

ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO DE LA ISLA CAYO DE BAJO NUEVO CON BASE
EN IMÁGENES DE SENSORES REMOTOS

Teniente de Fragata

ORTEGÓN VEGA JUAN RICARDO

ESCUELA NAVAL DE CADETES “ALMIRANTE PADILLA”

FACULTAD DE OCEANOGRAFÍA FÍSICA

PROGRAMA DE OCEANOGRAFÍA FÍSICA

CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C., COLOMBIA

2016

ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO DE LA ISLA CAYO DE BAJO NUEVO CON BASE
EN IMÁGENES DE SENSORES REMOTOS

Trabajo de grado para optar al título profesional de Oceanógrafo Físico

Teniente de Fragata

ORTEGÓN VEGA JUAN RICARDO

Director: M.Sc. Fernando Afanador Franco

Ingeniero Catastral y Geodesta

ESCUELA NAVAL DE CADETES “ALMIRANTE PADILLA”

FACULTAD DE OCEANOGRAFÍA FÍSICA

PROGRAMA DE OCEANOGRAFÍA FÍSICA

CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C., COLOMBIA

2016

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS	9
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN.....	12
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.1 Antecedentes del problema	18
1.2 Descripción general del problema.....	19
1.3 Pregunta de investigación	20
CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN	20
CAPÍTULO 3. ÁREA DE ESTUDIO	21
4.1 Mareas en el Mar Caribe	22
4.2. Circulación superficial	25
3.1 Isla Cayo de Bajo Nuevo.....	26
3.1.1 Morfodinámica de playas	29
3.1.3 Balance de erosión y sedimentación de Bajo Nuevo	30
CAPÍTULO 4. OBJETIVOS	31
4.1 Objetivo general	31
4.2 Objetivos específicos	31
CAPÍTULO 5. MARCO TEÓRICO	33
5.1 Atolones de arrecife (<i>atoll reefs</i>).....	37
5.1.1. Morfología superficial de los atolones	40
5.2 Arrecife de barrera (<i>barrier reef</i>).....	42
5.3 Arrecifes franjeantes (<i>fringing reefs</i>)	43
5.4 Clasificación por Fairbridge (1950)	44
5.5 Clasificación por Maxwell (1968)	45
5.6 Clasificación por Hopley (1982).....	47
5.7 La percepción remota	49

CAPÍTULO 6. METODOLOGÍA	52
6.1 Materiales y métodos.....	53
6.1.1 Recopilación de la información	53
6.1.2 Procesamiento de la información	54
6.1.2.1 Sistema único de referencia horizontal	54
6.1.2.2 Tratamiento digital de imágenes	55
6.1.2.3 Modelo batimétrico	56
6.1.2.4 Interpretación visual de imágenes y análisis de modelos digitales del terreno.....	57
6.1.2.5 Generación de shapefile	59
6.1.2.6 Asignación de Atributos.....	59
6.1.2.7 Trabajo de Campo	60
6.1.2.8 Generación de la base de datos.....	61
6.1.2.9. Generación de cartografía geomorfológica digital e impresa (escala 1:30.000).....	61
6.1.2.10Generación de metadatos.....	62
7 RESULTADOS	63
8. CONCLUSIONES	72
RECOMENDACIONES	74
BIBLIOGRAFIA	75
ANEXOS	83

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 curva espectral de diferentes bentos de arrecifes. Modificado de Xu & Zhao, 2014.	15
Figura 2 División geomorfológica del Caribe colombiano. (CIOH-DIMAR, 2009).	22
Figura 3 La marea astronómica en los Cayos de San Andrés inferida desde la observación de la modelación realizada en el Servicio Francés de Hidrografía para los Puertos de Cartagena, Cristóbal, Puerto Príncipe y Puerto Cortés (ENAP, Colciencias, 2010).	24
Figura 4 Corriente superficial en la región atlántica tropical noreste (Andrade, 2000)	26
Figura 5 Posición geográfica de la Isla Cayo de Bajo Nuevo	27
Figura 6 Fotografías tomadas por la Regional de Inteligencia Naval del Caribe (RINCA), agosto de 2008, en Bajo Nuevo	28
Figura 7 Altura de ola significativa en Bajo Nuevo en condiciones medias de oleaje.....	29
Figura 8. Resultado del modelo de balance erosión/sedimentación para un régimen medio del oleaje actual	30
Figura 9. Clasificación básica de arrecifes por Charles Darwin (1842).....	36
Figura 10. Distribución global de atolones.....	37
Figura 11 Etapas en la creación de un atolón. Modificada de http://www.wpclipart.com ...	38
Figura 12. Clasificación de atolones según Wiens (1962) en Woodroffe & Biribo (2011).	41
Figura 13. Morfología de <i>barrier reef</i>	42
Figura 14. Clasificación arrecife franjeante (<i>fringing reef</i>).....	44
Figura 15: isla expuesta de antiguos materiales de arrecife de coral	45
Figura 16. Clasificación de atolones según Hopley (2011).....	47
Figura 17 Zonificación del arrecife de coral, de acuerdo con las clasificaciones según Darwin (1842), Wiens (1962) y Hopley (2011).	49
Figura 18. Flujograma del procesamiento de la información.	52
Figura 19. Sistema de coordenadas de proyección asignado al shapefile atolón de Isla Cayo de Bajo Nuevo	54

