

Evaluación de los arrecifes coralinos del noroeste de la Isla de Providencia, mediante el uso de datos batimétricos: una herramienta para su Identificación y seguimiento

Harold Rojas Macías

Gabriel Ignacio Antolinez Gómez

Asesor

Fanny Matilde Pinzón Candelario

Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)

Escuela Ciencias de la Educación (ECAPMA)

Pregrado en Ingeniería Ambiental

2023

Resumen analítico especializado (RAE)	
Título	Evaluación de los arrecifes coralinos del noroeste de la Isla de Providencia, mediante el uso de datos batimétricos: una herramienta para su identificación y seguimiento.
Modalidad de Trabajo de grado	Proyecto aplicado
Línea de investigación	Gestión y manejo ambiental
Autores	Harold Rojas Macías – Código: 7721574 Gabriel Ignacio Antolinez Gómez – Código: 1140838650
Institución	Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD
Fecha	24 de abril de 2021
Palabras claves	Hidrografía, Arrecife, Retrodispersión, Haces, Batimetría, transductores, Mosaico, Multihaz.
Descripción	<p>El presente proyecto busca identificar los arrecifes coralinos en el noroeste de la Isla de Providencia, mediante el uso de datos batimétricos y retrodispersión como técnica adicional, que, dependiendo la intensidad del retorno de la onda acústica, se pueda caracterizar de forma superficial el fondo marino y determinar qué áreas corresponden a suelo duro o blando.</p> <p>Se recolectaron datos batimétricos y de retrodispersión en el canal navegable de acceso al puerto de la Isla Providencia y se procesaron para crear mapas detallados del fondo marino.</p> <p>Se utilizaron algoritmos de aprendizaje automático para analizar los datos y detectar características específicas que indiquen la presencia de arrecifes coralinos.</p> <p>Los resultados del proyecto podrían ser utilizados para la conservación y gestión de los arrecifes coralinos en la zona de estudio.</p>
Fuentes	<p>Para el desarrollo de la investigación se utilizaron las siguientes fuentes principales, porque tratan los temas bases para el desarrollo del proyecto, como lo son el uso de datos hidrográficos multihaz para generar backscatter, la metodología y la importancia de aportar a la conservación de los arrecifes coralinos.</p> <p>Primarias:</p> <p>Datos batimétricos colectados, revisados, procesados y analizados por fuerza propia.</p> <p>Secundarias:</p>

	<p>Rodrigo, C. (2006). Caracterización y clasificación de la bahía de Puerto Montt mediante batimetría de multihaz y datos de backscatter. <i>Investigaciones Marinas</i>. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-71782006000100007&script=sci_arttext&lng=pt</p> <p>Brown, C. y P. Blondel. (2009). The application of underwater acoustics to seabed habitat mapping. <i>Applied Acoustics</i>, 10, 1241. doi:https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2008.09.006</p> <p>Geister, J. y J. Díaz. (2007). <i>Ambientes arrecifales y geología de un archipiélago oceánico: San Andrés, Providencia y Santa Catalina (mar Caribe, Colombia) con guía de campo</i>. Ingeominas. Obtenido de https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadadas/Documents/AmbGeolArch-SAnd-Prov-SCat-.pdf</p> <p>Monroy Silvera J., Alvarado C. y G. Gutierrez. (2016). Aproximación a una metodología para la generación de productos de backscatter con la infraestructura tecnológica del Servicio Hidrográfico Nacional (SHN-CIOH). <i>Bol. Cient. CIOH</i>, (34), 65-76. https://doi.org/10.26640/22159045.427</p> <p>Zieger, S. (2007). <i>Biotic Classification of Multibeam Sonar Data of a Coral Reef in the Great Barrier Reef, Australia</i>. Tesis de grado. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Stefan_Zieger/publication/351048724_Biotic_Classification_of_Multibeam_Sonar_Data_of_a_Coral_Reef_in_the_Great_Barrier_Reef_Australia/links/60810fec881fa114b41b87de/Biotic-Classification-of-Multibeam-Sonar-Data-of-a-Co</p>
<p>Contenidos</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Introducción 2. Justificación 3. Planteamiento del problema 4. Objetivos 5. Hipótesis 6. Marco de referencia 7. Metodología 8. Resultados y discusión 9. Conclusiones 10. Bibliografía
<p>Metodología</p>	<p>Se identifica el área de estudio, luego procedemos a elaborar el diseño metodológico que teniendo en cuenta que no se cuenta como mucha información científica del área de estudio referente a identificación de corales con sistemas batimétricos multihaz, nuestra investigación es de carácter exploratoria (Hernández <i>et al.</i>, 2014) .porque vamos a identificar de forma precisa los arrecifes coralinos.</p> <p>Luego se definen el nivel de investigación, método de investigación y el diseño de investigación en donde acuerdo la bibliografía se tuvieron en</p>

	<p>cuenta las recomendaciones metodológicas aplicables en este tipo de investigación, enfocando el método científico y refiriendo el tipo de estudio que mejor describiera el proceso necesario en la adquisición de los resultados.</p> <p>Para el diseño de muestreo se establece una ficha de datos generales para hacer el control de calidad y seguimiento de la recolección de datos de campo, que mediante dos días de trabajo en campo, se planea navegar sobre 92 líneas de muestreo en el canal navegable de acceso al puerto de la isla Providencia, se van a guardar datos brutos y posteriormente procesar en tierra, por lo tanto nuestra investigación va a ser cuantitativa para conocer cuanta área corresponde a coral (área y porcentaje) y vamos a trabajar datos cualitativos de ausencia y presencia de arrecifes en un Área de estudio de 1.124.433,92 metros cuadrados (1,12 kilómetros cuadrados).</p> <p>Luego se ponen en funcionamiento los procedimientos establecidos por la organización hidrográfica internacional para la generación de productos finales que nos lleven a la Identificación y evaluación de los arrecifes coralinos en la isla de Providencia, mediante el uso de batimetría multihaz y retrodispersión, para aportar considerablemente en su conservación y seguimiento.</p>
<p>Conclusiones</p>	<p>Los datos batimétricos recolectados en el sector noroccidental de Isla Providencia y su respectivo procesamiento nos permiten caracterizar zonas coralinas en menor tiempo, con menor esfuerzo y con mayor precisión, que no sería posible identificar con otros tipos de herramientas.</p> <p>A partir de los mapas generados se lograron identificar geoformas asociadas a arrecifes coralino en la zona central del levantamiento y en la parte norte, demostrando la efectividad y eficiencia a la hora de identificar formaciones coralinas en el área de estudio.</p>
<p>Referencias Bibliográficas</p>	<p>Brown, C. y P. Blondel. (2009). The application of underwater acoustics to seabed habitat mapping. <i>Applied Acoustics</i>, 10, 1241.</p> <p>Costa, B., Battista, T., & Pittman, S. (2009). Comparative evaluation of airborne LiDAR and ship-based multibeam SoNAR bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystems. <i>Remote Sensing of Environment</i>, 113, 1082-1100.</p> <p>Darnell, P. y J. Gardner. (2004). Predicting Seafloor Facies from Multibeam Bathymetry and Backscatter Data. <i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>, 11, 1081-1091.</p> <p>DIMAR. (2019). capítulo J - Isla de Providencia y Santa Catalina. En DIMAR, <i>Derrotero de las costas y áreas insulares del Caribe y Pacífico Colombianos</i> (págs. J-1, J-30). DIMAR.</p> <p>El-Gharabawy, S., El-Wahab, M.A. y A. Hamouda. (2017). Seafloor Characterization and Backscatter Variability of Coral Reef by Different</p>

	<p>Acoustic Techniques, El-Gouna, Red Sea, Egypt. <i>Journal of Oceanography and Marine Research</i>, 5(3).</p> <p>Geister, J. y J. Díaz. (2007). <i>Ambientes arrecifales y geología de un archipiélago oceánico: San Andrés, Providencia y Santa Catalina (mar Caribe, Colombia) con guía de campo</i>. Ingeominas.</p> <p>Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C. y Baptista-Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación - sexta edición.</p> <p>icoclinicayaplicadas/files/2013/06/Metodolog%C3%ADa-de-la-Investigaci%C3%B3n.pdf</p> <p>INVEMAR. (2016). <i>Atlas de la Reserva de Biósfera Seaflower Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina</i>.</p> <p>Monroy Silvera J., Alvarado C. y G. Gutierrez. (2016). Aproximación a una metodología para la generación de productos de backscatter con la infraestructura tecnológica del Servicio Hidrográfico Nacional (SHN-CIOH). <i>Bol. Cient. CIOH</i>, (34), 65-76.</p> <p>Rodrigo, C. (2006). Caracterización y clasificación de la bahía de Puerto Montt mediante batimetría de multihaz y datos de backscatter. <i>Investigaciones Marinas</i>.</p> <p>Zieger, S. (2007). <i>Biotic Classification of Multibeam Sonar Data of a Coral Reef in the Great Barrier Reef, Australia</i>. Tesis de grado. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Stefan_Zieger/publication/351048724_Biotic_Classification_of_Multibeam_Sonar_Data_of_a_Coral_Reef_in_the_Great_Barrier_Reef_Australia/links/60810fec881fa114b41b87de/Biotic-Classification-of-Multibeam-Sonar-Data-of-a-Co</p>
--	---

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a: Dios nuestro Señor, porque gracias a él estamos aquí con vida, salud y este proyecto se ha hecho realidad. Nuestras familias, por su apoyo incondicional en todas las fases del proceso académico. A la señora Tutora Fanny Matilde Pinzón Candelario asesora metodológica, por su constante apoyo y su orientación para que el presente proyecto se hiciera realidad. De forma especial al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, por el apoyo prestado en cuanto a recursos y equipos, para la adquisición de la información y su uso para el presente proyecto.

Tabla de Contenido

Introducción.....	13
Justificación.....	16
Planteamiento del problema	18
Pregunta de investigación.....	20
Objetivos	21
Objetivo General.....	21
Objetivos específicos	21
Hipótesis	22
Marco de Referencia.....	23
Antecedentes	23
Marco Legal.....	26
Marco Conceptual.....	29
Arrecifes de Coral.....	29
Arrecifes de Coral en el Caribe Colombiano	32
Acústica Marina y Ecosondas Multihaz.....	34
Retrodispersión Acústica o Backscatter.....	37
Clasificación de Ecosistemas.....	38
Metodología.....	40
Área de Estudio.....	40
El diseño metodológico.....	40
Nivel de Investigación	42
Diseño de Investigación	43
Método de Investigación	43
Diseño de muestreo.....	44
Recolección de Datos en Campo.....	45
Procesamiento de Datos.....	47
Resultados y Discusión.....	49
Descripción del área de estudio.....	49
Oceanografía.....	50
Sistemas Atmosféricos Influyentes.....	51
Climatología: Temperatura y Precipitación	53

Hidrografía	54
Reconocimiento de geoformas	57
Generación del modelo digital del terreno con datos de retrodispersión.	59
Análisis del mapa batimétrico.....	64
Conclusiones	68
Bibliografía	69

Listado de Tablas

Tabla 1. Resumen de la evaluación del ICT en 2016 para los ecosistemas coralinos de Colombia (INVEMAR, 2016).	33
Tabla 2. Especificaciones técnicas de la ecosonda multihaz Kongsberg EM2040P empleada en este estudio.	46
Tabla 3. Datos resultantes de la relación entre intensidad acústica (Backscatter) y el Ángulo de incidencia. Fuente: propia.	62

Listado de Figuras

Figura 1 Esquema general de la anatomía de un pólipo. 1. Mesenterio, 2. Filamentos mesentéricos, 3. Tentáculos, 4. Disco oral, 5. Peristoma, 6. Estomodeo y 7. Esqueleto	31
Figura 2 Diagrama ilustrativo de los diferentes tipos de datos acústicos que pueden ser obtenidos con ecosonda multihaz	36
Figura 3 Ubicación geográfica de la Isla Providencia	40
Figura 4 Mapa Líneas de recolección para recolección de datos	42
Figura 5 Ficha de datos generales	45
Figura 6 Embarcación tipo soundermax con ecosonda Kongsberg EM2040P	47
Figura 7 Altura y dirección del Oleaje	51
Figura 8 Temperatura ambiente Isla de Providencia, promedios multianuales 1981-2010 IDEAM. Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales	53
Figura 9 Precipitación acumulada Providencia, Promedios multianuales 1981-2021 IDEAM ...	54
Figura 10 Ficha de datos generales No. 1	55
Figura 11 Ficha de datos generales No. 2	56
Figura 12 Mapa superficie batimétrica.....	58
Figura 13 Relación entre intensidad acústica de Backscatter y ángulo de incidencia, según el tipo de fondo	59
Figura 14 Mapa de retrodispersión acústica (Intensidades acústicas).....	60
Figura 15 Mapa de pendientes (Ángulos de incidencia)	61
Figura 16 Distribución de intensidades acústicas acuerdo el tipo de fondo en el software Caris Hips and Sips.....	63
Figura 17 Mosaico de caracterización de tipo de fondo marino	65
Figura 18 Verificación de arrecifes coralinos con Buzos.....	66

Consideraciones generales

El trabajo desarrollado y expuesto en el presente documento, busca aportar información útil en la toma de decisiones para el manejo y gestión de áreas con presencia de arrecifes coralinos, además, de servir como línea base para nuevos estudios y constituir un apoyo bibliográfico para los especialistas en ciencias marinas, sociales y humanísticas, al servicio de la nación y de todo el gremio investigativo.

Gracias al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de Caribe (CIOH), a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) y al esfuerzo propio, se lograron los objetivos planteados.

Línea de investigación

El presente proyecto de investigación se enmarca en la línea de investigación denominada “Gestión y manejo ambiental”, dado que con su realización se pretende brindar una herramienta técnica para precisar y mejorar la gestión de ecosistemas estratégicos, y de esta forma, contribuir en la solución de problemas ambientales de escala local y regional.

Introducción

Los ecosistemas marinos y costeros son el motor de desarrollo y sustento para la supervivencia de las comunidades de diversos países del mundo, debido a que mantienen y conservan el equilibrio biodinámico de la cadena alimentaria (Rojas-Higuera y Pabón-Caicedo, 2015; Portz *et al.*, 2022).

Colombia cuenta con una posición marítima privilegiada con jurisdicción sobre el océano Pacífico y el Mar Caribe, constituyendo un área marina que ocupa aproximadamente el 50 % de su territorio, abarcando 13 de los 32 departamentos del país. Esta área incluye una gran variedad de ecosistemas marinos y costeros como manglares, arrecifes de coral, pastos marinos, entre otros, de los cuales dependen importantes actividades económicas para el país (INVEMAR, 2020).

Los bienes y servicios que ofrecen estos ecosistemas representan activos estratégicos de gran importancia, generando no solo en Colombia, sino también a nivel mundial, el desplazamiento masivo de las poblaciones humanas hacia las zonas costeras, ocasionando conflictos ambientales, afectaciones a los ecosistemas y procesos de degradación y erosión de las costas, producto del desarrollo no planificado de actividades portuarias, la pesca, el turismo, el cambio climático, la exploración de hidrocarburos, el crecimiento de la población, la introducción de especies invasoras y en general el desarrollo urbano sobre dichas zonas (Guarderas *et al.*, 2008; Departamento Nacional de Planeación-DNP, 2014; Díaz, 2015).

En consecuencia, durante las últimas décadas las necesidades de planificación y gestión de los espacios oceánicos y zonas costeras e insulares del país ha aumentado. Por tal motivo, se han diseñado instrumentos de gestión ambiental que aportan a los planes de desarrollo, ordenamiento territorial y gestión ambiental a nivel nacional, departamental y

municipal, entre los que se incluyen políticas ambientales y determinación de Áreas Marinas Protegidas (INVEMAR, 2020).

Estos instrumentos deben contar con datos e información actualizada, con el objetivo de definir una línea base que permita dar seguimiento de la evolución de los recursos biológicos y garantizar el buen funcionamiento de estos ecosistemas. Sin embargo, estos estudios pueden tomar muchísimo tiempo (hasta 40 años), sin contar los altos presupuestos, de manera que en los últimos años se han diseñado unas alternativas para afrontar estos inconvenientes, a través de los Protocolos de Evaluación Rápida (*Rapid Assessment Protocols* - RAPs).

