



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS**



**MOVIMIENTOS, RESIDENCIA Y PATRONES DE COMPORTAMIENTO DEL
TIBURÓN LIMÓN (*Negaprion brevirostris*) EN EL PARQUE NACIONAL CABO
PULMO, MÉXICO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS**

PRESENTA

ANAMARIA POSADA PRADO

LA PAZ, BAJA CALIFORNIA SUR

DICIEMBRE 19 DE 2020



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 21 del mes de Enero del año 2021

El (la) que suscribe BIÓL. ANAMARIA POSADA PRADO Alumno (a) del Programa

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

con número de registro B180569 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS

manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DR. ROGELIO GONZÁLEZ ARMAS Y DR. JAMES THOMAS KETCHUM

y cede los derechos del trabajo titulado:

“Movimientos, residencia y patrones de comportamiento del tiburón limón (*Negaprion brevirostris*) en el Parque Nacional Cabo Pulmo, México”

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: ana.posada25@hotmail.com - rarmas@ipn.mx -

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

BIÓL. ANAMARIA POSADA PRADO

Nombre y firma del alumno

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Carlos Mario Posada Peláez e Ivette Fernanda Prado Libreros, por estar para mí durante toda mi vida. Por apoyarme en mi decisión de viajar a otro país y por brindarme el apoyo emocional, siempre!!!, no es fácil adaptarse a estar solo en un lugar y dentro de una cultura totalmente diferente, pero tenerlos y sentirlos cerquita me ayudó muchísimo a sobrellevar el proceso, de corazón, mil gracias!!!

A toda mi familia por estar tan pendiente de mí, a mis abuelos por apoyarme tanto (incluso en la velita para que me fuera bien en los exámenes!) y en especial a mi tío Germán Posada por estar tan atento de todo mi proceso desde que empezó! Ese tiquete fue de los mejores regalos del mundo!!! De verdad que siempre voy a estar agradecida por todo ese apoyo!!!

A todo mi comité de tesis: Dr. Rogelio, mil gracias por ser usted!! no sólo le doy gracias por siempre estar tan atento de mí y por ayudarme en todo mi proceso académico y administrativo, sino también por acogerme como si fuera parte de su familia! De verdad mil gracias!!! Dr. Villalobos, a usted le debo todos los análisis de mi tesis, el 90% de los cafés que me tomé durante todo el tiempo que me tomó escribir el documento y por las reuniones más chéveres y productivas mientras procesábamos los datos y describíamos los resultados!!, me divertí y aprendí muchísimo!! Mil gracias además por tenerme tanta paciencia a mí y a mi computador! Ambos llegamos vivos hasta el final! Jajaja. Dr. Felipe Galván, muchísimas gracias por todos sus consejos, anécdotas, enseñanzas y por supuesto, por sus fiestas!, gracias por escucharme todas mis historias locas, por darme tantos consejos y por hacerme parte de su grupo de investigación de tiburones y rayas, es todo un honor!. Dr. James, mil gracias por permitirme hacer parte de Pelagios Kakunjá, fue una experiencia enriquecedora, donde gracias a ella pude plantear y ejecutar mi proyecto de maestría. Dr. Vladimir, sos el apoyo más grande que he tenido desde que estudiaba biología, créeme que te falta mucho por enseñarme y por aguantarme! Vos sabes que no sabría como agradecerle por todo, así que solo diré, gracias por jamás dejarme sola!!! Por último les digo mil gracias a todos por los consejos, sus enseñanzas y su paciencia, todo esto hizo que creciera

muchísimo en lo personal y en lo académico! El trabajo que leerán a continuación no es solo mío, es de todos nosotros!! muchas gracias por todo equipo!.

A la A.C. Pelagios Kakunjá por permitirme hacer parte del macro-proyecto de áreas de crianza de tiburones y rayas en el Pacífico mexicano y a sus integrantes por todo su apoyo en campo y en el flujo de datos para los resultados de mi trabajo de tesis. Dr. Mauricio Hoyos mil gracias por atender a mi solicitud de pasantía en la ONG, mientras todavía me encontraba estudiando biología en Colombia, gracias por brindarme la oportunidad de hacer parte del equipo, por todos sus consejos y por todas sus enseñanzas!! Gracias a mis mejores compañeros de campo, Abel Trejo y Carolina Navarro, ustedes son unos científicos increíbles! Gracias por enseñarme y por apoyarme tanto!! Por supuesto, a mi “herma”, Paul, por estar atentos uno al otro desde que iniciamos con el sueño de ser maestros en ciencia, lo logramos! También quisiera darle las gracias a las personas que me permitieron trabajar en sus casas y en sus espacios, Juan y Felipe Cuevas, Pargo, Chami, Gabi y por supuesto, el nene!, mil gracias por enseñarme su historia, por permitirme conocer un poco más de ustedes y por darme el honor de llamarlos mis amigos!!

A mi novio, Pete, por ser parte de todo mi proceso académico y personal durante mi estancia en México. Gracias por permitirme entrar y hacer parte de tu casa (con todo y gatos!), por compartir mis gustos, por ser tan leal, por invitarme a ser parte de tus salidas e ir a nadar con tiburones, pero sobre todo, gracias por enseñarme tanto, por entenderme y por aguantarme!! Me faltan muchísimas cosas que agradecerle, pero por ahora lo intentaré resumir en lo más importante, gracias por hacerme parte de tu familia y por hacerme sentir como en mi casa!

A mis colegas biólogos en Cali: Johanna López sos la hermana más espectacular que la vida me dio, simplemente te doy gracias por existir y por siempre estar conmigo en las buenas, en las malas, y en la tesis!! María Estefanía López, Sara Rodríguez, Claudia Escobar, Marlyn Zuluaga, Laura Ramírez y Ana María Herrera, ustedes son seres espectaculares a los que nunca les voy a pagar todo el apoyo que me han dado en todo momento, gracias por impedirme colapsar, por darme tantos consejos y por considerarme

parte de sus respectivas familias, las adoro!!! José Luis Moreno, Juan Sebastián Bernate, Juan Camilo Orozco y Sebastián Gómez, ustedes son los mejores amigos que alguien podría tener!!! Gracias por el apoyo en todo momento, por no dejar que me desanime y por hacerme reír tanto! Todos ustedes son parte de mi familia y eso es algo que toda la vida les voy a agradecer!!!

A mis profesores durante mi maestría, gracias por su tiempo, conocimiento y amor a la ciencia! En especial les doy las gracias al Dr. Enrique Nava, a los Doctores Arturo (padre e hijo), al Dr. Sergio Martínez y al Dr. Manel Zetina. Son unos profesores espectaculares!!! Gracias por haberme enseñado con el cariño y el entusiasmo más grande del mundo!!!

A mi familia paceña, Arturo (mi hermanito mexicano) gracias por acogerme en tu casa desde el primer día de mi primer semestre de maestría y por ser el hermano que nunca tuve!! a Arturo Bell (el mastozoólogo más increíble de la historia), gracias por todas las enseñanzas habidas y por haber, por las risas, las anécdotas y por ser tan espectacular conmigo!! a Cami (mi paisano bello), gracias por siempre estar ahí y mantener a Colombia un poquito más cerca!! a Abel (el confidente más increíble que existe) gracias por no dejarme sola, por escucharme, regañarme y enseñarme!!, a Diego y Nicol, los más fiesteros y chistosos de la Paz, a Ángel, el piloto y la persona más tierna del mundo, a Arturo Hammeken, uno de los seres más sinceros e incondicionales que he conocido, y a todos los que han hecho parte de mi pedacito de historia de vida en La Paz. Gracias a todos por hacerme sentir en familia!!!

Por último le quisiera dar las gracias a dos personas que las considero parte de mi familia. Doctora Carolina Murcia y al Doctor Gustavo Kattan (que en paz descanse) gracias por ser quienes desde un inicio junto a Vlach, me animaron, aconsejaron y catapultaron a hacer mi maestría en otro país. Infinitas gracias por tenerlos siempre cerquita. Profe Caro, gracias por enseñarme que en esta vida se tiene que ser fuerte ante todo!! por enseñarme que cada situación por la que uno pasa, trae consigo un aprendizaje y que depende de uno la manera en la que se afronta para sacarle el máximo provecho. Gracias por hacer parte del proceso

que me ha convertido en una mujer y en una científica fuerte, decidida y apasionada por compartir sus descubrimientos.

Profe Kattan (como siempre lo llamé), yo a usted le debo muchísimas cosas, desde haberme terminado de convencer que la biología era mi camino de vida, hasta convertirme en la bióloga apasionada por el conocimiento, la ciencia y el comportamiento animal que soy hoy. Sus enseñanzas nunca se me van a olvidar, gracias por confiar en mí desde el primer día (en la entrevista para empezar mi pregrado), gracias por sentarse conmigo a compartir un café y mil anécdotas, gracias por todas experiencias durante las salidas de campo, y más importante, gracias por haberme permitido compartir todo el tiempo que pude estar cerca a usted, siempre lo consideraré como mi abuelo biólogo y como el ser humano más increíble que he conocido. Me habría encantado que hubieras podido leer mi tesis, yo sé que se te habrías sentido orgulloso de mí, así como yo me siento orgullosa de seguirme llamando tu alumna! Usted es un angelito biólogo que nos está mirando por ahí que nos sigue enseñando, y por eso y por todo el cariño que le tengo a usted y a la profe Caro, esta tesis se las dedico a ustedes!!!

Mil gracias a todos!!!

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABLAS	xviii
GLOSARIO	xx
RESUMEN	xxiii
ABSTRACT	xxiv
CAPÍTULO 1	1
ESTUDIOS SOBRE ECOLOGÍA Y ETOLOGÍA DE ELASMOBRANQUIOS CON ÉNFASIS EN EL TIBURÓN LIMÓN (<i>Negaprion brevirostris</i>)	1
INTRODUCCIÓN	2
MARCO TEÓRICO	5
CARACTERIZACIÓN DEL TIBURÓN LIMÓN, <i>Negaprion brevirostris</i>	7
ANTECEDENTES	13
ESTUDIOS REALIZADOS ACERCA DE <i>Negaprion brevirostris</i>	13
HIPÓTESIS	17
OBJETIVO GENERAL	17
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
MATERIALES Y MÉTODOS	18
Área de estudio.....	18
Trabajo de Campo	24
RESULTADOS	31
DISCUSIÓN	33
BIBLIOGRAFÍA	35

CAPÍTULO 2.	41
RESIDENCIA Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL TIBURÓN LIMÓN (<i>Negaprion brevirostris</i>) EN EL PARQUE NACIONAL CABO PULMO	41
INTRODUCCIÓN	42
MARCO TEÓRICO	46
MATERIALES Y MÉTODOS	49
Marcaje.....	49
Red de estaciones acústicas.....	51
Análisis de Datos.....	55
RESULTADOS	57
Análisis de resultados de telemetría acústica de <i>Jager</i>	57
Análisis de resultados de telemetría acústica de “ <i>Tom</i> ”	73
Análisis de resultados de telemetría acústica para “ <i>Nemo</i> ”	85
Análisis de resultados de telemetría acústica de “ <i>Philip</i> ”	97
DISCUSIÓN	107
BIBLIOGRAFÍA	112
CAPÍTULO 3.	116
PATRÓN DIARIO DE MOVIMIENTO DE UN INDIVIDUO DE TIBURÓN LIMÓN: 116	
CASO DE ESTUDIO EN EL PARQUE NACIONAL CABO PULMO.....	116
INTRODUCCIÓN	117
MARCO TEÓRICO	121
MATERIALES Y MÉTODOS	124
Marcaje.....	124
Análisis de video	126
Aceleración corporal dinámica general.....	126

Análisis de datos.....	134
RESULTADOS	138
DISCUSIÓN	171
BIBLIOGRAFÍA	176
CAPÍTULO 4.	181
DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES	181
DISCUSIÓN GENERAL	182
CONCLUSIONES	186
RECOMENDACIONES.....	187
BILIOGRAFÍA	188

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Vista lateral del tiburón limón *Neparión brevisrostris* (Poey, 1868). Fuente: Compagno 1984..... 7
- Figura 2.** Morfología de los dientes del tiburón limón, *Negaprion brevirostris*. (A) Dientes correspondientes a la maxila y a la mandíbula; imagen tomada de fishbase.org. (B) Dientes de la maxila; imagen tomada del Centro para la Investigación de Tiburones). El diagrama presentado en la parte inferior izquierda de cada imagen corresponde al sugerido por Compagno (1984). 8
- Figura 3.** Distribución geográfica del tiburón limón, *Negaprion brevirostris*, en 2020 basada en registros de observación. Fuente: Lista roja de la unión internacional para la conservación de la naturaleza (IUCN). 10
- Figura 4.** Número de artículos revisados hechos sobre tiburón limón (*Negaprion brevirostris*) discriminados por año y por tema de investigación sobre tiburón limón. 13
- Figura 5.** Ubicación geográfica del Parque Nacional Cabo Pulmo. Imagen tomada de la A.C. Amigos por la conservación de Cabo Pulmo. 18
- Figura 6.** Área del Parque Nacional Cabo Pulmo. El recuadro verde indica los límites del Parque y las áreas utilizadas por los prestadores de servicios para actividades acuáticas. Los colores corresponden a la asignación de actividades por zona. El color amarillo indica la zona de “preservación 1”, el naranja la zona de “preservación 2”, el espacio verde claro corresponde al área asignada para el “aprovechamiento Sustentable de los Recursos Naturales 1”, el azul para la zona de “aprovechamiento Sustentable de los Recursos Naturales 2”, el verde oscuro como zona de uso público y el rojo para representar los parches de coral. Mapa tomado del Compendio del programa de manejo del parque nacional Cabo Pulmo (2017). 19

Figura 7. Sustratos del Parque Nacional Cabo Pulmo. (A) Composición de una de las zonas areno-rocosas cercana a la costa. (B) Composición de una de las zonas arrecifal – arenosa alejada de la costa. Fotos: Leonardo González 21

Figura 8. Sustratos del Parque Nacional Cabo Pulmo. (A) Zona delimitada del Parque; imagen: Compendio del programa de manejo del parque nacional Cabo Pulmo (2017). (B) Bahía principal en la que se diferencia los tipos de sustrato por colores; Color rosa: rocas y riscos emergidos; Rojo: zonas de rocas y riscos sumergidos; Verde: “suelo duro” sumergido; Amarillo: sustrato arenoso (Riegl et al., 2007)..... 22

Figura 9. Palangre utilizado como arte de pesca durante los muestreos. (A) Diagrama del palangre indicando sus características. (B) Snap de pesca utilizado para sostener los anzuelos desde el estrobo. (C) Anzuelo modificado en la lengüetilla, utilizado para la captura de individuos para evitar lastimar el animal. 25

Figura 10. Red agallera utilizada como arte de pesca durante los muestreos. (A) Diagrama de la red agallera. (B) Red agallera utilizada en campo. 26

Figura 11. Medidas morfométricas tomadas en cada individuo. (A) Longitud total “LT”. (B) Máximo grosor “MG”. (C) Longitud del gonopterigio “LG”..... 28

Figura 12. Mapa de la red de receptores asociados al Parque Nacional Cabo Pulmo en 2020. Los puntos azules indican la posición de cada receptor, identificado con la abreviación su nombre (ver Tabla I)..... 29

Figura 13. Acercamiento del mapa actual de la red de receptores asociados al Parque Nacional Cabo Pulmo en 2020. Los puntos azules indican la posición de cada receptor, identificado con la abreviación su nombre (ver Tabla I)..... 30

Figura 14. A: Marca convencional tipo espagueti; B: Punta de acero inoxidable de la marca espagueti	49
Figura 15. A: Marca acústica interna V16 (Vemco, Ltda.); B: Receptor VR2W (Vemco, Ltda.).	50
Figura 16. Rango de detección de cada receptor dentro del Parque Nacional Cabo Pulmo.	51
Figura 17. Cronología de receptores en la que para cada receptor se indica su fecha de instalación, tiempo de utilidad, fecha de descarga de datos, cambio de unidad del receptor y la fecha programada para la siguiente descarga de datos. Nota: En los casos de los receptores que no presentan un recuadro amarillo, se debe a que estos fueron instalados antes de empezar el presente estudio.	54
Figura 18. Mapa de la red de receptores utilizada entre 2017 y 2018.	58
Figura 19. Acercamiento a los receptores dentro del Parque Nacional Cabo Pulmo. Los puntos indican la ubicación de cada receptor, el color rojo representa los receptores en los que no hubo ningún registro y los puntos verdes los receptores en lo que se detectó a <i>Jager</i>	59
Figura 20. Porcentaje de detecciones de <i>Jager</i> en cada estación. La distribución de las estaciones en el eje Y responde a un orden de sur a norte, siendo “PPE” la estación más al norte y “BS” la más al Sur.	61
Figura 21. Número total de detecciones de <i>Jager</i> obtenidas entre 2017 y 2018 discriminadas en un periodo de 24 horas. La escala azul a la derecha de la gráfica determina el periodo del día.	62

Figura 22. Detecciones de *Jager* registradas mensualmente discriminadas por periodo (año). Cada punto ilustrado indica una detección. Obsérvese la ausencia de registros en todos los receptores entre septiembre e inicios de diciembre de 2017..... 63

Figura 23. Detecciones de *Jager* registradas en cada estación por mes, discriminadas por el periodo del día. Las estaciones están organizadas de sur a norte, siendo BS la estación más al sur y PPE la estación más al norte. Cada punto ilustrado indica una detección..... 64

Figura 24. Detecciones de *Jager* en cada estación en función del periodo del día. Las estaciones están organizadas de sur a norte, siendo BS la estación más al sur y PPE la estación más al norte. Cada punto ilustrado indica una detección. 65

Figura 25. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detecciones de *Jager*, las zonas y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. Ama: Amanecer; Atar: Atardecer..... 67

Figura 26. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detecciones de *Jager*, las estaciones de la zona norte y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. Ama: Amanecer Atar: Atardecer. 68

Figura 27. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detecciones de *Jager*, las estaciones de la zona sur y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. Atar: Atardecer. 69

Figura 28. Índice de residencia (IR) mensual de <i>Jager</i> en el Parque Nacional Cabo Pulmo	71
Figura 29. Comparación entre la temperatura superficial del mar (línea roja), temperatura a 25 metros (línea azul), con el número de detecciones de <i>Jager</i> por día (puntos grises). Las líneas grises entre septiembre y noviembre indican el periodo en el que no se obtuvo ninguna detección.....	72
Figura 30. (A) Mapa de la red de receptores utilizada entre 2019 y 2020. (B) Acercamiento a los receptores dentro del Parque Nacional Cabo Pulmo. Los puntos indican la ubicación de cada receptor, el color azul representa los receptores en los que no hubo ningún registro y los puntos verdes los receptores en lo que se detectó <i>Tom</i>	76
Figura 31. Porcentaje de detecciones de <i>Tom</i> en cada estación. La distribución de las estaciones en el eje Y responde a un orden de sur a norte, siendo “ISL” la más al Sur y “CPN” la estación más al norte.	77
Figura 32. Número total de detecciones de <i>Tom</i> obtenidas entre abril de 2019 y 2020, discriminadas en un periodo de 24 horas. La escala azul a la derecha de la gráfica determina el periodo del día.	77
Figura 33. Detecciones de <i>Tom</i> registradas en cada mes discriminadas por periodo. Cada punto ilustrado indica una detección.	78
Figura 34. Detecciones de <i>Tom</i> registradas en cada estación por mes, discriminadas por el periodo del día. Las estaciones están organizadas de sur a norte, siendo “BS” la estación más al sur y “CPN” la estación más al norte. Cada punto ilustrado indica una detección...	79
Figura 35. Detecciones de <i>Tom</i> en cada estación en función del periodo del día. Las estaciones están organizadas de sur a norte, siendo “BS” la estación más al sur y “CPN” la estación más al norte. Cada punto ilustrado indica una detección.	80

Figura 36. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detecciones de *Tom*, las zonas y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. Ama: Amanecer; Atar: Atardecer..... 81

Figura 37. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detección de *Tom* las estaciones de la zona norte y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. Ama: Amanecer. 82

Figura 38. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detección de *Tom*, las estaciones de la zona sur y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. Ama: Amanecer; Atar: Atardecer. 83

Figura 39. Índice de residencia (IR) mensual de *Tom* en el Parque Nacional Cabo Pulmo. 84

Figura 40. (A) Mapa de la red de receptores utilizada entre 2019 y 2020. (B) Acercamiento a los receptores dentro del Parque Nacional Cabo Pulmo. Los puntos indican la ubicación de cada receptor, el color azul representa los receptores en los que no hubo ningún registro y los puntos verdes los receptores en lo que se detectó el *Nemo*..... 88

Figura 41. Porcentaje de detecciones de *Nemo* en cada estación. La distribución de las estaciones en el eje Y responde a un de sur a norte, siendo “ISL” la más al Sur y “CPN” la estación más al norte..... 89

Figura 42. Detecciones de *Nemo* registradas por mes, discriminadas por el periodo del día. Cada punto ilustrado indica una detección. Número total de detecciones de *Nemo* obtenidas entre 2019 y 2020 discriminadas en un periodo de 24 horas. La escala azul a la derecha de la gráfica determina el periodo del día. 89

Figura 43. Detecciones de *Nemo* registradas en cada mes discriminadas por periodo. Cada punto ilustrado indica una detección. Las curvas describen el atardecer y el amanecer de acuerdo con la variación estacional. 90

Figura 44. Detecciones de *Nemo* registradas por mes, discriminadas por el periodo del día y el receptor donde fue registrada la detección. Las estaciones están organizadas de sur a norte, siendo “BS” la estación más al sur y “PPE” la estación más al norte. Cada punto ilustrado indica una detección. 91

Figura 45. Detecciones de *Nemo* en cada estación en función del periodo del día. Las estaciones están organizadas de sur a norte, siendo “BS” la estación más al sur y “PPE” la estación más al norte. Cada punto ilustrado indica una detección. 92

Figura 46. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detecciones de *Nemo*, las zonas y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. Ama: Amanecer, Atar: Atardecer 93

Figura 47. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detección de *Nemo*, las estaciones de la zona norte y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. Ama: Amanecer 94

Figura 48. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detección de *Nemo*, las estaciones de la zona sur y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. Atar: Atardecer. 95

Figura 49. Índice de residencia (IR) mensual de *Nemo* durante los meses de 2019 y 2020 en el Parque Nacional Cabo Pulmo 96

Figura 50. (A) Mapa de la red de receptores utilizada entre 2019 y 2020. (B) Acercamiento a los receptores dentro del Parque Nacional Cabo Pulmo. Los puntos indican la ubicación de cada receptor, el color azul representa los receptores en los que no hubo ningún registro y los puntos verdes los receptores en lo que se detectó *Philip*. 99

Figura 51. Porcentaje de detecciones de *Philip* en cada estación. La distribución de las estaciones en el eje Y responde a un orden de sur a norte, siendo “ISL” la más al Sur y “CPN” la estación más al norte. 100

Figura 52. Número total de detecciones de *Philip* obtenidas entre abril de 2019 y 2020, discriminadas en un periodo de 24 horas. La escala azul a la derecha de la gráfica determina el periodo del día. 100

Figura 53. Detecciones de *Philip* registradas en cada mes discriminadas por periodo. Cada punto ilustrado indica una detección. 101

Figura 54. Detecciones de *Philip* registradas en cada estación por mes, discriminadas por el periodo del día. Las estaciones están organizadas de sur a norte, siendo “ISL” la estación más al sur y “PPE” la estación más al norte. Cada punto ilustrado indica una detección.. 102

Figura 55. Detecciones de *Philip* en cada estación en función del periodo del día. Las estaciones están organizadas de sur a norte, siendo “ISL” la estación más al sur y “PPE” la estación más al norte. Cada punto ilustrado indica una detección. 103

Figura 56. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detecciones de *Philip*, las zonas y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. 104

Figura 57. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detección de *Philip*, las estaciones de la zona sur y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. 105

Figura 58. Índice de residencia (IR) mensual de *Philip* en el Parque Nacional Cabo Pulmo. 106

Figura 59. Hembra de tiburón limón (*Negaprion brevirostris*) capturada en mayo de 2017 por James Ketchum 124

Figura 60. Marca CATS (Customized animal tracking solutions) utilizada para marcar el ejemplar. 125

Figura 61. (A) Relación entre la aceleración estática y el ángulo de posición del cuerpo respecto a los movimientos heave y surge (disposición del objeto que se ve encima del gráfico). El heave está representado por la línea punteada (-•-•-•-) y el surge por la línea continua (—). Después de voltear el objeto 40°, (línea punteada), el cambio en el surge (y) es mayor que el cambio en el heave (x). (A) Tasa de cambio de la aceleración estática (en unidades de g para cada grado en respuesta al movimiento) en el heave (-•-•-•-) y en el surge (—) dibujada contra el ángulo del cuerpo, donde la línea punteada indica el

momento en que cada eje es más sensible a los cambios en el Pitch. Imagen tomada del artículo de Shepard et al., (2008b)..... 129

Figura 62. (A) Representación del pitch sobre el cuerpo de un pingüino, el cual aparece como el valor medio del total de la aceleración en el heave (gráfico de arriba); aceleración estática derivada del heave (gráfico del medio); Pitch representado en grados. (B) Aceleración total sobre el heave de un tejón cuando pasa de estar acostado de lado a estar acostado boca arriba. (C) Representación del giro lateral de una tortuga, donde al hacer un giro de 90° sobre el eje del heave al mismo tiempo que hace rotaciones de 180° sobre el eje sway, describe una maniobra de giro que casi implica una vuelta completa. Imagen tomada de Shepard et al., (2008b)..... 131

Figura 63. Representación de cambios en la aceleración dinámica que surgen a partir de tres clases de movimiento diferentes. (A) Resultado del movimiento del aleteo al volar sobre el heave. (B) Cambio en el eje sway durante el nado de un tiburón. (C) Aumento del valor del surge durante una caminata. Las flechas indican la dirección y la extremidad con la que se hace el movimiento. Imagen tomada de Shepard et al., (2008b)..... 133

Figura 64. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 13:23:05 y las 13:26:05. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (franjas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g”..... 140

Figura 65. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 13:23:05 y las 13:28:05. La figura de arriba corresponde al Pitch, la del medio al Roll y la de abajo al Yaw. Los valores de cada eje son medidos en grados (°) La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés. 141

Figura 66. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 14:04:35 y las 14:08:35. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (francas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g”..... 143

Figura 67. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 14:04:35 y las 14:09:35. La figura de arriba corresponde al Pitch, la del medio al Roll y la de abajo al Yaw. Los valores de cada eje son medidos en grados (°) La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés..... 144

Figura 68. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 14:25:25 y las 14:29:25. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (francas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g”..... 146

Figura 69. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 14:25:25 y las 14:20:25. La figura de arriba corresponde al Pitch, la del medio al Roll y la de abajo al Yaw. Los valores de cada eje son medidos en grados (°) La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés..... 147

Figura 70. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 16:13:10 y las 16:18:10. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (francas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g”..... 149

Figura 71. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 16:13:10 y las 16:18:10. La figura de arriba corresponde al Pitch, la del medio al Roll y la de abajo al Yaw. Los valores de cada eje son medidos en grados (°) La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés..... 150

Figura 72. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 17:04:00 y las 17:09:00. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (franjas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g” 152

Figura 73. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 17:04:00 y las 17:09:00. La figura de arriba corresponde al Pitch, la del medio al Roll y la de abajo al Yaw. Los valores de cada eje son medidos en grados (°) La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés..... 153

Figura 74. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 19:40:00 y las 19:45:00. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (franjas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g” 155

Figura 75. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 19:40:00 y las 19:45:00. La figura de arriba corresponde al Pitch, la del medio al Roll y la de abajo al Yaw. Los valores de cada eje son medidos en grados (°) La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés..... 156

Figura 76. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 20:35:00 y las 20:40:00. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (franjas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g”..... 158

Figura 77. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 20:35:00 y las 20:40:00. La figura de arriba corresponde al Pitch, la del medio al Roll y la de abajo al Yaw. Los valores de cada eje son medidos en grados (°). La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés. 159

Figura 78. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 21:50:00 y las 21:55:00. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (franjas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g”..... 162

Figura 79. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 21:55:00 y las 22:00:00. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (franjas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g”..... 163

Figura 80. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 21:50:00 y las 21:55:00. La figura de arriba corresponde al Pitch, la del medio al Roll y la de abajo al Yaw. Los valores de cada eje son medidos en grados (°). La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés. 164

Figura 81. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 21:55:00 y las 22:00:00. La figura de arriba corresponde al Pitch, la del medio al Roll y la de abajo al Yaw. Los valores de cada eje son medidos en grados (°). La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés. 165

Figura 82. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 1:40:00 y las 1:45:00. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (franjas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g” 167

Figura 83. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 1:40:00 y las 21:55:00. La figura de arriba corresponde al Pitch, la del medio al Roll y la de abajo al Yaw. Los valores de cada eje son medidos en grados (°). La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés. 168

Figura 84. Perfiles de profundidad (figura de arriba) y temperatura (figura de abajo) medidos a lo largo de todo el periodo de registro de datos. Las franjas negras entre las 20:00 y las 21:00 horas indican la hora del atardecer (horario de verano). La línea verde indica la hora en la que al parecer la marca fue liberada de la aleta dorsal del tiburón. 169

Figura 85. Histograma de frecuencia de datos en cada intervalo de profundidad..... 170

LISTA DE TABLAS

Tabla I. Georreferenciación de las zonas delimitadas en el Parque Nacional Cabo Pulmo. Las coordenadas corresponden al sitio donde fue instalado el receptor, definiendo su profundidad respecto a la profundidad máxima de la zona e indicando el sustrato correspondiente.....	23
Tabla II. Datos registrados en las capturas de los individuos de tiburón limón (<i>Negaprion brevirostris</i>) en el Parque Nacional Cabo Pulmo. ND: No hay datos; N.S: Número de serie acústico; ID: Número de identificación acústico. JK: James Ketchum, KA: Kathy Ayres, AP: Ana Posada, MG: Miquel Grau	31
Tabla III. Ejemplares de tiburón limón (<i>Negaprion brevirostris</i>) capturados en el Parque Nacional Cabo Pulmo. ND: No hay datos. LT: Longitud máxima; LF: Longitud furcal; LP: Longitud precaudal; MG: máximo grosor; LG: longitud del gonopterigio.....	32
Tabla IV. Distribución de las estaciones entre la zona norte y sur en el Parque Nacional Cabo Pulmo. R: Rocoso; A: Arenoso; R-A: Rocoso - arenoso	52
Tabla V. Total de detecciones de <i>Jager</i> obtenidas en cada estación de cada zona entre mayo de 2017 y junio de 2018.	60
Tabla VI. Índice de residencia (IR) mensual de <i>Jager</i> en el Parque Nacional Cabo Pulmo en 2017 y 2018. ND: No datos disponibles	70
Tabla VII. Total de detecciones de <i>Tom</i> obtenidas en cada estación de cada zona entre abril de 2019 y 2020.	76
Tabla VIII. Índice de residencia (IR) <i>Tom</i> en el Parque Nacional Cabo Pulmo en los meses de abril de 2019 y 2020.	84

Tabla IX. Total de detecciones de <i>Nemo</i> obtenidas en cada estación de cada zona entre mayo de 2019 y agosto de 2020.	88
Tabla X. Índice de residencia (IR) mensual de <i>Nemo</i> en el Parque Nacional Cabo Pulmo en 2019 y 2020.	96
Tabla XI. Total de detecciones de <i>Philip</i> obtenidas en cada estación de cada zona entre junio de 2019 y julio de 2020.	99
Tabla XII. Índice de residencia (IR) de <i>Philip</i> en el Parque Nacional Cabo Pulmo en los meses de abril de 2019 y 2020.....	106
Tabla XIII. Frecuencia de datos, tiempo total y porcentaje de “estancia” de la hembra adulta de tiburón limón (<i>Negaprion brevirostris</i>) en cada intervalo de profundidad dentro del Parque Nacional Cabo Pulmo.....	170

GLOSARIO

Área protegida: Área terrestre o marítima con regulación y restricciones específicas de las actividades, tanto económicas como recreativas, que se pueden llevar a cabo dentro del polígono establecido.

Área de crianza: Zonas particulares, caracterizadas por tener alta productividad biológica y ser utilizadas recurrentemente por los individuos de una misma especie para parir a sus crías y pasar los primeros estadios de su vida. Se caracterizan por la presencia de individuos neonatos y juveniles de la misma especie a través del tiempo, y presencia de organismos adultos durante la temporada de alumbramiento.

Comportamiento animal (Etología): Ciencia cuyo objeto de estudio es el comportamiento o conducta de las especies de animales en su medio natural, respondiendo ante estímulos concretos con una predisposición que es adaptativa, es decir, que tiene un claro valor de supervivencia.

Conservación: Se refiere al cuidado de la biodiversidad en su entorno natural o sitio de origen, cuyo propósito es proteger las poblaciones para el mantenimiento de su variabilidad genética.

Dispersión: Movimiento de individuos desde su lugar de nacimiento a su sitio de reproducción, o de un sitio de reproducción a otro.

Distribución: Área donde habita una especie determinada.

Ecología: Ciencia que estudia los procesos de los seres vivos en un ecosistema, su relación con el medio ambiente y el impacto que se ejerce sobre él.

Ecosistema: Unidad ecológica que integra las interacciones de diversos factores bióticos y abióticos.

Ecoturismo: Actividad que apoyar la economía de comunidades rurales a través del servicio turístico.

Filopatría: Tendencia de los organismos a permanecer en el mismo territorio en que nacieron o volver al mismo con fines reproductivos.

Gonopterigio: Canal intromitente que conduce esperma.

Hábitat: Espacio determinado de un ecosistema con características particulares, donde vive una comunidad biológica.

Índice de residencia: Estimación biológica de la permanencia de un organismo en un área determinada a través del tiempo.

Longitud furcal: En peces, distancia desde el extremo anterior del organismo, hasta el punto de bifurcación de los lóbulos de la aleta caudal.

Longitud pre-caudal: Distancia desde el extremo anterior del organismo, hasta la base de la aleta caudal.

Longitud total: Distancia desde el extremo anterior hasta el extremo posterior del organismo.

Marca acústica: Transmisor que emite pulsos sonoros de frecuencia e intensidad determinadas, que se coloca en un individuo particular.

Máximo grosor: Medida de la circunferencia máxima de un organismo, tomada alrededor de la parte más ancha del tronco.

Neonato: Organismo recién nacido. En elasmobranquios se caracterizan por tener abierta la cicatriz umbilical.

Palangre: Arte de pesca que consiste de una línea principal (madre) de la cual derivan líneas de pesca más pequeñas en las que se coloca un anzuelo en cada extremo libre.

Población: Grupo de organismos de la misma especie (u otros grupos en cuyo seno los individuos pueden intercambiar información genética) que ocupa un lugar o área determinado.

Receptor acústico: Hidrófono especialmente diseñado, para registrar pulsos acústicos de determinada intensidad emitidos por transmisores específicos, registrando código individual y hora de detección. Usualmente se colocan en estaciones fijas.

Red agallera: Arte de pesca consistente de una red longitudinal con luz de malla variable, colocada a cierta profundidad para capturar un recurso específico.

Sustrato: Es la base, materia o sustancia que sirve de sostén a un organismo, ya sea vegetal, animal o protista, en el cual transcurre su vida.

Telemetría acústica: Método para medir variables físicas remotamente, utilizando el sonido como principal fuente de transmisión a través de espacios abiertos.

Telemetría activa: Método de telemetría, donde se sigue activamente y en tiempo real, las emisiones acústicas de un transmisor particular.

RESUMEN

El tiburón limón (*Negaprion brevirostris*) es una especie costera, la cual, de acuerdo con su comportamiento en estadios tempranos de vida, se encuentra asociado a ecosistemas de manglar y praderas de fanerógamas. A pesar de que el Parque Nacional Cabo Pulmo (PNCP) (ubicado en el Golfo de California México) no cuenta con estos tipos de ecosistema, la especie parece haberse adaptado a otro tipo de hábitat, principalmente en pozas de marea y ensenadas poco profundas. El presente estudio describe el uso del área de actividad del tiburón limón mediante la descripción de patrones de movimiento y comportamientos de la especie a partir de datos de telemetría acústica pasiva y de una marca "personalizada" (CATS), evaluando el grado de residencia dentro del PNCP. El seguimiento de los animales se hizo a partir de tres tipos de marcaje, (1) marcas convencionales tipo espagueti, (2) marcas acústicas internas y (3) un dispositivo personalizado denominado "CATS" (por sus siglas en inglés). En total se marcaron cinco individuos, cuatro machos (dos adultos nombrados como "*Jager*" y "*Tom*" y dos juveniles denominados "*Nemo*" y "*Philip*") y una hembra adulta. Aunque todos los fueron etiquetados con el marcaje convencional, los machos fueron etiquetados con las marcas acústicas implantadas y la hembra con la CATS. De acuerdo con la ubicación de las detecciones de las marcas, los adultos recurren con mayor frecuencia a áreas profundas (> 10 metros) alejadas de la costa (> 500 metros desde la rompiente hacia mar adentro) en la zona sur del PNCP durante todos los periodos del día (amanecer, día atardecer y noche), moviéndose hacia áreas igualmente alejadas de la costa en la zona norte (de la misma profundidad) únicamente en el periodo "noche". Los juveniles siguieron este mismo patrón de movimiento entre zonas, con la diferencia de que en lugar de utilizar zonas alejadas a costa, se mantuvieron en áreas cercanas a costa (≤ 500 m desde la rompiente hacia mar adentro) en bajas profundidades (< 10 m). La hembra (*Lucy*) marcada con la CATS demostró un patrón de nado en "yo-yo". Los movimientos en el eje de rotación sugieren que a bajas profundidades (< 1 m), no ocurren giros drásticos en los grados de ningún eje.

ABSTRACT

The lemon shark (*Negaprion brevirostris*) is a coastal species, which, according to its behavior in early stages of life, is associated with mangrove ecosystems and seagrass meadows. Despite the fact that the Cabo Pulmo National Park (PNCP) (located in the Gulf of California, Mexico) does not have these types of ecosystems, the species seems to have adapted to another type of habitat, mainly in tide pools and shallow inlets. The present study describes the use of the area of activity of the lemon shark by describing movement patterns and behaviors of the species from passive acoustic telemetry data and a "personalized" tag (CATS), evaluating the degree of residence within of the PNCP. The animals were tracked using three types of tags, (1) conventional spaghetti-like tags, (2) internal acoustic tags, and (3) a personalized device called "CATS" (for its acronym in English). In total, five individuals were tagged, four males (two adults named “*Jager*” and “*Tom*” and two juveniles named “*Nemo*” and “*Philip*”) and one adult female. Although all of them were tagged with the conventional tag, the males were tagged with the implanted acoustic tags and the female with the CATS. According to the location of the tag detections, adults resort more frequently to deep areas (> 10 meters) away from the coast (> 500 meters from the break to the open ocean) in the southern part of the PNCP during all the periods of the day (dawn, day, dusk and night), moving to areas equally far from the coast in the north (of the same depth) only in the night period. Juveniles followed this same pattern of movement between zones, with the difference that instead of using areas far from the coast, they remained in areas close to the coast (≤ 500 m from the break to the open ocean) at shallow depths (< 10 m). The female (*Lucy*) tagged with CATS demonstrated a "yo-yo" swimming pattern. The movements in the axis of rotation suggest that at shallow depths (< 1 m), drastic turns do not occur in the degrees of any axis.

CAPÍTULO 1

ESTUDIOS SOBRE ECOLOGÍA Y ETOLOGÍA DE ELASMOBRANQUIOS CON ÉNFASIS EN EL TIBURÓN LIMÓN (*Negaprion brevirostris*)

INTRODUCCIÓN

Taxonómicamente el grupo de los peces cartilaginosos conforma la Clase Chondrichthyes, la cual acoge a las especies de tiburones, rayas y quimeras. Hasta la fecha se conocen unas 1250 especies, las cuales, de acuerdo con sus adaptaciones, se distribuyen en zonas pelágicas (Dulvy *et al.*, 2008), costeras (Bigelow & Schroeder, 1948), estuarios (Simpfendorfer, 2005) y en sistemas de agua dulce (Thorson, 1982). Los tiburones, conjunto a otros pelágicos mayores, son fundamentales en ecosistemas acuáticos debido a que son reguladores poblacionales de peces e invertebrados (Compagno, 1990). Su importancia comprende un segundo componente, que responde al recurso pesquero, debido a que funge como base económica de poblaciones humanas asociadas a la costa alrededor del mundo (FAO, 2005).

Con base en la importancia del recurso, se esperaría que las poblaciones de especies comerciales de elasmobranquios se encontraran ampliamente estudiadas y bajo programas de conservación. Sin embargo, existen vacíos de información sobre aspectos ecológicos (tasas de natalidad y mortalidad, distribución, reproducción, abundancia) y comerciales (desembarques anuales, esfuerzo pesquero, biomasa disponible), dificultando entre otras, la evaluación del estado de conservación de las poblaciones (Tavares, 2018). Varios autores han documentado la pérdida de diversidad y la reducción drástica del número de individuos en las poblaciones de especies comerciales, como consecuencia del incremento de las capturas en los océanos Pacífico y Atlántico (Baum *et al.*, 2003).

En la actualidad, los tiburones son el grupo de vertebrados marinos cuyo nivel de amenaza sobrepasa el de los peces óseos a nivel global (Lucifera *et al.*, 2012). La reducción del número de individuos en las poblaciones se relaciona con diversas prácticas antropogénicas, e.g., la sobreexplotación pesquera (Bonfil, 1994), degradación de hábitats (Jennings *et al.*, 2008), contaminación de ecosistemas (Gelsleichter *et al.*, 2005), entre otras, generando efectos sobre la estabilidad y el comportamiento de las poblaciones en todo el mundo (Chin *et al.*, 2010). Además de las amenazas antropogénicas, la biología de la mayoría de las especies de elasmobranquios (crecimiento lento, madurez sexual tardía,

poco reclutamiento y en general una baja tasa de supervivencia en estadios tempranos) representa un reto adicional para su conservación (Mac Arthur & Wilson 1967). Uno de los puntos clave que ha permitido el incremento de la tasa de mortalidad, es la pesca excesiva de individuos que no han alcanzado la madurez sexual (Zanella & López-Garro, 2015). Esta actividad es llevada a cabo por pescadores artesanales, cuyas zonas de pesca corresponden a hábitats clave para la subsistencia de las poblaciones, tales como las áreas de cría, alimentación y reproducción. Por lo tanto, la necesidad de mantener el equilibrio de las poblaciones de estas especies ha llevado a la creación e implementación de áreas determinadas dedicadas a programas de conservación. Teniendo en cuenta que las estrategias utilizadas para la creación de estos sitios dependen del espacio y las particularidades de cada especie, las acciones de conservación se han basado en la creación de corredores marinos y protección de áreas “clave” (García *et al.*, 2007).

Por otro lado, existen estrategias biológicas utilizadas por las especies para incrementar su “eficiencia biológica” o “*fitness*”. Estas componen características fisiológicas como el desarrollo temprano de madurez sexual o comportamentales como la selección de hábitats. Esta última resulta ser la que a menudo presenta un mayor éxito reproductivo, debido a la escogencia de áreas con disponibilidad de recursos alimentarios y bajo riesgo de depredación (Werner *et al.*, 1983; Begon *et al.*, 2006). Debido a la importancia de estas áreas, resulta crucial conocer la composición y extensión de dichos espacios. Se considera “*área de actividad*” o “*home range*”, al área definida en tiempo y espacio donde el individuo crece (Odun & Kuenzler 1955), aportando a su vez información sobre la historia de vida de las especies que coexisten en el área (Schoener 1981). Según las características biológicas y ecológicas de cada especie, el área de actividad puede variar a nivel interespecífico e intraespecífico, incrementando a medida que el individuo alcance la madurez sexual (Wetherbee *et al.*, 2007).

Según Odun & Kuenzler (1955), los tiburones establecen un área de actividad que puede estar constituido por varios espacios definidos. Estas áreas son "diferenciadas" para desarrollar un comportamiento en particular, como por ejemplo alimentación, reproducción o migración. Para aspectos reproductivos se han reconocido dos zonas, una de reproducción y otra de crianza (McNab, 1963). Siguiendo los lineamientos de Castro (1993a), una zona puede ser denominada “área de reproducción” solo si se demuestra la presencia de hembras con cicatrices de cópula o grávidas, hembras y machos en edad reproductiva y una proporción de sexos 1:1. Contrastado con lo anterior, los parámetros para identificar y proponer “áreas de crianza” son la presencia de hembras grávidas (embriones en estadios de desarrollo avanzado) o la presencia de neonatos e individuos juveniles en el mismo espacio.

MARCO TEÓRICO

Conocer la distribución espacial y los componentes de los hábitats de los tiburones, permite la identificación de nuevas zonas como áreas potenciales para su investigación, aprovechamiento y conservación. Siendo además un requisito clave para el manejo de poblaciones y ordenamiento de pesquerías, algunas de estas áreas corresponden a zonas de reproducción y reclutamiento. Sin embargo, no todas las regiones donde podrían existir estas áreas se encuentran ampliamente estudiadas. Ejemplo de ello, son las regiones tropicales, lo que ha creado cierto nivel de incertidumbre sobre las relaciones interespecíficas entre tiburones y de estos con otras especies (Tavares, 2018).

El Parque Nacional Cabo Pulmo (PNCP) constituye un área protegida de vital importancia para la conservación y reproducción de especies de invertebrados, peces teleósteos y elasmobranquios. La composición del área difiere con respecto a la profundidad y cercanía a la costa, siendo esta última, de vital importancia para los estadios tempranos de especies de tiburón como *Ginglymostoma unamensi*, *Carcharhinus limbatus*, *Triaenodon obesus* y *Negaprion brevirostris*. En contraste, estudios previos en distintas zonas alrededor del mundo sugieren que las áreas resguardadas cercanas a la costa optimizan el crecimiento de los individuos, llegando a su talla de madurez en menor tiempo que en zonas pelágicas o en latitudes más elevadas (Tavares, 2008).

La permanencia de tiburón limón en el PNCP permite desarrollar diversas investigaciones sobre aspectos ecológicos, demográficos, etológicos, genéticos y en general sobre su historia de vida. Un aspecto importante es conocer las implicaciones ecológicas que tienen las áreas de distribución para la especie. Teniendo en cuenta que la especie no ha sido estudiada en el océano Pacífico y que la información sobre las áreas de distribución y dispersión solo han sido descritas en algunas regiones del océano Atlántico centro-occidental, el presente estudio permite un contraste entre la forma en la que la especie establece sus áreas de actividad dependiendo de las condiciones oceanográficas entre el Atlántico y el Pacífico.

La presente investigación describe el patrón de actividad de los individuos de la población dentro de los límites del PNCP. Los componentes que la conformaron fueron cuatro: (1) caracterización de las zonas de avistamiento y registro de presencia de individuos, (2) descripción de la distribución espacial, (3) índice de residencia y (4) el análisis del patrón de actividad espacial y su relación con la distribución en los diferentes microhábitats. La justificación del estudio se basó en cuatro puntos: (1) el estado de conservación, (2) la distribución espacial descrita hasta ahora para las poblaciones de *N. brevirostris*, (3) la identificación y descripción de un área de actividad alternativa para la especie, y (4) la generación de datos para la evaluación, manejo y aprovechamiento de la población en el Parque a partir de actividades no invasivas como el ecoturismo.

Los resultados de la investigación fueron obtenidos mediante la aplicación de las técnicas telemetría acústica y las marcas tipo "CATS" (Customized Animal Tracking Solutions / Soluciones Personalizadas para el Seguimiento Animal). A partir de estos resultados, el presente trabajo aporta conocimiento sobre la biología y ecología de la especie en el Pacífico Oriental Tropical.

CARACTERIZACIÓN DEL TIBURÓN LIMÓN, *Negaprion brevirostris*

El tiburón limón *Negaprion brevirostris*, es una especie distinguible entre las especies que conforman la familia Carcharhinidae. Su principal característica morfológica es el tamaño de su segunda aleta dorsal, puesto que su tamaño es casi igual a la de la primera (Poey, 1866; Fig. 1). Aunque no haya dimorfismo sexual (salvo en el tamaño de los individuos), su color corporal es diferente entre clases de edad. Mientras los adultos y los juveniles presentan la zona del dorso color arena, verde o gris amarillento y la región ventral de color blanco o gris claro; los neonatos suelen tener, adicionalmente a la descripción anterior, manchas negras difuminadas en los extremos de las aletas pectorales, segunda dorsal, anal y lóbulos de la caudal (Compagno, 1984). La morfología del rostro es corta y ovalada, seguida por cinco pares de hendiduras branquiales. La primera aleta dorsal se encuentra detrás del extremo del borde interno de la aleta pectoral (Compagno, 2002). Otro de los caracteres diagnósticos de la especie, es la ausencia de la cresta dérmica inter-dorsal (Castro, 1993b), así como la forma de los dientes de la maxila (rectos, con bordes lisos y base aserrada) (Ebert, 2013; Fig. 2).

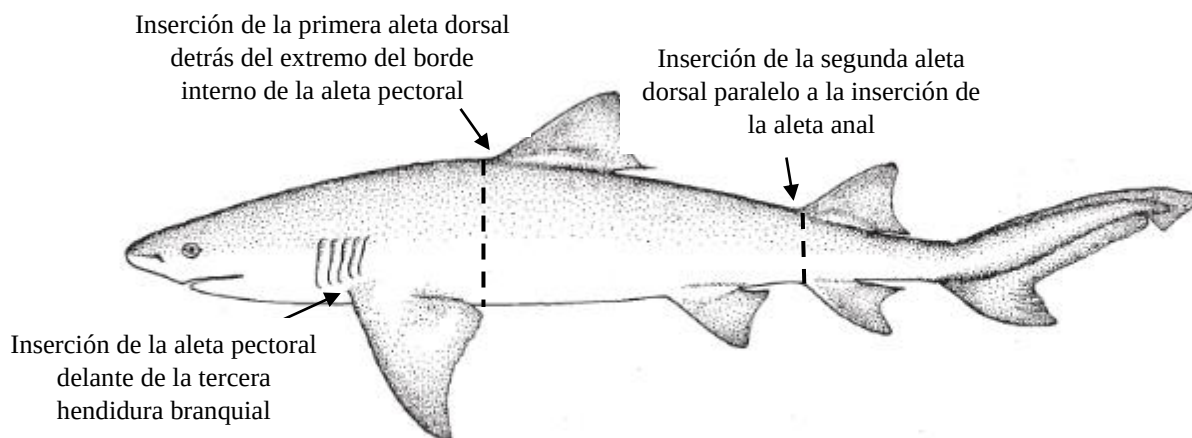


Figura 1. Vista lateral del tiburón limón *Neparión brevisrrostris* (Poey, 1868). Fuente: Compagno 1984.

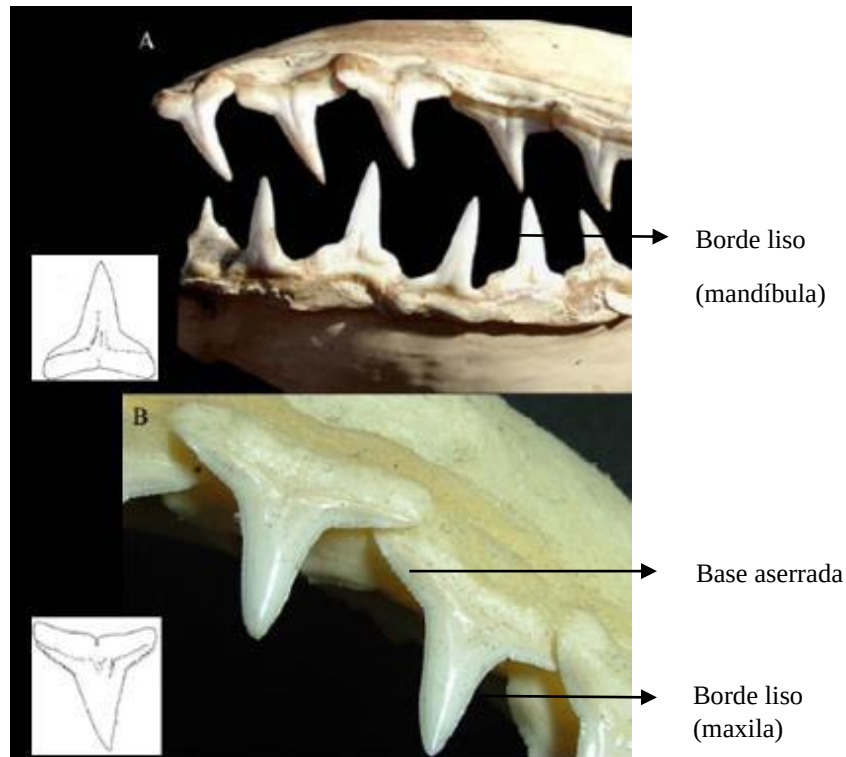


Figura 2. Morfología de los dientes del tiburón limón, *Negaprion brevirostris*. (A) Dientes correspondientes a la maxila y a la mandíbula; imagen tomada de fishbase.org. (B) Dientes de la maxila; imagen tomada del Centro para la Investigación de Tiburones). El diagrama presentado en la parte inferior izquierda de cada imagen corresponde al sugerido por Compagno (1984).

Respecto a su tamaño, la talla de nacimiento registrada oscila entre los 50 - 60 cm de longitud total (LT) (Gruber & Stout, 1983). La madurez sexual es alcanzada una vez los individuos han cumplido 11 y 13 años; machos y hembras, respectivamente. Ambos sexos, llegan a una talla de madurez promedio de 230 cm de LT (Compagno, 1984; Brown & Gruber, 1988). Aunque en la mayoría de los casos se encuentran organismos entre los 250 a 300 cm de LT, su talla máxima documentada alcanza los 340 cm. Su biología reproductiva corresponde a una especie vivípara (Springer, 1950) que requiere de 12 años para alcanzar la madurez sexual (Brow & Gruber 1988). Las hembras presentan gestación de 10 a 12 meses y un número de crías (con base en observaciones *ad libitum* de ocho hembras adultas) entre 4 y 18 tiburones por parto (Compagno, 1984; Feldheim *et al.*, 2002a). Es una especie de comportamiento filopátrico (Feldheim *et al.*, 2002a) caracterizada por el establecimiento de zonas de actividad restringidas, las cuales modifica a medida que los individuos alcanzan la madurez sexual (Gruber *et al.*, 1988).

La dieta del tiburón limón se compone de varias especies de peces de la familia Ostraciontidae, del género *Pteromylaeus* (familia Myliobatidae) y ocasionalmente aves marinas (Compagno, 1984; Castro *et al.*, 1999b). En general, la dieta de la especie es oportunista, pues presentan un tipo de alimentación intermitente, en donde el individuo come hasta saciarse y deja de alimentarse hasta completar el período de digestión (Wetherbee *et al.*, 1990).

Los sitios a los que se asocia la especie en su distribución son zonas costeras, encontrada a lo largo de las plataformas continentales e insulares de las zonas tropicales y subtropicales (Compagno, 1984; Fig. 3). Su distribución en el Atlántico oriental está restringida a la costa occidental tropical de África, encontrándose desde Senegal hasta Costa de Marfil (Compagno *et al.*, 2005). En contraste, su distribución en el Atlántico occidental ocupa una mayor área, puesto que se distribuye desde la costa de Nueva Jersey en los EE.UU., incluyendo el golfo de México, las Bahamas, el Mar Caribe y los Roques (Venezuela) hasta el sudeste de Brasil. La especie también ha sido detectada en el Pacífico oriental, con observaciones de individuos desde Baja California y golfo de California (México) hasta las costas de Colombia y Ecuador (Ebert, 2013). Es una especie costera tradicionalmente asociada con arrecifes coralinos, manglares, muelles y litorales rocosos (Bigelow & Schroeder, 1948). El rango de profundidad se ha relacionado con la edad, debido a las preferencias de hábitat que tienen las diferentes clases de edad (Castro, 1993a). Mientras los neonatos y juveniles usualmente se les ha relacionado únicamente con zonas intermareales y de poca profundidad (inferior a tres metros), los adultos pueden encontrarse desde dichas zonas hasta los 92 metros (Compagno, 1984).



Figura 3. Distribución geográfica del tiburón limón, *Negaprion brevirostris*, en 2020 basada en registros de observación. Fuente: Lista roja de la unión internacional para la conservación de la naturaleza (IUCN).

Los juveniles se establecen en áreas discretas y definidas en aguas someras de zonas costeras. Estas áreas son constituidas por uno o varios tipos de ecosistemas (bahías, estuarios, lagunas de manglares) son denominadas áreas de crianza (Castro, 1993a), las cuales funcionan como refugio y/o área de alimentación (Ebert, 2013). La especie presenta un comportamiento gregario, en la que, en estadios tempranos, se le ha visto formar grupos de hasta 20 individuos (Gruber *et al.*, 1988). Además de presentar un comportamiento filopátrico por ciertas áreas (Correia *et al.*, 1995), también se ha descrito su habilidad de “de volver al hogar - homing”, en la que, al ser trasladados de manera intencional hacia

otras áreas, tienen la capacidad de regresar y reconocer sus áreas de actividad comunes (Edren & Gruber, 2005).

A pesar de ser comúnmente capturada en toda su área de distribución mediante el uso de diversos artes de pesca (palangre, redes, cordel, arpón, entre otros), su pesquería, aunque pareciese ser de vital importancia para las comunidades, presenta vacíos de información. Es difícil crear línea base para entender su historia natural, debido a que la información pesquera de esta especie es limitada, o en algunos casos, inexistente. El objetivo de su captura engloba varios intereses: (1) consumo, puesto que las aletas son comercializadas para la preparación de sopa, (2) venta de artesanías, en donde se comercializan sus dientes y mandíbulas, (3) en la industria textil en la que a partir de su piel preparan los cueros y (5) en farmacéuticas, donde el aceite de hígado es aprovechado para la extracción de vitaminas (Ebert, 2013).

En las pesquerías de países como México, Belice y EE.UU., el tiburón limón es una especie objetivo (Sundström, 2015). Sin embargo, en México, existe un vacío de datos de captura debido a que no es registrado como especie, si no, en la mayoría de los casos, únicamente registrado e ingresado al sistema como “tiburón”. Los encargados de la administración pesquera suelen subdividir la categoría “tiburón” por especie cuando éstas resultan ser especies pelágicas, contrario a lo que sucede con especies asociadas a la costa. Una dificultad adicional, son los nombres comunes asignados a las especies por los pobladores de las diferentes localidades costeras. Ejemplo de ello es la situación actual en Baja California Sur, en la que mientras en el Parque Nacional Cabo Pulmo se le denomina a *Negaprion brevirostris* como “tiburón barroso”, los pobladores de la comunidad pesquera de Punta Arenas lo denominan “tiburón encerado”. Los registros de pesca del tiburón limón, al no estar asignados a una categoría independiente, dificultan la búsqueda de información y estadísticas pesqueras sobre la especie, impidiendo generar una línea base o cronológica que permita la ejecución de comparaciones y contrastes que esclarezcan aspectos claves sobre su ecología y conservación.

Negaprion brevirostris se considera “Casi Amenazada” (CA) en la lista de especies amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) (Sundström, 2015). A pesar de su aparente importancia en las pesquerías artesanales, no ha sido posible rastrear si alguno de los países (salvo EE.UU. (Kyne *et al.*, 2012) donde haya sido registrada, la especie cuenta con un plan de manejo que asegure su conservación y aprovechamiento sustentable. Existen varias amenazas para la especie: (1) pesquerías dirigidas, como es el caso de México, Belice y EE.UU., (2) sobrepesca de individuos que no han alcanzado la madurez sexual y (3) la degradación de hábitats esenciales. Sin embargo, como una medida para contrarrestar el impacto generado sobre las poblaciones por las pesquerías, se han creado estrategias de aprovechamiento no extractivo de la especie como el ecoturismo, en el que el uso del valor económico de los tiburones vivos representa una potencial alternativa económica para las comunidades locales y para los mismos tiburones (Gallagher & Hammerschlag, 2011).

ANTECEDENTES

ESTUDIOS REALIZADOS ACERCA DE *Negaprion brevirostris*

A través de la revisión bibliográfica de tesis de postgrado y artículos científicos, se registró un total de 200 trabajos realizados con *N. brevirostris* en el Océano Atlántico centro-occidental. Las áreas de estudio de los trabajos revisados fueron la costa oriental de EE.UU., Golfo de México, mar Caribe, Venezuela y el nordeste de Brasil. En resumen, se describe el número artículos por año y por tema de investigación (Fig. 4), indicando que durante el período 1868-2018 se observa un incremento progresivo en el número total acumulado de estudios sobre el tiburón limón. El 60% de los trabajos fueron ejecutados durante los últimos 20 años (2001-2017). Geográficamente, el 54% del total de estudios revisados fueron realizados en las Bahamas, el 34% en Florida (EE.UU.) y el 12% restante fue repartido en otras regiones del Atlántico occidental y el Mar Caribe.

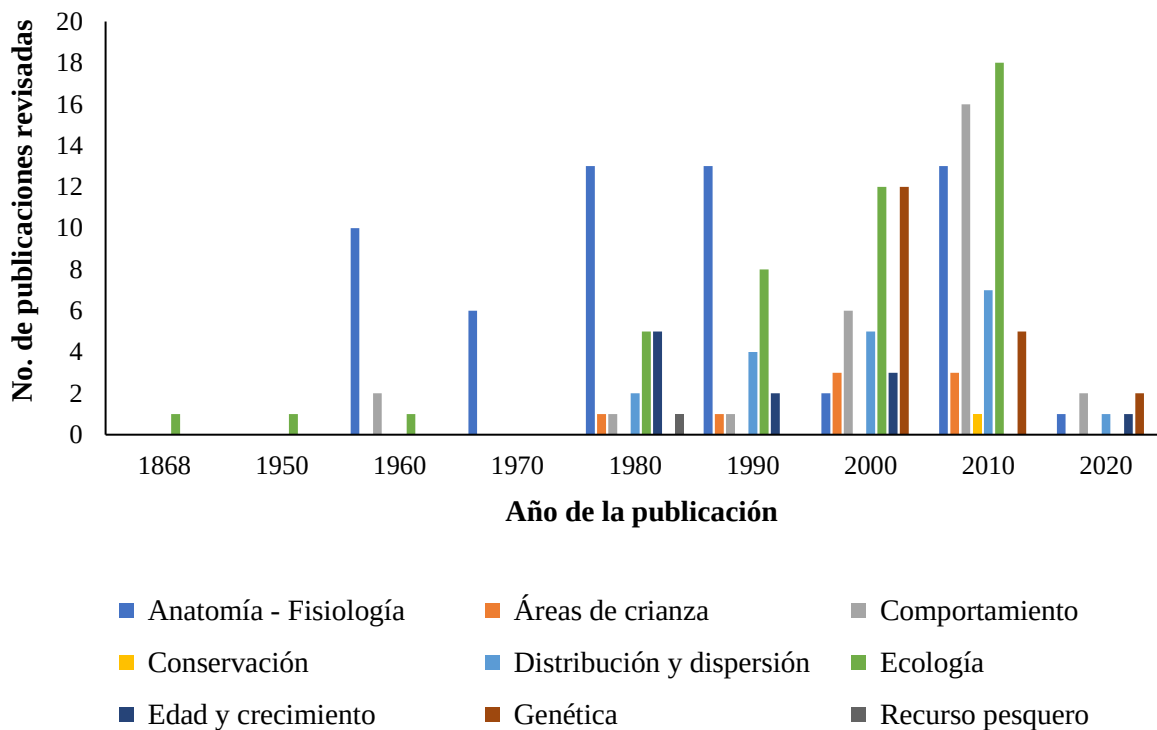


Figura 4. Número de artículos revisados hechos sobre tiburón limón (*Negaprion brevirostris*) discriminados por año y por tema de investigación sobre tiburón limón.

La investigación sobre *N. brevirostris* la inició Felipe Poey en 1868. A partir de descripciones morfológicas y algunos datos ecológicos tomados de observaciones *ad libitum*, Poey creó el “Catálogo razonado de los peces de Cuba”. Las investigaciones siguientes estuvieron dirigidas a conocer la historia natural de la especie (Springer, 1950), comportamiento (Vorenberg, 1962) y taxonomía (Clark & von Schmidt, 1965). A partir de la década de 1980, Samuel Gruber junto a sus colaboradores iniciaron un periodo importante para la comprensión de la biología de la especie. En la costa de la Florida, se han generado investigaciones entre las que resaltan aspectos como la distribución y el comportamiento (Gruber, 1982), edad y crecimiento (Gruber *et al.*, 1985; Brown & Gruber, 1988), patrones de movimiento y actividad espacial (Gruber *et al.*, 1988), dieta y hábitos alimenticios (Cortés & Gruber, 1990), ecología poblacional (Manire & Gruber, 1990), áreas de actividad y preferencia de hábitats (Morrissey & Gruber, 1993a, 1993b). Feldheim y colaboradores evaluaron aspectos genéticos y reproductivos con base en análisis de poliandria, estructura poblacional, filopatria (Feldheim *et al.*, 2002a, b). En Brasil se realizaron estudios sobre la movilidad de los individuos entre dos áreas distintas, aportando datos sobre su segregación espacial de acuerdo con su estadio de madurez sexual (Wetherbee *et al.*, 2007).

En años recientes se ha generado información sobre aspectos como la estructura de tallas dentro de la población, crecimiento, sobrevivencia, patrón de movimientos, áreas de crianza y distribución. Las investigaciones generadas se encuentran distribuidas geográficamente desde la costa oriental de EE.UU., hasta Brasil. Algunas de ellas son Freitas *et al.*, (2006) y Wetherbee *et al.*, (2007) en el Atol das Rocas, Brasil; DeAngelis *et al.*, (2008) en Islas Vírgenes, EE.UU., Reyier *et al.*, (2008) en Cabo Cañaveral, Florida, Garla *et al.*, (2009) en el Archipiélago Fernando de Noronha, Brasil, Henderson *et al.*, (2010) en las Islas Turks & Caicos, Murchie *et al.*, (2010) en Eleuthera, Bahamas, y por Tavares *et al.*, (2016) en el Archipiélago Los Roques, Venezuela.

