

COMISIÓN INTERAMERICANA DEL ATÚN TROPICAL
GRUPO DE TRABAJO AD-HOC PERMANENTE SOBRE PLANTADOS

8ª REUNIÓN

La Jolla, California (EE. UU.)
07-08 de junio de 2024

DOCUMENTO FAD-08-03

**EXPLORACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA IDENTIFICACIÓN REMOTA DE
PLANTADOS**

Jon Lopez¹, Marlon Román¹, Jose Luis Beloso², Tomás Galán², Gonzalo Legorburu³

¹Comisión Interamericana del Atún Tropical

²Satlink, España

³Digital Observer Service, España

ÍNDICE

| | |
|-----------------------------------------------------------|----|
| Resumen ejecutivo..... | 1 |
| 1. Antecedentes..... | 2 |
| 2. Objetivo | 4 |
| 3. Métodos..... | 4 |
| 3.1. Evaluación de tecnologías candidatas | 4 |
| 3.2. Pruebas en el mar de la tecnología seleccionada..... | 5 |
| 3.2.1. Pruebas exploratorias en Galicia | 5 |
| 3.2.2. Pruebas en Ashotines | 5 |
| 3.3. Análisis de los datos..... | 6 |
| 4. Resultados | 6 |
| 5. Discusión..... | 7 |
| 6. Conclusiones y recomendaciones..... | 9 |
| 7. Referencias | 10 |

RESUMEN EJECUTIVO

Durante décadas, los pescadores han aprovechado el comportamiento de agregación de los atunes para pescar alrededor de dispositivos agregadores de peces (plantados, objetos flotantes artificiales), que rápidamente se convirtieron en la forma predominante de capturar atunes en la pesquería cerquera del Océano Pacífico oriental (OPO). La pesca sobre plantados presenta varias ventajas en comparación con otras modalidades de pesca con red de cerco: es muy eficaz, relativamente fácil de planificar (es decir, los plantados se siembran con equipos electrónicos que permiten el monitoreo remoto de sus trayectorias y de la biomasa agregada) y tiene una menor proporción de lances nulos, entre otras. Sin embargo, esta modalidad de pesca también tiene varios impactos ecológicos negativos, como cantidades proporcionalmente mayores de algunas especies de captura incidental o atunes juveniles, impactos en el comportamiento y los desplazamientos de las especies y daños en hábitats costeros sensibles.

La cuantificación de estos impactos requiere métodos eficaces de recolección de datos de alta calidad,

incluidos métodos precisos de seguimiento y monitoreo de plantados individuales durante toda su vida útil. Actualmente, los plantados se identifican mediante identificadores de boyas satelitales (ver resolución [C-19-01](#)), y obtener con precisión los números de serie alfanuméricos de las boyas ha sido tradicionalmente difícil para los observadores, y no es posible con las capacidades actuales de monitoreo electrónico (ME). Sin embargo, esta información es clave para unir y conectar distintas bases de datos de la CIAT y apoyar la investigación científica de las actividades relacionadas con los plantados. Por lo tanto, un sistema electrónico para detectar e identificar plantados individuales de forma automática y remota mejoraría el valor y la utilidad de todos los tipos de datos. El personal de la CIAT, en colaboración con colaboradores en el campo tecnológico, probó estas tecnologías en condiciones controladas en el Laboratorio de Achotines, en Panamá, para evaluar su alcance y desempeño de detección, con resultados prometedores. Se probaron distintas configuraciones de la tecnología LoRaWAN (protocolo de comunicación de red de área amplia y de baja potencia que funciona con LoRa, una técnica patentada de radiocomunicación física de "largo alcance") para leer señales de sensores en un receptor ubicado a distintas distancias (100-1250 metros). Los resultados mostraron altas probabilidades de detección de estado (>75%) a distancias de 500-550 m y 675-750 m para configuraciones de receptor sin y con antena, respectivamente. Para los datos de ubicación, se observaron altas probabilidades de detección (>75%) a distancias de 100-350 m y 450-500 m para un receptor sin y con antena, respectivamente. De manera similar, el 50% de las tasas de detección de estado se encontraron a distancias de 600-650 m y 775-850 m para el receptor sin antena y con antena, respectivamente, mientras que para los datos de ubicación, las distancias fueron de 300-480 m y 575-650 m para un receptor sin antena y con antena, respectivamente. Por lo tanto, en general la señal de estado se pudo detectar a distancias mayores con más fiabilidad, en comparación con los datos de ubicación (es decir, 500-750 m en comparación con 100-500 m). Además, el receptor muestra una mayor capacidad de detección cuando se añade una antena tanto para los datos de estado como para los de ubicación, aumentando en general la capacidad de detección unos 150-300 metros. Estos resultados sugieren que esta tecnología podría ser viable para la identificación automática y remota de boyas satelitales por buques que se acercan a plantados con los que han interactuado. En el presente documento también se presentan las conclusiones del personal de la CIAT, acciones futuras, retos y lecciones aprendidas durante esta iniciativa y de la colaboración positiva con los fabricantes de boyas.

1. ANTECEDENTES

Durante décadas, los pescadores han aprovechado el comportamiento de agregación de los atunes para pescar alrededor de objetos flotantes (Watters 1999; Hall y Román 2013). En la década de 1980, los dispositivos agregadores de peces (plantados), objetos artificiales construidos para atraer atunes, comenzaron a utilizarse en el Océano Pacífico oriental (OPO). Su uso se ha expandido significativamente desde entonces, y la pesca sobre plantados se convirtió rápidamente en la forma predominante de capturar atunes en la pesquería cerquera del OPO (Lennert-Cody y Hall 1999; CIAT 2019; Hall y Román 2013). La pesca sobre plantados presenta ventajas significativas en comparación con otras modalidades de pesca: es muy eficaz, relativamente fácil de planificar (es decir, los plantados se siembran con boyas satelitales que permiten el monitoreo remoto de sus trayectorias y de la biomasa agregada) y tienen una menor proporción de lances nulos, entre otras (Lopez *et al.* 2014; Lopez *et al.* 2016; Cillari *et al.* 2018). Sin embargo, esta modalidad de pesca también tiene varios impactos ecológicos negativos. Por ejemplo, los plantados tienen una mayor proporción de algunas especies clave de captura incidental, afectan significativamente la captura de atunes juveniles (es decir, patudo y aleta amarilla), contribuyen a la alteración de los desplazamientos y comportamientos normales de las especies, incluida la dinámica de los cardúmenes, y, si se pierden o abandonan, pueden causar impactos en hábitats costeros sensibles y contribuir a la acumulación de desechos marinos en el océano (Maufroy *et al.* 2015; Sinopoli *et al.* 2020).