Estos RAPs han surgido como herramientas para optimizar al máximo los datos obtenidos en campo y suministrar información útil para las entidades y autoridades encargadas de la toma de decisiones relacionadas con la creación de instrumentos de gestión ambiental (Reuss Strenzel, 2004).

Uno de los instrumentos usados para la toma de información durante la aplicación de los RAPs, son los sensores remotos acústicos, ampliamente utilizados en la investigación científica marina como métodos de exploración (Andrade-Amaya, 2021).

Dentro de estos sensores se encuentran las ecosondas, que fueron inventadas a principios del siglo XX con aplicaciones militares, no obstante, en las últimas décadas, las capacidades de estos dispositivos han mejorado notablemente tras el desarrollo de ecosondas multihaz que no solo miden la profundidad del agua, sino que permiten estudiar los fondos marinos con diferentes niveles de detalle sobre ciertos atributos (Monroy Silvera *et al.*, 2016). La ventaja de los ecosondas multihaz sobre la anterior generación de ecosondas monohaz radica en una mayor cobertura, de tal forma que con el mismo patrón de navegación se puede cubrir la totalidad del fondo marino (Andrade-Amaya, 2021).

Estos ecosondas permiten mediante el post-proceso digital, realizar cartografía submarina, obtener información sobre los tipos de sustrato marino y generar mapas geomorfológicos y batimétricos (Kenny *et al.*, 2003).

Gracias a los múltiples usos que tienen estas ecosondas multihaz y el potencial que tienen para aplicar los RAPs, desde el Servicio Hidrográfico Nacional colombiano (SHN) se han adquirido estos equipos para la visualización del fondo del mar con mayor precisión y resolución, incrementando así la exactitud del reconocimiento del paisaje submarino y actualmente a nivel nacional se puede contar con información de datos multihaz en gran parte del país (Andrade-Amaya, 2021).

Por lo anterior, para este estudio se ha tomado información recolectada por un ecosonda multihaz en el sector noroeste de la Isla de Providencia, ubicado en el Caribe colombiano, como RAPs para identificar los arrecifes coralinos a partir de estos datos batimétricos, como herramienta para su evaluación y seguimiento.

Este documento se encuentra organizado en tres bloques de información. En el primero el lector podrá comprender del tema de acústica marina y ecosistemas coralinos; en el segundo, encontrará todas las consideraciones metodológicas y en el tercero, conocerá los resultados de la aplicación de los fundamentos teóricos y la comparación de la información obtenida en este estudio con diferentes fuentes bibliográficas.

Justificación

Las áreas costeras son consideradas unos de los hábitats más importantes del mundo debido a que generan más de la mitad de la biomasa marina. Según Reuss Strenzel (2004), se cree que casi toda la pesca global se lleva a cabo a menos de 320 kilómetros de la costa. Además, esta zona también alberga a más de la mitad de la población mundial con 13 de las 15 ciudades más grandes del mundo ubicadas sobre la costa o cerca de ella (Reuss Strenzel, 2004). Los efectos de esta densidad poblacional incluyen la desaparición de los ecosistemas, la erosión costera, la sobrepesca, la contaminación marina y una elevada vulnerabilidad a los desastres marinos (Brown y Blondel, 2009).

Uno de los ecosistemas estratégicos de la zona costera es el arrecife de coral, que representa la construcción biológica más grande del planeta y se caracteriza por una enorme diversidad y abundancia de especies, así como una vasta complejidad estructural y ecológica (Zieger, 2007; Zieger *et al.*, 2009). Este ecosistema constituye alrededor del 0,012% de la superficie de los océanos y en ellos habitan cerca de la mitad de las especies de hábitos bentónicos conocidas (Reuss Strenzel, 2004).

Según Stachowitsch (2003), alrededor del 58% de los arrecifes de coral a nivel mundial están en peligro debido a su elevada vulnerabilidad a las perturbaciones ambientales que se originan en las plataformas continentales e insulares circundantes.

Actividades tanto directas como indirectas, como el turismo descontrolado, el buceo, las prácticas pesqueras insostenibles, la eutrofización y la sedimentación excesiva, son causantes de transformaciones significativas en las especies dominantes de los arrecifes, tal y como señalan Jackson (1997) y Barker y Roberts (en prensa). Sumado a esto, la aceleración del cambio climático ha facilitado la expansión de fenómenos como el blanqueamiento masivo de corales con mortalidades de hasta un 80% en áreas específicas (Reuss Strenzel, 2004).

Las áreas coralinas del territorio colombiano no son ajenas a esta problemática, como es el caso del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, ubicado dentro de la Reserva de la Biosfera SEAFLOWER, Área Marina Protegida más grande en el Mar Caribe.

Los arrecifes de esta zona brindan una serie de servicios ecosistémicos que incluye peces de alto valor comercial, la protección costera contra la erosión, tormentas y huracanes, provisión de alimentos, mitigación del cambio climático, formación del suelo y es un sitio de alto interés turístico, entre otros (Prato y Newball, 2015).

En consecuencia, estas áreas han experimentado un desarrollo costero incontrolado, así como un elevado flujo de turistas que han afectado numerosas estructuras arrecifales, lo que ha generado la necesidad de nuevas estrategias para el manejo espacial de este ecosistema (Brown y Blondel, 2009; Ariza y Ramírez, 2014; Comisión Colombiana del Océano-CCO, 2015).

En este sentido es importante contar con información que permite diseñar estrategias de muestreo, zonificación y delimitación de áreas marinas destinadas a la protección, para lo cual se debe entender y predecir la distribución espacial de estos recursos y detectar cambios ambientales (Costa *et al.*, 2009).

Por lo anterior, este estudio proporciona un conocimiento preciso y completo de la profundidad y morfología de los fondos marinos de Isla de Providencia, información que a futuro se espera, sea clave para la identificación, protección y recuperación de los arrecifes de coral de todo el Archipiélago.

Planteamiento del problema

Convencionalmente, los tipos de fondo marino se determinan por análisis granulométrico y la distribución espacial se define por interpolación o extrapolación entre muestras. Sin embargo, una distribución detallada de los tipos de fondo es difícil de lograr debido a que generalmente se recolectan bajas cantidades de muestras para describir adecuadamente la variabilidad de los fondos superficiales (Darnell y Gardner, 2004).

En relación con los arrecifes de coral, se admite que la identificación y medición requieren de herramientas más sofisticadas, tales como las ecosondas combinadas con programas de análisis de información. Esto se debe a que la escala de detalle necesaria para describir el hábitat de este tipo de ecosistema es a nivel de complejos arrecifales, en lugar de simplemente diferenciar entre distintos tipos de arrecifes como es usual (Fossa *et al.*, 2005; Zieger *et al.*, 2009).

Debido a esto, los avances tecnológicos recientes en el campo de la ecosonda multihaz, han brindado una herramienta de cartografía que está empezando a sustituir los métodos convencionales, así como otros sistemas de levantamiento acústico (S. Zieger, 2009).

Ahora es posible producir imágenes del lecho marino de alta resolución y mapear rápidamente en tiempo real la morfología de los arrecifes de coral (Fossa *et al.*, 2005; Zieger *et al.*, 2009). Específicamente, con los datos de backscatter proporcionados por un sistema de sonar multihaz, con el cual se puede estimar en detalle la calidad en un área dada y construir un mapa de su distribución espacial (Rodrigo, 2006). No obstante, la disponibilidad de información de este tipo es limitada en los mares territoriales colombianos (Ver Sección 0 Antecedes).

Adicionalmente, el aumento de las presiones antropogénicas sobre el medio ambiente marino, y la pérdida de cobertura y biodiversidad de los arrecifes coralinos intensifican la

necesidad de implementar nuevas metodologías para el mapeo de estos sistemas tanto para inventariar nuestros recursos como para brindar apoyo a iniciativas de gestión (Brown y Blondel, 2009).

En este sentido, con la realización de este proyecto se busca aminorar el vacío de información de alta resolución y actualizada de los ecosistemas coralinos de la Isla de Providencia, donde se encuentran los arrecifes de coral más extensos y desarrollados del país (INVEMAR, 2016).

Pregunta de investigación

¿Qué geoformas del fondo marino se asocian con arrecifes coralinos de acuerdo con los datos batimétricos obtenidos en el noreste de Isla Providencia, Colombia?

Objetivos

Objetivo General

Evaluar los arrecifes coralinos del noroeste de la Isla de Providencia a partir del uso de datos batimétricos, como herramienta para su evaluación y seguimiento.

Objetivos específicos

Identificar las geoformas del fondo marino usando datos batimétricos en tres dimensiones para determinar las posibles áreas coralinas en el noroeste de Isla de Providencia.

Generar un modelo digital del terreno con datos de retrodispersión (Backscatter) en la zona levantada donde se pueda evidenciar la solidez del sustrato.

Analizar un mapa cartográfico de las zonas coralinas en el noroeste de Isla Providencia con base en los datos batimétricos.

Hipótesis

Los arrecifes coralinos de la Isla Providencia en la zona insular de Colombia se pueden identificar y graficar de forma precisa mediante el uso de datos batimétricos, para su evaluación y seguimiento.

Marco de Referencia

Antecedentes

Las técnicas hidroacústicas han estado disponibles para la comunidad científica desde finales de los años setenta (Reuss-Strenzel, 2004; Rodrigo, 2006). El primer sistema operativo fue desarrollado para la Marina de los EE. UU. en 1964 y más de una década después en 1977, se presentó la primera versión desclasificada para estudios científicos geomorfológicos submarinos en aguas profundas con una cobertura angular bastante modesta y operando con solo 16 haces a frecuencias entre 12 y 30 kHz (Colbo *et al.*, 2014; Hughes-Clarke, 2018).

El primer multihaz para aguas realmente poco profundas (500–1000 kHz) se desarrolló en 1984 como soporte para el montaje de infraestructuras de petróleo y gas en alta mar (Hughes-Clarke, 2018); sin embargo, la navegación y la seguridad de la vida humana en el mar impulsaron su desarrollo (Colbo *et al.*, 2014).

Desde entonces, estos sistemas de menor alcance se han adaptado cada vez más para definir la geomorfología submarina costera y de plataforma, por lo que los sistemas modernos ahora cuentan con una cobertura angular mucho mayor (típicamente 120-150°) y forman cientos de haces (Colbo *et al.*, 2014; Hughes-Clarke, 2018).

Diferentes tipos de flotas han adoptado progresivamente los sistemas multihaz montados en el casco como herramienta estándar y gracias al desarrollo de equipos electrónicos y programas de postproceso, se ha perfeccionado el control de la señal acústica posibilitando la obtención de imágenes del fondo del mar con calidad casi fotográfica, produciendo un aumento de los levantamientos de aguas costeras para satisfacer objetivos tanto hidrográficos como ingenieriles (Reuss Strenzel, 2004; Rodrigo, 2006).

Particularmente, el análisis detallado de las señales de retrodispersión de los sistemas multihaz es el interés principal de varias investigaciones actuales que, de manera general,

buscan obtener más información acerca de las propiedades del fondo marino y de los hábitats bentónicos (Monroy-Silvera *et al.*, 2016).

Tal es el caso del estudio de caracterización y clasificación de la bahía de Puerto Montt (Chile) mediante batimetría de multihaz y datos de backscatter. En este se obtuvo un modelo topográfico de la zona y a partir del backscatter se pudieron clasificar los sedimentos del fondo apoyado con los resultados de muestras de sedimentos (Rodrigo, 2006).

De manera similar, es común el desarrollo de investigaciones orientadas a la comparación entre técnicas de levantamiento y análisis de datos en pro de la optimización de los métodos. Ejemplo de ello, es la investigación dirigida por Gaida *et al.* (2020) quienes estudiaron el efecto de la penetración de la señal dependiente de la frecuencia en la retrodispersión multifrecuencia y los datos batimétricos. Sus hallazgos demuestran que no solo los cambios en el sedimento superficial, a los que una frecuencia es más sensible que otra, dan como resultado diferentes patrones de retrodispersión. Así pues, al existir una capa de sedimentos poco profundos debajo de los sedimentos finos, la señal de retrodispersión puede verse afectada por la penetración variable de la misma a diferentes profundidades.

Por otra parte, Costa *et al.* (2009) compararon los datos obtenidos de imágenes LiDAR respecto a los sistemas multihaz, concluyendo que las primeras son más eficientes en términos de tiempo y costo, pero las ecosondas recolectan datos a resoluciones espaciales más altas.

En cuanto a las investigaciones que involucran los ambientes arrecifales se encuentra el trabajo de Zieger en 2007, quien llevó a cabo un estudio doctoral en la Gran Barrera de Arrecifes (Australia). Este tuvo como objetivo aplicar un algoritmo de extracción de características multiescala a los datos de batimetría multihaz para extraer automáticamente las principales características de los arrecifes, con el fin de ayudar a los estudios de biología marina con mapas de hábitat.

Por otro lado, también se ha explorado la detección de corales de agua fría o profundidad. Roberts *et al.* (2005) llevaron a cabo prospecciones multihaz en cuatro áreas al oeste de Escocia donde se había registrado previamente el coral *Lophelia pertusa* mientras que Somoza *et al.*, (2014) reportaron, por primera vez, la presencia de montículos de coral de agua fría y un gran número de arrecifes vivos de *Lophelia* a lo largo del Banco de Galicia mediante varios métodos de detección acústica y muestreo en profundidades de agua de 1125 a 620 m.

En el 2015 Tasseti *et al.* realizaron un estudio en el que combinaron las ecosondas multihaz con técnicas de visualización en 3D, proporcionando imágenes métricas y de aspecto realista de estructuras artificiales; algunas de ellas pese a estar excavadas, fueron perfectamente identificables y de dimensiones correctas.

En Colombia la mayoría de las investigaciones científicas de arrecifes coralinos han estado orientadas al análisis descriptivo de la composición y ubicación de sus unidades ecológicas, a partir de metodologías como buceo, bio-transectos y fotografías aéreas e *in situ*, sin embargo, durante los últimos años se han estado implementado técnicas acústicas para su estudio (Díaz *et al.*, 2000; CCO, 2015).

Debido a que estas técnicas a la hora de mapear los sustratos arrecifales son independientes de la profundidad del agua, la visibilidad, la penetración de la luz y el tiempo. Por esta razón, se perfilan como la mejor alternativa, respecto a los convencionales transectos en términos de tiempo, costo y resultados con la ventaja adicional de ser ambientalmente seguros al no tener contacto directo con los arrecifes (El-Gharabawy *et al.*, 2017).

Un ejemplo claro es la investigación realizada por Martínez-Clavijo *et al.* en 2021, donde se caracterizaron las unidades geomorfológicas mediante técnicas de sensoramiento remoto (imágenes satelitales y acústico) y se determinó la distribución de las facies sedimentarias validadas con datos *in situ* en la Isla Cayos de Albuquerque, en el Caribe colombiano.

Marco Legal

El marco legal colombiano en materia de ambiente siempre ha apoyado las tendencias globales, por tal motivo, el país ha ratificado convenios de gran importancia como lo son la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (1992), el Convenio Sobre la Diversidad Biológica (1994), Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (1994), entre otros.

Una de las primeras normativas expedida por el país en materia de ambiente es el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (19...), el cual aborda toda la reglamentación sobre el manejo y la defensa de los recursos naturales renovables en Colombia, así como la defensa del ambiente contra la acción nociva de fenómenos naturales y demás elementos y factores que conforman el ambiente e influyan en él.

Este código reconoce al ambiente como patrimonio común y establece responsabilidades para su preservación y manejo, además, denomina al Sistema de Parques Nacionales como el conjunto de áreas con valores excepcionales para el patrimonio nacional que, en beneficio de los habitantes de la nación y debido a sus características naturales, culturales o históricas, se reserva y declara comprendida en cualquiera de las categorías definidas. Se establecen sus finalidades, los tipos de áreas que lo conforman, la necesidad de determinar las zonas amortiguadoras y las orientaciones para su administración y uso (Decreto 2811, 1974).