Además, los trabajos sobre ecología y distribución espacial enfocados en el tiburón limón también en sus áreas esenciales han sido una prioridad durante la última década. Entre los trabajos más importantes Guttridge *et al.*, (2009) examinaron las preferencias sociales de individuos juveniles en Bimini, Guttridge *et al.*, (2012) determinaron la influencia de la depredación intraespecífica en el uso del hábitat en Bimini; Reyier *et al.*, (2014) evaluaron el patrón migratorio y utilización de hábitat en el Atlántico de los EE.UU., Legare *et al.*, (2015) estudiaron la dinámica espacio-temporal y utilización de hábitat en las Islas Vírgenes, y Stump *et al.*, (2017), realizaron un experimento para medir el efecto del riesgo de depredación en las islas Bimini.

En resumen, luego de tres décadas de investigación acerca de *N. brevirostris* en Bimini (Bahamas), se han establecido una serie de comportamientos característicos de la especie, tales como la segregación por edades, filopatría y poligamia. Sin embargo, pese al número de investigaciones, al menos dos tópicos han sido marginales. El primero, refiere a su biología reproductiva, en la que, si bien se han ejecutado extensivos estudios de poligamia en Florida, Bimini y las islas Marquesas (USA) (Feldheim *et al.*, 2001), se desconocen aún, tópicos importantes como temporadas de apareamiento por localidad, número de hembras reproductivamente activas dentro de la población, número de crías por hembra y promedio del tamaño del reclutamiento por temporada reproductiva de la población.

El segundo aspecto que se ha visto marginado es el de la distribución y dispersión de la especie. Gruber *et al.*, (1988), en su descripción de las áreas de distribución de tiburón limón, hace apología de las observaciones realizadas por Meek (1916). A partir de estudios de comportamiento sobre hembras grávidas de tiburones vivíparos, Meek (1916) sugiere que existe una recurrencia hacia áreas particulares para la liberación de las crías. Sin embargo, a pesar de que los registros sugieren una distribución que comprende los océanos Atlántico y Pacífico, existe un sesgo de investigación hacia las poblaciones del Atlántico Occidental, dejando a las poblaciones del Pacífico con algunos registros dispersos e imprecisos.

Schultz *et al.*, (2008), en el único estudio de dinámica poblacional a nivel global, describen la posible dispersión original de la especie con respecto a un ancestro común. Actualmente no se encuentran disponibles los registros recientes de poblaciones en el océano Pacífico (los nuevos registros sobre la presencia de individuos parecen resumirse en datos anecdóticos), por lo que es común encontrar la distribución original descrita por Bigelow & Schroeder (1948) como un dato que se repite en la mayoría de los documentos publicados. Con base en las observaciones a lo largo de la costa de Florida (Clark & Schmidt 1965), las islas Bimini (Gruber *et al.*, 1988) y Brasil (Wetherbee *et al.*, 2007), puede suponerse que, en el Atlántico Occidental, las áreas de distribución de tiburón limón se encuentran mejor conocidas.

Respecto a los antecedentes en el área de estudio del presente estudio, desde el año 2013 Pelagios Kakunja A.C., ha ejecutado dentro su macro-proyecto sobre las zonas de crianza en el Pacífico Oriental, una serie de censos terrestres y marinos de elasmobranchios en el Parque Nacional Cabo Pulmo. Su objetivo ha sido la evaluación y el análisis de comportamientos, ecología y patrón de movimientos de tres especies de tiburón: (1) tiburón toro (*Carcharhinus leucas*), puntas negras (*Carcharhinus limbatus*) y tiburón limón (*Negaprion brevirostris*).

Debido a su atractivo entre los turistas, *C. leucas* ha sido la especie sobre la que se ha desarrollado mayor número de investigaciones. En ese mismo sentido, debido a sus grandes agregaciones (aprox. 200 individuos), *C. limbatus* ha recibido atención particular por parte de los investigadores y turistas. En contraste, sobre *N. brevirostris* no se ha centrado ninguna investigación en particular. Sin embargo, al pertenecer al proyecto marco de Pelagios Kakunjá, por medio de observaciones terrestres se han recopilado algunos datos que aportan sobre aspectos ecológicos y poblacionales. Hasta el momento no se habían establecido métodos que permitieran una descripción del comportamiento de los individuos, por lo que la presente investigación plantea describir patrones de comportamiento del tiburón limón, tiempo de residencia y la manera en la que la especie se distribuye dentro del PNCP.

HIPÓTESIS

Considerando la preferencia del tiburón limón por áreas costeras someras y de manglar en otras partes y latitudes del mundo, los movimientos y comportamiento de esta especie presenten patrones distintos en áreas desprovistas de manglar como el PNCP.

OBJETIVO GENERAL

Describir los movimientos, residencia y patrones de comportamiento del tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Describir los movimientos de los individuos dentro del PNCP.
- b) Comparar el índice de residencia de cada individuo dentro del PNCP.
- c) Identificar patrones de actividad diario del tiburón limón en el PNCP.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El Parque Nacional Cabo Pulmo pertenece al municipio de Los Cabos, Estado de Baja California Sur (México), ubicado entre las coordenadas 23°22'30'' N, – 109°28'03'' W y 23°30'00''N, – 109°23'00''W) en la costa suroccidental del Golfo de California (fig. 5). Su área corresponde a 7.111 ha, en las que el 99% corresponden al área marina protegida y el 1% restante a la zona federal marítima terrestre correspondiente (fig. 6) (CONAPESCA-INP, 2004).



Figura 5. Ubicación geográfica del Parque Nacional Cabo Pulmo. Imagen tomada de la A.C. Amigos por la conservación de Cabo Pulmo.

La geografía del área corresponde a un relieve de planicie costera, moldeada a partir de corrientes fluviales y erosión eólica. Su forma tiende a ser homogénea, comúnmente pueden encontrarse valles aluviales compuestos por clastos graníticos y fragmentos volcánicos (CONAPESCA-INP, 2004). El área se encuentra dividida en dos zonas, la

primera compuesta por dunas entre 5 y 15 m de alto, la segunda por un lomerío de 100 m de largo que separa dos bahías. El fondo marino presenta una pendiente suave y series de barras de basalto en las que se asienta la composición coralina. El sustrato que predomina en el área es arenoso, compuesto principalmente por sílice proveniente de la desintegración de los acantilados rocosos y de las partículas de carbonato de calcio. El sustrato rocoso se presenta de dos maneras: (1) pequeñas "islas" entre los campos de arena y (2) distribuido en forma de “corrales” de piedras que sobresalen de la superficie, algunos situados desde la costa entrando en el mar formando fosas de marea (CONANP, 2006).



Figura 6. Área del Parque Nacional Cabo Pulmo. El recuadro verde indica los límites del Parque y las áreas utilizadas por los prestadores de servicios para actividades acuáticas. Los colores corresponden a la asignación de actividades por zona. El color amarillo indica la zona de “preservación 1”, el naranja la zona de “preservación 2”, el espacio verde claro corresponde al área asignada para el “aprovechamiento Sustentable de los Recursos Naturales 1”, el azul para la zona de “aprovechamiento Sustentable de los Recursos Naturales 2”, el verde oscuro como zona de uso público y el rojo para representar los parches de coral. Mapa tomado del Compendio del programa de manejo del parque nacional Cabo Pulmo (2017).

El PNCP contiene el único arrecife de coral dentro del golfo de California. Debido a su dinámica oceanográfica, su biodiversidad corresponde a una de las más altas del Pacífico mexicano, puesto que incluye casi el 26% de las especies reportadas para el GC (Villarreal-Cavazos *et al.*, 2000). El PNCP se encuentra influenciado por diversas corrientes, tales como la Corriente Costera de Costa Rica (CCCR), la cual presenta una temperatura entre los 18 °C y los 35°C y una salinidad de 34.6-34.8 UPS; la Corriente del Golfo de California (CGC) caracterizada por presentar una temperatura entre los 12 °C y los 35 °C de temperatura y una salinidad mayor a 34.9 UPS; y la Corriente de California cuya temperatura promedio es de 24.9°C y una salinidad de 34.6 UPS (Lavín *et al.*, 2003).

Las corrientes asociadas al área siguen el patrón descrito para la boca del Golfo de California, en la que durante el verano y otoño existe una dominancia de corrientes hacia el norte, mientras que en invierno y primavera es hacia el sur (Álvarez-Borrego, 1983). Su fisiografía está compuesta por tres sustratos, arenoso, rocoso y coralino (fig. 7). Estos sustratos se encuentran distribuidos por parches a lo largo del Parque (fig. 8), en la columna de agua sobre los cuales se instalaron los receptores acústicos utilizados para el ejercicio de telemetría durante el presente estudio (Tabla I).

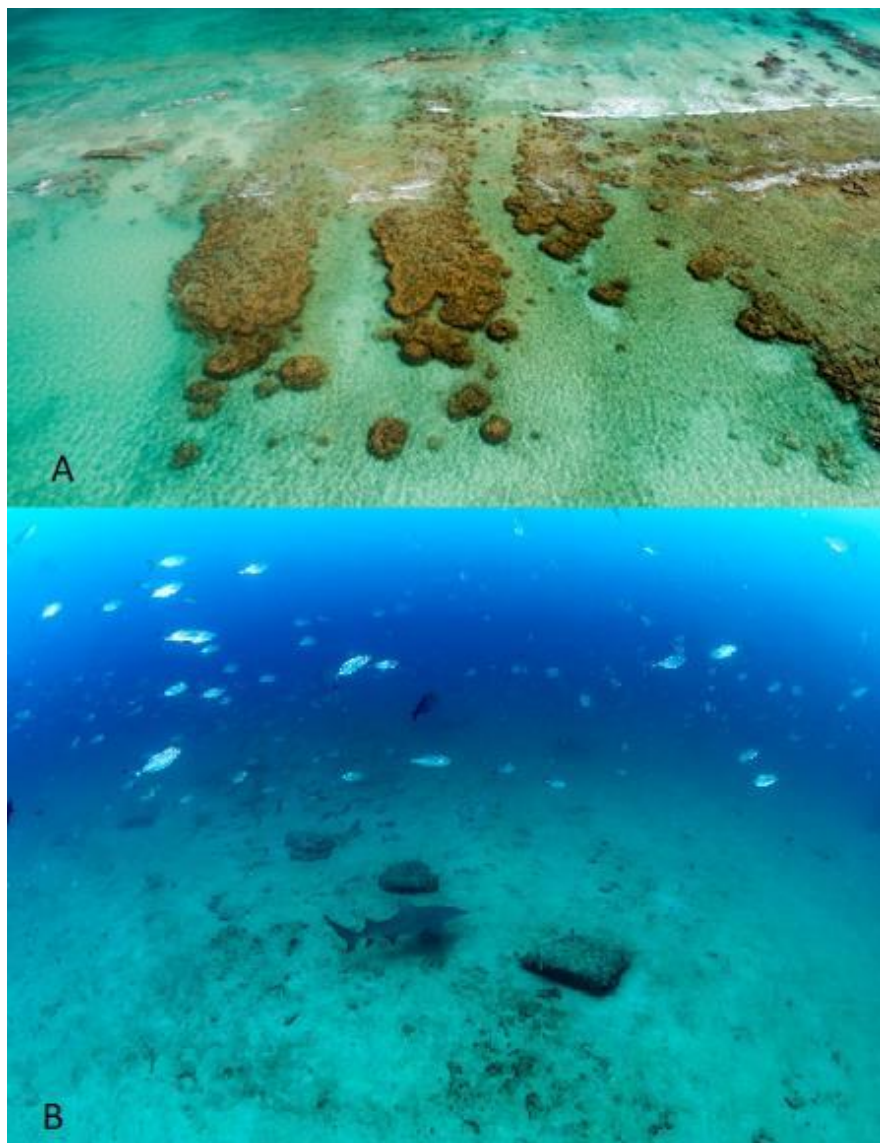


Figura 7. Sustratos del Parque Nacional Cabo Pulmo. (A) Composición de una de las zonas areno-rocosas cercana a la costa. (B) Composición de una de las zonas arrecifal – arenosa alejada de la costa. Fotos: Leonardo González

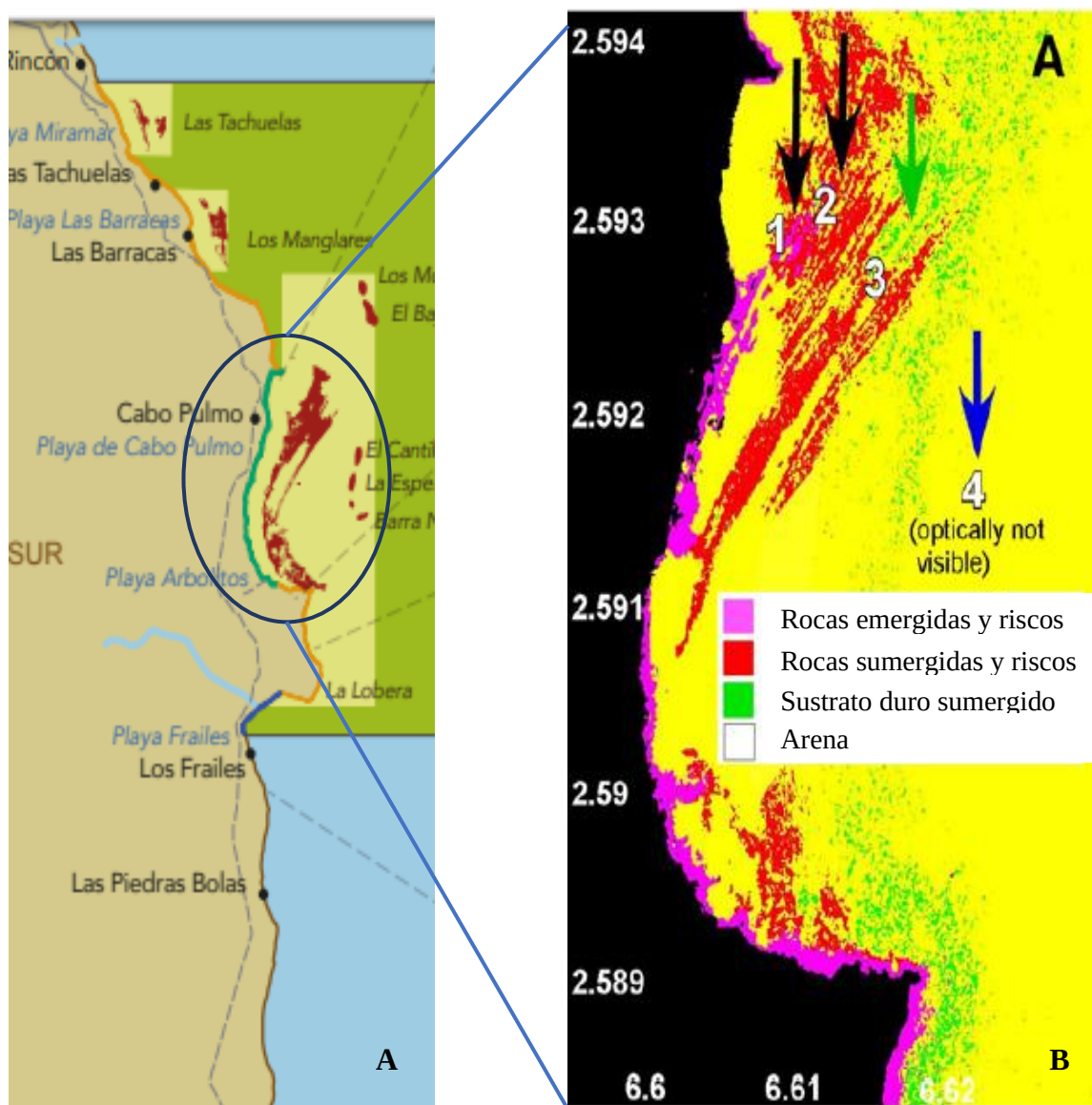


Figura 8. Sustratos del Parque Nacional Cabo Pulmo. (A) Zona delimitada del Parque; imagen: Compendio del programa de manejo del parque nacional Cabo Pulmo (2017). (B) Bahía principal en la que se diferencia los tipos de sustrato por colores; Color rosa: rocas y riscos emergidos; Rojo: zonas de rocas y riscos sumergidos; Verde: “suelo duro” sumergido; Amarillo: sustrato arenoso (Riegl *et al.*, 2007).

Tabla I. Georreferenciación de las zonas delimitadas en el Parque Nacional Cabo Pulmo. Las coordenadas corresponden al sitio donde fue instalado el receptor, definiendo su profundidad respecto a la profundidad máxima de la zona e indicando el sustrato correspondiente

Receptor	Siglas	Latitud	Longitud	Profundidad del sitio	Profundidad del receptor	Sustrato
Punta Pescadero	PPE	23.79419	-109.69477			Rocoso - Arenoso
Cabo Pulmo Norte	CPN	23.50525	-109.45441	10	8	Arenoso
Miramar	MR	23.49553	-109.43951	10	8	Arenoso
Barracas Norte	BN	23.4954	-109.4393	10	8	Arenoso
Barracas New	BAN	23.49213	-109.44663	16	15	Arenoso
Barracas	BAV	23.4917	-109.44795	10	8	Arenoso
Boya CICESE	BCI	23.48558	-109.4046	15	12	Arenoso
Bochudo Profundo	BOP	23.4813	-109.4063	17	15	Arenoso
Bochudo	BCH	23.46984	-109.4037	15	13	Arenoso
Morros Bochudo	MBO	23.46761	-109.40508	25	20	Arenoso
Morros Norte	MON	23.46281	-109.4078	16	14	Arenoso
Bajo Meros Norte	BMN	23.45927	-109.40887	17	12	Rocoso - Arenoso
Bajo Meros Sur	BMS	23.4558	-109.40538	18	12	Rocoso - Arenoso
Vencedor	VEN	23.45492	-109.41576	14	11	Arenoso
Cantil Esperanza	CES	23.43851	-109.40784	15	13	Rocoso - Arenoso
Cantil	CAN	23.43661	-109.41361	12	5	Rocoso - Arenoso
Bajo 100 Norte	BCN	23.43447	-109.40636	21	17	Rocoso - Arenoso
Tinajitas	TIN	23.4289	-109.4204	7	5	Rocoso - Arenoso
Rayon	RAY	23.42886	-109.39506	50	45	Arenoso
Bajo 100 Sur	BCS	23.42826	-109.40617	26	20	Rocoso - Arenoso
Punto 15	PTQ	23.427138	-109.407139	25	20	Arenoso
Esperanza	ESP	23.42562	-109.40887	21	13	Rocoso - Arenoso
Esperanza Sur	ES	23.42206	-109.40986	20	15	Rocoso - Arenoso
Almirante	AL	23.41442	-109.42632	7	5	Rocoso - Arenoso
Islote	ISL	23.40751	-109.41322	18	14	Rocoso - Arenoso
Bledito	BLE	23.35913	-109.42099	26	20	Rocoso - Arenoso
Bajo del Salado	BSA	23.29727	-109.41086	30	25	Arenoso

Trabajo de Campo

La presente investigación hace parte de un macro-proyecto gestionado y ejecutado por la A.C. Pelagios Kakunjá, dedicado a describir y establecer nuevas zonas de crianza de diferentes especies de tiburones y rayas en el Pacífico mexicano. Este trabajo, ejecutado conjunto al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR - IPN), se enfocó en estudiar aspectos ecológicos y comportamentales del tiburón limón (*Negaprion brevirostris*) en el Parque Nacional Cabo Pulmo.

El trabajo en campo fue realizado entre los años 2017 y 2020 el cual constó de siete salidas de campo en las que se ejecutaron diferentes actividades: pesca artesanal, avistamiento desde tierra y buceo autónomo (Tabla II). Las embarcaciones utilizadas en las actividades de pesca fueron lanchas de fibra de vidrio (7-8 m de eslora) equipadas con un motor fuera de borda (300 hp). Los artes de pesca empleados fueron palangres de fondo y una red agallera. El palangre de fondo constó de 216 metros de longitud, con seis estrobos de cuatro metros de alto separadas a una distancia de 18 metros para la disposición de 6 anzuelos de tipo “garra de águila” de tamaño No. 13) (Fig. 9).

La red agallera fue construida a partir de nylon multi-filamentado con las siguientes características: 80 metros de longitud, seis metros de altura y una abertura de malla de 18 cm (Fig. 10). Las redes fueron desplegadas durante un período continuo de tiempo de dos a tres horas, entre las 14:00 y 17:00 h, donde fue generalmente colocada en posición perpendicular con relación a la línea de costa. Para evitar el exceso de estrés y muerte de los individuos capturados, las redes fueron revisadas cada 15 minutos o al detectar alguna sección de la línea de flotadores sumergida (lo señalaría una captura). Ningún individuo capturado murió durante el desarrollo del proyecto.

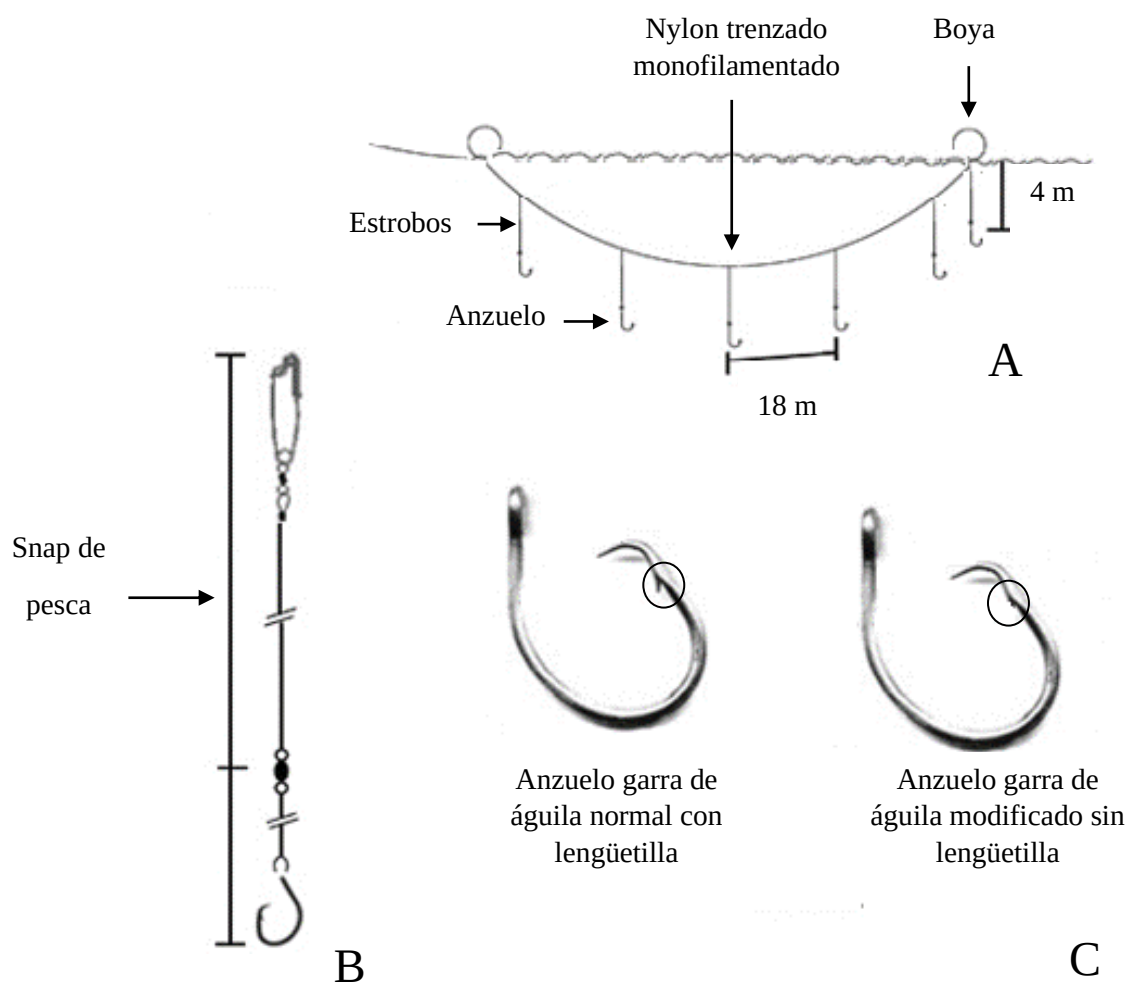


Figura 9. Palangre utilizado como arte de pesca durante los muestreos. (A) Diagrama del palangre indicando sus características. (B) Snap de pesca utilizado para sostener los anzuelos desde el estrobo. (C) Anzuelo modificado en la lengüetilla, utilizado para la captura de individuos para evitar lastimar el animal.

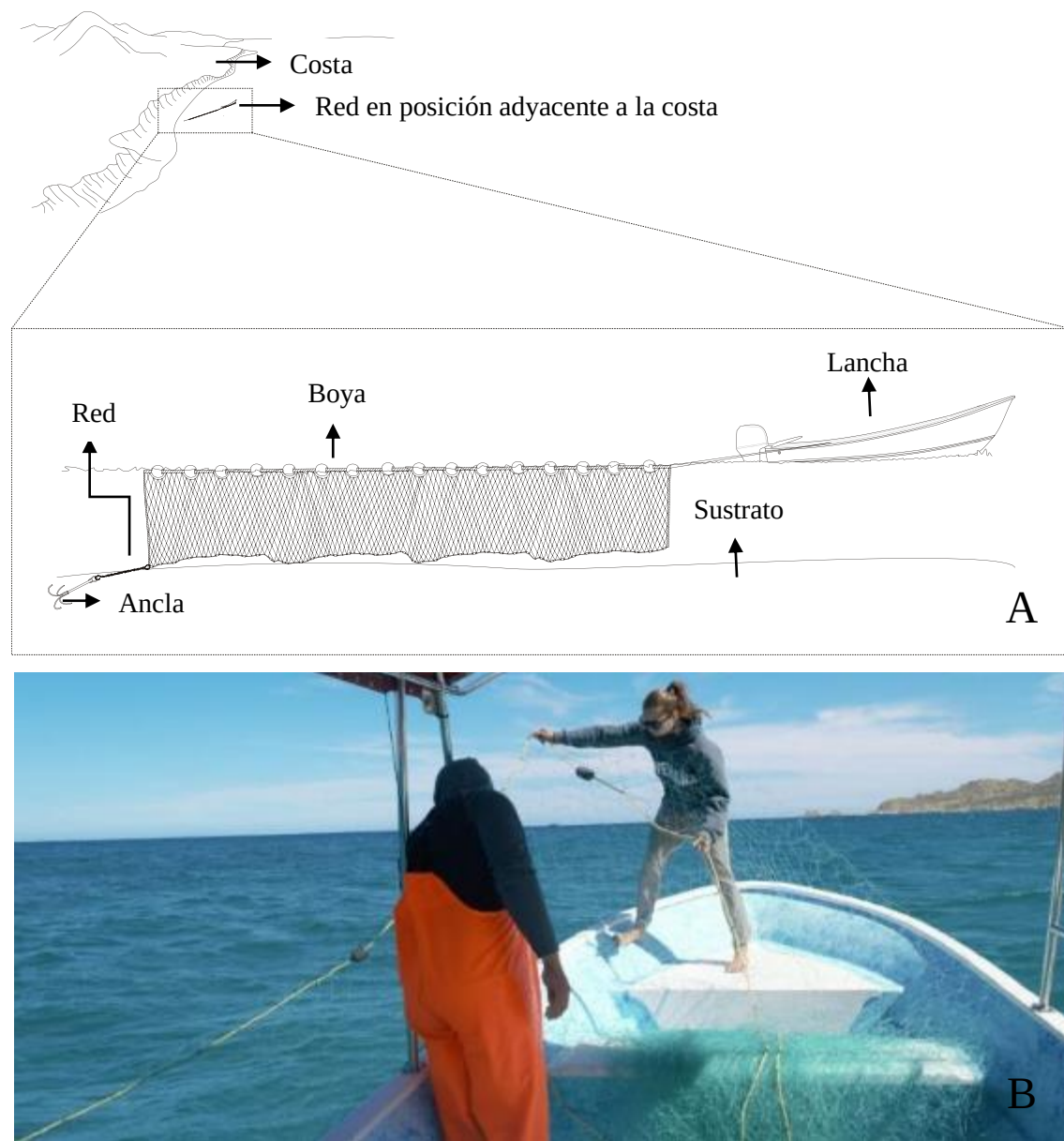


Figura 10. Red agallera utilizada como arte de pesca durante los muestreos. (A) Diagrama de la red agallera. (B) Red agallera utilizada en campo.

El esfuerzo de pesca total fue de 10 lances del palangre, 60 anzuelos desplegados y 5 lances de red agallera. Las zonas de pesca solo abarcaron las áreas de aguas someras (< 20 m). Para cada jornada de campo se registró la fecha, hora, esfuerzo de pesquero, posición geográfica (mediante GPS) de los lances y de la captura y la profundidad. A los ejemplares capturados se les registró las longitudes: total (LT), furcal (LF), precaudal (LP), el máximo grosor (MG) (tomando la circunferencia desde el borde interno de la primera aleta dorsal), el sexo, y en el caso de los machos, la longitud de los órganos copuladores (gonopterigios (LG) (Fig. 11).

Los ejemplares fueron identificados mediante la aplicación de una marca externa convencional tipo espagueti. El estado de madurez de los individuos fue determinado con base en las características generales de desarrollo de los órganos reproductivos para ambos sexos, establecidas por Castro (1996) y por su longitud total siguiendo los lineamientos de Brown & Gruber (1988), donde los neonatos corresponden a individuos que presenten una longitud total entre 40 –100 cm, los juveniles entre 100 – 225 cm, y los adultos, mayor a 225 cm. El tiempo de manipulación por individuo fue entre 15 y 30 minutos debido a la dificultad generada por el oleaje de la zona y su liberación fue dada en la misma zona en la que fueron capturados.



Figura 11. Medidas morfométricas tomadas en cada individuo. (A) Longitud total “LT”. (B) Máximo grosor “MG”. (C) Longitud del gonopterigio “LG”.

Las marcas utilizadas para identificar a los tiburones fueron de dos tipos: marcas convencionales tipo espagueti, marcas (implantables) internas VEMCO V16. Para el marcaje y el registro del movimiento de los individuos dentro del parque se utilizó telemetría acústica (ver capítulo 2). Debido a que a través del tiempo se han realizado varios ejercicios con este mismo método en diferentes especies dentro del PNCP, para la ejecución de este proyecto se tomó la red de receptores previamente instalada por la A.C. Pelagios Kakunjá en 2017, 2019 (Fig. 12) y 2020 (Fig. 13). Teniendo en cuenta que algunos receptores fueron removidos, integrados o reubicados a través de los años, en la sección de resultados se especifica la red que existía en el momento de las detecciones de cada individuo. A los individuos capturados les fue implantada una marca interna haciendo una incisión de aproximadamente 2 cm en la zona ventral entre las aletas pectorales (ver capítulo 2).

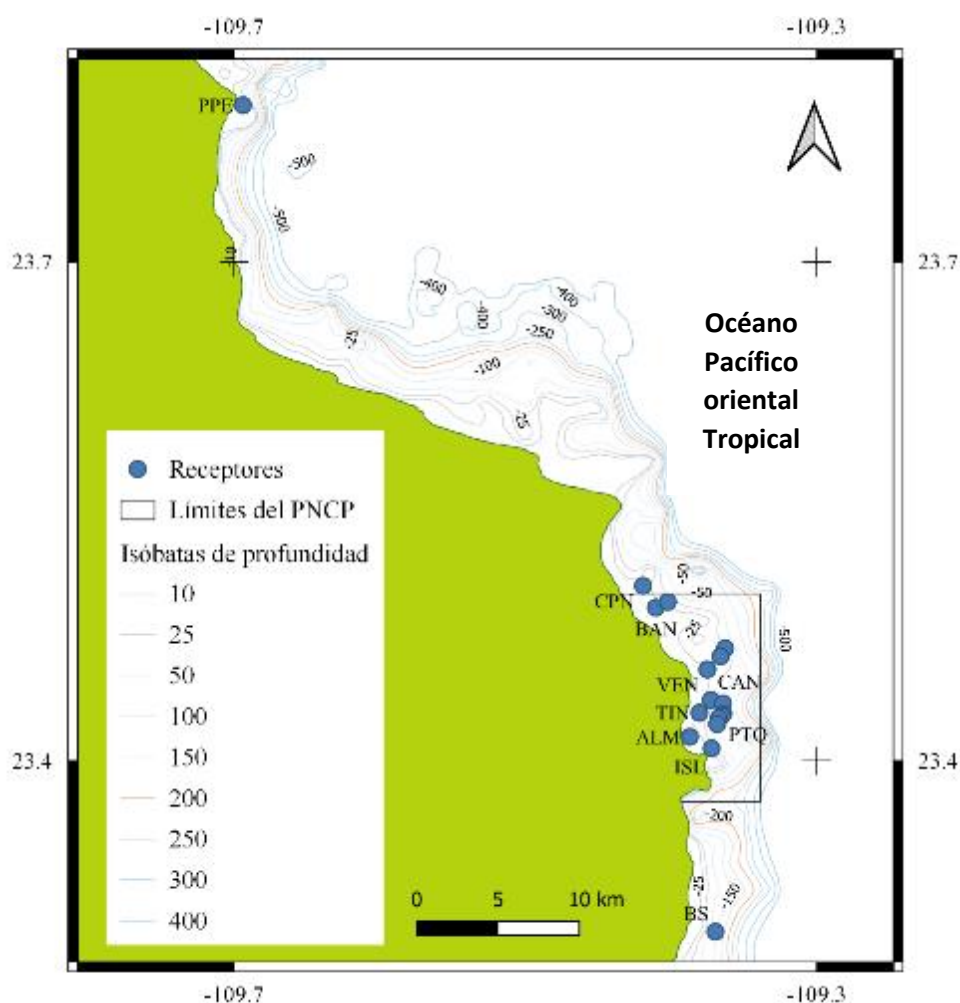


Figura 12. Mapa de la red de receptores asociados al Parque Nacional Cabo Pulmo en 2020. Los puntos azules indican la posición de cada receptor, identificado con la abreviación su nombre (ver Tabla I).

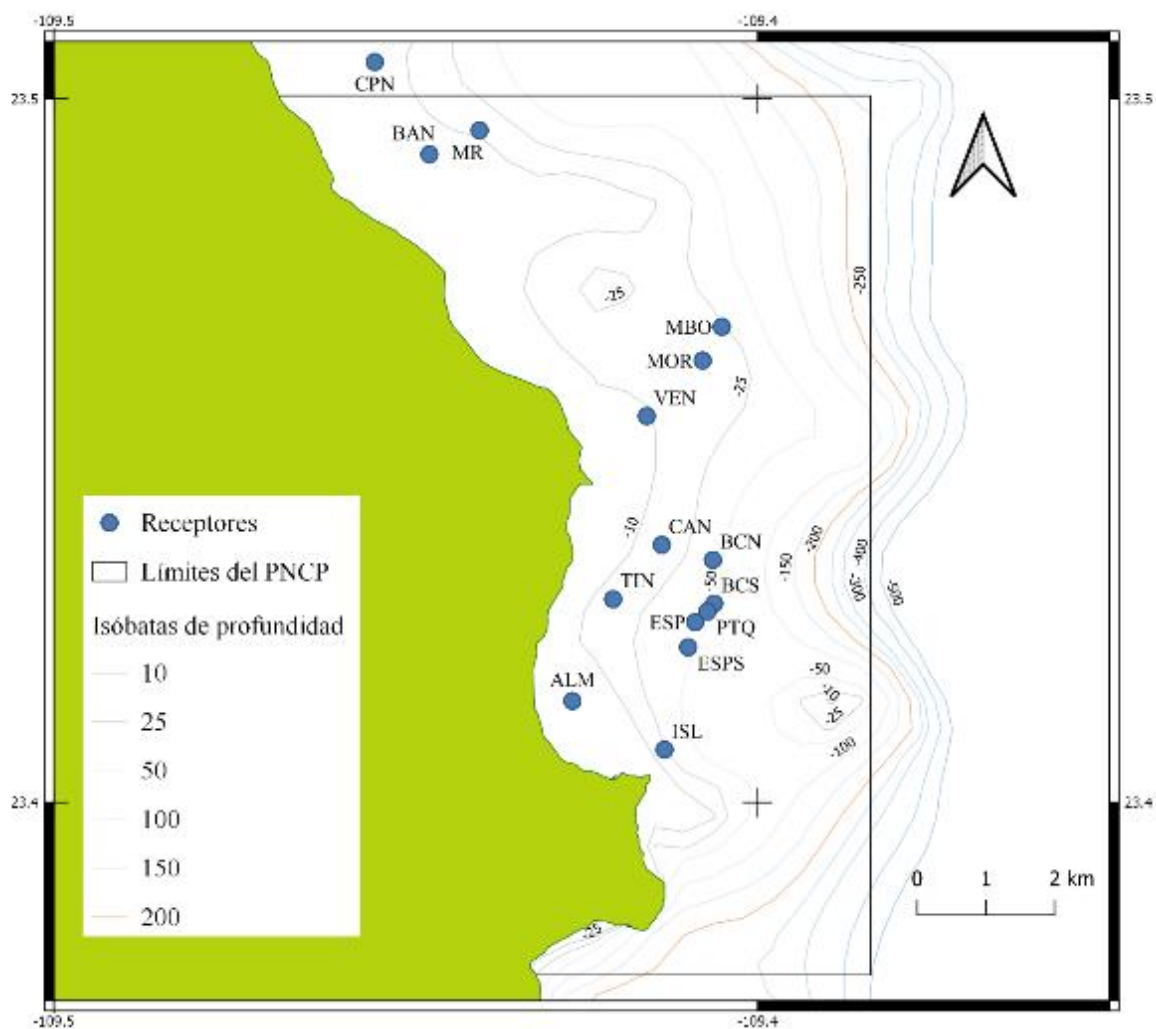


Figura 13. Acercamiento del mapa actual de la red de receptores asociados al Parque Nacional Cabo Pulmo en 2020. Los puntos azules indican la posición de cada receptor, identificado con la abreviación su nombre (ver Tabla I).

RESULTADOS

Durante las jornadas de pesca realizadas en 2019 se capturaron tres individuos machos en zonas cercanas a costa (<100m). Adicional a estos resultados, jornadas de campo previas a la presente investigación (mayo de 2017), adicionaron dos individuos más, un macho y una hembra (Tabla II). La longitud total de los individuos indicó que los tiburones capturados en 2017 eran adultos, la hembra midió 215 cm y el macho 210 cm. Por su parte, los individuos capturados en 2019 mostraron ser un adulto y dos juveniles, cuyas tallas fueron 248, 180 y 187 cm respectivamente (Tabla III).

Tabla II. Datos registrados en las capturas de los individuos de tiburón limón (*Negaprion brevirostris*) en el Parque Nacional Cabo Pulmo. ND: No hay datos; N.S: Número de serie acústico; ID: Número de identificación acústico. JK: James Ketchum, KA: Kathy Ayres, AP: Ana Posada, MG: Miquel Grau

Fecha	Hora local	Latitud	Longitud	Sexo	Nº espagueti	Tipo Marca acústica	N.S acústico	ID acústico	CATS	Marcado por
27/05/2017	ND	23.48626	-109.45594	Hembra	ND	V16	1242447	53636	Si	J. K.
28/05/2017	ND	23.42960	-109.41952	Macho	ND	V16	1242459	53648	No	JK
8/04/2019	20:03	23.48344	-109.45413	Macho	673	V16	1311360	13787	No	KA
13/03/2019	9:58	23.41521	-109.43137	Macho	630	V16	1300383	9016	No	AP
12/04/2019	22:27	23.48489	-109.45433	Macho	671	V16	1300380	9013	No	MG

Tabla III. Ejemplares de tiburón limón (*Negaprion brevirostris*) capturados en el Parque Nacional Cabo Pulmo. ND: No hay datos. LT: Longitud máxima; LF: Longitud furcal; LP: Longitud precaudal; MG: máximo grosor; LG: longitud del gonopterigio

Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Sexo	Nombre (ID)	LT (cm)	LF (cm)	LP (cm)	MG (cm)	LG (cm)
27/05/2017	ND	23.48626	-109.4559	Hembra	Lucy	215	ND	ND	ND	ND
28/05/2017	ND	23.42960	-109.4195	Macho	Jager	210	ND	ND	ND	ND
8/04/2019	20:03	23.48344	-109.4541	Macho	Philip	187	158	140	72	14,2
12/04/2019	22:27	23.48489	-109.4543	Macho	Tom	248	240	187	124	28
13/04/2019	9:58	23.41521	-109.4313	Macho	Nemo	180	143	159	67	16

DISCUSIÓN

Entre 2011 y 2020 el equipo de la A.C. Pelagios Kakunjá ha desarrollado proyectos de investigación sobre la ecología y etología de elasmobranquios en el Parque Nacional Cabo como parte de su macroproyecto sobre la descripción y evaluación de áreas de crianza de tiburones en el Pacífico mexicano. La presente investigación, llevada a cabo desde 2017 hasta 2018 aporta información sobre los patrones de movimiento, comportamiento y residencia de dos machos adultos (*Jager* y *Tom*), dos machos juveniles (*Nemo* y *Philip*) y una hembra adulta (*Lucy*) de tiburón limón (*Negaprion brevirostris*). A pesar de que no se identificó ninguna área de crianza, la presente investigación contribuye al macroproyecto de Pelagios Kakunjá con nueva información y como base para futuros estudios sobre la especie.

El antecedente más importante dentro del área de estudio es el de Asúnslo (2016), donde a partir de censos terrestres y subacuáticos describe la abundancia, presencia y algunas observaciones *ad libitum* del comportamiento de las diferentes especies de tiburones dentro del área del PNCP. La autora sugiere que las especies más abundantes son *Carcharhinus leucas*, *Carcharhinus limbatus* y *Negaprion brevirostris*, las cuales se al parecer pretendieron tener espacios determinados para cada una de ellas. En contraste a este estudio, los resultados indican que al menos *N brevirostris* usa toda el área del PNCP en todos los periodos del día. Sin embargo como no se tuvieron datos sobre la presencia o ausencia de otras especies de tiburón, no podemos atribuir que la presencia y los patrones de movimiento del tiburón limón se deba a la evasión o a la interacción con otras especies. Debido a que el presente trabajo fue ejecutado en paralelo a estudios sobre los patrones de movimiento de *C. leucas* y *C. limbatus* dentro del PNCP, en esta ocasión no alcanzamos a comparar los resultados de los tres estudios.

Aunque los datos generados a partir de censos terrestres que se hicieron como parte de un programa de voluntariado en Pelagios Kakunjá, no fueron incluidas en los análisis de la presente investigación (debido al margen de error que se asumió al tener diferentes observadores en distintos instantes de tiempo), en general las observaciones permitieron

describir que los individuos (aparentemente juveniles) de tiburón limón utilizan con mayor frecuencia las pozas de marea o piscinas rocosas al margen de la costa durante el día. Esto es interesante debido a que en otras partes del mundo como en Bimini (Franks, 2007), Brasil (Wetherbee *et al.*, 2007), Florida (Clark & Schmidt 1965), entre otras, la especie ha sido asociada a zonas de manglar y pastos marinos, ecosistemas que no existen en el PNCP. Durante los censos se detectaron grupos de hasta siete individuos de varias clases etarias, pero no mezcla de individuos de clases diferentes, probablemente como medida de evasión de la depredación que algunos adultos ejercen sobre los más jóvenes.

A partir de estas observaciones se plantearon algunas hipótesis en torno al papel del PNCP como área potencial de crianza y reclutamiento para la especie. Aunque la intención inicial era probar esa hipótesis, por términos de tiempo (determinado por el programa de maestría) se tuvo que modificar. Los datos generados a partir de la telemetría acústica y de un dispositivo multi sensorial con cámara permitió aportar información sobre la ecología y etología del tiburón limón en el PNCP y a su vez en formando una base para futuras investigaciones sobre la especie el Océano Pacífico.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez-Borrego S. 1983. Gulf of California. *Ecosystems of the World*, 26, 427-449 pp.
- Asunsolo A. 2016. Distribución, abundancia y riqueza de especies de tiburones del arrecife de Cabo Pulmo, B.C.S. México. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Baum J.K., Myers R.A., Kehler D.G., Worm B., Harley S.J. & Doherty P.A. 2003. Collapse and conservation of shark populations in the northwest Atlantic. *Science*. 299:389–392 pp.
- Begon M., Townsend C.R. & Harper J.L. 2006. *Ecology: from individuals to ecosystems*. 4th Edition. Blackwell Publishing, Oxford, UK. 738 pp.
- Bigelow H.B. & Schroeder W.C. 1948. Fishes of the Western North Atlantic. Part 1. Sharks. Fishes of the Western North Atlantic. Part 1. Tee-Van T., Breder C.M., Hildebrand S.F., Parr A.E. & Schroeder W.C. (eds). 59–546 pp.
- Bonfil R. 1994. Overview of world elasmobranch fisheries (No. 341). Food & Agriculture Org.
- Brown C.A. & Gruber S.H. 1988. Age assessment of the lemon shark, *Negaprion brevirostris*, using tetracycline validated vertebral centra. *Copeia* 1988(3):747–753.
- Castro J.I. 1993a. The shark nursery of Bull Bay, South Carolina, with a review of the shark nurseries of the southeastern coast of the United States. *Environmental Biology of Fishes*. 38:37–48 pp.
- Castro J.I. 1993b. A field guide for the sharks commonly caught in commercial fisheries of the Southeastern United States. NOAA Technical Memorandum NMFS-SEFSC-338. 47 pp.
- Castro J.I. 1996. The biology of the blacktip shark, *Carcharhinus limbatus*, off the southeastern United States. *Bulletin of Marine Science* 59(3):508–522 pp.
- Clark E. & von Schmidt. 1965. Sharks of the Central Gulf Coast of Florida. *Bulletin of Marine Science*, 15:13–83 pp.
- Compagno L.J.V. 1984. Sharks of the world. An annotated and illustrated catalogue of shark species known to date. FAO Fishery Synopsis No. 125. 655 pp.
- Compagno L.J.V. 1990. Alternative life history styles of cartilaginous fishes in time and space. *Environmental Biology of Fishes* 28:33–75 pp.
- Compagno L.J.V. 2002. Sharks. The living marine resources of the Western Central Atlantic: Species identification guide for fishery purposes. Carpenter K.E. (ed.). FAO Special Publication No. 5. 358–505 pp.

- Compagno L.J.V., Dando M. & Fowler S. 2005. *Sharks of the world*. Princeton University Press, New York. 480 pp.
- CONAPESCA-INP. 2004. Plan de acción nacional para el manejo y conservación de tiburones, rayas y especies afines en México. Comisión nacional de Acuacultura y Pesca e Instituto Nacional de la Pesca Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Mazatlán. 80 pp.
- Correia J., Marignac J.R.C. & Gruber S.H. 1995. Young lemon shark behaviour in Bimini lagoon. *Bahamas Journal of Science* 3(1):2–8 pp.
- Cortés E. & Gruber S.H. 1990. Diet, feeding habits and estimates of daily ration of young lemon sharks, *Negaprion brevirostris* (Poey). *Copeia* 1990(1):204–218 pp.
- DeAngelis B.M., McCandless C.T., Kohler N.E., Recksiek C.W. & Skomal G.B. 2008. First characterization of shark nursery habitat in the United States Virgin Islands: evidence of habitat partitioning by two shark species. *Marine Ecology Progress Series* 358:257–271 pp.
- Dulvy N.K., Baum J.K., Clarke S., Compagno L.J., Cortés E., Domingo A. & Martínez J. 2008. You can swim but you can't hide: the global status and conservation of oceanic pelagic sharks and rays. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 18(5), 459–482 pp.
- Ebert D.A. 2013. Sharks, batoids and chimaeras of the North Atlantic. *FAO Species Catalogue for Fisheries Purposes, Fishery Synopsis No. 7*. 523 pp.
- Edren S.M.C. & Gruber S.H. 2005. Homing ability of young lemon sharks, *Negaprion brevirostris*. *Environmental Biology of Fishes* 72:267–281 pp.
- FAO. 2005a. Management techniques for elasmobranch fisheries. *FAO, Fisheries Technical Paper No. 474*. 251 pp.
- Feldheim K.A. & Edren S.M.C. 2002. Impacts of dredging on marine-communities with special reference to resident lemon sharks (*Negaprion brevirostris*), at Bimini, Bahamas. *Bahamas Journal of Science* 9:28–35 pp.
- Feldheim K.A., Gruber S.H. & Ashley M.V. 2001. Multiple paternity of a lemon shark litter (Chondrichthyes: Carcharhinidae). *Copeia* 2001(3):781–786 pp.
- Feldheim K.A., Gruber S.H. & Ashley M.V. 2002a. The breeding biology of lemon sharks at a tropical nursery lagoon. *Proceeding of the Royal Society of London* 269:1655–1661 pp.

- Feldheim K.A., Gruber S.H., Marignac J.R.C. & Ashley M.V. 2002b. Genetic tagging to determine passive integrated transponder tag loss in lemon sharks. *Journal of Fish Biology* 61:1309–1313 pp.
- Freitas R.H.A., Rosa R.S., Gruber S.H. & Wetherbee B.M. 2006. Early growth and juvenile population structure of lemon sharks, *Negaprion brevirostris*, in the Atol das Rocas Biological Reserve, off north-east Brazil. *Journal of Fish Biology* 68:1319–1332 pp.
- Gallagher A.J. & Hammerschlag N. 2011. Global shark currency: the distribution, frequency, and economic value of shark ecotourism. *Current Issues in Tourism* 14:797–812 pp.
- Garla R.C., Garcia J. Jr., Veras L.B. & Lopes N.P. 2009. Fernando de Noronha as an insular nursery area for lemon sharks, *Negaprion brevirostris*, and nurse sharks, *Ginglymostoma cirratum*, in the equatorial western Atlantic Ocean. *Marine Biodiversity Records* 2:1–4 pp.
- Gelsleichter J., Manire C.A., Szabo N.J., Cortés E., Carlson J., & Lombardi-Carlson L. 2005. Organochlorine concentrations in bonnethead sharks (*Sphyrna tiburo*) from four Florida estuaries. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 48(4), 474-483 pp.
- Gruber S.H. 1982. Role of the lemon shark, *Negaprion brevirostris* (Poey), as a predator in the tropical marine environment: A multidisciplinary study. *Florida Scientist* 45:46–75 pp.
- Gruber S.H. & Stout R.G. 1983. Biological materials for the study of age and growth in a tropical marine elasmobranch, the lemon shark, *Negaprion brevirostris* (Poey). *Proceedings of the international workshop on age determination of oceanic pelagic fishes: tunas, billfishes, and sharks*. Prince E.D. & Pulos L.M. (eds.).193–205 pp.
- Gruber S.H., Brown C.A. & Henningsen A.D. 1985. Age and growth of the lemon shark, *Negaprion brevirostris* (Poey), as determined by mark recapture data and the examination of tetracycline labelled vertebral centra. *American Zoologist* 25(4):106–106 pp.
- Gruber S.H., Nelson D.R. & Morrissey J.F. 1988. Patterns of activity and space utilization of juvenile lemon sharks, *Negaprion brevirostris*, in a shallow Bahamian lagoon. *Bulletin of Marine Science* 43(1):61–76 pp.
- Guttridge T.L., Gruber S.H., Gledhill K.S., Croft D.P., Sims D.W., & Krause, J. 2009. Social preferences of juvenile lemon sharks, *Negaprion brevirostris*. *Animal Behaviour*, 78(2), 543-548 pp.
- Guttridge T.L., Gruber S.H., Franks B.R., Kessel S.T., Gledhill K.S., Uphill J., Krause J. & Sims D.W. 2012. Deep danger: intra-specific predation risk influences habitat use and aggregation formation of juvenile lemon sharks *Negaprion brevirostris*. *Marine Ecology Series Progress* 445:279–291 pp.

- Jennings D.E., Gruber S.H., Franks B.R., Kessel S.T. & Robertson A.L. 2008. Effects of large-scale anthropogenic development on juvenile lemon shark (*Negaprion brevirostris*) populations of Bimini, Bahamas. *Environmental Biology of Fishes* 83:369–377 pp.
- Kyne P.M., Carlson J.K., Ebert D.A., Fordham S.V., Bizzarro J.J., Graham R.T., Kulka D.W., Tewes E.E., Harrison L.R. & Dulvy N.K. 2012. The conservation status of North America, Central America, and Caribbean chondrichthyans. IUCN, Species Survival Commission, Shark Specialist Group, Vancouver, Canada. 148 pp.
- Lavín M. F., & Marinone S. G. 2003. An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. In *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics*. Springer, Dordrecht. 173-204 pp.
- Legare B., Kneebone J., DeAngelis B. & Skomal G. 2015. The spatiotemporal dynamics of habitat use by blacktip (*Carcharhinus limbatus*) and lemon (*Negaprion brevirostris*) sharks in nurseries of St. John, United States Virgin Islands. *Marine Biology* 162:699–716 pp.
- Manire C. A., & Gruber, S. H. 1990. Many sharks may be headed toward extinction. *Conservation Biology*, 4(1), 10-11 pp.
- McNab B.K. 1963. Bioenergetics and the determination of home range size. *The American Naturalist*, 97(894), 133-140 pp.
- Meek A. 1916. *The migrations of fish*. Edward Arnold.
- Morrissey J.F. & Gruber S.H. 1993a. Home range of juvenile lemon sharks, *Negaprion brevirostris*. *Copeia* 1993(2):425–434 pp.
- Morrissey J.F. & Gruber S.H. 1993b. Habitat selection by juvenile lemon sharks, *Negaprion brevirostris*. *Environmental Biology of Fishes* 38:311–319 pp.
- Murchie K.J., Schwager E., Cooke S.J., Danylchuk A.J., Danylchuk S.E., Goldberg T.L., Suski C.D. & Philipp D.P. 2010. Spatial ecology of juvenile lemon sharks (*Negaprion brevirostris*) in tidal creeks and coastal waters of Eleuthera, The Bahamas. *Environmental Biology of Fishes* 89:95–104 pp.
- Reyier E.A., Adams D.H. & Lowers R.H. 2008. First evidence of a high density nursery ground for the lemon shark, *Negaprion brevirostris*, near Cape Canaveral, Florida. *Florida Scientist* 71:134–148 pp.
- Reyier E.A., Franks B.R., Chapman D.D., Scheidt D.M., Stolen E.D. & Gruber S.H. 2014. Regional-scale migrations and habitat use of juvenile lemon sharks (*Negaprion brevirostris*) in the US South Atlantic. *PLoS ONE* 9(2): 1–13 pp.

- Riegl B.M., Halfar J., Purkis S.J., & Godinez-Orta L. 2007. Sedimentary facies of the eastern Pacific's northernmost reef-like setting (Cabo Pulmo, Mexico). *Marine Geology*, 236(1-2), 61-77 pp.
- Schoener A., & Schoener T.W. 1981. The dynamics of the species-area relation in marine fouling systems: 1. Biological correlates of changes in the species-area slope. *The American Naturalist*, 118(3), 339-360 pp.
- Schultz J.K., Feldheim K.A., Gruber S.H., Ashley M.V., McGovern T.M. & Bowen B.W. 2008. Global phylogeography and seascape genetics of the lemon sharks (genus *Negaprion*). *Molecular Ecology* 17:5336–5348 pp.
- Springer S. 1950. History notes on the lemon shark, *Negaprion brevirostris*. *Texas Journal of Science* 3:349–359 pp.
- Stump K.L., Crooks C.J., Fitchett M.D., Gruber S.H. & Guttridge T.L. 2017. Hunted hunters: an experimental test of the effects of predation risk on juvenile lemon shark habitat use. *Marine Ecology Progress Series* 574:85– 95 pp.
- Sundström L.F. 2015. *Negaprion brevirostris*. The IUCN Red List of Threatened Species 2015: e.T39380A81769233.
- Tavares R. 2008. Occurrence, diet and growth of juvenile blacktip sharks, *Carcharhinus limbatus*, from Los Roques Archipelago National Park, Venezuela. *Caribbean Journal of Science* 44(3):291–302 pp.
- Tavares R. 2018. Distribución, área de cría y variables demográficas y espaciales del tiburón limón, *Negaprion brevirostris* (Poey 1868) en el Parque Nacional Archipiélago Los Roques. Ph.D. Thesis. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Venezuela. 275 pp.
- Tavares R., Rodríguez J.P. & Morales M. 2016. Nursery area and size structure of the lemon shark population, *Negaprion brevirostris* (Poey, 1868), in Los Roques Archipelago National Park, Venezuela. *Universitas Scientiarum* 21(1):33–52 pp.
- Villarreal-Cavazos A., Reyes-Bonilla H., Bermúdez-Almada B., & Arizpe-Covarrubias O. 2000. Los peces del arrecife de Cabo Pulmo, Golfo de California, México: Lista sistemática y aspectos de abundancia y biogeografía. *Revista de Biología Tropical*, 48(2-3), 413-424 pp.
- Vorenberg M.M. 1962. Cannibalistic tendencies of lemon and bull sharks. *Copeia* 1962(59):455–456 pp.
- Werner E.E., Gilliam J.F., Hall D.J. & Mittelbach G.G. 1983. An experimental test of the effects of predation risk on habitat use in fish. *Ecology* 64(6):1540–1548 pp.

- Wetherbee B.M., Gruber S.H. & Cortés E. 1990. Diet, feeding habits, digestion and consumption in sharks, with especial reference in lemon shark, *Negaprion brevirostris*. Elasmobranchs as living resources: advances in the biology, ecology, systematics and the status of the fisheries. Pratt Jr. H.L., Gruber S.H. & Taniuchi T. (eds.). NOAA, Technical Report NMFS 90, U.S. Department of Commerce. 29–47 pp.
- Wetherbee B.M., Gruber S.H. & Rosa S. 2007. Movement patterns of juvenile lemon sharks within Atol das Rocas, Brazil: a nursery characterized by tidal extremes. Marine Ecology Progress Series 343:283–293 pp.
- Zanella I., & López-Garro A. (2015). Abundancia, reproducción y tallas del tiburón martillo *Sphyrna lewini* (Carcharhiniformes: Sphyrnidae) en la pesca artesanal de Golfo Dulce, Pacífico de Costa Rica. Revista de Biología Tropical, 63, 307-317.

CAPÍTULO 2.

RESIDENCIA Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL TIBURÓN LIMÓN (*Negaprion brevirostris*) EN EL PARQUE NACIONAL CABO PULMO

INTRODUCCIÓN

Un aspecto relevante en ecología es la manera y el tipo de jerarquía en la que se organizan los individuos de una población dentro de un espacio determinado (Begon *et al.*, 2006). Características intrínsecas de la especie como patrones de distribución y agregación en áreas definidas, determinan aspectos como la abundancia, dinámicas intra e interespecíficas, y en general sobre aspectos de la dinámica poblacional (Tilman & Kareiva, 1997). La organización espacial de las especies no solo es relevante para dilucidar aspectos sobre su historia de vida. Puesto que los tiburones presentan alta movilidad y un número considerable de diversas amenazas, la información generada a partir de datos de distribución se vuelve fundamental (Heupel *et al.*, 2007). Saber el lugar y la manera en la que se encuentran distribuidos los individuos es determinante a la hora de detectar posibles amenazas contra sus poblaciones, para crear estrategias de conservación o para una posterior planeación y creación de planes de manejo.

Con base en su importancia ecológica, la distribución de tiburones es un aspecto fundamental para los ecosistemas. A través de las redes tróficas, estos depredadores contribuyen directamente en la integración y transferencia de energía en ambientes marinos, proporcionando estabilidad para las poblaciones de otras especies (i.e., meso-depredadores (Grubbs *et al.*, 2016)) y en general para el equilibrio ecosistémico (Dulvy *et al.*, 2017). Sin embargo, pese a esta importancia, se han descrito cambios en la distribución conocidas para algunas especies de tiburón. Estos cambios, en su mayoría, obedecen a impactos directos de origen antropogénico, tales como la sobrepesca, la destrucción del hábitat y la contaminación (Dulvy *et al.*, 2014).

Respecto a la problemática de la sobrepesca, el factor común en las pesquerías artesanales de tiburón es la captura de individuos sexualmente inmaduros. Su captura suele ser efectuada debido a que los pescadores usualmente recurren a zonas costeras, zonas correspondientes a áreas habitadas por organismos juveniles como, por ejemplo, áreas de crianza. Aunque existen pocos registros rastreables sobre el número de capturas de individuos sexualmente inmaduros, la proporción de tiburones juveniles capturados puede

alcanzar niveles entre 50 y 100% (Tavares, 2018). Ejemplo de ello son los resultados de la pesca artesanal llevadas a cabo en el Golfo de México (Castillo-Geniz *et al.*, 1998), nordeste de Brasil (Yokota & Lessa, 2006) y golfo de Venezuela (Tavares & Sánchez, 2012). La captura de estos individuos afecta la estabilidad de las poblaciones, puesto que influye directamente en el proceso de mantenimiento poblacional.

Con base en esta problemática, los estudios se han dirigido a la creación de estrategias para la identificación de hábitats críticos para el desarrollo de las poblaciones, tales como áreas de alimentación, reproducción o crianza (Heithaus, 2007). Dichas estrategias deben ser establecidas en función del equilibrio ecosistémico, donde uno de sus objetivos sea dirigido a la disminución de los impactos negativos sobre los organismos, poblaciones y hábitats. Bajo este supuesto, se hace necesario el establecimiento e implementación de estrategias de manejo y conservación. Sin embargo, con base en la dificultad de implementar los planes de manejo para poblaciones de especies de tiburón utilizando medidas convencionales como la regulación de la captura mediante el establecimiento de vedas, la regulación de los tipos de arte de pesca, cuotas de captura y tallas mínimas de captura, se han intentado otras medidas que aseguren la viabilidad y la conservación de poblaciones (Tavares, 2018).

La protección de sus hábitats ha sido una estrategia cada vez más utilizada a través del tiempo, donde en lugar de intentar que los pescadores no afecten a cualquier parte de la población, lo que intenta es proteger a un grupo específico de individuos dentro de la población (Cortés, 1999). Estos grupos específicos son determinados por la edad o madurez sexual. En términos de edad, los organismos son clasificados a partir de un criterio sobre un rango de tallas, en donde de acuerdo con su longitud total, se clasifican entre neonatos, juveniles, en algunos casos “sub-adultos” y adultos. Con base en su madurez sexual, los organismos se clasifican solo en dos, en la que sí el individuo presenta estar sexualmente maduro es clasificado como adulto, y si no, como juvenil.

Las estrategias de conservación de hábitats se han planteado para las zonas de agregación de adultos (Cortés, 1999; Simpfendorfer, 1999) y para las zonas de agregación de neonatos y juveniles (Heithaus, 2007). Sin embargo, a partir de estudios basados en modelos demográficos, se ha sugerido que la sobrevivencia de individuos inmaduros es de mayor relevancia para el mantenimiento de las poblaciones y por lo tanto que el grupo prioritario, en cuanto a esfuerzos de conservación, es el correspondiente al de neonatos y juveniles (Gallucci *et al.*, 2006).

El concepto de áreas de cría de tiburones, establecido por Meek (1916), sugiere que la distribución de las hembras de tiburones vivíparos está ligada a su biología reproductiva. Meek (1916) demostró a partir de observaciones de hembras de *Mustelus canis* pariendo en aguas poco profundas, los juveniles permanecieron en esa zona hasta alcanzar la madurez sexual, desde la que posteriormente migrarían a zonas más profundas. Springer (1967) por su parte sugirió que las hembras adultas migraban a lugares específicos y delimitados, utilizándolos para poner sus huevos o parir a sus crías. Además, el autor propone que el principal depredador de los tiburones son otros tiburones, y que por lo tanto las áreas de crianza podrían definirse por la presencia y abundancia de neonatos y juveniles, y por la ausencia de tiburones adultos. Basado en lo descrito por Springer (1967), Bass (1978) sugiere que los tiburones tienen dos tipos de áreas de crianza: (1) una en la que los neonatos nacen y permanecen durante sus primeras etapas de vida y otra (2) en donde las áreas son habitadas por tiburones más grandes que siguen siendo sexualmente inmaduros.

En contraste a lo sugerido por Springer (1967), Castro (1987) indica que la mayoría de las especies tienen un área de crianza geográficamente discreta, ubicadas en zonas de poca profundidad y alta productividad, que puede ser compartida por varias especies con algún grado de temporalidad. Por su parte Simpfendorfer & Milward (1993), establecieron que dichas áreas no solo brindan y disponibilidad de presas para los tiburones juveniles, estas también podrían contribuir a la disminución de la tasa de depredación inter e intraespecífica. Posteriormente, Castro (1993a) examina las características de las áreas de cría, describiéndolas como zonas costeras de aguas someras, que bien podían ser bahías, lagunas o estuarios, en las que las hembras grávidas paren a sus crías, y estas últimas

permanecen las primeras semanas, meses o años de vida, concluyendo que las áreas de cría pueden ser evidenciadas o detectadas por la presencia hembras grávidas y de individuos que no han alcanzado la madurez sexual. Tomando la información sugerida por estos autores, finalmente Heupel *et al.*, (2007) proponen que las áreas de cría de tiburones deben ser establecidas de acuerdo con tres criterios: (1) abundancia de individuos, puesto que estos se encuentran más comúnmente en estas áreas que en otras, por lo que las densidades son mucho mayores que la densidad media en otras áreas; (2) Permanencia en el sitio, en el que los individuos tienen una tendencia a permanecer por periodos prolongados de tiempo que bien puede ser semanas, meses o años; (3) comportamiento filopátrico, en el que los individuos utilizan el área repetidas veces durante todo su ciclo de vida.

MARCO TEÓRICO

Una estrategia clave de conservación de áreas de relevancia ecológica ha sido la creación de áreas marinas protegidas (AMP) (Bound *et al.*, 2017). Las AMP son una medida de manejo especial de la biodiversidad marina, en la que se incluyen diversos niveles de protección, regulación y ordenamiento (White *et al.*, 2017). En el caso de las AMP implementadas para la conservación de especies de tiburones, han mostrado resultados positivos al priorizar los espacios para la protección de individuos juveniles (Heupel & Simpfendorfer, 2005; Garla *et al.*, 2006; Knip *et al.*, 2012; Yates *et al.*, 2015; Graham *et al.*, 2016). Existen algunos casos en los que, debido al interés sobre las especies, estas áreas han adquirido valor económico a partir de estrategias como el ecoturismo; ejemplo de ello, la valoración económica del buceo con tiburones.