Sin embargo, la cuantificación de estos impactos requiere métodos eficaces de recolección de datos de alta calidad, incluidos métodos precisos de seguimiento y monitoreo de plantados individuales durante toda su vida útil. Actualmente, los plantados se identifican mediante identificadores de boyas satelitales (ver resolución [C-19-01](#)), y obtener con precisión los números de serie alfanuméricos de las boyas ha sido tradicionalmente difícil para los observadores, y no es posible con las capacidades actuales de monitoreo electrónico (ME) (Legorburu *et al.* 2018). Sin embargo, esta información es clave para unir y conectar distintas bases de datos de la CIAT y apoyar los avances científicos. El personal, el Grupo de Trabajo sobre Plantados y el Comité Científico Asesor (CCA) han discutido y reiterado la importancia de acceder a los identificadores de plantados/boyas satelitales y han recomendado repetidamente explorar formas eficaces de marcar y rastrear plantados (por ejemplo, [FAD-03 INF-A](#), [SAC-11 INF-M](#)).

El ME puede generar ciertos datos sobre plantados, como siembras y retiros, pero solo los tipos de datos que pueden recolectarse mediante cámaras y otros sensores. Los observadores recolectan varios tipos de datos sobre plantados, pero su acceso a la información suele depender de la tripulación, como el identificador del plantado o de la boya, lo que conlleva riesgos en cuanto a la calidad y accesibilidad de los datos. Sin la capacidad de identificar plantados individuales a lo largo de los viajes, la utilidad de los datos de los observadores relacionados con los plantados tiene un valor limitado, ya que no se pueden hacer inferencias sobre sus registros y actividades a lo largo de su vida. Por lo tanto, un sistema electrónico para detectar e identificar plantados individuales de forma automática y remota mejoraría el valor y la utilidad de todos los tipos de datos. En el mercado existen varias tecnologías para la identificación remota de objetos, pero ninguna ha sido explorada aún en detalle por la comunidad científica, los fabricantes de boyas o los proveedores de servicios de ME. Lo ideal sería probar estas tecnologías en condiciones controladas para evaluar su desempeño y comprender mejor sus ventajas y desventajas, así como para contribuir a la transición hacia la recolección automatizada de datos clave, tanto por parte de los observadores como de los sistemas de ME. El Laboratorio de Achotines de la CIAT en Panamá es un lugar ideal para tales experimentos en condiciones controladas, con equipos e instalaciones para pruebas en interiores y exteriores. El laboratorio cuenta con tanques, buques, personal cualificado, acceso a su propia bahía y fácil acceso a mar abierto.

El personal de la CIAT está actualmente concluyendo una serie inicial de experimentos financiados por la UE para evaluar las capacidades del ME para las flotas cerqueras y palangreras que operan en el OPO, y está colaborando en otros proyectos piloto de ME en la región (por ejemplo, la flota de mediana y avanzada escala de Costa Rica). Asimismo, el personal ha estado investigando los impactos de la pesquería sobre plantados en los últimos años (por ejemplo, [FAD-05 INF-A](#), [FAD-07-01](#), [FAD-08-01](#)) utilizando tanto datos tradicionales (por ejemplo, datos de observadores) como nuevos tipos de datos (por ejemplo, datos de plantados/boyas activos provistos en virtud de las resoluciones [C-17-02](#) y [C-21-04](#)). Iniciativas como éstas han mejorado los conocimientos del personal sobre las capacidades de los sistemas de ME y las boyas satelitales y han fortalecido las relaciones con los principales proveedores de servicios de ME y fabricantes de boyas. Una relación y conexión positivas con los líderes del sector, así como un mejor conocimiento de los sistemas de ME y otros dispositivos tecnológicos, son fundamentales para llevar a cabo el proyecto con éxito. Cualquier exploración e implementación fructífera de tecnologías debe contar con el apoyo de socios tecnológicos (es decir, fabricantes de boyas y proveedores de ME), ya que potencialmente aplicarán los resultados del proyecto en sus productos a corto y mediano plazo. Como se mencionó anteriormente, tal mejora tecnológica mejoraría significativamente la recolección y calidad de los datos y apoyaría los avances científicos y, por consiguiente, la elaboración de recomendaciones de ordenación exhaustivas para las especies objetivo y no objetivo en el OPO. En este documento, se describen las capacidades de desempeño y la idoneidad de diferentes tecnologías y configuraciones para identificar plantados remota y electrónicamente, así como los detalles sobre la metodología y los resultados de las pruebas e ideas para el trabajo futuro y la implementación de las tecnologías en las

pesquerías atuneras del OPO.

2. OBJETIVO

El objetivo de este estudio es evaluar la idoneidad de distintas tecnologías y configuraciones para identificar plantados remota y electrónicamente (es decir, boyas satelitales con ecosonda) en condiciones reales. También son fundamentales para este trabajo las discusiones con los socios tecnológicos y otras partes interesadas pertinentes sobre la idoneidad de estas tecnologías para ser incorporadas a los sistemas de monitoreo electrónico, así como otros dispositivos (es decir, boyas satelitales, sensores portátiles para observadores), y para mejorar la recolección de datos y la rastreabilidad de los plantados.