Figura 20. Superior izquierda: imagen Landsat 8 sin tratamiento delimitado según Darwin. Superior derecha: imagen tratada digitalmente con los procedimientos descritos en la tabla 3 imagen inferior batimetría 3D del área.....	56
Figura 22 Izquierda imagen datos batimétricos, Imagen derecha: Imagen Landsat 8 banda 2, sin tratamiento digital. Central: Imagen tratada digitalmente con los procedimientos descritos en la tabla 3. Se realiza la interpretación de la imagen de acuerdo Wiens línea color naranja	58
Figura 23 Interpretación de imagen de acuerdo con Hopley (detallado); imagen superior izquierda línea verde fondo negro landsat 8 banda 2, Imagen superior derecha datos batimétricos con profundidades con intervalos de 1 metro, imagen inferior central con los procedimientos descritos en la tabla 4.....	58
Figura 24. Perfil del transecto que pasa desde la laguna hasta la cresta algal del atolón de Bajo Nuevo, corroborando las profundidades	59
Figura 25 Asignación de atributos al shapefile de la clasificación según Wiens (1962).	60
Figura 26 Trabajo de campo área general de Bajo Nuevo, rutas y maniobras realizadas por el ARC Malpelo aguas profundas.....	60
Figura 27 Geodatabase de las zonificaciones del atolón Bajo Nuevo.....	61
Figura 28 Imagen Landsat 8 con tratamiento, donde se observa la diferenciación de colores de un tono naranja a un tono amarillo y verde claro.	63
Figura 29 batimetría del área general de bajo Nuevo, realizado en trabajo de campo mes de septiembre de 2016 CIOH	64
Figura 30 Atolón Bajo Nuevo de acuerdo con clasificación según Darwin (1842).....	64
Figura 31 Atolón Bajo Nuevo, de acuerdo con la clasificación según Darwin (1842).	65
Figura 32 Delimitación del outer reef, arrecife exterior; a partir de la imagen.....	66
Figura 33 Delimitación del Reef Rim (arrecife de borde), y Lagoon (laguna) utilizando el MBT y la graficación de un transecto del mismo. Se observa el mayor grado de inclinación de la geoforma Reef Rim y el inicio de la laguna en la gráfica del perfil.	66
Figura 34 Clasificación de las unidades geomorfológicas en el atolón Bajo Nuevo, de acuerdo al sistema de clasificación según Wiens (1962).	67

Figura 35 Delimitación del reef crest (cresta arrecifal), con base en la aerofotografía digital, obteniendo el polígono respectivo en color rojo. Delimitación del algal crest (Cresta algal), con base en la aerofotografía digital, obteniendo el polígono de la zona en color verde.....	69
Figura 36 Clasificación según Hopley (2011) en el atolón Bajo Nuevo.	70

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Origen de la informacion recolectada</i>	53
Tabla 2. Caracteristicas de la informacion recolectada <i>de sensores remotos utilizados</i>	54
Tabla 3. <i>Caracteristicas digitales para el tratamiento de la información</i>	55
Tabla 4. <i>Clasificación de Darwin: perímetro y área</i>	70
Tabla 5. <i>Clasificación de Wiens: perímetro y área</i>	71
Tabla 6. <i>Clasificación de Hopley: perímetro y área</i>	71

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de grado fue explicar la conformación geomorfológica de la Isla Cayo de Bajo Nuevo, que pertenece al complejo de Islas Cayos del Norte en el departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Colombia. Para tal fin, se hizo necesario realizar un análisis geomorfológico de la isla, con base en imágenes de sensores remotos, como complemento al estudio desarrollado por la Dirección General Marítima de Colombia (DIMAR), para la determinación del máximo y mínimo nivel del mar producido por la marea astronómica en las Islas Cayos del Norte.

El análisis fue posible gracias a los estudios realizados en las áreas evaluadas por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar), la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Coralina), entre otras instituciones colombianas, así como a la consulta bibliográfica de investigaciones realizadas con sensoramiento remoto sobre áreas con presencia de arrecife de coral.

Uno de los resultados más importantes fue la delimitación del arrecife de coral que bordea a la Isla Cayo de Bajo Nuevo, denominado *reef crest* (cresta arrecifal); acuerdo clasificación según Hopley (2011), con un área de 31.191 m² y un perímetro de 7.322 m. Esta delimitación del arrecife de coral constituye un elemento técnico importante para el Estado Colombiano, con el cual se puede solicitar ante la Corte Internacional de Justicia, la

modificación en la delimitación del mar territorial, zona contigua y zona económica exclusiva de la Isla Cayo de Bajo Nuevo.

El trabajo comprende dos partes centrales: en primer lugar, la recopilación de imágenes de sensores remotos, aerofotografías aéreas digitales, batimetría con base en imágenes Landsat8 y la recopilación de estudios existentes en el área de estudio; en segundo lugar, el tratamiento digital de imágenes, la generación del Modelo Digital de Terreno (MDT) y del Modelo Batimétrico Tridimensional (MBT). Esto a través de Sistemas de Información Geográfica y el uso del software ArcGIS 10.1, para obtener cartografía digital geomorfológica de detalle a escala (1:30.000) de la Isla Cayo de Bajo Nuevo, así ^X elementos adicionales en la generación de conocimiento y de argumentos técnicos para la defensa de Colombia ante la Corte Internacional de Justicia en conflictos actuales o potenciales por el territorio marítimo.

INTRODUCCIÓN

A través de los años, se han venido desarrollando diferentes estudios e investigaciones en las islas del departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina por diferentes instituciones colombianas, tales como el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar), la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Coralina), entre otras. Sin embargo, se identificó la necesidad de actualizar la información relacionada con las características geomorfológicas y oceanográficas en detalle de la Isla Cayo de Bajo Nuevo, que pertenece al complejo de Islas Cayos del Norte del departamento, teniendo en cuenta que actualmente es de gran importancia contribuir a la recopilación de información que demuestre ante diversos entes internacionales cuáles y cómo son los espacios marítimos de Colombia.