Baum *et al.*, (2003) indicaron que, a nivel mundial, la estimación poblacional de todas las especies de tiburón (con excepción del tiburón mako, *Isurus oxyrinchus*) registró una reducción entre el 50% y 70% en los últimos 15 años debido a la pesca excesiva. Sin embargo, no fue hasta 2005 que la valoración económica de la industria de avistamiento de tiburones demostró que esta actividad podría calificarse como alternativa de la explotación pesquera y de esa manera reducir el daño causado a las poblaciones (Topelko & Dearden, 2005). Por ejemplo en Palau, en donde el buceo con tiburones genera \$18 millones de dólares al año, es decir, el 8% del producto interno bruto del país (Vianna *et al.*, 2012). Aunque los datos generados para 2013 sugieren que alrededor del mundo el buceo con tiburones generó un total de 314 millones de dólares, es decir, la mitad que lo que generaron las pesquerías, las proyecciones para los próximos 20 años es que la industria del turismo con tiburones se duplique, generando hasta 780 millones de dólares (Cisneros-Montemayor *et al.*, 2013). En conclusión, las actividades ecoturísticas han demostrado ser eficaces, reemplazando actividades extractivas como la pesca y demostrando beneficios para la conservación de especies, fungiendo como acciones de sustento y desarrollo importante para las comunidades locales (Eriksson & Clarke, 2015).

En general, la mala regulación de la pesca artesanal en el Golfo de California ha generado la sobreexplotación de los recursos. Iniciando los años setenta, el crecimiento del turismo en Los Cabos, B.C.S. transformó la región (Hoffman, 1992). Aunque en países en vía de desarrollo la industria turística suele ser una estrategia para alcanzar un óptimo crecimiento económico en corto plazo, la región ha tenido obstáculos para planificar y ejercer los planes de manejo en el área con base en la dificultad para relacionar los impactos ambientales con los beneficios económicos. En Cabo Pulmo la población ha estado conformada principalmente por familias pesqueras, quienes integraron una Asociación Productora Rural Pesquera en 1980, por lo cual la captura de peces y moluscos se realizaba intensamente en el arrecife ya que representaba una fuente de ingresos para los pescadores y para la economía local.

En 1987 la Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS) ejecutó una serie de investigaciones en la zona, enfocados en el estudio de la comunidad coralina, invertebrados bentónicos, y en la riqueza específica de los peces arrecifales. Debido a que en siete años se registró una disminución de cobertura coralina (de 35% en 1988 a 15% en 1995) y abundancia peces y moluscos asociados a la zona arrecifal, se iniciaron estudios para la creación de un plan de manejo con base en la conservación del sistema. El 6 de junio de 1995 Cabo Pulmo es incluido en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, demandando la creación de plan de manejo en el que se establecieran prioridades y acciones a corto, mediano y largo plazos para la conservación de la biodiversidad y el aprovechamiento sustentable de los recursos del área. La idea de este aprovechamiento estuvo basada en la incorporación de actividades que promuevan y propicien el desarrollo del ecoturismo (buceo) como una alternativa económica para sustituir a las actividades extractivas.

Actualmente en el Parque Nacional Cabo Pulmo se desarrolla una estrategia de manejo del sistema arrecifal con base en el ecoturismo. Esta estrategia ha permitido la recuperación ecológica del parque puesto que se ha transformado nuevamente en una zona con la capacidad de carga suficiente para albergar una amplia comunidad de especies (Aburto-Oropeza, 2011). Con respecto al ensamblaje de tiburones dentro del parque, aumentó en biomasa y número de especies (Azunsolo, 2015). Se han identificado 12 especies dentro del

parque: *Rhincodon typus*, *Galeocerdo cuvier*, *Triaenodon obesus*, *Nasolamia velox*, *Carcharhinus galapaguensis*, *Carcharhinus obscurus*, *Ginglymostoma unamensi*, *Carcharhinus falciformis*, *Carcharhinus leucas*, *Carcharhinus limbatus* y *Negaprion brevirostris*.

Hasta el momento no existe ningún artículo publicado con base en el estudio de movimientos y uso de hábitat de cada una de estas especies dentro del parque. Debido a esto, la presente investigación es la primera en aportar datos sobre los patrones de movimiento del tiburón limón en el PNCP.

MATERIALES Y MÉTODOS

Marcaje

La descripción de patrones de movimiento y la evaluación del índice de residencia de cada individuo fue obtenido mediante el uso del marcaje convencional y el monitoreo acústico pasivo utilizando marcas internas. La marca convencional es conocida como “*marca de espagueti*”, la cual se compone de filamento de plástico de 12 cm de largo unido a un sujetador y a un dardo de acero inoxidable (Fig. 14). Cada marca convencional tiene impreso un código de identificación y un número telefónico para que quién la encuentre, pueda reportarla. La manera en la que esta marca es instalada en el animal es mediante una punción utilizando un aplicador de acero inoxidable afilado de 4 mm de ancho. La marca fue insertada en el costado izquierdo del tiburón entre el tejido muscular en la base de la aleta dorsal arriba de la columna vertebral, penetrando a través de la línea media del tiburón con un ángulo de entrada de 45° con respecto al eje longitudinal caudal, orientando la barbilla de la marca hacia la línea media. El aplicador se retira en el momento en el que este pueda sentirse a través de la piel del animal asegurándose que la marca se encuentre anclada musculatura dorsal.



Figura 14. A: Marca convencional tipo espagueti; B: Punta de acero inoxidable de la marca espagueti

Con respecto a la telemetría acústica pasiva, Weber (2009) sugiere que para elegir el modelo del transmisor (marca acústica codificada) se deben tomar en cuenta cuatro parámetros: (1) el peso de los organismos, debido a que debe asegurarse que el peso de la marca sea inferior al 2% del peso del animal; (2) la expectativa de vida de la batería que requiere el estudio; (3) la frecuencia de transmisión del transmisor; y (4) el poder acústico de salida para el modelo del transmisor. Bajo estos parámetros se decidió utilizar marcas V13 (Vemco, Ltd.) para organismos con una longitud total menor o igual a 100 cm y marcas V16 (Vemco, Ltd.) (Fig. 15) en individuos que superaran los 100 cm de longitud total. Con excepción de la hembra (Lucy), todos los organismos capturados fueron etiquetados con marcas acústicas (Tabla I en capítulo 1).



Figura 15. A: Marca acústica interna V16 (Vemco, Ltda.); B: Receptor VR2W (Vemco, Ltda.).

Esta marca funciona básicamente emitiendo una señal de transmisor hacia un receptor fijo en el área determinada. Las pruebas de alcance hechas en el área de estudio revelaron que cada uno de estos receptores podían detectar y registrar marcas codificadas a distancias entre 300 - 500 m (Fig. 16) registrando la fecha y hora exacta de cada detección de cada código cada 60 segundos. Este intervalo de emisiones permite que los transmisores V16 y V13 tengan una vida útil de 10 y tres años respectivamente. El método implementado para la instalación de estas marcas fue a partir del protocolo de marcaje y manipulación establecido por la Universidad de California, Davis (Protocolo No. 16022). Las marcas fueron insertadas en la cavidad intraperitoneal, mediante una incisión quirúrgica con un bisturí en la parte ventral en medio de las aletas pectorales. La incisión fue entre dos y tres

centímetros de largo para que la marca acústica (de un diámetro máximo de 16 mm) se insertara fácilmente. Una vez la marca se encontrase dentro del animal, la incisión es cerrada utilizando sutura absorbible.

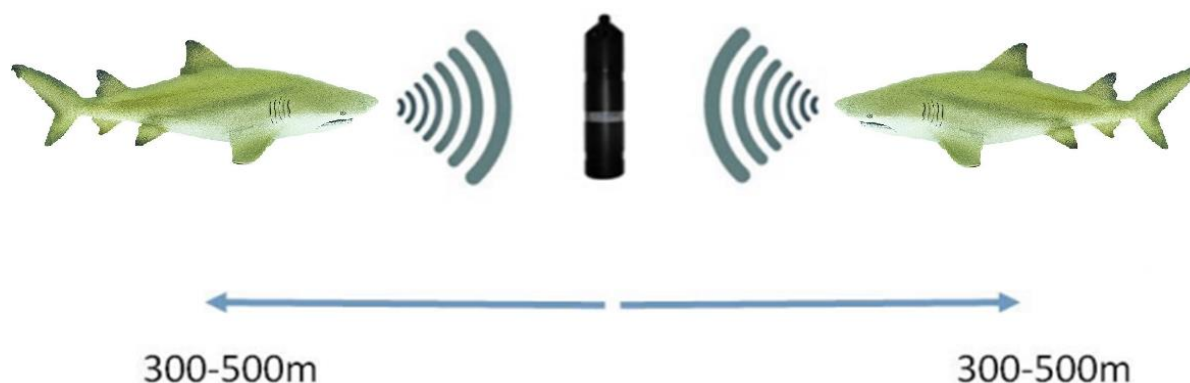


Figura 16. Rango de detección de cada receptor dentro del Parque Nacional Cabo Pulmo.

Red de estaciones acústicas

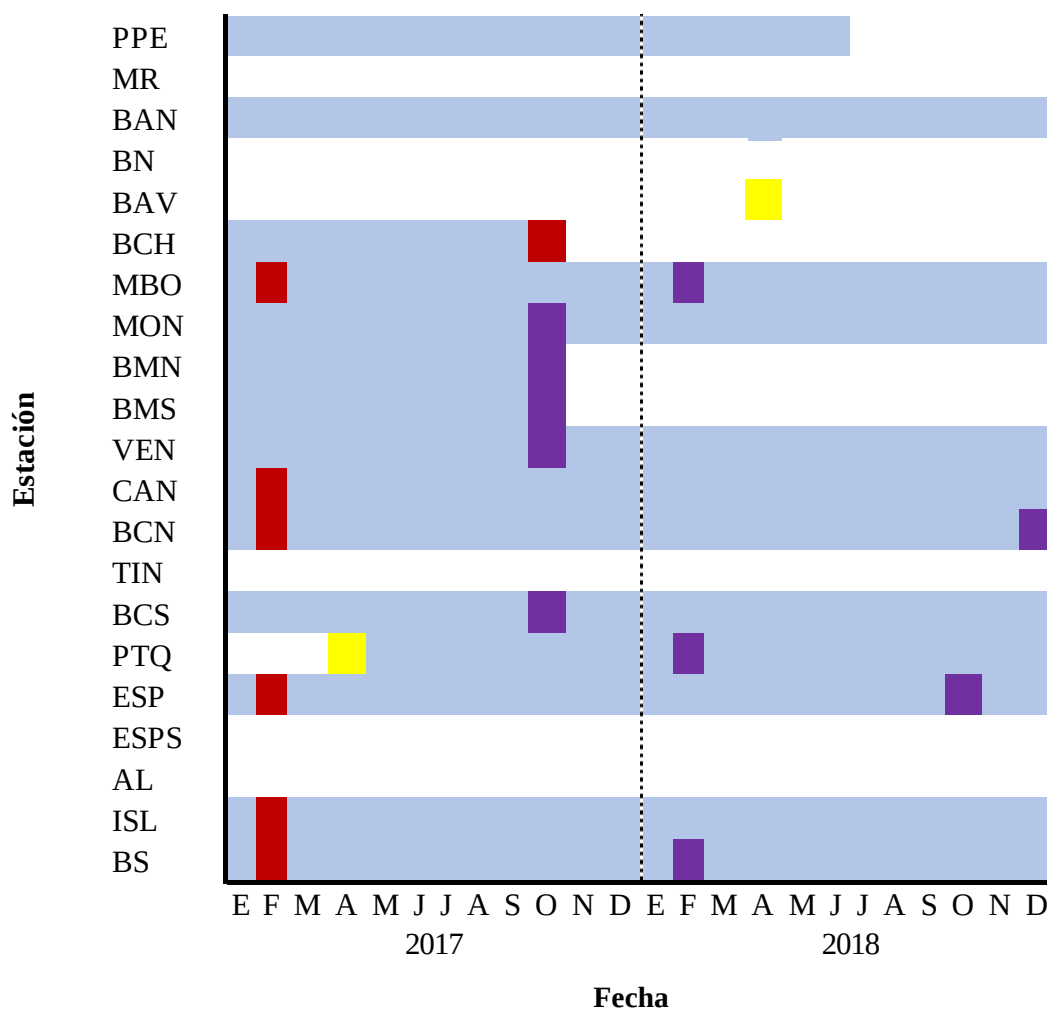
Se denominará “estación” al área de detección de cada uno de los receptores, debido a que la coordenada donde fue instalado el primer receptor fue conservada a lo largo del tiempo, sin importar el número de veces que el “equipo”, en este caso el receptor, tuviera que ser cambiado. Este diseño de implementación permitió monitorear la presencia de tiburones marcados en las zonas norte y sur del parque. El límite entre ambas zonas fue establecido a partir de la latitud 23.45 (Tabla IV). La zona norte incluye 15 estaciones, denominadas Punta Pescadero (PEE) (fuera del límite del Parque), Cabo Pulmo Norte (CPN), Miramar (MR), Barracas Norte (BN), Barracas New (BAN), Barracas (BAV), Boya CICESE (BUO), Bochudo Profundo (BOP), Bochudo (BCH), Morros Bochudo (MBO), Morros Norte (MON), Bajo Meros Norte (BMN), Bajo Meros Sur (BMS), y el Vencedor (VEN). Por su parte la zona sur integra 10 estaciones, llamados el Cantil (CAN). Bajo Cien Norte (BCN), Tinajitas (TIN), Bajo Cien sur (BCS), Punto 15 (PTQ), Esperanza (ESP), Esperanza Sur (ESPS), Almirante (AL), Islote (ISL), y el Bajo del salado (BS) (fuera del límite del

Parque). Los datos de los receptores VR2 (Vemco, Ltda.) se importaron a la plataforma analítica "R" (v.3.2.1), donde se realizó el procesamiento y el análisis de datos. Las recepciones únicas en un solo receptor dentro de un intervalo de tiempo de 24 h fueron eliminadas.

Tabla IV. Distribución de las estaciones entre la zona norte y sur en el Parque Nacional Cabo Pulmo. ND: No hay datos; R: Rocoso; A: Arenoso; R-A: Rocoso - arenoso

Zona	Estación	Siglas	Latitud	Longitud	Profundidad del sitio	Sustrato	Distancia a la playa (m)
Norte	Punta Pescadero	PPE	23.7941	-109.6947	ND	R – A	440
	Cabo Pulmo Norte	CPN	23.5052	-109.4544	10	A	1486
	Barracas New	BAN	23.4921	-109.4466	16	A	1363
	Barracas Norte	BN	23.4954	-109.4393	10	A	2430
	Miramar	MR	23.4955	-109.4395	10	A	2430
	Barracas	BAV	23.4917	-109.4479	10	A	1154
	Boya CICESE	BUO	23.4855	-109.4046	15	A	3967
	Bochudo Profundo	BOP	23.4813	-109.4063	17	A	3503
	Bochudo	BCH	23.4698	-109.4037	15	A	2821
	Morros Bochudo	MBO	23.4676	-109.4050	25	A	2692
	Morros Norte	MON -MOR	23.4628	-109.4078	16	R – A	2224
	Bajo Meros Norte	BMN	23.4592	-109.4088	17	R – A	1943
	Bajo Meros Sur	BMS	23.4558	-109.4053	18	R – A	2126
	Vencedor	VEN	23.4549	-109.4157	14	A	1096
Sur	Cantil	CAN	23.43661	-109.4136	12	R – A	1342
	Bajo Cien Norte	BCN	23.4344	-109.4063	21	R – Ar	2088
	Tinajitas	TIN	23.4289	-109.4204	7	R – A	849
	Bajo Cien Sur	BCS	23.4282	-109.4061	26	R – A	2241
	Punto 15	PTQ	23.4271	-109.4071	20	A	2192
	Esperanza	ESP	23.4256	-109.4088	21	R – A	2090
	Esperanza Sur	ES	23.4220	-109.4098	20	R – A	2126
	Almirante	AL	23.4144	-109.4263	7	R – A	579
	Islote	ISL	23.4075	-109.4132	18	R – A	539
	Bajo del Salado	BS	23.2972	-109.4108	30	A	1686

Debido a circunstancias logísticas y de mantenimiento (desarrollado por técnicos de la A.C. Pelagios Kakunjá), la red de estaciones instalada en el Parque (ver capítulo 1) fue modificada discontinuamente a través de los años (Fig. 17). De acuerdo con lo anterior, para los análisis de patrones de movimiento de los individuos, fue necesaria la creación de un mapa de receptores para cada tiburón detectado.



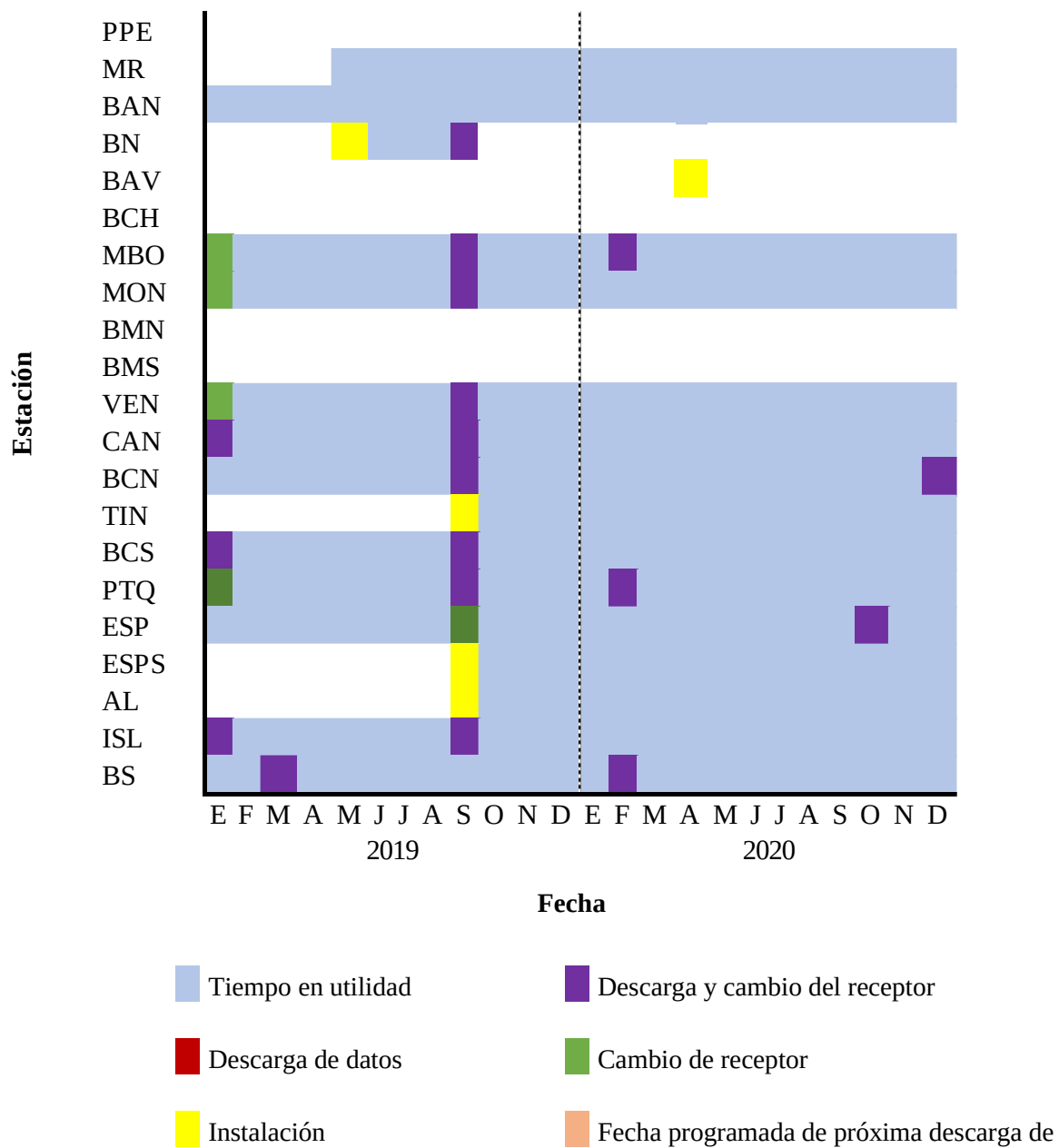


Figura 17. Cronología de receptores en la que para cada receptor se indica su fecha de instalación, tiempo de utilidad, fecha de descarga de datos, cambio de unidad del receptor y la fecha programada para la siguiente descarga de datos. Nota: En los casos de los receptores que no presentan un recuadro amarillo, se debe a que estos fueron instalados antes de empezar el presente estudio.

Análisis de Datos

Los análisis para describir los movimientos y las áreas de actividad de los individuos de tiburón limón se ejecutaron a partir de técnicas de sistemas de información geográfica (SIG) y con el apoyo del programa para el análisis de datos espaciales Qgis 3.16.1 (QGIS, 2020). El área de actividad fue evaluada mediante el método del mínimo polígono convexo (MPC; Mohr, 1947). Se escogió este método debido a que es ampliamente usado en estudios de ecología espacial, debido a que permite calcular el área de actividad de cada uno de los individuos a partir de la creación de un polígono convexo que integre todos los receptores en donde hubo alguna detección.

La gran ventaja de este método es que permite la comparación de nuestros resultados con los obtenidos en otros estudios sobre tiburones. Sin embargo, teniendo en cuenta su sensibilidad a los datos periféricos o “*outliers*”, su desventaja es que podría sobre-estimar la extensión del área de actividad (Worton, 1987). Aunque estos puntos se encuentren integrados al polígono, probablemente tendrían más relación con movimientos exploratorios, en lugar de movimientos relacionados a procesos biológicos como por ejemplo la alimentación o la reproducción (Börger *et al.*, 2006). Los polígonos para describir las áreas de actividad se hicieron para cada uno de los animales por separado.

Para determinar el tipo de asociación entre cada individuo, la zona del parque, los receptores y el periodo del día en el que fueron detectados, se implementó una tabla de contingencia multidimensional. Esta tabla se construyó con base en el número de detecciones, incluyendo las variables: zona (norte y sur), los receptores de cada zona y el periodo del día (amanecer, día, atardecer y noche). Para esto, se utilizó la medida de asociación conocida como “prueba χ^2 de independencia” o “ χ^2 de Pearson”. Esta prueba se empleó para determinar si existe una asociación entre variables categóricas, es decir, si las proporciones de una variable son diferentes dependiendo del valor que adquiriera la otra variable, siempre y cuando los datos sean independientes. Además, se debe tener en cuenta las observaciones esperadas sean mayores a cinco, debido a qué, si para alguno de los niveles es igual o menor a este número, el resultado de la aproximación podría no ser

bueno. Lo que hace esta prueba es cuantificar y sumar los eventos observados en cada nivel con respecto al número esperado acorde con la hipótesis nula (H_0), lo que permite determinar si la desviación total es mayor a la que ocurriría por azar.

Para determinar el valor del estadístico χ^2 , primero se debe determinar el valor esperado de cada grupo, multiplicando las frecuencias marginales de la fila y columna en la que se encuentra la celda, para posteriormente dividir por el total de observaciones. Finalmente, el valor de χ^2 se obtiene sumando las diferencias de todos los niveles. Este resultado se debe elevar al cuadrado para convertir todos los valores en positivos.

$$\chi^2 = \sum_{ij} \frac{(\text{observado}_{ij} - \text{esperado}_{ij})^2}{\text{esperado}}$$

Los grados de libertad (gl) son el único parámetro de la distribución chi-cuadrada, y son quienes finalmente determina su forma, centro y dispersión. Teniendo en cuenta que la distribución de chi-cuadrado siempre es positiva, para calcular el valor p solo se tiene en cuenta la cola superior.

$$\begin{aligned} gl &= (\text{niveles variables } A - 1) * (\text{niveles variables } B - 1) \\ &= (\text{columnas} - 1) * (\text{filas} - 1) \end{aligned}$$

En el caso de que alguna de las variables tenga más de dos niveles y la prueba de independencia sea significativa, el análisis para determinar los niveles se encuentran las diferencias significativas se hace a partir de los valores residuales de *Pearson*. Aquí el procedimiento se hace con base en las diferencias entre los valores observados y los esperados. Si la diferencia dada entre estos valores se divide por la raíz cuadrada de los valores esperados, se obtiene lo que se conoce como residuos estandarizados que se pueden comparar como el factor Z de una normal. Para un α de 0.05 si el valor residual estandarizado de un nivel supera el 1.95 se considera significativo.

RESULTADOS

Con base en la información de la tabla II (ver Cap. 1), desde este momento los individuos serán nombrados en este documento a partir de su nombre ID (establecido por quienes desarrollaron esta investigación). Los individuos que presentaron detecciones acústicas fueron cuatro machos, dos adultos (“*Jager*” y “*Tom*”) y dos juveniles (“*Nemo*” y “*Philip*”). *Jager* fue marcado el 27 de mayo de 2017 y detectado 39.395 veces entre mayo de 2017 y junio de 2018 en 13 receptores. *Tom* fue capturado el 12 de abril de 2019 y registrado 12,821 (entre abril de 2019 y abril del 2020) en seis de 17 receptores en total instalados en el PNCP durante ese periodo. *Philip* fue marcado el 8 de abril de 2019 y fue detectado 288 veces en cuatro de 17 receptores entre junio de 2019 y julio del 2020. Por último, *Nemo* fue marcado el 13 de abril de 2019 y detectado 6,975 entre cinco de los 17 receptores entre mayo del 2019 y agosto de 2020. Debido a que las fechas de marcaje y detección de los individuos no son comparables, la descripción y el análisis de resultados de cada individuo se hizo de manera independiente. Para esto, los resultados se darán de manera cronológica empezando por el primer animal marcado.

Análisis de resultados de telemetría acústica de *Jager*

La red de receptores correspondiente a 2017 y 2018 (fechas en las que el individuo fue detectado) estuvo compuesta por 15 receptores acústicos (Fig. 18 y Fig. 19), de los cuales dos de ellos no generaron ninguna detección y 13 generaron un total de 39,377 detecciones. Las detecciones estuvieron distribuidas entre estaciones de ambas zonas, seis en la zona norte y siete en el sur. En cada uno de estos receptores se obtuvo al menos una detección a lo largo de todo el periodo de observación (tiempo entre la primera y última detección) (Tabla V).

Los datos fueron analizados a partir del porcentaje del total de detecciones por estación (Fig. 20). Debido a que la disposición de los nombres de los receptores es de sur a norte, el eje Y representa a los receptores en este orden, siendo el “BS” la estación ubicada más al

sur y “PPE” la estación más al norte. De esta manera, los datos indican una mayor frecuencia de uso en los receptores ubicados en la zona sur del Parque.

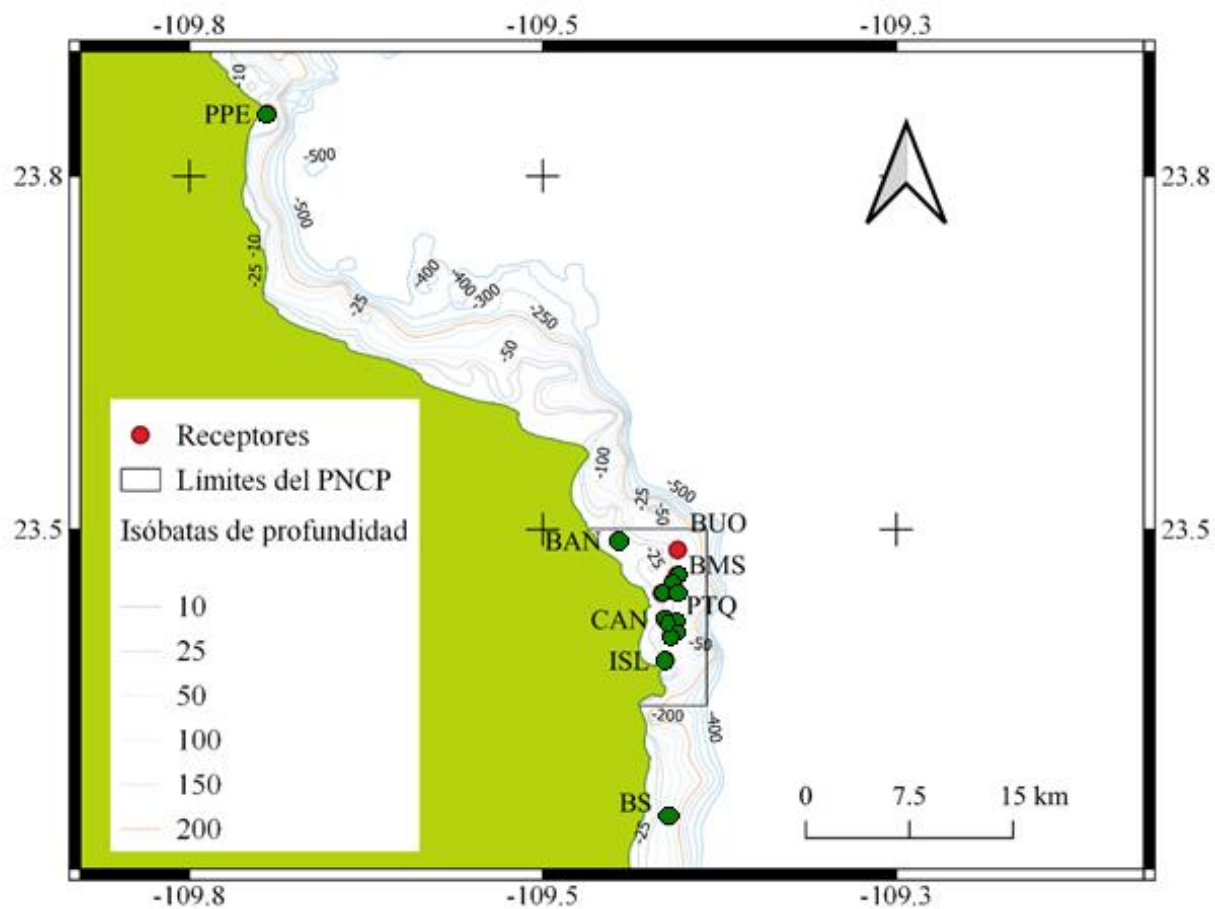


Figura 18. Mapa de la red de receptores utilizada entre 2017 y 2018.

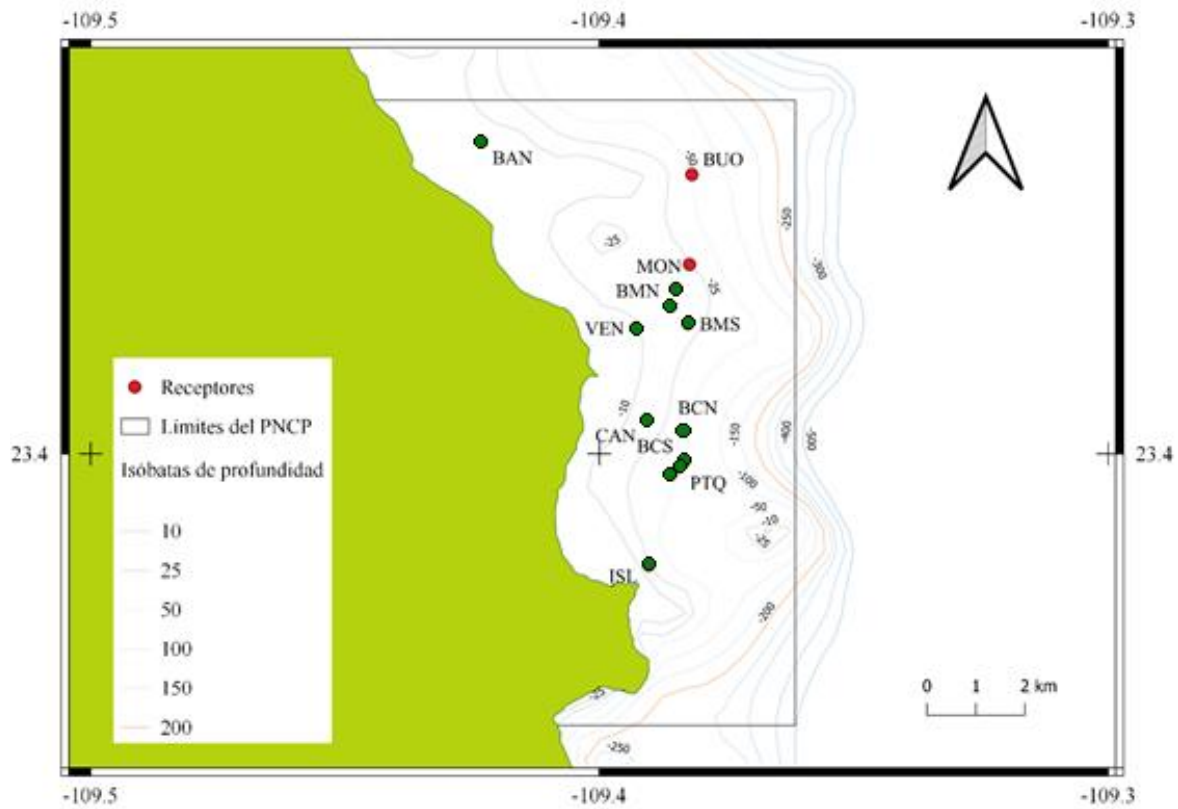


Figura 19. Acercamiento a los receptores dentro del Parque Nacional Cabo Pulmo. Los puntos indican la ubicación de cada receptor, el color rojo representa los receptores en los que no hubo ningún registro y los puntos verdes los receptores en los que se detectó a *Jager*.

Tabla V. Total de detecciones de *Jager* obtenidas en cada estación de cada zona entre mayo de 2017 y junio de 2018.

Zona	Receptor	Abreviación	Latitud	Longitud	Total de detecciones
Norte	Punta Pescadero	PPE	23.79419	-109.69477	199
	Barracas New	BAN	23.49213	-109.44663	544
	Moros Bochudo	MBO	23.46761	-109.40508	207
	Bajo Meros Norte	BMN	23.45927	-109.40887	78
	Bajo Meros Sur	BMS	23.4558	-109.40538	106
	Vencedor	VEN	23.45492	-109.41576	325
Sur	Cantil	CAN	23.43661	-109.41361	79
	Bajo cien norte	BCN	23.43447	-109.40636	3279
	Bajo cien sur	BCS	23.42826	-109.40617	3680
	Punto 15	PTQ	23.4271389	-109.407139	23509
	Esperanza	ESP	23.42562	-109.40887	7220
	Islote	ISL	23.40751	-109.41322	148
	Bajo del salado	BS	23.29727	-109.41086	3

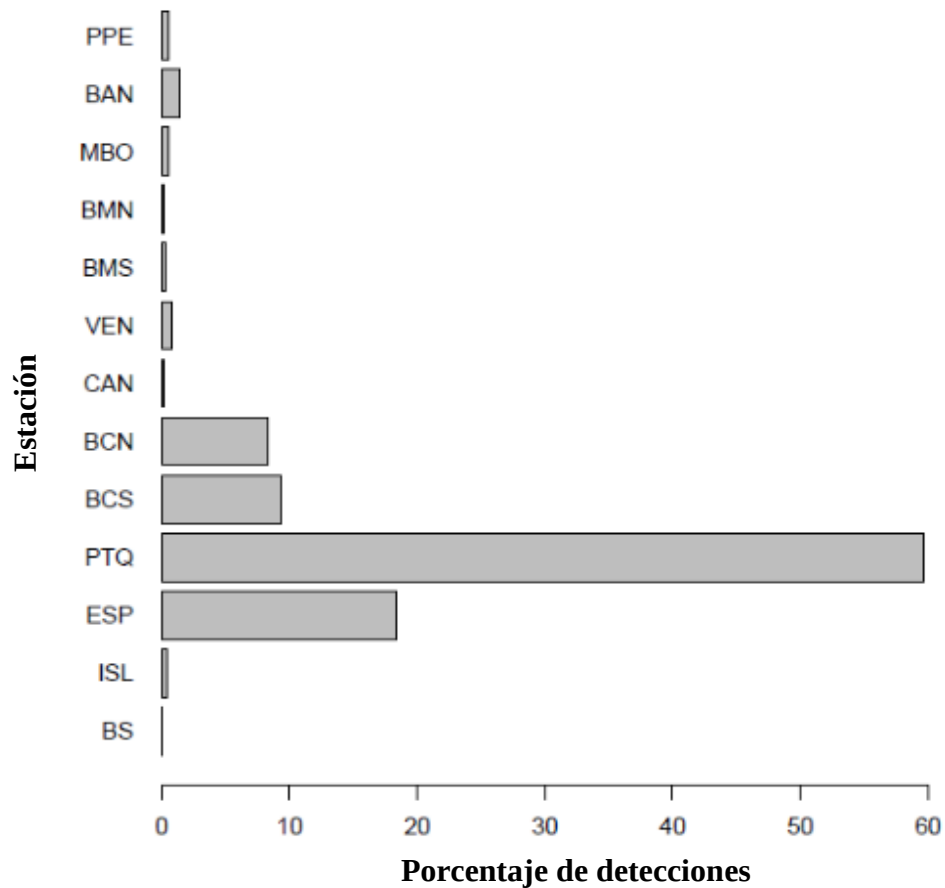


Figura 20. Porcentaje de detecciones de *Jager* en cada estación. La distribución de las estaciones en el eje Y responde a un orden de sur a norte, siendo “PPE” la estación más al norte y “BS” la más al Sur.

Los datos de todos los receptores fueron juntados para hacer un análisis de detecciones por un periodo de 24 horas (Fig. 21). Este análisis fue utilizado para determinar dentro del total de detecciones la hora del día en la que con mayor frecuencia el animal fue detectado, a partir de la asignación de cuatro periodos: amanecer, día, atardecer y noche. El resultado mostró qué, aunque el tiburón fue registrado en cada uno de los periodos del día, las horas correspondientes al periodo “día” (cuyo horario cubrió un rango entre las 6:30 horas hasta las 19:00 horas debido al cambio entre el horario de verano e invierno), fueron en las que con mayor frecuencia se obtuvieron registros.

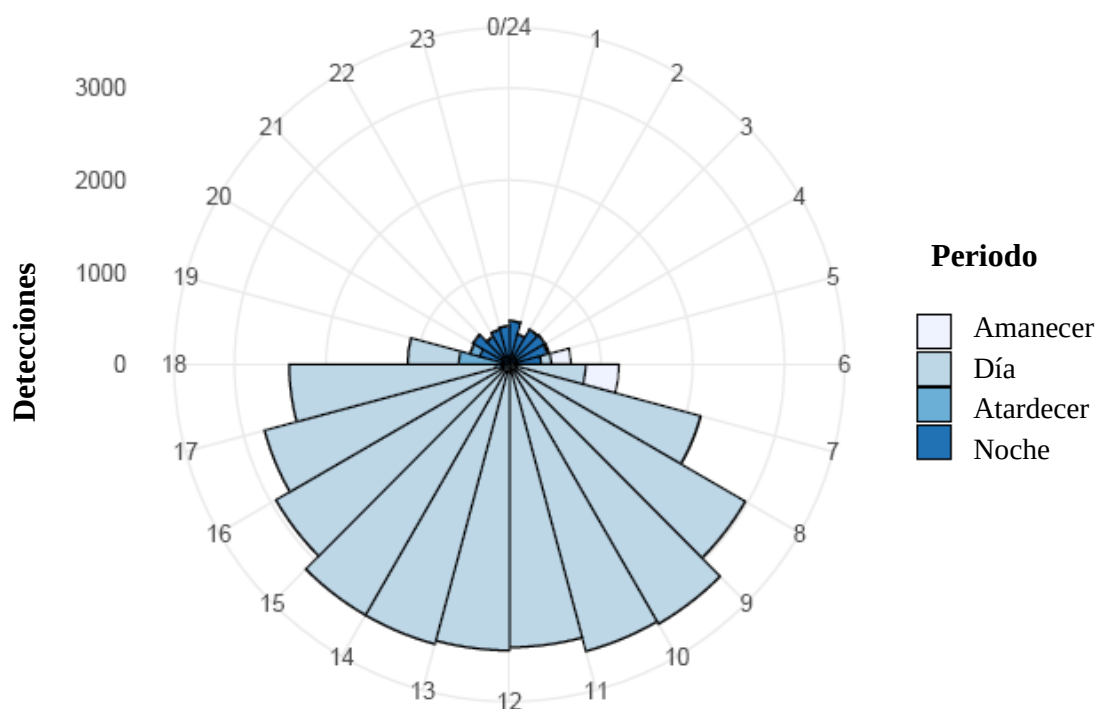


Figura 21. Número total de detecciones de *Jager* obtenidas entre 2017 y 2018 discriminadas en un periodo de 24 horas. La escala azul a la derecha de la gráfica determina el periodo del día.

Sin embargo, para un análisis de datos más detallado de la hora del día en la que el tiburón fue detectado, se tomó por separado el grupo de datos de cada mes, durante todo el periodo de muestreo (2017 - 2018) (Fig. 22). En contraste a la anterior gráfica, la información fue discriminada con base en las detecciones en cada estación por mes y por periodo de observación (Fig. 23). Se utilizaron puntos para representar cada detección y colores para indicar su periodo correspondiente: verde = amanecer, amarillo = día, naranja = atardecer y azul = noche. Los resultados de este análisis indican que el individuo fue detectado en todos los periodos del día independientemente de la zona. Sin embargo, sugiere que el animal se mueve hacia la zona norte con mayor frecuencia en el periodo de la noche, mientras que la zona sur es usada a lo largo de todo el día.

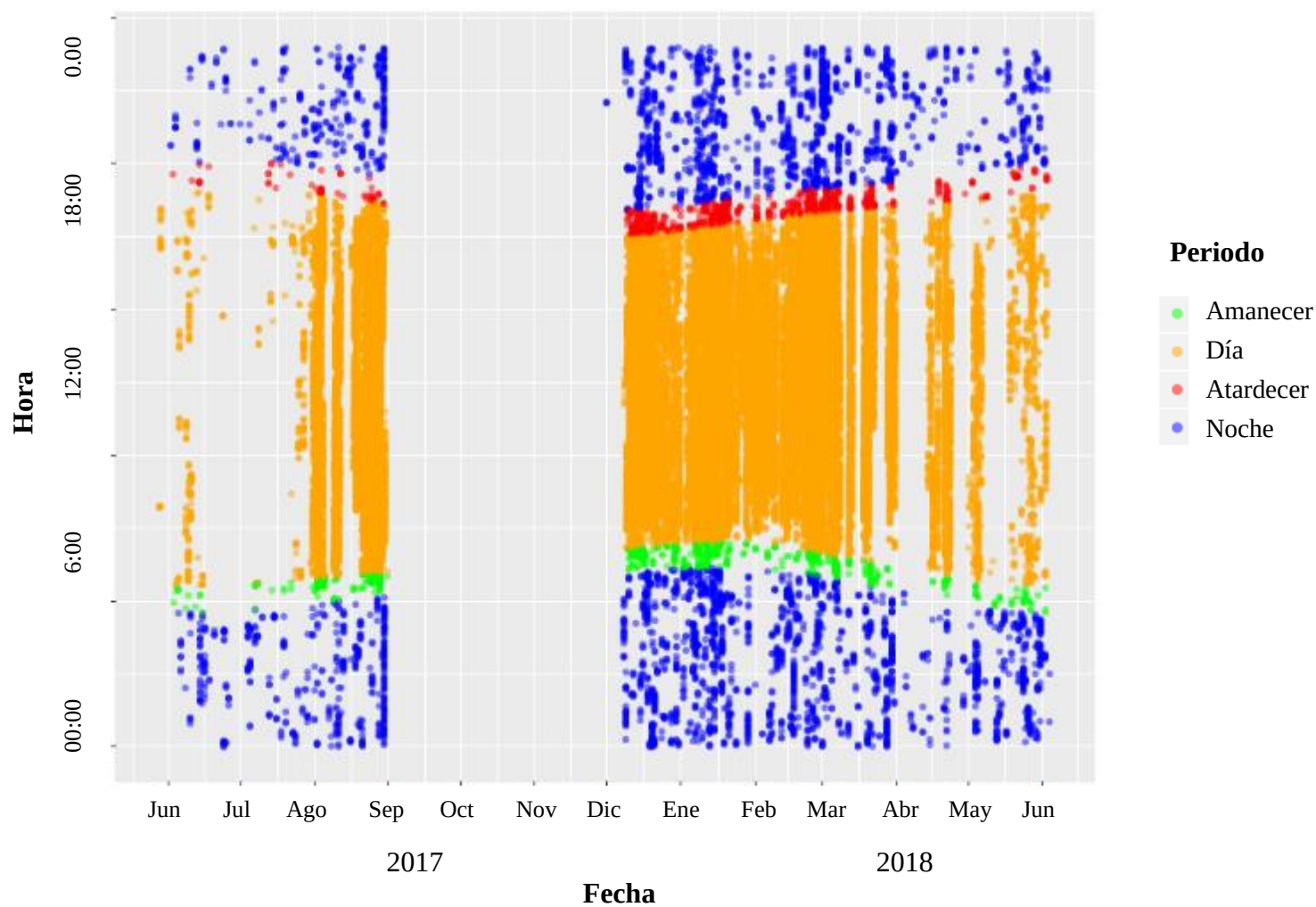


Figura 22. Detecciones de *Jager* registradas mensualmente discriminadas por periodo (año). Cada punto ilustrado indica una detección. Obsérvese la ausencia de registros en todos los receptores entre septiembre e inicios de diciembre de 2017.

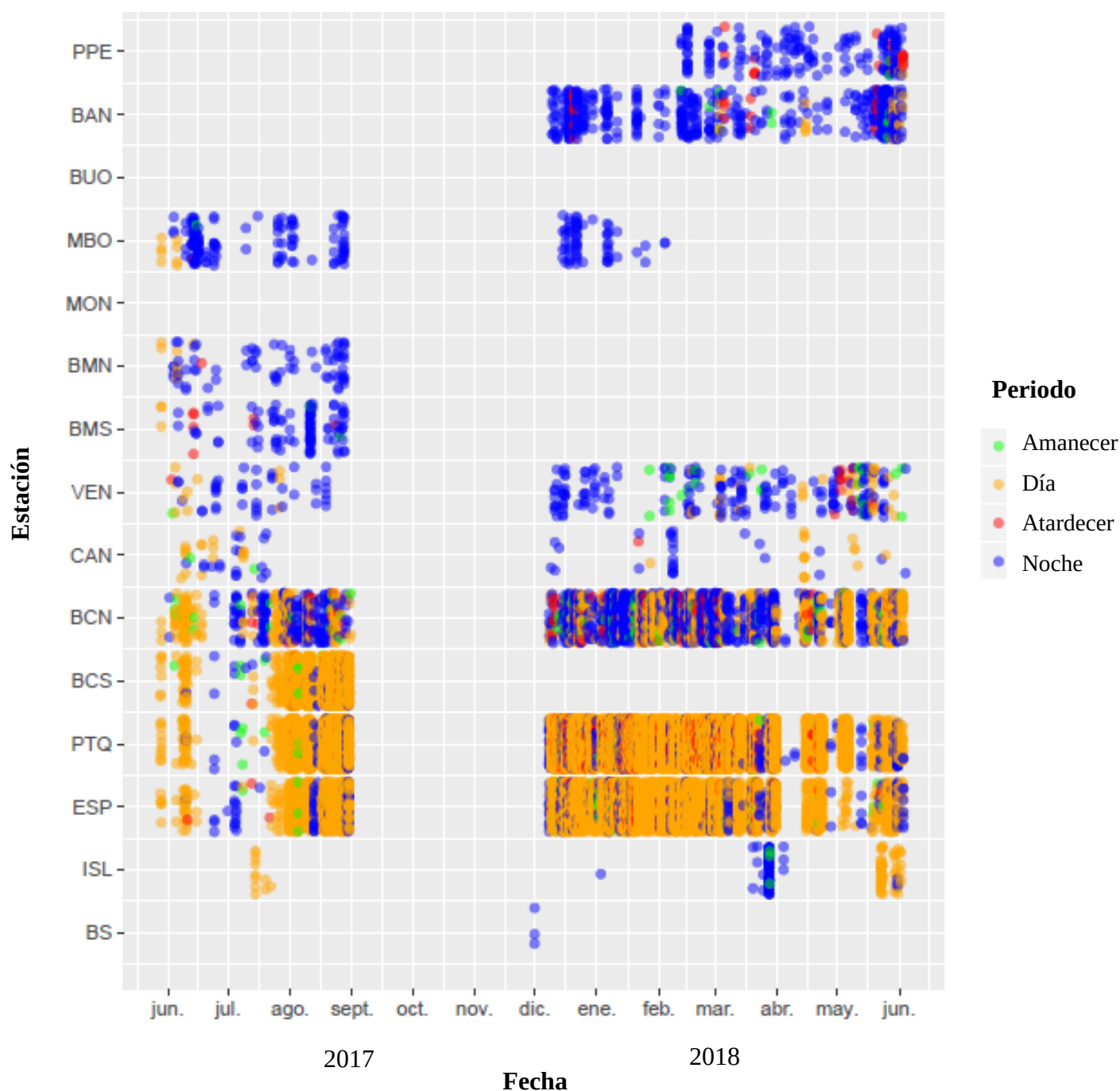


Figura 23. Detecciones de *Jager* registradas en cada estación por mes, discriminadas por el periodo del día. Las estaciones están organizadas de sur a norte, siendo BS la estación más al sur y PPE la estación más al norte. Cada punto ilustrado indica una detección.

Debido a la densidad de puntos que se ilustran en la figura anterior, se desarrolló un otro análisis en el que se agregaron todas las detecciones registradas en el mes en cada estación en función de los periodos del día (Fig. 24). Los resultados de este análisis muestran que,

aunque existe un mayor número de detecciones en los receptores dispuestos en la zona sur del parque, el animal suele moverse a lo largo del día por toda la red de sensores de seguimiento, en la que particularmente parece moverse al norte con mayor frecuencia en las horas de la noche.

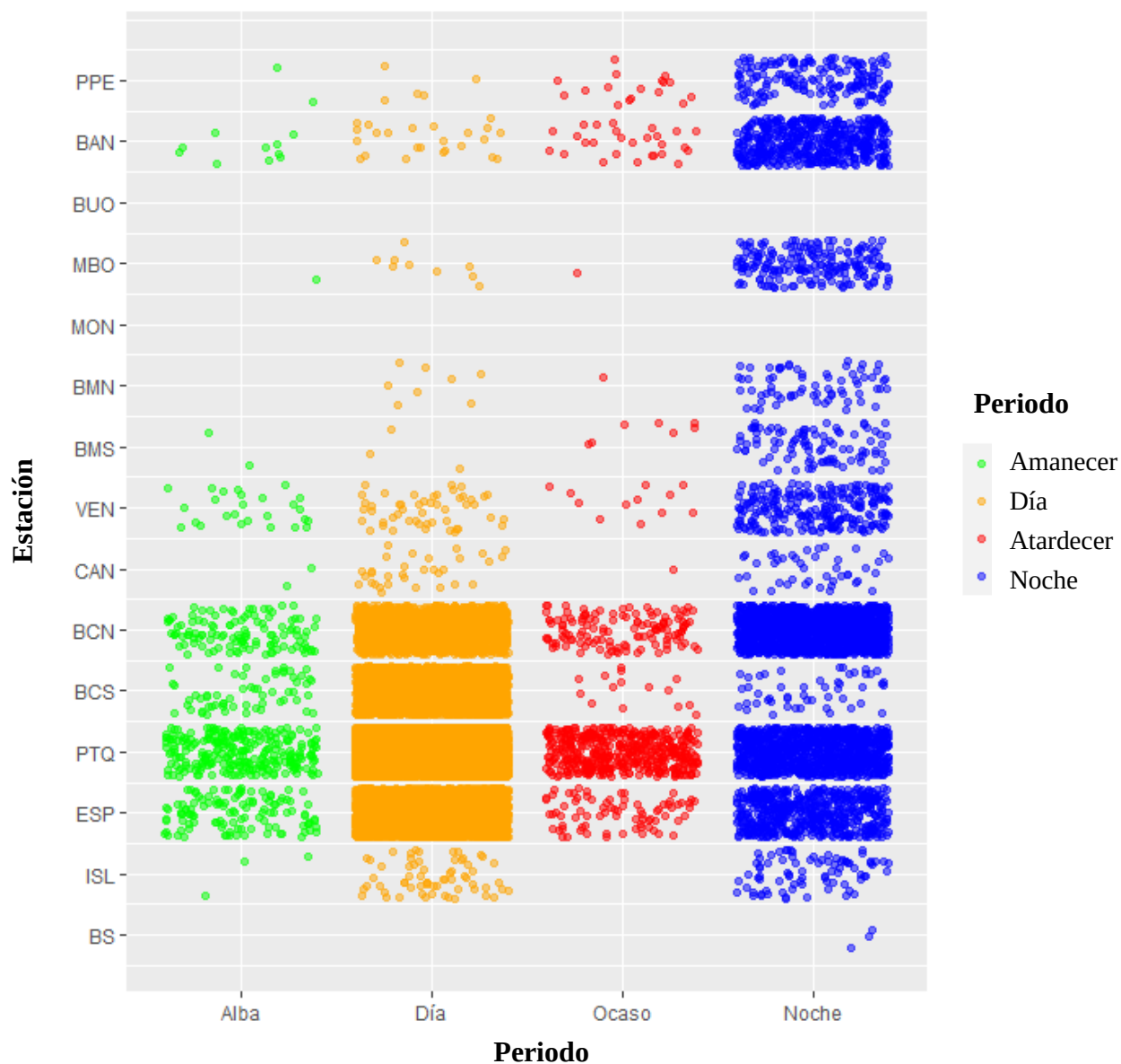


Figura 24. Detecciones de *Jager* en cada estación en función del periodo del día. Las estaciones están organizadas de sur a norte, siendo BS la estación más al sur y PPE la estación más al norte. Cada punto ilustrado indica una detección.

Las observaciones en los puntos más distantes (PPE al norte y BS al sur) hicieron que su área de actividad (calculada a partir del polígono mínimo convexo (PMC)) fuera de aproximadamente 249 km², la más grande registrada a lo largo del estudio. Sin embargo, las áreas cambiaron de tamaño de acuerdo con el mes en que fue observado, ocupando entre 10.7 km² (registrado en junio y septiembre de 2017) y 246 km² (en febrero de 2018), para un promedio de 122.65 km². En el caso de *Tom*, el otro macho adulto (marcado en 2019 y detectado hasta junio de 2020) tuvo un área de actividad total de 20.7 km², que varió mensualmente desde un kilómetro cuadrado (registrado en abril de 2019) hasta 15.5 km² (en mayo y junio de 2019), obteniendo un promedio de 6.78 km². Los individuos juveniles presentaron áreas de actividad visualmente más pequeñas. El área total de actividad calculada para *Nemo* fue de 17.3 km², la cual varió entre los 0.29 km (mayo a septiembre de 2019) y 17.3 km (de mayo a agosto de 2020), con un promedio de 6.78 km². Por último, *Philip* fue el individuo con menor número de detecciones, al cual se le estimó un área de actividad total aproximada de 15 km², que varió desde los 0.29 hasta los 9.79 km², con promedio total de 6.06 km².

Se desarrollaron gráficos de mosaico a partir de tablas de contingencia (Fienly, 1994), en los que con base en el total de detecciones de cada zona (sumando las detecciones de todo el tiempo de muestreo), se probará la hipótesis de independencia entre zona y periodo. Los resultados de la prueba de chi-cuadrado de Pearson ($\chi^2 = 8422.7$, $gl = 3$, $p = 2.2e^{-16}$) revelaron que existen diferencias significativas para rechazar la hipótesis nula, lo que indica que efectivamente existe una relación entre la zona y los periodos del día. En la figura 25 se destacan las asociaciones positivas (preferencia) entre la zona norte y el periodo “amanecer”, “atardecer” y “noche, y entre la zona sur y el periodo “día”. Además, se destaca la asociación negativa (evasión) entre la zona norte y el periodo “día” y entre la zona sur y el periodo “noche”.

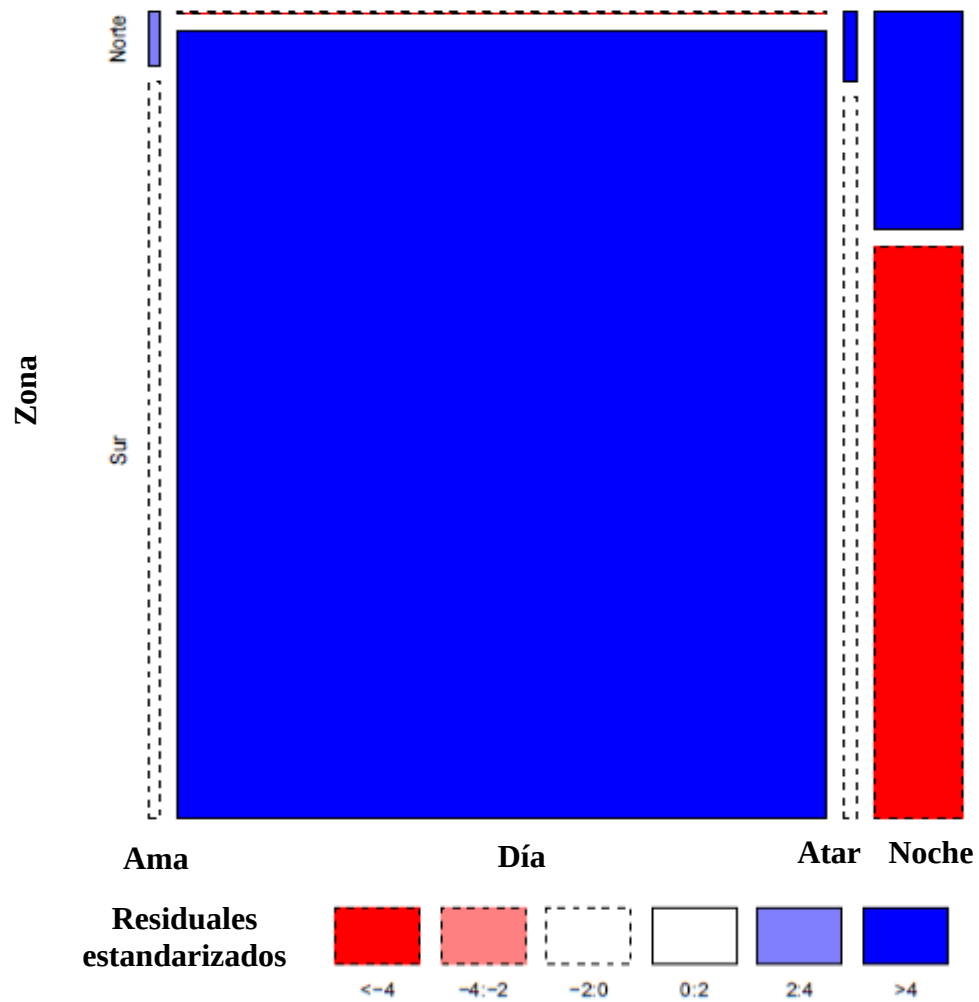


Figura 25. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detecciones de *Jager*, las zonas y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. Ama: Amanecer; Atar: Atardecer.

Teniendo en cuenta el número de estaciones de cada zona, se hicieron tablas de contingencia y gráficas de mosaico para la zona norte y la zona sur. Los resultados de la prueba para la zona norte fueron $\chi^2 = 120.12$, $gl = 15$, $p = 2.2e^{-16}$ y para la zona sur, $\chi^2 = 8258.5$, $gl = 18$, $p = 2.2e^{-16}$. En la figura 26 se muestran las relaciones de asociación entre las estaciones de la zona norte, el periodo del día, en el que se destacan las asociaciones positivas (preferencia) entre la estación vencedor y el periodo “amanecer” y “día”.

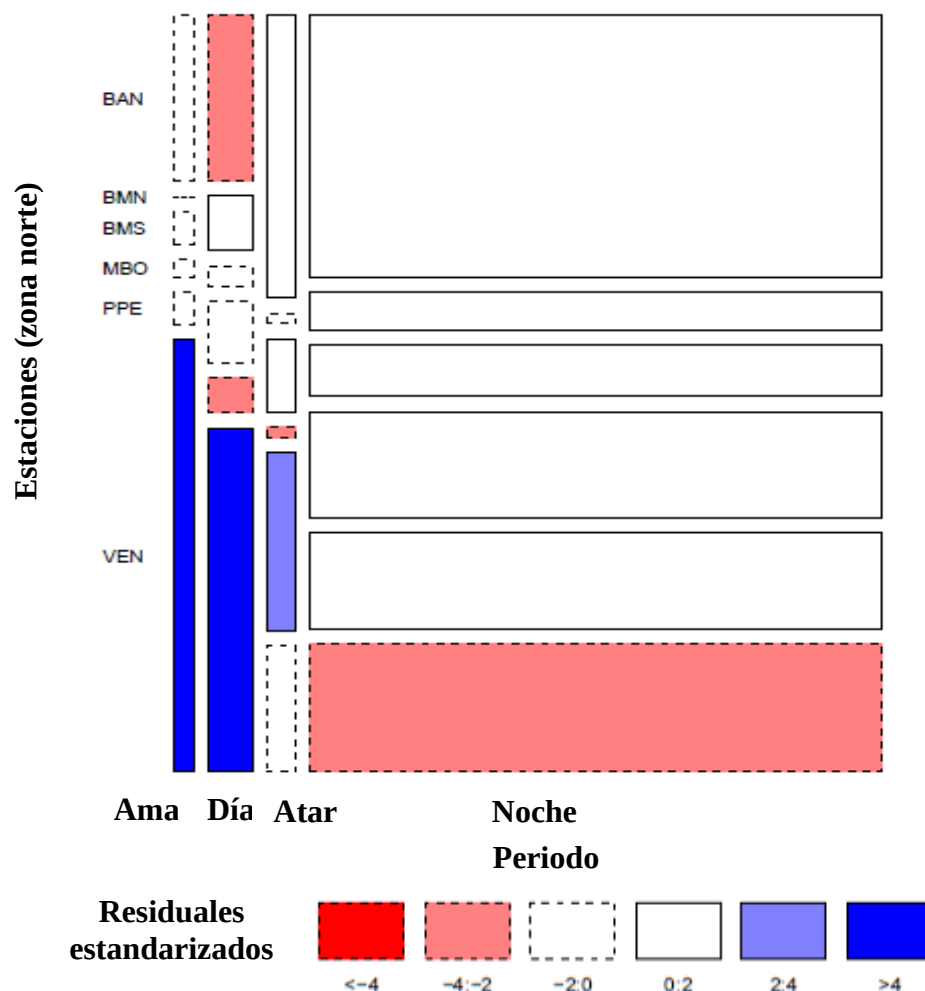


Figura 26. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detecciones de *Jager*, las estaciones de la zona norte y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. Ama: Amanecer Atar: Atardecer.

En la figura 27 se muestran las relaciones de asociación entre las estaciones de la zona sur, el periodo del día y el número de detecciones de *Jager*, en el que se destacan las asociaciones positivas (preferencia) entre la estación “BCN” y los periodos “amanecer”, “atardecer” y “noche”, la estación “BCS” y el periodo “día”, las estaciones “CAN” e “ISL” y el periodo “noche”, y entre la estación “PTQ” y el periodo “día”. Las asociaciones negativas (evasión) se observaron entre las estaciones “BCN” y “CAN” y el periodo “día”, la estación “BCS” y los periodos “atardecer” y “noche”, la estación “ESP” y el periodo “atardecer”, y entre la estación “PTQ” y los periodos “amanecer” y “noche”.

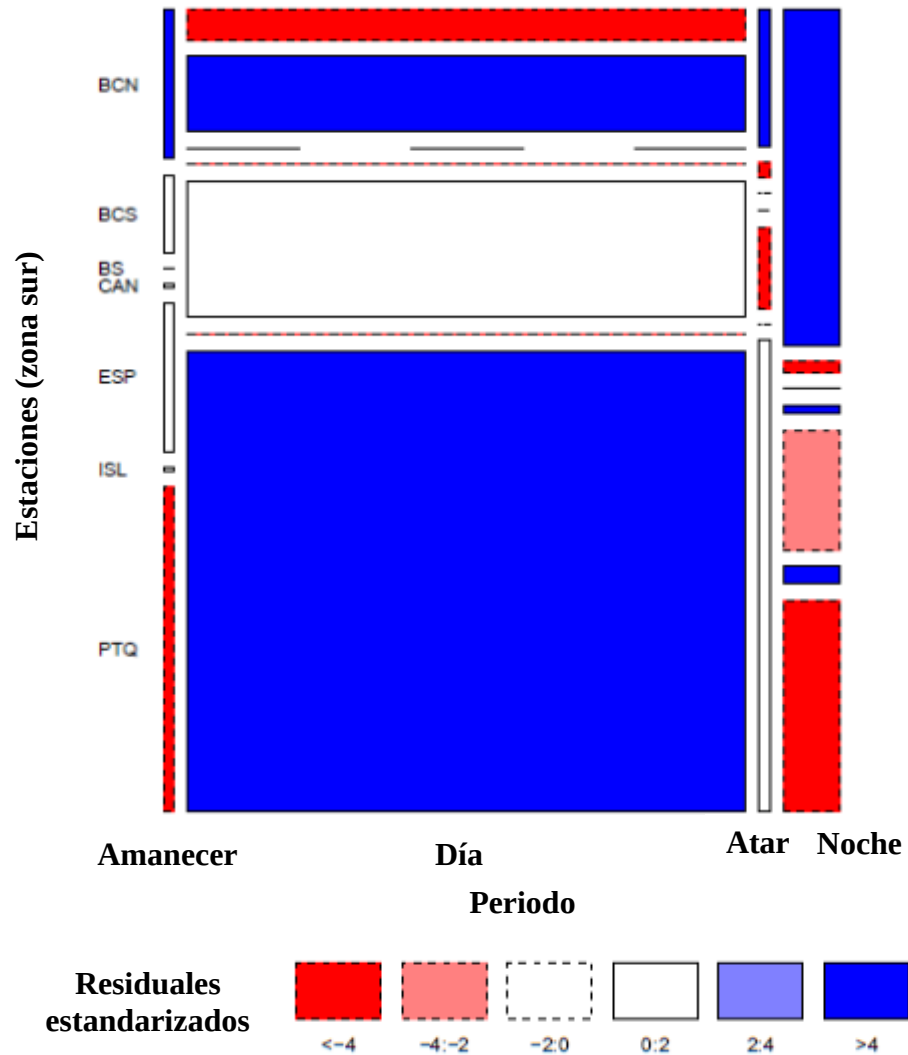


Figura 27. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detecciones de *Jager*, las estaciones de la zona sur y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. Atar: Atardecer.