3. MÉTODOS

3.1. Evaluación de tecnologías candidatas

Se llevaron a cabo investigaciones bibliográficas (por ejemplo, Mrag, 2017, Benelli y Pozzebon, 2013, FAO, 2018) y consultas con expertos en la materia para recolectar información sobre las tecnologías más adecuadas para poner a prueba en el experimento. Al evaluar las diferentes opciones tecnológicas se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- i. debería desempeñarse eficazmente en cualquier condición ambiental (por ejemplo, buenas condiciones de mar vs. mar agitado, lluvia intensa) y a una distancia razonable (es decir, idealmente a una distancia en la que el buque haya detectado la presencia del plantado o esté preparado para realizar una actividad con él).
- ii. no debería utilizarse para la detección y búsqueda remota/activa de boyas (es decir, no aumenta la capacidad de búsqueda de boyas de los buques);
- iii. debería ser de un precio razonable y no suponer un aumento significativo del costo de producción de las boyas satelitales, los sensores de ME o el equipo de los observadores;
- iv. debería poder transmitir de forma activa (por ejemplo, de forma continua) o pasiva (por ejemplo, cuando se le llama, de forma intermitente), dependiendo de las necesidades de batería y del sistema de comunicación utilizado;
- v. debería ser compatible con una fuente de alimentación eléctrica externa (por ejemplo, paneles solares o las baterías de la boya satelital) y no consumir mucha energía;
- vi. debería ser de tamaño pequeño (es decir, que no implique cambios significativos en los diseños actuales de boyas satelitales y equipo de ME);
- vii. no debería interferir con otros equipos del buque (es decir, que no cree interferencias con los equipos a bordo ni con las estructuras del buque);
- viii. debería ser a prueba de manipulaciones (es decir, fabricado de modo que no se pueda interferir ni modificar) y no rastreable (es decir, que proteja y garantice la privacidad y restrinja el acceso a los datos comerciales de las empresas pesqueras);
- ix. debería ser portátil y fácil de instalar (es decir, para los casos en que se utilicen helicópteros/lanchas para acceder al plantado); y
- x. debería poder fabricarse en masa.

La evaluación preliminar de las tecnologías candidatas se discutió en varias reuniones en las que participaron personal científico de la CIAT y los socios tecnológicos del proyecto, incluidos ingenieros y expertos de Satlink y DOS. En estas reuniones se discutieron el desempeño y las capacidades potenciales de estas tecnologías con base en literatura revisada y la experiencia del equipo, así como los criterios mencionados anteriormente, con el objetivo de preseleccionar la tecnología o configuraciones más adecuadas para su uso en pruebas en el mar.

Como resultado, la única tecnología seleccionada que podía cumplir todos los requisitos en esta etapa era

LoRaWAN (protocolo de comunicación de red de área amplia y de baja potencia que funciona con LoRa, una técnica patentada de radiocomunicación física de "largo alcance")

La tecnología LoRa tiene, entre otras, las siguientes ventajas: es configurable a diferentes intensidades y ganancias, puede transmitir tanto activa como pasivamente y consume muy poca batería (es decir, las pilas pueden durar hasta 10 años). Suele estar compuesta por dos elementos 1) una puerta de enlace o receptor LoRaWAN, que se refiere a la caja o carcasa física que alberga el hardware/receptor (en lo sucesivo, receptor) y el software que realiza tareas esenciales para conectar dispositivos de internet a la nube u otros sistemas de comunicación, y 2) un dispositivo de sensor LoRaWAN (el transmisor, en lo sucesivo, sensor), que envía señales de radiofrecuencia con información detectada (por ejemplo, el ID de la boya del plantado, la ubicación) para que la capte cualquier puerta de enlace/receptor que esté dentro del alcance, que puede pasar esta información a la nube y, en última instancia, a un programa informático o a una app (Figura 1). En el estudio se exploraron dos tipos de receptores (Milesight UG67 y Kerlink, ambos con características similares y configurados del mismo modo para las pruebas) y sensores (Abeeway Compact y los rastreadores GPS Mokosmart LW001) (Figura 2).

Antes de enviar el equipo para las pruebas en el mar, los materiales se manipularon y configuraron en la sede de Satlink en Madrid para cumplir los objetivos del proyecto. Se prepararon dos puertas de enlace y dos sensores, junto con cuatro boyas satelitales, para los experimentos en el mar. Dos sensores se configuraron para que comunicaran automáticamente cada 5 y 10 minutos, mientras que los otros dos se configuraron para que comunicaran solo cuando se les solicitara. La capacidad de detección de la puerta de enlace podía ampliarse con la adición de una antena, por lo que también se dispuso de antenas adicionales para las pruebas.

3.2. Pruebas en el mar de la tecnología seleccionada

Se llevaron a cabo dos pruebas diferentes en distintos lugares. El primero, realizado en un estuario de Galicia (España) en enero de 2024, se diseñó como una prueba exploratoria para tener una idea aproximada de las capacidades de desempeño de la tecnología en el mar y garantizar que el equipo funcionara como se esperaba antes de enviarlo a Panamá. La prueba principal en el mar se realizó en el Laboratorio de Achotines de la CIAT, en Panamá, en marzo de 2024.

3.2.1. Pruebas exploratorias en Galicia

Se utilizaron dos tipos de sensores, junto con un receptor (Milesight UG67) con y sin antena. Un par de ambos tipos de sensores se colocaron en dos boyas satelitales y se anclaron en una ubicación fija. Los sensores enviaron las señales de transmisión de estado y de ubicación al receptor y se registraron las lecturas (exitosas o fallidas) utilizando diferentes distancias y configuraciones (con o sin antena) entre el receptor y los sensores (800, 1,600, 1,900, 2,400 y 3,200 m).

Para las pruebas se utilizó una embarcación artesanal de unos 10 m de eslora total y las condiciones eran despejadas y soleadas.

3.2.2. Pruebas en Achotines

Para las pruebas se utilizaron un receptor Kerlink con y sin antena y dos sensores idénticos Mokosmart LW001. Los sensores se colocaron en boyas satelitales y se anclaron junto a una jaula situada a unos 650 m del muelle de Achotines. Los sensores se configuraron para enviar información sobre el estado y la ubicación (señales de transmisión de GPS) al receptor (Figura 3). Dado que con la configuración actual para las pruebas en el mar el receptor utiliza sistemas basados en la nube para ejecutar comandos que requieren comunicación entre el sensor y el receptor, se utilizó un módem de teléfono celular para proporcionar acceso a internet al sistema, y un inversor de corriente proporcionó corriente alterna de 110 V al equipo desde una batería de corriente continua de 12 V. Las lecturas de GPS y estado se solicitaron y

obtuvieron *in situ* a través de la aplicación para computadora/*smartphone* IQMenic.