Posteriormente, en la Constitución Política de Colombia (1991), se estableció que todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.

En 1993 se presentó la Ley 99, producto de las acciones adelantadas por el país para implementar el concepto de Manejo Integrado de Zonas Costeras, acogido por los países asistentes a la Cumbre de la Tierra (Declaración de Río en 1992), donde se definió como concepto central para el desarrollo sostenible de las costas y de los océanos.

Esta ley creó el Ministerio del Medio Ambiente (hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), reordenó el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, organizó el Sistema Nacional Ambiental-SINA y dictó otras disposiciones en asuntos ambientales.

Entre otros aspectos, estableció que la biodiversidad del país, por ser patrimonio nacional y de interés de la humanidad debe ser protegida prioritariamente y aprovechada en forma sostenible; indicó que la acción para la protección y recuperación ambiental del país es una tarea conjunta y coordinada entre el Estado, la comunidad y las organizaciones no gubernamentales y el sector privado; así como también precisó las competencias a cargo de las autoridades ambientales para la reserva, declaración y administración de distintas figuras de manejo y protección de los recursos naturales reguladas por el Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y sus reglamentos, y para las creadas por esa misma Ley (Ley 99, 1993).

A partir de las disposiciones de esta Ley, se creó la Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los Espacios Oceánicos y las Zonas Costeras e Insulares de Colombia (PNAOCI) en el año 2000, la cual busca propender por el desarrollo sostenible de los espacios oceánicos y las zonas costeras, y definió tres regiones integrales de planificación y ordenamiento ambiental territorial, cada región alberga unidades ambientales, unas de carácter costero (UAC) y otras oceánicas (UAO).

Otra de las políticas a nivel nacional es la Política Nacional del Océano y los Espacios Costeros (PNOEC), la cual permite el direccionamiento integral de las actividades que giran en torno a las zonas marino-costeras y va desde la coordinación intersectorial y el poder naval, hasta asuntos transversales como la ciencia y la tecnología (CCO, 2007).

Ley 165 de 1994, aprobó el Convenio de las Naciones Unidas sobre Diversidad Biológica, el cual tiene como objetivo: “la conservación de la diversidad biológica, la utilización sostenible de sus componentes y la participación justa y equitativa en los beneficios que se deriven de la utilización de los recursos genéticos”.

Entre los compromisos de este convenio se encuentran: elaborar estrategias, planes o programas nacionales para la conservación y la utilización sostenible de la diversidad biológica; establecer un sistema de áreas protegidas o áreas donde haya que tomar medidas especiales para conservar la diversidad biológica; elaborar directrices para la selección, establecimiento y ordenación de áreas protegidas o áreas donde haya que tomar medidas especiales para la conservación in situ de la biodiversidad (Ley 165, 1994).

Para cumplir con estas obligaciones, el país estableció el Sistema de Áreas Protegidas (SINAP), que se rige principalmente por el Decreto 1076 de 2015. Para el año 2020, se buscaba conservar al menos el 17% de las áreas terrestres y de agua dulce, y el 10% de las áreas marinas y costeras, especialmente aquellas de gran importancia para la diversidad biológica y los servicios de los ecosistemas, a través de sistemas de áreas protegidas gestionados de forma efectiva y justa, que sean ecológicamente representativos y estén bien conectados con otras medidas de conservación eficaces basadas en áreas, y que estén integrados en paisajes terrestres y marinos más amplios (Ley 165, 1994).

De acuerdo con los compromisos del nuevo Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 “Pacto por Colombia -pacto por la equidad”, adoptado mediante la Ley 1955 del 2019, se

establece el compromiso de contar con una nueva política para avanzar en la consolidación del SINAP con visión 2020 – 2030 (Ley 1955, 2019).

El documento CONPES 4050, como política para la Consolidación del Sistema Nacional de Áreas Protegidas, se oficializó el 27 de septiembre de 2021 por el Consejo Nacional de Política Económica y Social. Esta política se plantea como objetivo general el “Reducir al 2030 el riesgo de pérdida de naturaleza en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, de tal manera que se garantice la protección de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que soportan el desarrollo social, económico y cultural de la nación” (CONPES 4050, 2021).

Marco Conceptual

Este apartado está dividido en cinco componentes. Los dos primeros abordan la información biológica concerniente a los ecosistemas coralinos y el territorio nacional, el tercero la información física desde la acústica marina y el funcionamiento de las ecosondas multihaz y el cuarto y quinto, la integración de los aspectos biológicos y físicos en la clasificación de ecosistemas respectivamente.

Arrecifes de Coral

Los constructores primarios de los arrecifes coralinos son organismos conocidos como pólipos, que viven en colonias y llegan a formar un solo organismo esquelético calcáreo que se distribuye en el fondo y conforma relieves complejos. Pueden alcanzar más de 2000 Km de longitud como es el caso de la gran barrera de arrecifes (Australia) y más de 1300 metros de espesor como el Atolón Enewetok en el Pacífico (Garzón-Ferreira, 1997). Los bajos y barreras constituidos por las formaciones coralinas representan protección para efectos dinámicos en las zonas costeras, así como hábitat de diferentes especies; sin embargo, desde el punto de vista cartográfico, son considerados peligros para la navegación y requieren de estudios cuidadosos con el fin de garantizar la seguridad de esta (Organización Hidrográfica Internacional-IHO, 2018).

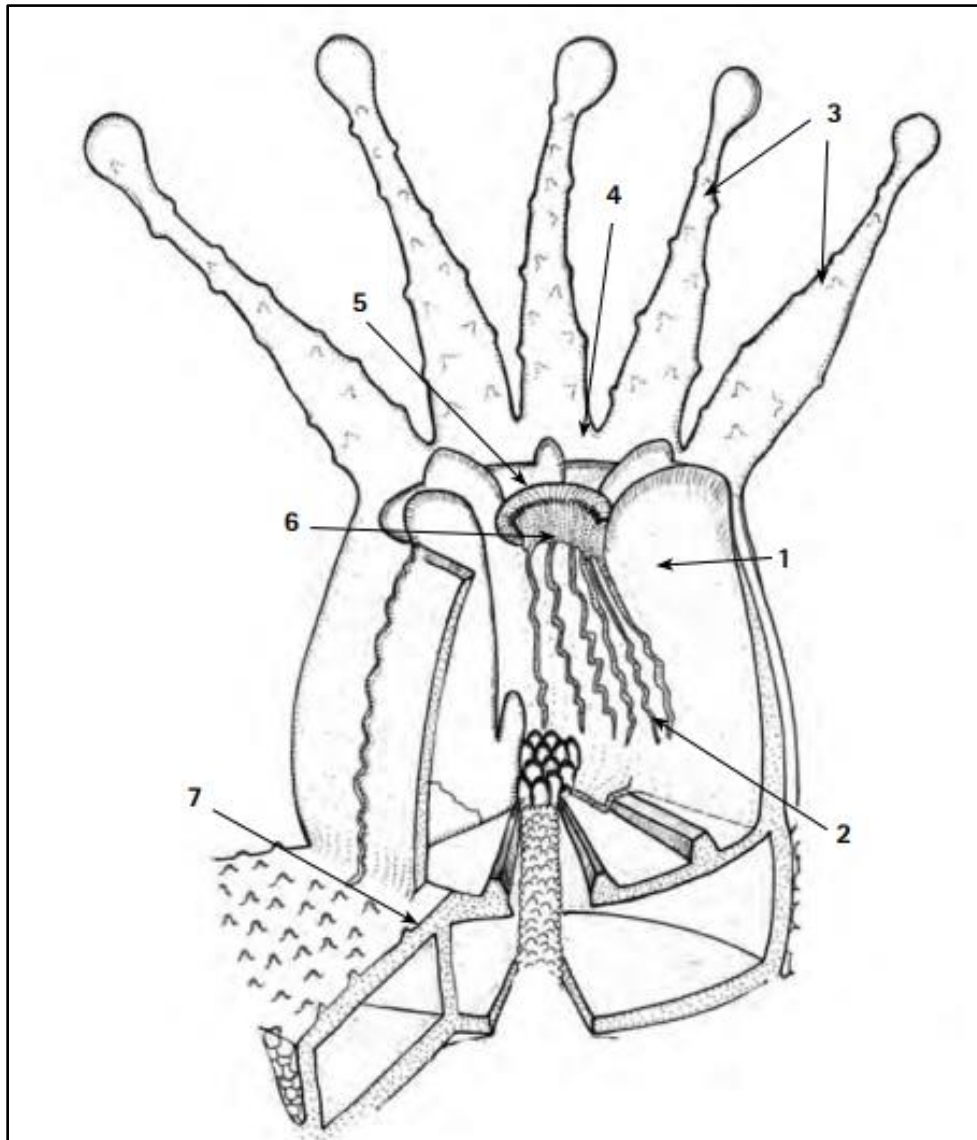
En los corales escleractinios o duros, cada pólipo consiste en una columna cilíndrica, con un anillo de tentáculos en el tope alrededor de un disco oral horizontal como se puede observar en la figura 1. La capa columnar contiene un gran número de algas simbiotas unicelulares llamadas zooxantelas. Estas pequeñas plantas usan la luz solar y el dióxido de carbono en el proceso de fotosíntesis para producir el oxígeno y los nutrientes necesarios para cumplir con el 98% de los requerimientos de los pólipos (Zieger, 2007).

Dentro de los principales factores que limitan las tasas de crecimiento coralino se encuentran la luz solar, la temperatura, la salinidad y la turbidez. Como se mencionó en el párrafo anterior, los corales obtienen la mayoría de su energía a través de la fotosíntesis, por lo tanto, prosperan en zonas de alta radiación solar y es justamente, por la misma razón que estos organismos parecen ser más sensibles a las temperaturas frías que a las cálidas. Adicionalmente, requieren salinidades típicas del océano abierto y por lo tanto proliferan dentro de un rango de tolerancia del 9%.

Respecto a la turbulencia, los corales son atraídos a áreas de alto movimiento y crecen exitosamente en regiones de alta energía de oleaje, particularmente fuera de la plataforma. Un número de razones han sido planteadas para este elemento de control ambiental incluyendo la circulación oceánica, que podría proveer nutrientes y oxígeno mientras a la vez que remueve el dióxido de carbono biogénico y se previene la sedimentación (Zieger, 2007).

Figura 1

Esquema general de la anatomía de un pólipo.



Fuente: INVEMAR, 2010.

Nota: La imagen representa la estructura anatómica de un pólipo incluyendo sus partes y composición interna (1. Mesenterio, 2. Filamentos mesentéricos, 3. Tentáculos, 4. Disco oral, 5. Peristoma, 6. Estomodeo y 7. Esqueleto.)

Arrecifes de Coral en el Caribe Colombiano

Colombia cuenta con una extensión total de 4.405 km² de áreas coralinas, de las cuales 4.390,3 km² corresponden a áreas coralinas oceánicas y continentales del Caribe a una profundidad máxima de 20 m (Abril-Howard *et al.*, 2012). La extensión aproximada de las áreas coralinas del país se estima en 372.7 ha con más del 99% localizadas en el Caribe y, una tercera parte de esta área comprende fondos coralinos con una estructura ecosistémica conspicua (INVEMAR, 2016).

A nivel de especies, se han reconocido 197 especies de corales del orden Scleractinia para el Atlántico Tropical Occidental, de ellas el 60% (118 especies) se encuentra distribuida en el Caribe colombiano (INVEMAR, 2010).

El INVEMAR en 2016, publicó el “Informe Nacional del Estado de los Ambientes y Recursos Marinos y Costeros de Colombia” donde muestran los resultados de la evaluación de la condición general de integridad biótica, y por tanto de estado de conservación de los ecosistemas marinos del país y sus cambios a partir de líneas base. Para tal fin, emplearon un Índice de Condición de Tendencia (ICT) que, para el caso de los arrecifes de coral, incorpora cuatro variables: cobertura de coral vivo, cobertura de macroalgas frondosas y tapete algal, biomasa de peces herbívoros: loros y cirujanos, biomasa de peces carnívoros: pargos, meros y chernas. En la Tabla 1 se resumen los resultados encontrados para las tres regiones consideradas

Tabla 1

Resumen de la evaluación del ICT en 2016 para los ecosistemas coralinos de Colombia.

	Región Caribe Continental	Región Caribe Insular	Región Pacífico
Parámetro	PNN Tayrona, PNN Corales del Rosario, entre otros	San Andrés y Providencia	Gorgona y Utría
Estado de las formaciones coralinas	29% en condición “buena”; 67% en condición “regular”; 4 % en estado “alerta”	52% en condición “regular”; 48% en condición “buena”	56% en condición “buena”; 25% en condición “regular”; 13% en condición “deseable”; 6% en condición “no deseable”
Cobertura del coral vivo	>38%	16%.	PNN Utría: Coral vivo 40 %; Macroalgas 55 % PNN Gorgona: Coral vivo 70%; macroalgas 10%.
Biomasa de peces herbívoros	Entre “buena” y “deseable” en la mayoría de las zonas muestreadas	Condición “deseable”	Entre “regular” y “buena”
Biomasa de peces carnívoros	Entre “regular” y “no deseable”.	Condición “deseable”	Condición “buena”

Fuente: (INVEMAR, 2016).

Nota: La tabla permite observar la distribución de los ecosistemas coralinos en Colombia.

Comparativamente, el estado de salud de los arrecifes de coral del Caribe insular y continental colombiano descritos en la tabla 1, respecto al del Sistema Arrecifal Mesoamericano en el Caribe (Belice, México, entre otros) se encuentra en mejores condiciones, puesto que el promedio de cobertura coralina para el Atlántico Occidental Tropical (incluyendo 88 localidades) es de 16.8% (Jackson *et al.*, 2014). Sin embargo, un análisis de riesgo de los arrecifes coralinos evidencia procesos de degradación notables gracias a la gran cobertura de macroalgas, mayor al 40% en algunas locaciones.

Estas macroalgas compiten con los corales por espacio y, gracias a sus rápidas tasas de crecimiento, suelen quedarse con él. El problema se intensifica con la sobrepesca de especies de peces herbívoros como el pez loro, dado que, al estar presentes, estos organismos ayudan a controlar la cobertura de macroalgas.

Acústica Marina y Ecosondas Multihaz

De manera general, la señal acústica es una onda longitudinal que, en un fluido como el agua de mar, se transmite a grandes velocidades (aproximadamente 1500 m/s) y a largas distancias antes de ser atenuada por el ruido del ambiente (Tarrío-Saavedra *et al.*, 2017).

La acústica submarina presenta una de las mejores aproximaciones para el estudio del lecho marino, razón por la cual los sistemas de sonar multihaz han evolucionado rápidamente en las últimas décadas y actualmente, son la herramienta más avanzada y eficiente para la caracterización del fondo del mar (Parnum *et al.*, 2004).

Un sonar multihaz consta de un par de arreglos acústicos lineales montados ortogonalmente: el transmisor generalmente se orienta a lo largo del eje longitudinal del fondo de la embarcación, mientras que el receptor lo hace transversalmente (Hughes-Clarke, 2018).