Teniendo en cuenta que la mayoría de las estaciones se encuentran dentro de los límites del Parque (puesto que “PPE” y “BS” están fuera de los límites) se integraron las detecciones de todas las estaciones (incluyendo las detecciones de “PPE” y “BS”) para calcular el índice de residencia (IR) mensual de *Jager* en el Parque Nacional Cabo Pulmo (Tabla VI). Siguiendo los lineamientos de Fontes *et al.*, (2008), el IR se calculó como el número total de días detectado (DD) entre el número de días de todo el periodo de seguimiento es decir, entre el total de días de cada mes dentro del periodo de muestreo (tiempo entre el momento

que fue marcado y se obtuvo la última detección) (Fig. 28), así cada “periodo de seguimiento” tendría el número de días correspondiente a la totalidad de días del mes. El único mes que no fue incluido fue mayo debido a que el animal fue marcado el día 27 y solo pudo ser visto un día (entre el 27 y el 31 de mayo), por lo tanto, no habría sido coherente dividir este día entre los 30 días del mes.

Tabla VI. Índice de residencia (IR) mensual de *Jager* en el Parque Nacional Cabo Pulmo en 2017 y 2018. ND: No datos disponibles

Año	Mes	Total de días con detección	Número de días del mes	IR
2017	Junio	24	30	0.8
	Julio	27	31	0.87
	Agosto	31	31	1
	Septiembre	ND	30	ND
	Octubre	ND	31	ND
	Noviembre	1	30	0.03
	Diciembre	24	31	0.77
2018	Enero	30	31	0.96
	Febrero	26	28	0.93
	Marzo	31	31	1
	Abril	23	30	0.77
	Mayo	31	31	1
	Junio	3	30	0.1

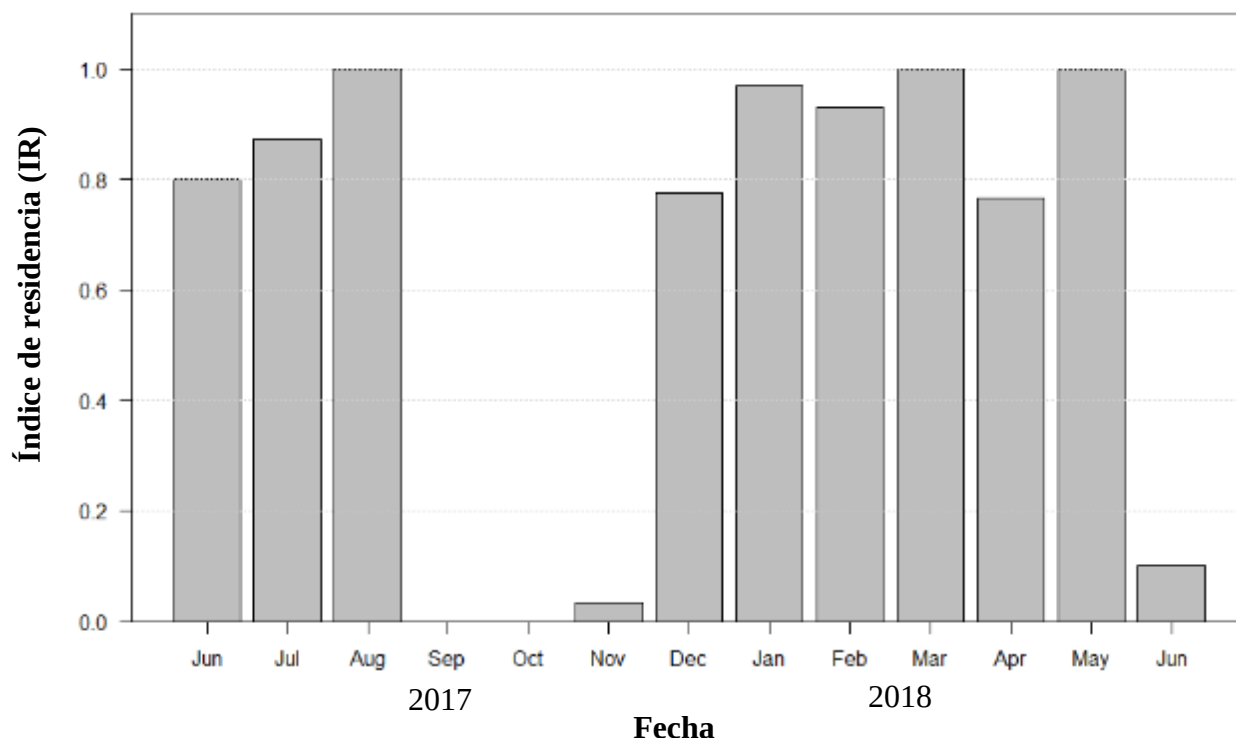


Figura 28. Índice de residencia (IR) mensual de *Jager* en el Parque Nacional Cabo Pulmo

Debido a que en esta investigación no se tomaron variables medioambientales *in situ*, para definir si existía algún tipo de relación entre la temperatura superficial del mar o a 25 metros de profundidad (media en la que se encuentran las estaciones de seguimiento) y el número de detecciones a través del tiempo, se tomaron datos de temperatura del Parque generados por el programa Copernicus a través de la plataforma “DIAS” (*Data Information Access Service*). A partir del satélite “Sentinel-3”, se obtuvieron imágenes del campo visible al infrarrojo térmico, gracias al radiómetro “*Sea and Land Surface Temperature Radiometer*” (SLSTR), con el que finalmente se graficaron las temperaturas diarias de la superficie marina (línea roja) y a 25 metros de profundidad (línea azul) desde enero de 2017 hasta enero de 2019, con el fin de analizar su variabilidad dentro de un ciclo anual (Fig. 29).

Estos datos fueron contrastados con el número de detecciones por día (puntos grises) dentro del periodo de muestreo para determinar si existía un patrón entre la temperatura y la frecuencia de detecciones. Los resultados sugieren que los meses con temperaturas más altas (agosto e inicios de

septiembre de 2017) fueron los que presentaron pocos días en el que el animal fue detectado, sin embargo, fueron los días con más detecciones por día (con un máximo de 580 detecciones en un día) dentro de todo el periodo de muestreo. Lo anterior es contrastado con los meses que presentaron las temperaturas más bajas (diciembre de 2018 y abril de 2019) durante el muestreo, que, aunque se observa una menor cantidad de detecciones por día (entre 100 y 500 registros), se ve una mayor cantidad de días con detección.

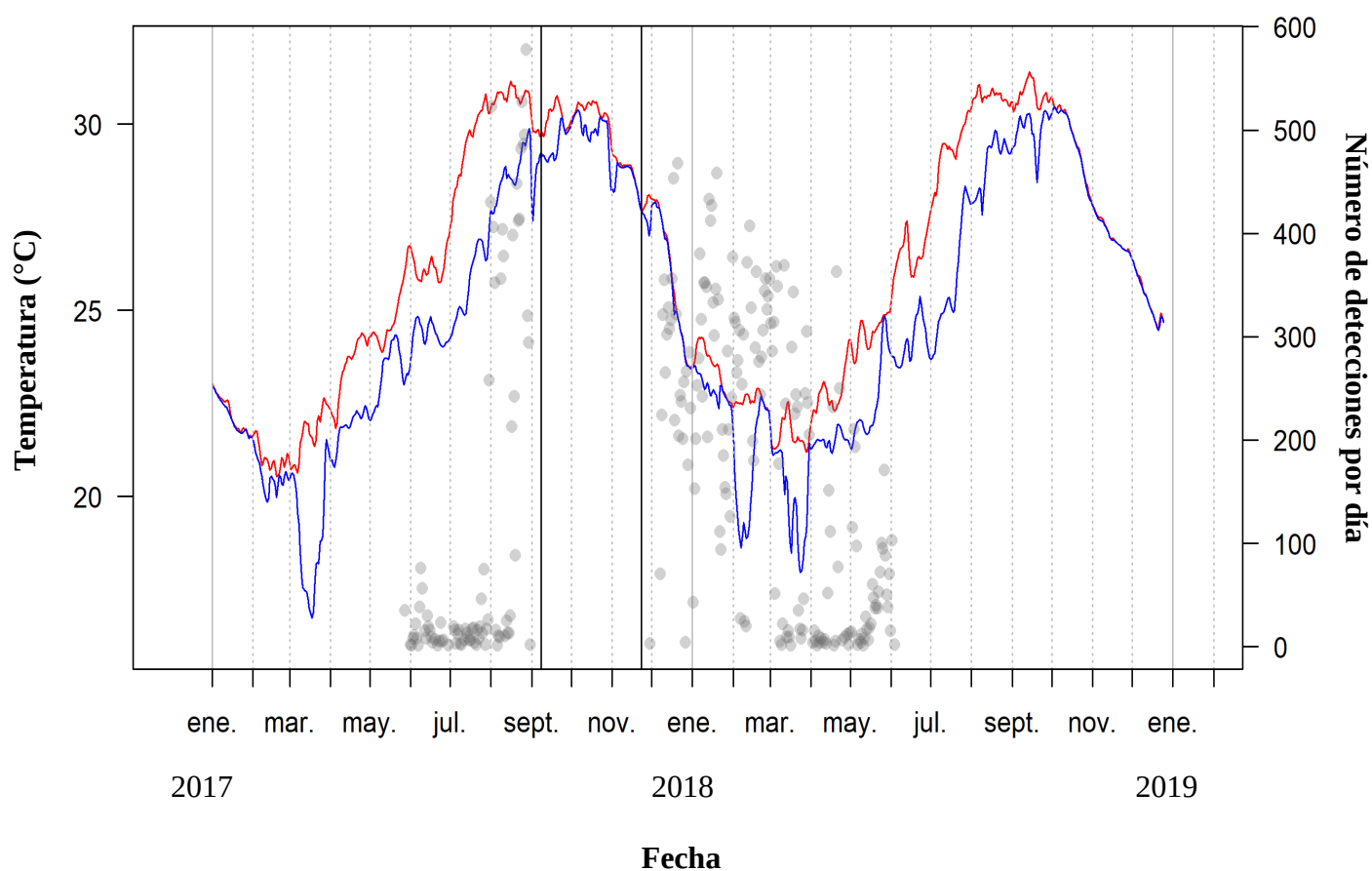


Figura 29. Comparación entre la temperatura superficial del mar (línea roja), temperatura a 25 metros (línea azul), con el número de detecciones de *Jager* por día (puntos grises). Las líneas grises entre septiembre y noviembre indican el periodo en el que no se obtuvo ninguna detección..

Análisis de resultados de telemetría acústica de “Tom”

La red de receptores correspondiente al periodo entre de abril de 2019 y 2020 (fechas en las que el individuo fue detectado) estuvo compuesta por 17 receptores acústicos (Fig. 30), de los cuales 10 presentaron (entre todos) un total de 12,821 detecciones. Las detecciones estuvieron distribuidas entre cuatro estaciones pertenecientes a la zona norte y seis a la zona sur (Tabla VII). Al igual que con los datos de *Jager*, los análisis se hicieron a partir del porcentaje del total de detecciones por estación (Fig. 31).

Debido a que la disposición de los nombres de los receptores corresponde a un orden latitudinal respecto a su coordenada, el eje Y representa a los receptores en orden Sur - Norte, siendo el “ISL” la estación ubicada más al sur y “CPN” la estación más al norte en la que se obtuvieron detecciones. El resultado indicó que existe una mayor frecuencia de detección en los receptores ubicados en la zona sur del Parque. El análisis de detecciones por un periodo de 24 horas (Fig. 32) de Tom demostró que hubo registros durante todos los periodos con una mayor frecuencia de detecciones durante el periodo “día”.

Sin embargo, para un análisis más detallado sobre la hora del día en la que el tiburón fue detectado a lo largo del muestreo, se tomaron los datos de todos los receptores en los que el tiburón fue detectado separados por mes (Fig. 33). El resultado indica que el individuo fue registrado en ocho de los 12 meses dentro del periodo de detección, con una mayor frecuencia durante el periodo “día”. Por su parte, el análisis que integró las detecciones obtenidas en cada mes de muestreo, discriminándolas a su vez entre el periodo del día en que fueron registradas (Fig. 34) mostró que en 2019 *Tom* fue detectado durante abril y mayo en los receptores “ISL”, “PTQ”, “BCS”, “BCN”, durante todos los periodos del día y en los receptores de la zona norte “MOR” Y “MR” con mayor frecuencia en el periodo “noche”. Las observaciones en 2020 difirieron de 2019 en cuanto al número de receptores, debido a que solo fue detectado durante los meses de enero a abril; en el receptor “PTQ” durante todos los periodos y en “TIN” con mayor frecuencia durante la noche.

Aunque *Tom* tiene menos detecciones que *Jager*, la gráfica anterior todavía acumula una alta densidad de puntos que no permiten una buena descripción, por ello se complementó nuevamente con el análisis en el que se agregaron todas las detecciones registradas en el mes en cada estación en función de los periodos del día (Fig. 35). Los resultados de este análisis demuestran que, aunque existe una mayor frecuencia de detecciones en la zona sur del Parque, en especial en la estación “PTQ” durante todos los periodos del día, el animal se desplaza hacia la zona norte durante el periodo “noche”, patrón similar al descrito por *Jager*.

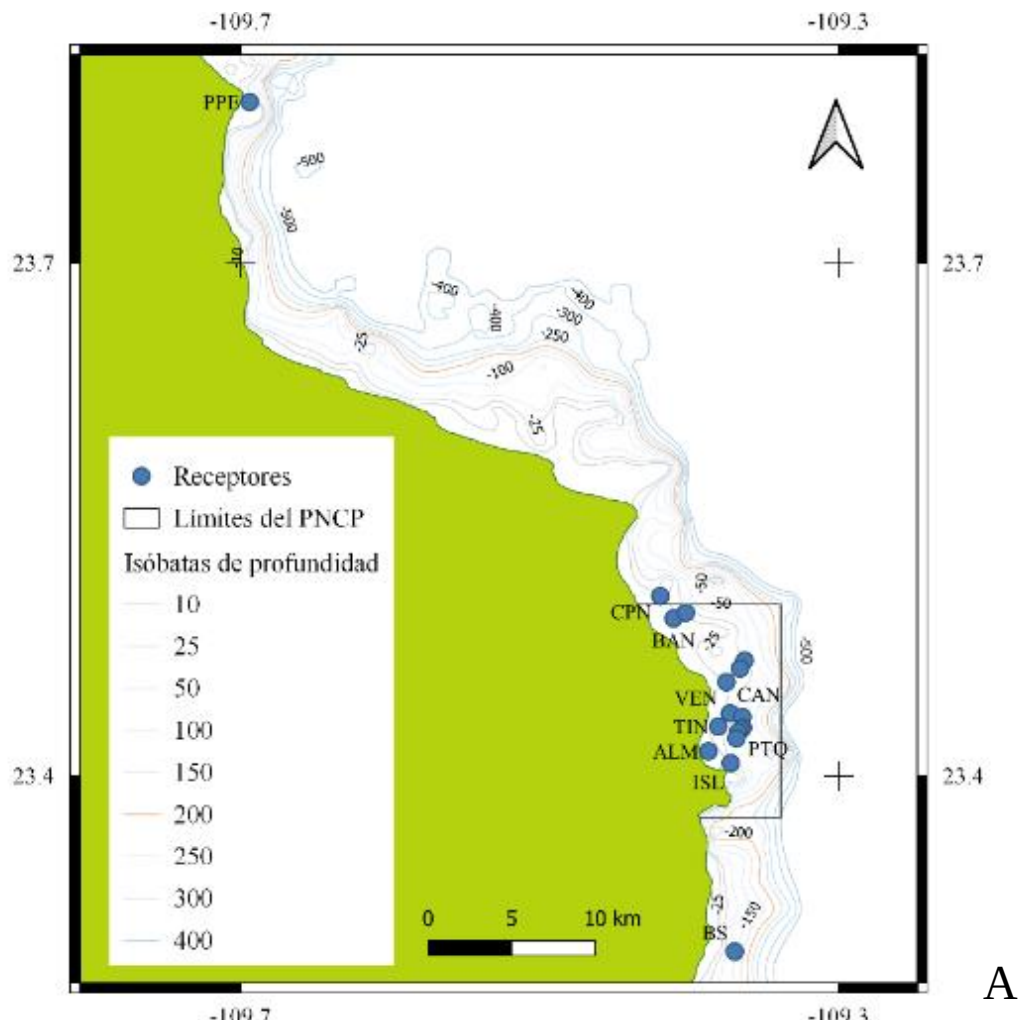
Las tablas de contingencia y las gráficas de mosaico nuevamente fueron utilizadas para probar la hipótesis de independencia entre la zona y el periodo del día tomando los datos de las detecciones de todos los receptores. Los resultados de la prueba de chi-cuadrado de Pearson ($\chi^2 = 658.22$, $gl = 3$, $p = 2.2e^{-16}$) revelaron que existen diferencias significativas para rechazar la hipótesis nula y que por lo tanto se puede afirmar que si existe una relación entre la zona y el periodo.

La figura 36 destaca solo una asociación positiva (preferencia) entre la zona norte y el periodo “atardecer”, y dos asociaciones negativas (evasión), la primera entre la zona norte y el periodo “día” y la segunda entre la zona sur y el periodo “atardecer”. En el caso de la prueba para determinar si existe relación entre el periodo del día y los receptores de la zona norte, los resultados de la prueba chi-cuadrado de Pearson ($\chi^2 = 125.34$, $gl = 9$, $p = 2.2 e^{-16}$) nuevamente demuestran que existen diferencias significativas, y por lo tanto existe relación entre las variables. La figura 37 destaca las asociaciones positivas entre la estación “MOR” y el periodo “atardecer”, la estación “MR” y los periodos “día” y “noche”, y la estación “VEN” y el periodo “Día”.

Las asociaciones negativas (evasión) estuvieron representadas por una única estación (“MR”) en un único periodo (“atardecer”). Por su parte, los resultados obtenidos a partir de los datos correspondientes a las estaciones de la zona sur ($\chi^2 = 1736.9$, $gl = 15$, $p = 2.2e^{-16}$) (Fig. 38) mostraron una asociación positiva entre las estaciones “BCN”, “BCS” “CAN” “ISL” y “TIN” con el periodo “atardecer”, la estación “ISL” con el periodo “amanecer”, y

la estación “PTQ” con el periodo “día”. La única relación negativa evidente fue entre la estación “PTQ” y el periodo “Atardecer”.

El índice de residencia (IR) mensual calculado para *Tom* en el Parque Nacional Cabo Pulmo (Tabla VIII) presentó diferencias entre los meses durante el periodo de muestreo. Mientras en 2019 se obtuvo un IR de 0.23 en el mes de abril, mayo presentó un IR 0.67, sin embargo, se debe tener en cuenta que *Tom* fue marcado el 13 de abril y por lo tanto no tenemos registro de la presencia o ausencia en 13 de los 30 días del mes dentro del PNCP. En 2020 los valores de IR fueron un poco más altos: 0.71 en enero, 0.72 en febrero, 0.61 en marzo y 0.13 en abril, lo que sugiere que, aunque el animal fue visto con regularidad durante ambos periodos, no se tiene información suficiente para determinar si el individuo es residente del Parque (Fig. 39).



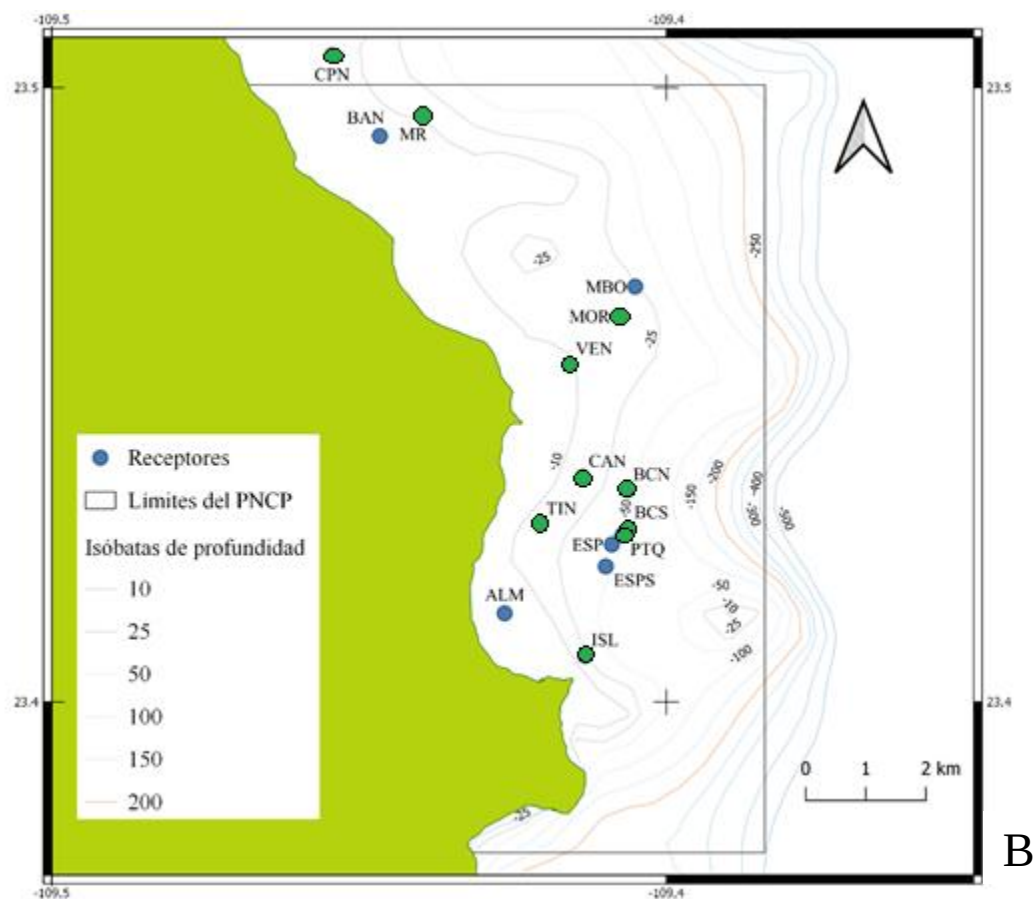


Figura 30. (A) Mapa de la red de receptores utilizada entre 2019 y 2020. (B) Acercamiento a los receptores dentro del Parque Nacional Cabo Pulmo. Los puntos indican la ubicación de cada receptor, el color azul representa los receptores en los que no hubo ningún registro y los puntos verdes los receptores en los que se detectó *Tom*.

Tabla VII. Total de detecciones de *Tom* obtenidas en cada estación de cada zona entre abril de 2019 y 2020.

Zona	Receptor	Abreviación	Latitud	Longitud	Total de detecciones
Norte	Cabo Pulmo Norte	CPN	23.5052	-109.4544	7
	Miramar	MR	23.49553	-109.43951	57
	Morros	MOR	23.4621	-109.4078	103
	Vencedor	VEN	23.45492	-109.41576	11
Sur	Cantil	CAN	23.43661	-109.41361	2
	Bajo Cien Norte	BCN	23.43447	-109.40636	177
	Bajo Cien Sur	BCS	23.42826	-109.40617	630
	Tinajitas	TIN	23.42889	-109.4205	71
	Punto 15	PTQ	23.42714	-109.4071	11907
	Islote	ISL	23.40751	-109.41322	33

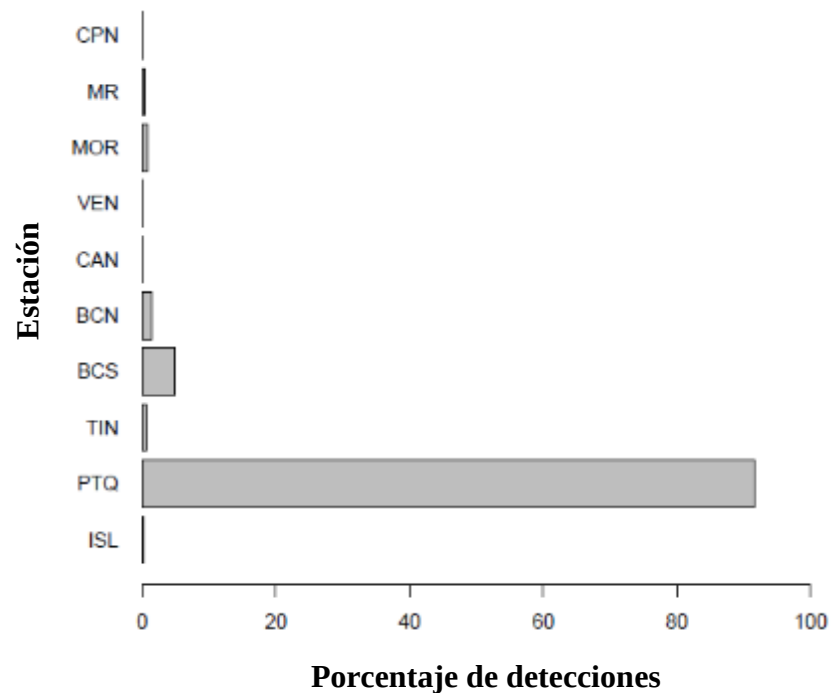


Figura 31. Porcentaje de detecciones de Tom en cada estación. La distribución de las estaciones en el eje Y responde a un orden de sur a norte, siendo “ISL” la más al Sur y “CPN” la estación más al norte.

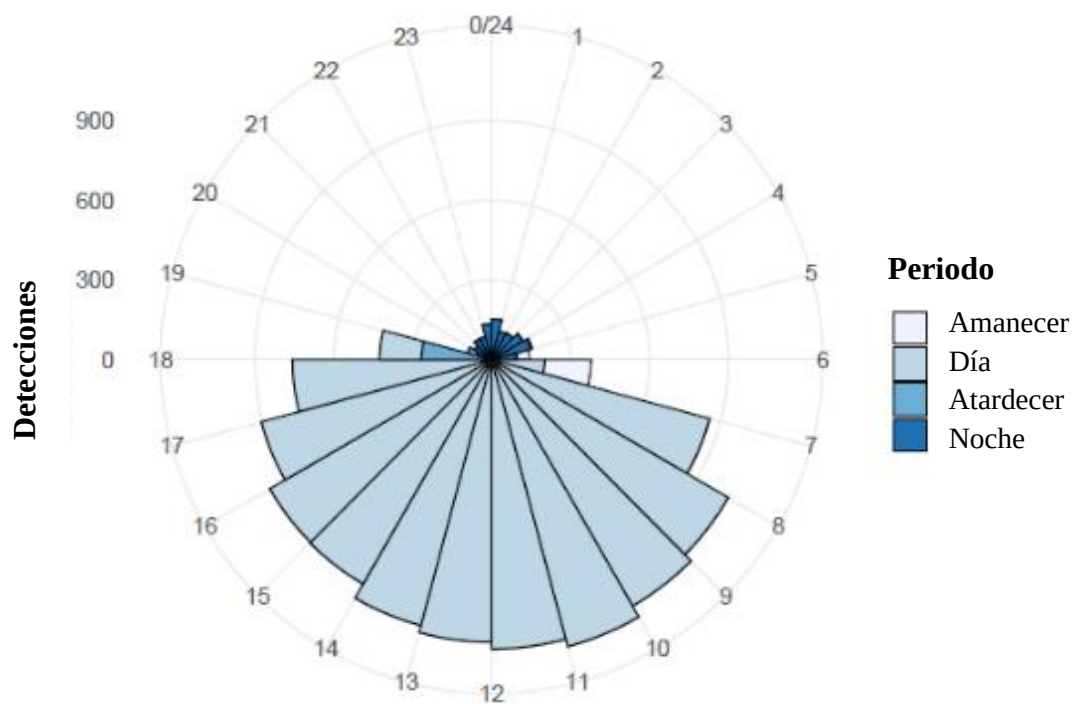


Figura 32. Número total de detecciones de Tom obtenidas entre abril de 2019 y 2020, discriminadas en un periodo de 24 horas. La escala azul a la derecha de la gráfica determina el periodo del día.

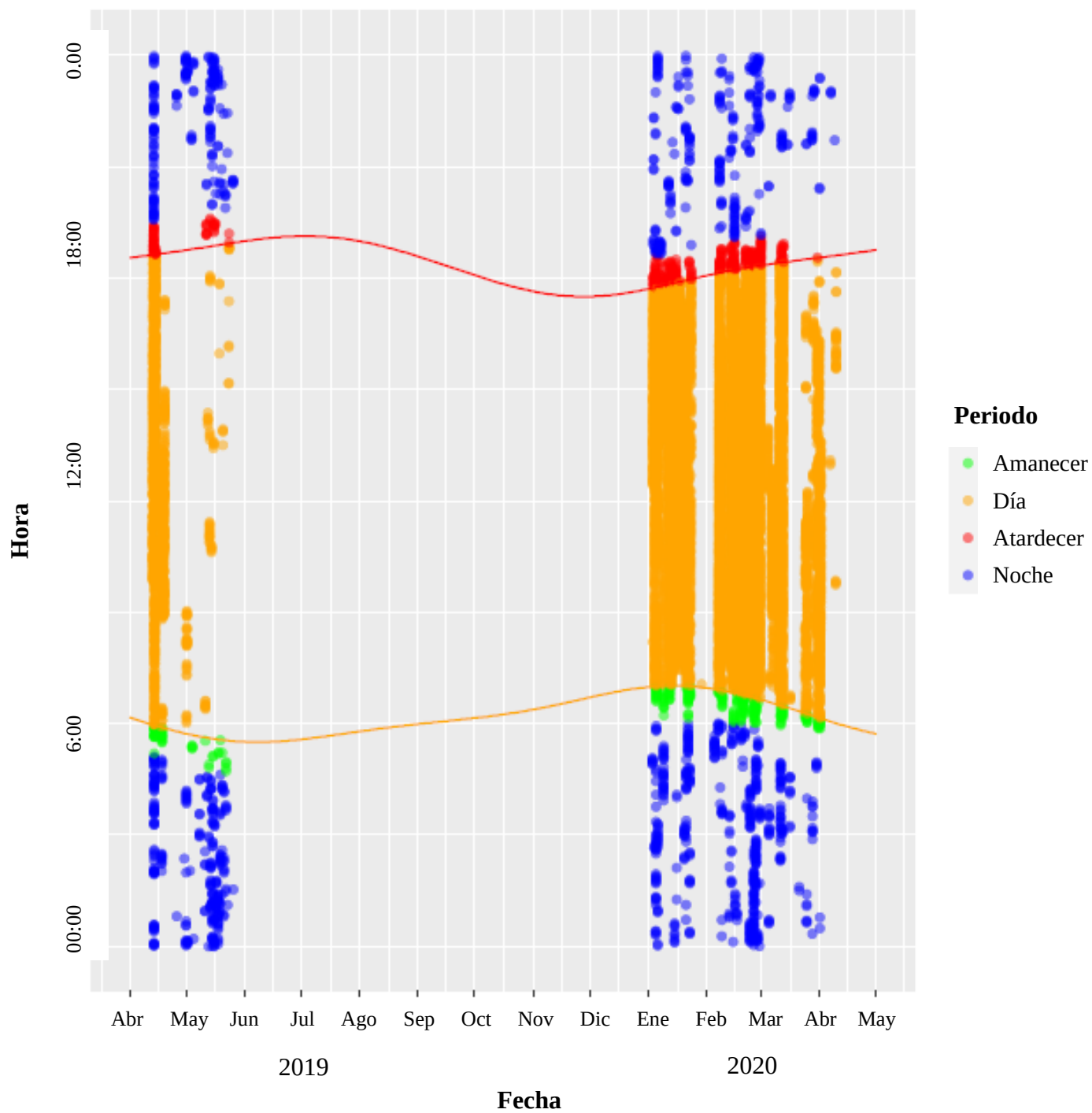


Figura 33. Detecciones de *Tom* registradas en cada mes discriminadas por periodo. Cada punto ilustrado indica una detección.

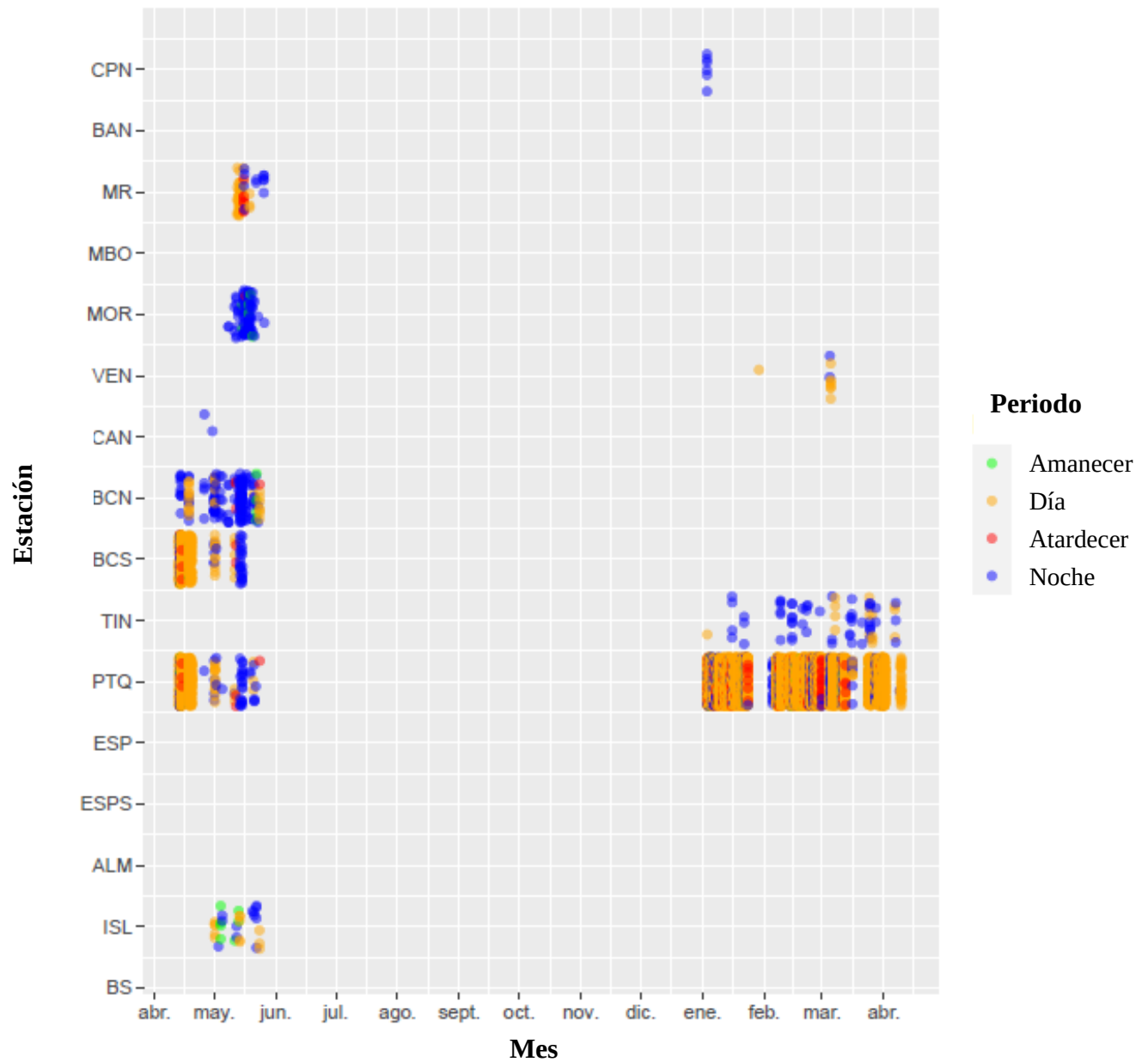


Figura 34. Detecciones de *Tom* registradas en cada estación por mes, discriminadas por el periodo del día. Las estaciones están organizadas de sur a norte, siendo “BS” la estación más al sur y “CPN” la estación más al norte. Cada punto ilustrado indica una detección.

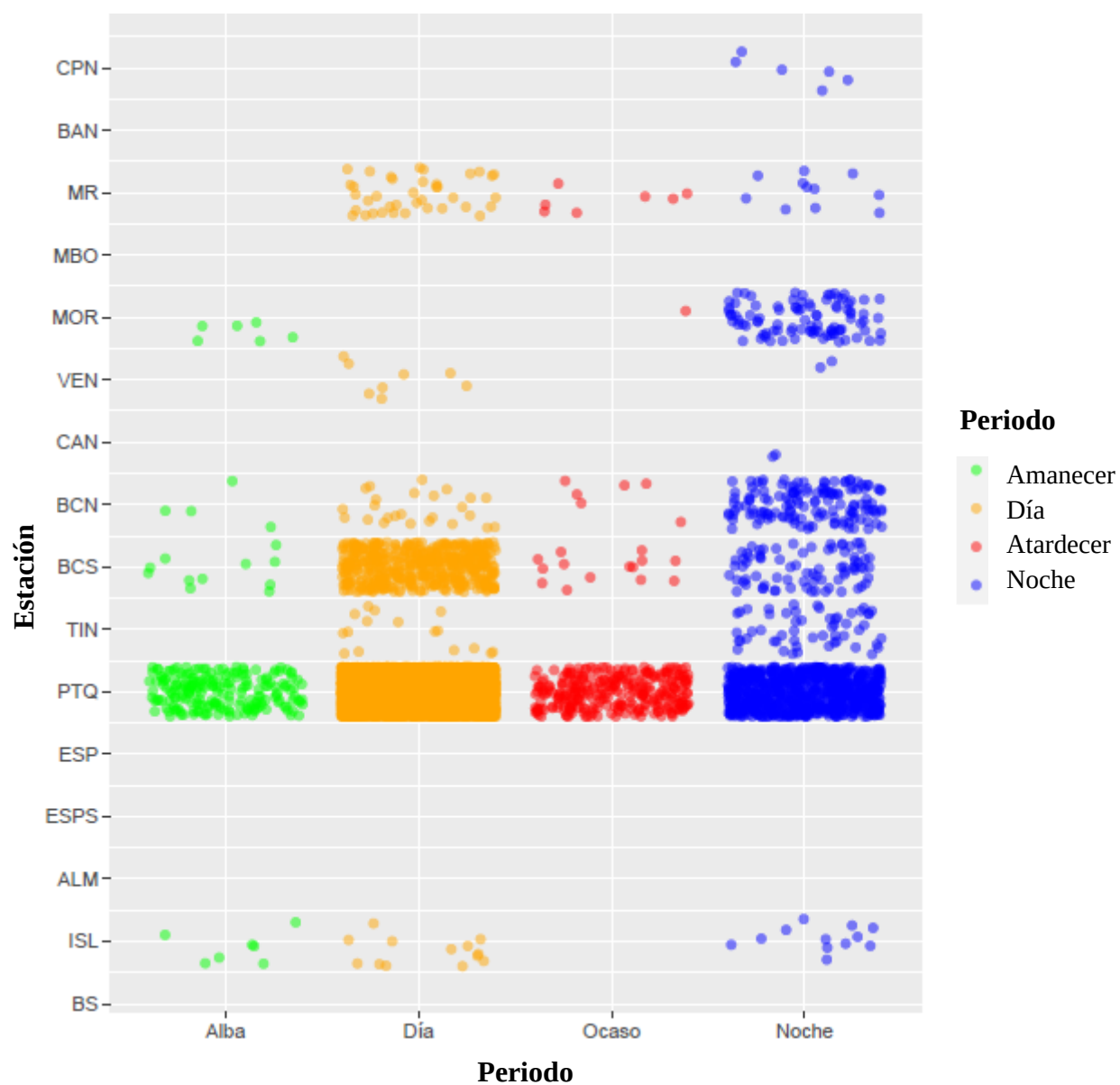


Figura 35. Detecciones de *Tom* en cada estación en función del periodo del día. Las estaciones están organizadas de sur a norte, siendo “BS” la estación más al sur y “CPN” la estación más al norte. Cada punto ilustrado indica una detección.

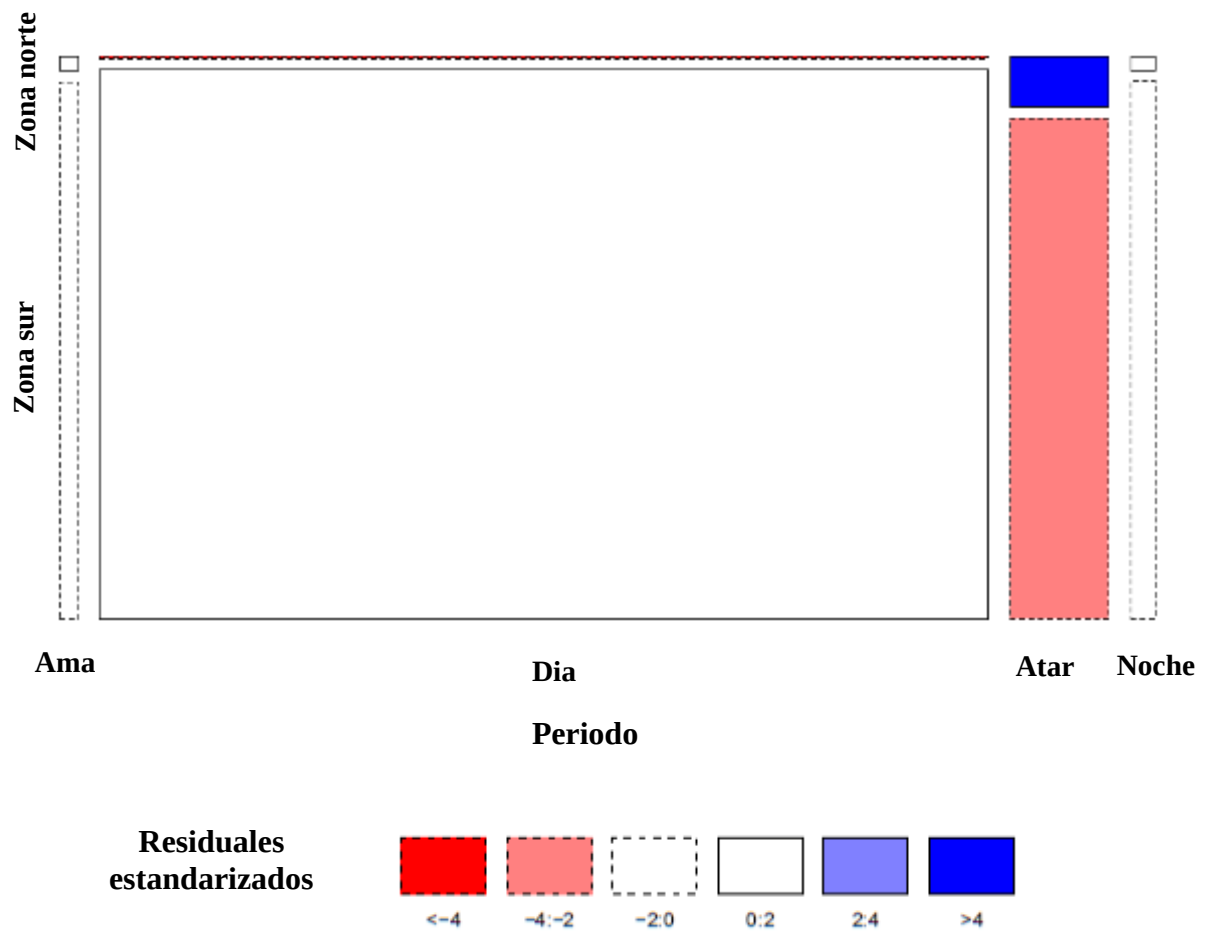


Figura 36. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detecciones de Tom, las zonas y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. Ama: Amanecer; Atar: Atardecer

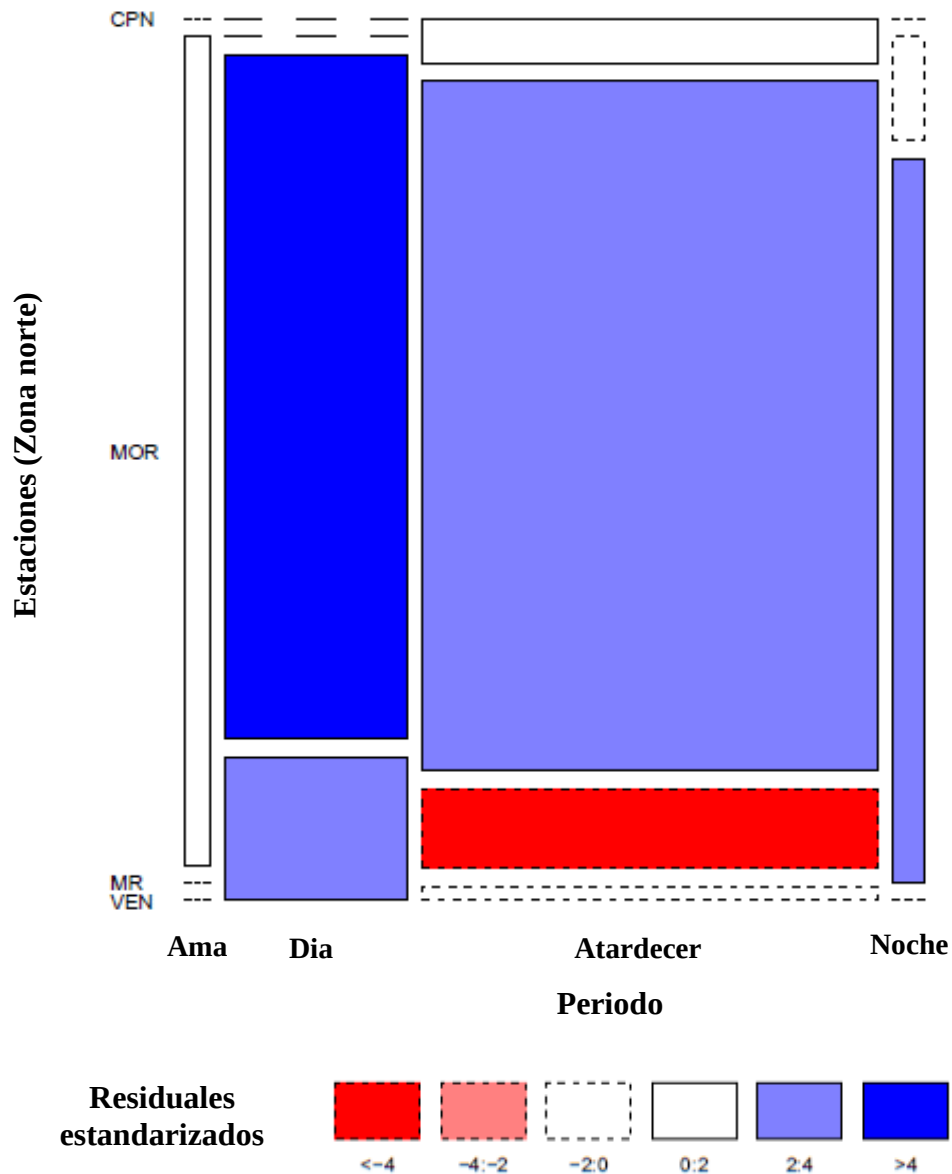


Figura 37. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detección de Tom las estaciones de la zona norte y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. Ama: Amanecer.

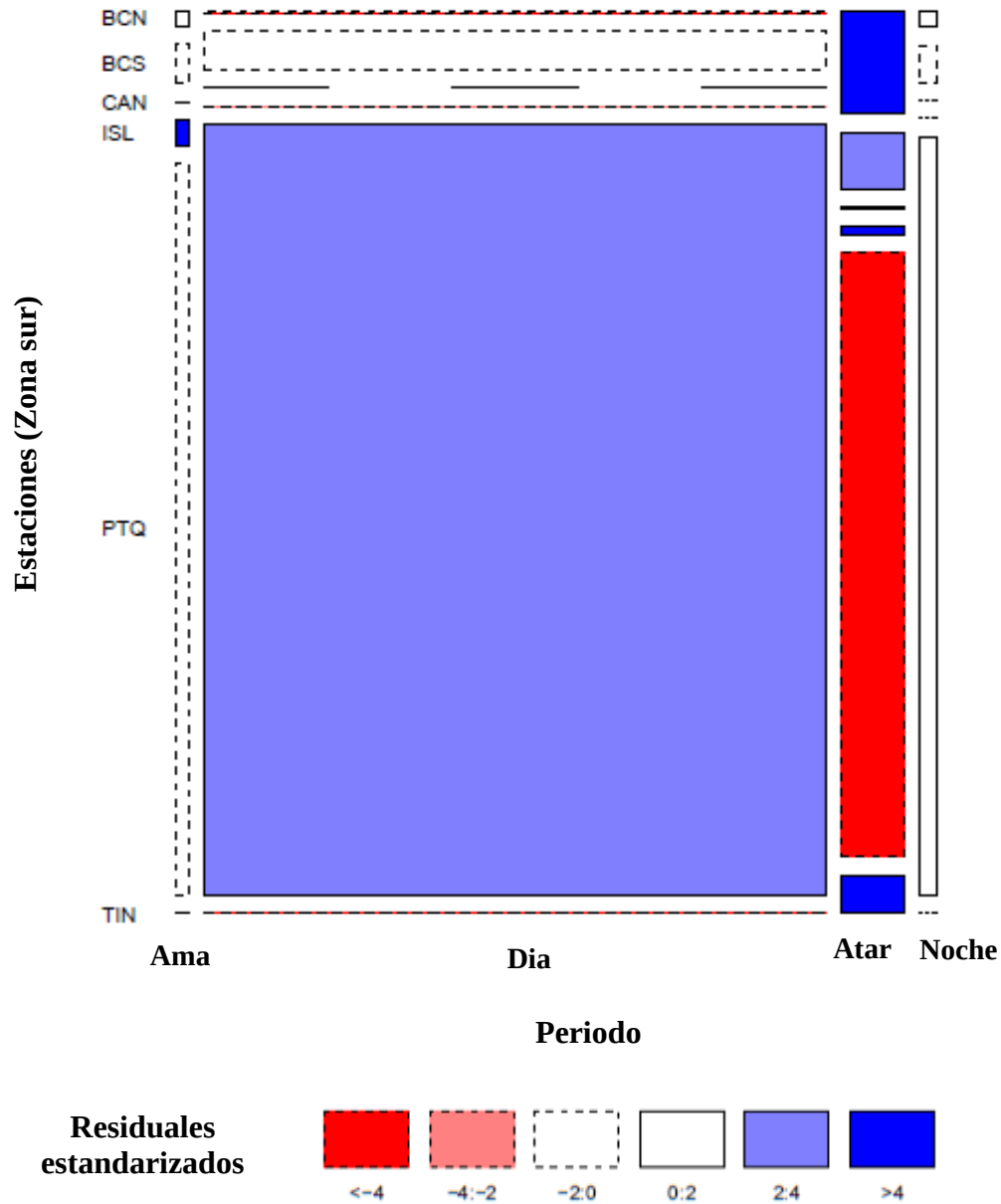


Figura 38. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detección de *Tom*, las estaciones de la zona sur y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. Ama: Amanecer; Atar: Atardecer.

Tabla VIII. Índice de residencia (IR) *Tom* en el Parque Nacional Cabo Pulmo en los meses de abril de 2019 y 2020.

Año	Mes	Total de días con detección	Número de días del mes	IR
2019	Abril	7	30	0.23
	Mayo	21	31	0.67
2020	Enero	22	31	0.71
	Febrero	21	29	0.72
	Marzo	19	31	0.61
	Abril	4	30	0.13

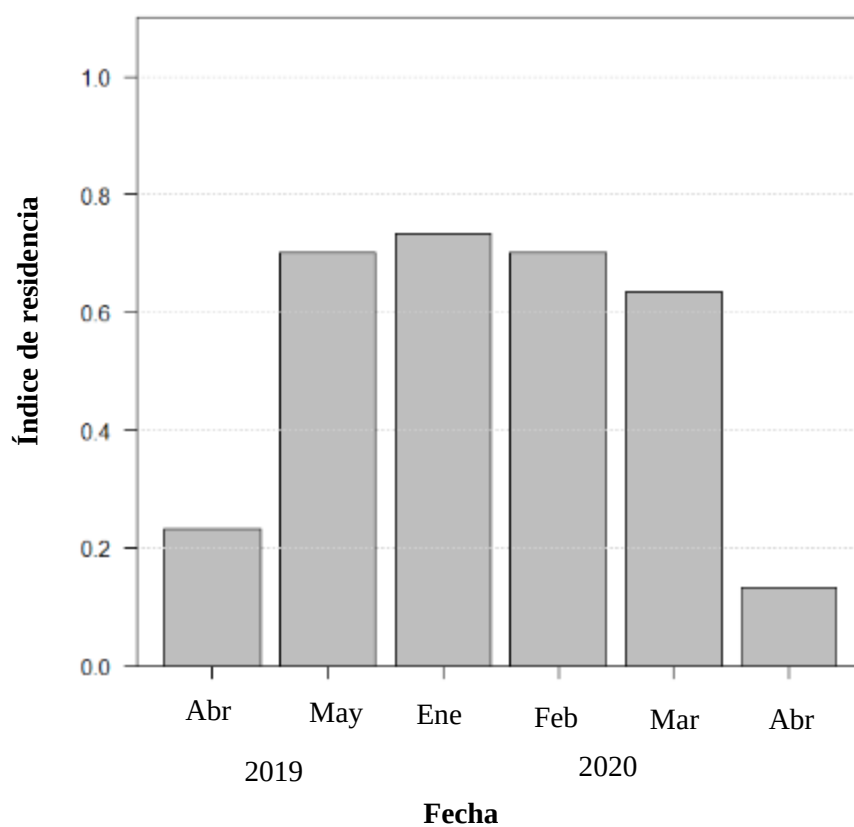


Figura 39. Índice de residencia (IR) mensual de *Tom* en el Parque Nacional Cabo Pulmo.

Análisis de resultados de telemetría acústica para “*Nemo*”

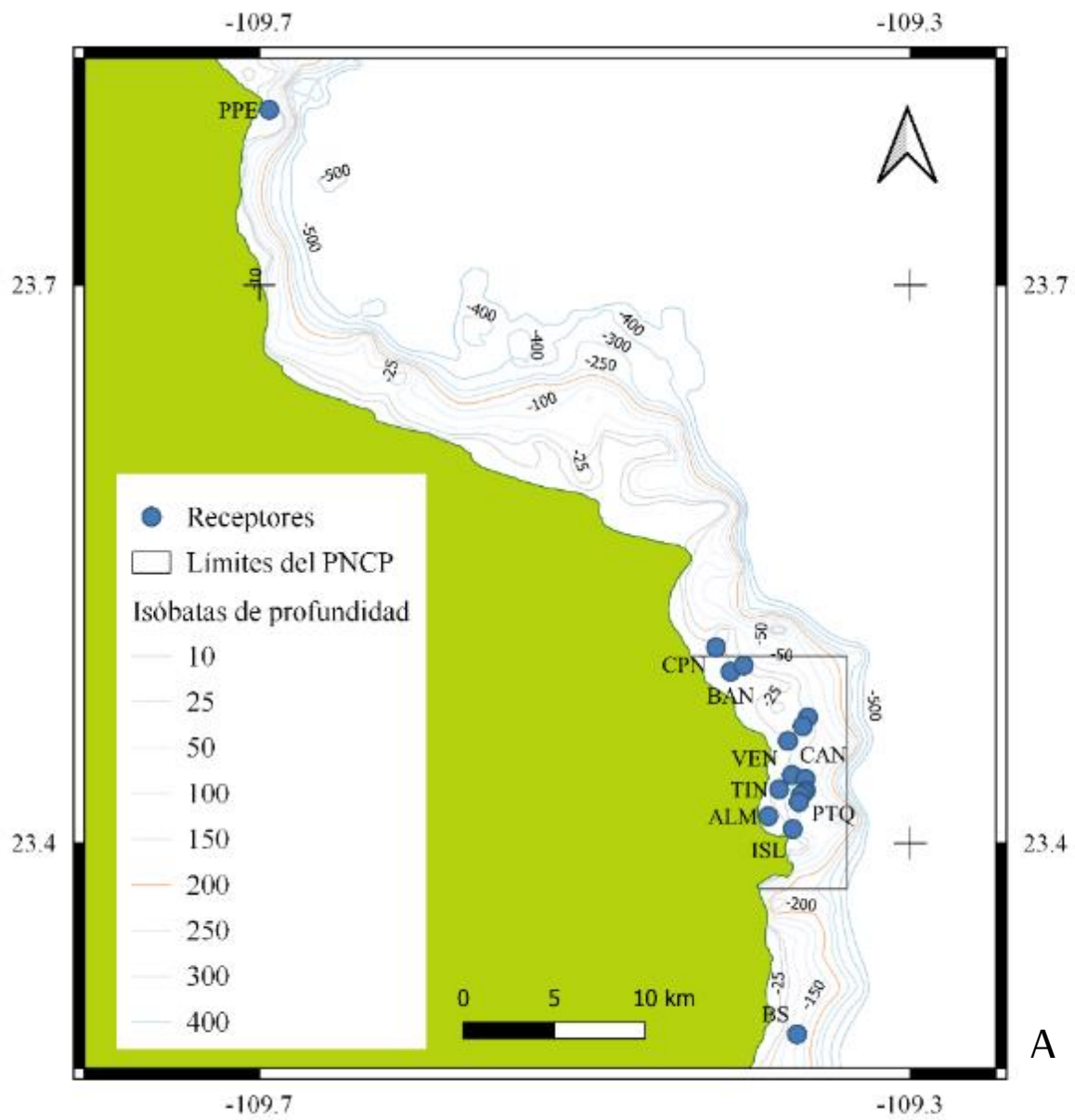
La red de receptores correspondiente estuvo activa entre los meses de mayo de 2019 y agosto de 2020 (fechas en las que el individuo fue detectado) estuvo compuesta por 17 estaciones acústicas (Fig. 40), de las cuales se obtuvo un total de 6,975 registros distribuidos en 3 receptores de la zona norte y dos de la zona sur (Tabla IX). Al igual que con los datos de los demás individuos, los análisis se hicieron a partir del porcentaje del total de detecciones por estación (Fig. 41). El análisis de detecciones por un periodo de 24 horas (Fig. 42) demostró que hubo registros durante todos los periodos de día, con una mayor frecuencia en las horas correspondientes al periodo “día”.

El análisis que integró las detecciones obtenidas en cada mes de muestreo, discriminándolas a su vez entre los periodos del día (Fig. 43), mostraron que *Nemo* fue detectado con una baja frecuencia durante los meses de 2019, la cual se incrementó entre enero y mayo de 2020 y continuó con algunas observaciones hasta septiembre. Continuando con la descripción de las detecciones, la figura 44 sugiere que el individuo permaneció cerca del receptor “MR” entre mayo y septiembre de 2019 durante todos los periodos del día, pero con una mayor frecuencia durante el periodo “noche”. En 2020 las detecciones estuvieron un poco más distribuidas en el área de estudio, manteniéndose durante todos los periodos en receptores de la zona sur (“TIN” y “PTQ”) y en dos receptores de la zona norte (“VEN” y “CPN”) con mayor frecuencia en el periodo noche. Teniendo en cuenta que la densidad puntos en la gráfica anterior no permite con facilidad ver el número de detecciones por periodo por estación, la figura 45 separa el número de detecciones por periodo en cada una de ellas, y de esta manera poder apreciar mejor la información.

La tabla de contingencia y la gráfica de mosaico, construidas con base en los datos de *Nemo* (Fig. 46) mostraron qué, tomando los datos de las detecciones de todos los receptores correspondientes a cada zona, podemos rechazar la hipótesis nula, ilustrando que existe una relación entre la zona y el periodo del día. Los resultados de la prueba del chi-cuadrado de Pearson ($\chi^2 = 1036.4$, $gl = 3$, $p = 2.2e^{-16}$). En el caso de las zonas, estas presentaron una

relación positiva entre la zona norte y el periodo “atardecer”, y entre la zona sur y el periodo “día”. Las relaciones negativas o de evasión que se presentaron fueron entre la zona norte y el periodo “día” y entre la zona sur y el periodo “atardecer”. Tomando por separado cada una de las zonas, los resultados de la prueba para la zona norte fueron $\chi^2 = 81.49$, $gl = 6$, $p = 2.2e^{-16}$ y para la zona sur, $\chi^2 = 284.03$, $gl = 3$, $p = 2.2e^{-16}$. los receptores de la zona norte (Fig. 47) presentan relaciones positivas entre los receptores “CPN” y el periodo “día”, “MR” y el periodo noche, y “VEN” y el periodo “amanecer”. Las relaciones negativas se dieron en el receptor “CPN” y el periodo “atardecer”, y en el receptor “VEN” y el periodo “día”. Los receptores de la zona sur por su parte (Fig. 48), las relaciones positivas tuvieron lugar entre el receptor “TIN” y los periodos “amanecer” y “noche”, “MR” y el periodo noche, y “VEN” y el periodo “amanecer”. Las relaciones negativas fueron demostradas por el receptor “PTQ” y el periodo “noche”, y por “TIN” con el periodo “día”.

El índice de residencia (IR) mensual calculado para *Nemo* en el Parque Nacional Cabo Pulmo (Tabla X) de mayo de 2019 a agosto de 2020, indica que los valores de IR en promedio son de 0.14, y por tanto los datos no son suficientes para afirmar que el individuo fue residente del Parque durante este periodo. Sin embargo, durante enero y agosto de 2020 el IR promedio fue de 0.53, sugiriendo que individuo fue residente del Parque durante este periodo (Fig. 49).



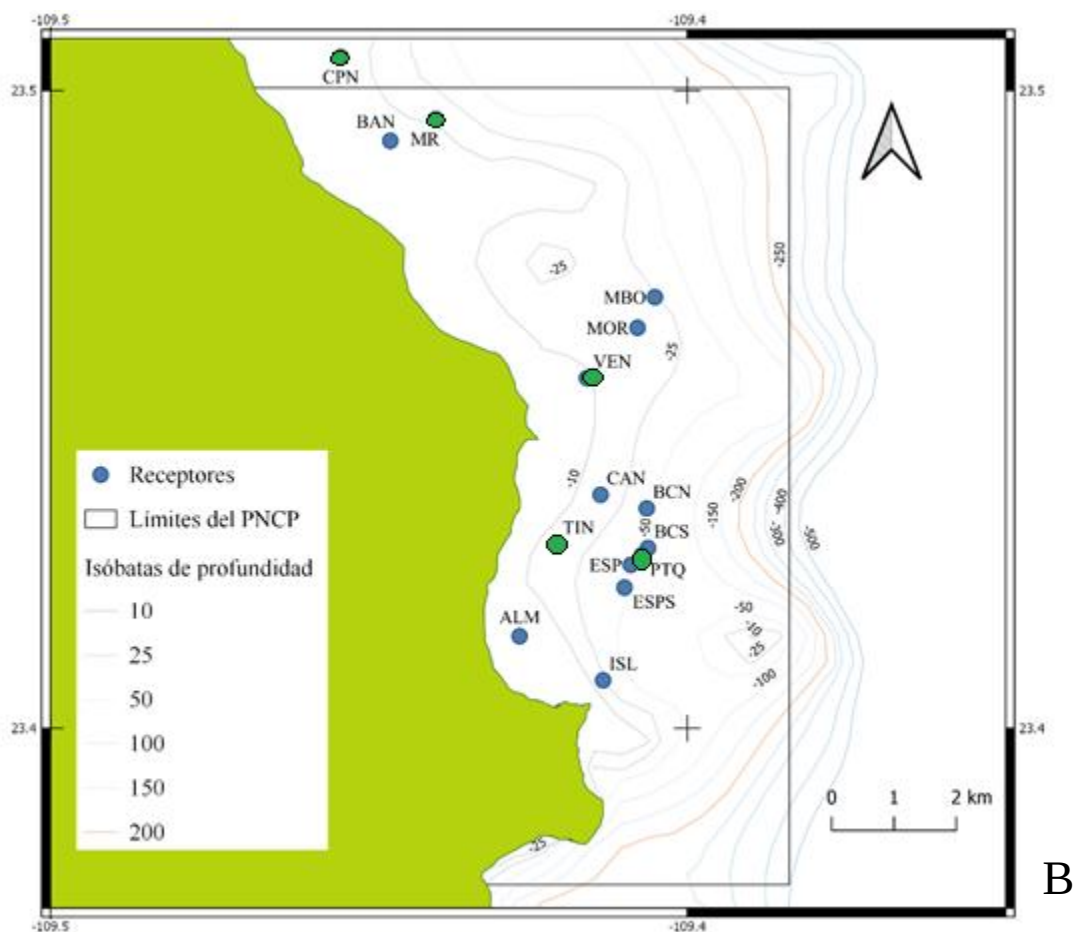


Figura 40. (A) Mapa de la red de receptores utilizada entre 2019 y 2020. (B) Acercamiento a los receptores dentro del Parque Nacional Cabo Pulmo. Los puntos indican la ubicación de cada receptor, el color azul representa los receptores en los que no hubo ningún registro y los puntos verdes los receptores en los que se detectó el *Nemo*.

Tabla IX. Total de detecciones de *Nemo* obtenidas en cada estación de cada zona entre mayo de 2019 y agosto de 2020.