Se registraron las lecturas de GPS y estado de los sensores (exitosas o fallidas) utilizando diferentes distancias entre el receptor y los sensores (100, 250, 375, 500, 750, 1,000, y 1,250 m; ver Figura 4) con diferentes configuraciones de antena o sin antena. Las distancias entre el receptor (es decir, el buque) y los sensores se midieron utilizando la aplicación para *smartphones* Gaia GPS (<https://www.gaiagps.com>). Las pruebas se realizaron primero con un receptor sin antena, empezando en 100 m y terminando en 750 m. Las pruebas realizadas con receptor con antena empezaron en 500 m, ya que se supusieron lecturas positivas para alcances inferiores a 500 m.

Para las pruebas se utilizó una panga de 8 metros de eslora total, y el receptor se colocó 2 metros por encima del nivel del agua. Las condiciones meteorológicas eran suaves, con vientos inferiores a 12 nudos y un estado del mar de Beaufort entre 0 y 2, con niveles ocasionales de 3.

3.3. Análisis de los datos

Las probabilidades de comunicación como función de la distancia entre los sensores y el receptor se modelaron utilizando una regresión logística lineal generalizada con una distribución binomial (McCullagh y Nelder, 1989). Se establecieron modelos individuales para diferentes tipos de información proporcionada por los sensores (es decir, estado, ubicación), así como diferentes configuraciones del receptor (es decir, con antena o sin antena). Se comprobaron los diagnósticos de los modelos y se estimaron las métricas de desempeño. Asimismo, se realizaron comparaciones estadísticas entre los modelos para todas las combinaciones de configuraciones de receptor y tipos de datos proporcionados por los sensores.

Todos los análisis estadísticos y visualizaciones se realizaron utilizando el software estadístico gratuito R (R Core Team 2021), así como los paquetes de R "ggplot2" (Wickham, 2016) e "lmtree" (v0.9-40; Zeileis & Hothorn, 2002).

4. RESULTADOS

En las pruebas exploratorias realizadas en el estuario de Galicia, no se recibieron datos de ubicación a 800 m cuando se utilizó el receptor sin antena. En cambio, se recibieron positivamente datos de ubicación hasta unos 1,900 m con un receptor con antena. Sin embargo, el receptor con antena no recibió datos de ubicación a 3,200 m, y se obtuvieron resultados mixtos a 2,400 m (Tabla 1).

Durante los tres días de pruebas en "condiciones reales" en el Laboratorio de Achotines, se realizaron un total de 84 solicitudes de datos al sensor No. 1 (39 para el receptor con antena y 45 para el receptor sin antena); de ellas, 18 lecturas de estado fueron exitosas con el receptor con antena y 35 sin antena, y 8 lecturas de GPS fueron exitosas con el receptor con antena y 28 sin antena. En total, se realizaron 85 solicitudes de datos al sensor No. 2 (39 para el receptor con antena y 46 para el receptor sin antena); de ellas, 22 lecturas de estado fueron exitosas con el receptor con antena y 36 sin antena, y 12 lecturas de GPS fueron exitosas con el receptor con antena y 19 sin antena (Tabla 2).

El modelado de las tasas de detección para las lecturas de estado y GPS de los sensores para el receptor con o sin antena (Figura 5) mostró que se esperan altas probabilidades de detección de estado (>75%) a distancias de 500-550 m y 675-750 m para configuraciones de receptor sin y con antena, respectivamente. Para los datos de ubicación, se observaron altas probabilidades de detección (>75%) a distancias de 100-350 m y 450-500 m para un receptor sin y con antena, respectivamente. De manera similar, el 50% de las tasas de detección de estado se encontraron a distancias de 600-650 m y 775-850 m para el receptor sin antena y con antena, respectivamente, mientras que para los datos de ubicación, las distancias fueron de 300-480 m y 575-650 m para un receptor sin antena y con antena, respectivamente. Por tanto, en general la señal de estado se pudo detectar a distancias mayores con más fiabilidad, en comparación con los datos

de ubicación (es decir, 500-750 m en comparación con 100-500 m). Además, el receptor muestra una mayor capacidad de detección cuando se añade una antena tanto para los datos de estado como para los de ubicación, aumentando en general la capacidad de detección unos 150-300 metros.

En este sentido, las comparaciones entre modelos mediante la prueba de razón de verosimilitud (LRT) mostraron que la adición de una antena al receptor aumenta significativamente el alcance de detección (valores $p < 2.2e-16$) de las lecturas de los sensores, tanto de información de estado como de ubicación de GPS, detectándose las primeras a distancias significativamente mayores que las segundas (valores $p < 2.2e-16$) (Tabla 3).

5. DISCUSIÓN

Varios retrasos, relacionados directa e indirectamente con la pandemia de COVID-19, obstaculizaron el avance del proyecto en las fases iniciales. Interrupciones en la cadena de suministro, escasez de componentes electrónicos y retrasos aduaneros impidieron la adquisición y el envío de las tecnologías necesarias en los plazos previstos, que persistieron durante gran parte de 2021 y 2022. El equipo se adquirió y recibió finalmente en 2023, y tras la elaboración de un manual y un protocolo, así como la realización de una prueba exploratoria en España, el equipo se envió a Achotines a principios de 2024 para iniciar inmediatamente las pruebas.

Las pruebas realizadas en Achotines aportaron datos significativos para evaluar la eficacia de la tecnología LoRaWAN para transmitir señales de radiofrecuencia entre un transmisor (es decir, un sensor) y un receptor dentro de un alcance específico, incluida la posible comunicación entre boyas satelitales y buques cercanos, lo que permite el registro de datos en diversos dispositivos electrónicos, incluyendo equipo de ME u otras tecnologías disponibles en el puente del buque. La tecnología de radiofrecuencia es económica, segura y viable para integrarse fácilmente con el ME u otros sistemas electrónicos de los buques. Desde su aparición hace más de tres décadas, ha dominado el mercado de los sistemas de identificación automática (Xiao *et al.*, 2006). Recientemente, esta tecnología se ha utilizado para sustituir a la tecnología WiFi en sensores conectados a una báscula electrónica de grúa para pesar las capturas durante un estudio piloto en buques de transbordo (Heberer e Itano, 2023). Se espera que el uso de LoRaWAN aumente el ancho de banda y proporcione una comunicación más consistente entre dispositivos a mayores distancias, y que se vea menos afectada por las estructuras de los buques en comparación con los sistemas WiFi probados anteriormente en el estudio.