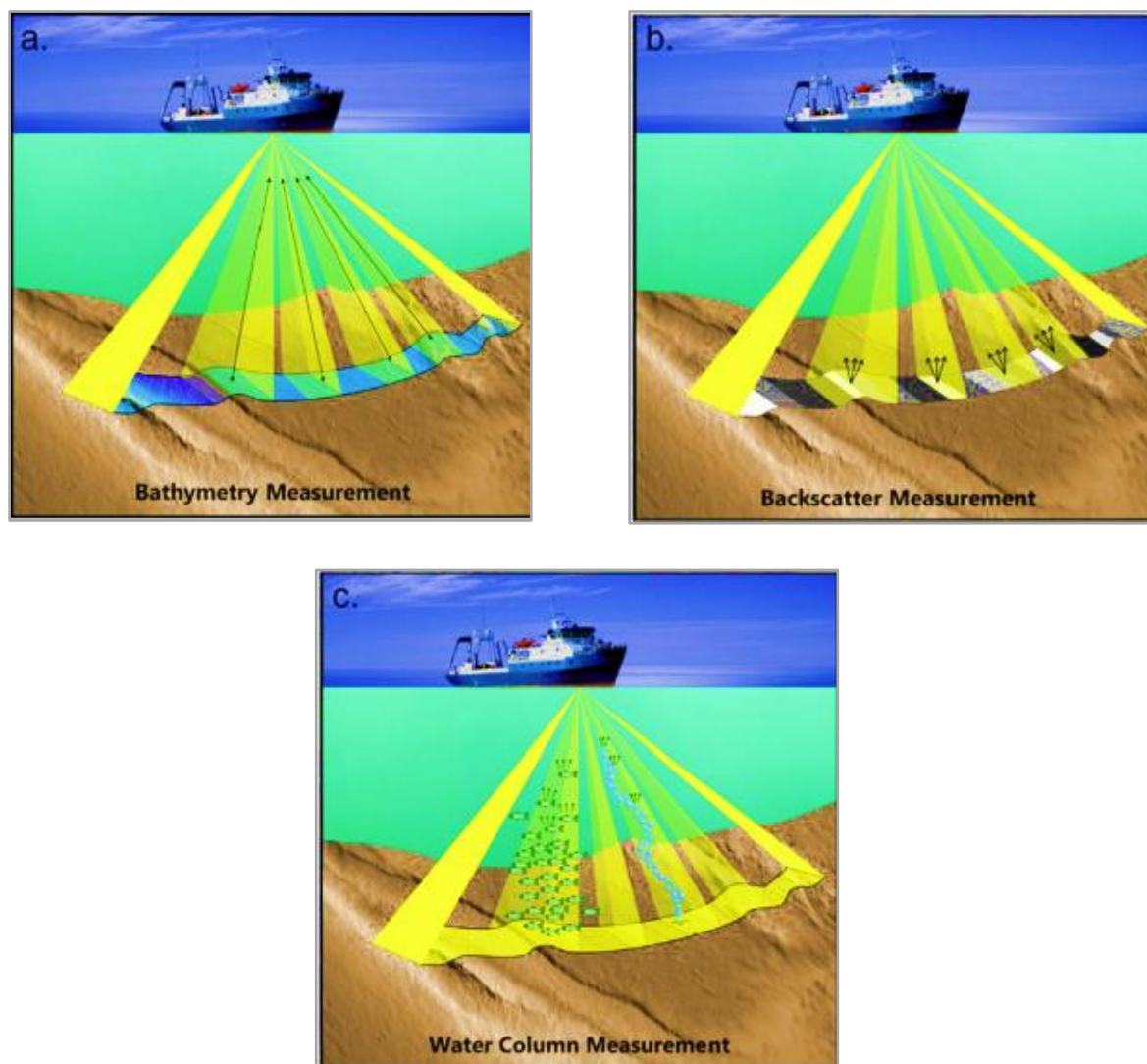
En los sistemas modernos, se utilizan frecuencias que van desde unos pocos kHz hasta varios cientos de kHz y, usualmente, comprenden más de cien haces. La señal generada por el

transmisor, se propaga hacia el fondo en una forma de onda tridimensional. Al llegar al fondo, la señal acústica es reflejada por el fondo marino, primero verticalmente, e inmediatamente después, oblicuamente (Tarrío-Saavedra *et al.*, 2017). Como se observa en la figura 2, los haces se transmiten en diferentes ángulos desde la misma unidad de transmisión, creando un abanico perpendicular a la dirección del barco. El ángulo del abanico se denomina ángulo de franja, que junto con la profundidad del agua determina el ancho del corredor mapeado o levantado (Fossa *et al.*, 2005).

Para la operación de la ecosonda deben considerarse los objetivos de estudio y la compensación entre el rendimiento del rango y la resolución. Una opción ideal es aquella en la que no se ha alcanzado el umbral de la relación señal/ruido en el borde exterior de la franja deseada. En las frecuencias más bajas utilizadas (comúnmente 12 kHz), esto no es limitante hasta aproximadamente los 2000–3000 m de profundidad. No obstante, si es necesario cubrir un amplio rango de profundidades, la frecuencia más adecuada para las zonas más profundas no tendrá la mejor resolución para las zonas más someras (Hughes-Clarke, 2018).

Figura 2

Diagrama ilustrativo de los diferentes tipos de datos acústicos que pueden ser obtenidos con ecosonda multihaz.



Fuente: Colbo *et al.*, 2014.

Nota: La imagen representa como es posible obtener datos de diferentes variables para la identificación de alturas, retrodispersión e información en tiempo real de la columna de agua.

Retrodispersión Acústica o Backscatter

Además de entregar datos de profundidades georreferenciadas, los sistemas multihaz también proveen datos de retrodispersión acústica o *backscatter*, tras la aplicación de algunas correcciones geométricas y radiométricas a la señal recibida (Monroy-Silvera *et al.*, 2016; Gaida *et al.*, 2020).

Las mediciones de retrodispersión del fondo marino de un sistema multihaz, se registran como una función del tiempo para cada haz dentro del sistema y representan el sonido que se dispersa o refleja desde la interfaz agua-sedimento y desde el volumen de sedimento hacia el transmisor (Colbo *et al.*, 2014; Gaida *et al.*, 2020). La señal acústica se propaga esféricamente en todas las direcciones y devuelve múltiples ecos del lecho marino. En este sentido, cambios instantáneos en la intensidad del eco o la retrodispersión se relacionan con cambios en el nivel acústico de la fuente o en la frecuencia usada, la rugosidad a microescala del fondo marino, en las características geológicas superficiales y/o irregularidades dentro del volumen de sedimentos (Rodrigo, 2006; Colbo *et al.*, 2014).

De forma general, un ángulo de barrido amplio en aguas profundas aumenta el corredor cartografiado, pero reduce la resolución a medida que la distancia entre los haces individuales incrementa al ser mayor la huella o área cubierta por un solo haz (Fossa *et al.*, 2005; Zieger, 2007).

El backscatter también responde al tamaño de grano pues este indica diferencias de rugosidad en el piso marino, producto de características como ondulaciones y presencia de organismos bentónicos o propiedades físicas de los sedimentos superficiales (textura, compactación, densidad, porosidad) (Rodrigo, 2006; Medialdea *et al.*, 2008). Lo anterior fundamenta la detección de algunos tipos de sedimentos a partir de la retrodispersión (Fossa *et al.*, 2005) y la identificación de las firmas acústicas de diferentes tipos de materiales, como depósitos de sedimentos y arrecifes duros (El-Gharabawy *et al.*, 2017).

La fuerza del backscatter también varía con el ángulo de incidencia, lo que se conoce como respuesta angular (Parnum *et al.*, 2004; Monroy-Silvera *et al.*, 2016). Además, la relación entre la frecuencia acústica y la longitud de onda afecta la interacción del sonido con el fondo marino: mientras que las frecuencias más altas son más sensibles a la rugosidad del lecho marino, las señales de frecuencia más bajas se ven más afectadas por las heterogeneidades de volumen debido a la menor atenuación del sonido, lo que resulta en una mayor penetración de la señal en el sedimento (Gaida *et al.*, 2020).

Con base en las complejas interacciones entre las variables mencionadas anteriormente, se han propuesto diversas técnicas para clasificar los datos de retrodispersión, siendo cuatro las metodologías empleadas con mayor frecuencia: 1) análisis textural, 2) dependencia angular de la retrodispersión acústica, 3) análisis espectral de potencia de amplitudes de eco y 4) análisis de función de densidad de probabilidad de pico de eco (Parnum *et al.*, 2004).

Clasificación de Ecosistemas

En el ámbito terrestre, el hábitat suele estar definido y estructurado por los tipos de vegetación dominante o por las disposiciones humanas, que proporcionan el entorno físico y la estructura tridimensional del hábitat para la fauna asociada. Con frecuencia, los métodos de teledetección óptica terrestre pueden distinguir y delinear el tipo de vegetación y, por lo tanto, el hábitat, con base en la combinación de firmas espectrales y otras variables como, por ejemplo, la elevación o la pendiente (Brown y Blondel, 2009).

En contraste, los hábitats bentónicos marinos tienden a estar estructurados por sus características geomorfológicas bidimensionales o tridimensionales junto con los parámetros hidrográficos de la columna de agua, lo cual los hace mucho más difíciles de mapear. La excepción son las estructuras biogénicas (por ejemplo, los arrecifes de coral, los arrecifes de

esponjas, los lechos de mejillones) o los hábitats de aguas poco profundas que están dominados por la vegetación (por ejemplo, los bosques de algas marinas o las praderas de pastos marinos), que se han cartografiado con gran éxito utilizando métodos acústicos de detección remota (Brown y Blondel, 2009).

Dependiendo del objetivo de estudio, los hábitats sumergidos pueden clasificarse con base únicamente en las características geomorfológicas y criterios como el tipo y la forma del sustrato, la profundidad, la pendiente, el nivel de protección de tempestades, entre otros (Reuss Strenzel, 2004). No obstante, las características ecológicas también pueden ser incluidas en un mismo sistema de clasificación, ya que la caracterización del lecho marino desde diferentes perspectivas es un componente esencial en algunos campos de estudio entre estos los estudios pesqueros o geológicos y para el manejo de ecosistemas estratégicos (Reuss Strenzel, 2004; El-Gharabawy *et al.*, 2017).

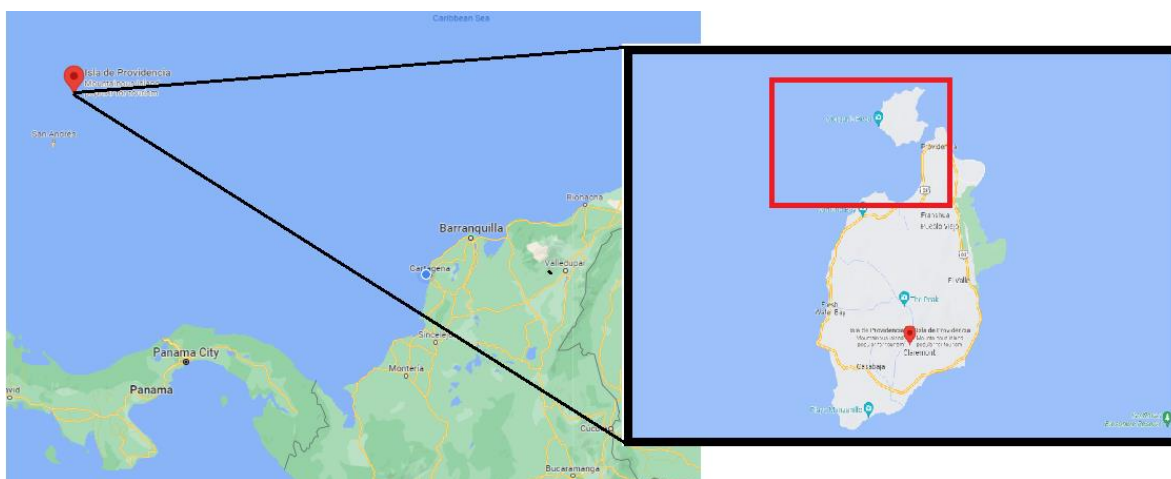
Metodología

Área de Estudio

La Isla de Providencia está localizada al suroeste del Caribe colombiano en la posición geográfica latitud $13^{\circ}20'56''$ N, Longitud $81^{\circ}22'29''$ W y hace parte de un conjunto de islas oceánicas, atolones y bancos de coral alineados NNE-SSW del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, que conforman la Reserva de la Biosfera Seaflower (Geister y Díaz, 2007).

Figura 3

Ubicación geográfica de la Isla Providencia.



Nota: Ubicación geoespacial de Isla Providencia, como parte del Archipiélago, en el mar Caribe en soberanía de Colombia.

El diseño metodológico

Teniendo en cuenta que no se cuenta como mucha información científica del área de estudio referente a identificación de corales con sistemas batimétricos multihaz, se planteó una investigación de carácter exploratoria, porque se procedió a identificar de forma precisa los arrecifes coralinos en el área de estudio, de tal manera que se pueda aportar considerablemente en su conservación y seguimiento. Para este caso se utilizaron las ventajas

de la metodología de transectos, no solo para identificar individuos a distancias (Buckland et al., 2015), sino con una cobertura completa gracias a la tecnología multihaz.

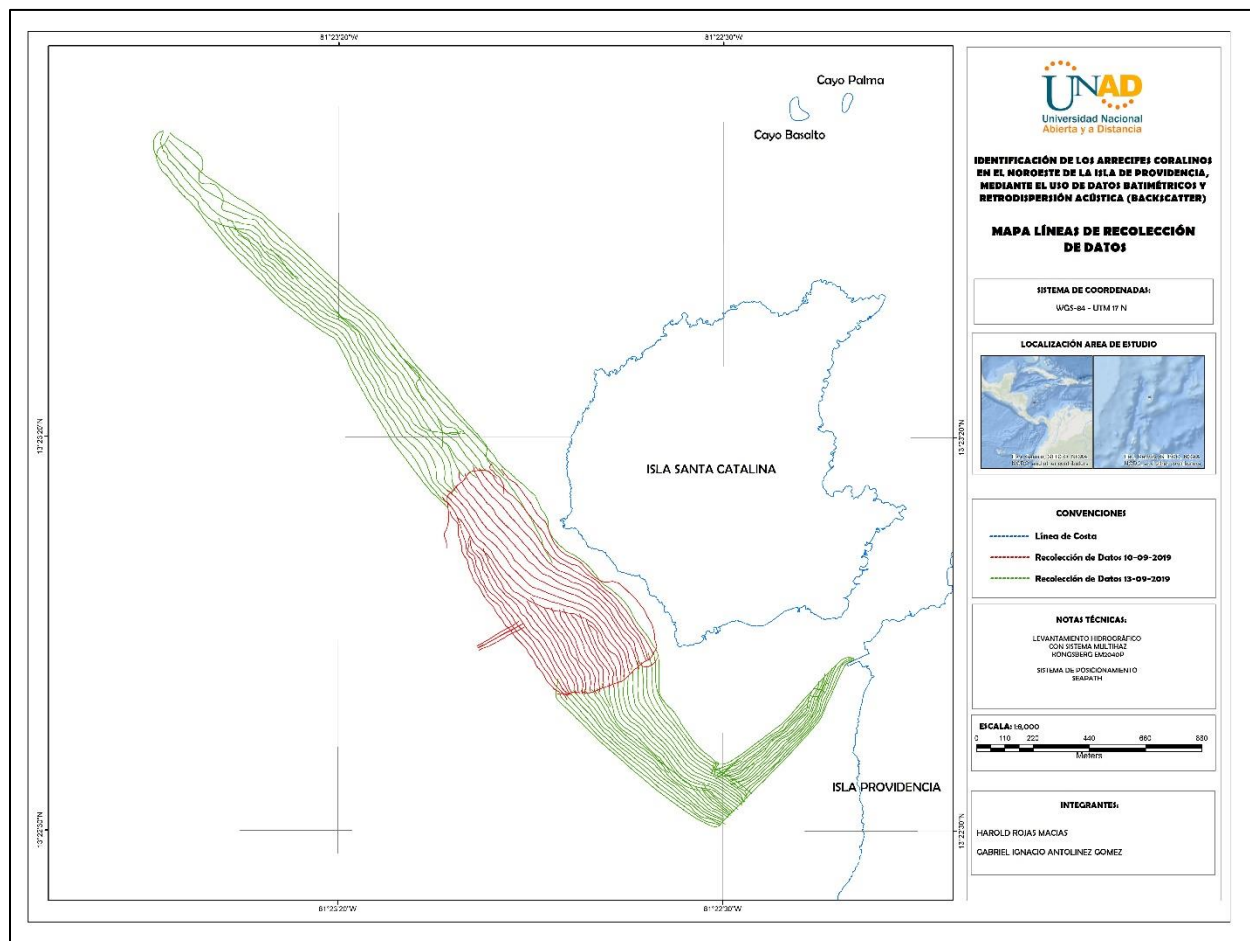
En cuanto a los datos se refiere la investigación es de tipo cualitativa ya que se tomó ausencia y presencia de corales y cuantitativa ya que se tomaron datos de presencia en un área determinada y porcentajes de acuerdo con los transectos recorridos en un área total de estudio de 1.124.433,92 metros cuadrados (1,12 kilómetros cuadrados) Esto teniendo en cuenta las ventajas que ofrece la metodología como facilidad, economía y robustez (Thomas et al., 2002; Silveira et al.,2003).

