropofonía) y componentes acústicos biológicos (biofonía) encontrados en muestras de sonido del ecosistema; dicho índice considera como antropofonía a los sonidos entre 1 y 2 kHz, y como biofonía a los que están entre 2 y 8 kHz.

$$NDSI = \frac{(b - a)}{(b + a)}$$

Donde b son las biofonías y a las antropofonías, y los valores del índice se encuentran entre -1 y 1.

Anexo B. Descripción y cálculo de la correlación biserial puntual.

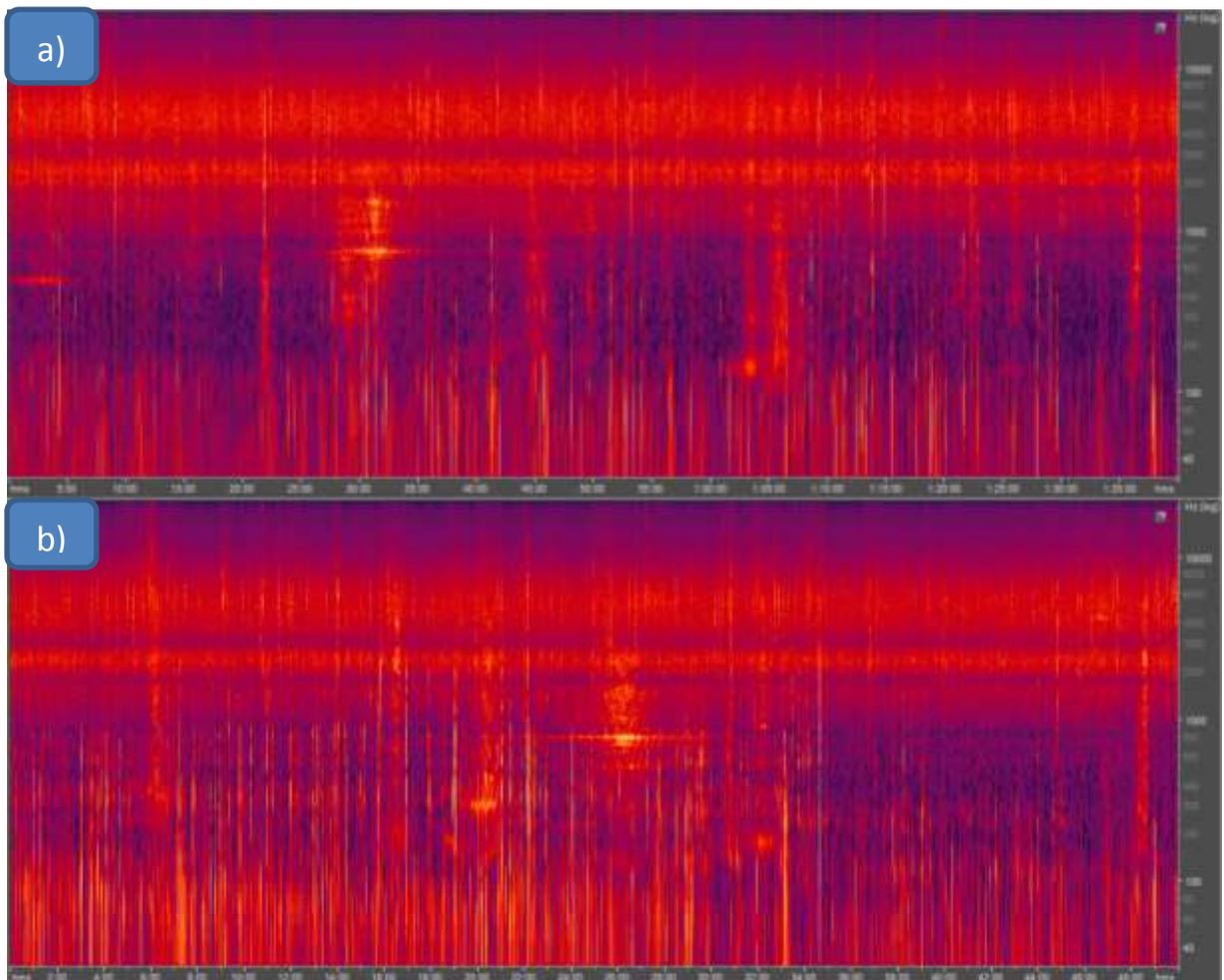
El coeficiente de correlación biserial puntual nos permite determinar la relevancia de la ocurrencia de eventos, representados en un vector discreto de presencia/no detección, respecto al vector de una variable continua, sin importar la interdependencia entre ellas, y cuyos valores oscilan entre -1 y 1, representando cada uno la máxima correlación entre ambos vectores, de forma negativa y positiva, respectivamente.

$$r = \frac{\bar{X}_p - \bar{X}_q}{S_x} * \sqrt{p * q}$$

Donde p es la proporción de elementos con una de las dos modalidades posibles de la variable discreta, q es la proporción de elementos con la otra modalidad, \bar{X}_p es la media de los elementos de proporción p, \bar{X}_q es la media de los elementos de proporción q, y S_x es la desviación típica en X de todos los elementos.