Los equipos tecnológicos, aunque se fabriquen siguiendo estándares de manufactura, pueden mostrar ligeras diferencias de desempeño entre dispositivos individuales. Por ello, realizar experimentos con dispositivos duplicados mejora la comprensión de la variabilidad del desempeño de las tecnologías, además de proporcionar una idea general de sus capacidades en condiciones reales. Los modelos establecidos para cada sensor, tipo de información y distancia fueron, en general, significativos (ver Figura 5). En particular, solo las lecturas de ubicación de GPS del sensor 2 sin antena mostraron menos consistencia en el modelo (es decir, r -cuadrada = 0.23). Sin embargo, las lecturas de GPS del sensor 1 se ajustaron bien al modelo. Esta disparidad en los resultados podría atribuirse a la variabilidad en la fabricación o el desempeño y a averías. Por ejemplo, mientras que el sensor 2 proporcionó inicialmente un 44% de lecturas de GPS exitosas al receptor sin antena a una distancia de 100 m, más tarde alcanzó un 50% de éxito a una distancia de 500 m en condiciones similares en el mar. Esta variabilidad específica de cada dispositivo debe tenerse en cuenta en el futuro a la hora de implementar esta tecnología a gran escala para garantizar que sea fiable y consistente en el espacio y el tiempo y que cumpla los posibles requisitos de recolección de datos establecidos por las OROP.

Los resultados mostraron diferencias significativas en las distancias de comunicación entre los sensores y las distintas configuraciones de receptor (receptor con y sin antena), y para los distintos tipos de

información proporcionada por los sensores (es decir, la información sobre el estado y la ubicación de GPS). Los receptores con antena son capaces de comunicarse con éxito con los sensores a mayores distancias, en comparación con los receptores sin antena. Del mismo modo, los sensores son capaces de transmitir información sobre el estado a mayores distancias, en comparación con los datos de ubicación de GPS.

En general, los resultados sugirieron altas probabilidades (>75%) de comunicación positiva entre los datos de ubicación de los transmisores (es decir, los sensores) y los receptores con antena dentro de un alcance de hasta 450-500 m (100-350 m para un receptor sin antena), lo que sugiere que esta tecnología podría ser una opción fiable para identificar boyas satelitales desde buques que se acercan a plantados a distancias cortas-medianas. Estos resultados son prometedores, ya que lo ideal es que la comunicación entre dispositivos se produzca a una distancia en la que el buque haya detectado la presencia del plantado o esté preparado para realizar una actividad con él. La mayoría de las veces, cuando un buque interactúa con un plantado es porque i) está monitoreando su trayectoria y conoce su ubicación o ii) se topa con él de forma oportunista cuando navega o busca cardúmenes de atunes o plantados en el mar. En la mayoría de los casos, al identificar y comprobar un plantado antes de realizar un lance sobre él, los buques se acercan al plantado a distancias inferiores a 500 m (a menudo menos de 100 m), donde se explora la biomasa de especies objetivo asociadas. Por lo tanto, las tecnologías que van más allá de 500 m pueden no ser necesarias, o incluso aconsejables, y no incentivarán la búsqueda activa de plantados no monitoreados por el buque. En algunas ocasiones, es posible que el buque envíe una lancha o un helicóptero para realizar una primera exploración del plantado y su biomasa asociada. Por lo tanto, es importante considerar cómo podría implementarse esta tecnología en entornos comerciales, no solo en el puente del buque o en el equipo de ME, sino en otro tipo de vehículos utilizados por la flota para explorar los plantados, como podría ser el caso de las lanchas o los helicópteros. Sin embargo, esto debería considerarse con precaución, ya que la implementación de este tipo de tecnologías en helicópteros puede causar interferencias con los equipos a bordo del helicóptero y, por lo tanto, ocasionar problemas de seguridad. Las estructuras de los buques y otros vehículos pueden afectar la capacidad de comunicación de las tecnologías. Dado que las pruebas se llevaron a cabo con embarcaciones pequeñas no pesqueras con diseños de cubierta sencillos y pocas barreras físicas, las características estructurales de los buques pesqueros industriales también deberán tenerse en cuenta para futuros experimentos y la adaptación de los resultados actuales para fines comerciales.

Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en Achotines son prometedores, pero solo representan las capacidades de las tecnologías en condiciones marítimas favorables. Se sabe que las capacidades de comunicación de las tecnologías disminuyen en condiciones de mar agitado (Benneli y Pozzabon, 2013). La lluvia intensa, los vientos fuertes, etc. pueden afectar la intensidad y el alcance de la señal de radio y reducir la distancia efectiva de comunicación entre el transmisor y el receptor. Lamentablemente, 2023-2024 ha sido un año de El Niño, más seco y caluroso de lo habitual, y hasta finales de abril y principios de mayo, no ha habido lluvias consistentes ni mal tiempo en Achotines. Lo ideal sería que los futuros experimentos pusieran a prueba las capacidades de desempeño de la tecnología en condiciones desfavorables en el mar para comprender mejor todo el espectro de desempeño de la tecnología.

En el futuro, puede preverse una reducción significativa de la dependencia de la conectividad a internet. Inicialmente, la necesidad de conectividad a internet estaba justificada en un proyecto piloto porque el software de gestión accedía a datos almacenados en servidores en la nube. Sin embargo, con los futuros avances tecnológicos, existe la posibilidad de que la información se almacene localmente en los dispositivos. Esto permitiría la transmisión de datos sin necesidad de una conexión activa a internet. Otra opción sería recibir y visualizar la información exclusivamente a nivel local, eliminando la necesidad de acceso remoto a servidores externos. Este método ofrecería mayor autonomía y flexibilidad en la gestión

de los datos a transmitir, reduciendo la dependencia de una infraestructura de conectividad externa.

El compromiso activo, el liderazgo y la retroalimentación de los fabricantes de boyas fueron fundamentales para el éxito del proyecto. Por lo tanto, sigue siendo esencial asegurar una comprensión clara de los objetivos, la metodología y la dinámica del proyecto, así como proporcionar apoyo técnico oportuno durante la fase de desarrollo tecnológico y las pruebas en el mar. Además, los socios tecnológicos desempeñan un papel fundamental a la hora de considerar los próximos pasos y el plan de acción a seguir para el despliegue comercial de esta tecnología en las pesquerías de cerco que, en caso de implementarse, podría informar recomendaciones integrales de recolección de datos a nivel regional. En este sentido, cualquier plan de implementación debería contemplar un calendario razonable, no solo para el desarrollo de estándares internacionales de fabricación, sino también para incorporar los posibles requisitos y necesidades de recolección de datos de las OROP.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El personal de la CIAT colaboró estrechamente con socios tecnológicos para mejorar los métodos de recolección de datos de las pesquerías cerqueras. Con la integración de ME y otros dispositivos electrónicos a bordo, incluyendo tecnologías que permitan la comunicación remota y automática, recolectar datos de las actividades pesqueras podría ser menos difícil. Realizar investigaciones que mejoren la calidad, resolución y disponibilidad de los datos científicos es clave para formular recomendaciones de ordenación basadas en la ciencia para las pesquerías atuneras del OPO.