Para ello se recolectaron datos por dos días de campo haciendo seguimiento a un plan de 92 líneas de levantamiento o transectos, en el canal navegable de acceso al puerto de la isla Providencia como se puede observar en la figura 4, la toma de datos se realizó a bordo de una lancha siguiendo la ruta planteada.

Para la toma de datos se utilizó una ecosonda multihaz, que permite ir guardando los datos brutos que posteriormente fueron procesados en laboratorio en tierra.

Figura 4

Mapa Líneas de recolección para recolección de datos.



Nota: Mapa elaborado por los autores exponiendo la planificación y ejecución del trabajo realizado, con información geográfica lineal sin coberturas ni resultados postprocesados.

En el proyecto desarrollado se tuvo en cuenta las recomendaciones metodológicas aplicables en este tipo de investigación, enfocando el método científico y refiriendo el tipo de estudio que mejor describiera el proceso necesario en la adquisición de los resultados.

Nivel de Investigación

La Investigación científica de carácter exploratorio constituye aquella sobre la cual no se cuenta con suficiente información secundaria (Guffante et al, 2016), sin embargo, para este

caso se tiene en cuenta además de dicha característica, el uso del proceso descriptivo, donde se emplean las herramientas que permiten caracterizar el fondo marino, de manera que pueden describirse las formaciones claves que definen el objeto de estudio. Entonces, teniendo en cuenta las peculiaridades que definen la investigación exploratoria y descriptiva, precisan estas su aplicación en el nivel de investigación del caso de estudio.

Diseño de Investigación

La exploración descrita en el documento se define como investigación de campo, a pesar de que los datos compartidos por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, fueron obtenidos como archivos brutos y con los anexos necesarios para su análisis y determinación; sería escueto enmarcar el proceso como investigación meramente documental. Lo anterior, teniendo en cuenta que los investigadores poseen las capacidades académicas y profesionales en la adquisición de dichos datos, y además participaron de forma directa en la adquisición y procesamiento de estos.

Es así demostrable la metodología aplicada en el planeamiento, ejecución, administración, procesamiento y resultados de la investigación en cuestión, resaltando la veracidad de los valores adquiridos, la experiencia en la ejecución de los procesos para emisión de resultados y el uso adecuado de los mismos en diferentes campos de la ciencia.

Método de Investigación

La VI versión de la Expedición Científica Seaflower 2019 se llevó a cabo en las islas de Providencia y Santa Catalina. Esta expedición y sus investigaciones le permitieron al país actualizar el conocimiento de estas islas a través de la toma de datos en Oceanografía, Hidrografía, Geología, Biología, Física, Biotecnología y Geografía, entre otros (CCO, 2019).

Teniendo en cuenta la importancia de soportar la investigación en un proceso formal de acuerdo con el método científico, se define como método inductivo la presente (Dávila 2006), ya que se toma un caso puntual de observación de la realidad, se adquieren los datos, se someten a procesos de verificación, limpieza y correcciones, que finalmente permiten plantear hipótesis en respuesta a la pregunta problema.

Así mismo, teniendo en cuenta que los datos obtenidos presentan diferentes características a asociar, como los valores de retrodispersión, pendiente y altura, se define como método sintético; donde en conclusión y luego de aplicar los valores que afectan la incertidumbre de los datos, es posible reunir los valores en su totalidad y definir la hipótesis final. Evidenciada en las salidas gráficas y resultados de la investigación.

En cuanto a la naturaleza de los datos, la aplicación tanto de métodos cuantitativo como cualitativo manifiesta la relevancia de la experiencia de los investigadores en el campo. Cuantitativo teniendo en cuenta que corresponde a valores absolutos obtenidos con instrumentos de medición, análisis de datos en software de procesamiento numéricos y cuantificación de los valores reflejados en superficies gráficas. Cualitativo teniendo en cuenta conocimientos previos sobre los indicadores de relevancia ambiental conocidos en el área de estudio. Basado en la interpretación de los investigadores, en la observación del área, y en la experiencia de campo, es posible que, apoyado en los datos cuantitativos adquiridos, se plantean las conclusiones de la investigación descriptiva aplicada en el caso de estudio.

Diseño de muestreo

Para el diseño de muestreo se establece una ficha de datos generales como se observa en la figura 5, para hacer el control de calidad y seguimiento de la recolección de datos en campo.

Figura 5

Ficha de datos generales.

Ficha de Datos Generales No.	
Fecha	
Hora	
Ubicación Geográfica	
Jefe de Campo	
Coordenadas Geográficas	
Profundidad Máxima	
Profundidad Mínima	
Condiciones Meteorológicas	
Altura de la ola	
Velocidad del viento	
Condiciones Climáticas	
Líneas recolectadas	
Ecosonda	
Sistema de Posicionamiento	
Perfilador de Velocidad del Sonido	
Perfiles Tomado	
Embarcación	

Nota: Tabla usada como ficha principal para la salida de campo, donde se registra la información base para cada día de levantamiento.

Recolección de Datos en Campo

Durante la Expedición Científica Seaflower 2019, desarrollada durante el mes de septiembre en las islas de Old Providence y Santa Catalina, se realizó levantamiento hidrográfico durante cinco días a bordo de una lancha tipo Soundermax utilizando una Ecosonda multihaz Kongsberg EM2040P cuyas especificaciones se detallan en la tabla 2 (Data Sheet EM 2024P MKII Multibeam).

Adicionalmente, se tomaron datos de velocidad del sonido con el Perfilador de Velocidad del Sonido AML Minos X, utilizando el software SeaCast versión 4.3.0, y toda esta

información fue complementada con datos de marea tomados de la Red Hidrográfica Vertical de la DIMAR.

Tabla 2

Especificaciones técnicas de la ecosonda multihaz Kongsberg EM2040P empleada en este estudio.

Parámetro	Descripción
Operación	Software SIS 4.3.2
Frecuencia de operación	200-700 kHz
Cantidad de haces	512 (simple) 1024(dual)
Cobertura	>170 °
Profundidad	30 m

Fuente: (Data Sheet EM 2024P MKII Multibeam)

Nota: En la tabla se evidencian las características técnicas del equipo utilizado en el levantamiento.

Des esta manera, una vez obtenidos los datos batimétricos brutos, es posible reconocer en la vista preliminar del software de levantamiento, las geoformas del fondo marino y plantear la base para el análisis en procesamiento.

Figura 6

Embarcación tipo soundermax con ecosonda Kongsberg EM2040P.



Fuente: propia.

Nota: Imagen de la lancha usada en la salida de campo e instalación de los equipos usados en la recolección de la información.

Se realizaron desplazamientos paralelos entre 5 y 15 metros de distancia de cada recorrido, para obtener un área total de 000 km² levantados, utilizando el sistema de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) y un datum WGS84.

De esta manera, una vez obtenidos los datos batimétricos brutos, es posible reconocer en la vista preliminar del software de levantamiento, las geoformas del fondo marino y plantear la base para el análisis en procesamiento en y lograr el primer objetivo específico del proyecto.

Procesamiento de Datos

Una vez culminada la fase de recolección de datos, estos fueron procesados en el Software Caris Hips and Sips versión 10.2.

A través de la Ecuación 1, con los datos de velocidad del sonido provenientes del perfilador, se verificó el exacto de profundidad. Entretanto, con los datos de marea para la fecha y hora de cada colecta de datos, se corrigieron los valores del nivel del mar correspondientes.

Ecuación 1. Ecuación para hallar la profundidad en los cuerpos de agua.

$$S = \frac{V \times T}{2}$$

Donde S es el desplazamiento, V la velocidad y T el tiempo.

Con los datos procesados de acuerdo con las especificaciones anteriores, se elaboraron mapas de retrodispersión o *backscatter* y mapas de pendientes. Es la integración de estos dos mapas, la que permite localizar de forma clara y precisa los arrecifes coralinos. Así entonces, se logró generar modelo digital del terreno con datos de retrodispersión en la zona levantada donde se pueda evidenciar la solidez del sustrato y dar cumplimiento al segundo objetivo específico del proyecto.

El primero, muestra en decibles el retorno de las ondas acústicas, es decir, fuertes intensidades de retorno corresponden a fondos duros, mientras que retornos tenues muestran afinidad con fondos blandos. Por otro lado, en los mapas de pendiente, las diferencias en el valor de dicha variable facilitan la visualización de geoformas.

La información obtenida de este análisis fue comparada con la información generada por los buzos científicos que participaron en la VI expedición *Seaflower 2019*, los cuales hicieron reconocimiento de esta misma zona través de transectos de buceo.

Finalmente, luego de efectuar el procesamiento de los datos y cotejar los resultados, se logra realizar el análisis del mapa cartográfico de las zonas coralinas en el noroeste de Isla Providencia con base en los datos batimétricos y dar cumplimiento al tercer objetivo específico señalado para el proyecto.

Resultados y Discusión

Descripción del área de estudio

La isla de Providencia se encuentra sobre un banco submarino delimitado por el veril de los 200 metros de profundidad, en la cima de la Dorsal de Guambiano, a una distancia de 56 millas náuticas de la Isla de San Andrés hacia el noreste. Este banco se extiende 18.8 millas náuticas de noreste a suroeste y 7 millas náuticas de noroeste a sureste (DIMAR, 2019).

La principal isla de Providencia tiene un área aproximada de 17.5 Km². Sobre el Norte, Este y Sur de la costa, existe una extensa barrera arrecifal (aproximadamente 18 millas náuticas de extensión) que rodea la isla y encierra un área de 122.5 Km². La isla de Santa Catalina tiene un área aproximada de 2.5 Km², se encuentra ubicada al norte de Providencia, están separadas por el canal Aury de aproximadamente 130 metros de ancho. Al norte de la isla se encuentra Cayo Bajo (Low Cay) el cual emerge permanentemente sobre el nivel de las más altas mareas (DIMAR, 2019).

Las islas de Providencia y Santa Catalina mantienen en su mayoría un paisaje natural, pues su población ha logrado entrar en una dinámica de turismo y desarrollo sostenible del entorno. Hoy Providencia se proyecta como el destino turístico más atractivo del Caribe en el Plan de Gobierno nacional, departamental y municipal (DIMAR, 2019).

La reserva en la cual se encuentra esta isla (Reserva de la Biosfera Seaflower) fue declarada en el año 2000 por el programa "Man and Biosphere" de la UNESCO y abarca la totalidad del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Contiene ecosistemas representativos de las regiones tropicales insulares, en especial extensos arrecifes coralinos, praderas de pastos marinos, manglares, playas, mar abierto y bosques secos tropicales, los cuales albergan puntos de alto endemismo (Seaflower Foundation, 2019).

De hecho, estos arrecifes coralinos ocupan aproximadamente un 5% del mar Caribe y el 76% de los arrecifes de Colombia, y su alta biodiversidad puede evidenciarse en las más de 2.300 especies marinas que alberga (Seaflower Foundation, 2019).

Para la protección de la Reserva de Biosfera Seaflower, Colombia por intermedio de la Comisión Colombiana del Océano, ha venido desarrollando expediciones a las diferentes islas de la zona insular. La expedición Seaflower constituye un esfuerzo articulado por múltiples entidades del orden nacional en pro de la generación de conocimiento de la Reserva de Biosfera Seaflower. Busca en el mediano y corto plazo concretar un plan de monitoreo 2015-2023 y estandarizar protocolos de muestreo. Además, de demostrar mediante bases científicas la importancia que contiene la Reserva de Biosfera Seaflower para Colombia y el mundo (CCO, 2015).

Oceanografía

Los regímenes de velocidad media del viento en el Archipiélago de San Andrés y Providencia, al igual que en la mayoría de las áreas en el litoral Caribe colombiano, están influenciadas por las oscilaciones del sistema de alta presión de las Azores, las fluctuaciones de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) latitudinalmente, el ingreso de frentes fríos y huracanes en la zona. Entre diciembre y abril (época seca) se presentan condiciones propicias para el flujo constante de viento, ocasionando las mayores velocidades del año, las cuales oscilan entre 6.3 y 7.0 m/s; así mismo, entre mayo y noviembre (época húmeda) se presentan velocidades entre 4.5 y 6.2 m/s. Durante la época de transición, de junio a julio, se ostentan velocidades entre 5.9 y 7.8 m/s, respectivamente, siendo esta última el promedio mayor en todo el año (DIMAR, 2019).

Las aguas oceánicas del Archipiélago tienen una salinidad entre 34 y 36, y la temperatura del agua oscila entre 26.8 y 30.2°C en promedio. De junio a noviembre la zona insular es susceptible a verse afectada por mareas de tormenta y mar de leva.

En el área se presentan corrientes que vienen generalmente del NNW, con un porcentaje del 40%, con una intensidad entre 0.16 a 0.42 m/s para los meses de enero hasta julio; esta corriente representa un aumento entre agosto y noviembre, hasta llegar a un máximo de 0.68 m/s, según lo reportado por el Área de Oceanografía Operacional del CIOH desde el modelo numérico SWAN.

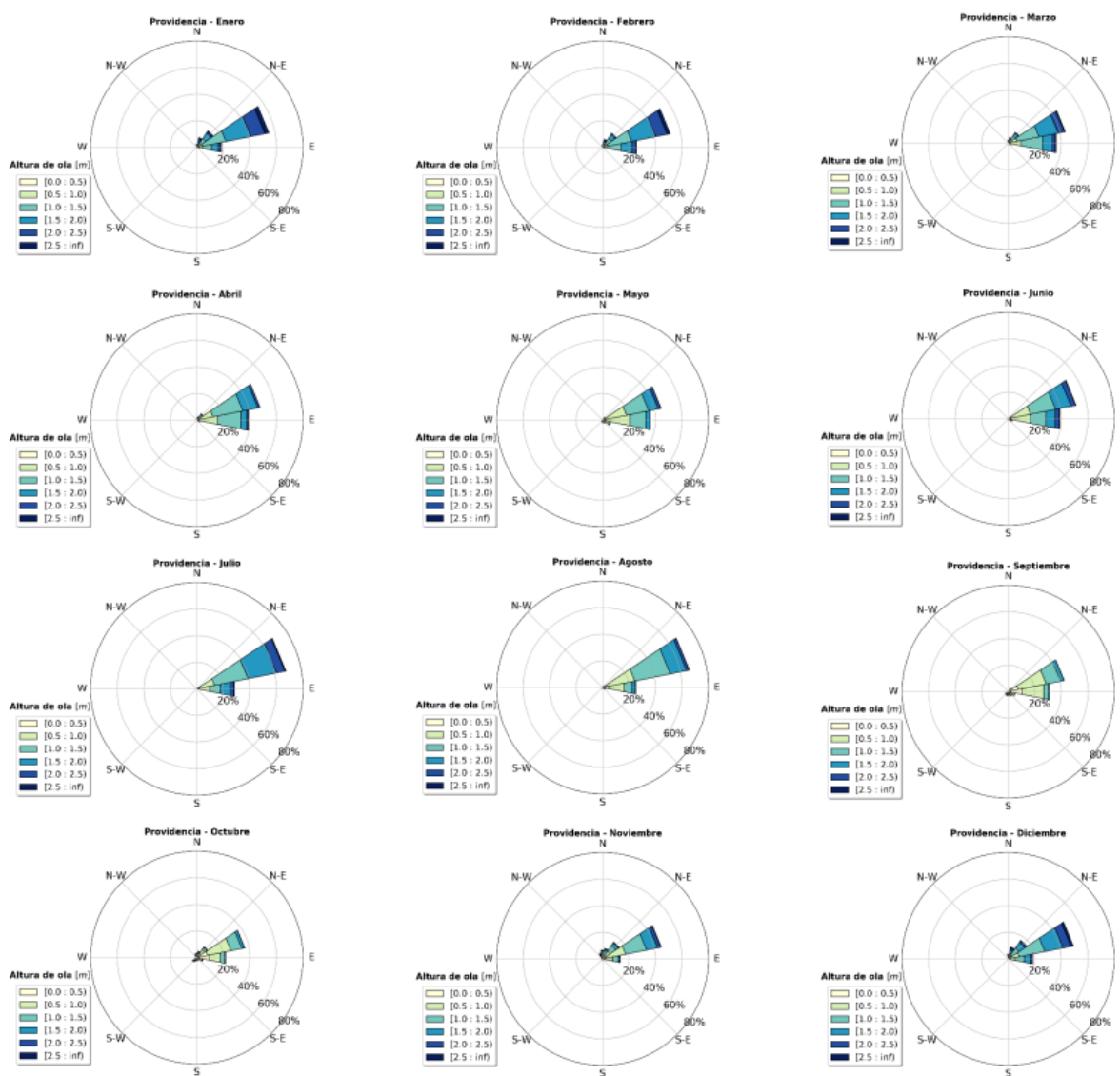
En la isla de Providencia, la dirección del oleaje coincide con la dirección de viento, propagándose la ola desde el E-NE, mostrando una altura promedio entre 1.0 y 2.5 metros de diciembre a marzo, coincidente con el período de mayor actividad de los alisios como se observa en la figura 7. Las menores alturas del oleaje se registran de mayo a noviembre, coincidiendo con las épocas de lluvias y de transición (DIMAR, 2020).