Zona	Receptor	Abreviación	Latitud	Longitud	Total de detecciones
Norte	Cabo Pulmo Norte	CPN	23.5052	-109.4544	83
	Miramar	MR	23.49553	-109.43951	113
	Vencedor	VEN	23.45492	-109.41576	6372
Sur	Tinajitas	TIN	23.42889	-109.4205	312
	Punto 15	PTQ	23.42714	-109.4071	95

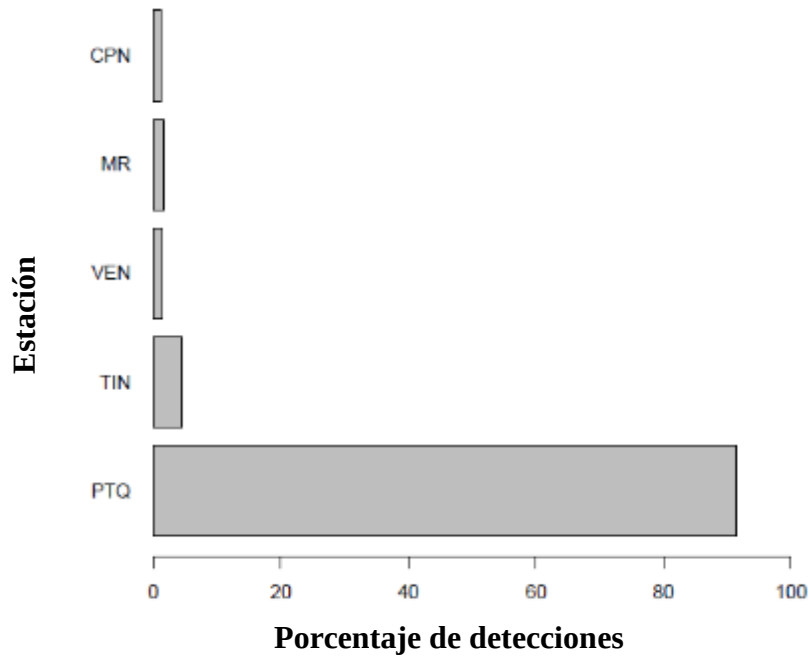


Figura 41. Porcentaje de detecciones de *Nemo* en cada estación. La distribución de las estaciones en el eje Y responde a un de sur a norte, siendo “ISL” la más al Sur y “CPN” la estación más al norte.

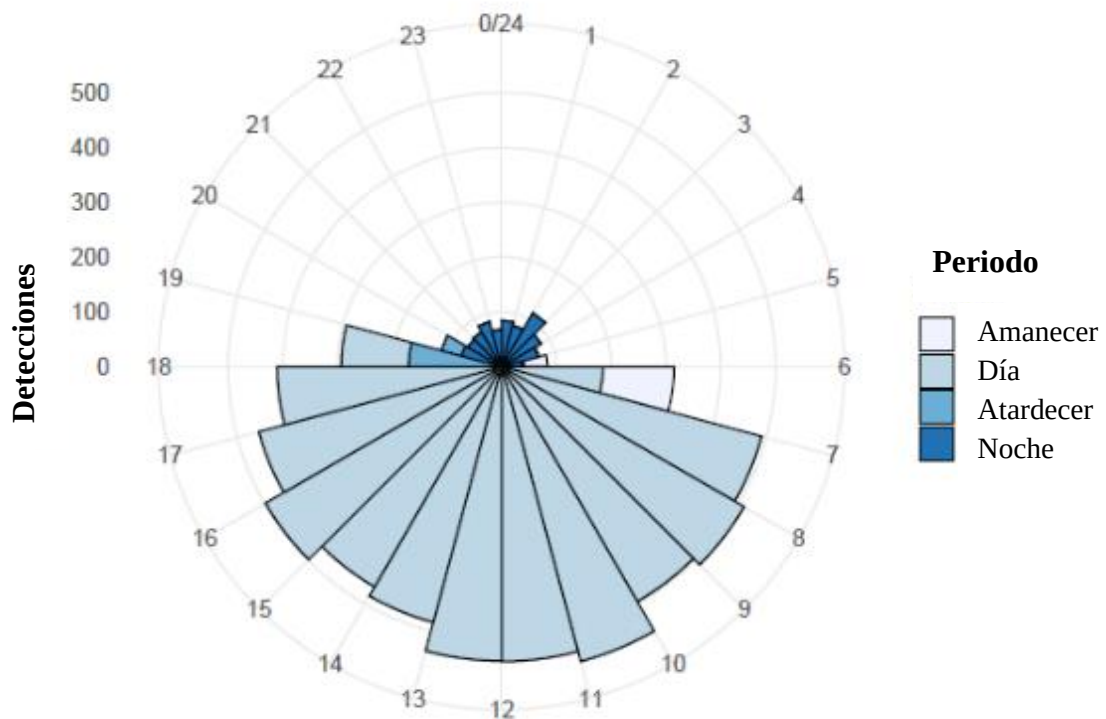


Figura 42. Detecciones de *Nemo* registradas por mes, discriminadas por el periodo del día. Cada punto ilustrado indica una detección. Número total de detecciones de *Nemo* obtenidas entre 2019 y 2020 discriminadas en un periodo de 24 horas. La escala azul a la derecha de la gráfica determina el periodo del día.

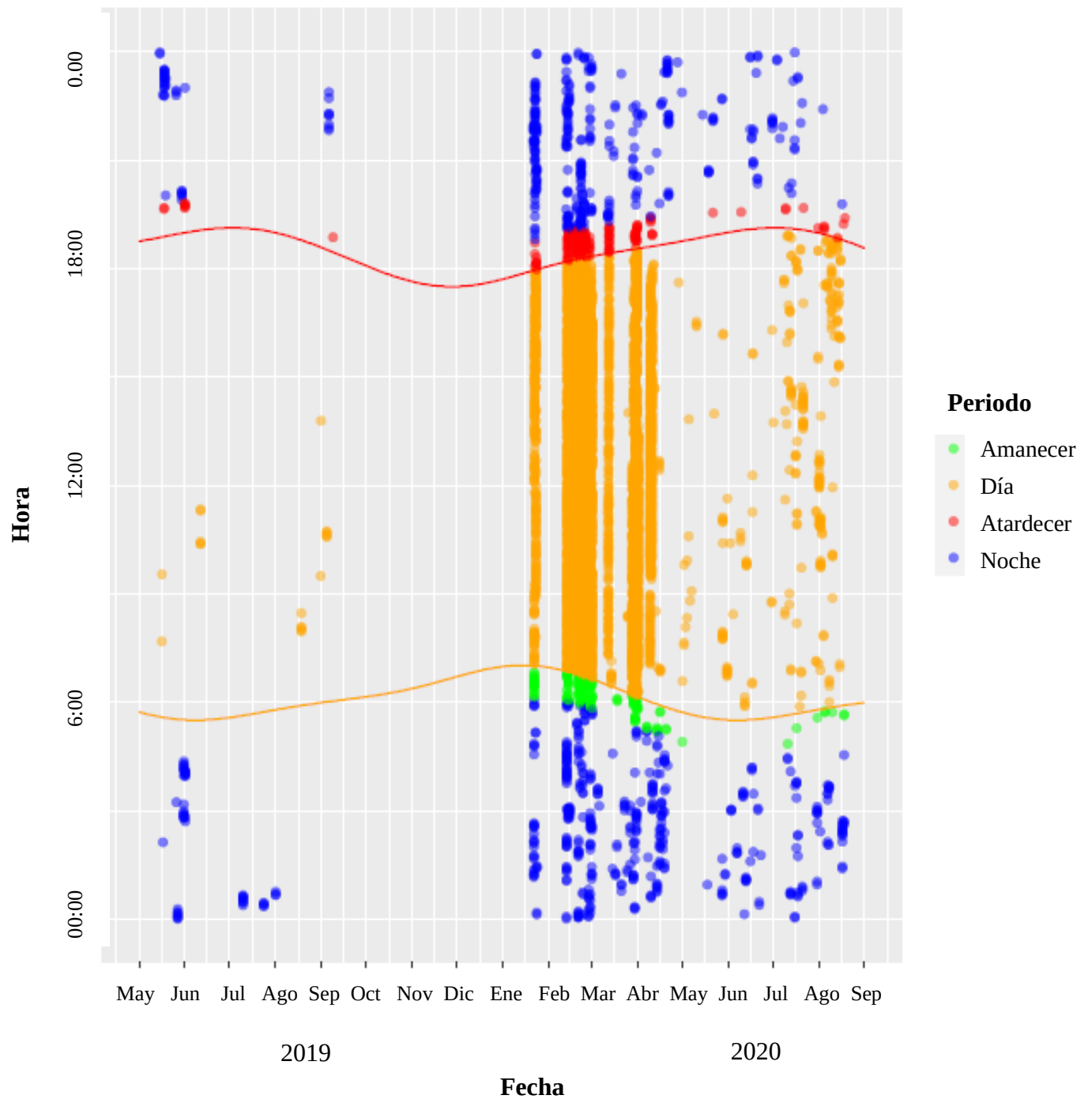


Figura 43. Detecciones de *Nemo* registradas en cada mes discriminadas por periodo. Cada punto ilustrado indica una detección. Las curvas describen el atardecer y el amanecer de acuerdo con la variación estacional.



Figura 44. Detecciones de *Nemo* registradas por mes, discriminadas por el periodo del día y el receptor donde fue registrada la detección. Las estaciones están organizadas de sur a norte, siendo “BS” la estación más al sur y “PPE” la estación más al norte. Cada punto ilustrado indica una detección.

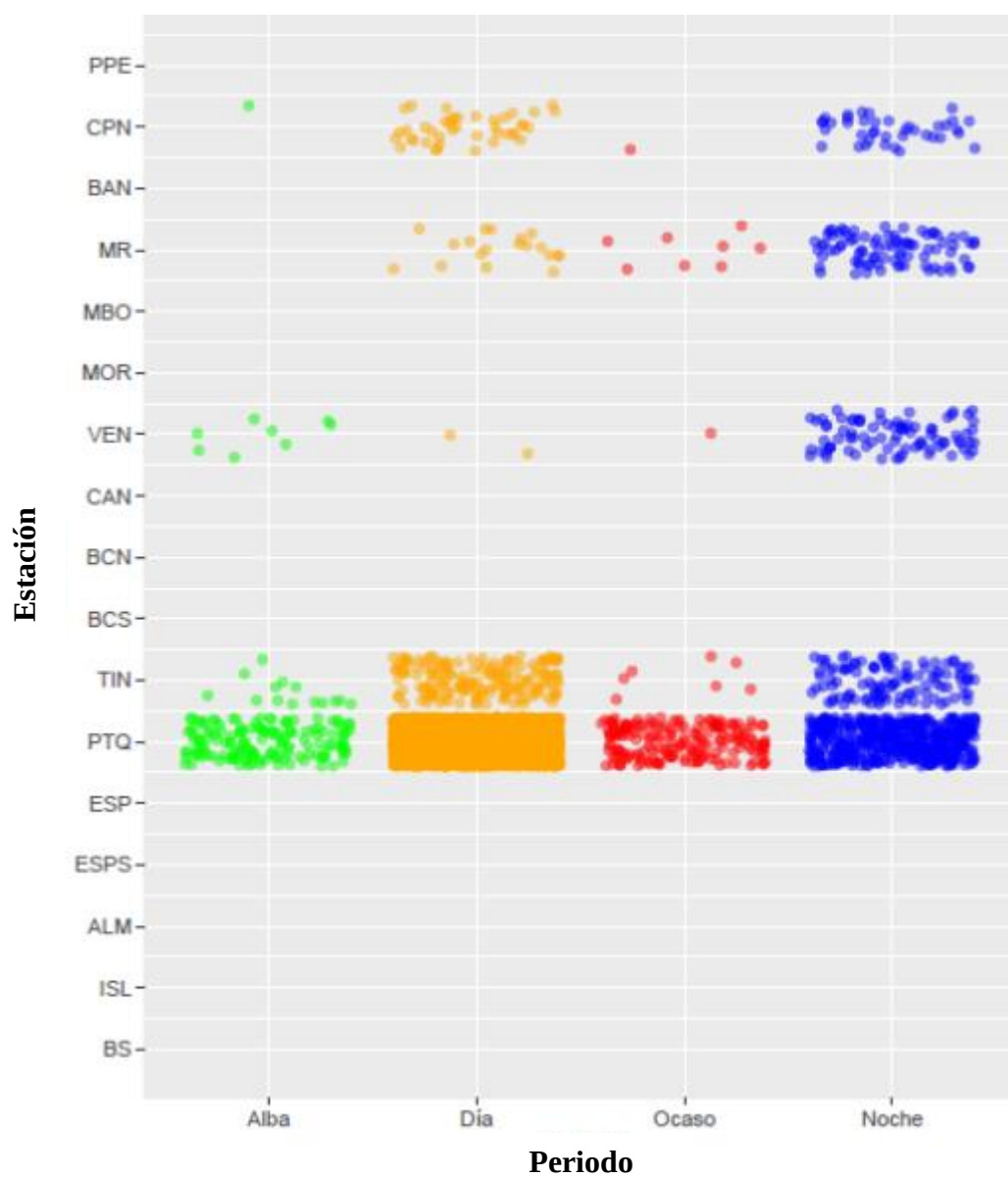


Figura 45. Detecciones de *Nemo* en cada estación en función del periodo del día. Las estaciones están organizadas de sur a norte, siendo “BS” la estación más al sur y “PPE” la estación más al norte. Cada punto ilustrado indica una detección.

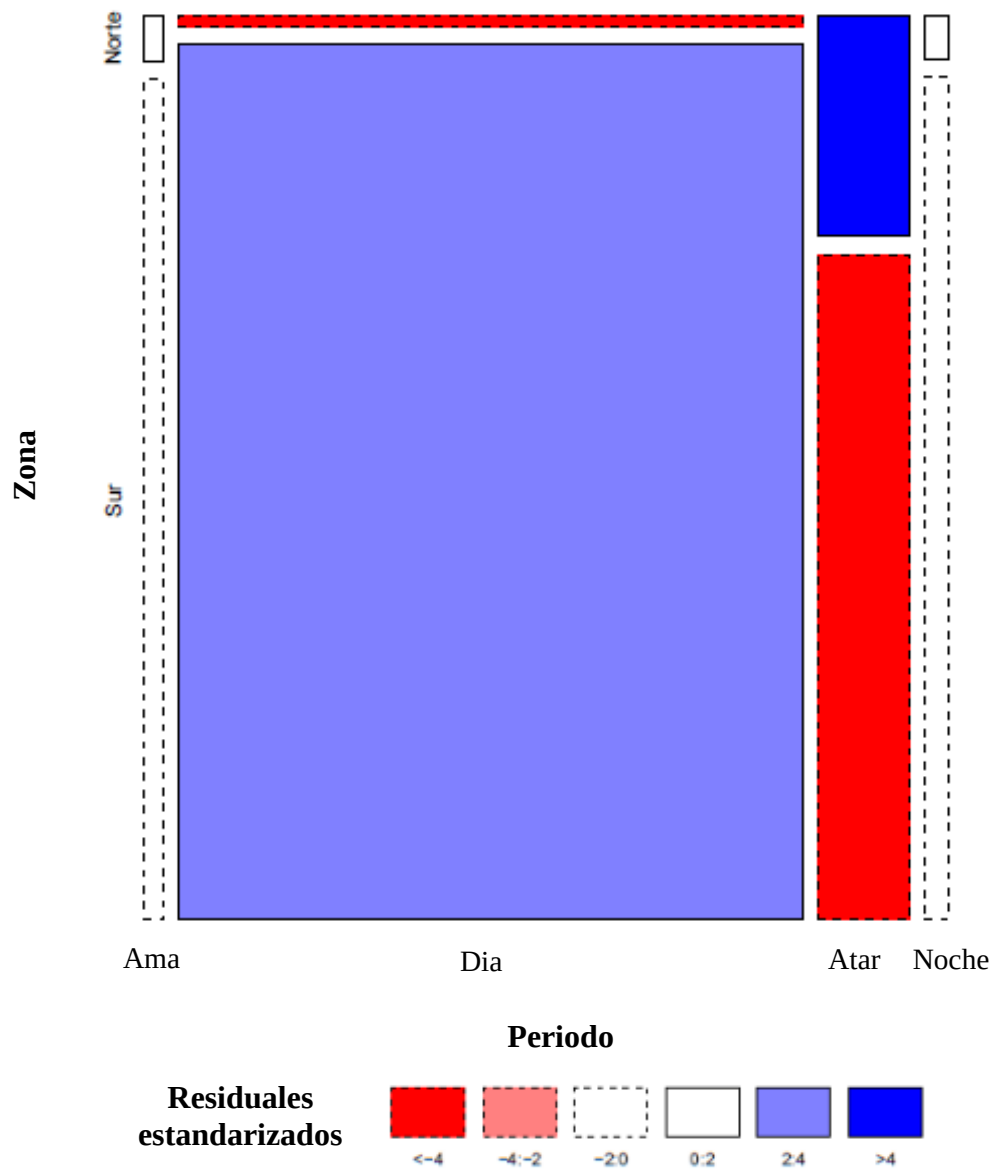


Figura 46. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detecciones de *Nemo*, las zonas y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. Ama: Amanecer, Atar: Atardecer

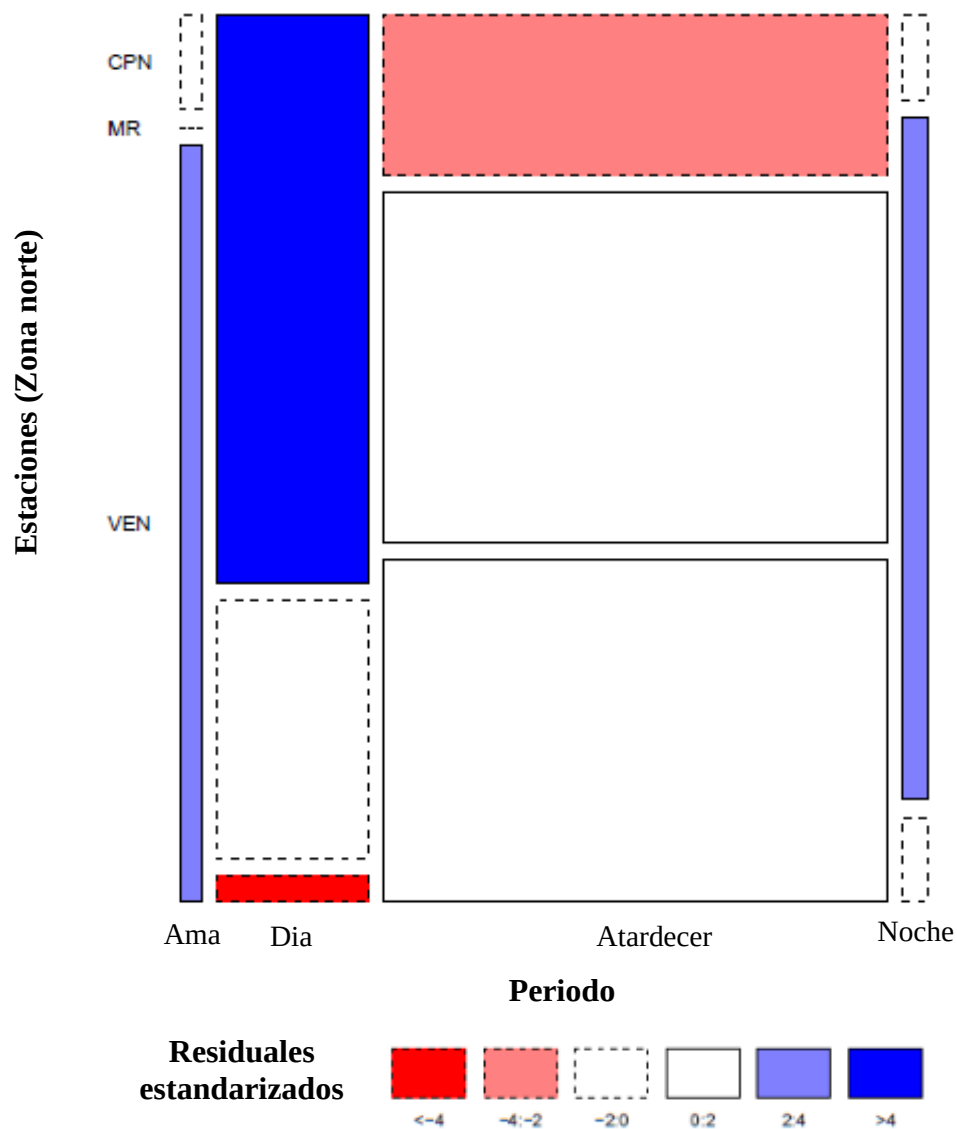


Figura 47. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detección de *Nemo*, las estaciones de la zona norte y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. Ama: Amanecer

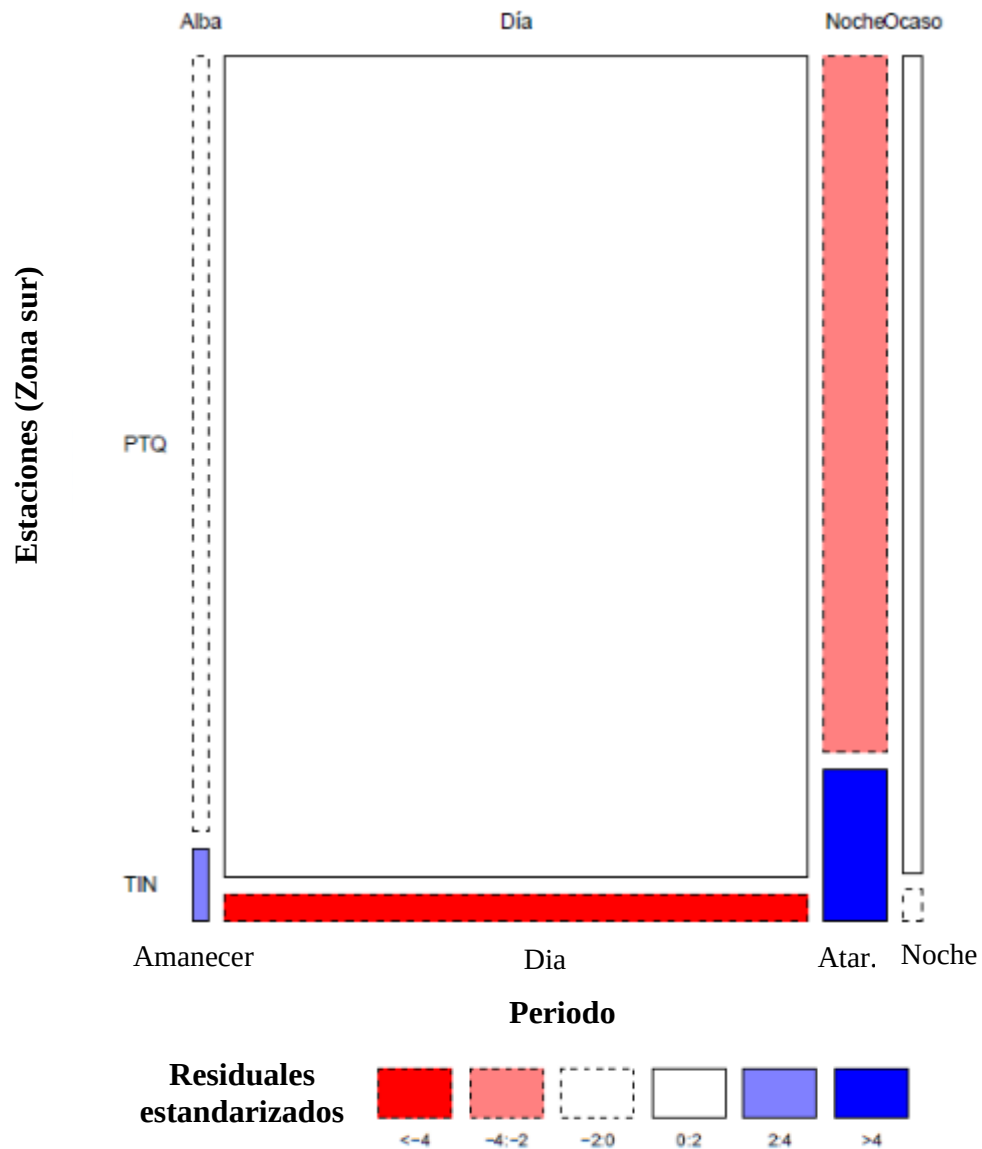


Figura 48. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detección de *Nemo*, las estaciones de la zona sur y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación. Atar: Atardecer.

Tabla X. Índice de residencia (IR) mensual de *Nemo* en el Parque Nacional Cabo Pulmo en 2019 y 2020.

Año	Mes	Total de días con detección	Número de días del mes	IR
2019	Mayo	10	31	0.32
	Junio	3	30	0.1
	Julio	2	31	0.06
	Agosto	4	31	0.13
	Septiembre	3	30	0.1
2020	Enero	4	31	0.13
	Febrero	15	31	0.48
	Marzo	19	29	0.65
	Abril	21	31	0.68
	Mayo	16	30	0.53
	Junio	18	31	0.58
	Julio	20	30	0.66
	Agosto	17	31	0.54

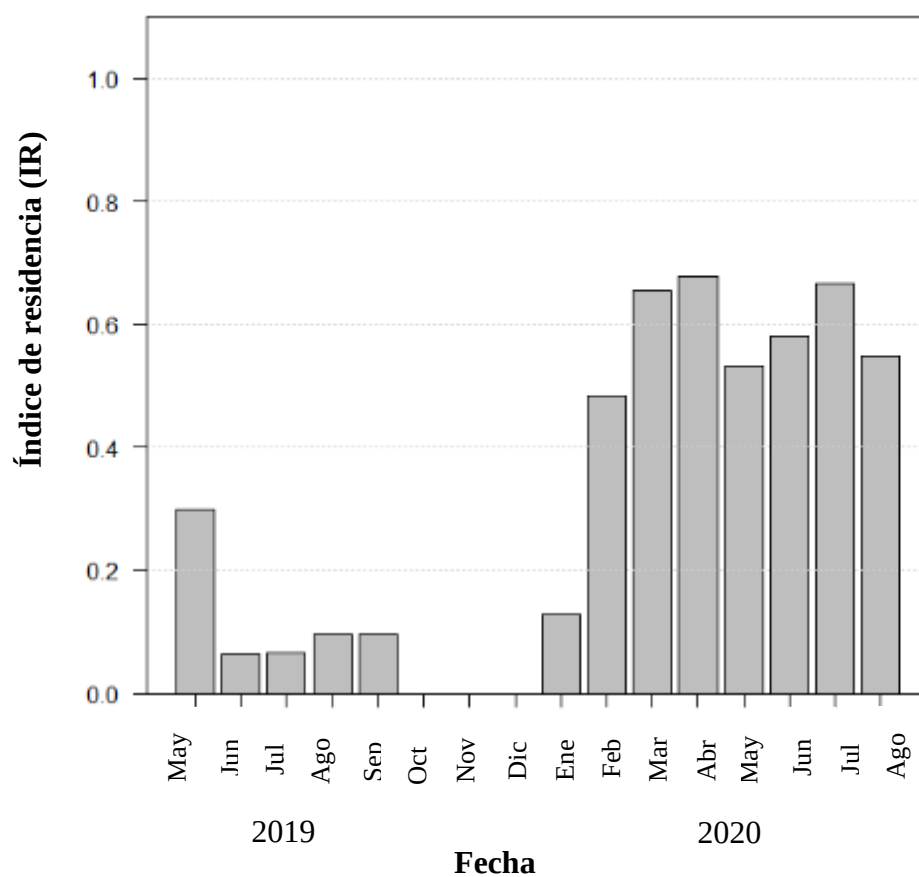


Figura 49. Índice de residencia (IR) mensual de *Nemo* durante los meses de 2019 y 2020 en el Parque Nacional Cabo Pulmo

Análisis de resultados de telemetría acústica de “*Philip*”

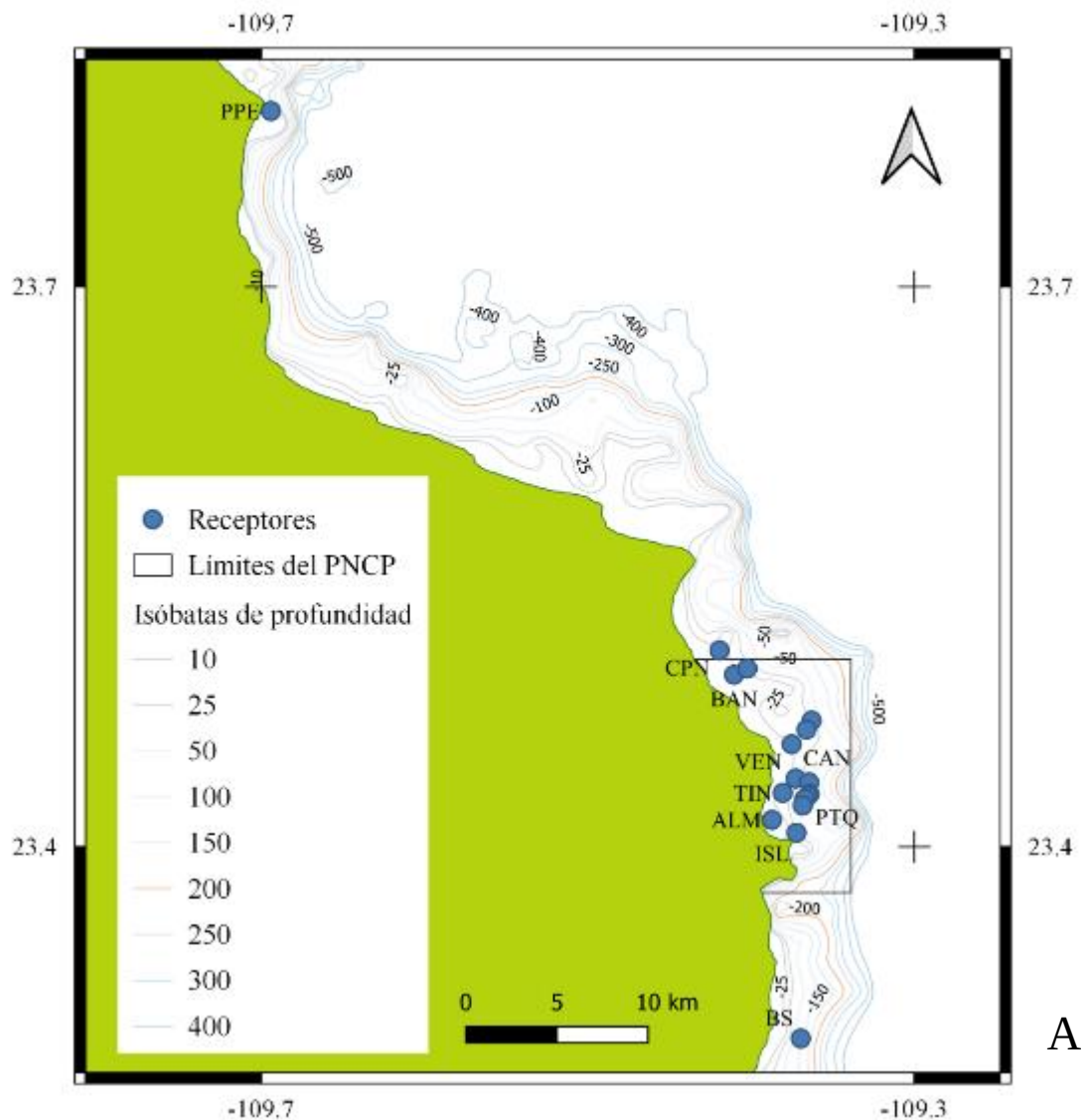
La red de receptores para con este individuo, operó entre junio de 2019 y julio de 2020 (fechas en las que el individuo fue detectado) y estuvo compuesta por 17 estaciones acústicas (Fig. 50), de las cuales se obtuvo un total de 288 registros distribuidos en un receptor de la zona norte y tres de la zona sur (Tabla XI); igual que con los datos de los demás individuos, los análisis se hicieron a partir del porcentaje del total de detecciones por estación (Fig. 51). El análisis de detecciones por un periodo de 24 horas (Fig. 52) demostró que hubo registros durante todos los periodos de día, con una mayor frecuencia en las horas correspondientes al periodo “noche”.

El análisis que integró el número de detecciones por cada mes en función de la hora del día (Fig. 53), mostró que *Philip* fue detectado pocas veces entre junio a enero de 2019, lo que contrasta con la frecuencia de detección entre abril y julio de 2020, en donde se pudo observar que el individuo se movió durante todos los periodos del día en este intervalo de tiempo. Aunque el análisis de las detecciones por mes en función de los receptores (figura 54) sugiere que el individuo permaneció con mayor frecuencia en el receptor “TIN” durante todos los periodos del día en todo el periodo de muestreo, el análisis de los periodos del día en función de los receptores (Fig. 55), indican que la frecuencia de datos se ubica en el periodo “noche”.

La tabla de contingencia y la gráfica de mosaico construidas con base en los datos de *Philip* (Fig. 56) indican que los resultados de la prueba del chi-cuadrado de Pearson ($\chi^2 = 18$, $gl = 3$, $p = 0.00043$) con base en los datos de las detecciones de todos los receptores correspondientes a cada zona, podemos rechazar la hipótesis nula, demostrando que existe al menos una relación entre la zona y el periodo del día. En el caso de las zonas, estas presentaron una única relación positiva, dada entre la zona norte y el periodo “atardecer”. No se registraron relaciones negativas o de evasión entre zonas y periodos. La tabla de contingencia y la gráfica de mosaico hecha a partir de los datos de la zona norte no fue representada debido a que solo era un receptor. Los resultados de la prueba para la zona norte fueron $\chi^2 = 96$, $gl = 3$, $p = 2.2e^{-16}$ y para la zona sur fueron $\chi^2 = 6.89$, $gl = 6$, $p = 0.330$.

El análisis demostró que no hubo evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, y, por lo tanto, no podemos corroborar si existe una relación entre los receptores de la zona sur y los periodos del día (Fig. 57).

El índice de residencia (IR) mensual calculado para *Philip* (Tabla XII) en el Parque Nacional Cabo Pulmo de junio de 2019 a julio de 2020 (Fig. 58), indica que los valores de IR en promedio son de 0.1, por lo que, los datos no son suficientes para afirmar que el individuo fue residente del Parque durante este periodo.



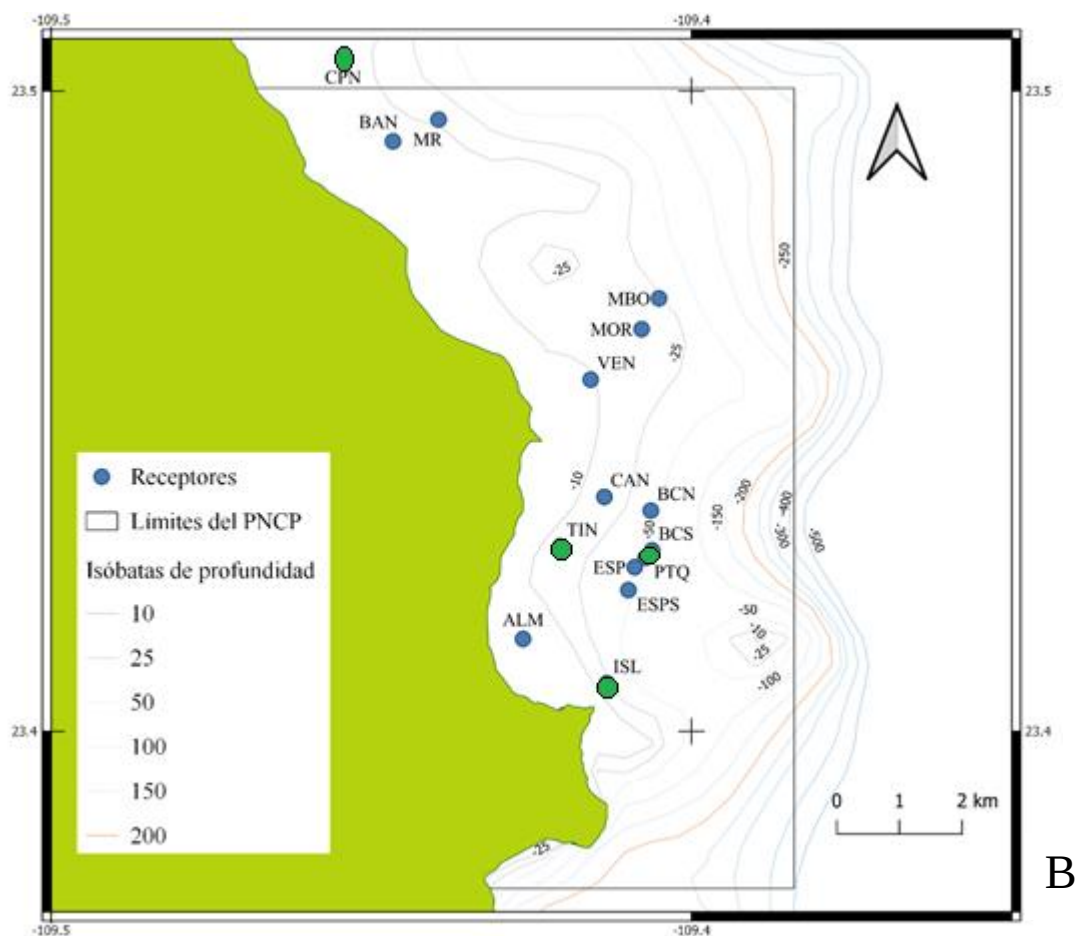


Figura 50. (A) Mapa de la red de receptores utilizada entre 2019 y 2020. (B) Acercamiento a los receptores dentro del Parque Nacional Cabo Pulmo. Los puntos indican la ubicación de cada receptor, el color azul representa los receptores en los que no hubo ningún registro y los puntos verdes los receptores en los que se detectó *Philip*.

Tabla XI. Total de detecciones de *Philip* obtenidas en cada estación de cada zona entre junio de 2019 y julio de 2020.

Zona	Receptor	Abreviación	Latitud	Longitud	Total de detecciones
Norte	Cabo Pulmo Norte	CPN	23.5052	-109.4544	32
	Tinajitas	TIN	23.42889	-109.4205	245
Sur	Punto 15	PTQ	23.42714	-109.4071	10
	Islote	ISL	23.40751	-109.41322	1

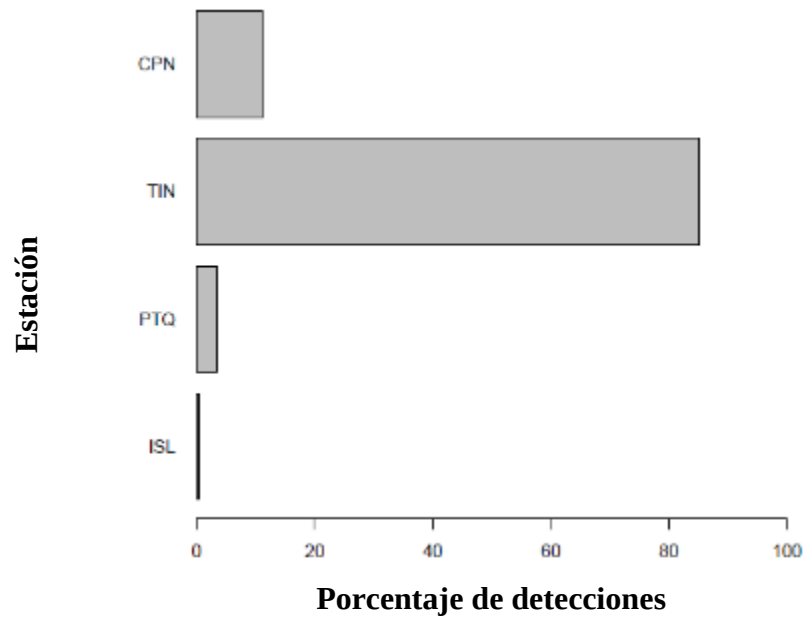


Figura 51. Porcentaje de detecciones de *Philip* en cada estación. La distribución de las estaciones en el eje Y responde a un orden de sur a norte, siendo “ISL” la más al Sur y “CPN” la estación más al norte.

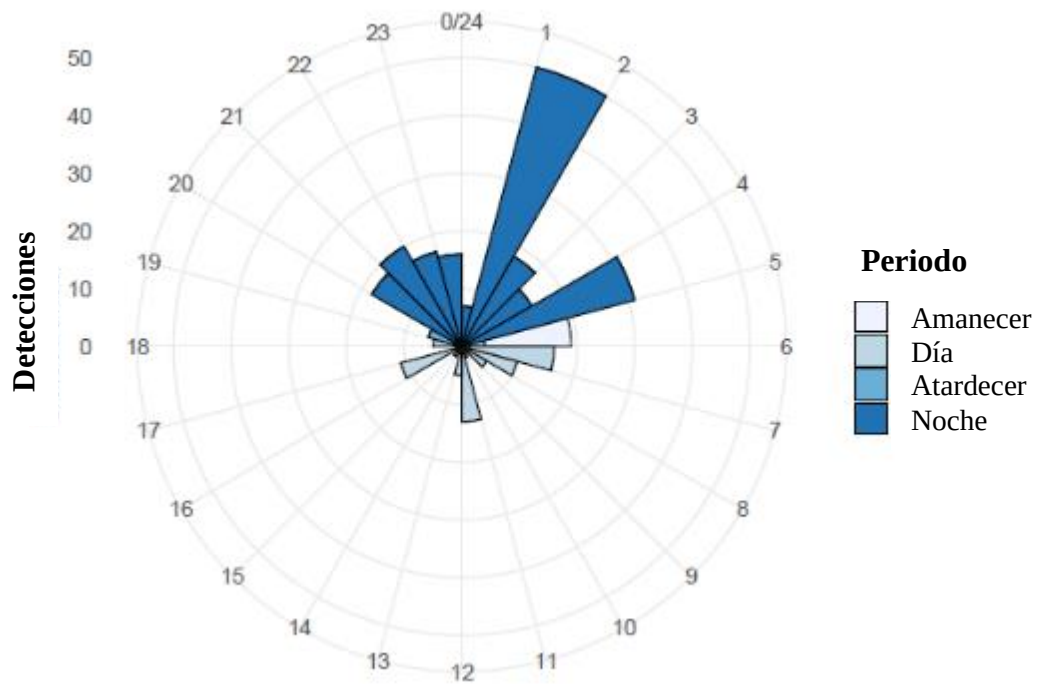


Figura 52. Número total de detecciones de *Philip* obtenidas entre abril de 2019 y 2020, discriminadas en un periodo de 24 horas. La escala azul a la derecha de la gráfica determina el periodo del día.

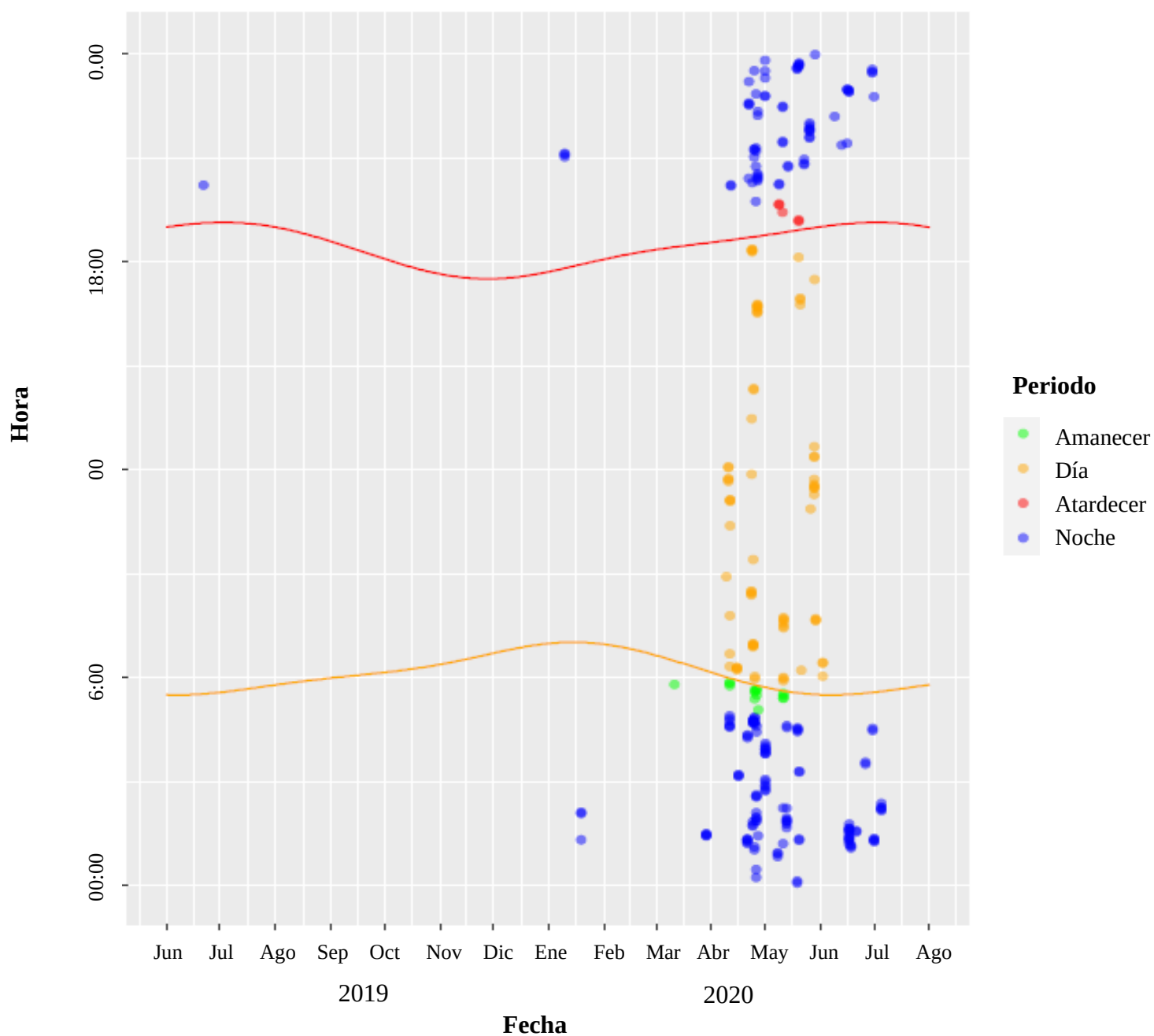


Figura 53. Detecciones de *Philip* registradas en cada mes discriminadas por periodo. Cada punto ilustrado indica una detección.

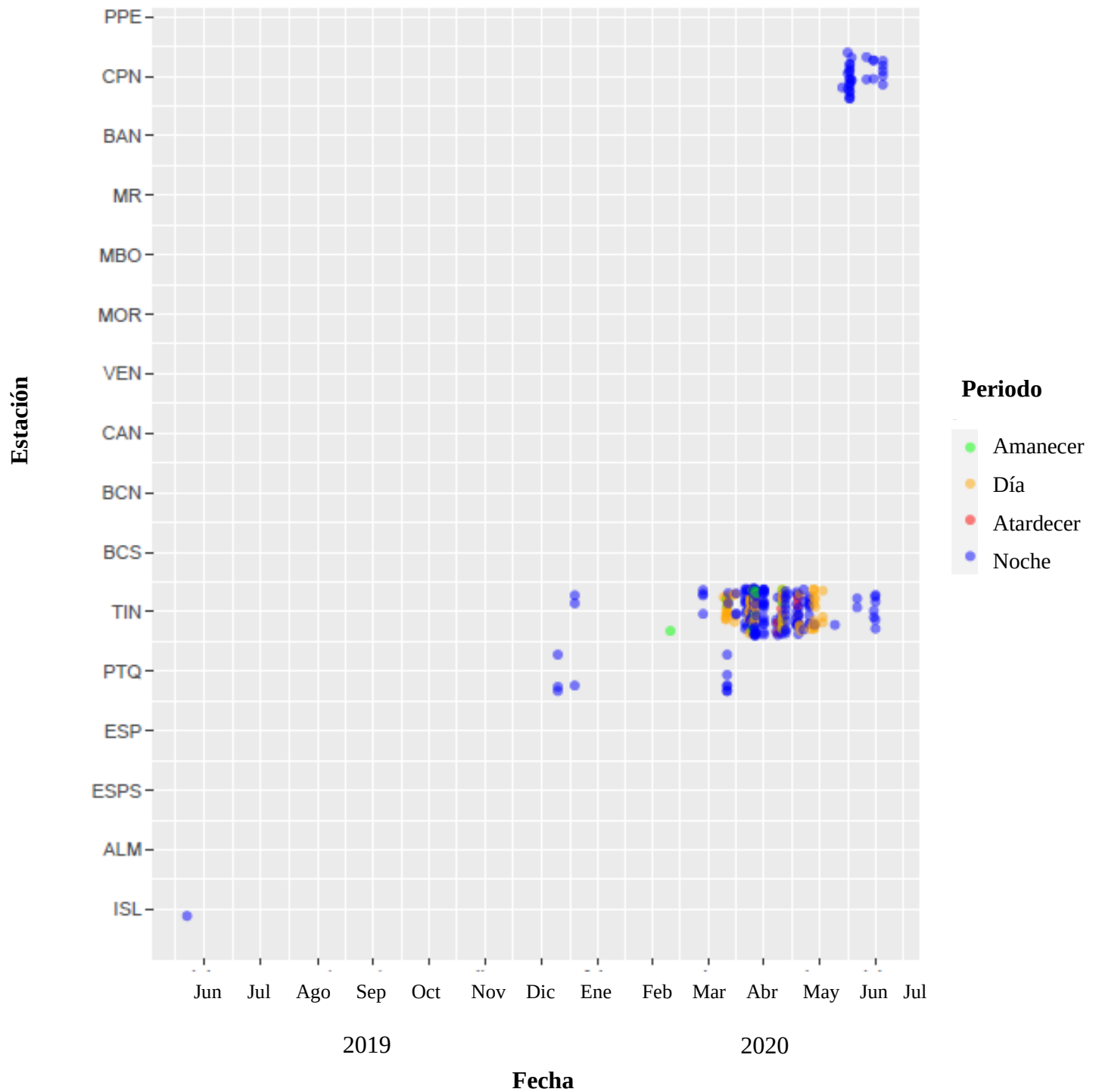


Figura 54. Detecciones de *Philip* registradas en cada estación por mes, discriminadas por el periodo del día. Las estaciones están organizadas de sur a norte, siendo “ISL” la estación más al sur y “PPE” la estación más al norte. Cada punto ilustrado indica una detección.

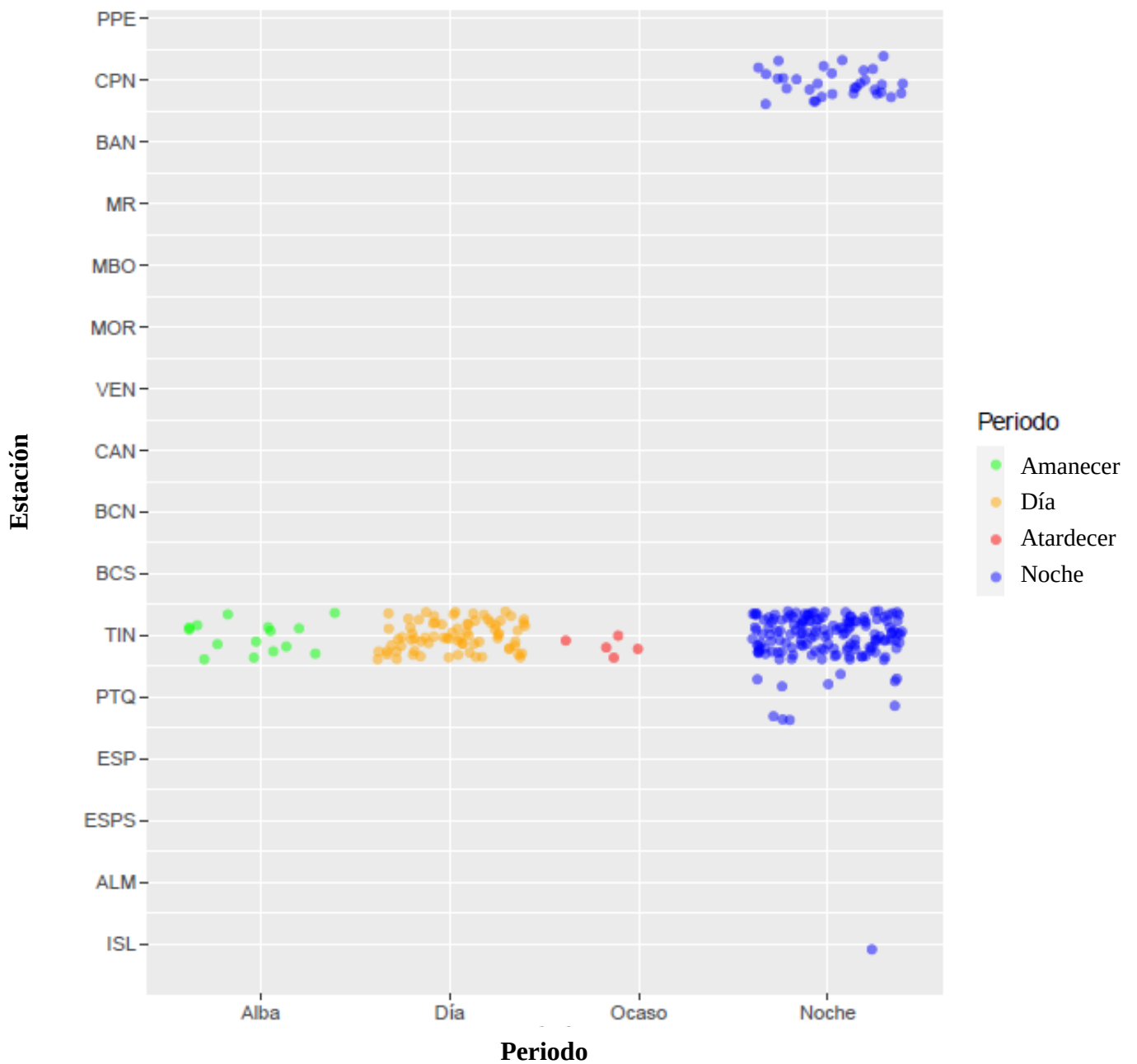


Figura 55. Detecciones de *Philip* en cada estación en función del periodo del día. Las estaciones están organizadas de sur a norte, siendo “ISL” la estación más al sur y “PPE” la estación más al norte. Cada punto ilustrado indica una detección.

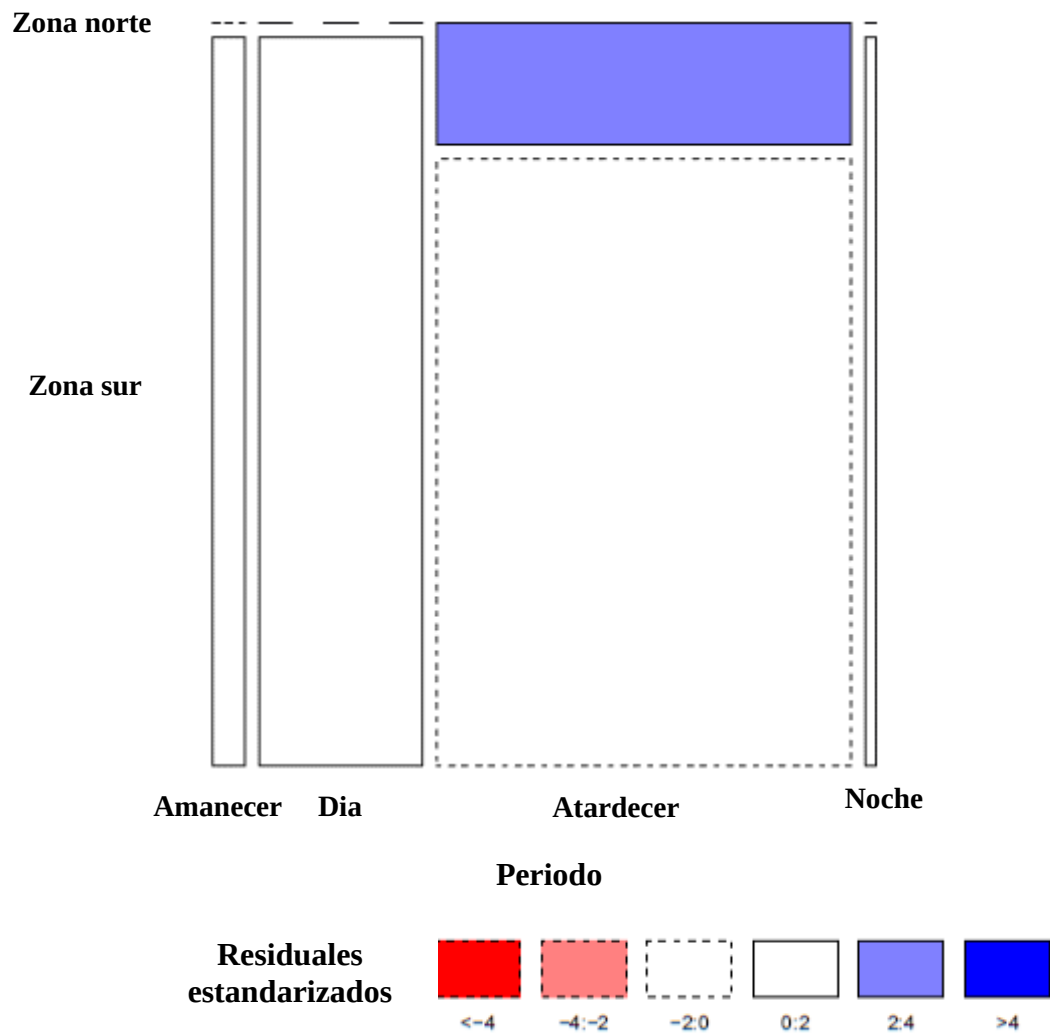


Figura 56. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detecciones de *Philip*, las zonas y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación.

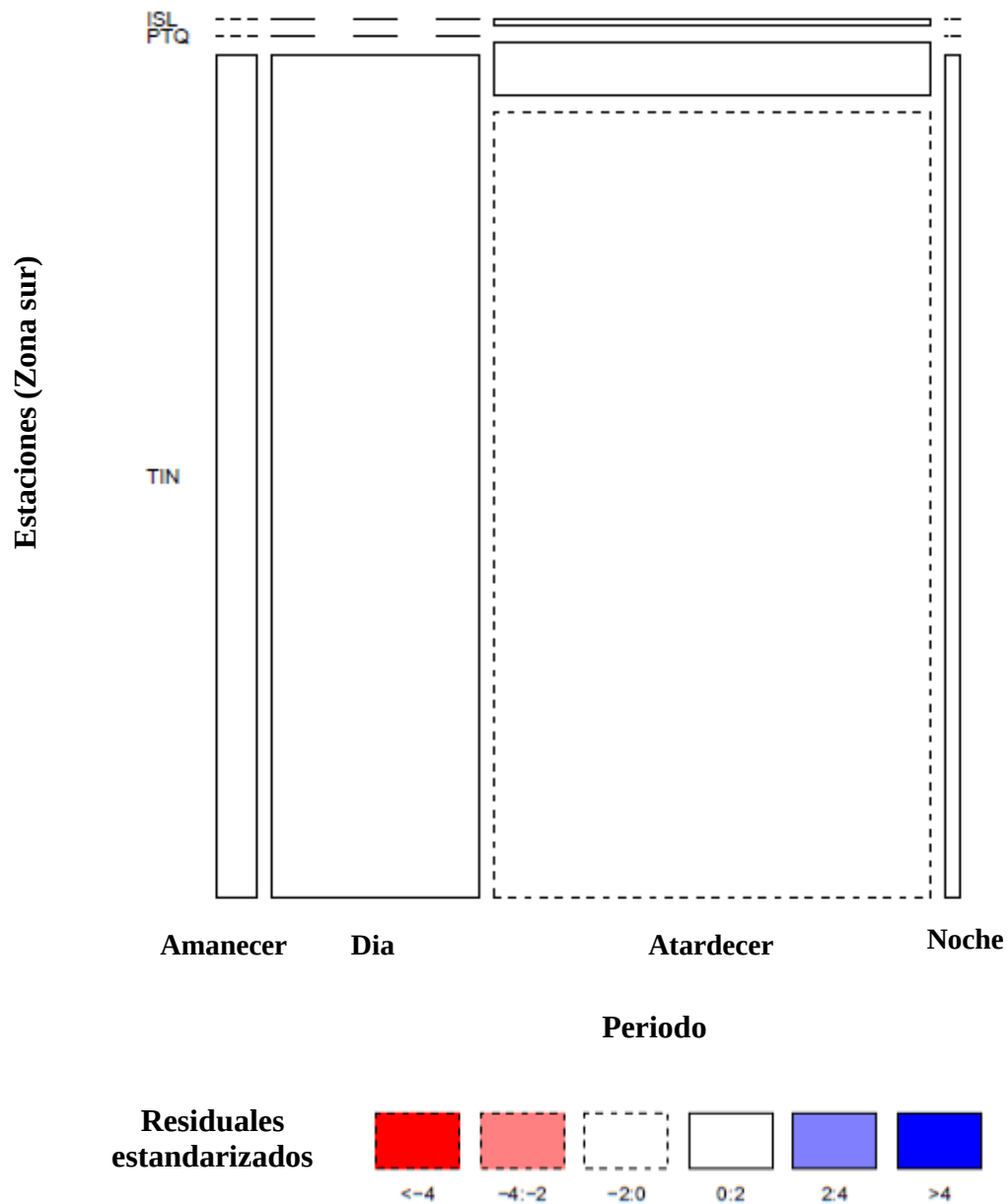


Figura 57. Gráfico de mosaico de relaciones de asociación entre el número de detección de *Philip*, las estaciones de la zona sur y el periodo del día. Las celdas en rojo representan asociaciones negativas (evasión), mientras que las celdas azules representan asociaciones positivas. El área de los rectángulos es proporcional a la frecuencia de datos en cada asociación.

Tabla XII. Índice de residencia (IR) de *Philip* en el Parque Nacional Cabo Pulmo en los meses de abril de 2019 y 2020.

Año	Mes	Total de días con detección	Número de días del mes	IR
2019	Junio	1	30	0.03333333
	Enero	2	31	0.06451613
	Marzo	2	31	0.06451613
2020	Abril	12	30	0.4
	Mayo	14	31	0.4516129
	Junio	11	30	0.36666667
	Julio	2	31	0.06451613

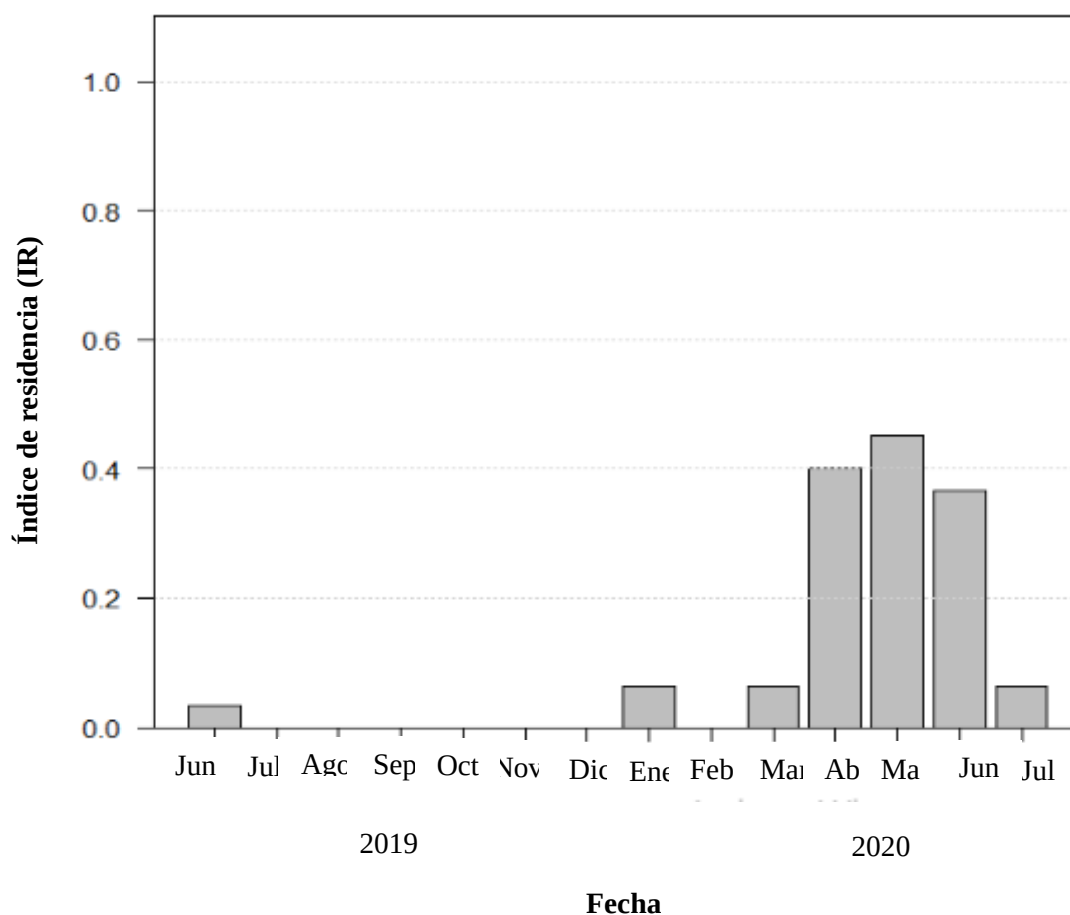


Figura 58. Índice de residencia (IR) mensual de *Philip* en el Parque Nacional Cabo Pulmo.

DISCUSIÓN

El monitoreo acústico de adultos y juveniles de *N. brevirostris* aporta nueva información sobre sus patrones de distribución y áreas de actividad a lo largo del tiempo dentro del parque nacional Cabo Pulmo. El caso de *Jager* (el macho adulto marcado en mayo de 2017) fue muy particular, debido a que fue el único individuo registrado en los receptores “PPE” y “BS”, demostrando (a partir del cálculo del polígono mínimo convexo (PMC)) un área de actividad aproximada de 249 km², la más grande registrada entre todos los tiburones estudiados en el presente trabajo.