El personal de la CIAT, el Grupo de Trabajo sobre Plantados y el Comité Científico Asesor (por ejemplo, [FAD-03 INF-A](#), [SAC-11 INF-M](#)) han recomendado reiteradamente el marcado y seguimiento eficaces de los plantados mediante identificadores de plantados/boyas satelitales y métodos apropiados de recolección de datos. La tecnología LoRaWAN, probada en el presente estudio, puede transmitir información de forma fiable entre un transmisor y un receptor a distancias cortas-medianas (500 m) (por ejemplo, identificación de boyas satelitales para buques que se acercan al plantado), resolviendo potencialmente los problemas relacionados con la recolección de datos de observadores, tanto humanos como electrónicos, y con los números de serie de las boyas satelitales. Además, esta prometedora tecnología podría explorarse para utilizarse en diversas necesidades de recolección de datos de pesca, como el uso de balanzas electrónicas para registrar las capturas de atún remota y automáticamente en cerqueros, transbordos u otros sistemas, mejorando la precisión y fiabilidad de los datos.

Tomando en cuenta todos estos elementos, el personal de la CIAT hace las siguientes recomendaciones:

- Considerar la tecnología LoRaWAN para el diseño de sensores que transmitan el número de serie de las boyas de los plantados a receptores ubicados a distancias no superiores a 500 m.
- Considerar la posibilidad de explorar la tecnología LoRaWAN para aplicaciones en otras actividades pesqueras que requieran la recolección remota y automática de datos (por ejemplo, balanzas electrónicas para estimar pesos).

7. REFERENCIAS

- Bennelli, G. and Pozzebon, A. (2013). RFID Under Water: Technical Issues and Applications. Radio Frequency Identification. R. Mamun Bin Ibne. Rijeka, IntechOpen: Ch. 18.
- Cillari, T., A. Allegra, F. Andaloro, M. Gristina, G. Milisenda, and M. Sinopoli. 2018. The use of echo-sounder buoys in Mediterranean sea: a new technological approach for a sustainable FADs fishery. *Ocean Coast Manag.* 152, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.11.018>.
- FAO. 2018. Gilman, E., Bigler, B., Muller, B., Moreno, G., Largacha, E., Hall, M., Poisson, F., Chiang, W., Toole, J., He, P. Stakeholders' Views on Methods to Identify the Ownership and Track the Position of Drifting Fish Aggregating Devices Used by Tuna Purse Seine Fisheries with Reference to the FAO Draft Guidelines on the Marking of Fishing Gear. Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. T631. Rome
- Hall, M., M. Román. (2013). Bycatch and non-tuna catch in the tropical tuna purse seine fisheries of the world. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 568. Rome, FAO. 249 pp. Available online: <http://www.fao.org/docrep/018/i2743e/i2743e00.htm>.
- Heberer, C., and D. Itano. 2023. TNC and Tunago Electronic Monitoring Transshipment Vessel Research Project. Scientific Committee Nineteenth Regular Session, Koror, Palau, 16-24 August. WCPFC-SC19-2023/ST-WP-04. Western and Central Pacific Fisheries Commission. 16 pp.
- IATTC. 2019. Tuna fishery, stocks, and ecosystem in the eastern Pacific Ocean in 2018. IATTC Fisheries Status Report 17. https://www.iattc.org/PDFFiles/FisheryStatusReports/English/No-17-2019_Tuna%20fishery,%20stocks,%20and%20ecosystem%20in%20the%20eastern%20Pacific%20Ocean%20in%202018.pdf.
- Legorburu G., Lekube X., Canive I., Ferré J.G., Delgado H., Moreno G., Restrepo V. 2018. Efficiency of Electronic Monitoring on FAD related activities by supply vessels in the Indian Ocean. ISSF Technical Report 2018-03.
- Lennert-Cody, C. E., and M. A. Hall. 1999. The development of the purse seine fishery on drifting fish aggregating devices in the eastern Pacific Ocean: 1992-1998. In *Pêche thonière et dispositifs de concentration de poissons*, Ed. by J.-Y Le Gall, P. Cayré, and M. Taquet. Colloque Caraïbe-Martinique, Trois-îlets, 15–19 Octobre 1999.
- Lopez, J., G. Moreno, I. Sancristobal, and J. Murua. 2014. Evolution and current state of the technology of echo-sounder buoys used by Spanish tropical tuna purse seiners in the Atlantic, Indian and Pacific Oceans. *Fish.Res.* 155:127–137.
- Lopez, J., G. Moreno, G. Boyra, L. Dagorn. 2016. A model based on data from echosounder buoys to estimate biomass of fish species associated with fish aggregating devices. *Fishery Bulletin*, 114: 166–178.
- Maufroy, A., E. Chassot, R. Joo, and D. M. Kaplan. 2015. Large-scale examination of spatio-temporal patterns of drifting fish aggregating devices (dFADs) from tropical tuna fisheries of the Indian and Atlantic Oceans. *PLoS One*, 10: e0128023.
- McCullagh, P., & Nelder, J. A. (1989). *Generalized linear models (Monographs on Statistics and Applied Probability 37)*. CRC press.
- MRAG (2017). *Monitoring of FADs Deployed and Encountered in the WCPO, Final Report*.
- R Core Team (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

- Sinopoli, M., T. Cillari, F. Andaloro, C. Berti, P. Consoli, F. Galgani, and T. Romeo. 2020. Are FADs a significant source of marine litter? Assessment of released debris and mitigation strategy in the Mediterranean Sea. *J. Environ. Manag.* (2020), 253, 8pp. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109749>.
- Watters, G (1999). Geographical distributions of effort and catches of tunas by purse-seine vessels in the Eastern Pacific Ocean during 1965-1998. Inter-American Tropical Tuna Commission, Data Report 10. URL https://www.iattc.org/GetAttachment/661713af-9fcb-49a5-8458-e04f877a1bec/No-10-1999-WATTERS,-GEORGE-M_Geographical-distributions-of-effort-and-catches-of-tunas-by-purse-seine-vessels-in-the-eastern-Pacific-Ocean-during-1965-1998.pdf
- Wickham H (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4, <https://ggplot2.tidyverse.org>.
- Xiao, Y., S. Yu, K. Wu, Q. Ni, C. Jenecek, and J. Nordstad. 2006. Radio frequency identification: technologies, applications, and research issues. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2007 May;7(4):457-72. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wcm.365>.
- Zeileis, A., & Hothorn, T. (2002). Diagnostic Checking in Regression Relationships. In *R News* (Vol. 2, Issue 3, pp. 7–10). <https://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/>.