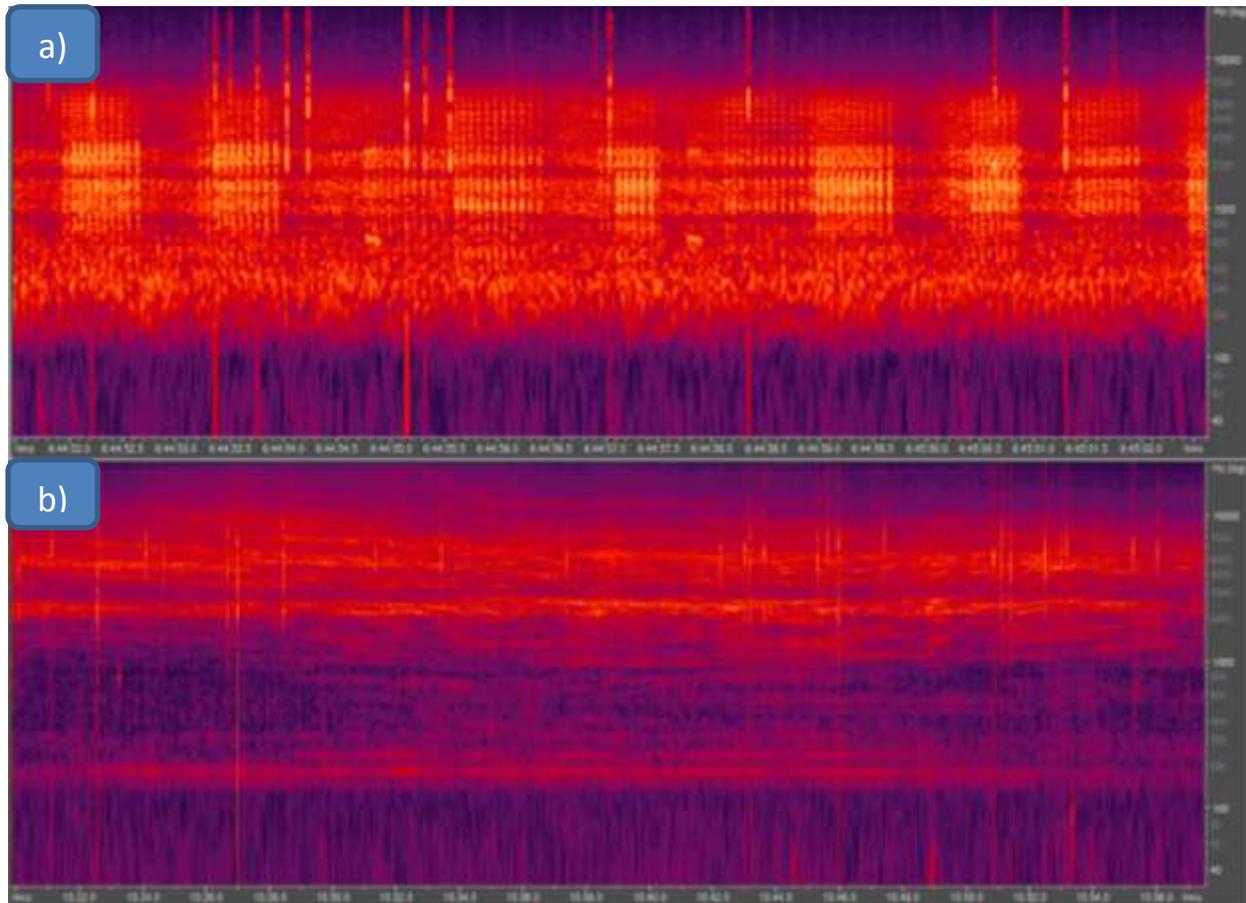
Anexo C. Respuestas del índice ACI ante dos antropofonías para la estación B19.

El índice ACI ante las antropofonías de registro uniforme (a) disminuye, mientras que para otras de registro fluctuante (b) aumenta su valor. Siendo la causa el manejo de la información por parte del índice, ya que no computa los sonidos de amplitud constante y termina por reducir su valor, mientras que aquel que abarca mayor número de rangos de frecuencias es computado al considerarlo una biofonía.