Debido a que este estudio es la primera investigación sobre *Negaprion brevirostris* en el Océano Pacífico oriental, nuestros resultados son contrastados con los obtenidos por otros investigadores en el Océano Atlántico. El primer estudio en describir el área de actividad de individuos juveniles de tiburón limón (*Negaprion brevirostris*) fue Morrissey & Gruber (1993a) mediante el MPC, quienes reportaron que el promedio del área de actividad (AA) es de 0.68 km² (intervalo: 0.23-1.26 km²) al norte de Bimini (Bahamas). Este resultado es contrastado con el obtenido por Franks (2007) quien sugiere que el área de actividad de los individuos de esta especie al sur y al norte de Bimini es de 0.87 km² (intervalo: 0.14-2.66 km²) y 0.61 km² (intervalo: 0.08-3.14 km²). Legare *et al.*, (2015) determinó que el promedio del área de actividad de juveniles (obtenido a partir del método de densidad de Kernel (95%)) era de 0.11 km² (intervalo: 0.04-0.28 km²), valores mucho más bajos a los obtenidos en el presente estudio. En latitudes más bajas, Tavares (2018) sugirió que el promedio del área de actividad de juveniles de tiburón limón en las costas de Venezuela es de 1.2 km² (intervalo de 0.33 – 1.63 km²). Nuestros resultados demuestran que los Juveniles *Nemo* y *Philip* presentaron un AA de 17.3 y 15 km² (respectivamente) sugiriendo que en el PNCP los juveniles tienen AA mayores a las que han sido reportadas en Bimini y en las costas de Venezuela. En “Pine Island Sound”, una laguna semi-encerrada en Florida (USA), Yeiser *et al.*, (2008) determinaron que el valor medio semanal de MCP para individuos juveniles y adultos de *N. brevirostris* osciló entre 2.40 y 56.07 km², con la mayoría de los valores entre 10 y 30 km². Teniendo en cuenta que el AA descrita *Jager* y

Tom fueron de respectivamente 249 y 20.7 km², en general se puede decir que las áreas de actividad de individuos juveniles y adultos de tiburón limón en el PNCP se asemejan más a las reportadas en Pine Island Sound que a las reportadas en Bimini y en Venezuela.

Los antecedentes sugieren qué, en el caso de los tiburones el crecimiento y el estado de madurez sexual son determinantes a la hora de establecer un área de actividad (Gruber *et al.*, 1988; Franks, 2007). Mientras Gruber *et al.*, (1988) sugiere que los individuos maduros sexualmente tienden a incrementar sus tasas de movimiento y áreas de actividad espacial. Franks (2007) describe que al sur de las Islas Bimini existe una correlación significativa entre el tamaño de las áreas de actividad y la talla/edad de individuos juveniles de tiburón limón. En nuestro caso, aunque el número de individuos analizados es bajo, es claro que el área de los adultos *Jager* y *Tom* son notablemente mayores a la de los juveniles. No obstante, nuestro estudio carece de número significativo de individuos y de registros para determinar que efectivamente las áreas de actividad de la especie en el PNCP se incrementan con respecto a la madurez sexual o a la edad/talla.

Aunque los resultados generados en investigaciones anteriores sugieren que los individuos juveniles del tiburón limón tienen áreas de actividad espacial limitadas, nuestros resultados no son suficientes para determinar qué en el PNCP, el comportamiento de la especie sea el mismo. Teniendo en cuenta que el tamaño de las áreas corresponde a los movimientos de los individuos, estas se pueden modificar de acuerdo la influencia de diferentes factores como la propia extensión de las áreas de estudio, los estados ontogénicos, la presencia de otras especies de tiburones, disponibilidad de presas. Los resultados del presente estudio sugieren que los movimientos de los ejemplares se ven influenciados por el periodo del día. En el caso de los machos adultos, se observa que en la zona sur del Parque las detecciones fueron registradas durante todos los periodos del día en los receptores más alejados de costa (>1,200 metros), a diferencia de la zona norte donde la mayoría de las detecciones ocurrieron durante las horas del periodo “noche”, igualmente en los receptores más alejados a la costa correspondientes a la zona. Las observaciones de los individuos juveniles describen este mismo comportamiento, permaneciendo a lo largo del día en la zona sur del parque, desplazándose hacia la zona norte durante el periodo “noche”. Sin embargo, a

diferencia de los adultos, tanto en la zona norte como en la sur, los juveniles permanecieron la mayoría del tiempo en receptores cercanos a costa ($\leq 1,200$ m).

En un estudio similar a esta investigación, lo ejecutó Tavares (2018) en las costas de Venezuela, donde en lugar de separar los periodos en cuatro, integró las horas para determinar un periodo diurno y uno nocturno. El autor escribe que los juveniles presentaron registros de actividad en las horas crepusculares con una mayor frecuencia en horas de la noche, periodo durante el cual los juveniles tendieron a movilizarse más a lo largo del margen de la costa y los manglares. Otros estudios han reportado que los juveniles de *N. brevirostris* tienden a incrementar su área de actividad espacial y las tasas de movimiento durante las horas crepusculares y nocturnas, tal como en los trabajos de: Gruber *et al.*, (1988), Correia *et al.*, (1995), Sundström *et al.*, (2001) y Wetherbee *et al.*, (2007). Estos resultados son contrastados a los resultados del presente estudio, donde a pesar de que el tiburón juvenil, *Nemo*, fue detectado con mayor frecuencia durante el día, en la noche su patrón de movimiento fue hacia la costa; El caso de *Philip* es muy similar al descrito por otros autores, debido a que fue detectado con mayor frecuencia en el periodo noche a lo largo de la red de receptores en las estaciones cercanas a costa (< 500 metros).

Aunque en la presente investigación no se evaluó la diversidad y disponibilidad de presas, otros artículos han asociado este comportamiento a actividades de alimentación o a zonas de refugio ante depredadores. El uso frecuente de áreas con poca profundidad se ha visto asociado este comportamiento, cuya finalidad sería reducir la depredación por parte de sus congéneres (Morrissey & Gruber, 1993b; Wetherbee *et al.*, 2007; Murchie *et al.*, 2010; Legare *et al.*, 2015). Sin embargo, aunque los tiburones capturados dentro de nuestras jornadas de campo fueron marcados y detectados en diferentes instantes de tiempo, en términos generales se podría describir que mientras los adultos prefieren moverse durante los cuatro periodos del día (amanecer, día, atardecer y noche) en zonas profundas (> 5 metros) alejadas de la costa en la zona sur, desplazándose con mayor frecuencia a estaciones igualmente profundas y alejadas de la costa en el norte del PNCP. Mientras que los adultos parecen preferir los espacios de mayor profundidad para desarrollar estos patrones de movimiento, los juveniles a pesar de exhibir este mismo patrón, de acuerdo con

la frecuencia de sus detecciones, parecen preferir zonas someras o de poca profundidad (<5 metros). Con base en los resultados obtenidos se podría sugerir que la manera en que los individuos de tiburón limón se distribuyen en el Parque Nacional Cabo Pulmo, corresponde a un comportamiento ontogénico, en el que probablemente los juveniles y los adultos delimitan sus áreas a lo largo del día como una estrategia para reducir la competencia y depredación intra-específica (Heupel, 2007).

Distintos autores sugieren que existen otros factores que controlan el patrón diario de actividad de los tiburones que pueden cambiar a lo largo del tiempo. Ejemplo de ello, son los movimientos de las especies influenciados por aspectos como la temperatura superficial del mar y a lo largo de la columna de agua. Reyier *et al.*, (2014) describen que los ejemplares sexualmente inmaduros de tiburón de limón encontrados en agregaciones cercanas a la costa en Cabo Cañaveral (E.E.U.U.), presentan una alta fidelidad a esta región desde diciembre hasta febrero, bajo temperaturas estacionales típicas. Sin embargo, en las caídas de temperatura por debajo de los 15 °C, los autores indican que estas agregaciones presentan un desplazamiento continuo hacia el sur a lo largo de la costa oriental de Florida en busca de aguas más cálidas (intervalo de 20 a 25 °C). Con base en estos resultados, los autores sugieren que en contraste con otras poblaciones de tiburón limón en el atlántico, la mayoría de los individuos juveniles pasan el invierno en el centro-este de Florida, luego realizan una migración anual hacia el norte y pasan el verano en aguas estuarinas cercanas a la costa al norte de Florida, Georgia y las Carolinas antes de regresar al sur de Florida en otoño.

En los resultados del presente estudio, las temperaturas más altas registradas (intervalo entre 27 y 31°C) en cada año de detección corresponden a los meses entre septiembre y diciembre, los cuales concuerdan a los meses en los hubo pocas o ninguna detección. En general los meses que presentaron las temperaturas más bajas fueron los que exhibieron la mayor frecuencia de detecciones (intervalo entre 18 y 25 °C). Con base en lo anterior y de acuerdo con lo propuesto con Reyier *et al.*, (2014), la frecuencia de detección de los individuos en el PNCP podría responder, entre otros aspectos, a la temperatura del agua.

Estudios previos ejecutados en Bimini (Gruber *et al.*, 1988; Morrissey & Gruber, 1993a), Atol das Rocas, Brasil (Wetherbee *et al.*, 2007), en Eleuthera, Bahamas (Murchie *et al.*, 2010) y en Sant John, Islas Vírgenes (Legare *et al.*, 2015), describen que los individuos de tiburón limón presentan poca movilidad y una alta residencia, sugiriendo que los individuos demuestran un comportamiento de fidelidad espacial en las áreas en las que fueron estudiados. La estancia de cada uno de los individuos dentro del Parque fue calculada mediante el índice de residencia (IR) de cada mes en el que el animal fue detectado. Aunque todos los individuos exhibieron patrones de movimiento en zonas y periodos determinados, los IR fueron diferentes para cada uno de ellos.

En contraste a los estudios previos de la especie en otras partes del mundo, nuestros resultados indican que la residencia es diferente entre adultos y juveniles. Mientras los machos exhibieron un alto índice de residencia, los juveniles fueron quienes mostraron los menores valores. El macho adulto, “*Jager*”, presentó en promedio un IR del 75% para un periodo de muestreo de 395 días, *Tom* un 51% de residencia en los 182 días muestreados, *Nemo* exhibió un 38% en 397 días y *Philip* apenas un 20% de residencia en 214 días de observación. Sin embargo, la ausencia de detecciones en algunos periodos y zonas del parque e incluso el bajo índice de residencia, podrían obedecer a factores independientes al comportamiento de los individuos. Uno de estos factores podría ser netamente metodológico, como, por ejemplo, la ausencia de receptores cercanos a la línea de costa. Teniendo en cuenta que la costa dentro del Parque tiene una extensión de 9,3 km y que únicamente fueron monitoreados 0,9 km (que incluso estuvieron entre 500 y 900 m alejados de ella) es decir, solo un 9,6% de la extensión total, no podemos saber si en los periodos en que los animales no fueron captados por los demás receptores, se debía a que estos se encontraban en zonas cercanas a costa (entre la zona de rompiente y 100 metros mar adentro).

BIBLIOGRAFÍA

- Aburto-Oropeza O., Erisman, B., Galland, G. R., Mascareñas-Osorio, I., Sala, E., & Ezcurra, E. 2011. Large recovery of fish biomass in a no-take marine reserve. *PloS one*, 6(8), e23601.
- Asúnsolo A. 2016. Distribución, abundancia y riqueza de especies de tiburones del arrecife de Cabo Pulmo, B.C.S. México. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Bass A.J. 1978. Problems in studies of sharks in the Southwest Indian Ocean. *Sensory biology of sharks, skates and rays*. Hodgson E.S. & Mathewson R.F. (eds.). 545–594 pp.
- Baum J.K., Myers R.A., Kehler D.G., Worm B., Harley S.J. & Doherty P.A. 2003. Collapse and conservation of shark populations in the northwest Atlantic. *Science*. 299:389–392 pp.
- Begon M., Townsend C.R. & Harper J.L. 2006. *Ecology: from individuals to ecosystems*. 4th Edition. Blackwell Publishing, Oxford, UK. 738 pp.
- Börger L., Francon N., De Michele G., Gantz A., Meschi F., Manica A., Lovari S. & Coulson T. 2006. Effects of sampling regime on the mean and variance of home range size estimates. *Journal of Animal Ecology* 75: 1393–1405.
- Bound M.A., Valentin-Albanese J., Babcock E.A., Abercrombie D., Lamb N.F., Miranda A., Pikitch E.A. & Chapman D.D. 2017. Abundance and size structure of a reef shark population within a marine reserve has remained stable for more than a decade. *Marine Ecology Progress Series* 576:1–10 pp.
- Castillo-Géniz J.L., Márquez-Farias J.F., Cruz M.C.R., Cortés E. & Prado A.C. 1998. The Mexican artisanal shark fishery in the Gulf of Mexico: Towards a regulated fishery. *Marine Freshwater Research* 49:611–620 pp.
- Castro J.I. 1993a. The shark nursery of Bull Bay, South Carolina, with a review of the shark nurseries of the southeastern coast of the United States. *Environmental Biology of Fishes*. 38:37–48 pp.
- Cisneros-Montemayor A. M., Barnes-Mauthe M., Al-Abdulrazzak D., Navarro-Holm, E., & Sumaila, U. R. 2013. Global economic value of shark ecotourism: implications for conservation. *Oryx*, 47(3), 381-388 pp.
- Correia J., Marignac J.R.C. & Gruber S.H. 1995. Young lemon shark behaviour in Bimini lagoon. *Bahamas Journal of Science* 3(1):2–8 pp.
- Cortés E. 1999. A stochastic stage-based population model of the sandbar shark in the western north Atlantic. *Life in the slow lane: ecology and conservation of long lived marine animals*. Musick J.A. (ed.) 115–136 pp.

- Dulvy N.K., Fowler S.L., Musick J.A., Cavanagh R.D., Kyne P.M., Harrison L.R., Carlson J.K., Davidson L.N.K., Fordham S.V., Francis M.P., Pollock C.M., Simpfendorfer C.A., Burgess G.H., Carpenter K.E., Compagno L.J.V., Ebert D.A., Gibson C., Heupel M.R., Livingstone S.R., Sanciangco J.C., Stevens J.D., Valenti S. & White W.T. 2014. Extinction risk and conservation of the world's sharks and rays. *eLife* 3: e00590.
- Dulvy N.K., Simpfendorfer C.A., Davidson L.N.K., Fordham S.V., Brautigam A., Sant G. & Welch D.J. 2017. Challenges and priorities in shark and ray conservation. *Current Biology* 27(11):565–572 pp.
- Eriksson H. & Clarke S. 2015. Chinese market responses to overexploitation of sharks and sea cucumbers. *Biology Conservation* 184:163–173 pp.
- Franks B.R. 2007. The spatial ecology and resource selection of juvenile lemon sharks (*Negaprion brevirostris*) in their primary nursery areas. Ph.D. Thesis. Drexel University, USA. 203 pp.
- Gallucci V.F., Taylor I.G. & Erzini K. 2006. Conservation and management of exploited shark populations based on reproductive value. *Canadian Journal of Fishery and Aquatic Science* 63:931–942 pp.
- Garla R.C., Chapman D.D., Wetherbee B.M. & Shivji M.S. 2006. Movement patterns of young Caribbean reef sharks, *Carcharhinus perezi*, at Fernando de Noronha Archipelago, Brazil: the potential of marine protected areas for conservation of a nursery ground. *Marine Biology* 149:189–199 pp.
- Graham F., Rynne P., Estevanez M., Luo J., Ault J.S. & Hammerschlag N. 2016. Use of marine protected areas and exclusive economic zones in the subtropical western North Atlantic Ocean by large highly mobile sharks. *Diversity and Distributions* 2016:1–13 pp.
- Grubbs R.D., Carlson J.K., Romine J.G., Curtis T.H., McElroy W.D., McCandless C.T., Cotton C.F., & Musick J.A. 2016. Critical assessment and ramifications of a purported marine trophic cascade. *Nature, Scientific Reports*. e20970. 6:1–12 pp.
- Gruber S.H., Nelson D.R. & Morrissey J.F. 1988. Patterns of activity and space utilization of juvenile lemon sharks, *Negaprion brevirostris*, in a shallow Bahamian lagoon. *Bulletin of Marine Science* 43(1):61–76 pp.
- Heithaus M.R. 2007. Nursery areas as essential shark habitats: A theoretical perspective. *American Fishery Society Symposium* 50:3–13 pp.
- Heupel M.R. & Simpfendorfer C.A. 2005. Using acoustic monitoring to evaluate MPAs for shark nursery areas: the importance of long-term data. *Marine Technology Society Journal* 39:10–18 pp.
- Heupel M.R., Carlson J.K. & Simpfendorfer C.A. 2007. Shark nursery areas: concepts, definition, characterization and assumptions. *Marine Ecology Series Progress* 337:287–297 pp.

- Knip D.M., Heupel M.R. & Simpfendorfer C.A. 2012. Evaluating marine protected areas for the conservation of tropical coastal sharks. *Biological Conservation* 148:200–209 pp.
- Legare B., Kneebone J., DeAngelis B. & Skomal G. 2015. The spatiotemporal dynamics of habitat use by blacktip (*Carcharhinus limbatus*) and lemon (*Negaprion brevirostris*) sharks in nurseries of St. John, United States Virgin Islands. *Marine Biology* 162:699–716 pp.
- Meek A. 1916. The migrations of fish. Edward Arnold.
- Mohr C.O. 1947. Table of equivalent populations of North American small mammals. *American Midland Naturalist* 37: 223–449.
- Morrissey J.F. & Gruber S.H. 1993a. Home range of juvenile lemon sharks, *Negaprion brevirostris*. *Copeia* 1993(2):425–434 pp.
- Morrissey J.F. & Gruber S.H. 1993b. Habitat selection by juvenile lemon sharks, *Negaprion brevirostris*. *Environmental Biology of Fishes* 38:311–319 pp.
- Murchie K.J., Schwager E., Cooke S.J., Danylchuk A.J., Danylchuk S.E., Goldberg T.L., Suski C.D. & Philipp D.P. 2010. Spatial ecology of juvenile lemon sharks (*Negaprion brevirostris*) in tidal creeks and coastal waters of Eleuthera, The Bahamas. *Environmental Biology of Fishes* 89:95–104 pp.
- Newman S.P. 2003. Spatial and temporal variation in diet and prey preference of nursery-bound juvenile lemon sharks (*Negaprion brevirostris*) at Bimini, Bahamas. Ph.D. Thesis, University of Plymouth, U.K. 263 pp.
- QGIS Development Team. 2020. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org>.
- Reyier E.A., Franks B.R., Chapman D.D., Scheidt D.M., Stolen E.D. & Gruber S.H. 2014. Regional-scale migrations and habitat use of juvenile lemon sharks (*Negaprion brevirostris*) in the US South Atlantic. *PLoS ONE* 9 (2): 1–13 pp.
- Simpfendorfer C.A. 1999. Demographic analysis of the dusky shark fishery in southwestern Australia. *Life in the slow lane: ecology and conservation of long lived marine animals*. Musick J.A. (ed.). American Fisheries Society Symposium 23, Bethesda, M.D. 149–160 pp.
- Simpfendorfer C.A. & Milward N.E. 1993. Utilization of a tropical bay as a nursery area by sharks of the families Carcharhinidae and Sphyrnidae. *Environmental Biology of Fishes* 37:337–345 pp.
- Springer S. 1967. Social organization of shark populations. *Sharks, skates and rays*. Gilbert P.W., Matheson R.F. & Rall D. (eds.) 149–174 pp.

- Sundström L.F., Gruber S.H., Clermont S.M., Correia J.P.S., Marignac J.R.C., Morrissey J.F., Lowrance C.R., Thomassen L. & Oliveira M.T. 2001. Review of elasmobranch behavioral studies using ultrasonic telemetry with special reference to the lemon shark, *Negaprion brevirostris*, around Bimini Islands, Bahamas. *Environmental Biology of Fishes* 60:225–250 pp.
- Tavares R. 2018. Distribución, área de cría y variables demográficas y espaciales del tiburón limón, *Negaprion brevirostris* (Poey 1868) en el Parque Nacional Archipiélago Los Roques. Ph.D. Thesis. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Venezuela. 275 pp.
- Tavares R. & Sánchez L. 2012. Áreas de cría de tiburones en el Golfo de Venezuela. *Ciencia* 20(2):112–119 pp.
- Tilman D. & Kareiva P. 1997. Spatial ecology: The role of space in population dynamics and interspecific interactions. Princeton University Press, New Jersey. 338 pp.
- Topelko K.N., & Dearden, P. 2005. The shark watching industry and its potential contribution to shark conservation. *Journal of Ecotourism*, 4(2), 108-128 pp.
- Vianna G. M., Meekan, M.G., Pannell, D.J., Marsh, S. P., & Meeuwig, J. J. 2012. Socio-economic value and community benefits from shark-diving tourism in Palau: a sustainable use of reef shark populations. *Biological Conservation*, 145(1), 267-277 pp.
- Wetherbee B.M., Gruber S.H. & Rosa S. 2007. Movement patterns of juvenile lemon sharks within Atol das Rocas, Brazil: a nursery characterized by tidal extremes. *Marine Ecology Progress Series* 343:283–293 pp.
- White T.D., Carlisle A.B., Kroodsma D.A., Block B.A., Casagrandi R., De Leo G.A., Gatto M., Micheli F. & McCauley D.J. 2017. Assessing the effectiveness of large marine protected for reef shark conservation. *Biological Conservation* 207:64–71 pp.
- Worton B.J. 1987. A review of models of home range for animal movement. *Ecological Modeling* 38:277–298.
- Yates P.M., Tobin A.J., Heupel M.R. & Simpfendorfer C.A. 2015. Benefits of marine protected areas for tropical coastal sharks. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 26(6):1063–1080 pp.
- Yeiser, B.G., Heupel, M.R., & Simpfendorfer, C.A. 2008. Occurrence, home range and movement patterns of juvenile bull (*Carcharhinus leucas*) and lemon (*Negaprion brevirostris*) sharks within a Florida estuary. *Marine and Freshwater Research*, 59(6), 489-501.
- Yokota L. & Lessa R.P. 2006. A nursery area for sharks and rays in Northeastern Brazil. *Environmental Biology of Fishes* 75:349–360 pp.

CAPÍTULO 3.

**PATRÓN DIARIO DE MOVIMIENTO DE UN INDIVIDUO DE TIBURÓN
LIMÓN:**

CASO DE ESTUDIO EN EL PARQUE NACIONAL CABO PULMO

INTRODUCCIÓN

Un aspecto esencial para la historia natural, puesto que es una manifestación en respuesta a factores medioambientales o a su condición fisiológica, es el comportamiento (Shepard *et al.*, 2008). Debido a la complejidad para describir el comportamiento de los organismos, se han creado líneas de investigación dedicadas a medir de manera única o simultánea varios factores (Martin & Bateson, 2007). Una de estas líneas, se basa en la descripción del comportamiento a partir de la evaluación del movimiento, utilizando sensores internos o externos (Cooke *et al.*, 2004) a los que se le ha incluido acelerómetros (Kato *et al.*, 2006).

La capacidad de los acelerómetros para medir la orientación y la dinámica del movimiento permite obtener datos sobre los diferentes comportamientos de las especies en vida silvestre, los cuales no serían asequibles u observables en tiempo real (Yoda *et al.*, 1999). El uso de esta herramienta combinado con la información de seguimiento de los organismos (Tanaka *et al.*, 2001), se ha posicionado como la manera de abordar aspectos ecológicos y comportamentales, obteniendo información sobre la extensión del área de actividad a partir de la creación de mapas (Amlaner & Mac Donald, 1980). La recreación de estos polígonos de actividad permitiría delimitar el tipo de hábitat según su importancia o conducta asociada (i.e., reproducción, crianza, alimentación), así como para describir el sitio donde los organismos llegasen a presentar comportamientos particulares intra e interespecíficos.

Según Shepard *et al.*, (2008), la medición de la aceleración como atributo tiene tres ventajas: (1) Proporcionar una alternativa a la evaluación del movimiento animal en todas las dimensiones espaciales para lograr un estimado más preciso del cuerpo completo del organismo para identificar tipos de comportamiento; (2) Estimar el gasto energético de un animal cuando realiza algún comportamiento (Wilson *et al.*, 2006); (3) Cuantificar la aceleración ejercida por un animal, mediante la alineación del acelerómetro con el plano horizontal. Se debe tener en cuenta cualquier reducción de la aceleración medida en un eje determinado, se presentará compensada en las otras dimensiones, con el fin que la orientación del dispositivo sobre el animal sea menos crítica.

Los movimientos de los animales se componen por acciones que pueden variar tanto en su complejidad como en el tiempo de duración, por lo que el resultado de la aceleración termina por abordarse desde sus componentes estático y dinámico; haciendo que su interpretación sea compleja. Adicionalmente, diversos autores han demostrado que además del uso de acelerómetros, la integración de cámaras ha sido la clave para la identificación de los tipos de movimiento y comportamiento en diferentes taxones como tortugas marinas (Heithaus *et al.*, 2002), cetáceos (Calambokidis *et al.*, 2007), pinnípedos (Bowen *et al.*, 2002), aves marinas (Ponganis *et al.*, 2000; Yoda *et al.*, 2011) y peces (Beltramino & Madryn, 2016), entre otros.

En el caso de los tiburones, se han utilizado cámaras para evaluar e identificar comportamientos y patrones de movimiento en diferentes especies. Heithaus *et al.*, (2002) describieron el comportamiento de forrajeo y el uso del hábitat de tiburones tigre (*Galeocerdo cuvier*) en un ecosistema de pastos marinos al oeste de Australia, donde a partir del seguimiento de 45 individuos, revelaron que el patrón de movimiento general es hacia el norte, donde su distribución es influenciada por la disponibilidad de presas, las cuales son encontradas mayormente en áreas de poca profundidad. Jewell *et al.*, (2019) describieron el uso de un hábitat críptico de un tiburón blanco (*Carcharodon carcharias*) dentro de un bosque de *kelp* (algas gigantes) en la Isla Dyer (Sudáfrica), donde a partir de una marca personalizada conocida como CATS (Costumized Animal Tracking Solutions) adherida a su aleta dorsal, describieron que el comportamiento de alimentación/depredación dentro de estos "bosques" es muy diferente a la técnica de emboscada utilizada en aguas abiertas o zonas costeras.

Shepard *et al.*, (2008) identificaron patrones rítmicos de locomoción, alimentación e interacciones sociales de 12 especies diferentes (entre ellas, dos individuos de tiburón limón capturados en la Isla Bimini (Bahamas)) mediante el uso de datos de la aceleración triaxial a partir de acelerómetros. Los instrumentos fueron adosados sobre animales en cautiverio y en libertad. Los autores exponen que la interpretación de los datos de aceleración puede ser compleja, debido a que el componente estático (indicativo de postura) y dinámico (movimiento) se derivan del valor total de la aceleración. Por último,

indican que los datos del acelerómetro se pueden combinar con información posicional, con el objetivo de identificar patrones de uso del área y mapear la distribución de cada uno de los comportamientos. Concluyen que, a partir de la medición de la aceleración triaxial, se puede proporcionar conocimiento de los procesos tanto a nivel individual como poblacional, los cuales pueden influir en el desarrollo y eficacia de los planes de conservación.

Bullock *et al.*, (2015) investigaron el comportamiento y el tiempo de recuperación de individuos juveniles de tiburón limón en respuesta a la instalación de un paquete de etiquetas (CEFAS, Acelerómetro triaxial G6A con transmisor acústico, Sonotronics PT4 epoxi). Los autores intentaron identificar la compensación conductual, a partir de mecanismos que indicaran el estrés en elasmobranquios usando marcas externas; midieron la expresión de las respuestas y determinaron el tiempo que tardaron los animales en volver a un estado de homeostasis conductual. Los ensayos tanto en cautiverio (n = 10, longitud total, rango LT 80-140 cm) como en libertad (n = 7, rango LT 100-160 cm) no detectaron cambios en los diferentes comportamientos (nado, velocidad, frecuencia de batido de cola, tiempo de descanso y frecuencia de rozaduras) entre los tiburones de ambas áreas. En los ensayos dentro de su hábitat natural, después de la instalación de la marca, los ejemplares volvieron a un estado de natación estable luego de entre 2 y 35 minutos.

A partir del seguimiento de cada individuo, los autores registraron que después del proceso de manipulación en instalación de la marca, todos los tiburones nadaron inmediatamente hacia la costa, permanecieron dentro de 100 m de la costa durante largos períodos. Con base en estos resultados, los autores indican que aunque *N. brevirostris* es capaz de adaptarse rápidamente a factores estresantes (como la manipulación) y demostrar (en términos de actividad) una recuperación rápida, los datos de seguimiento sugieren que los individuos pueden modificar sus patrones de uso espacial posterior a la liberación.

Bouyucos *et al.*, (2017) analizaron la velocidad de nado y las tasas metabólicas de 25 juveniles de esta especie con base en la aceleración. Los autores calibraron los acelerómetros triaxiales de manera que fuera posible estimar las velocidades de natación y

las tasas metabólicas de tiburones semi-cautivos en un experimento al aire libre que se encuentra limitado y completa o parcialmente cerrado con la intención de delimitar la brecha entre el laboratorio y el espacio natural. Los tiburones fueron capturados en la isla Eleuthera (Bahamas), (LT: 60-75 cm; peso 1-2 kg). El experimento consistió en equipar a cada uno de los individuos con un acelerómetro y un respirómetro e inducirlos a nadar a diferentes velocidades a través de un túnel de natación. Sus resultados indican que, en lugar de la acción corporal dinámica general, la frecuencia de los movimientos de la cola derivada de la aceleración, fue el predictor más fuerte de la tasa metabólica. La tasa metabólica activa calculada fue de 249.7 ± 1.9 mg de O_2 $kg^{-1} h^{-1}$ y la tasa metabólica diaria promedio (ADMR) de 88.7 ± 0.7 kJ $kg^{-1} d^{-1}$ a 30°C. La velocidad crítica de natación calculada fue de 0.71 ± 0.03 longitudes corporales por segundo (BL s^{-1}), y la velocidad de nado fue de 0.19 ± 0.01 BL s^{-1} . Los autores concluyeron que (1) los niveles de actividad locomotora de los tiburones semi cautivos fueron influenciados por el estado de la marea y el período diurno, y (2) que los tiburones tienden a incrementar su velocidad de nado durante los períodos diurnos y las mareas de altas o de “inundación”.

En general, los trabajos hechos hasta la fecha sobre *N. brevirostris* han sido sobre individuos del Océano Atlántico. El presente estudio es el primero en aportar información sobre el comportamiento de esta especie en el Océano Pacifico Oriental utilizando un acelerómetro triaxial y una cámara (ambos integrados a un dispositivo personalizado (Customized Animal Tracking Solutions, CATS)) sobre una hembra adulta de tiburón limón (*Negaprion brevirostris*) en el Parque Nacional Cabo Pulmo (Baja California Sur, México).

MARCO TEÓRICO

El comportamiento animal es clave para comprender algunos aspectos de la ecología animal, los datos acerca de la manera y el lugar donde se desarrollan dichas conductas proporciona información sobre las estrategias de vida o aspectos particulares como patrones migratorios, estrategias reproductivas, entre otros (Hays *et al.*, 2016). En el caso de especies acuáticas, las observaciones directas y continuas del comportamiento son particularmente difíciles de obtener (Gleiss *et al.*, 2009a) debido a múltiples factores: algunas son muy móviles y protagonizan movimientos migratorios extensos (Wilson *et al.*, 2006), otras pueden encontrarse asociadas a periodos nocturnos (Hammond *et al.*, 2016) u otras podrían verse comprometidas por la presencia de un ser humano (Brown *et al.*, 2013). Hoy en día las herramientas para observar de forma remota el comportamiento, la fisiología e incluso los patrones movimiento, se captan a partir de uno o varios registradores electrónicos que miden entre otros parámetros aceleración, velocidad, luminosidad, temperatura, presión (Rutz & Hays, 2009).

Teniendo en cuenta que la postura o el movimiento corporal responde a un comportamiento en particular, los datos de aceleración proveen una medición de alta resolución permitiendo simultáneamente los estudios en localidades remotas (Wilson *et al.*, 2006). La aceleración medida en sus tres ejes es considerada como la más favorable al momento de caracterizar los comportamientos animales que desarrollan en un espacio tridimensional, donde entre mayor sea el número de frecuencias en el muestreo, la descripción de los comportamientos será mejor (Nathan *et al.*, 2012).

En general, la teoría del procesamiento (conocida como el criterio de Nyquist), indica que los acelerómetros deben programarse con una frecuencia de muestreo al menos el doble que la frecuencia mínima producida del movimiento corporal más rápido de interés (Chen & Bassett, 2005). Varios autores han analizado e identificado comportamientos de animales terrestres y acuáticos a partir de datos de aceleración utilizando una amplia gama de frecuencias de muestreo, que podrían ir desde tan solo 1 Hz (Whitney *et al.*, 2007) hasta 100 Hz (Broell *et al.*, 2013; le Roux *et al.*, 2017). Uno de los principales retos al utilizar

estos métodos, es que si la grabación de datos es programada para que su frecuencia sea menor a un segundo (> 1 Hz) en los tres ejes (como por ejemplo este estudio), el resultado contendría millones de registros, lo que indiscutiblemente hace del análisis de datos una tarea que requiere mucho tiempo (Shepard *et al.*, 2008b; Brown *et al.*, 2013).

Un problema importante respecto al uso de acelerómetros es que, en la mayoría de los dispositivos, tanto el almacenamiento de memoria como la duración de la batería pueden llegar a su límite rápidamente cuando la frecuencia de datos es muy alta, como por ejemplo en los casos donde se requiere que los datos sean a escala muy fina para diferenciar tipos de comportamiento en cortos periodos de tiempo (Halsey *et al.*, 2008). Lo anterior implica que solo se pueden almacenar registros captados durante periodos cortos de tiempo (< 1 semana), lo cual limita la representación de cada uno de los comportamientos que presentan los animales en respuesta a las condiciones ambientales.

Existen dos métodos que permiten la identificación de comportamientos con base en los conjuntos de datos de aceleración. El primero es el aprendizaje automático (ML), el cual clasifica de manera automática cada uno de los comportamientos previamente registrados (Grünewälder *et al.*, 2012; Ladds *et al.*, 2017). El segundo es el aprendizaje supervisado, en cual se deben etiquetar datos comprobados en tierra desde observaciones directas, hasta conformar un algoritmo de clasificación para posteriormente predecir el comportamiento a partir de nuevos datos (Gao *et al.*, 2013; Valletta *et al.*, 2017).

Dentro de los algoritmos de clasificación con aprendizaje automático se encuentra el de “*Random Forest (RF)*”, el cual se ha utilizado por varios autores para clasificar el comportamiento de los individuos a partir de los datos de aceleración (Nathan *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2015; Sur *et al.*, 2017; Walton *et al.*, 2018). Los algoritmos de RF son un clasificador de conjuntos de datos mediante el cual se crean múltiples árboles de regresión o clasificación (Breiman, 2001).

Los movimientos “más rápidos” donde la frecuencia y la amplitud de la aceleración es mayor (denominados “comportamientos complejos”), han sido difíciles de identificar a partir de método RF, lo que sugiere que, para una clasificación exitosa de estos

comportamientos, se requieren frecuencias más altas (Broell *et al.*, 2013). Ejemplo de ello son los resultados de Horie *et al.*, (2017), donde a partir de frecuencias de muestreo de 200 Hz pudieron la identificar exitosamente ($F1 > 0,7$) comportamientos alimentarios en meros (*Epinephelus akaara*).

La ventaja de identificar comportamientos y patrones de actividad de forma remota podría ayudar en la construcción de estrategias de conservación y manejo para muchas especies. La programación de acelerómetros es importante para que la interpretación de datos sea correcta, obteniendo un mayor número de datos a partir de frecuencias más bajas, reduciendo la velocidad en la que la capacidad de memoria se sature y optimizando el tiempo del consumo de la batería. Los dispositivos programados con una frecuencia de muestreo de 5 Hz pueden durar hasta 30 días registrando datos (según la programación de almacenamiento, por ejemplo, número de bits) sin sacrificar el rendimiento de la clasificación (Hounslo *et al.*, 2019).

MATERIALES Y MÉTODOS

Marcaje

El trabajo de campo se llevó a cabo en 2017. Los doctores Yannis P. Papastamatiou, James Ketchum y Mauricio Hoyos (colaborador y directores de ONG Pelagios Kakunjá, respectivamente) capturaron (con un palangre) y marcaron una hembra adulta de *N. brevirostris* de 215 cm de longitud total en el Parque Nacional Cabo Pulmo (Baja California Sur, México) (Fig. 59). En esa ocasión se utilizó una marca personalizada llamada “CATS” por sus siglas en inglés “Customized animal tracking solutions” es decir “soluciones personalizadas para seguimiento de animales” (Fig. 60). La marca estuvo compuesta por una cámara (CATS-Cam) y por varios sensores de alta resolución (CATS-Diary) que midieron la profundidad, temperatura, luminosidad y aceleración.



Figura 59. Hembra de tiburón limón (*Negaprion brevirostris*) capturada en mayo de 2017 por James Ketchum



Figura 60. Marca CATS (Customized animal tracking solutions) utilizada para marcar el ejemplar.

Teniendo en cuenta que no se contó con información detallada de aspectos básicos de natación de individuos de la especie, para pre programar la configuración de la cámara, se procedió a medir "por defecto" con base en el tiempo en el que se registra cada dato (0.05 segundos); se asumió que los sensores giroscopio, magnetómetro y acelerómetro triaxial, estuvieron configurados para que su registro de datos fuera de 20 Hz. La marca estuvo conectada una cámara de video HD para filmar a 30 cuadros por segundo (fps). Los sensores “Diary y Cam” estaban incluidos en un armazón de resina epoxi y micro-burbujas, fabricada a su medida; al cual se le fue conectado un transmisor de VHF para su posterior recuperación.

La marca se unió a un gancho o abrazadera tipo resorte de acero inoxidable, puesta a través de un pasador de acoplamiento y un GTR corrosible (Neptune Marine Products, EE. UU). Para bloquear la abrazadera de la aleta, se pusieron almohadillas de fricción abrasivas (aproximadamente de 4×4 cm), que se ajustaban a la aleta dorsal y permitían que la montura permaneciera en la aleta a mayores velocidades sin perforar o lastimar la piel del animal.

Una de las características de esta marca es que no es invasiva, tanto su instalación como su liberación no comprometen la salud corporal del animal. La marca se libera pasivamente del animal después de un período de tiempo determinado. Para facilitar el desprendimiento de la marca, se cortó un brazo de la abrazadera cerca de la espiral del resorte, el cual se

volvió a conectar con una manga de magnesio. Debido a su constitución química, el manguito de magnesio se disolvió en 14 y 15 horas después de entrar en contacto con el agua salada, separando la abrazadera del brazo y a su vez la marca de la aleta. Para aumentar la probabilidad de recuperar la marca, el enlace GTR se desgastó y la unidad de etiqueta flotó libre de la abrazadera para finalmente ser localizada con un receptor de VHF.

Análisis de video

Procesamiento de video: Windows media player

Se analizaron y clasificaron 254.26 minutos de video (separados en siete segmentos) con base en los patrones de movimientos y comportamiento del tiburón en su hábitat natural usando el programa Windows media player (V12.0.19041.662; Microsoft, 2009), registrando observaciones sobre el tipo de fondo, fauna asociada y tiempo que el animal pasó en superficie (< 2 metros de profundidad), a media agua (entre 2 y 15 m) y en zonas profundas (>15 m). También se registraron orientaciones de nado y observaciones de movimientos corporales como ráfagas activas o movimientos bruscos y movimientos lentos.

La duración y las características de cada una de las observaciones dentro del video fueron registradas en una tabla de Excel. Los videos fueron reproducidos mínimo tres veces en diferentes instantes de tiempo, con el objetivo de reducir el riesgo de no haber registrado algún comportamiento o alguna característica del hábitat. La duración de cada observación se determinó a partir del inicio del movimiento o actividad hasta el momento que el animal cambió de comportamiento.

Aceleración corporal dinámica general

La aceleración corporal dinámica general (ACDG), llamada de ahora en adelante en este documento por sus siglas en inglés “*Overall Dynamic Body Acceleration*” (ODBA), es la aceleración dinámica combinada e inducida sobre el centro de masa de un animal dada

a partir del movimiento de partes del cuerpo en todos los ejes, es una herramienta para obtener información detallada sobre el comportamiento animal (i.e. Yoda *et al.*, 2001, Watanabe *et al.*, 2005). La aceleración medida se compone de un componente estático y un componente dinámico. La aceleración estática indica la postura del animal debido a que es quien se relaciona a la inclinación del acelerómetro con respecto al campo gravitacional de la tierra. Los cambios de postura suelen estar representados como cambios bajos de frecuencia en la señal de aceleración. La aceleración dinámica se encuentra más relacionada con los cambios en la velocidad a partir de los patrones de movimiento del animal (Yoda *et al.*, 2001), los cuales son usualmente registrados como señales de frecuencia más altas. Ambos componentes se pueden medir si el acelerómetro se instala en el tronco del animal, debido a que los movimientos en una determinada dirección harán que el centro de masa se mueva en la dirección opuesta (Shepard *et al.*, 2008a).

Los datos de la aceleración representan movimientos de traslación y rotación. Los movimientos de translación se registraron en 3 ejes, uno dorso-ventral denominado “*heave*” o “empuje” (eje z), uno anterior-posterior llamado “*surge*” u “oleaje” (eje y) y otro lateral nombrado “*sway*” u “oscilación” (eje x), a partir de unidades experimentales diarias “*daily diary*” o “(DD)” (Wilson *et al.*, 2008). Los movimientos de rotación también fueron registrados en 3 ejes: (1) sobre el eje transversal (y) la rotación es representada con movimientos de arriba-abajo y es denominada “*Pitch*” o “Cabeceo”; (2) movimientos de inclinación sobre el eje longitudinal (x) denominados como “*Roll*” o “Balanceo”; (3) movimientos de lado a lado o sobre su eje vertical (z) llamados “*Yaw*” o “*Guñida*”. Debido a lo novedoso de este tipo de aproximación y con el propósito de hacer que los datos aquí presentados sean comparables y comparados con otros estudios, en el desarrollo del documento se usó con prelación la nomenclatura de los movimientos de rotación en inglés

Aceleración Estática

Los valores de aceleración se obtuvieron en términos de fuerza “g”, donde g representa la aceleración obtenida a partir de la fuerza de gravedad y asciende a partir de 1 g o $9,81 \text{ ms}^{-2}$ de aceleración. Su valor se puede aproximar utilizando una media móvil (Shepard *et al.*, 2008b) (figura 2), en este caso, conocida como “*aceleración estática*”. Este tipo de

aceleración es necesaria para calcular los movimientos de *Pitch* y *Roll* (Wilson *et al.*, 2008), las cuales a su vez, son necesarias para calcular el rumbo de la brújula, cuando la orientación del dispositivo no está nivelado (como suele ocurrir cuando se etiqueta a un animal). Si bien “g” es la aceleración estática en el movimiento de translación *heave*, el *pitch* será calculado como el arcoseno de *g*. Sin embargo, si “g” es la aceleración estática en el movimiento de translación *sway*, el arcoseno de *g* dará como resultado el valor del *roll*. La aceleración estática varía de 1 a -1g en cada uno de los movimientos, donde cada sensor registra el máximo g cuando el organismo se encuentre mirando hacia arriba, totalmente opuesto al campo gravitacional de la tierra.

La sensibilidad con la que el acelerómetro mide los cambios en el *pitch* varía respecto a su ángulo, debido a que el ángulo del cuerpo es el arcoseno del componente estático. El *pitch* puede ser derivado tanto del *surge* como del *heave*, si un animal está erguido e inmóvil, entonces el *heave* medirá 1 g y el *surge* 0 g. Si por ejemplo el animal llegase a girar 40°, debido a la función de arcoseno, el cambio en g medido en *surge*, se vuelve proporcionalmente mayor que el medido por el *heave*. Generalmente, el *surge* es más sensible a los cambios en el *pitch* cuando el ángulo cambia 45°. Por otra parte, el *heave* se vuelve más sensible cuando el cambio en el *pitch* es de 90° (Fig. 61; Shepard *et al.*, 2008b).

Mientras el *pitch* se deriva de la aceleración estática, también debe derivarse de la aceleración total, la cual se conforma por la aceleración estática y dinámica. La aceleración estática puede obtenerse a partir de un “filtro” (i.e., Tanaka *et al.*, 2001) o “suavizado” de datos (Yoda *et al.*, 2001, Wilson *et al.*, 2008) antes de convertir el valor obtenido en grados utilizando la función arcoseno. Por lo tanto, es posible estimar los ángulos de movimiento del *pitch* y el *roll* bajo un simple análisis visual de los datos de la aceleración total, siempre y cuando se asuma que el acelerómetro se encontrase perfectamente alineado con el plano horizontal del animal y por lo tanto su ángulo tenga un valor de 0°. Si el dispositivo se instala con una orientación sesgada, los datos obtenidos resultarán en ángulos de inclinación que desplazarían (teóricamente) el movimiento del animal.

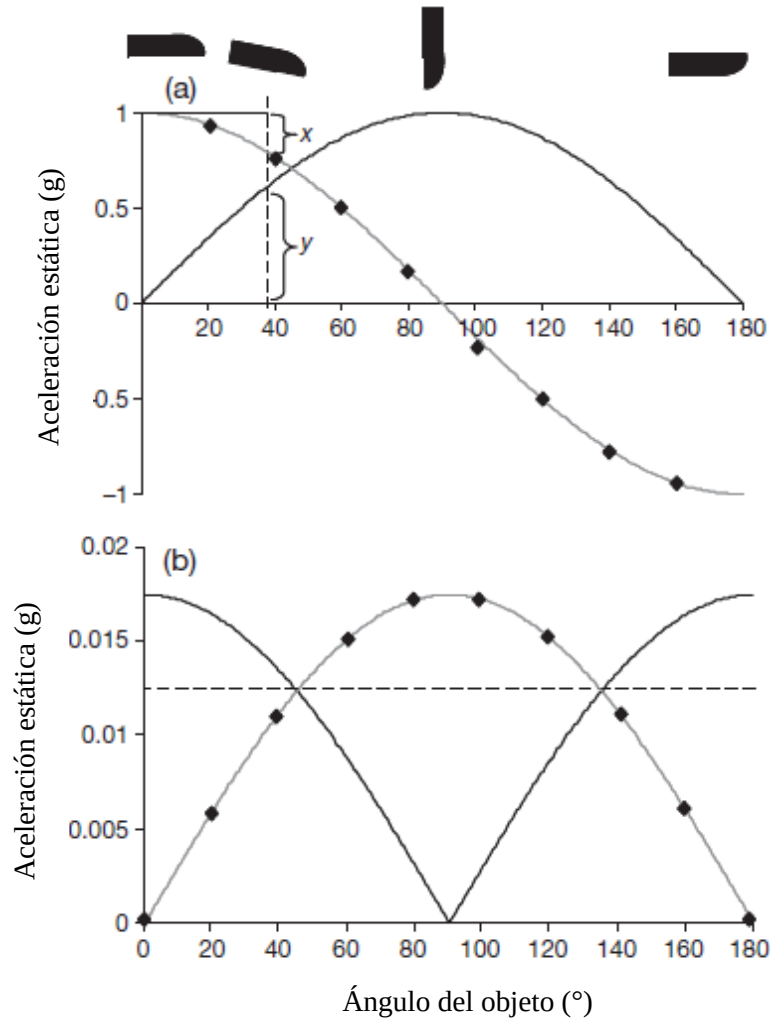
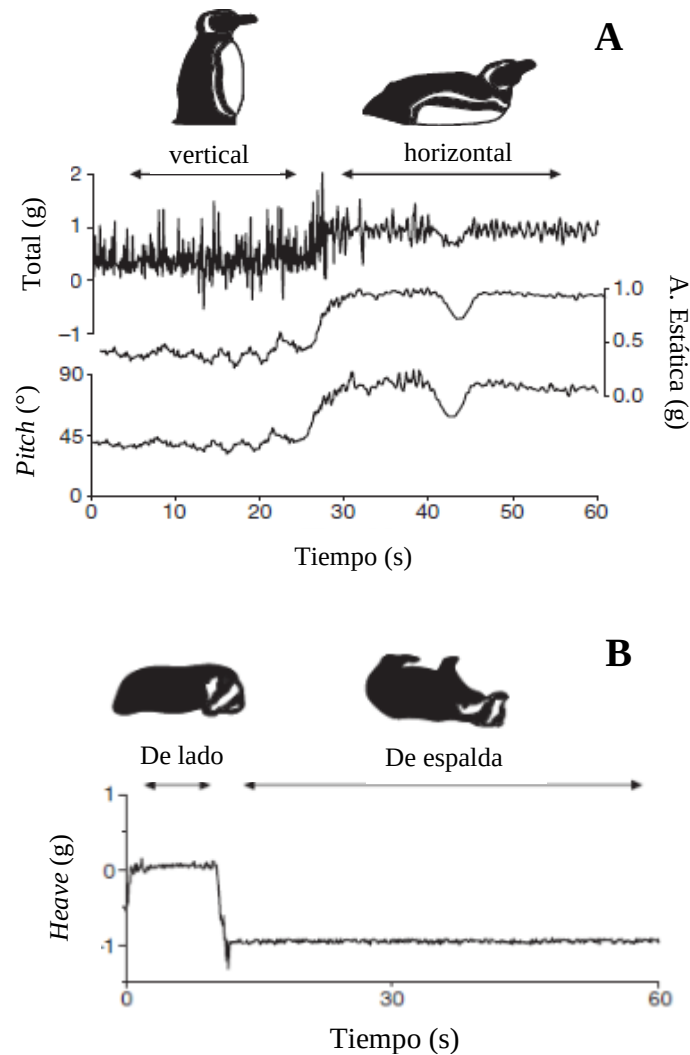


Figura 61. (a) Relación entre la aceleración estática y el ángulo de posición del cuerpo respecto a los movimientos *heave* y *surge* (disposición del objeto que se ve encima del gráfico). El *heave* está representado por la línea punteada (---) y el *surge* por la línea continua (—). Después de voltear el objeto 40°, (línea punteada), el cambio en el *surge* (y) es mayor que el cambio en el *heave* (x). (b) Tasa de cambio de la aceleración estática (en unidades de g para cada grado en respuesta al movimiento) en el *heave* (---) y en el *surge* (—) dibujada contra el ángulo del cuerpo, donde la línea punteada indica el momento en que cada eje es más sensible a los cambios en el *Pitch*. Imagen tomada del artículo de Shepard *et al.*, (2008b).

La identificación del *pitch* y el *roll* es importante para la clasificación de los patrones de movimiento de los animales (Watanabe *et al.*, 2005). La postura corporal de un individuo puede ser útil a gran escala. Por ejemplo, si un tiburón se encuentra en una posición horizontal, podría indicar que este pudiera encontrarse descansando o nadando, sin embargo, si este estuviera en una posición vertical, indicaría que posiblemente estaría nadando en dirección a la superficie o hacia el fondo. Por tanto, los datos de la postura de

los individuos pueden ser utilizados para determinar la cantidad de tiempo que un animal desarrolló una actividad, de esta manera que al determinar el periodo de tiempo que un individuo emplea en una postura corporal particular, podría utilizarse como un indicativo de un patrón de comportamental (Fig. 62; Shepard *et al.*, (2008a). Si bien la aceleración estática tiene la capacidad de caracterizar comportamientos, los animales a menudo tienen uno o dos posturas predominantes (por ejemplo, la postura horizontal en mamíferos tetrápodos) de las cuales se derivan la mayoría de los movimientos y comportamientos. Sin embargo, como complemento a esta información, los patrones de aceleración dinámica pueden proporcionar información adicional que ayude a detallar e identificar estos patrones.



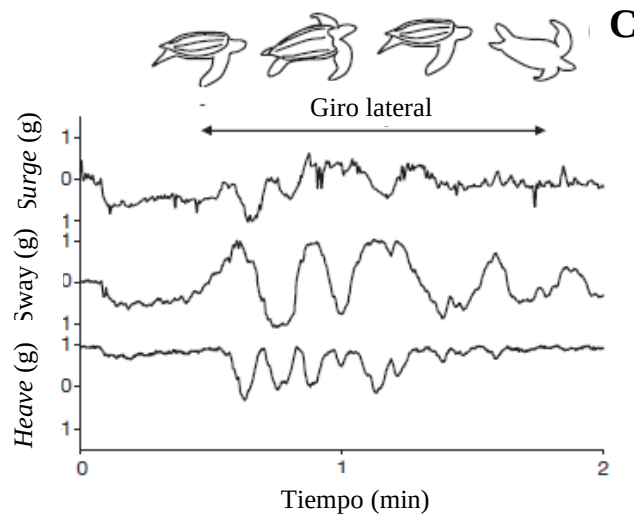


Figura 62. (A) Representación del *pitch* sobre el cuerpo de un pingüino, el cual aparece como el valor medio del total de la aceleración en el *heave* (gráfico de arriba); aceleración estática derivada del *heave* (gráfico del medio); *Pitch* representado en grados. (B) Aceleración total sobre el *heave* de un tejón cuando pasa de estar acostado de lado a estar acostado boca arriba. (C) Representación del giro lateral de una tortuga, donde al hacer un giro de 90° sobre el eje del *heave* al mismo tiempo que hace rotaciones de 180° sobre el eje *sway*, describe una maniobra de giro que casi implica una vuelta completa. Imagen tomada de Shepard *et al.*, (2008b).

Aceleración dinámica

El componente dinámico de la aceleración total representa el cambio de velocidad como resultado del movimiento corporal (Shepard *et al.*, 2008a). La manera más simple para obtenerlo es restando los valores de la aceleración estática (a partir del proceso de suavizado) a los valores de la aceleración total sobre el mismo período de tiempo (Wilson *et al.*, 2006). A partir de lo establecido por la tercera ley de Newton, donde, para cada acción hay una reacción (sea igual u opuesta), el movimiento de una extremidad en una dirección determinada producirá un segundo movimiento hacia la dirección opuesta. Esto se vuelve evidente en patrones de movimiento repetitivos como en la natación, donde el movimiento de la cola redirecciona el cuerpo hacia la dirección opuesta (Fig. 63b), o por ejemplo durante el vuelo, donde un movimiento de alas hacia abajo (movimiento en el eje de elevación) resulta en una (y por lo tanto movimiento) del cuerpo hacia arriba (Kato *et al.*, 2006; Fig. 63a). Otro ejemplo podría ser una caminata, donde el movimiento de una extremidad hacia atrás contra el suelo o sobre el sustrato, impulsará el cuerpo hacia adelante (Fig. 63c).

Se debe de tener en cuenta que el resultado de la aceleración estará comprometido al lugar y la manera en la que el dispositivo fue instalado. Las oscilaciones en la aceleración dinámica son características de la manera en la que los animales se mueven respecto a sus diferentes patrones corporales. Teniendo en cuenta que la aceleración dinámica es un componente de la aceleración total y que si la aceleración dinámica es cero, la aceleración total será igual a la aceleración estática, los cambios en la aceleración dinámica serán registrados con relación al valor estático y, por tanto, los valores de g serán cada vez más positivos y cada vez más negativos.

En el ejemplo del nado de un tiburón obtenido por Shepard *et al.*, (2008) (Fig. 63b), el valor del *sway* fue 0 mientras estaba en reposo, mientras que cuando nadaba, el ciclo de “brazada” o en este caso, el impulso con la cola comprendió dos golpes hacia los lados para dar el movimiento hacia adelante; el primer movimiento de la cola aumenta el valor de la aceleración en el eje *sway*, seguido por una disminución momentánea justo antes de que se produzca una segunda aceleración en el mismo eje debido al segundo impulso hacia el lado opuesto (Ogilvy & Dubois 1981, Kawabe *et al.*, 2003b). Allí la aceleración negativa, proveniente del segundo movimiento de la cola, es un reflejo de la salida del transductor del *sway*, sólo es negativa con respecto a la dirección de la aceleración producida durante el primer movimiento de la cola. Mientras el *sway* se reduce, el *surge* se incrementa dando una proyección hacia adelante, registrando a su vez, una dirección del valor de la aceleración estática.

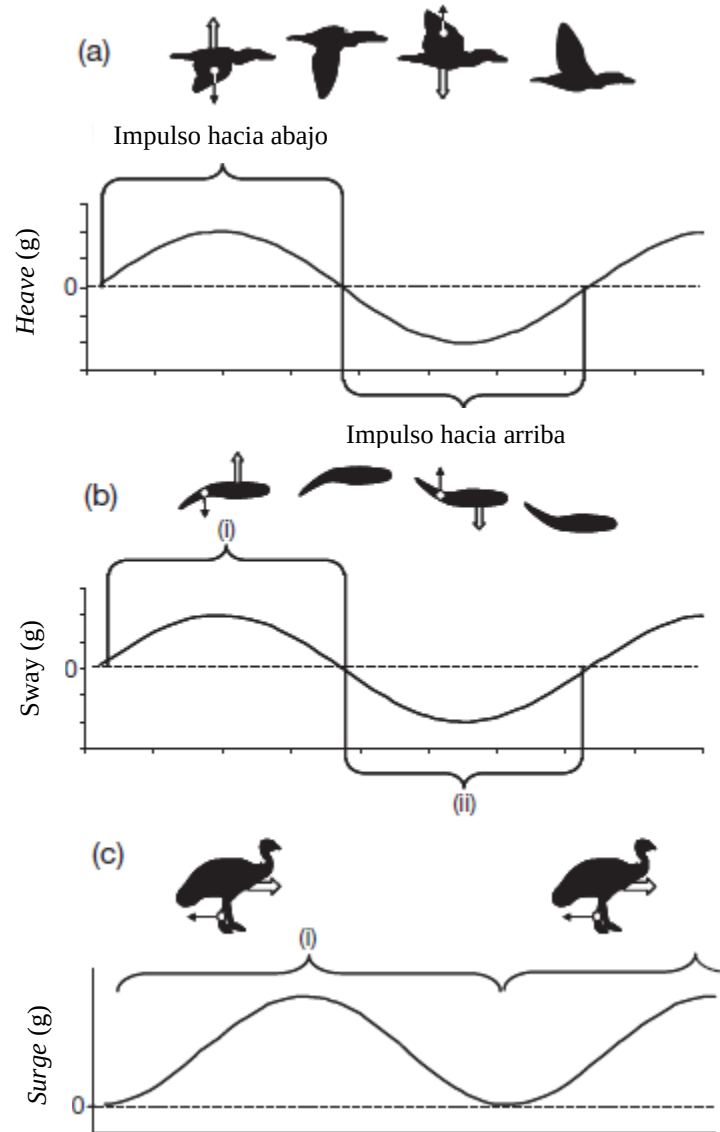


Figura 63. Representación de cambios en la aceleración dinámica que *surgen* a partir de tres clases de movimiento diferentes. (a) Resultado del movimiento del aleteo al volar sobre el *heave*. (b) Cambio en el eje sway durante el nado de un tiburón. (c) Aumento del valor del *surge* durante una caminata. Las flechas indican la dirección y la extremidad con la que se hace el movimiento. Imagen tomada de Shepard *et al.*, (2008b).

Análisis de datos

El análisis de datos de cada sensor fue hecho con el programa R (en RStudio, versión 4.0.3), en el que a partir del paquete “Animal Track” se calcularon los componentes de la aceleración corporal dinámica: (1) estático y (2) dinámico. El proceso para calcular los tipos de aceleración fue a partir de los siguientes pasos:

(1) se calcularon los promedios móviles (*pmov*) donde,

```
pmov ← function(x,k) {  
  n ← length (x)  
  y ← rep (NA,n)  
  for (i in k:n)  
    y [i − floor ( $\frac{k}{2}$ )] ← mean(x[1 + i − k):i])  
  y  
}
```

(2) se dio un ajuste de anotación en los gráficos, siendo,

```
px ← function (p = 5) {  
  pu ← par ("usr")  
  mpx ← pu[1]  
  px ← mpx + mpx * ( $\frac{p}{100}$ )  
  mpy ← pu[4]  
  py ← mpy − mpy * ( $\frac{p}{100}$ )  
  pxy ← c(px,py)  
  pxy  
}
```

(3) Se crearon los vectores de tiempo a partir de la función “*digits.secs*”, la cual controla el número máximo de dígitos para cuando el formato de valores de tiempo es en segundos. La hora fue convertida a del formato original “UTC” al formato local “America/Mazatlan”. La sigla “*mov*” corresponde a los datos de todos los sensores.

```

op ← options(digits.secs = 3)
dateUTC ← strptime(paste(mov$date, mov$time),
format = %d.%m.%Y %H:%M:%OS, tz = "UTC")
dateLOC ← strptime(paste(mov$dateLOC, mov$timeLOC),
format = %d.%m.%Y %H:%M:%OS, tz = "America/Mazatlan")

```

(4) Los datos de aceleración fueron convertidos de ($\text{m} \cdot \text{s}^2$) a g, donde 1 ms^2 es igual a 0.101971621, donde

Si

$$f \leftarrow 0.101971621$$

Entonces,

```

raX ← mov$accX * f
raY ← mov$accY * f
raZ ← mov$accZ * f

```

(5) Se calculó la aceleración estática para obtener los valores en los ejes de rotación: *Roll* (eje x), *Pitch* (eje y) y *Yaw* (eje z). *k* indica los segundos que fueron tomados para promediar los promedios móviles (*pmov*), donde

Sí

$$k \leftarrow 3$$

Entonces,

```

saX ← pmov(raX, k)
saY ← pmov(raY, k)
saZ ← pmov(raX, k)

```

(6) Se calculó la aceleración dinámica para calcular los valores en los ejes de translación: *Surge* (eje *x*), *Surge* (eje *y*) y *Heave* (eje *z*), donde

$$daX \leftarrow raX - saX$$

$$daY \leftarrow raY - saY$$

$$daZ \leftarrow raZ - saZ$$

(7) Se calculó el *pitch* y *roll* a partir de las ecuaciones propuestas por Bidder *et al.*, (2015)

$$Pitch \leftarrow -atan2(saY, \sqrt{saX^2 + saZ^2})$$

$$Roll \leftarrow atan2(saX, \sqrt{saY^2 + saZ^2})$$

Donde los valores que se pierden por los promedios móviles se volvieron 0 mediante la ecuación

$$Pitch[is.na(Pitch)] \leftarrow 0$$

$$Roll[is.na(Roll)] \leftarrow 0$$

(8) Cálculo del heading compensado SIN *iron corrections. Para este procedimiento fue requerida la declinación magnética (proveniente de la función “oce”

$$declin \leftarrow magneticField(-109.4321, 23.464, as.Date("2017-05-27"))$$

$$yaw \leftarrow tilt_compensate(x = mov$magY, y = mov$magX, z = mov$magZ, pitch = pitch, roll = roll, declination = declin$declination)$$

(9) Búsqueda de los datos de interés. A partir de las observaciones de los videos, se identificó el momento en el ocurrían los tipos de movimiento, los cuales fueron rastreados en los datos de la siguiente manera:

(i) Índice, donde

$$idx \leftarrow 1:length(dateLOC)$$

(ii) Determinar el tiempo inicial (*tini*) y final (*tfin*) para la construcción del gráfico. Se debe aclarar que la hora puesta al inicio es solo un ejemplo, y que al final de la ecuación, la suma es *t* en segundos.

$$tini \leftarrow "17:04:00"$$

$$tini \leftarrow as.POSIXlt(paste("2017-05-27", tini), tz = "America/Mazatlan")$$

$$tfin \leftarrow tini + 4 * 60$$

(iii) Creación de líneas verticales (*tlv*) para identificar el inicio y fin del comportamiento observado.

$$tlv \leftarrow c("17:04:42", "13:56:32")$$

$$tlv \leftarrow as.POSIXct(paste("2017-05-27", tlv), tz = "America/Mazatlan")$$

(iv) Registros

$$ss \leftarrow idx[dateLOC \geq tini \& dateLOC \leq tfin]$$

RESULTADOS

Los valores de aceleración total (aceleración bruta) incluyeron un componente estático y un componente dinámico, lo que, en conjunto con las imágenes de video, dan una interpretación de la postura, los patrones de movimiento y los patrones de comportamiento de un animal dentro de un área determinada. La marca CATS registró un total de 1'462,159 datos (para cada uno de los sensores) captados cada 0.05 segundos durante 840 minutos (14 horas) de los cuales 254.26 minutos (cuatro horas, 14 minutos con 16 segundos) correspondieron al tiempo en el que además de registrar los datos de los sensores, también se registraron los de video que captó la cámara. La fauna asociada que se pudo ver en los videos no pareció "modificar" los comportamientos del tiburón. Puesto que no hubo reacción aparente, podríamos decir que en esta ocasión el animal no se encontraba interesado en cazar o interactuar con alguna de estas especies.

Las gráficas que se presentan a continuación son creadas con base en los comportamientos vistos durante los videos (nado continuo, derrapes bruscos, cambio de dirección, tiempo en superficie, entre otras), las cuales fueron contrastados con cinco momentos (cada uno de cinco minutos) correspondientes a las horas donde al animal no fue captado por la cámara. El propósito de estos gráficos fue la descripción de los patrones de movimiento dentro del hábitat asociado al tiburón, determinando a su vez si existían diferencias significativas entre el tiempo que este permanecía en superficie (< 2 m), a media agua ($2 - 10$ m) o en el fondo (>10 m).

De acuerdo con el video, el tiburón fue liberado a las 13:21:20, por lo que la primera fracción de tiempo (desde las 13:23:05 horas, hasta las horas 13:26:05) corresponde al comportamiento directamente ligado a la manipulación, lo cual se quiso comparar con los patrones de nado en las horas siguientes. La figura (Fig.64) muestra en términos generales la aceleración dinámica y estática (estimadas por promedios móviles). La figura 65, muestra la expresión del movimiento en los ejes de rotación (*pitch*, *roll* y *yaw*) por separado.

Dentro de las observaciones, destaca lo que ocurre entre las 13:23:15 y las 13:23:30 donde, con base en el video, se ve al tiburón sobre el fondo mientras se inclina y hace derrapes a la derecha e inclina el cuerpo hacia arriba, comportamientos que se ven representados en el incremento en el *roll*, en el *yaw* y en el *pitch* respectivamente. El comportamiento denominado como “nado tranquilo” fue identificado con base en los valores representados entre las 13:23:42 y las 13:24:13, donde no se ven movimientos bruscos (en el video) o alguna reacción significativa en los tres ejes.