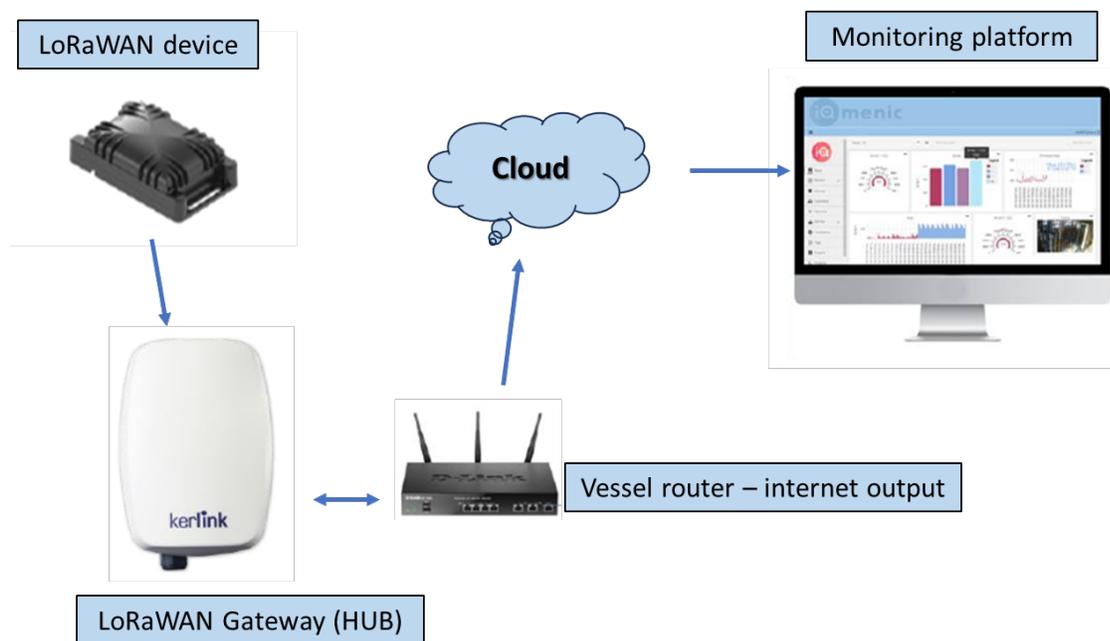


FIGURE 1. Architecture of the LoRaWAN technology.
FIGURA 1. Arquitectura de la tecnología LoRaWAN.



FIGURE 2. Equipment setup for the trials made in Galicia-Spain, with the HUB with antenna (left panel) and the sensors over the satellite buoys (right panel).
FIGURA 2. Configuración del equipo para las pruebas realizadas en Galicia, España, con el receptor con antena (panel izquierdo) y los sensores en las boyas satelitales (panel derecho).



FIGURE 3. Equipment setup for the trials made in the Achotines lab, with the electrical and internet set up (left panel), hub (i.e., receiver) with the antenna (central panel) and the sensors (i.e., trackers, transmitters) on the satellite buoys (right panel).

FIGURA 3. Configuración del equipo para las pruebas realizadas en el Laboratorio de Achotines, con la configuración eléctrica y de internet (panel izquierdo), el receptor con antena (panel central) y los sensores (es decir, rastreadores, transmisores) en las boyas satelitales (panel derecho).



FIGURE 4. Tracks of the trials at the Achotines lab. Added, for reference, the distances tested during the at sea trials.

FIGURA 4. Trayectos de las pruebas en el Laboratorio de Achotines. Se incluyen las distancias probadas durante las pruebas en el mar como referencia.