Con el desarrollo de este proyecto se pretende conocer, a través de imágenes satelitales y datos de batimetría, la distribución geomorfológica de la Isla Cayo de Bajo Nuevo. Por tal razón, se hace relevante conocer los tipos de clasificación de los arrecifes de coral.

Los arrecifes de coral son los ecosistemas de mayor productividad y abundancia de especies en la Tierra. También se caracterizan por ser zonas ecológicas claves, de especial valor para mantener la productividad de los recursos marinos y un indicador importante del medio marino (Xu y Zhao, 2014, p. 11). Adicionalmente, son considerados como ecosistemas bentónicos de gran arquitectura y complejidad, cuya rugosidad es el principal parámetro que define la hidrodinámica. En estos términos, la función principal de los

arrecifes coralinos es la difusión de la energía de la ola, a través de la presión ejercida por el agua sobre el fondo rugoso, el cual le permite actuar como defensa natural costera (Ruiz de Alegría-Arzaburu, Mariño-Tapia, Enriquez, Silva y González-Leija, 2013).

La aparición y el desarrollo de la tecnología de sensores remotos han proporcionado una nueva forma de visión regional sobre los ecosistemas de arrecifes de coral, que ahora se caracterizan con rapidez, mediante el rastreo de un área relativamente grande, con observaciones repetibles y, por lo tanto, se convierte en un importante medio complementario de los métodos de producción convencionales (batimetría láser, discriminación acústica de la tierra, QTC, EchoPlus, Ground Truthing, Accuracy Assessment). Dentro del sensoramiento remoto de los ecosistemas de arrecifes, se incluye la supervisión de propiedades ecológicas y ambientales, que se lleva a cabo principalmente para la vigilancia de los arrecifes de coral, con el fin de obtener información sobre su distribución, geomorfología, composición bentónica del sustrato etc. (Xu y Zhao, 2014, p. 11).

La aplicación de sensores remotos para el manejo de arrecifes de coral incluye mapeo cartográfico de líneas de base, mapas geomorfológicos de arrecife y mapas de hábitat arrecifal. Generalmente, el objetivo de los mapas más detallados requiere las más sofisticadas técnicas de sensores remotos. La mayoría de montajes de sensores está disponible para proveer la información sobre geomorfología de arrecifes e información ecológica limitada a la ubicación de los corales, arena, hábitat de algas y pastos marinos con un rango de exactitud desde 50% a 70% (Green, Mumby, Edwards y Clark, 2005).

Sobre la base de la separabilidad espectral de los diferentes tipos de arrecife o bentos, los sensores remotos se pueden utilizar para supervisar dos aspectos de arrecifes de coral: (1) la

medición de las propiedades ecológicas de los arrecifes y (2) la evaluación de la salud del ecosistema de los arrecifes de coral. En la primera parte, métodos ópticos de sensores remotos se utilizan ampliamente para el mapeo de la geomorfología de arrecifes y biotipos o hábitats. La investigación de zonificación geomorfológica ha demostrado ser una de las aplicaciones más exitosas, ya que las distintas zonas geomorfológicas están asociadas con las estructuras de la comunidad bentónica característica y ocurren en escalas espaciales de decenas a cientos de metros, que son susceptibles de detección remota de moderada a alta resolución (Xu y Zhao, 2014, p. 12).

En Colombia, en los últimos años, se han llevado a cabo diversos estudios enfocados a los arrecifes de coral. Ejemplo de ello es el trabajo realizado por Jaime Garzón-Ferreira y Juan Manuel Díaz, “The Caribbean coral reefs of Colombia” (2003); así mismo, cabe resaltar el libro *Áreas coralinas de Colombia* (2000), editado por Díaz y el Inveemar, que actualmente está adelantando una edición actualizada de la obra.

Por su parte, la investigación de Yamano et al. (2006) se concentró en el análisis a cinco bandas de diferentes sensores remotos, dentro de un estudio para la extracción de la línea de costa en ambientes de arrecife coralino (Majuro Atoll, Marshall Islands). Se compararon distintas regiones de longitud de onda (infrarrojo cercano [NIR] e infrarrojo de onda corta [SWIR]) y, así mismo, diferentes resoluciones espaciales (4 m, 15 m y 30 m). Los autores llegaron a la conclusión de que el sensor remoto TERRA ASTER Banda 3, es el más rentable (costo-precisión) para el mapeo y la extracción de la línea de costa en hábitats y ambientes de arrecifes de coral, teniendo en cuenta que la región de longitud de onda del infrarrojo cercano es donde los arrecifes de coral presentaron mayor reflectancia y, de igual

manera, que la precisión en la estimación de la línea de costa está directamente relacionada con la resolución espacial del sensor (Yamano et al., 2006, p. 12).

La fotografía aérea infrarroja puede ser usada para estimar cobertura de coral vivo en aguas someras (< 1 m profundidad) en piso de coral. Sin embargo, dadas las bajas restricciones de la altitud de la cobertura aérea de cada fotografía, este método es únicamente apropiado para áreas pequeñas (Green, Mumby, Edwards y Clark, 2005, p. 13).