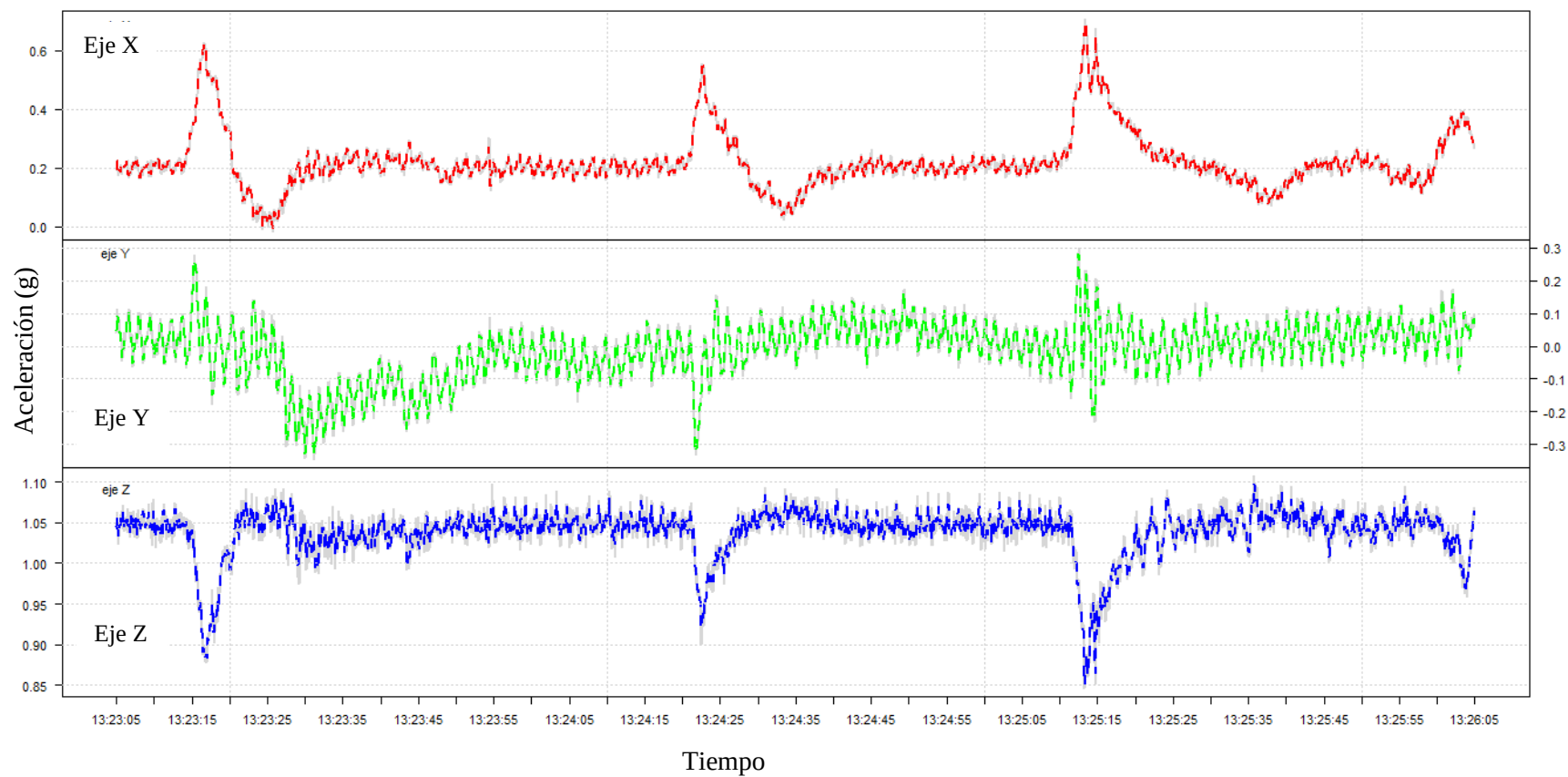


Figura 64. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 13:23:05 y las 13:26:05. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (franjas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g”.

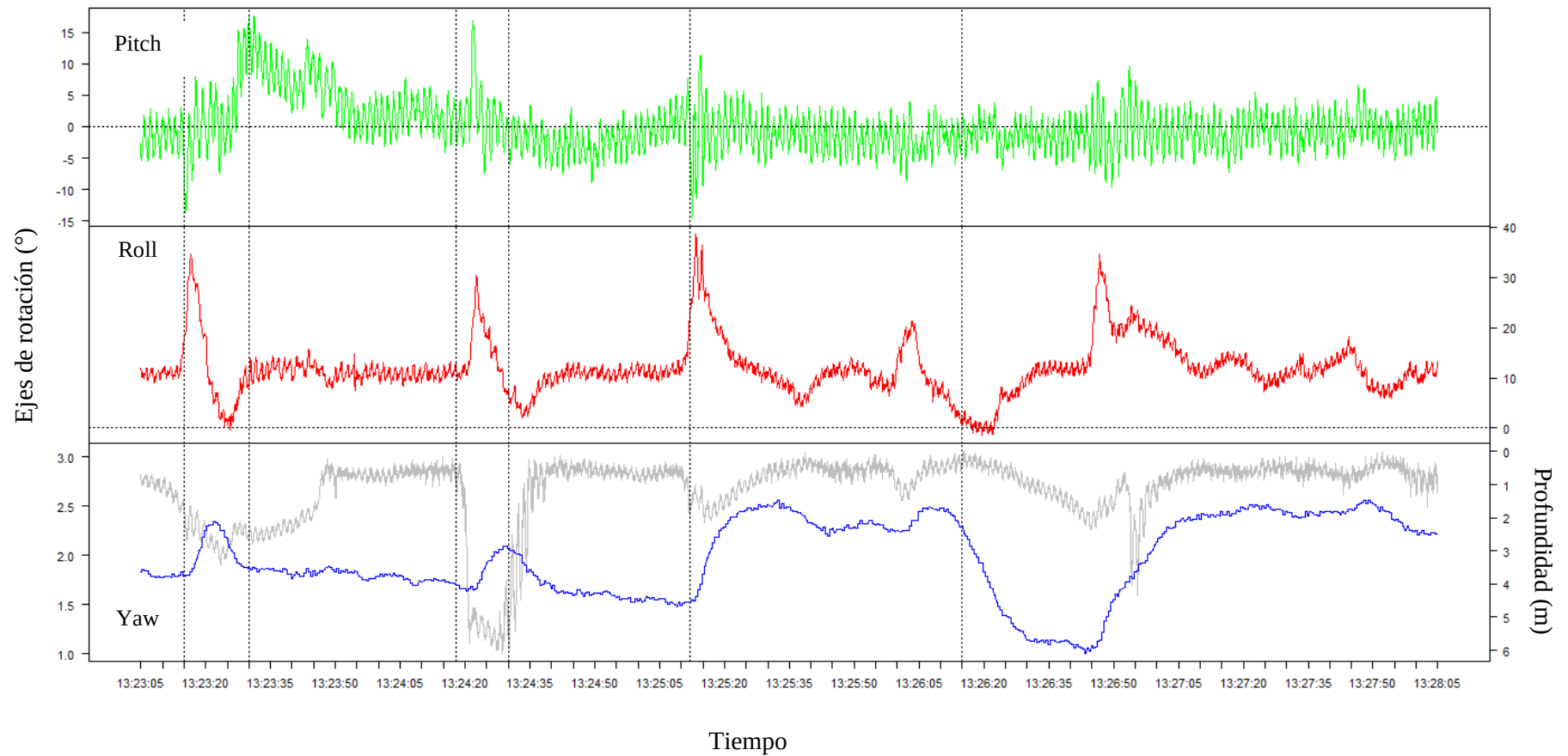


Figura 65. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 13:23:05 y las 13:28:05. La figura de arriba corresponde al *Pitch*, la del medio al *Roll* y la de abajo al *Yaw*. Los valores de cada eje son medidos en grados (°). La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés.

El segundo segmento de tiempo analizado fue desde las 14:04:35 hasta las 14:09:35. La figura 66 muestra el total de la aceleración dinámica y estática. La expresión del movimiento en los ejes de rotación (*pitch*, *roll* y *yaw*) por separado (Fig. 67) muestra que a partir de la hora inicial del segmento hasta las 14:05:25, el nado es continuo y sin movimientos bruscos a 18 metros de profundidad. Cinco segundos después, se observa un incremento drástico en el *roll* al mismo tiempo que empieza a subir a superficie poco a poco; el cambio en *roll* se da cuando cambia de 19 a 15 metros en cinco segundos. A las 14:05:32 ocurre el máximo descenso en el *pitch*, el máximo incremento en el *roll* y una disminución en el *yaw*, y empieza a nadar a superficie poco a poco.

Desde las 14:05:35 hasta las 14:05:55 mantiene un ascenso hacia superficie mientras incrementa los valores en *yaw* (donde el movimiento de lado a lado ocurre segundo a segundo), al mismo tiempo que gira el cuerpo a ambos lados de manera continua hasta estabilizarse al llegar a los cuatro metros de profundidad. A las 14:07:56, mientras nada en superficie, ocurre un cambio drástico en el *yaw*, el cual disminuye cuando el tiburón cambia de dirección (visto en el video como un giro a la derecha); los movimientos de lado a lado parecen ser más lentos. Al llegar a los tres metros de profundidad se observa un incremento en el *pitch* y en el *roll* (en el video se ve la manera de inclinar la cabeza hacia arriba y de girar el cuerpo). A las 14:07:12, se encuentra un poco más de un metro de profundidad, en el que se observa un incremento en el *yaw*, sugiriendo que el tiburón cambia de dirección mientras hace derrapes lentos (aprox. 1,5 segundos por cada uno) hacia la derecha; al mismo tiempo ocurre un descenso drástico en el *roll* (que contrastado con el video), indicando un giro del cuerpo hacia la derecha.

Finalmente, a las 14:07:25, el individuo se estabiliza en superficie sin hacer movimientos fuertes en ningún eje. Sin embargo destaca que desde esta hora hasta las 14:09:35 los valores del *pitch* se mantienen positivos. En general, se puede decir que a partir del comportamiento observado, cuando el tiburón gira el cuerpo hacia la derecha también se inclina hacia ese mismo lado, lo que en los datos se podría traducir como: cuando los valores del *roll* incrementan, el *yaw* disminuye.

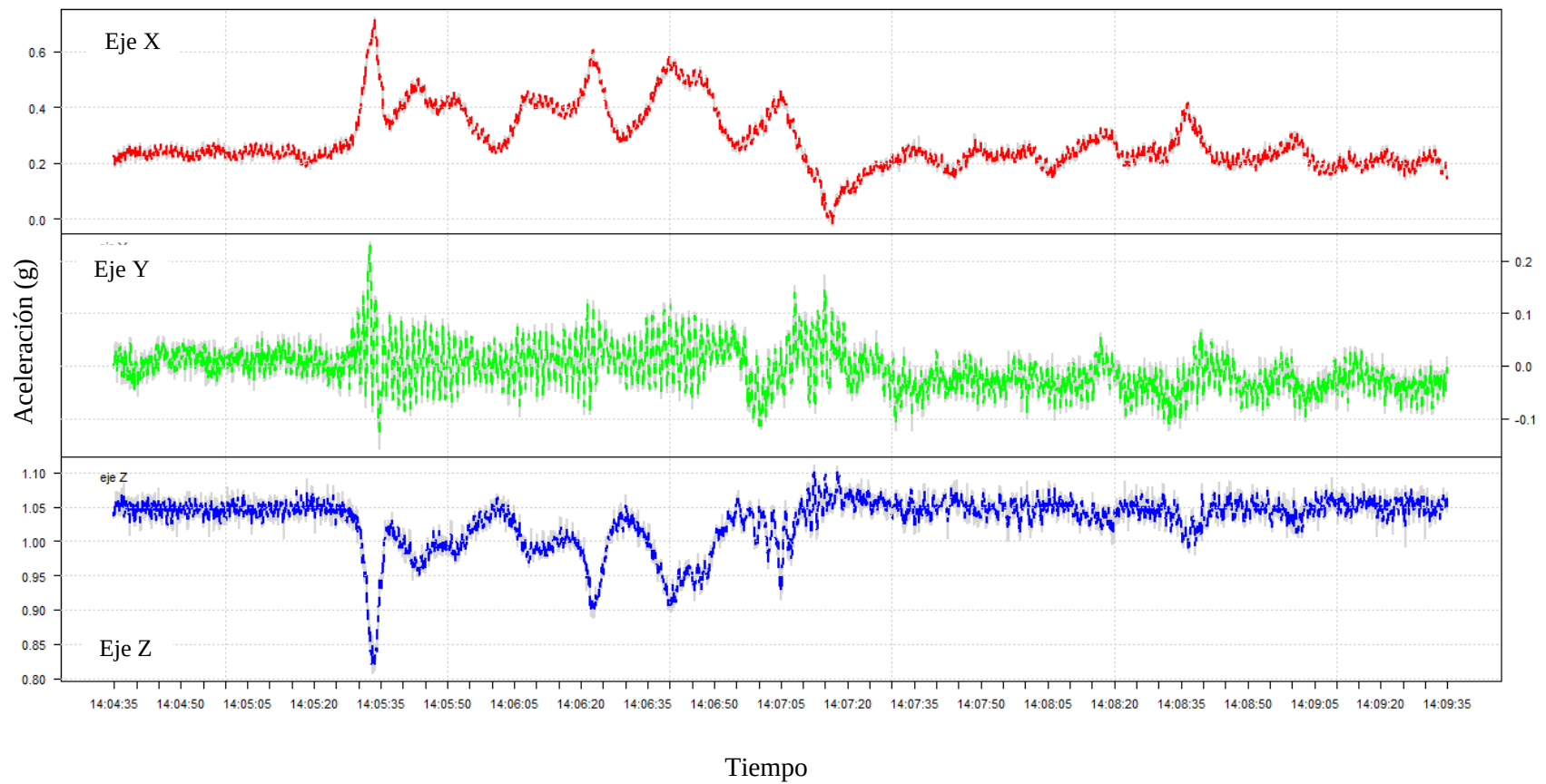


Figura 66. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 14:04:35 y las 14:08:35. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (franjas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g”.

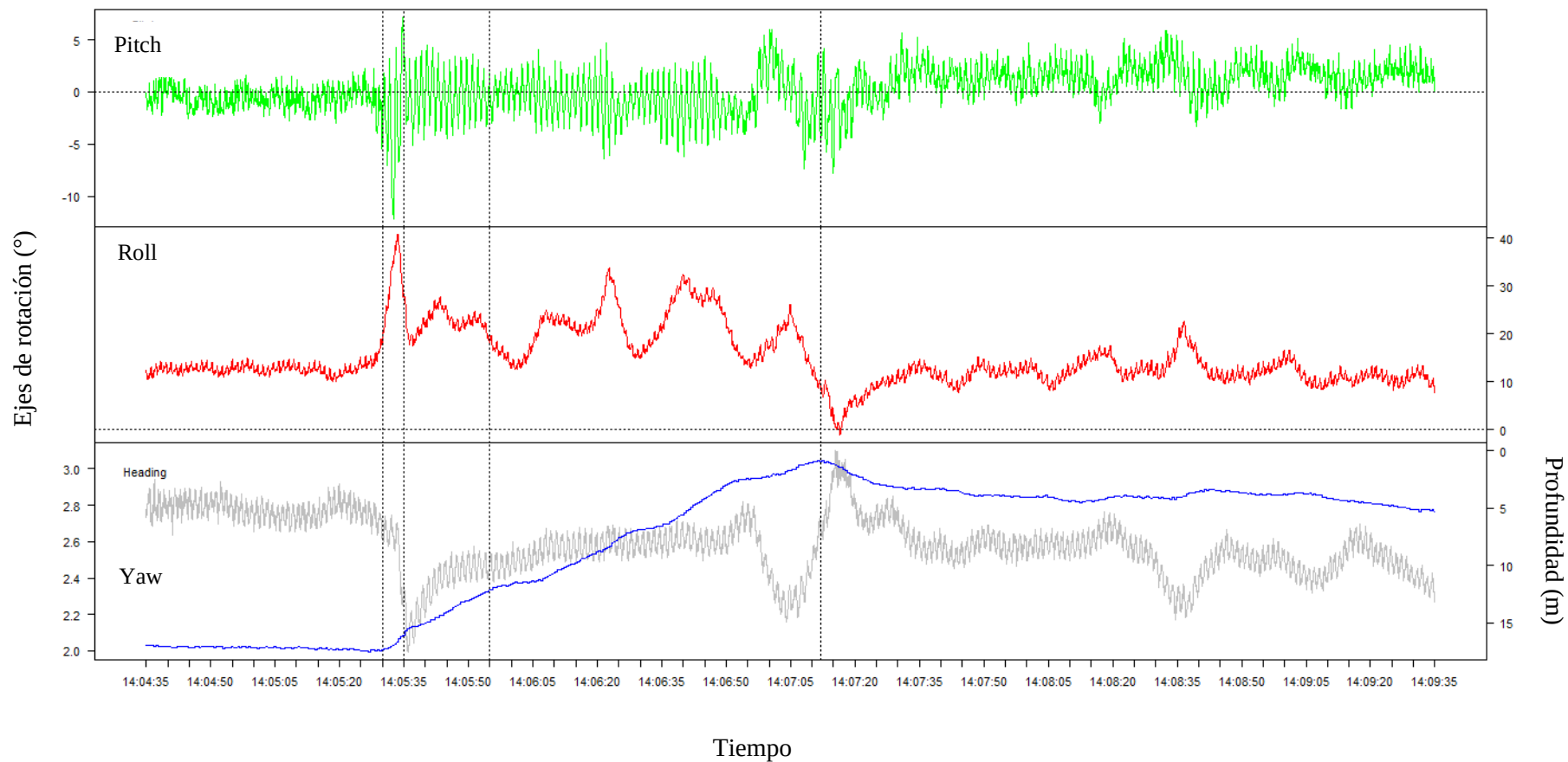


Figura 67. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 14:04:35 y las 14:09:35. La figura de arriba corresponde al *Pitch*, la del medio al *Roll* y la de abajo al *Yaw*. Los valores de cada eje son medidos en grados (°) La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés.

El tercer segmento analizado fue desde las 14:25:20? hasta las 14:30:25, una hora después de la liberación del individuo (Fig. 68). Los movimientos correspondientes a los ejes de rotación (Fig. 69), al inicio del segmento se observa que posiblemente venía haciendo movimientos sutiles en superficie (0,5 metros), hasta las 14:25:36 donde hace tres derrapes a la derecha, los cuales son vistos tanto en el video como en el cambio en el *yaw*. Los valores de este eje se van incrementando poco a poco hasta las 14:26:07 horas (segmento entre las líneas verticales) donde se presentan cambios en los tres ejes mientras nada a profundidades mayores. Cabe notar que justo antes que empieza el descenso, el animal sube la cabeza y el *pitch* incrementa. También es importante mencionar que cinco segundos antes del descenso, el animal hace dos derrapes lentos a la derecha (representado en el *yaw*) que cambian a derrapes rápidos hacia los dos lados al momento que este empieza a nadar hacia el fondo. Mientras el animal hace estos derrapes, el eje del *roll* sugiere que al mismo tiempo que esta gira, también se inclina hacia la derecha.

Desde las 14:26:35 el individuo se estabiliza sin hacer movimientos fuertes en ningún eje. Su comportamiento continuó así hasta que llega a profundidades mayores a 10 metros, donde nuevamente empieza a incrementarse el *roll* hasta estabilizarse entre los 10° y 15°. Aunque en el video se observan una escuela de aproximadamente 10 atunes (no es clara la imagen para la identificación de la especie), ni en las imágenes ni en los valores de los ejes, el tiburón demuestra tener alguna reacción frente a estos peces. En general, parece que los movimientos más “fuertes” los hace durante el cambio de una profundidad cercana a superficie (< 1 m) a 10 metros; Sin embargo, una vez que el tiburón pasa los 10 metros, no se ven movimientos fuertes en ningún eje, por lo que su nado podría catalogarse como tranquilo

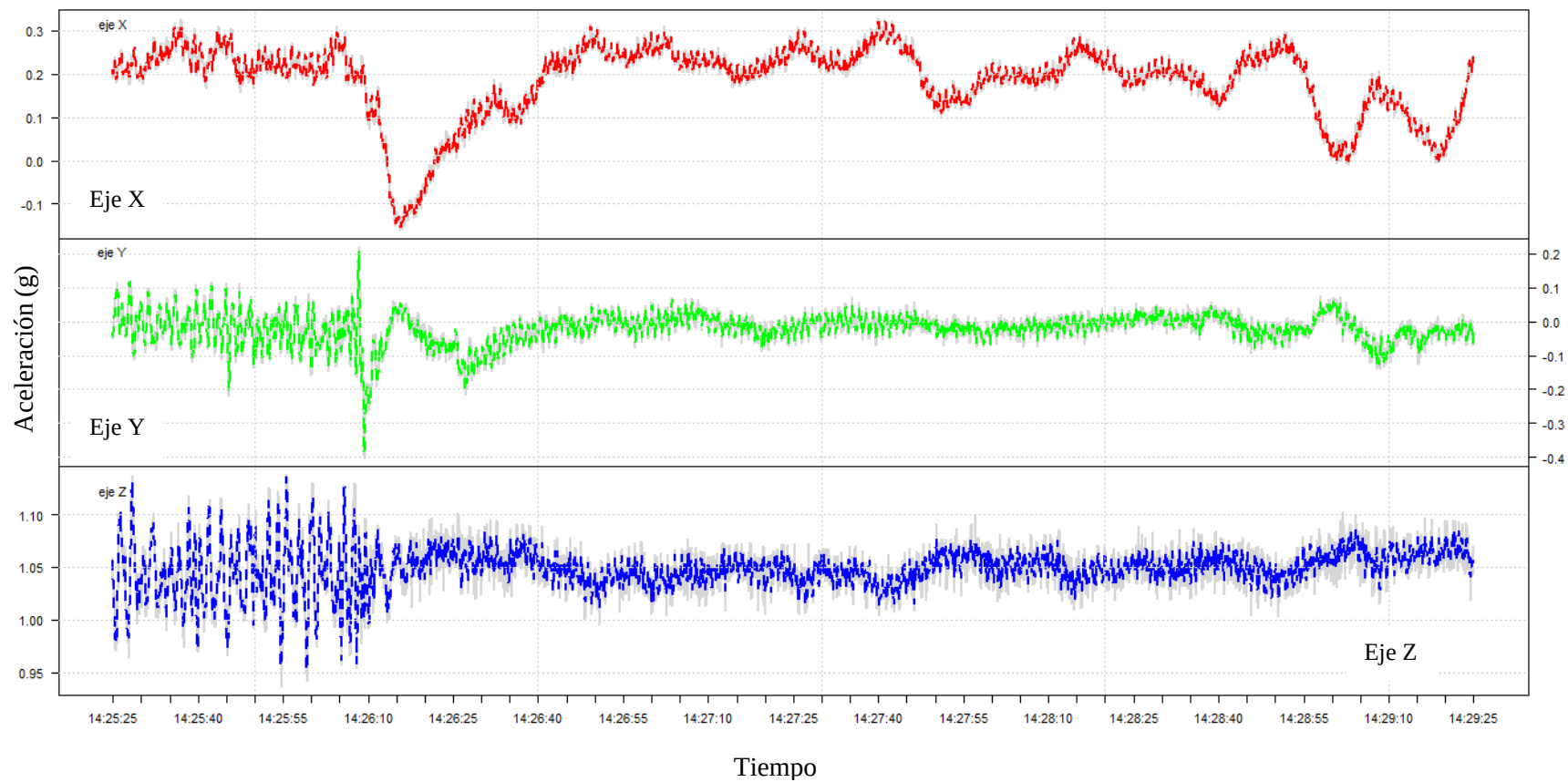


Figura 68. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 14:25:25 y las 14:29:25. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (franjas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g”.

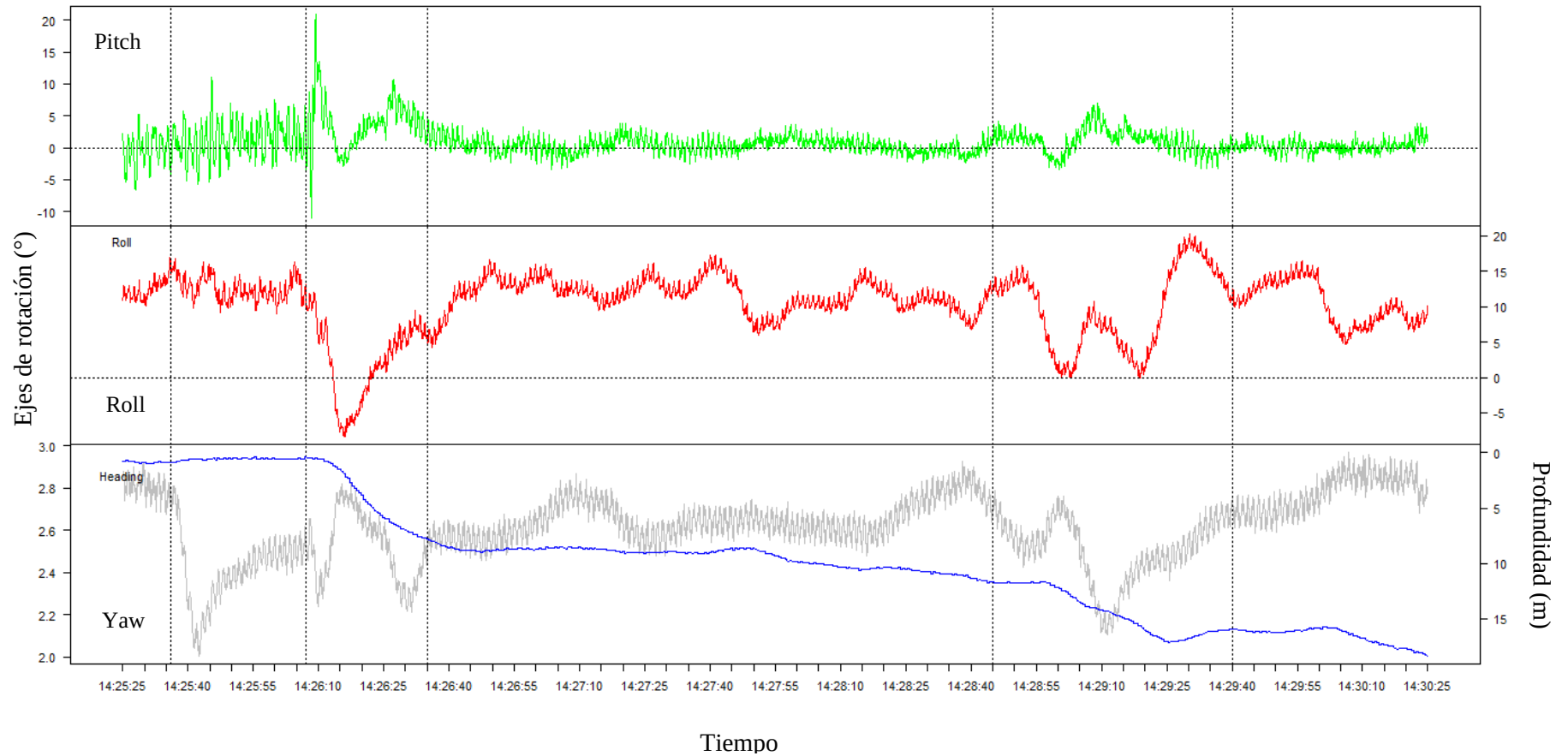


Figura 69. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 14:25:25 y las 14:20:25. La figura de arriba corresponde al *Pitch*, la del medio al *Roll* y la de abajo al *Yaw*. Los valores de cada eje son medidos en grados (°) La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés.

El cuarto segmento escogido con base en los videos duró desde las 16:13:10 hasta las 16:18:10 (Fig. 70). Respecto a los movimientos de rotación (Fig. 71), al inicio de este periodo de tiempo, el animal viene nadando desde los 14 metros de profundidad hacia superficie. Mientras en el video parece que hace movimientos de yoyo, en los ejes de rotación aparecen patrones (más claros en el eje del *roll* que en los otros).

El eje de *yaw* inicia con una disminución de 0.2° que los 15 segundos incrementa hasta los 2.8° , disminuyendo lentamente (a lo largo de 25 segundos) hasta llegar a los 2.2° . Después de esto, sigue nadando hacia la superficie mientras hace el mismo movimiento tres veces más (sin embargo, se debe tener en cuenta que los picos de cambio en los grados no son tan altos). A las 16:16:55 horas va desde superficie (< 1 m) a 8 m de profundidad en un minuto si mostrar movimientos fuertes.

En el eje del *roll*, los patrones son un poco más claros. Mientras el tiburón va hacia superficie el patrón de movimiento es cada 50 segundos (desde las 16:13:15 hasta las 16:16:35). Una vez que el tiburón llega a superficie, estos cambios de inclinación disminuyen, pero se vuelven cada vez más rápidos (número de giros a lado y lado por segundo) durante los 50 segundos. Estos patrones de movimiento cambian inmediatamente el tiburón nada de superficie al fondo (16:16:55), donde el ángulo ϕ cambia en menos de 5 segundos, de 10° a 0° . El cambio drástico en el eje del *Pitch* ocurrió a las 16:13:34, en el que pasó de 0° a 10° , y a las 16:13:40, donde pasó de los 10° a los -9° .

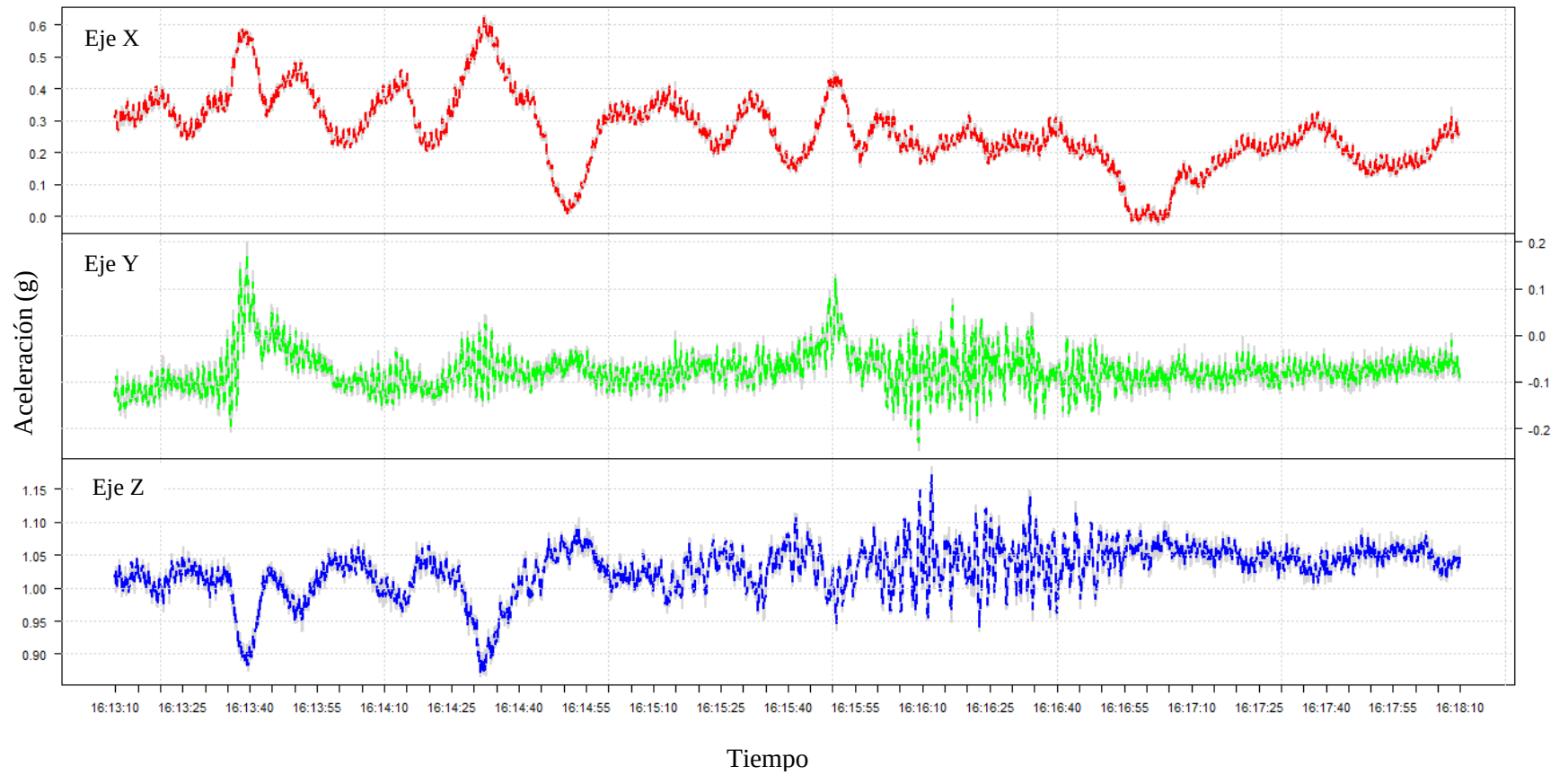


Figura 70. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 16:13:10 y las 16:18:10. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (franjitas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g”.

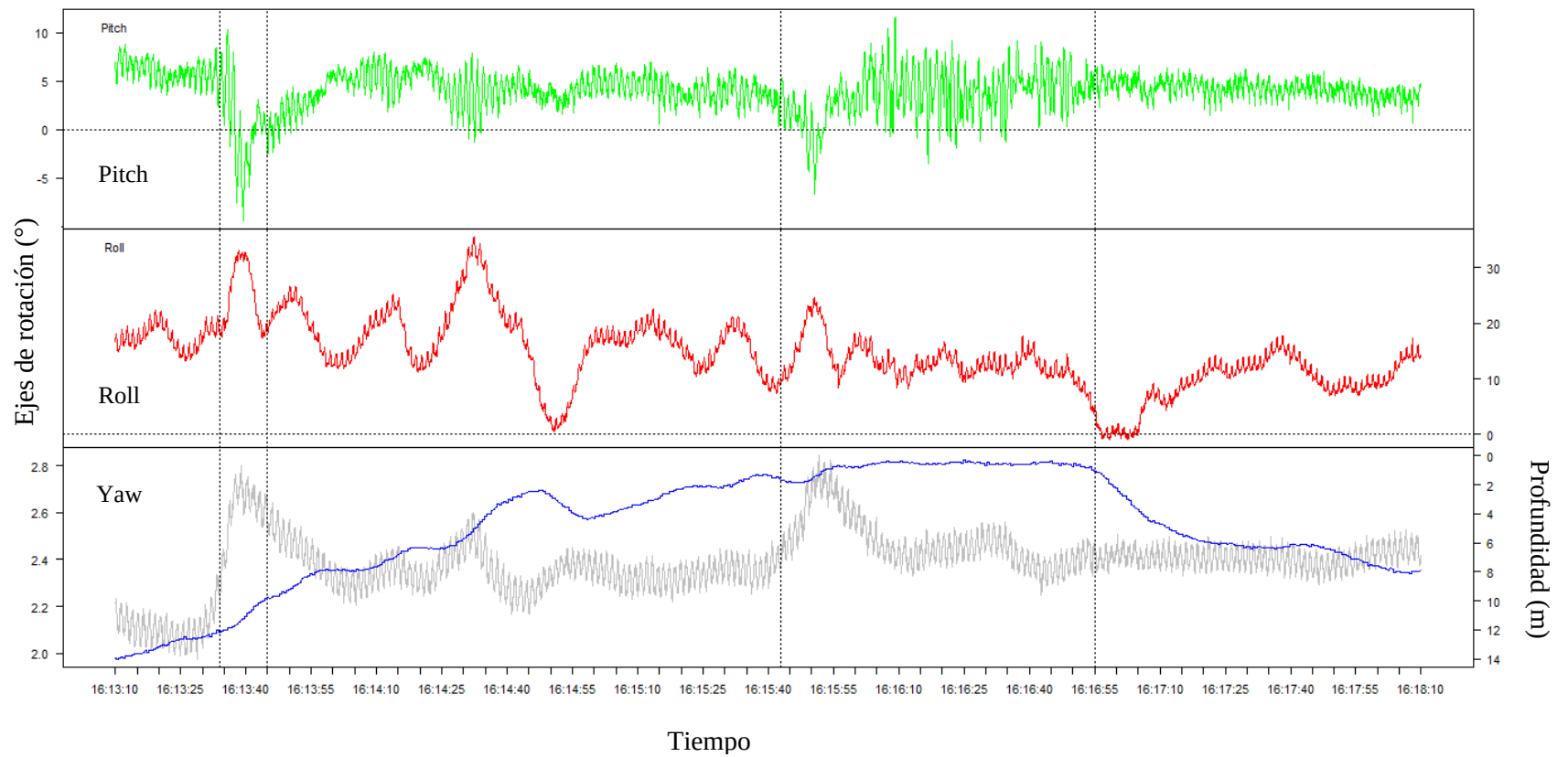


Figura 71. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 16:13:10 y las 16:18:10. La figura de arriba corresponde al *Pitch*, la del medio al *Roll* y la de abajo al *Yaw*. Los valores de cada eje son medidos en grados (°) La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés.

El quinto segmento escogido fue entre las 17:04:00 y las 17:09:00. Los valores de la aceleración total y estática se muestran en la figura 72. Respecto a los valores de los ejes de rotación (Fig. 73), al inicio se observa un patrón en el eje del roll mientras el animal va de los 10 metros de profundidad hacia superficie. Según los datos, parece que el animal da giros hacia ambos lados cada 15 segundos hasta las 17:05:00 horas, momento en que el individuo sube rápidamente (15 segundos) de 6 a 1 metro de profundidad. Mientras ocurre este rápido ascenso, el pico más alto en el roll es de 10° a casi 40° , al mismo tiempo que el *pitch* disminuye de 0 a -10° .

Mientras que los movimientos en los ejes del *pitch* y el roll se mantuvieron estables a menos de un metro de profundidad (desde las 17:05:15 hasta las 17:07:40), los movimientos en el yaw indican un cambio de dirección que ocurre en menos de 5 segundos, donde pasa de 2.5° a 1° , el cual vuelve a incrementar hasta estabilizarse entre 2.3° y 2.4° . El cambio drástico en el *Pitch* y en el *roll* ocurre entre las 17:07:45 y las 17:08:00, donde el individuo pasa de estar a menos de un metro de profundidad a 8 m. Inmediatamente ocurre este descenso, el *roll* cambia de 11° a -10° , quien vuelve a incrementarse hasta estabilizarse entre los 10° y 20° a medida que el tiburón mantiene su profundidad.

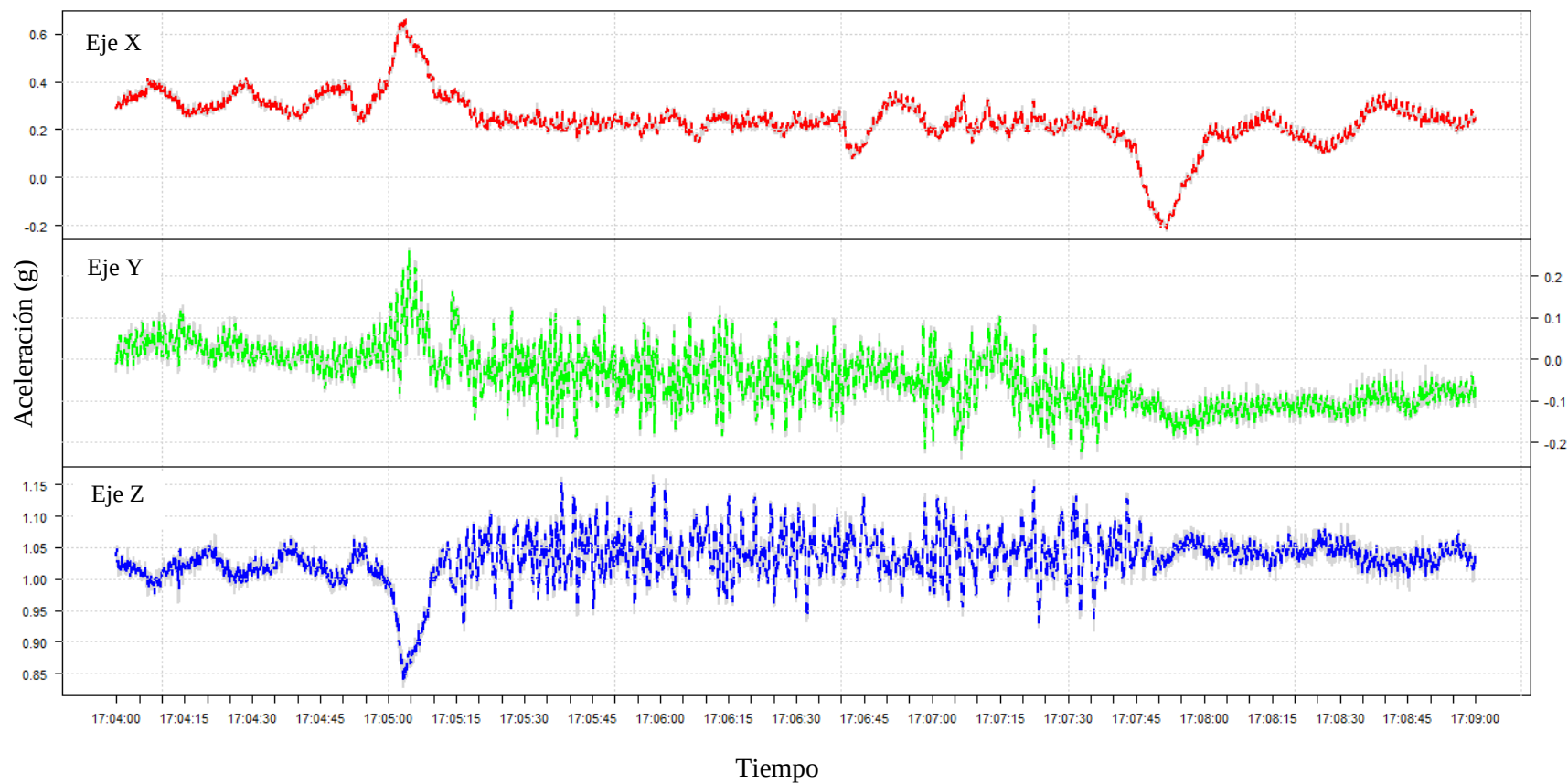


Figura 72. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 17:04:00 y las 17:09:00. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (franjas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g”.

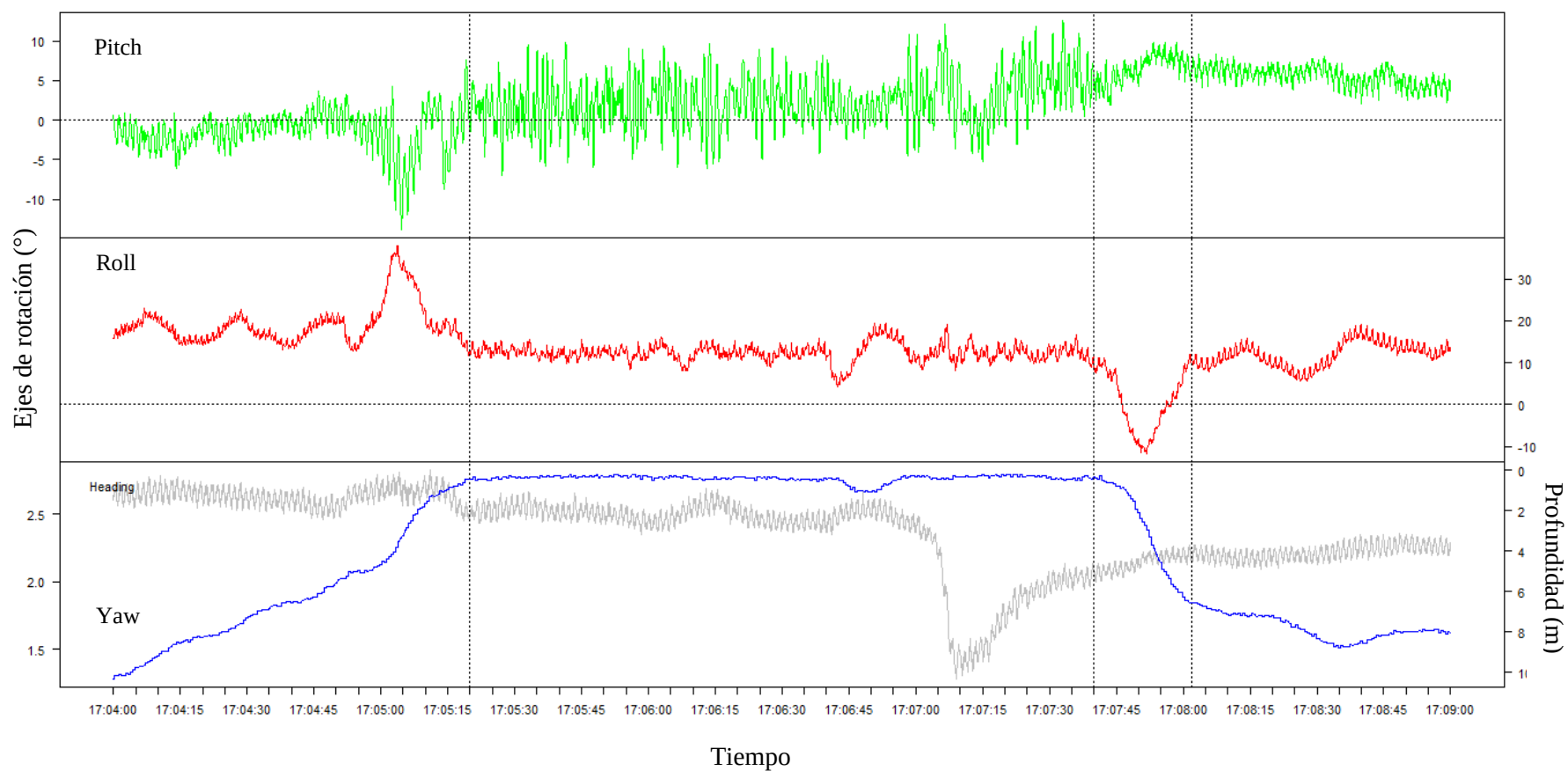


Figura 73. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 17:04:00 y las 17:09:00. La figura de arriba corresponde al *Pitch*, la del medio al *Roll* y la de abajo al *Yaw*. Los valores de cada eje son medidos en grados (°) La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés.

En contraste a los movimientos que fueron comparados con las imágenes del video, se escogieron cinco segmentos de tiempo adicionales posteriores al momento donde la cámara deja de grabar. El objetivo del análisis de estos segmentos fue la comparación de patrones de movimiento a lo largo de las horas donde hubo registro de datos, determinando si existió algún patrón de movimiento claro durante las 14 horas de grabación.

El primer segmento escogido fue desde las 19:40:00 hasta las 19:45:00 horas. Igualmente se calculó el total de la aceleración estática y la aceleración dinámica en términos de g (Fig. 74) así mismo como los valores en cada eje de rotación en términos de grados ($^{\circ}$) (Fig. 75). Al inicio del gráfico de los ejes de rotación, se observa que el animal estuvo hasta las 19:40:40 en superficie (< 1 m) sin hacer movimientos fuertes en ningún eje, sin embargo, al momento en que este comienza a nadar hacia zonas más profundas (entre 2 y 8 m), ocurre un cambio en *yaw* (de 2.4° a 2.6°) y en el *roll*, quien cambia de 15° a -5° . Los cambios de ambos ejes se estabilizan una vez el tiburón mantiene la profundidad entre 5 y 8 metros, lo cual contrasta con los cambios en el *roll* y en el *pitch* cuando nuevamente nada con dirección a la superficie. Una vez se encuentra en superficie, no parece hacer movimientos fuertes en el *yaw* ni en el *roll*, a diferencia del *pitch* donde se observan cambios constantes entre los 5° y los -5° .

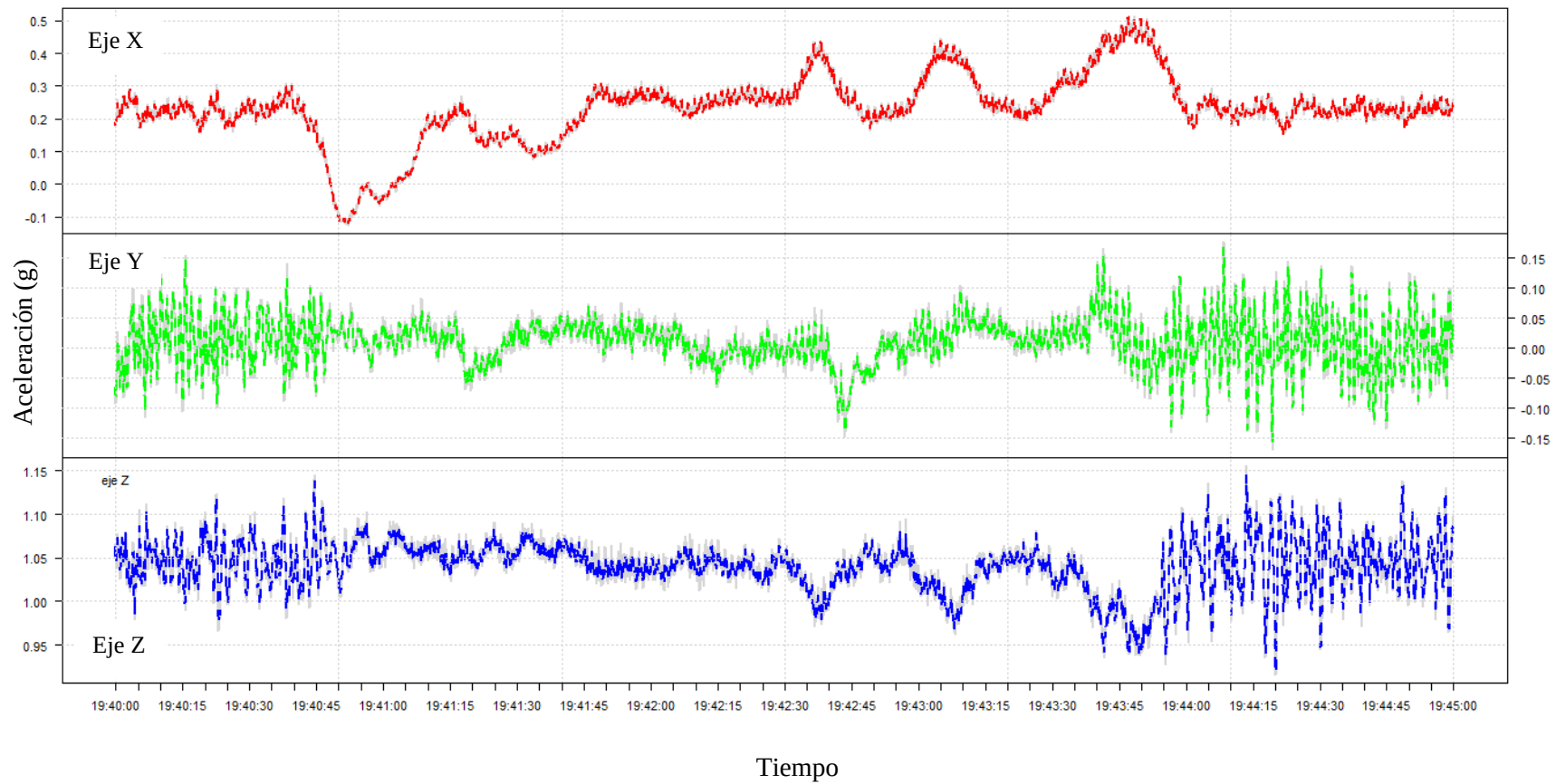


Figura 74. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 19:40:00 y las 19:45:00. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (frangas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g”.

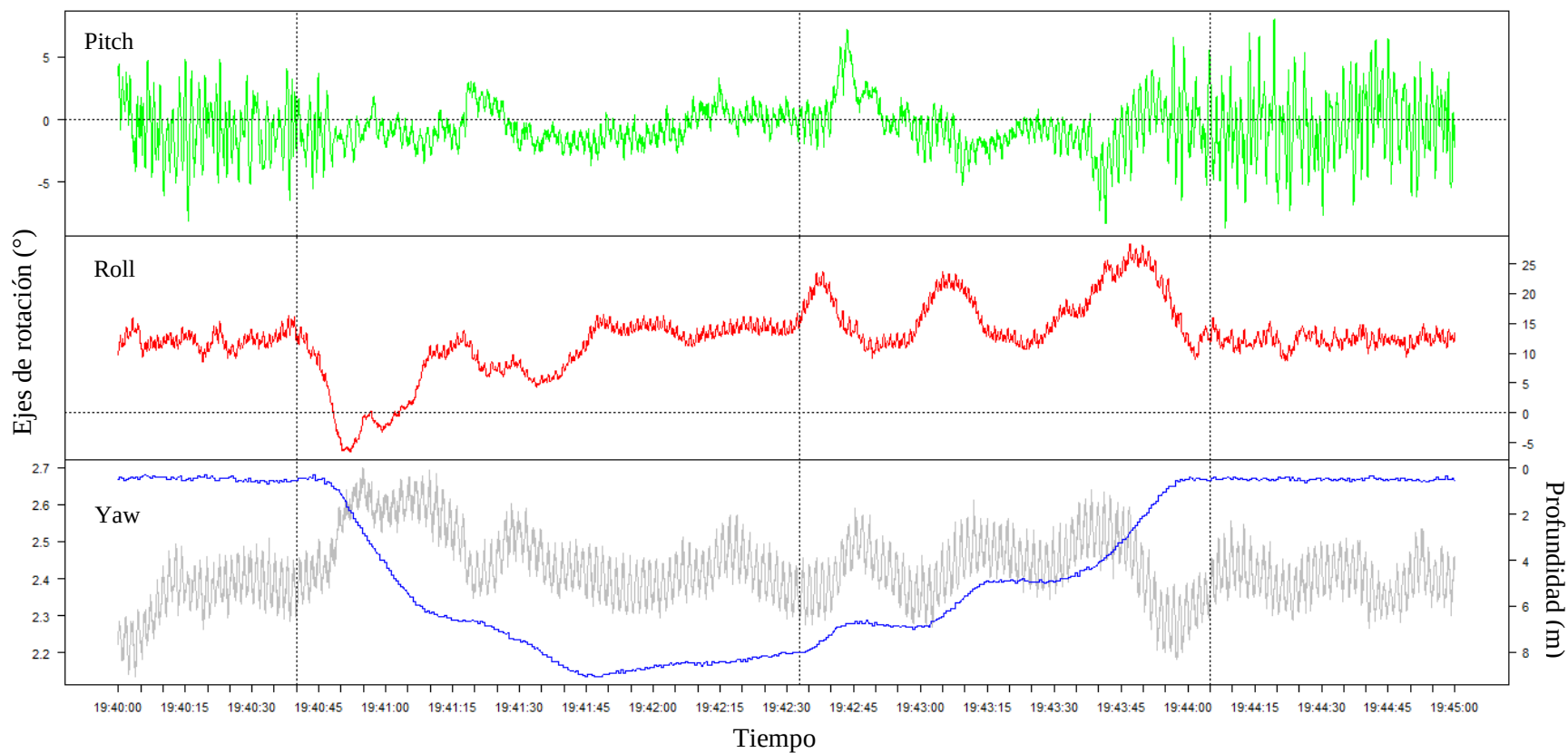


Figura 75. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 19:40:00 y las 19:45:00. La figura de arriba corresponde al *Pitch*, la del medio al *Roll* y la de abajo al *Yaw*. Los valores de cada eje son medidos en grados (°) La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés.

El segundo fragmento de tiempo que se escogió fue desde las 20:35:00 hasta las 20:40:00 horas, debido a que este corresponde con la hora del atardecer en el horario de verano. La aceleración total y estática se representan en la figura 76. Las rotaciones en los tres ejes (Fig. 77) demostraron un comportamiento errático a lo largo del segmento, el cual también se destaca por mantenerse en superficie. El cambio más destacado fue a las 20:37:55, donde los valores del *yaw* cambian de 1° a 2.8° , para luego mantenerse constante hasta 20:39:00 donde nuevamente comienza con sus movimientos erráticos. Los valores del *pitch* cambian de 5° a -15° , los cuales se mantienen entre los 0° y los 10° hasta que termina el segmento; los cambios en ambos ejes ocurren sin que el animal cambie la profundidad en la que nada.

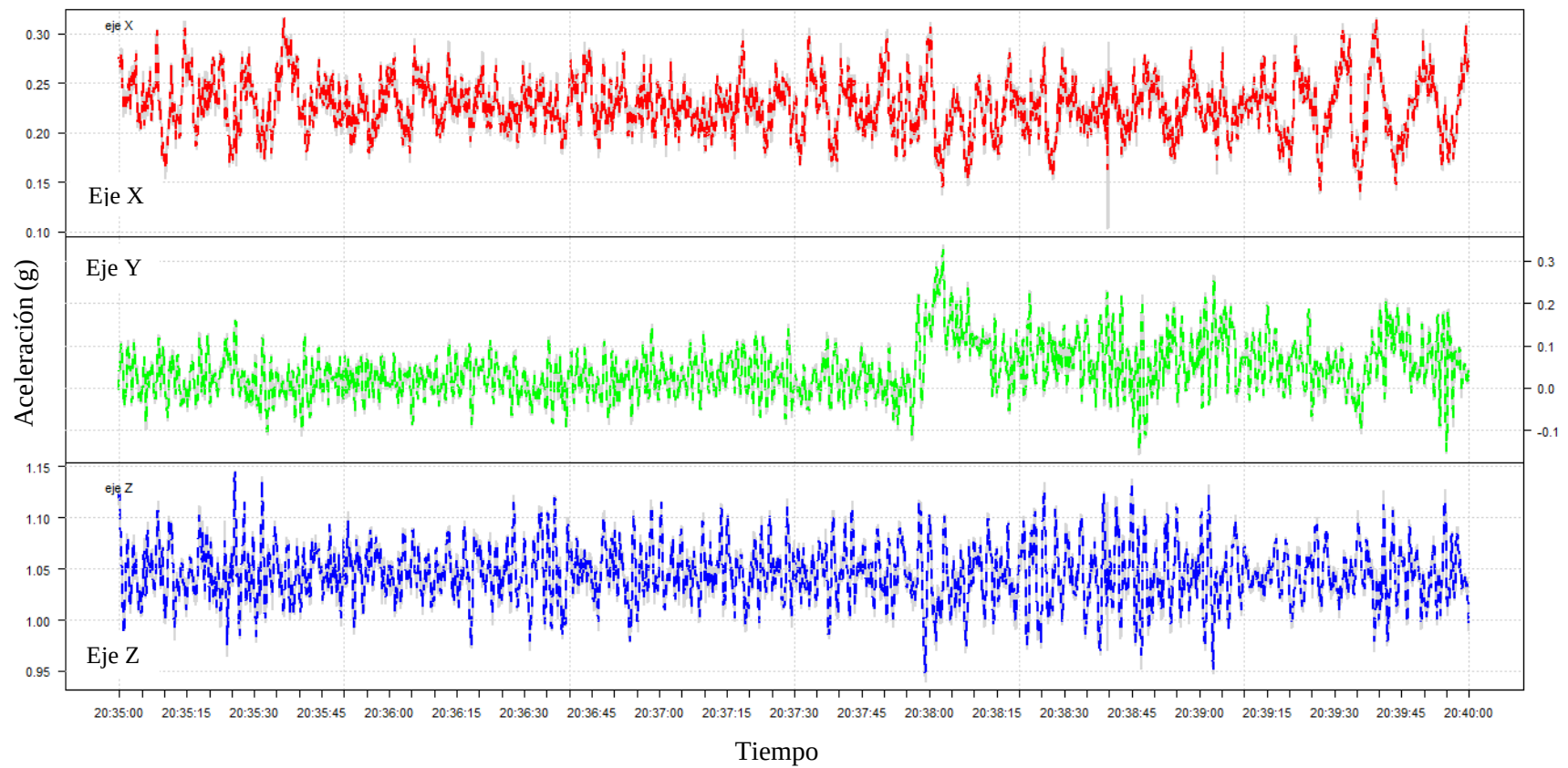


Figura 76. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 20:35:00 y las 20:40:00. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (franjitas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g”.

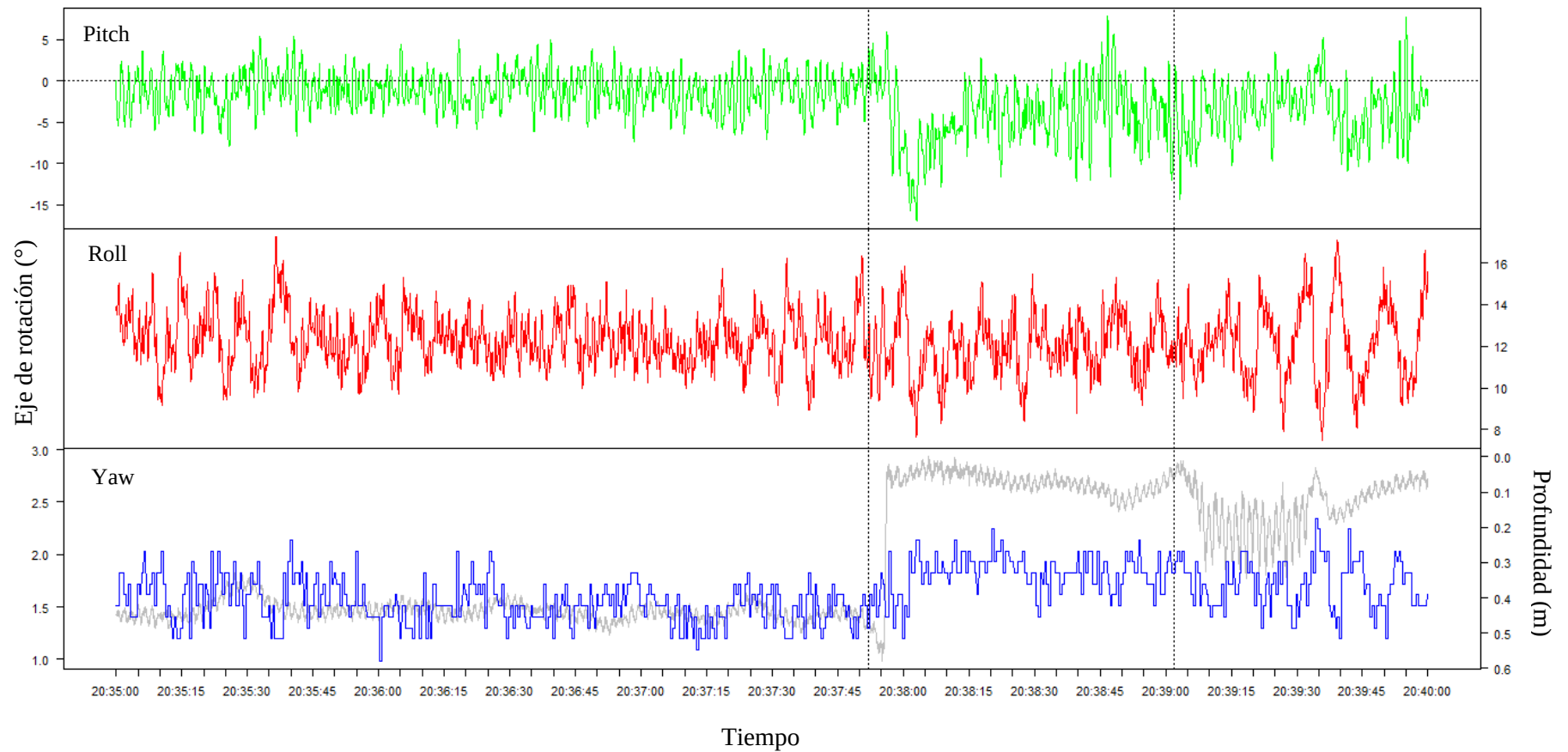


Figura 77. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 20:35:00 y las 20:40:00. La figura de arriba corresponde al Pitch, la del medio al Roll y la de abajo al Yaw. Los valores de cada eje son medidos en grados ($^{\circ}$). La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés.

El tercer y cuarto segmentos fueron escogidos con base en la máxima profundidad registrada por el tiburón; bajó 38 metros. La figura 78 representa los valores de la aceleración total del componente dinámico y estático entre las 21:50:00 y las 21:55:00 horas, y la figura 79 los valores entre las 21:55:00 y las 22:00:00 horas. Los valores de los movimientos de rotación entre las 21:50:00 y las 21:55:00 horas son representados en la figura 80, y los representados entre las 21:55:00 y las 22:00:00 horas, en la figura 81.

Las gráficas 80 y 81 ilustran el momento en el que el tiburón va desde los 0,5 hasta los 40 metros en un nado continuo (sin "detenerse" durante el trayecto). Los movimientos de rotación que hace en superficie (< 1 m) desde las 21:50:30 hasta las 21:52:10 horas, son constantes en el *roll* y en el *pitch*, manteniéndose en un rango entre 5° y 15° , y entre -8° y 3° respectivamente. En el caso de los movimientos en el *yaw*, durante el periodo de tiempo en superficie, inicialmente cambia de $2,7^{\circ}$ a $1,1^{\circ}$, 30 segundos después hace dos cambios de $1,3^{\circ}$ a $2,5^{\circ}$. A las 21:52:15 el tiburón comienza a descender desde superficie (< 1 m) hasta los 40 m de profundidad.

En el momento en el que el tiburón cambia su profundidad, el eje del *roll* indica que hay una inclinación de 15° a -10° , la cual se estabiliza entre los 0° y los 10° a medida que el tiburón sigue bajando. A diferencia a cuando estaba en superficie, los movimientos sobre el eje del *pitch* no son tan erráticos; se sigue manteniendo dentro del rango anteriormente dicho. Los movimientos en el eje del *yaw* no son muy claros, sin embargo, parecen estabilizarse entre los $2,5^{\circ}$ y los $3,0^{\circ}$ en el momento que el tiburón se encuentra entre los 15 y los 20 metros.

La continuación de esta gráfica muestra que después de los 20 metros de profundidad, los movimientos en los tres ejes comienzan a variar. En el caso del *yaw*, se presenta un cambio desde los $1,2^{\circ}$ hasta los $2,8^{\circ}$ en menos de cinco segundos, manteniéndose en este rango hasta las 21:56:20. El *pitch* por su parte cambia entre los -10° hasta 5° durante segundos, a diferencia del momento en el que va de los 38 m hacia superficie, donde parece hacer movimientos más erráticos y constantes. Mientras el tiburón se acerca a los 38 m, los movimientos en el *roll* disminuyen gradualmente, hasta las horas 21:56:25, donde ocurre el

cambio más drástico (de -10° a 30°). En general, los movimientos del *roll* y el *yaw* los tres ejes una vez el tiburón va desde los 38 m hacia superficie parecen ser constantes. El *pitch* por su parte cambia desde los 0° hasta los 5° .