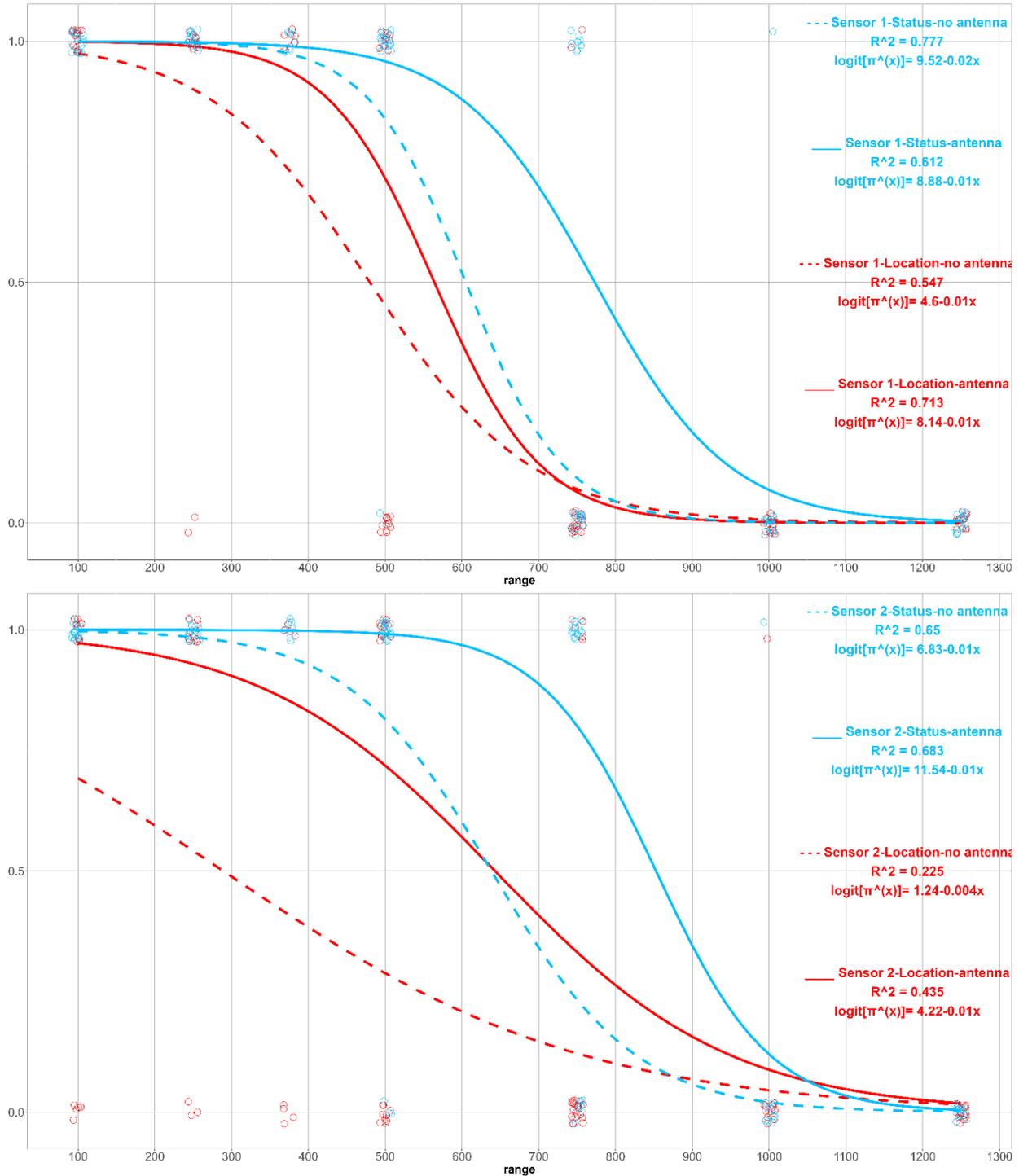


FIGURE 5. Statistical results of the status and GPS location communication between the sensors and hub with and without antenna during the trials at the Achotines lab (sensor 1, upper panel; sensor 2, lower panel).

FIGURA 5. Resultados estadísticos de la comunicación de estado y ubicación de GPS entre los sensores y el receptor con y sin antena durante las pruebas en el Laboratorio de Achotines (sensor 1, panel superior; sensor 2, panel inferior).

TABLE 1. Summary of the data collected during the trials in Galicia-Spain.

TABLA 1. Resumen de los datos recolectados durante las pruebas en Galicia, España.

| Receptor con antena | Alcance (m) | Fecha | Hora de llamada del sensor | Lecturas de GPS exitosas del sensor | Hora del sensor GPS |
|---------------------|-------------|-----------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| No | 800 | 1/19/2024 | 16:01 | 0 | |
| No | 800 | 1/19/2024 | 16:21 | 0 | |
| Yes | 800 | 1/19/2024 | 16:31 | 1 | 16:41 |
| Yes | 1600 | 1/19/2024 | 16:41 | 1 | 16:51 |
| Yes | 1900 | 1/19/2024 | 16:31 | 1 | 16:41 |
| Yes | 2400 | 1/19/2024 | 17:11 | 0 | |
| Yes | 2400 | 1/19/2024 | 17:21 | 1 | 17:31 |
| Yes | 3200 | 1/19/2024 | 16:51 | 0 | |
| Yes | 3200 | 1/19/2024 | 17:01 | 0 | |

TABLE 2. Summary of the data collected during the trials in the Achotines lab.

TABLA 2. Resumen de los datos recolectados durante las pruebas en el Laboratorio de Achotines.

| Alcance (m) | Receptor con antena | Sensor 1 Llamadas | Sensor 1 Lecturas de estado exitosas | Sensor 1 Lecturas de GPS exitosas | Sensor 2 Llamadas | Sensor 2 Lecturas de estado exitosas | Sensor 2 Lecturas de GPS exitosas |
|-------------|---------------------|-------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 100 | No | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 |
| 250 | No | 8 | 8 | 6 | 8 | 8 | 5 |
| 375 | No | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 4 |
| 500 | No | 10 | 8 | 3 | 10 | 7 | 5 |
| 500 | Sí | 10 | 10 | 7 | 10 | 10 | 6 |
| 750 | No | 9 | 1 | 1 | 10 | 3 | 0 |
| 750 | Sí | 14 | 7 | 1 | 14 | 11 | 5 |
| 1000 | Sí | 7 | 1 | 0 | 7 | 1 | 1 |
| 1250 | Sí | 8 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 |

TABLE 3. Diagnostics of model comparisons.

TABLA 3. Diagnóstico de comparaciones de modelos.

| Sensor | Antena | Lectura | #Df | Log-Lik | Df | Chisq | Pr(>Chisq) |
|--------|--------|-----------|-----|---------|----|-------|---------------|
| 1 | Sí | Ubicación | 2 | -9.93 | 0 | 15.89 | < 2.2e-16 *** |
| | No | | 2 | -17.88 | | | |
| 2 | Sí | Ubicación | 2 | -20.35 | 0 | 16.12 | < 2.2e-16 *** |
| | No | | 2 | -28.41 | | | |
| 1 | Sí | Estado | 2 | -13.43 | 0 | 9.91 | < 2.2e-16 *** |
| | No | | 2 | -8.47 | | | |
| 2 | Sí | Estado | 2 | -10.3 | 0 | 6.35 | < 2.2e-16 *** |
| | No | | 2 | -13.47 | | | |
| 1 | Sí | Estado | 2 | -13.43 | 0 | 6.99 | < 2.2e-16 *** |
| | | Ubicación | 2 | -9.93 | | | |
| 1 | No | Estado | 2 | -8.47 | 0 | 18.81 | < 2.2e-16 *** |
| | | Ubicación | 2 | -17.88 | | | |
| 2 | Sí | Estado | 2 | -10.3 | 0 | 20.11 | < 2.2e-16 *** |
| | | Ubicación | 2 | -20.35 | | | |
| 2 | No | Estado | 2 | -13.47 | 0 | 29.88 | < 2.2e-16 *** |
| | | Ubicación | 2 | -28.41 | | | |