Las características espectrales de los arrecifes de coral dependen generalmente de la absorción y dispersión de las propiedades de sustancias bentónicas. Las comunidades de arrecifes de coral están distribuidas en gran medida en mosaicos de coral, algas y arena. (Figura 1). Los corales y algas contienen clorofila y otros pigmentos fotosintéticos. Su magnitud y forma espectral muestran una cierta similitud y dependerán por sobre todo, de su absorción y de las características fluorescentes de la composición de diferentes

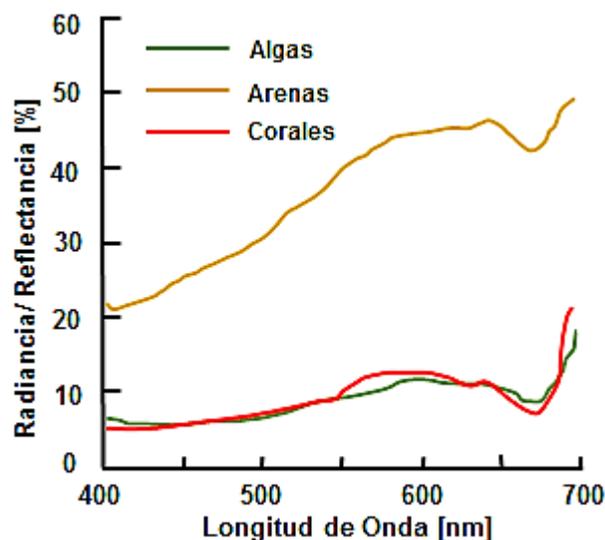


Figura 1 curva espectral de diferentes bentos de arrecifes. Modificado de Xu & Zhao, 2014.

Pigmentos. En contraste, los valores de curva espectral de arena son mayores. Hochberg y Atkinson (Xu y Zhao, 2014, p. 13).

Las características espectrales de los arrecifes de coral están también afectadas por una variedad de factores tales como la profundidad del agua, la calidad del agua y la geomorfología, además de la composición de pigmentos. En Contraste, los valores de curva espectral de arena son mayores. (Xu y Zhao, 2014, p. 14).

La mayoría de los sensores remotos usados para la detección de arrecifes de coral pertenecen a la categoría de los sensores remotos de aguas someras. La óptica en aguas poco profundas se observa cuando la luz del sol brilla en el agua, parte de la luz penetra y llega a la superficie de los arrecifes coralinos, otra es reflejada, otra es absorbida o se presenta una excitación y se ve como fluorescencia (Xu y Zhao, 2014, p. 14).

La detección remota de los arrecifes coralinos se utiliza principalmente para mapear su distribución y su geomorfología. En el proceso de formación de estos ecosistemas, muchos muestran algunas zonas geomorfológicas comunes, debido al efecto del medio ambiente físico marino. Las zonas típicas incluyen el arrecife de borde, el arrecife plano y la laguna arrecifal, entre otros. Los arrecifes de coral están cubiertos en general por un gran número de corales y algas que tienen absorción selectiva de la luz. Las zonas geomorfológicas se distribuyen a menudo a diferentes profundidades, cubiertas de diferentes biomas. Como resultado de ello, la identificación efectiva de los arrecifes de coral y de su geomorfología puede realizarse a partir del color, forma, textura y otras características de imágenes de sensores remotos. En comparación con los biomas, la distribución de zonas geomorfológicas de arrecifes de coral es, por lo general, caracterizada con grandes escalas

espaciales. Algunos datos en sensores remotos ópticos de resolución moderada y alta pueden ser aplicados en el monitoreo incluyendo (landsat) TM, ETM, SPOTHRV, ASTER, IKONOS, Quickbird, entre otros (Xu y Zhao, 2014, p. 16).

El sistema de clasificación de los arrecifes coralinos mediante el uso de sensores remotos considera dos aspectos: las zonas geomorfológicas y los tipos de sustrato. No obstante, en ciertas investigaciones, las zonas geomorfológicas de la mayoría de arrecifes de coral en sensores remotos se categorizan habitualmente así: arrecife de borde, arrecife de fondo, arrecife posterior, laguna arrecifal, etc., y los tipos de sustrato son clasificados como coral, algas, arena, etc. (Xu y Zhao, 2014, p. 16).

La extracción de información mediante la tecnología de sensores remotos sobre los arrecifes coralinos incluye dos formas: (1) enfoque del sensor, basado en análisis de la imagen y estadísticas; (2) enfoque del arrecife, basado en características espectrales de diferentes sustratos bentónicos. Un método tradicional en el primero de ellos es el uso de espectro de la imagen estadística para clasificación supervisada y no supervisada, en donde muchos estudiosos no solo consideran la información espectral de la imagen, sino también añaden textura, contexto y autocorrelación espacial estadística en el análisis debido a los diferentes tamaños de parches de los biomas (Xu y Zhao, 2014, p. 16).

La condición ecológica y el futuro “estado de salud” de los arrecifes de coral son objeto de un intenso debate científico. En estos debates se hace un reconocimiento al papel crucial de la estructura de los arrecifes como rasgo geomorfológico tridimensional que es, a la vez, un producto sostenido de carbonato y una fuente del sedimento detrítico. Por lo tanto, la estructura del arrecife no solo proporciona la base para la coraza del coral vivo, sino que

también permite el desarrollo de una amplia gama de formaciones sedimentarias, incluyendo las islas del arrecife de coral. El entendimiento de las transiciones de la estructura geomorfológica y la estabilidad de los arrecifes es una cuestión de importancia fundamental, pero requiere de un buen entendimiento sobre los controles y procesos dinámicos que los afectan, la evolución de los arrecifes de relieve y su cambio a través de múltiples escalas temporales y espaciales (Kench, 2014).