Sistemas Atmosféricos Influyentes

Las condiciones de tiempo y clima de la isla de Providencia son resultado de la dinámica general de la atmósfera (vientos Alisios del Este/Noreste y la Zona de Convergencia Intertropical) así como de otros sistemas de escala sinóptica y de meso escala (sistemas frontales, Ondas Tropicales del este y ciclones tropicales). Es así como durante el invierno boreal Frentes Fríos descienden en latitud, incidiendo en las condiciones meteomarinas de la región. De mayo a noviembre por su parte, las lluvias están influenciadas por el tránsito de ondas del este, en tanto que entre agosto a noviembre la ZCIT alcanza su posición más norte dejando las precipitaciones más copiosas de la isla (DIMAR, 2020).

Figura 7

Altura y dirección del Oleaje.



Fuente: CIOH, 2010.

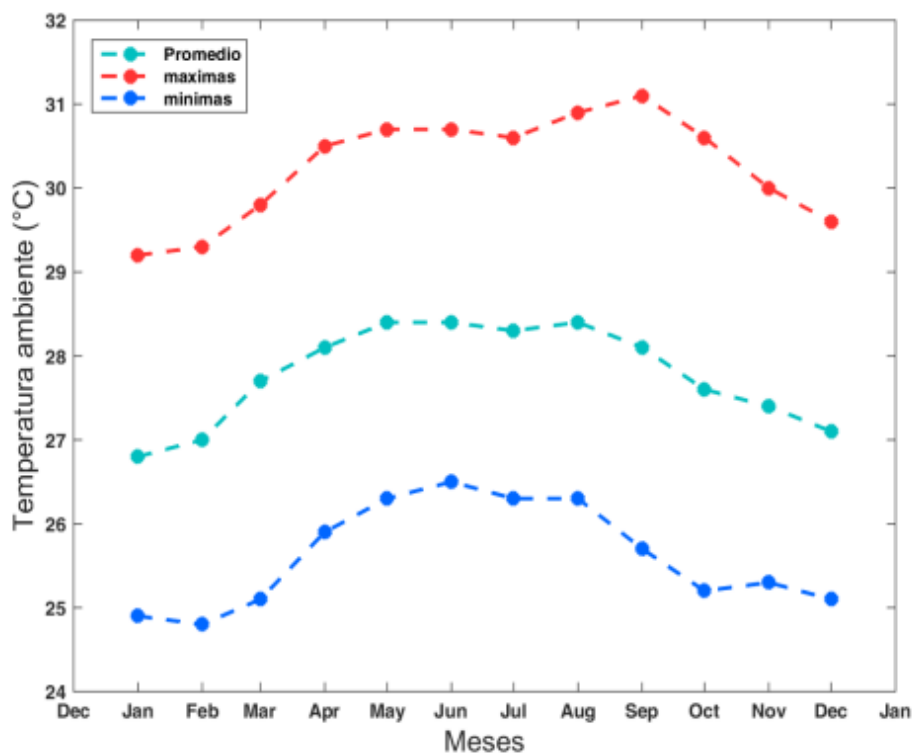
Nota: Imagen representativa de la información meteorológica del área de estudio, según los datos suministrados por el Servicio Meteorológico Marino a través del CIOH.

Climatología: Temperatura y Precipitación

La zona de estudio se clasifica como un clima cálido semihúmedo según la metodología Caldas-Lang, con tres épocas climáticas marcadas Seca (diciembre a abril), húmeda (julio a noviembre) y de transición (abril a junio). La temperatura media anual del aire para Providencia es de 27.6°C, temperatura máxima anual de 30.3°C y temperatura mínima anual de 25.6°C (DIMAR, 2020).

Figura 8

Temperatura ambiente Isla de Providencia, promedios multianuales 1981-2010 IDEAM.



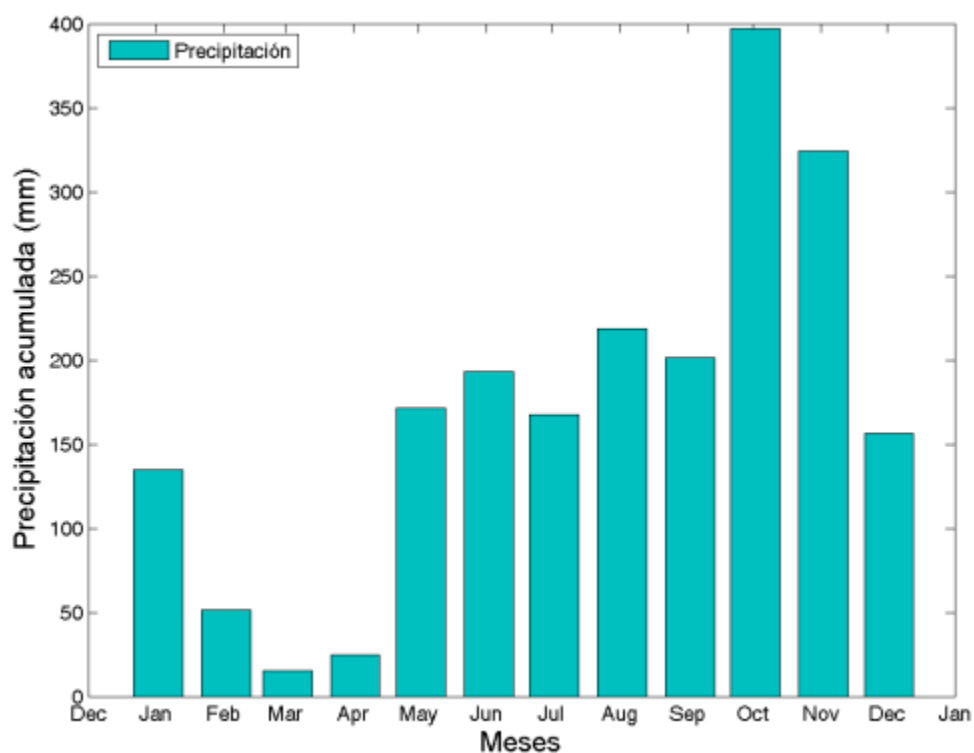
Fuente: IDEAM, 2010

Nota: Figura representativa de los valores promedios multianuales de temperatura en la Isla de Providencia entre los años 1981 al 2010.

La precipitación total anual multianual es de 2054.0 milímetros (Figura 9), el periodo de mayor lluvia esta entre octubre y noviembre (DIMAR, 2020).

Figura 9

Precipitación acumulada Providencia, Promedios multianuales 1981-2021 IDEAM.



Fuente: IDEAM, 2010

Nota: Imagen representativa de los valores promedios multianuales de lluvias en la Isla de Providencia entre los años 1981 al 2021.

Hidrografía

De acuerdo con los resultados obtenidos, se logró establecer que los datos batimétricos sí tienen múltiples usos y aparte de ser usados para la identificación de profundidades con fines cartográficos, pueden servir como metodología para la identificación de arrecifes de coral. En las figuras 10 y figura 11, se pueden observar las fichas de datos generales recolectados en campo, que demuestran el seguimiento y el control de calidad de los datos guardados mediante la ecosonda multihaz.

Figura 10

Ficha de datos generales No.1.

Ficha de Datos Generales No. 1	
Fecha	10 de septiembre/2019
Hora	10:02 am
Ubicación Geográfica	Isla de Providencia
Jefe de Campo	Harold Rojas Macias
Coordenadas Geográficas	Latitud 13°22'59,95" N Longitud 081°22'52" W
Profundidad Mínima	90 centímetros
Profundidad Máxima	19 metros
Condiciones Meteorológicas	Buenas
Altura de la ola	1 metro
Velocidad del viento	6 m/s
Condiciones Climáticas	Clima cálido, cielo despejado, temperatura 30° C
Líneas recolectadas	31
Ecosonda	Ecosonda multihaz Kongsberg EM2040P
Sistema de Posicionamiento	DGPS SeaPath 130
Perfilador de Velocidad del Sonido	AML Minos X
Perfiles Tomado	1
Embarcación	Tipo Soundermax

Fuente: Propia

Nota: Ficha general de trabajo diligenciada para el primer día de levantamiento en campo.

Figura 11

Ficha de datos generales No. 2.

Ficha de Datos Generales No. 1	
Fecha	10 de septiembre/2019
Hora	10:02 am
Ubicación Geográfica	Isla de Providencia
Jefe de Campo	Harold Rojas Macias
Coordenadas Geográficas	Latitud 13°22'59,95" N Longitud 081°22'52" W
Profundidad Mínima	90 centímetros
Profundidad Máxima	19 metros
Condiciones Meteorológicas	Buenas
Altura de la ola	1 metro
Velocidad del viento	6 m/s
Condiciones Climáticas	Clima cálido, cielo despejado, temperatura 30° C
Lineas recolectadas	31
Ecosonda	Ecosonda multihaz Kongsberg EM2040P
Sistema de Posicionamiento	DGPS SeaPath 130
Perfilador de Velocidad del Sonido	AML Minos X
Perfiles Tomado	1
Embarcación	Tipo Soundermax

Fuente: Propia

Nota: Ficha general de trabajo diligenciada para el segundo día de levantamiento en campo.

Reconocimiento de geoformas

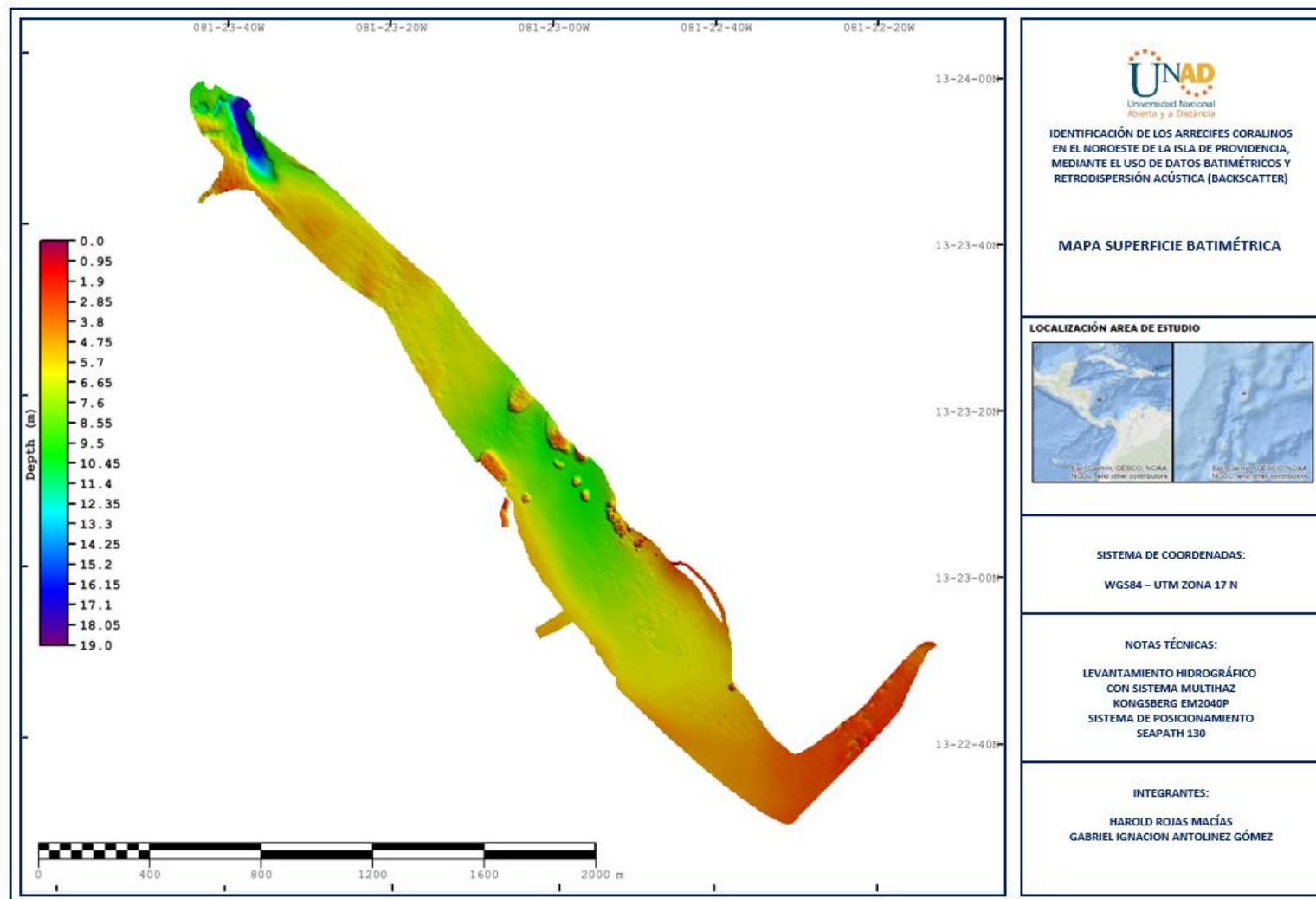
En la figura 12 se presenta un mapa de la superficie batimétrica generada para el área de estudio en 2D, donde se obtuvieron profundidades entre 0 y 19 m. Las áreas más someras se encuentran en la parte sur del levantamiento y las más profundas en la parte norte.

En la parte central del levantamiento se aprecian unas geoformas muy marcadas con profundidades de hasta 1 m, junto a una planicie con profundidades de hasta 7.5 m.

De esta manera se logra el primer objetivo específico de reconocimiento de las geoformas del fondo marino usando datos batimétricos en tres dimensiones para determinar las posibles áreas coralinas en el noroeste de Isla de Providencia

Figura 12

Mapa superficie batimétrica.



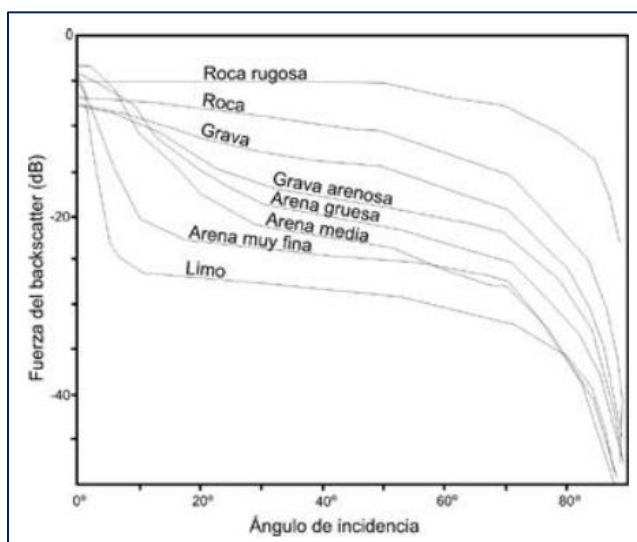
Fuente: propia.