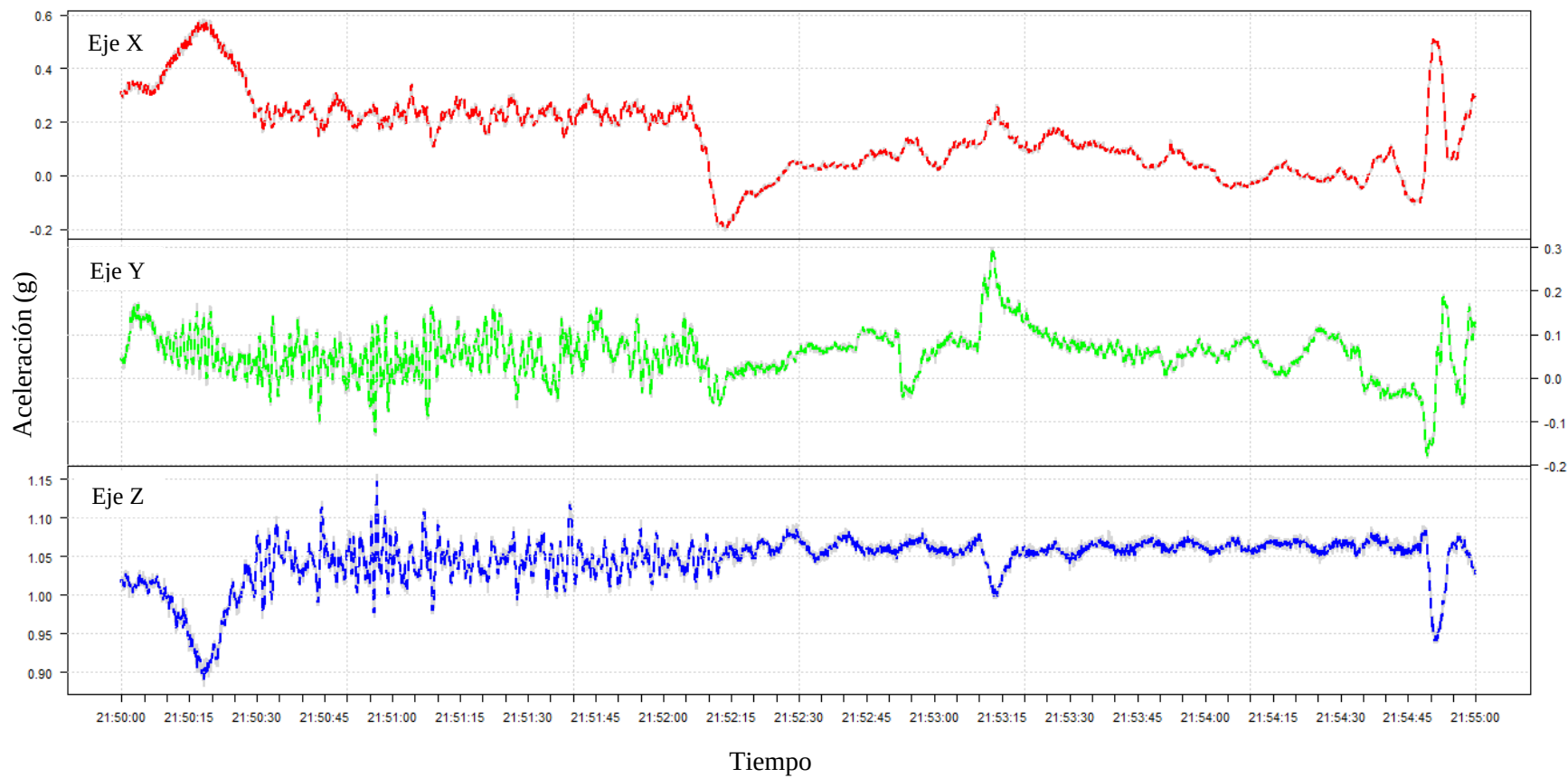


Figura 78. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 21:50:00 y las 21:55:00. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (franjas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g”.

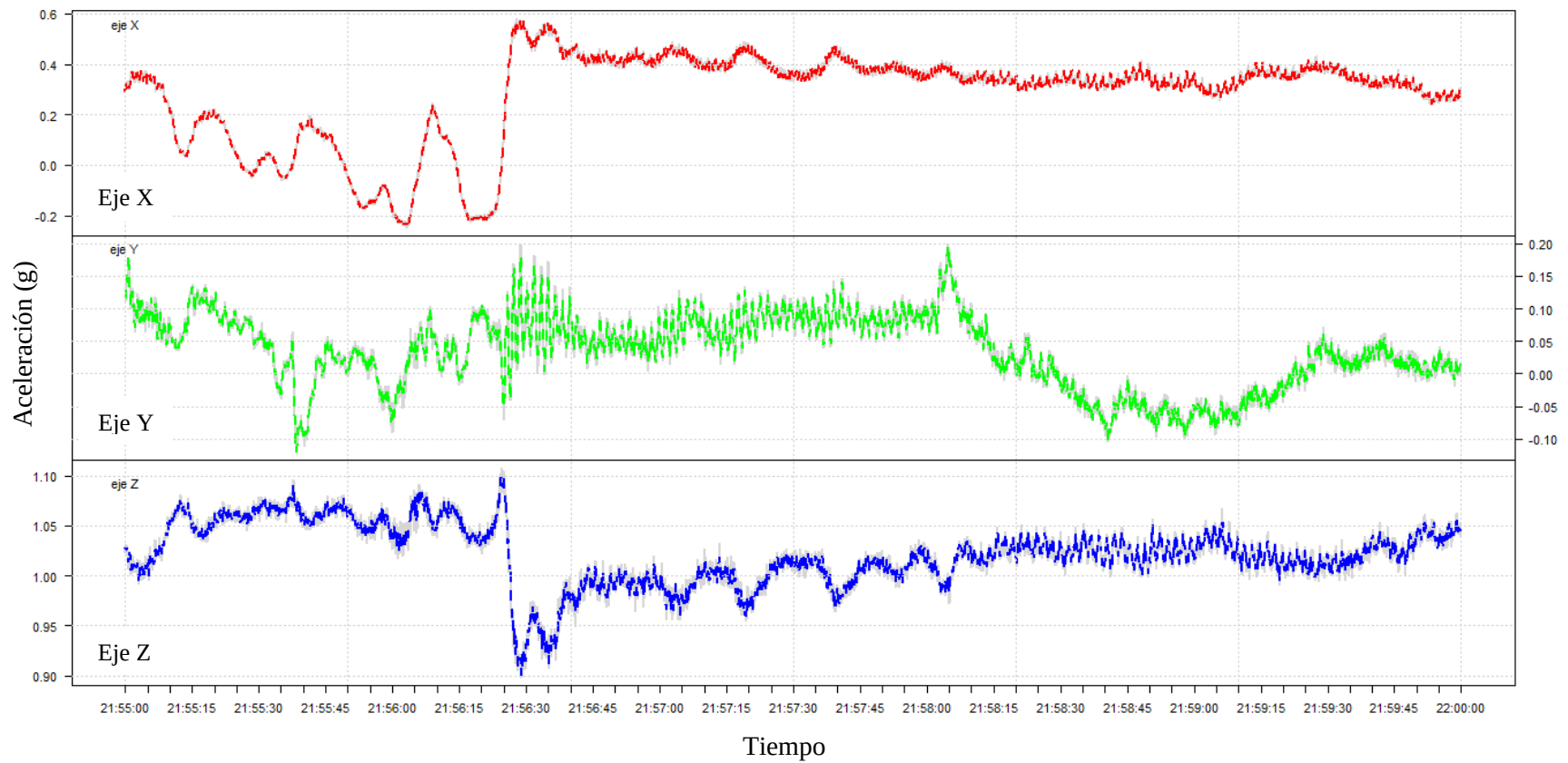


Figura 79. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 21:55:00 y las 22:00:00. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (franjas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g”.

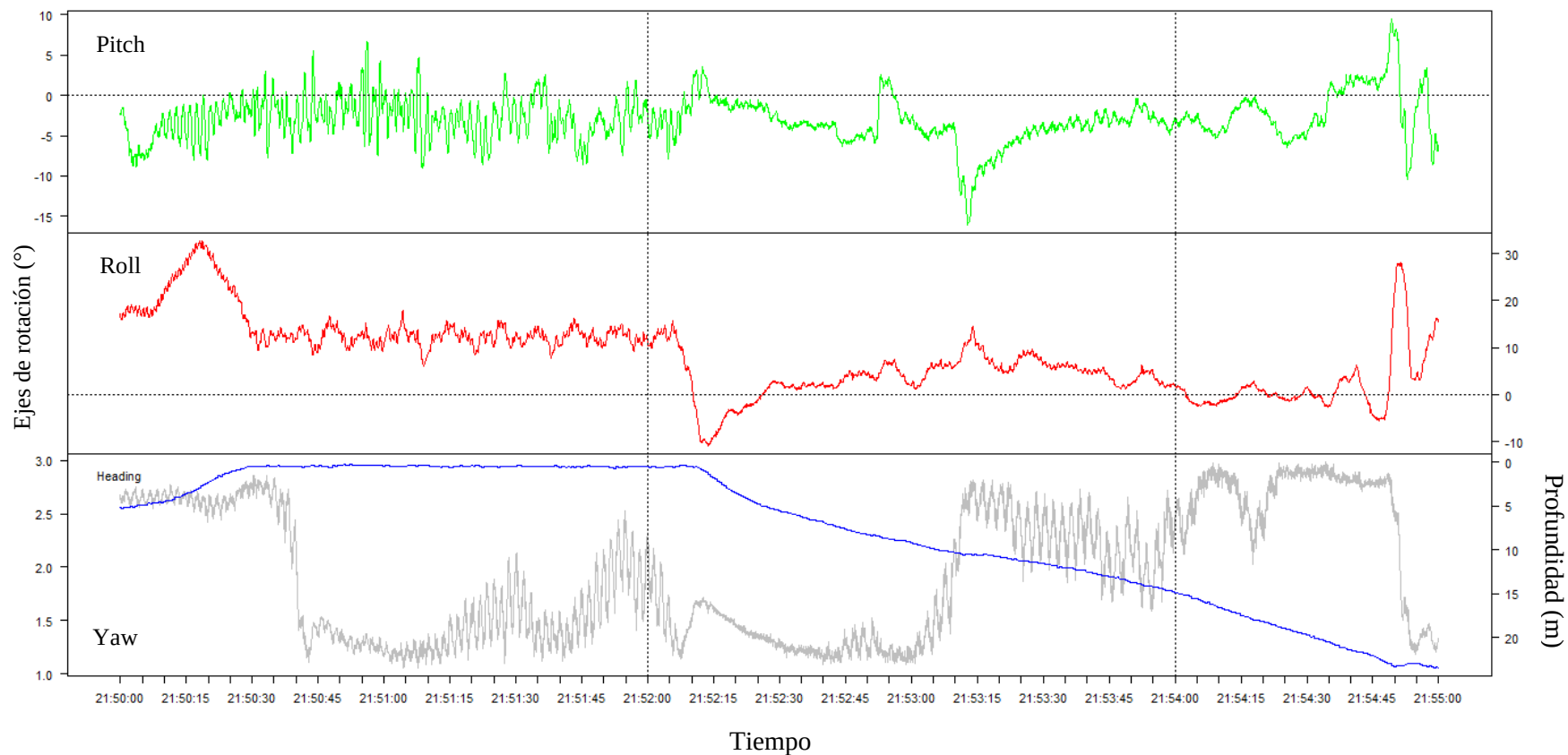


Figura 80. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 21:50:00 y las 21:55:00. La figura de arriba corresponde al *Pitch*, la del medio al *Roll* y la de abajo al *Yaw*. Los valores de cada eje son medidos en grados ($^{\circ}$). La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés.

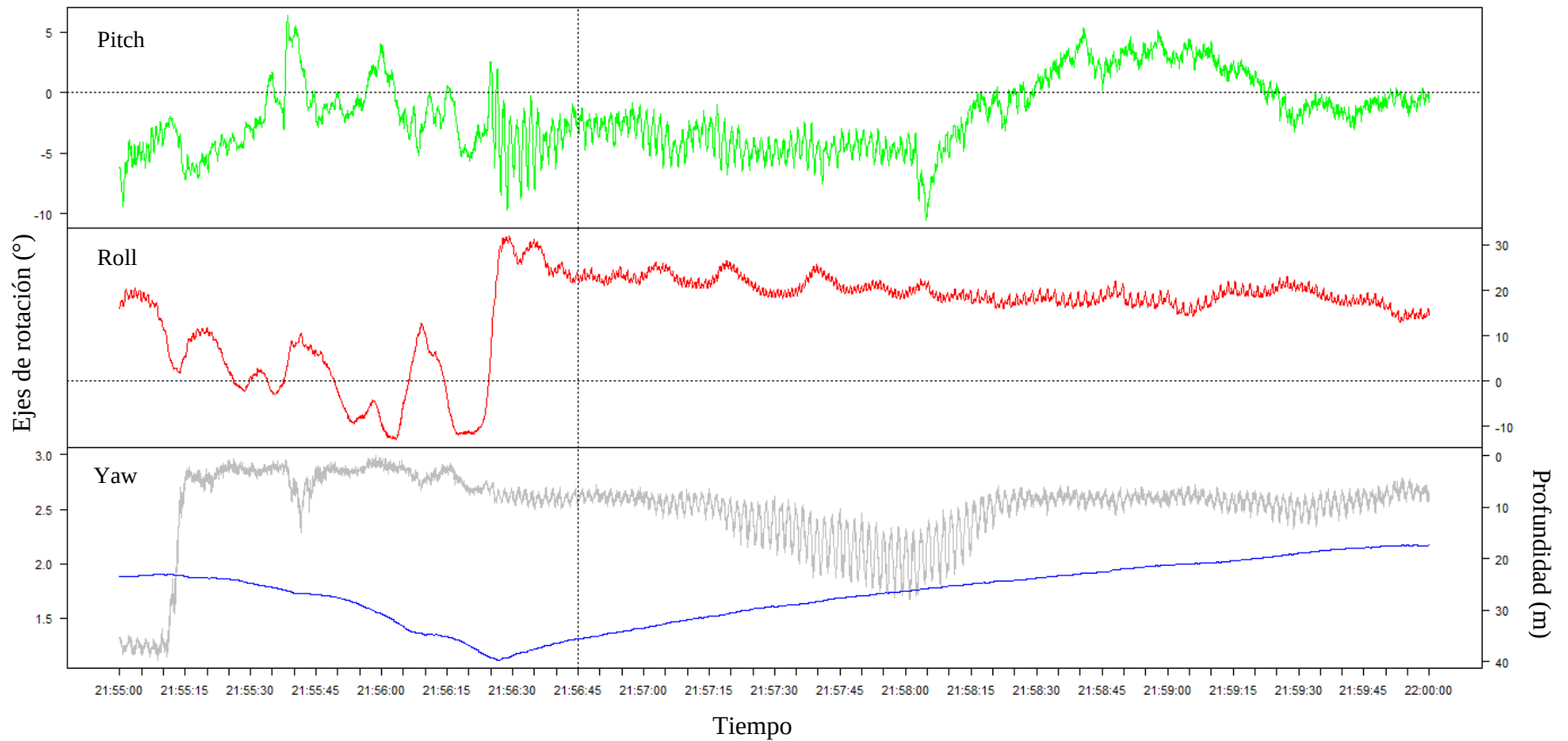


Figura 81. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 21:55:00 y las 22:00:00. La figura de arriba corresponde al *Pitch*, la del medio al *Roll* y la de abajo al *Yaw*. Los valores de cada eje son medidos en grados ($^{\circ}$). La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés.

El quinto y último segmento escogido, comprendió desde la 1:40:00 hasta la 1:45:00 de la mañana del 28 de mayo de 2017. Al igual que en las anteriores gráficas, la aceleración total y estática fueron calculadas a partir de promedios móviles (Fig. 82). Con respecto a los ejes de rotación (Fig. 83), en este periodo se observa que mientras el animal se mantiene en un nado constante entre los 10 y 15 m de profundidad, los valores en el eje del *pitch* se mantienen entre -6° y 0° , los valores del *roll* entre 20° y 10° , y los valores del *yaw* entre 2.2° y 2.8° . En general, los datos parecen sugerir que en el tiempo en el que el tiburón se encuentra a media agua (entre los 10 y 15 m), el comportamiento en los tres ejes no parece variar.

A partir de los sensores de temperatura y presión, se hicieron los perfiles de profundidad y temperatura (Fig. 84) en la que se ven movimientos de “yo-yo” durante todo el periodo de muestreo. Con base en esta figura, se quiso determinar si había diferencias significativas entre el tiempo en que el animal estuvo presente a diferentes profundidades, se hizo un histograma de frecuencias de registro de datos sobre cinco intervalos de profundidad (Fig. 85). El primer intervalo fue desde los 0 hasta los 2 metros de profundidad, el segundo entre los 2 y 5 metros, el tercero entre los 5 y 10 metros, el cuarto entre los 10 y 20 m, y el último entre 20 y 40 m.

Cada detección en cada intervalo fue multiplicada por 0.05 segundos (tiempo en que cada dato fue tomado) y divididas por 60 para sacar el total de minutos que el tiburón estuvo en cada intervalo de profundidad (tabla XIII). El porcentaje de cada intervalo fue obtenido por la división del resultado del tiempo total de cada uno entre el tiempo de todo el periodo de observación y multiplicado por 100. En general, estas frecuencias indican que el tiburón pasó 69.6% (del total del tiempo registrado por la cámara) entre los 0 y 10 metros de profundidad, un 26.45% entre 10 y 20 metros y solo un 3,9% entre los 20 y 40 metros.

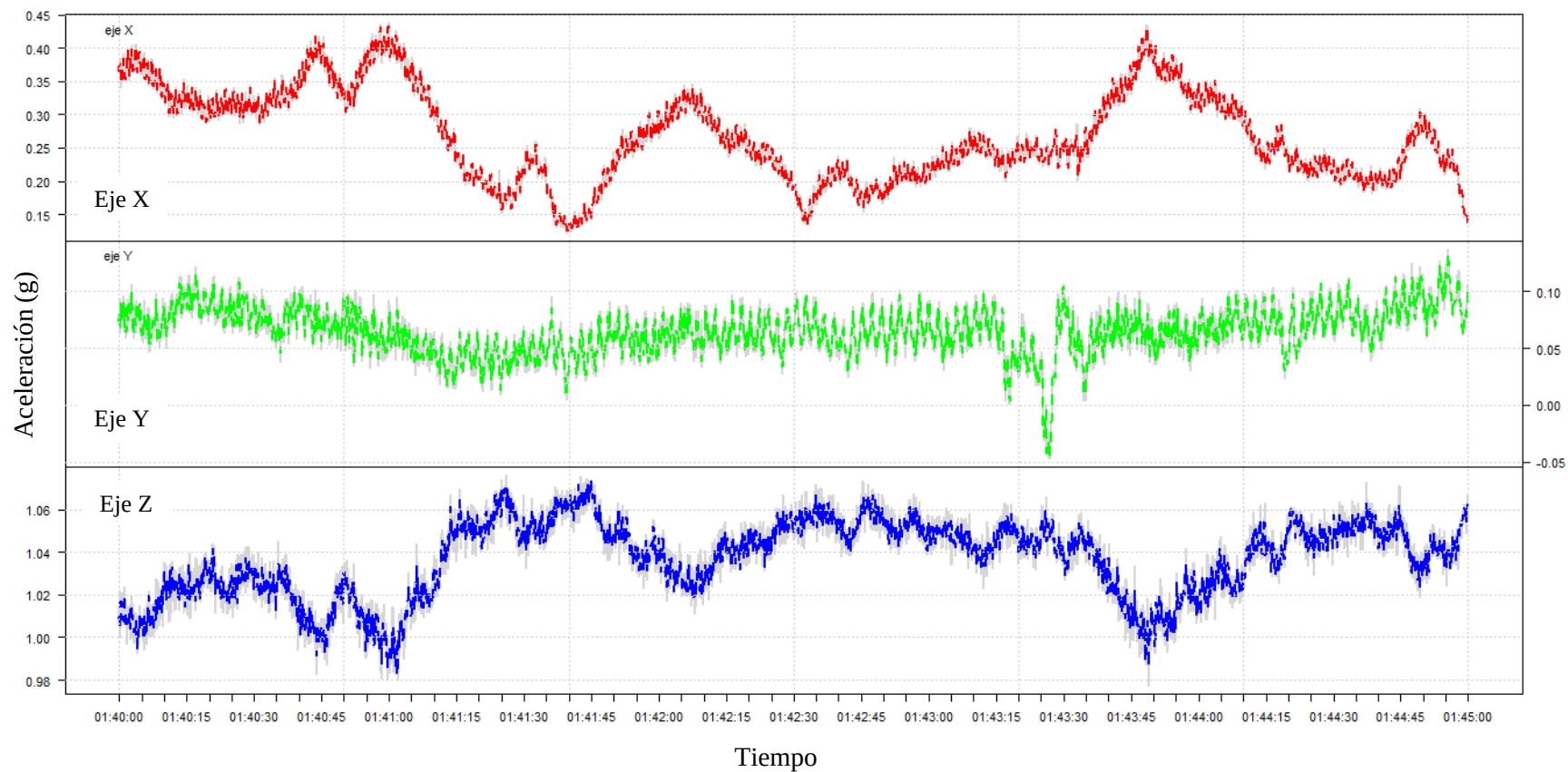


Figura 82. Aceleración dinámica y estática de una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 1:40:00 y las 1:45:00. Los datos fueron calculados a partir de los promedios móviles (franjas de colores en cada eje). Los valores de la aceleración se dan en términos de “g”.

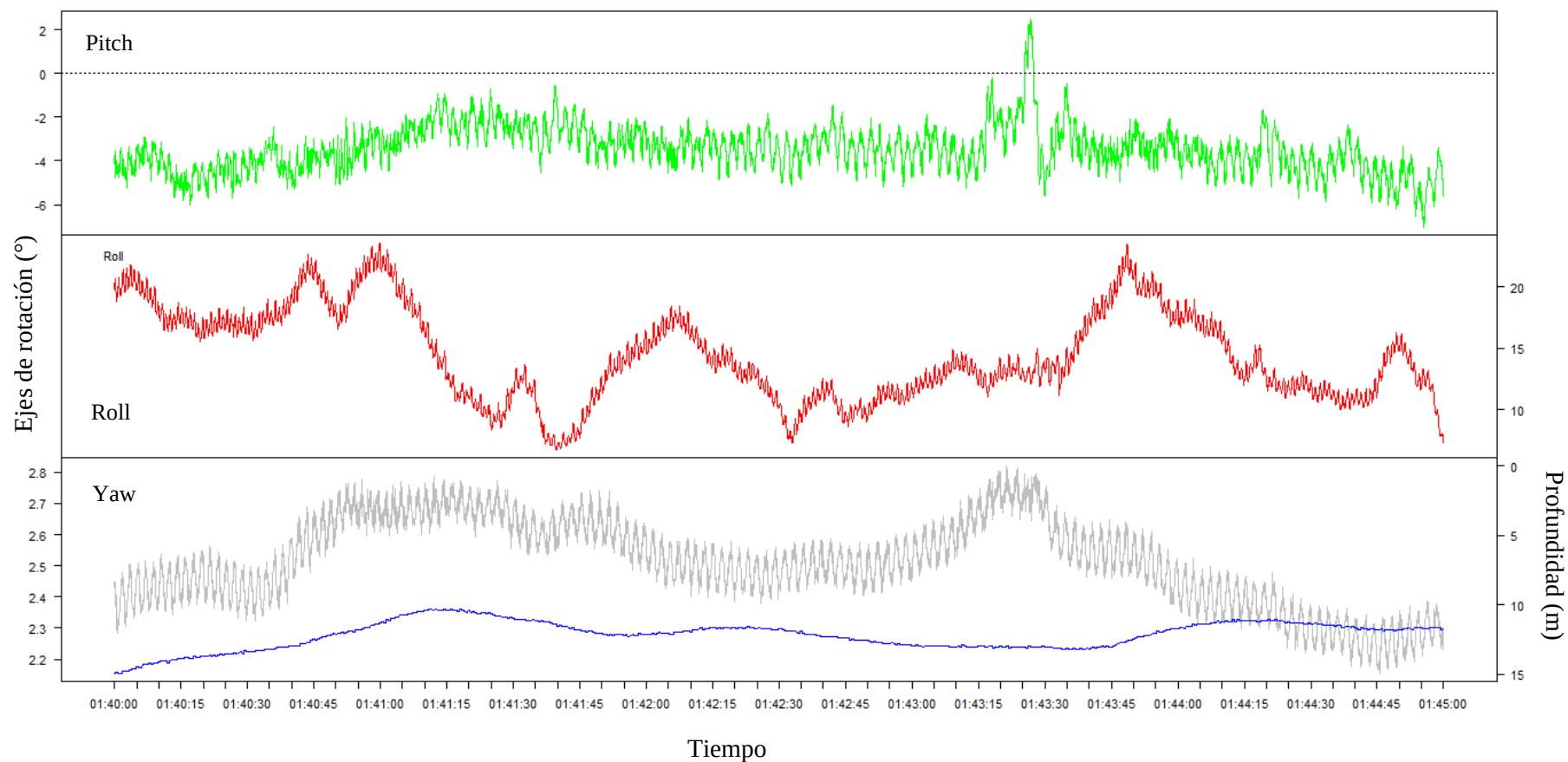


Figura 83. Ejes de rotación. Se ilustran las rotaciones hechas por una hembra adulta de tiburón limón en el Parque Nacional Cabo Pulmo el 27 de mayo de 2017 entre las 1:40:00 y las 21:55:00. La figura de arriba corresponde al *Pitch*, la del medio al *Roll* y la de abajo al *Yaw*. Los valores de cada eje son medidos en grados (°). La franja azul en la figura de abajo representa la profundidad, cuyos valores se encuentran a la derecha del gráfico. Las líneas punteadas verticales representan el segmento de mayor interés.

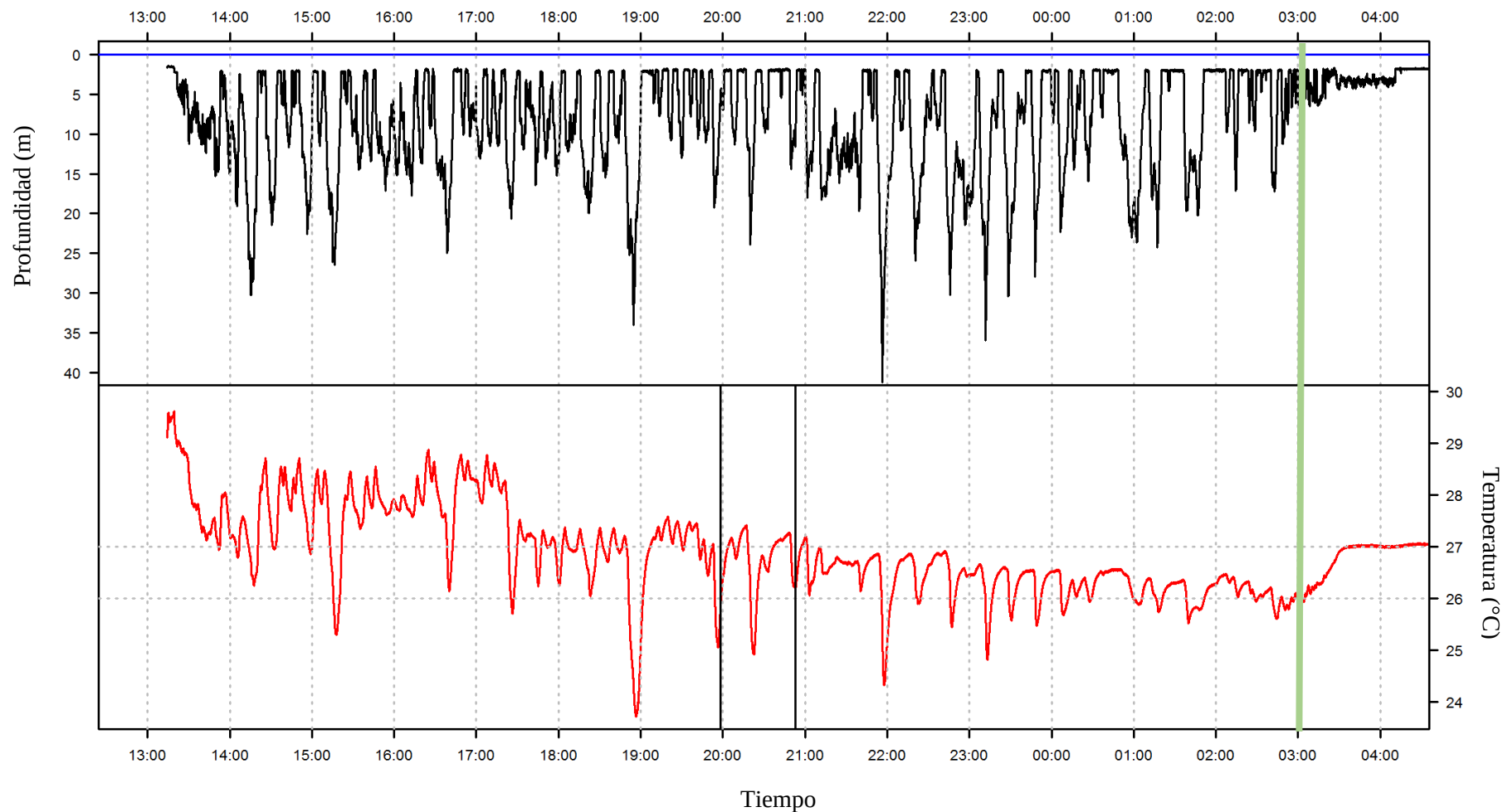


Figura 84. Perfiles de profundidad (figura de arriba) y temperatura (figura de abajo) medidos a lo largo de todo el periodo de registro de datos. Las franjas negras entre las 20:00 y las 21:00 horas indican la hora del atardecer (horario de verano). La línea verde indica la hora en la que al parecer la marca fue liberada de la aleta dorsal del tiburón.

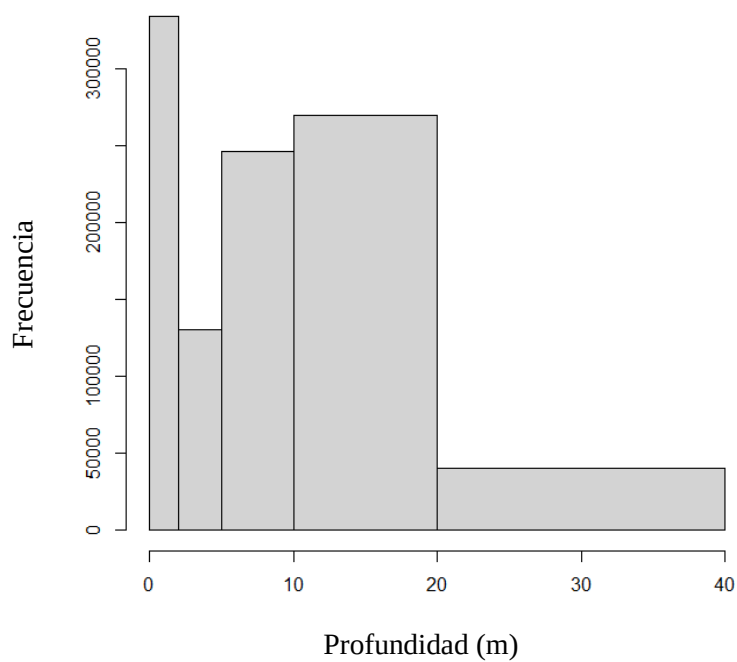


Figura 85. Histograma de frecuencia de datos en cada intervalo de profundidad.

Tabla XIII. Frecuencia de datos, tiempo total y porcentaje de “estancia” de la hembra adulta de tiburón limón (*Negaprion brevirostris*) en cada intervalo de profundidad dentro del Parque Nacional Cabo Pulmo

Intervalo de profundidad	Frecuencia	Tiempo total (minutos)	Porcentaje
0 - 2	334060	278.38	32.75
2 - 5	130550	108.79	12.8
5 - 10	245730	204.77	24.09
10 - 20	269870	224.89	26.45
20 - 40	29790	33.15	3.9

DISCUSIÓN

La marca personalizada (CATS), aportó los primeros datos sobre los movimientos de la hembra adulta de tiburón limón (*N. brevirostris*) en el Parque Nacional Cabo Pulmo (B.C.S., México) durante un periodo de 14 horas. Con base en los segmentos analizados, se puede sugerir que el comportamiento en superficie (< 2 m) es diferente al comportamiento a media agua ($2 - 10$ m) y a profundidades mayores (> 20 m).

Mientras que en superficie los tres ejes de los movimientos de rotación parecen mantener estables con pequeños cambios en la orientación y con un mayor número de movimientos por unidad de tiempo (5 segundos), a media agua parece incrementar el cambio en los grados para cada uno de los ejes, mientras que los cambios en cada uno de ellos se dan más lento por unidad de tiempo. Es interesante que entre los 10 y 20 metros el animal muestre un comportamiento tranquilo, y que de los 20 a los 40 comienza a variar. Es importante notar que durante el atardecer (aunque no se tenga video de ese momento), el tiburón duró más tiempo en superficie que en otras profundidades, cuyos movimientos erráticos fueron evidenciados con mayor frecuencia en el eje del *pitch*

En los últimos años, los investigadores utilizan dispositivos remotos para conocer aspectos biológicos sobre diferentes especies (Donaldson *et al.*, 2014). Las herramientas más utilizadas son los dispositivos de bio-telemetría (telemetría satelital y acústica) y de “biologización” (registrador de archivos), los cuales proveen resultados más exactos y eficaces al momento de evaluar el comportamiento, la ecología espacial, la energía y fisiología de los animales en su hábitat natural.

En general, los estudios de comportamiento sobre animales en su hábitat natural se han hecho a partir de marcas de archivo, usadas para medir el comportamiento y el estrés posterior a la liberación en los tiburones (Skomal *et al.*, 2007; Campana *et al.*, 2009; Hutchinson *et al.*, 2015). Los acelerómetros son marcas de registro de archivo que pueden integrarse a otros dispositivos (como la CATS), los cuales han sido cada vez más usadas en

la investigación marina. Varios estudios de aves, mamíferos y peces han utilizado esta tecnología con el objetivo de determinar aspectos de comportamiento, fisiológicos y de gasto energético (Kokobun *et al.*, 2011; Friedlaender *et al.*, 2015).

Muchos de los estudios se han centrado en medir los efectos de estos dispositivos y las técnicas de marcaje sobre el comportamiento de animales marinos, principalmente en teleósteos (Cooke *et al.*, 2011). En el caso de los elasmobranquios se han evaluado los efectos de la presencia de las marcas y las tasas de recuperación. Bullock *et al.*, (2015) sugirieron que, aunque el tiburón limón (*Negaprion brevirostris*) puede modificar sus patrones de movimientos y uso del espacio después de haber sido marcado y liberado, los individuos son capaces de adaptarse y, en términos de actividad, demostrar una recuperación rápida (entre 2 y 35 minutos).

En nuestro estudio observamos un patrón de movimiento que ha sido descrito y denominado por otros autores como “yo-yo” o de “línea recta”. Estos movimientos se refieren al cambio constante de una profundidad menor a una mayor durante un periodo de tiempo determinado. A partir de datos de un acelerómetro triaxial, Heithaus *et al.*, (2002) describieron el comportamiento de forrajeo y el uso del hábitat de tiburones tigre (*Galeocerdo cuvier*) en un ecosistema de pastos marinos al oeste de Australia, donde a partir del seguimiento de 45 individuos, encontraron que el patrón de movimiento general es hacia el norte, donde su distribución es influenciada por la disponibilidad de presas, encontradas por lo regular en áreas de poca profundidad.

El movimiento observado en los tiburones también fue vertical, donde se identificaron patrones de nado denominados “rebote”. Los rebotes integran periodos cortos de nado en superficie (< 2) seguidas por descensos relativamente rápidos y luego por un periodo en el fondo antes de un ascenso más lento. En el fondo, la mayoría de los rebotes sucedieron a pocos centímetros del sustrato, pero no todos los rebotes llegaron hasta él.

Los rebotes tuvieron un tiempo promedio de 4,3 min, y los tiburones un promedio de 14 rebotes por hora. La natación en línea recta también ha sido observada en tiburones martillo (*Sphyrna lewini*) por Klimley (1993) y tiburones tigre en Hawaii (Holland *et al.*, 1999). En el caso del tiburón martillo, la natación direccional se describió como excursiones de ida y vuelta desde y hacia un monte submarino, y para los tiburones tigres de Hawaii como excursiones entre aguas costeras y bancos en mar abierto.

En nuestro estudio, el contraste con la profundidad del fondo no se pudo hacer debido a que este dato solo fue obtenido al juntar el momento en el que el video mostrara el sustrato y los datos correspondientes al sensor de presión. Se debe tener en cuenta que los resultados en este caso de estudio incluyen únicamente al individuo marcado, y que estos no se pueden extrapolar al comportamiento de la especie. Teniendo en cuenta que el tiempo en el que la marca registró datos no es suficiente para determinar si los movimientos estaban asociados a algún patrón de comportamiento o si estaban direccionados hacia un sitio específico, es necesario contar con técnicas de rastreo simultáneas que ofrezcan un panorama cuyo rango de tiempo sea mayor para describir los patrones de movimiento de los individuos.

Aunque la técnica de identificación de patrones de movimiento y comportamiento a partir de datos de un acelerómetro son sofisticadas y sus resultados han demostrado un alto nivel de confianza, existen varias razones para clasificar erróneamente los comportamientos que involucran los movimientos más rápidos. El nado de un tiburón usualmente está representado por patrones oscilatorios regulares, cada oscilación representa un batido de la cola (contribuyendo a la propulsión hacia adelante) (Gleiss *et al.*, 2009a), lo que hace que su identificación sea relativamente “sencilla”.

Sin embargo, cualquier similitud entre la forma de onda producida por un nado rápido u otro comportamiento, podría resultar en una mala clasificación (McClune *et al.*, 2014; Ladds *et al.*, 2017; le Roux *et al.*, 2017; Hounslo *et al.*, (2019), indicaron que los comportamientos complejos de los tiburones limón juveniles (movimientos rápidos de la cabeza, giros inesperados entre otros) se caracterizaron de manera similar a partir de sus señales de aceleración, tanto en la frecuencia como en su amplitud, produjeron variables

predictoras por segundo, lo que llevó a una serie predicciones incorrectas dentro del modelo. Estos errores de identificación de comportamientos se han evidenciado en trabajos similares en gatos (*Felis catus*) (Watanabe *et al.*, 2005), ovejas (*Ovis aries*) (le Roux & col., 2017; Walton *et al.*, 2018) y leones marinos (*Arctocephalus sp.*) y focas (*Neophoca cinerea*) (Ladds *et al.*, 2017).

Un punto clave para evitar la mala identificación de los movimientos, es la programación adecuada del dispositivo de grabación de datos. La marca debe estar programada con base el comportamiento previamente conocido de la especie, o (en el caso donde sea un estudio pionero) la información de la misma en otras partes del mundo o de especies emparentadas (Hounslo *et al.*, 2019). Sin embargo, si no se tiene la información anterior, Whitney *et al.*, (2007) sugieren que para elasmobranquios grandes (> 1 m), las frecuencias de muestreo desde 1 Hz han permitido la identificación exitosa de los comportamientos de natación y descanso a partir datos el acelerómetro.

Basados en este autor, Hounslo *et al.*, (2019) hicieron experimentos sobre individuos juveniles de tiburón limón, concluyendo que las frecuencias de muestreo de 5 Hz son adecuadas para la clasificación de tipos de comportamiento a partir de datos de acelerómetros, lo que a su vez ahorraría espacio en la memoria del dispositivo y aumentaría el rendimiento de la batería.

Otra de las razones por las que la clasificación de comportamientos pudiera ser incorrecta, podría estar ligada al “aliasing” o “alisado” de la forma de la onda, cuyo efecto de distorsión hace que los comportamientos no se puedan distinguir entre sí cuando la frecuencia de muestreo es menor a la de Nyquist (Broell *et al.*, 2013). A medida que se redujo la frecuencia de muestreo, el efecto del “alisado” fue evidente entre todos los comportamientos observados. Los movimientos en los que el efecto fue más notable fueron los de mayor frecuencia, como las que incluían ráfagas y sacudidas de cabeza.

Aunque la identificación del comportamiento y patrones de movimiento de las especies pueda ser complicada, la combinación de una cámara y varios sensores es una solución efectiva a este problema. El uso del dispositivo CATS permitió generar información sobre los patrones de movimiento en tiempo real de la hembra adulta, *Lucy*, los cuales aportan conocimiento sobre su ecología y generan una base para estudios de comportamiento de la especie en el Océano Pacífico oriental y en el PNCP.

BIBLIOGRAFÍA

- Amlaner, C. 1. & Macdonald, D. W. 1980. (eds). A Handbook on Biotelemetry and Radio Tracking. Pergamon Press, Oxford. pp. 425-430.
- Beltramino, L. E., & Madryn, S. P. 2016. Determinación de patrones comportamentales y de actividad en peces de arrecifes rocosos mediante el uso de acelerómetros.
- Bouyoucos, I. A., Montgomery, D. W., Brownscombe, J. W., Cooke, S. J., Suski, C. D., Mandelman, J. W., & Brooks, E. J. 2017. Swimming speeds and metabolic rates of semi-captive juvenile lemon sharks (*Negaprion brevirostris*, Poey) estimated with acceleration biologgers. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 486, 245-254.
- Brewster, L.R., Dale, J.J., Guttridge, T.L., Gruber, S.H., Hansell, A.C., Elliott, M., Cowx, I.G., Whitney, N.M., Gleiss, A.C., 2018. Development and application of a machine learning algorithm for classification of elasmobranch behaviour from accelerometry data. Mar. Biol. 165 (62).
- Broell, F., Noda, T., Wright, S., Domenici, P., Steffensen, J.F., Auclair, J.-P., Taggart, C.T., 2013. Accelerometer tags: detecting and identifying activities in fish and the effect of sampling frequency. J. Exp. Biol. 216, 1255–1264.
- Brown, D.D., Kays, R., Wikelski, M., Wilson, R., Klimley, A., 2013. Observing the unwatchable through acceleration logging of animal behavior. Anim. Biotelem. 1, 1–16.
- Bullock, R. W., Guttridge, T. L., Cowx, I. G., Elliott, M., & Gruber, S. H. 2015. The behaviour and recovery of juvenile lemon sharks *Negaprion brevirostris* in response to external accelerometer tag attachment. Journal of Fish Biology, 87(6), 1342-1354.
- Calambokidis, J., Schorr, G. S., Steiger, G. H., Francis, J., Bakhtiari, M., Marshall, G., ... & Robertson, K. 2007. Insights into the underwater diving, feeding, and calling behavior of blue whales from a suction-cup-attached video-imaging tag (CRITTERCAM). Marine Technology Society Journal, 41(4), 19-29.
- Campana, S. E., Joyce, W. & Manning, M. J. 2009. Bycatch and discard mortality in commercially caught blue sharks *Prionace glauca* assessed using archival satellite pop-up tags. Marine Ecology Progress Series 387, 241–253.
- Chen, K.Y., Bassett Jr., D.R., 2005. The technology of accelerometry-based activity monitors: current and future. Med. Sci. Sports Exerc. 37, S490–S500.
- Cooke, S. J., Hinch, S. G., Wikelski, M., Andrews, R. D., Kuchel, L. J., Wolcott, T. G., & Butler, P. J. 2004. Biotelemetry: a mechanistic approach to ecology. Trends in ecology & evolution, 19(6), 334-343.

- Donaldson, M. R., Hinch, S. G., Suski, C. D., Fisk, A. T., Heupel, M. R. & Cooke, S. J. 2014. Making connections in aquatic ecosystems with acoustic telemetry monitoring. *Frontiers in Ecology and the Environment* 12, 565–573.
- Friedlaender, A. S., Goldbogen, J. A., Hazen, E. L., Calambokidis, J. & Southall, B. L. 2015. Feeding performance by sympatric blue and fin whales exploiting a common prey resource. *Marine Mammal Science* 31, 345–354.
- Gao, L., Campbell, H.A., Bidder, O.R., Hunter, J., 2013. A Web-based semantic tagging and activity recognition system for species' accelerometry data. *Ecological Informatics* 13, 47–56
- Gleiss, A.C., Norman, B., Liebsch, N., Francis, C., Wilson, R.P. 2009b. A new prospect for tagging large free-swimming sharks with motion-sensitive data-loggers. *Fish. Res.* 97, 11–16.
- Grünewälder, S., Broekhuis, F., MacDonald, D.W., Wilson, A.M., McNutt, J.W., ShaweTaylor, J., Hailes, S. 2012. Movement activity based classification of animal behaviour with an application to data from cheetah (*Acinonyx jubatus*). *PLoS ONE* 7, e49120.
- Halsey L.G., Shepard E.L.C., Hulston C.J., Venables M.C., White C.R., Jeukendrup A.E., Wilson R.P. 2008 Acceleration versus heart rate for estimating energy expenditure and speed during locomotion in animals: tests with an easy model species, *Homo sapiens*. *Zoology* 111:231–241
- Hammond, T.T., Springthorpe, D., Walsh, R.E., Berg-Kirkpatrick, T. 2016. Using accelerometers to remotely and automatically characterize behavior in small animals. *J. Exp. Biol.* 219, 1618–1624.
- Hays, G.C., Ferreira, L.C., Sequeira, A.M., Meekan, M.G., Duarte, C.M., Bailey, H., Bailleul, F., Bowen, W.D., Caley, M.J., Costa, D.P., 2016. Key questions in marine megafauna movement ecology. *Trends Ecol. Evol.* 31, 463–475.
- Heithaus MR, Dill LM, Marshall GJ, Buhleier B 2002 Habitat use and foraging behaviour of tiger sharks (*Galeocerdo cuvier*) in a seagrass ecosystem. *Mar Biol* 140:237–248.
- Holland KN, Wetherbee BM, Lowe CG, Meyer CG 1999 Movements of tiger sharks (*Galeocerdo cuvier*) in coastal Hawaiian waters. *Mar Biol* 134:665–673
- Horie, J., Mitamura, H., Ina, Y., Mashino, Y., Noda, T., Moriya, K., Arai, N., Sasakura, T. 2017. Development of a method for classifying and transmitting high-resolution feeding behavior of fish using an acceleration pinger. *Animal Biotelemetry* 5 (12).
- Hounslow, J. L., Brewster, L. R., Lear, K. O., Guttridge, T. L., Daly, R., Whitney, N. M., & Gleiss, A. C. 2019. Assessing the effects of sampling frequency on behavioural classification of accelerometer data. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 512, 22-30.

- Hutchinson, M. R., Itano, D. G., Muir, J. A. & Holland, K. A. (2015). Post-release survival of juvenile silky sharks captured in a tropical tuna purse seine fishery. *Marine Ecology Progress Series* 521, 143–154.
- Jewell, O. J., Gleiss, A. C., Jorgensen, S. J., Andrzejaczek, S., Moxley, J. H., Beatty, S. J., ... & Chapple, T. K. 2019. Cryptic habitat use of white sharks in kelp forest revealed by animal-borne video. *Biology letters*, 15(4), 20190085.
- Kato, A., Ropert-Coudert, Y., Grémillet, D., & Cannell, B. 2006. Locomotion and foraging strategy in foot-propelled and wing-propelled shallow-diving seabirds. *Marine Ecology Progress Series*, 308, 293-301.
- Kawabe R, Kawano T, Nakano N, Yamashita N, Hiraishi T, Naito Y. 2003b. Simultaneous measurement of swimming speed and tail beat activity of free-swimming rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* using an acceleration datalogger. *Fish Sci* 69:959–965
- Klimley AP. 1993. Highly directional swimming by scalloped hammerhead sharks, *Sphyrna lewini*, and subsurface irradiance, temperature, bathymetry, and geomagnetic field. *Mar Biol* 117:1–22
- Kokobun, N., Kim, J., Shin, H., Naito, Y. & Takahashi, A. 2011. Penguin head movement detected using small accelerometers: a proxy of prey encounter rate. *Journal of Experimental Biology* 214, 3760–3767.
- Ladds, M.A., Thompson, A.P., Kadar, J.-P., Slip, D., Hocking, D., Harcourt, R. 2017. Super machine learning: improving accuracy and reducing variance of behaviour classification from accelerometry. *Animal Biotelemetry* 5 (8).
- le Roux, S.P., Marias, J., Wolhuter, R., Niesler, T. 2017. Animal-borne behaviour classification for sheep (Dohne Merino) and Rhinoceros (*Ceratotherium simum* and *Diceros bicornis*). *Animal Biotelemetry* 5 (25).
- Martin P, Bateson G. 2007. Measuring behaviour: an introductory guide. Cambridge University Press, Cambridge
- McClune DW, Marks NJ, Wilson RP, Houghton J.D., Montgomery I.W., McGowan N.E. 2014. Tri-axial accelerometers quantify behaviour in the Eurasian badger (*Meles meles*): towards an automated interpretation of field data. *Animal Biotelemetry*. 2:5.
- Nathan R., Spiegel O., Fortmann-Roe S., Harel R., Wikelski M., Getz W.M. 2012. Using tri-axial acceleration data to identify behavioral modes of free-ranging animals: general concepts and tools illustrated for griffon vultures. *J Exp Biol* [Internet]. 215(Pt 6):986–96.
- Ponganis, P. J., Van Dam, R. P., Marshall, G., Knowler, T., & Levenson, D. H. 2000. Sub-ice foraging behavior of emperor penguins. *Journal of Experimental Biology*, 203(21), 3275-3278.

- Ogilvy, C.S. & Dubois, A.B. 1981. The hydrodynamic drag of swimming bluefish (*Pomatomus saltatrix*) in different intensities of turbulence variation with changes of buoyancy. *J Exp Biol* 92:67–85.
- Sakamoto K.Q., Sato K., Ishizuka M., Watanuki Y., Takahashi A., Daunt F. 2009. Can ethograms be automatically generated using body acceleration data from free-ranging birds? *PLoS One* 4(4): e5379.
- Shepard, E.L., Wilson, R.P., Halsey, L.G., Quintana, F., Laich, A.G., Gleiss, A.C., ... & Norman, B. 2008a. Derivation of body motion via appropriate smoothing of acceleration data. *Aquatic Biology*, 4(3), 235-241.
- Shepard, E.L., Wilson, R.P., Quintana, F., Laich, A.G., Liebsch, N., Albareda, D.A., ... & Newman, C. 2008b. Identification of animal movement patterns using tri-axial accelerometry. *Endangered Species Research*, 10, 47-60.
- Skomal, G.B., Lobel, P.S. & Marshall, G. 2007. The use of animal-borne imaging to assess post-release behavior as it relates to capture stress in grey reef sharks, *Carcharhinus amblyrhynchos*. *Marine Technology Society Journal* 41, 44–48.
- Sur, M., Suffredini, T., Wessells, S.M., Bloom, P.H., Lanzone, M., Blackshire, S., Sridhar, S., Katzner, T. 2017. Improved supervised classification of accelerometry data to distinguish behaviors of soaring birds. *PLoS ONE* 12, e0174785.
- Rutz, C., Hays, G.C. 2009. New frontiers in biologging science. pp. 289–292.
- Tanaka H., Tagaki Y., Naito Y. 2001. Swimming speeds and buoyancy compensation of migrating adult chum salmon *Oncorhynchus keta* revealed by speed/depth/acceleration data logger. *J Exp Biol* 204:3895–3904.
- Tavares, R. 2018. Distribución, área de cría y variables demográficas y espaciales del tiburón limón, *Negaprion brevirostris* (Poey 1868) en el Parque Nacional Archipiélago Los Roques. Ph.D. Thesis. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Venezuela. 275 pp.
- Valletta, J. J., Torney, C., Kings, M., Thornton, A., & Madden, J. 2017. Applications of machine learning in animal behaviour studies. *Animal Behaviour*. 124, 203-220.
- Walton, E., Casey, C., Mitsch, J., Vázquez-Diosdado, J.A., Yan, J., Dottorini, T., Ellis, K.A., Winterlich, A., Kaler, J. 2018. Evaluation of sampling frequency, window size and sensor position for classification of sheep behaviour. *R. Soc. Open Sci.* 5, 171442.
- Wang, Y., Nickel, B., Rutishauser, M., Bryce, C.M., Williams, T.M., Elkaim, G., Wilmers, C.C. 2015. Movement, resting, and attack behaviors of wild pumas are revealed by tri-axial accelerometer measurements. *Movement Ecol.* 3, 2.

- Watanabe Y., Izawa M., Kato A., Ropert-Coudert Y., Naito Y. 2005. A new technique for monitoring the detailed behaviour of terrestrial animals: a case study with the domestic cat. *Appl Anim Behav Sci* 94:117–131
- Whitney, N.M., Papastamatiou, Y.P., Holland, K.N., Lowe, C.G. 2007. Use of an acceleration data logger to measure diel activity patterns in captive whitetip reef sharks, *Triaenodon obesus*. *Aquat. Living Resour.* 20, 299–305.
- Wilson, R.P., Shepard, E.L.C., & Liebsch, N. 2008. Prying into the intimate details of animal lives: use of a daily diary on animals. *Endangered species research*, 4(1-2), 123-137.
- Wilson R. P., White C. R., Quintana F., Halsey L.G., Liebsch N., Martin G.R., Butler P.J. 2006. Moving towards acceleration for estimates of activity-specific metabolic rate in free-living animals: the case of the cormorant. *J Anim Ecol* 75: 1081–1090.
- Windows media player. 2009. Microsoft.
- Yoda, K., Murakoshi, M., Tsutsui, K., & Kohno, H. 2011. Social interactions of juvenile brown boobies at sea as observed with animal-borne video cameras. *PLoS One*, 6(5), e19602.
- Yoda, K., Naito, Y., Sato, K., Takahashi, A., Nishikawa, J., Ropert-Coudert, Y., ... & Le Maho, Y. 2001. A new technique for monitoring the behaviour of free-ranging Adelie penguins. *Journal of Experimental Biology*, 204(4), 685-690.
- Yoda K., Sato K., Niizuma Y., Kurita M., Bost C.A., Le Maho Y., Naito Y. 1999. Precise monitoring of porpoising behaviour of Adélie penguins determined using acceleration data loggers. *J Exp Biol* 202:3121–3126

CAPÍTULO 4.
DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

DISCUSIÓN GENERAL

La combinación de la telemetría acústica y la marca personalizada (CATS) permitieron conocer e identificar los patrones de movimiento de los individuos de tiburón limón (*N. brevirostris*) en el Parque nacional Cabo Pulmo (B.C.S., México). En el presente estudio se utilizó una matriz acústica pasiva para documentar los movimientos de tiburones limón entre estaciones acústicas instaladas en el Parque Nacional Cabo Pulmo (PNCP), situado en el estado de Baja California Sur (México). En total se marcaron cinco individuos, dos machos adultos, dos machos juveniles y una hembra adulta de *N. brevirostris*, cuyas medidas variaron entre 180 y 248 cm de longitud total. La hembra fue el único tiburón que fue marcado con el dispositivo CATS (ver Cap. 3), por lo cual no se le realizó el seguimiento con telemetría pasiva. Los machos fueron monitoreados desde mayo de 2017 hasta septiembre de 2020 con el fin de determinar los patrones de movimiento, el tiempo de residencia y el periodo del día en el que cada animal visitaba una estación o receptor acústico dentro del arreglo de receptores del PNCP (ver Cap. 3).

Teniendo en cuenta que en la presente investigación no se utilizó telemetría activa, los datos obtenidos a partir de la telemetría acústica permiten hacer una interpretación de los patrones de movimientos de los individuos, sin determinar con exactitud los movimientos de cada tiburón. La red de receptores instalada previamente por la A.C. Pelagios Kakunjá originalmente pretendió estar situada únicamente dentro de los límites del Parque, sin embargo, se adicionaron dos estaciones, ubicadas al norte y sur del Parque. La primera fue denominada “Punta Pescadero (PPE)”, instalada a 40 km del límite norte del Parque a 670 metros de la costa, y segunda, nombrada “Bajo del Salado (BS)” a 8,6 km al límite sur del Parque a 1800 metros de la costa.

La estimación del área de actividad (AA) de cada animal fue calculada mediante la creación de un polígono mínimo convexo (PMC), construido dentro del programa QGIS. El caso de *Jager* (el macho adulto marcado en mayo de 2017) fue muy particular, debido a que fue el único individuo registrado en el receptor “PPE” y en el receptor “BS”. Estas observaciones hicieron que tuviera el área de actividad más grande registrado a lo largo del estudio,

llegando a medir aproximadamente 249 km². Si bien el número de individuos en el presente estudio es mucho menor al utilizado en otros trabajos, nuestros resultados coinciden con otros autores (ver Capítulo 2) en que el tamaño de las AA de los adultos fue mayor a la de los juveniles. Sin embargo, se requiere una muestra con un número mayor de individuos para dar evidencias significativas de que el tamaño de las AA de los juveniles y adultos en el PNCP se encuentra correlacionado al sexo, la edad/talla o a la madurez sexual.

Al combinar los movimientos de varios individuos de una misma especie, podrían definir la distribución de la población (Turchin 1998, Russell *et al.*, 2003). Sin embargo, para definir el uso de las áreas de distribución también se requiere saber el tiempo de residencia de los individuos en cada una de estas áreas. El patrón de residencia de un individuo o de una población dentro de un área y tiempo determinado será el resultado de la suma de los patrones de residencia de cada uno de los integrantes de la población (Tavares 2018). Al combinar ambos elementos, se podría inferir sobre varios aspectos sobre la ecología y el comportamiento de una especie.

En ocasiones, cuando no se puede hacer una medición directa de la calidad del hábitat, la aptitud individual o la demografía de la población (Van Horne 1983), las zonas donde las especies presenten una alta residencia pudieran ser un indicio de hábitats de alta calidad (Austin *et al.*, 2004). El desarrollo de herramientas que permiten recopilar y analizar grandes cantidades de datos sobre ubicaciones, movimientos y desplazamientos de las especies, facilitado la manera en la que hoy se estudia el comportamiento animal (Pinaud & Weimerskirch 2007).

Fauchald & Tavera (2003), desarrollaron un tipo de análisis denominado “tiempo de primer paso” o “FPT” con el fin de estudiar la escala a la que ocurren los patrones de movimiento en respuesta a la heterogeneidad espacial, identificando simultáneamente el comportamiento de búsqueda en áreas restringida (ARS). Sus conclusiones fueron que los depredadores utilizan las ARS cuando se alimentan de parches de presas, aumentando sus movimientos al mismo tiempo que reducen la velocidad para permanecer dentro de las

agregaciones de presas más viables, por lo cual este comportamiento hace que aumente la residencia de los individuos en áreas determinadas.

En el caso de estudios efectuados a partir del uso de telemetría acústica, los patrones de movimiento y residencia son más confiables. Yeiser *et al.*, (2008) describieron que a diferencia de los patrones de movimiento observados para *C. leucas*, *N. brevirostris* mostró patrones de comportamiento a partir de movimientos repetitivos y constantes, tal como es el caso de los juveniles de tiburones limón estudiados en Bimini (Bahamas) por Morrissey & Gruber (1993b), donde los patrones de movimiento de los individuos se repiten de este a oeste. Por otra parte Gruber *et al.*, (1988) demostraron que la periodicidad en los movimientos de individuos de *N. brevirostris* sucedía más hacia el este de día que en la noche, sugiriendo que los individuos de tiburón limón orientaban sus movimientos en relación con el sol. En comparación con otras metodologías de seguimiento de animales en vida libre, la telemetría permite obtener una ventana de información de años, los cuales podrían ser comparados entre individuos de la misma especie dentro de una o varias poblaciones.

Teniendo en cuenta que los aspectos de comportamiento de la especie en otras partes del mundo son un antecedente para las nuevas investigaciones, los estudios podrían estar diseñados para que el muestreo lograra ser más representativo. Por ejemplo, Cortes y Gruber (1990) sugieren que en Bimini (Bahamas), los individuos de *N. brevirostris* no tiene un horario de alimentación preferida y, por lo tanto, no presentan un patrón de alimentación diario. Lo anterior es complementado por lo sugerido por Longval *et al.*, (1982), quienes demostraron a partir de entornos controlados, que esta especie tiene un ciclo de alimentación de 3 a 4 días. Con base en estos estudios, se podría inferir que, aunque *N. brevirostris* suele alimentarse con una baja periodicidad, este tuviera áreas de patrullaje preferidas dentro de su rango de actividad.

Estos hallazgos podrían aumentar su confiabilidad si la toma de datos se hiciera combinando varias técnicas de registro de datos que trabajaran simultáneamente. La marca personalizada obtiene los valores de la aceleración dinámica y estática medida en sus seis

ejes, más el video en cámara, lo que estaría indicando en tiempo real, los tipos de hábitats dentro de su área de distribución, comportamientos intra e interespecíficos, dieta y otros aspectos de su comportamiento. Si esta se llegase a juntar con datos de telemetría o de un GPS, se podría conocer la ruta que utilizó mientras se comportaba de una manera determinada, lo que podría dar una idea acerca sus patrones de movimiento y comportamiento.

CONCLUSIONES

- 1) Se describieron los movimientos de los individuos dentro del PNCP, donde los machos adultos se movieron a lo largo de toda la red de receptores acústicos dentro del parque, uno de ellos llegando incluso hasta la estación instalada a 40,4 kilómetros al norte de la primera estación de la zona norte, y hasta el receptor a 12 kilómetros después de la última estación instalada en el sur dentro de los límites del PNCP. El individuo juvenil que fue marcado en la zona sur a 30 metros de la línea de costa solo fue registrado en una estación perteneciente a la zona norte.
- 2) La comparación del índice de residencia entre cada individuo dentro del parque demostró que el único individuo que puede ser catalogado como “residente” del PNCP es el macho adulto, *Jager*. Los demás individuos no presentaron un alto índice de residencia debido a las pocas detecciones durante el periodo de observación, sin embargo, hay que tener en cuenta que la red de receptores no abarca toda el área del PNCP y por lo tanto no se puede asegurar que los individuos sean o no residentes del área.
- 3) De acuerdo con los patrones de actividad diario de los individuos, los adultos parecen preferir la zona sur alejados de la costa durante el día mientras que el tiburón juvenil parece preferir la zona norte cercana a la costa durante el atardecer y la noche.
- 4) Los patrones de movimiento obtenidos de la hembra adulta de tiburón limón a partir de la marca personalizada (CATS), indican movimientos de “yo-yo” a lo largo de todo el periodo en que la marca registró datos. Según el acelerómetro integrado a la marca, los movimientos en los ejes de rotación indican que mientras el animal se encuentre en superficie, sus movimientos son erráticos pero no drásticos, es decir, mientras los movimientos ocurren más veces dentro de un segmento de tiempo (5 segundos), generalmente los grados de movimiento se mantienen dentro de un intervalo de 5°.

RECOMENDACIONES

- 1) Aunque esta investigación pretendió describir los patrones de movimiento de los individuos a partir de la telemetría acústica y una marca personalizada, no podemos determinar la causa de los mismos. Sin embargo, con base en estudios de etología previos hechos en otras partes del mundo, podríamos atribuir este comportamiento a que los individuos juveniles evitan la competencia, y en general, compartir el espacio con tiburones adultos de la misma especie. Teniendo en cuenta que la presencia de tiburones toro y tiburones puntas negras es constante en el Parque, sería interesante comparar las áreas de actividad de cada una de estas especies y determinar si existe solapamiento de áreas o uso independiente de las mismas.
- 2) Los estudios poblacionales en los que se incluya demografía, uso de hábitat, patrón de movimientos y comportamiento de las especies de tiburón a través del tiempo, son claves para la generación de nueva información, necesaria para el monitoreo y ejecución de planes de manejo y conservación de especies. Con base a esto, es necesario continuar y complementar los resultados obtenidos en el PNCP, considerando la importancia del ecosistema para las especies que habitan en él. Además, considerando la capacidad de dispersión de los tiburones, sería interesante complementar la información obtenida para *N. brevirostris* investigando a las demás poblaciones de la especie que habitan en islas continentales de la misma región en donde existen registros de observación, quienes podrían estar contribuyendo a la recuperación y mantenimiento de las poblaciones en una escala regional.
- 3) Con respecto a la marca CATS, la recomendación sería programar la marca en función de la especie, es decir, tomar como base los antecedentes que se han hecho sobre el comportamiento y la biología de la especie en otras partes del mundo para aprovechar al máximo los datos obtenidos.

BILIOGRAFÍA

- Austin D., Bowen W. D., & McMillan J. I. 2004. Intraspecific variation in movement patterns: modeling individual behaviour in a large marine predator. *Oikos*, 105(1), 15-30.
- Cortés E. & Gruber S.H. 1990. Diet, feeding habits and estimates of daily ration of young lemon sharks, *Negaprion brevirostris* (Poey). *Copeia* 1990(1):204–218 pp.
- Fauchald P., & Tavera T. 2003. Using first-passage time in the analysis of area-restricted search and habitat selection. *Ecology*, 84(2), 282-288.
- Gruber S.H., Nelson D.R. & Morrissey J.F. 1988. Patterns of activity and space utilization of juvenile lemon sharks, *Negaprion brevirostris*, in a shallow Bahamian lagoon. *Bulletin of Marine Science* 43(1):61–76 pp.
- Longval M. J., Warner R. M., & Gruber S. H. 1982. Cyclical patterns of food intake in the lemon shark *Negaprion brevirostris* under controlled conditions. *Florida Scientist*, 25-33.
- Morrissey J.F. & Gruber S.H. 1993b. Habitat selection by juvenile lemon sharks, *Negaprion brevirostris*. *Environmental Biology of Fishes* 38:311–319 pp.
- Pinaud D., & Weimerskirch H. 2007. At-sea distribution and scale-dependent foraging behaviour of petrels and albatrosses: a comparative study. *Journal of Animal Ecology*, 76(1), 9-19.
- Russell R. E., Swihart R. K., & Feng Z. 2003. Population consequences of movement decisions in a patchy landscape. *Oikos*, 103(1), 142-152.
- Tavares R. 2018. Distribución, área de cría y variables demográficas y espaciales del tiburón limón, *Negaprion brevirostris* (Poey 1868) en el Parque Nacional Archipiélago Los Roques. Ph.D. Thesis. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Venezuela. 275 pp.
- Turchin P. 1998. Quantitative analysis of movement: measuring and modeling population redistribution in animals and plants. Sinauer Associates.