Los arrecifes de coral han sido objeto de interés científico en el último siglo y medio. Darwin (1842) realizó descripciones sobre las formas de arrecifes básicos (franja, barrera, atolón y arrecifes), términos de uso común hoy en día. En Australia, Fairbridge (1950, 1967, como se cita en Hopley, 2011, p. 17) se centró principalmente en la Gran Barrera de Coral, inicialmente en la línea de borde, pero luego elaboró una exhaustiva y amplia descripción de la totalidad del sistema de la región de Australia. La clasificación es un procedimiento analítico que denota la tipología de los arrecifes de coral en función de factores tales como la morfología, la edad, el tamaño, entre otros (Hopley, 2006, 2011).

Capítulo 1. Planteamiento del problema

1.1 Antecedentes del problema

La delimitación de los territorios insulares en el Mar Caribe colombiano aún no ha sido determinada en forma definitiva, debido en parte a la confianza del Gobierno Nacional en el tratado Esguerra-Bárceñas firmado en 1928 (Pantojas, 1928, como se cita en Mantilla, 2009), en el cual Colombia y Nicaragua aceptaron y establecieron el límite fronterizo

marítimo entre ambos países. El 6 de diciembre del año 2001, Nicaragua desconoció los títulos de soberanía colombianos firmados en este tratado y presentó una demanda ante la Corte Internacional de Justicia. Las consecuencias se reflejaron en el fallo emitido por la Corte el 19 de noviembre de 2012, donde decidió que la línea de la frontera marítima que delimita la plataforma continental y las zonas económicas exclusivas de la República de Nicaragua y de la República de Colombia, se guiará por líneas geodésicas, conectando los puntos con las coordenadas que se estipularon en el fallo hasta que alcance el límite de 200 millas náuticas desde las líneas de base desde las cuales se mide el mar territorial de Nicaragua.

1.2 Descripción general del problema

Colombia requiere de argumentos técnicos debidamente sustentados tales como información actualizada sobre las características geomorfológicas y oceanográficas de detalle, fundamentales para sustentar ante la Corte Internacional de Justicia el carácter de las Islas Cayos del Norte, de acuerdo con los conceptos establecidos por las Naciones Unidas sobre el derecho del mar y los lineamientos técnicos de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI). Mediante esta información, Colombia pretende demostrar sus límites marítimos reales, con el fin de revertir el mencionado fallo. De acuerdo con lo anterior, se hace necesario determinar la conformación geomorfológica de las Islas Cayos del Norte y generar su cartografía correspondiente como un elemento adicional de generación de conocimientos y de argumentos técnicos para la defensa ante la Corte Internacional de Justicia.

1.3 Pregunta de investigación

¿Cuáles son las características geomorfológicas de la Isla Cayo de Bajo Nuevo?

Capítulo 2. Justificación

Con base en la sentencia de la Corte Internacional de Justicia (CIJ) del día 19 de noviembre de 2012, donde se falló en contra de Colombia en el litigio por los espacios marítimos con Nicaragua, se inició una labor prioritaria con el fin de demostrar que nuestro país no solo cuenta con las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, sino también con seis islas más, y de esta manera, controvertir dicho fallo y mantener los límites marítimos actuales.

Para lo anterior, la Dirección General Marítima (DIMAR), a través del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), se encuentra recopilando la información oceanográfica y de sensores remotos para establecer los puntos y líneas de base, con el objeto de sustentar ante la Corte Internacional de Justicia (CIJ) el carácter de islas de los Cayos del Norte, de acuerdo con los conceptos establecidos por la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (Convemar).

En el marco de la fundamentación del carácter de islas de los Cayos del Norte que adelanta la DIMAR, el análisis geomorfológico de la Isla Cayo de Bajo Nuevo que se llevará a cabo en la presente investigación, por medio de recopilación bibliográfica y procesamiento de la información actualizada existente, se constituye como un argumento técnico de importancia nacional para fortalecer la sustentación que el país presentará ante la CIJ. Este trabajo se

enmarca además en la línea de investigación de Oceanografía Física, con un eje temático centrado en la caracterización geomorfológica de la Isla Cayo mediante el estudio y el procesamiento de imágenes aéreas y satelitales.

Capítulo 3. Área de estudio

Las Islas Cayos del departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina están aparentemente relacionadas con el origen y la formación de la elevación de Nicaragua en el mar Caribe (Geister y Díaz, 2009). El esquema tectónico regional del fondo marino se caracteriza por zonas de fractura, siendo la más conspicua la fractura de San Andrés. Todas las islas, atolones y bancos coralinos del archipiélago, se originaron aparentemente a partir de volcanes dispuestos a lo largo de fracturas tectónicas de la corteza submarina, orientadas predominantemente hacia el NNE y el SW (Escuela Naval de Cadetes [ENAP], Colciencias, 2010).

Este es el único departamento de Colombia conformado por islas, atolones e islotes sobre una plataforma volcánica del occidente del mar de las Antillas (Figura 2), donde se encuentra uno de los sistemas arrecifales más productivos del Caribe (ENAP, Colciencias, 2010).