Generación del modelo digital del terreno con datos de retrodispersión.

Para la caracterización de los tipos de fondo presentes en las áreas de estudio, se utilizó la relación entre intensidad de backscatter y ángulo de incidencia, según el tipo de fondo (Rodrigo, 2006). Posteriormente se procedió a calcular y efectuar los mapas de intensidad y ángulo de incidencia a los datos recolectados.

Figura 13

Relación entre intensidad acústica de Backscatter y ángulo de incidencia, según el tipo de fondo.



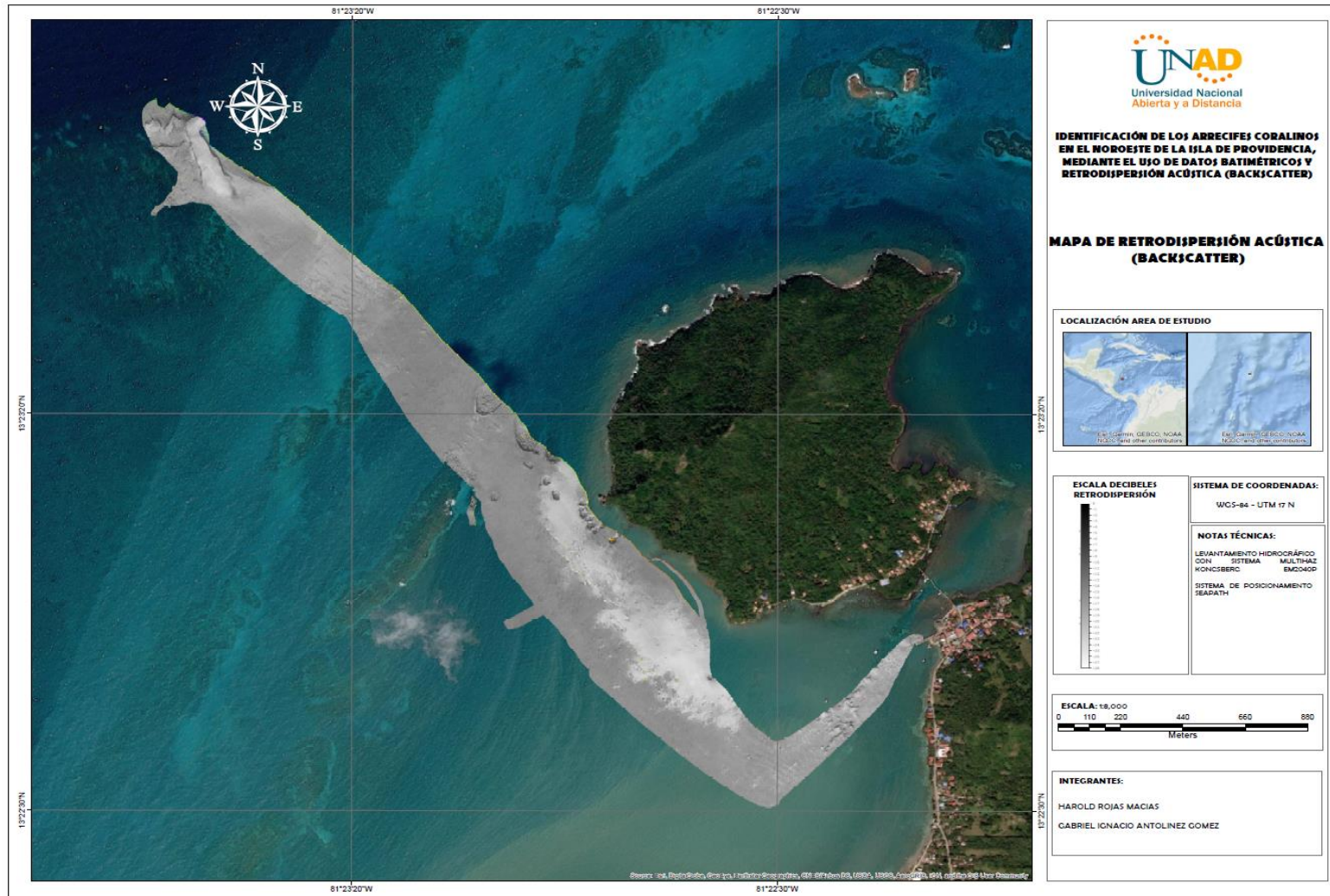
Fuente: Rodrigo, 2006.

Nota: Formulación de (Rodrigo, 2006.), valores de intensidad acústica vs ángulo de incidencia.

En la figura 14 se presenta el mapa de retrodispersión acústica. Los valores de intensidades en decibeles obtenidos, nos permite identificar de forma general y superficial, los fondos duros derivados de los valores con intensidades altas (colores más oscuros) y los fondos blandos con los valores de intensidades bajas (colores más claros). Y de esta manera se logra generar un modelo digital del terreno con datos de retrodispersión (Backscatter) en la zona levantada donde se pueda evidenciar la solidez del sustrato en cumplimiento del segundo objetivo específico del proyecto.

Figura 14

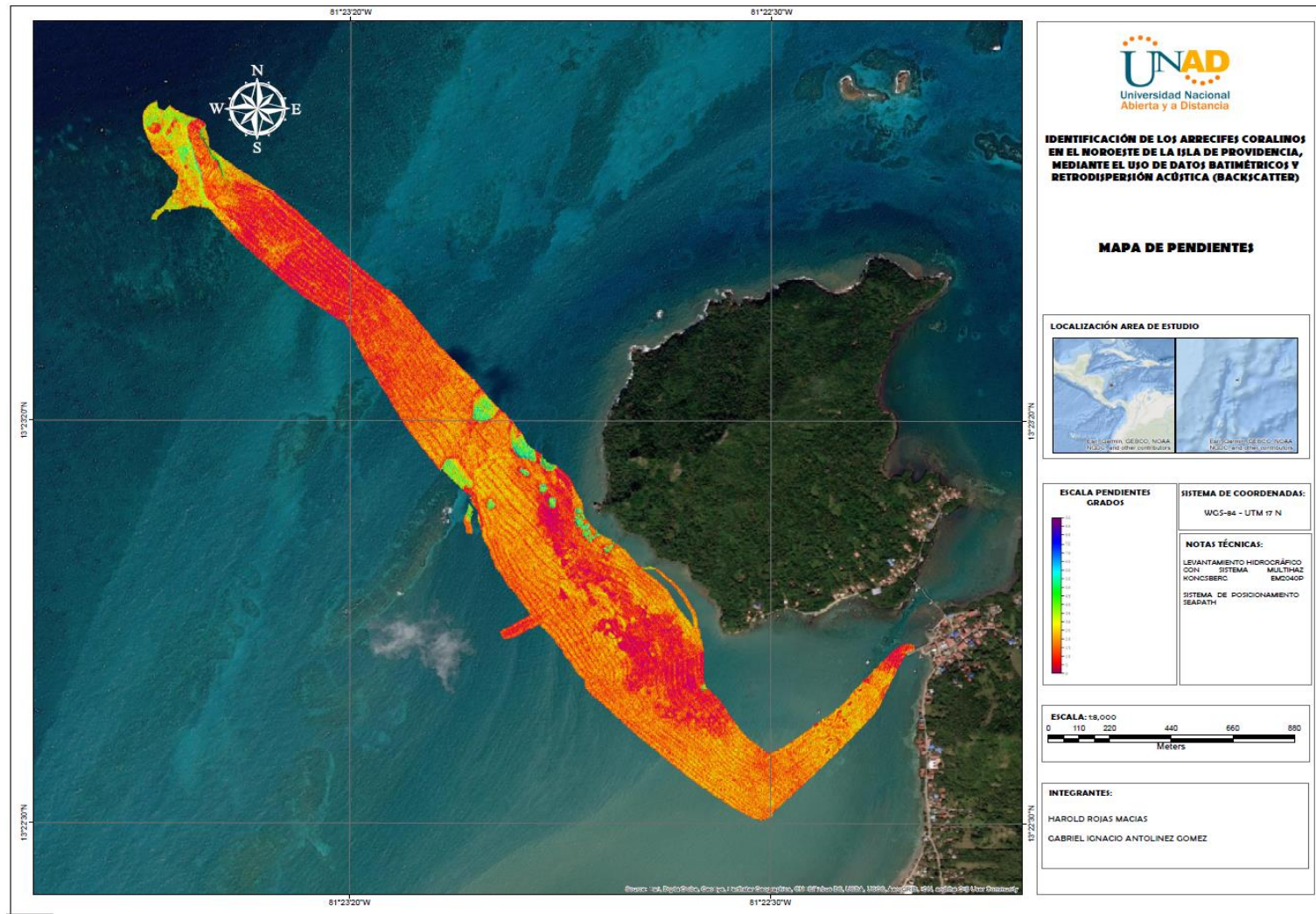
Mapa de retrodispersión acústica (*Intensidades acústicas*).



Fuente: propia.

Figura 15

Mapa de pendientes (Ángulos de incidencia).



Fuente: propia.

El mapa de pendientes con valores en ángulos nos permite identificar de forma clara, las geoformas en el fondo marino del área de estudio. Las geoformas que tienen pendientes más pronunciadas tienen el color verde y el fondo que no tiene pendientes marcadas esta de color rojo como lo muestra la figura anterior.

Las pendientes más pronunciadas se encuentran en la parte central (entre 40 y 55°) y en la parte norte del levantamiento (entre 40 y 45°), siendo más pronunciadas en la parte central. La parte sur presenta las endientes más suaves, siendo en algunas zonas casi nulo (< 5°)

Al correlacionar los valores de intensidades, ángulos de incidencia e interpretar el cuadro de relación entre intensidad acústica y ángulo de incidencia, podemos tabular los resultados obtenidos en rangos máximos, mínimos y su respectiva clasificación.

A partir de la Tabla 3 se logró determinar que en el área de estudio existen tres tipos de sedimento: arenas finas, arenas muy finas, limos y roca/coral.

Tabla 3

Datos resultantes de la relación entre intensidad acústica (Backscatter) y el Ángulo de incidencia.

SEDIMENTO	MAX	MIN	PROMEDIO
Arenas finas	-17,42	-18,72	-18,07
Arenas muy finas	-12,379	-17,4	-14,8895
Limos	-18,753	-27,426	-23,0895
Roca/Coral	-5	-12,3	-8,65

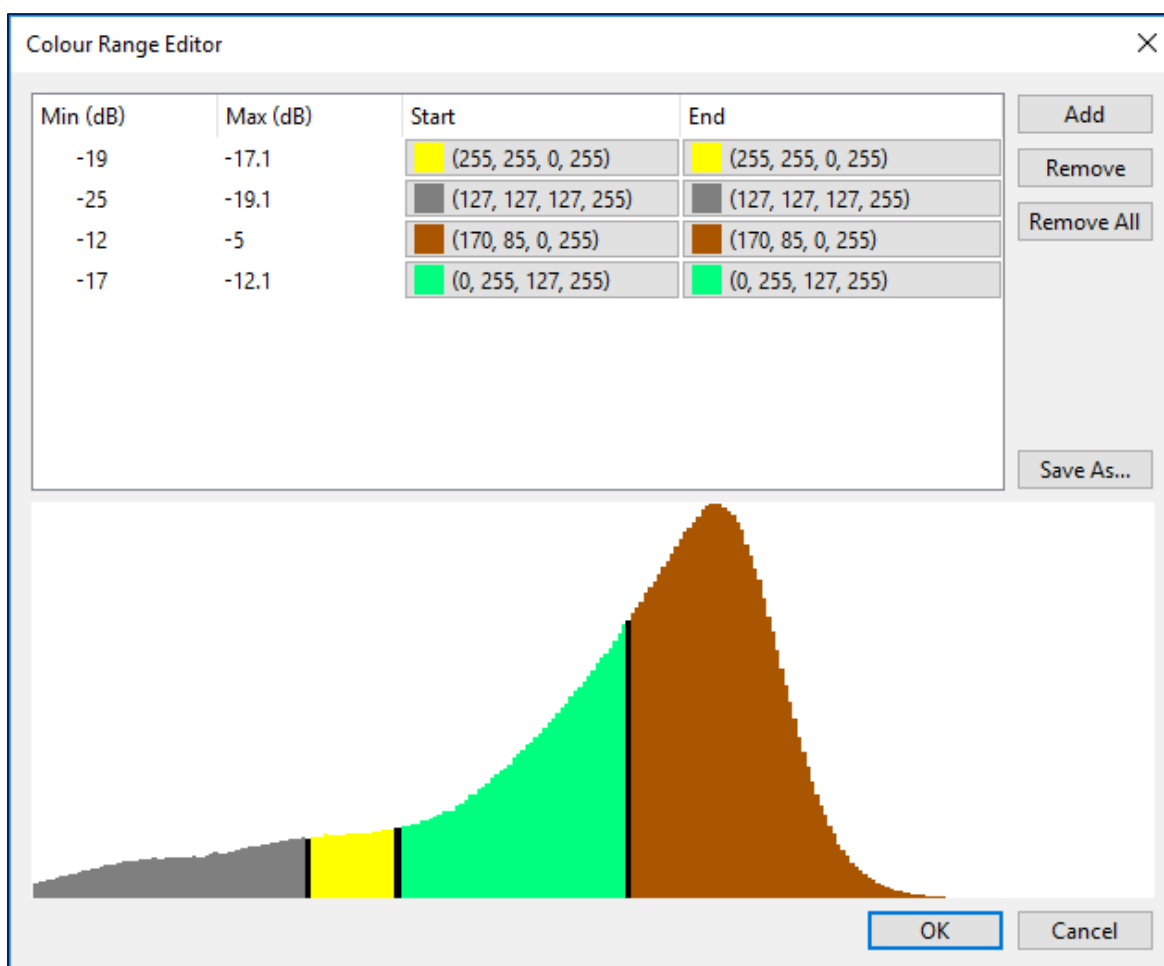
Fuente: Propia

Nota: La tabla permite observar la clasificación granulométrica del fondo marino a partir de valores de intensidad en el área de estudio.

Con estos resultados se generó una capa con los valores obtenidos y clasificados por colores como lo muestra la figura 16, con el fin de caracterizar el fondo marino del área de estudio e identificar los tipos de fondos existentes, entre estos las áreas coralinas.

Figura 16

Distribución de intensidades acústicas acuerdo el tipo de fondo en el software Caris Hips and Sips.



Fuente: propia.