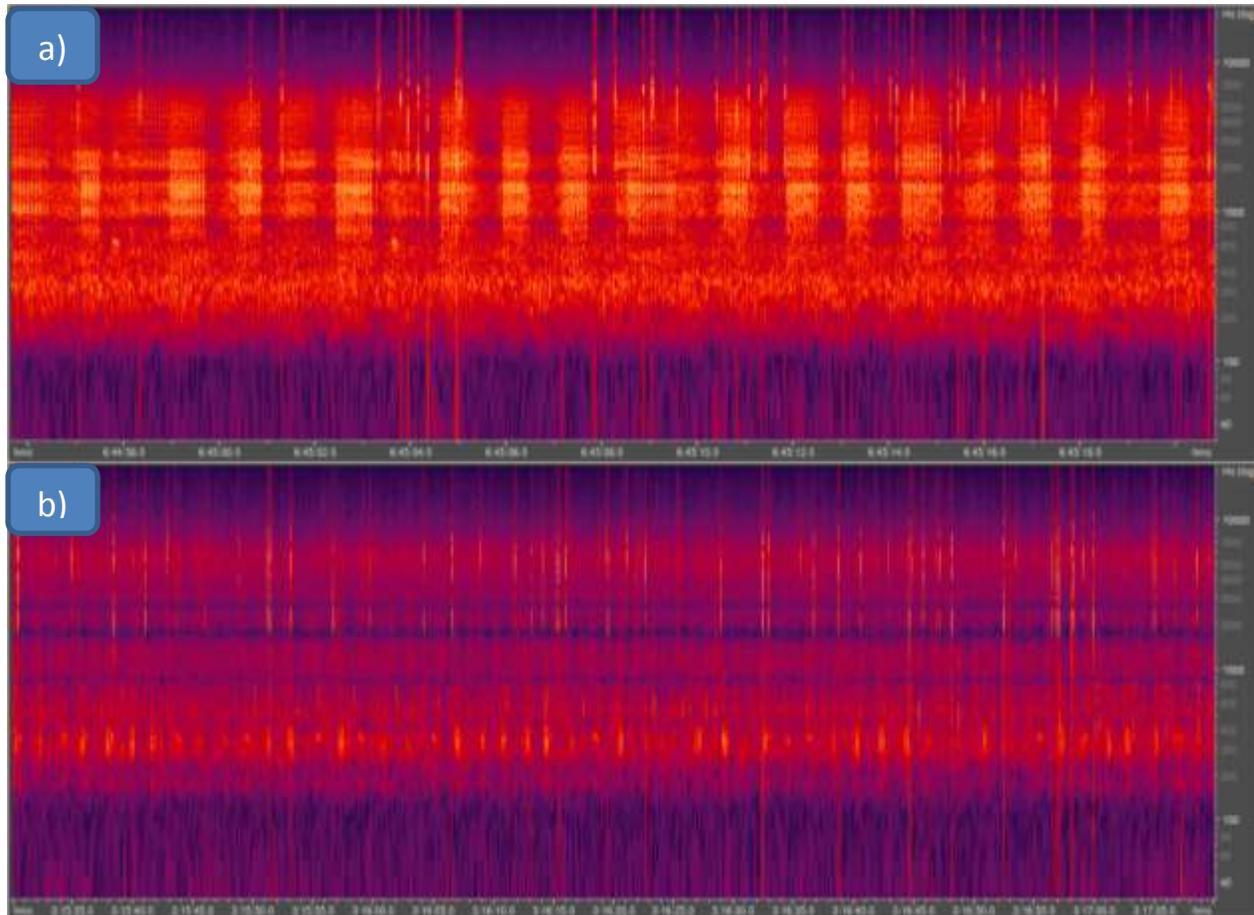
Anexo D. Respuestas del índice AEI ante dos antropofonías para la estación B29.

El índice AEI en general debe reducirse ante las antropofonías, dado su comportamiento regular de presentar tonos puros y poco cambiantes (a), sin embargo puede considerarse biofonías a aquellos sonidos con numerosas bandas de frecuencia que muestran cambios en su frecuencia sin repeticiones mecánicas (b).



Anexo E. Respuestas del índice BI ante dos antropofonías para la estación B29.

Para el índice BI, al no presentar una diferenciación de sonidos en su cálculo, todos los eventos acústicos con un rango de frecuencias entre 2-8 kHz (a) serán considerados con una relación positiva al índice, mientras que cualquier sonido fuera de este rango de frecuencias (b) no estará incluido en su cálculo.



Anexo F. Respuestas del índice NDSI ante dos antropofonías para la estación B19.

Las características del índice NDSI permiten separar las biofonías de otros eventos acústicos, clasificando como antropofonía/geofonía a los sonidos en un rango de frecuencia de 1-2 kHz, sin embargo en ocasiones los componentes de estos sonidos pueden incluir el rango de 2-11 kHz que el índice considera biofonías, dando así errores de interpretación (a). Siendo lo común que las antropofonías/geofonías no superen el rango de 2 kHz (b).