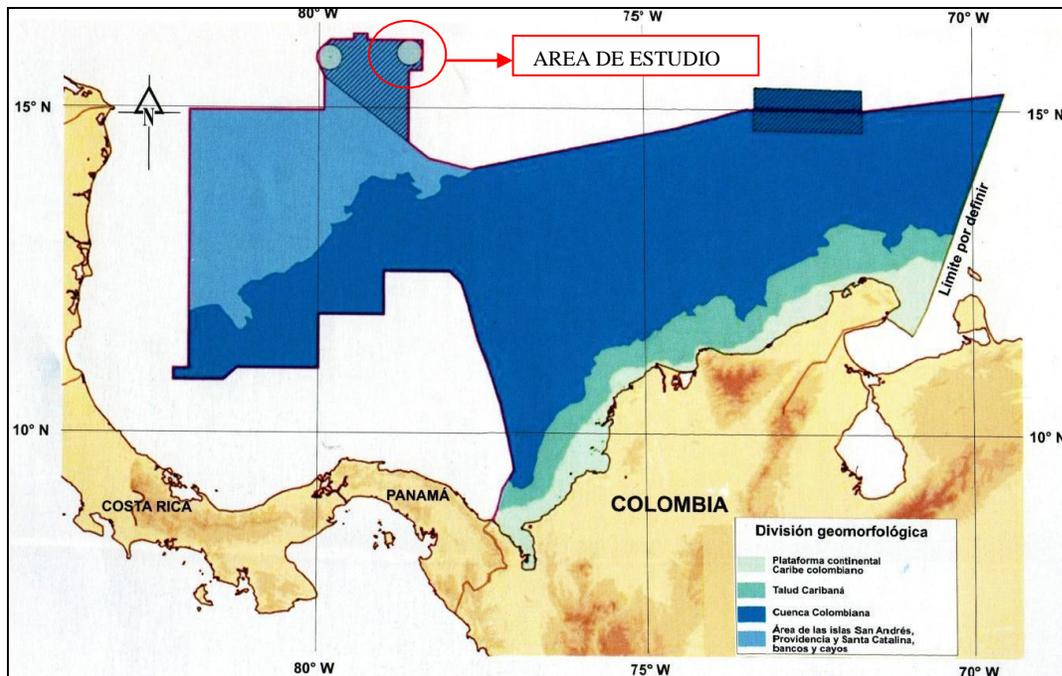


Figura 2 División geomorfológica del Caribe colombiano. (CIOH-DIMAR, 2009).

Un aspecto no menos importante para considerar aquí es el cambio sustancial que, en el año 2000, se generó respecto a cómo la Nación y el mundo concebían el departamento Archipiélago de San Andrés, ya que fue en ese entonces cuando se lo declaró como Reserva de la Biosfera Seaflower por la Unesco y, posteriormente, como Área Marina Protegida (AMP) Seaflower (65.000 km²) por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. De esta manera, Colombia entró a ser parte del 1.7% del mar del mundo que se encuentra bajo un esquema de protección.

4.1 Mareas en el Mar Caribe

La primera referencia significativa que se conoce con relación a la marea del Caribe colombiano, fue descrita por Wiedemann (1973), quien determinó que las mareas del Caribe son débiles, con un rango mareal que varía de 20 a 30 cm y rara vez excede los 50

cm, por lo cual, fue catalogada como micro mareal (rango < 2 m). La marea fue caracterizada como mixta, de tipo diurno y semidiurno, con cierta irregularidad. Otra referencia conocida se encuentra en Kjerfve (1981) el cual elaboró cartas de marea, utilizando información de varias estaciones de marea del Caribe. (Morales, 2004)

Para apreciar el rango de marea en el área de las Islas Cayos del Norte, la Escuela Naval Almirante Padilla (2010) utilizó datos de un ciclo lunar (28 días) de la marea astronómica de los cuatro puertos alrededor de los Cayos de San Andrés (Puerto Cortés - Honduras, Puerto Príncipe – Haití, Cristóbal – Panamá y Cartagena – Colombia). Obteniendo como resultado una variación mixta semi-diurna (dos pleamares y dos bajamares en un día) cuya amplitud varia en los cuatro puertos, siendo la máxima en Puerto Príncipe de alrededor de 50 cm y las más pequeñas en Cristóbal de alrededor de 30 cm. (Figura 3)