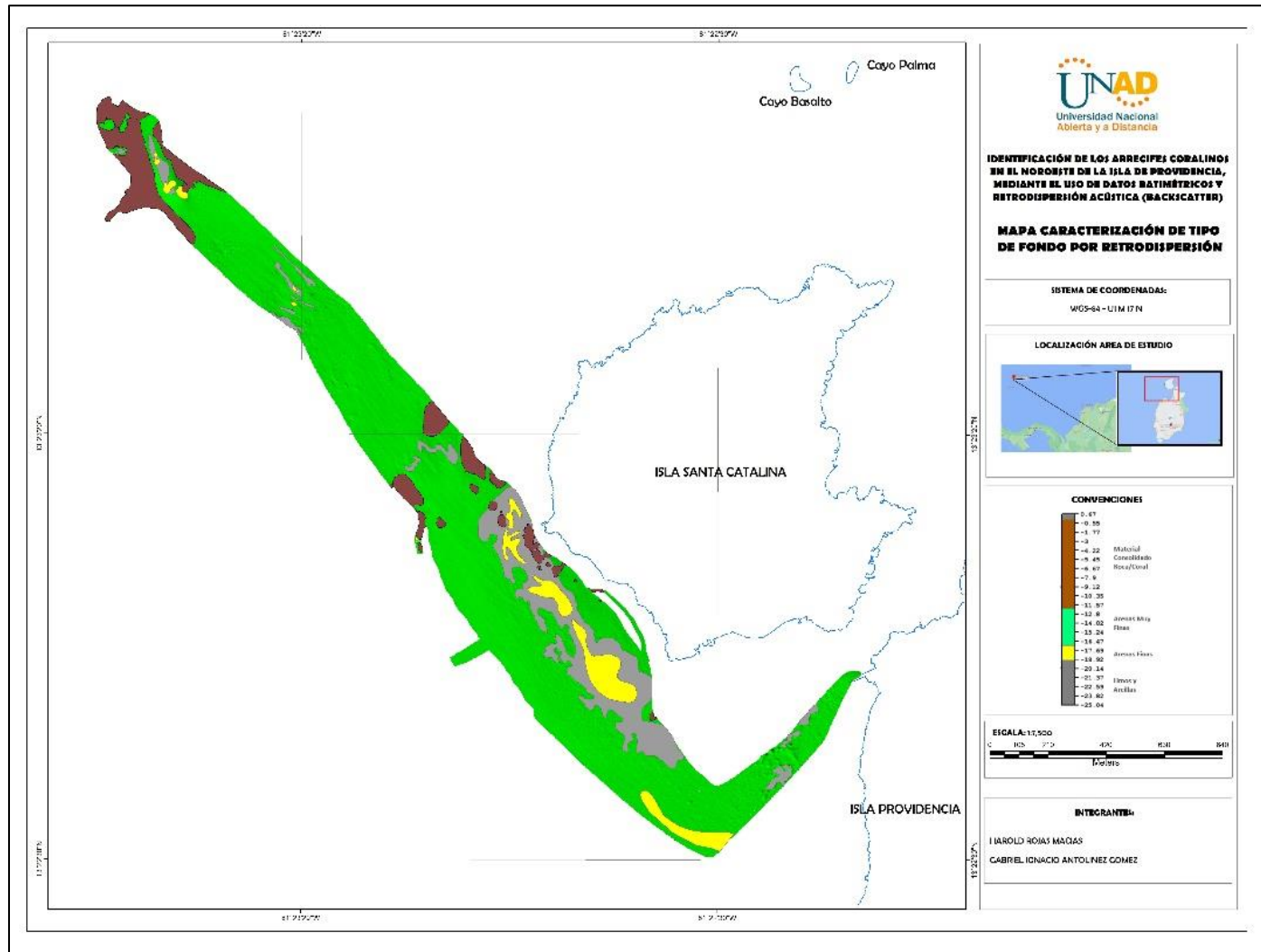
Nota: En la figura se evidencian los resultados obtenidos en procesamiento de datos a través del software Caris Hips and Sips, permitiendo caracterizar el fondo marino del área de estudio.

Análisis del mapa batimétrico.

De acuerdo con la figura 17 el área de estudio es de 1.124.433,92 metros cuadrados (1,12 kilómetros cuadrados), en la zona central y suroeste del área de estudio se encuentra la mayor parte de arrecifes coralinos correspondiente a un área de 103.518,21 metros cuadrados (10% del área levantada), además, gran parte de la zona norte y sureste está dominada por arenas finas y muy finas.

Figura 17

Mosaico de caracterización de tipo de fondo marino.



Fuente: propia.

A partir de estos mapas se identificaron las geformas asociadas con arrecifes coralinos, información que coincide con las inspecciones submarinas realizadas en la zona por los buzos científicos, en el desarrollo de la expedición Seaflower 2019 (figura 18). Finalmente se logra ejecutar de forma coherente y coordinada el análisis del mapa cartográfico de las zonas coralinas en el noroeste de Isla Providencia con base en los datos batimétricos y dar cumplimiento al tercer objetivo específico planteado para el proyecto.

Figura 18

Verificación de arrecifes coralinos con Buzos.



Fuente: Comisión Colombiano del Océano, 2019.

Nota: Imagen evidenciando la verificación por parte de uno de los buzos biólogos participantes en la expedición, confirmando así la presencia in situ de arrecifes de coral

Luego de validar la investigación, se estableció comunicación con las entidades nacionales encargadas de elaborar los mapas de Colombia y la cartográfica náutica Nacional, para solicitar la verificación y validación de la información, y poder graficar de forma específica estas zonas de arrecifes coralinos como áreas protegidas, permitiendo así la protección y conservación de estas importantes especies marinas.

Las fuentes consultadas referente a trabajos similares en otros países, nos permiten corroborar la importancia del presente trabajo de investigación, porque los datos batimétricos recolectados para fines cartográficos específicamente, pueden ser utilizados con sus productos derivados, para la protección del medio ambiente marino, no solo en la Isla de Providencia, sino también en las demás zonas que disfrutan de arrecifes coralinos, beneficiando a los Colombianos y promoviendo el desarrollo de nuestro País.

Conclusiones

Los datos batimétricos recolectados en el sector noroccidental de Isla Providencia y su respectivo procesamiento nos permiten caracterizar zonas coralinas en menor tiempo, con menor esfuerzo y con mayor precisión, que no sería posible identificar con otros tipos de herramientas.

A partir de los mapas generados se lograron identificar geoformas asociadas a arrecifes coralino en la zona central del levantamiento y en la parte norte, demostrando la efectividad y eficiencia a la hora de identificar formaciones coralinas en el área de estudio.

El empleo de la ecosonda multihaz para georreferenciar el sustrato del arrecife de coral, no es afectado por la profundidad del agua, la visibilidad, penetración de luz, ni el tiempo. Por lo tanto, se concluye como una mejor alternativa frente al método convencional de línea de transecto e imágenes de satélite en términos de tiempo, costo invertido y los resultados obtenidos especialmente para investigaciones a gran escala.

Es posible identificar las firmas acústicas de diferentes tipos de materiales, tales como depósitos de sedimentos blandos y coral duro, diferencias en pendientes y fiel representación geoespacial del área y los elementos estudiados.

Este trabajo representa una evidencia más de que las ecosondas son una buena metodología para evaluar la distribución de arrecifes, sobre todo en áreas tan alejadas de las zonas costera y de difícil acceso, apoyando la generación de planes e instrumentos para la protección, conservación y preservación de esta área marina protegida.

Bibliografía

1991, C. P. (1991). *Capítulo 3. De los derechos colectivos y del ambiente. Artículo 79.*

A. Abril-Howard, C. T. (2012). Primera aproximación al conocimiento de las comunidades coralinas de los complejos arrecifales de Serranilla, Bajo Alicia y Bajo Nuevo – Colombia, sección norte de la Reserva de Biósfera Seaflower, Caribe Occidental. *Ciencias Marinas y Costeras.*

Andrade-Amaya. (2021). Interpretación de imágenes de sonar de barrido lateral y de sonda multihaz sobre anomalías culturales en la bahía de Cartagena. *Boletín científico CIOH.*

Ariza , a., & Ramirez, H. (2014). Modelo Batimétrico derivado de imágenes Landsat ETM+ en zonas de arrecifes tropicales. *Revista Cartográfica.*

Ariza, A., & Ramírez, H. (2014). Modelo Batimétrico derivado de imágenes Landsat ETM+ en zonas de arrecifes tropicales. *Revista Cartográfica.*

Brown, C., & Blondel, P. (2009). The application of underwater acoustics to seabed habitat mapping. *Applied Acoustics*, 10, 1241. doi:https://people.bath.ac.uk/pyspb/research/selected_publications/APAC_BrownandBlondel_inpress2008.pdf

Buckland, S.T., Rexstad, E.A., Marques, T.A. & Oedekoven, C.S. (2015) Distance sampling: methods and applications, Springer, New York. 277 pp

Comisión Colombiana del Océano. (2007). *Política Nacional del Océano y los Espacios Costeros (PNOEC)*. Bogotá: JL Impresores LTDA.

Comisión Colombiana del Océano. (2015). *Reserva de Biósfera Seaflower.*

Comisión Colombiana del Océano. (7 de 10 de 2019). *Expedición Seaflower 2019.*

- Congreso de la República. (1993). *Ley 99 de 1993. por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan.*
- Congreso de la República. (1994). *Ley 165 de 1994. Por medio de la cual se aprueba el "Convenio sobre la Diversidad Biológica", hecho en Río de Janeiro el 5 de junio de 1992.*
- Congreso de la República. (2019). *Ley 1955 de 2019. Por el cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 pacto por Colombia, pacto por la equidad.*
- Costa, B., Battista, T., & Pittman, S. (2009). Comparative evaluation of airborne LiDAR and ship-based multibeam SoNAR bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1082-1100.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.015>
- Dávila Newman, G., (2006). El razonamiento inductivo y deductivo dentro del proceso investigativo en ciencias experimentales y sociales. *Laurus*, 12(Ext), 180-205.
- Departamento Nacional de Planeación. (2021). *Documento CONPES 4050 del 2021. Política para la consolidación del Sistema Nacional de Áreas Protegidas SINAP.* Bogotá.
- Díaz, J., Barrios, L., Censales, M., Garzón-Ferreira, J., Geister, J., López-Victoria, M., . . . Zea, S. (2000). *Áreas coralinas de Colombia.* Santa Marta: Serie Publicaciones Especiales No. 5.
- Díaz, M. (2015). Afectación y protección. *Verbum*, 10(10), 95-116.
- DIMAR. (2019). capítulo J Isla de Providencia y Santa Catalina. En DIMAR, *Derrotero de las costas y áreas insulares del Caribe y Pacífico Colombianos* (págs. J-1, J-30). DIMAR.

- DIMAR. (2020). *Climatología puertos del caribe Colombiano*. DIMAR.
- DNP. (2014). *Bases para el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018, Todos por un nuevo país, Paz, Equidad y Desarrollo*. Bogotá.
- Garzón-Ferreira, J. (1997). Arrecifes Coralinos: ¿Un tesoro camino a la extinción?
- Geister, J., & Díaz, J. (2007). *Ambientes arrecifales y geología de un archipiélago oceánico: San Andrés, Providencia y Santa Catalina (mar Caribe, Colombia) con guía de campo*. Ingeominas.
- Guarderas, A., Hacker, S., & Lubchenco, J. (2008). Estado Actual de las Áreas Marinas Protegidas en Latinoamérica y el Caribe. *Conservar Biol*, 22, 1630 - 1640.
doi:<https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.01023.x>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C. y Baptista-Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación - sexta edición.
icoclinicayaplicadas/files/2013/06/Metodolog%C3%ADa-de-la-Investigaci%C3%B3n.pdf
- Hughes-Clarke, J. (2018). Multibeam Echosounders. *Submarine Geomorphology*.
- INVEVAR. (2010). *Corales Escleractinios de Colombia*.
- INVEVAR. (2016). *Atlas de la Reserva de Biósfera Seaflower Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*.
- INVEVAR. (2020). . *Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia, 2019*. Serie de Publicaciones Periódicas No. 3.
- J. Jackson, M. D. (2014). *Status and Trends of Caribbean Coral Reefs: 1970-2012*.
- J. Tarrío-Saavedra, N. S.-C. (2017). SEABED CLASSIFICATION USING SUPERVISED FUNCTIONAL DATA ANALYSYS TECHNIQUES. *tecni Acustica*.

- J.H. Fosså, B. L. (2005). Mapping of Lophelia reefs in Norway: experiences and survey methods. En *Cold-Water Corals and Ecosystem* (págs. 359-391).
- K. Colbo, T. R. (2014). A review of oceanographic applications of water column data from multibeam echosounders. *Estuarine Coastal and Shelf Science*.
- Kenny, A., Cato, I., Desprez, M., Fader, G., Schüttenhelm, R., & Side, J. (2003). An overview of seabed-mapping technologies in the context of marine habitat classification. *ICES Journal of Marine Science*, 60, 411-418.
- Kongsberg. (s.f.). User manual: EM 2040P MKII Multibeam echo sounder
- MMA-Ministerio del Medio Ambiente. (2001). *Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los Espacios Oceánicos y las Zonas Costeras de Colombia -PNAOCI-*. (p. S.-U. INVEMAR, Ed.) Colombia: Panamericana Formas e Impresos S.A.
- Monroy Silvera J., A. C. (2016). Aproximación a una metodología para la generación de productos de backscatter con la infraestructura tecnológica del Servicio Hidrográfico Nacional (SHN- CIOH). *Boletín Científico CIOH*.
- Mosca, F., Matte, G., Lerda, O., Naud, F., Charlot, D., Rioblanco, M., & Corbières, C. (2016). Scientific potential of a new 3D multibeam echosounder in fisheries and ecosystem research. *Fisheries Research*, 178, 130-141.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.fishres.2015.10.017>
- Organización Hidrográfica Internacional-IHO. (2018). *REGULATIONS OF THE IHO FOR INTERNATIONAL (INT) CHARTS AND CHART SPECIFICATIONS OF THE IHO*. Monaco.
- P. Dartnell, J. G. (2004). Predicting Seafloor Facies from Multibeam Bathymetry and Backscatter Data. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*.

- Parnum, I., Siwabessy, P., & Gavrilov, A. (2004). Identification of seafloor habitats in coastal shelf waters using a multibeam echosounder. *Proceedings of Acoustics*.
- Portz, L., Portantiolo, R., Villate-Daza, D., & Fontan-Bouzas, A. (2022). Where does marine litter hide? The Providencia and Santa Catalina Island problem, SEAFLOWER Reserve (Colombia). *Science of The Total Environment*, 813, 151878.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151878>
- Prato, J., & Newball, R. (2015). *Aproximación a la valoración económica ambiental del departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina – Reserva de la Biósfera Seaflower*. Bogotá: Secretaría Ejecutiva de la Comisión Colombiana del Océano SECCO, Corporación para el desarrollo sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina -CORALINA.
- Presidente de la República de Colombia. (1974). *DECRETO 2811 DE 1974. Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*.
- Reuss Strenzel, G. M. (2004). *Caracterización del paisaje sumergido costero para la gestión de áreas marinas protegidas*. Tesis doctoral.
- Rodrigo, C. (2006). Caracterización y clasificación de la bahía de Puerto Montt mediante batimetría de multihaz y datos de backscatter. *Investigaciones Marinas*.
71782006000100007&script=sci_arttext&tlng=pt
- Rojas-Higuera, P., & Pabón-Caicedo, J. (2015). Sobre el calentamiento y la acidificación del océano mundial y su posible expresión en el medio marino costero colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat*, 39(151), 201-217.
doi:<http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.135>

- S. El-Gharabawy, M. E.-W. (2017). Seafloor Characterization and Backscatter Variability of Coral Reef by Different Acoustic Techniques, El-Gouna, Red Sea, Egypt. *Journal of Oceanography and Marine Research*.
- S. Zieger, S. S. (2009). Mapping reef features from multibeam sonar data using multiscale morphometric analysis. *Science Direct*.
- Seaflower Foundation. (2019). *Seaflower Foundation*.
- Silveira, L., Jacomo, A.T. & Diniz-Filho, J.A.F. (2003) Camera trap, line transect census and track surveys: a comparative evaluation. *Biological Conservation*, 114, 351-355.
- Stachowitsch, M. (2003). Research on intact marine ecosystems: a lost era. *Marine Pollution Bulletin*, 46, 801-805.
- T. Medialdea, L. S.-M.-P. (2008). Multibeam backscatter as a tool for sea-floor characterization and identification of oil spills in the Galicia Bank. *Science Direct*.
- T.C. Gaida, T. A. (2020). Monitoring underwater nourishments using multibeam bathymetric and backscatter time series. *Coastal Engineering*.
- Tania Guffante Naranjo, F. G. (2016). Investigación Científica: El proyecto de Investigación.
- Thomas, L., Buckland, S., Burnham, K., Anderson, D., Laake, J., Borchers, D. & Strindberg, S. (2002) Distance sampling. Pp 544–552. En: *Encyclopedia of Environmetrics*. A.El-Shaarawi & W. Piegorchs (eds). John Wiley & Sons, Chichester
- Zieger, S. (2007). *Biotic Classification of Multibeam Sonar Data of a Coral Reef in the Great Barrier Reef, Australia*. Tesis de grado.