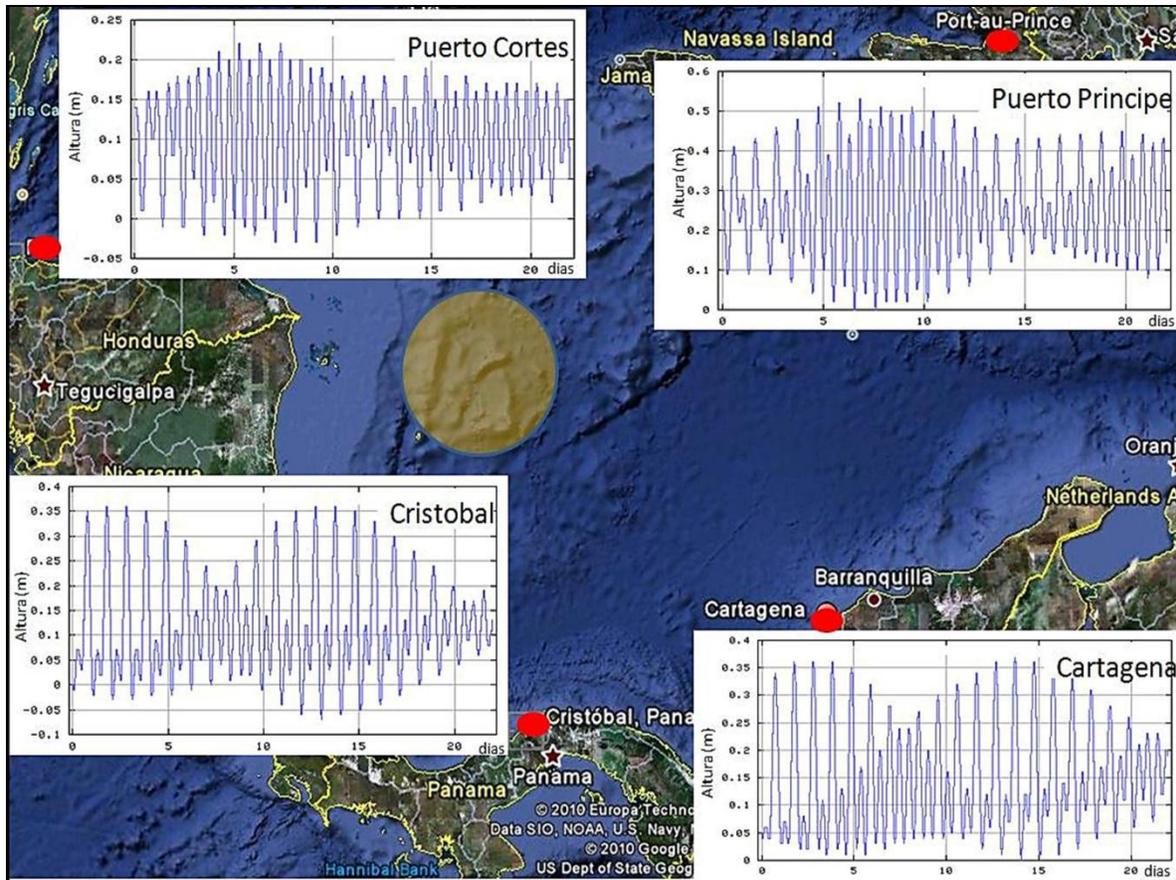


Figura 3 La marea astronómica en los Cayos de San Andrés inferida desde la observación de la modelación realizada en el Servicio Francés de Hidrografía para los Puertos de Cartagena, Cristóbal, Puerto Príncipe y Puerto Cortés (ENAP, Colciencias, 2010).

Especialmente en el área de las Islas Cayos del Norte, la marea astronómica es mixta semidiurna con una amplitud de alrededor de 30 cm; concordando con lo descrito por Wiedemann. Pero se debe tener en cuenta; que además de la marea astronómica, existen desviaciones del nivel del mar ocasionadas por la presión atmosférica, el desnivel estérico y las conocidas como ondas de tormenta (storm surge) que tienen tanta o más amplitud que la componente astronómica.

4.2. Circulación superficial

La característica principal de la circulación superficial en el área de las Islas Cayos del Norte, es la Corriente del Caribe en su viaje hacia el noroeste que en el sector presenta una variabilidad espacio-temporal importante a nivel de media escala relacionada con remolinos de media escala y meandros (Figura 4), con tamaños entre 100-500 km que viajan a lo largo del eje de esta corriente (Fu & Holt, 1983), con fluctuaciones tan fuertes como la corriente principal (Molinari, Splillane, Brooks, Atwood, & Duckett, 1981). Nystuen y Andrade (1993) reportaron estos giros anticiclónicos de aproximadamente 200 km de diámetro viajando en dirección al occidente a 30 cm/s en el Norte del Caribe.

Los anticiclones se deforman en su paso a la cuenca Caimán a través de los pasos entre las Islas Cayos del Norte y algunos se disipan entre ellos (Andrade, Barton, & Mooers, 2003). Estudios con boyas de deriva muestran que la parte de la Corriente del Caribe que sale hacia la Cuenca Caimán, tiene un núcleo dominante en el Paso Chibcha al sur de Serranilla; mientras que al sur de 14° N, la corriente empieza un gran giro ciclónico que rodea hacia el sur la costa centroamericana y la panameña hacia el Este hasta llegar a la costa colombiana donde se produce el giro hacia el Oeste a la altura de Bocas de Ceniza (Andrade, 2003). En las Islas Cayos del Norte la dirección predominante es hacia el noroeste, con mucha variabilidad debido al paso de los remolinos que lleva la corriente (Escuela Naval Almirante Padilla, 2010).

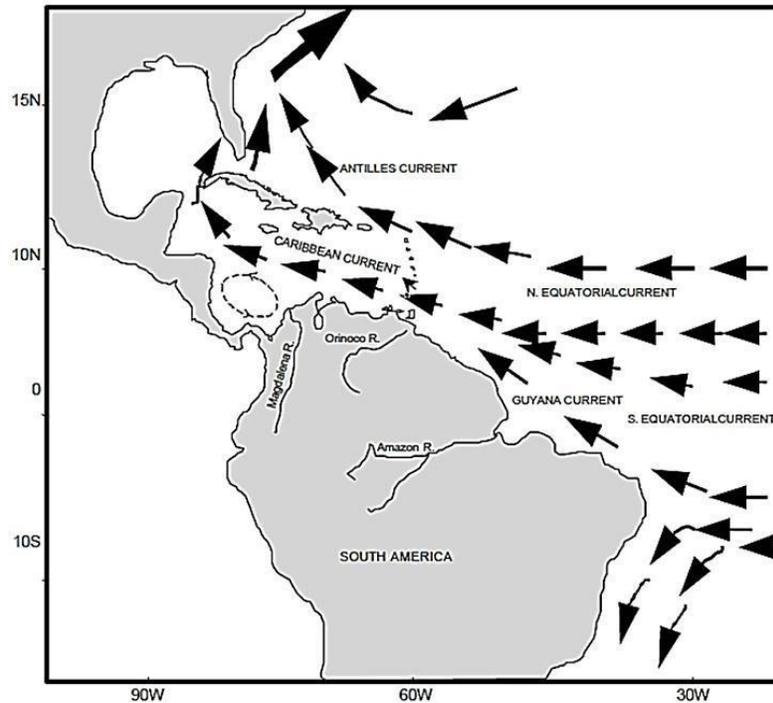


Figura 4 Corriente superficial en la región atlántica tropical noreste (Andrade, 2000)

3.1 Isla Cayo de Bajo Nuevo

La Isla Cayo de Bajo Nuevo se localiza aproximadamente a 405 km al NE de Providencia, a 123 km de Serranilla y a 496 km de San Andrés, entre los $15^{\circ} 47'$ y $15^{\circ} 56'$ N y los $78^{\circ} 49'$ y $78^{\circ} 31'$ W (Coralina, 2010). Se trata de un complejo coralino con forma de atolón, con un arrecife periférico de cerca de 27 km de largo (Coralina, 2010), que está dividido en dos secciones y atravesadas por un canal profundo (60 m) de alrededor de 1.4 km de ancho en su punto más estrecho. (Figura 5)

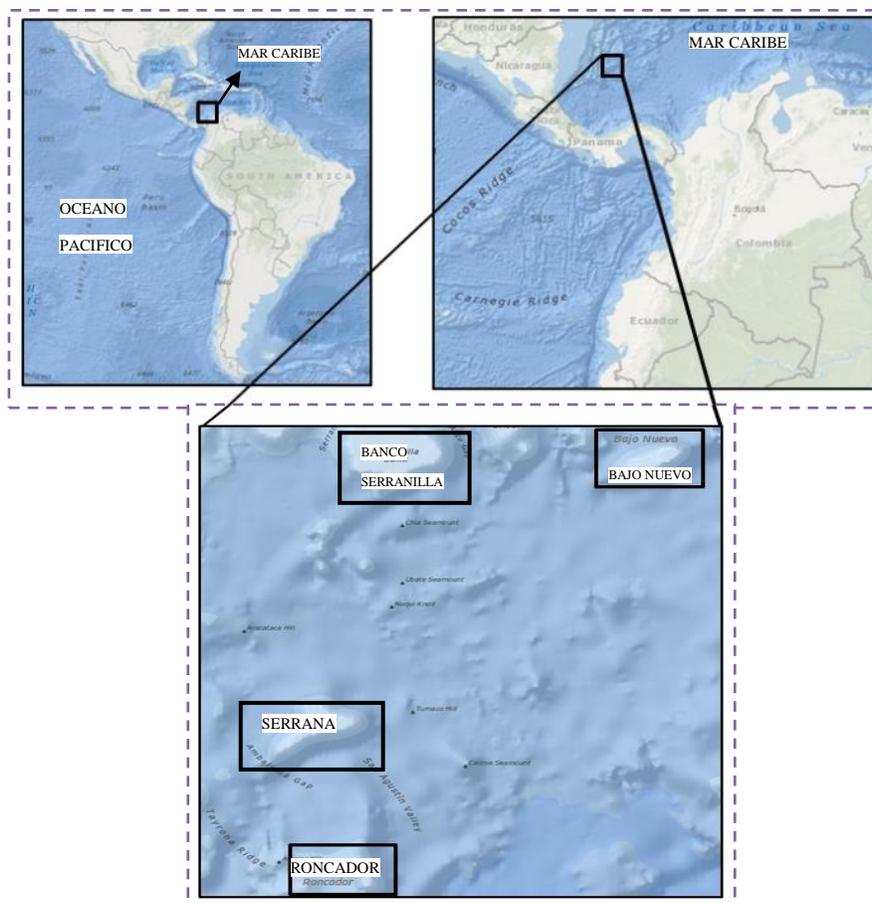


Figura 5 Posición geográfica de la Isla Cayo de Bajo Nuevo

El complejo coralino más grande (SW) mide 15.4 km de NE a SW y aproximadamente 9.4 km de ancho, con un área aproximada de 100 km². El complejo arrecifal más pequeño (NE) mide 10.5 km de E a W y 5.5 km de ancho, con un área aproximada de 45 km² (Bruckner, 2012). Como muchos de los arrecifes, Bajo Nuevo crece sobre una topografía calcárea heredada del Pleistoceno, pero en el norte del archipiélago (Serranilla, Bajo Alicia y Bajo Nuevo), la producción de carbonatos de plataforma, particularmente el crecimiento de arrecifes, parece estar limitada (Geister y Díaz, 2009). Por esta razón, el presupuesto de arena que pueda captarse en estos bajos del norte se convierte en prioridad en relación con los del sur, donde aparentemente la producción es mayor o se mantiene.

El Cayo de Bajo Nuevo es un banco que tiene unas decenas de metros de longitud y que apenas emerge (figura 6). Es un lugar muy apartado del territorio continental colombiano, pero posee gran importancia desde el punto de vista geopolítico porque en él se ha instalado un faro desde el cual el país ha determinado soberanía y produce mar territorial en límites con Jamaica y Haití.



Figura 6 Fotografías tomadas por la Regional de Inteligencia Naval del Caribe (RINCA), agosto de 2008, en Bajo Nuevo

3.1.1 Morfodinámica de playas

La base de datos empleada para la obtención del régimen medio del oleaje en Bajo Nuevo se desprendió a partir de valores reportados según los parámetros del clima marítimo. Con base en esos datos, se entregaron las condiciones de contorno, con el propósito de propagar el oleaje de aguas profundas hasta las playas. Se presenta el resultado de la modelación para la condición media del clima en esta área, para el oleaje extremo que se produce con las tormentas en el lapso de un año, conocido como Hs12 (ENAP, Colciencias, 2010).

El Hs12 hace referencia a la altura de ola significativa que es excedida doce (12) horas al año. La propagación del oleaje con estos datos se presenta como una aproximación al clima extremo en el área (figura 7). El sistema se parece mucho al régimen climático debido a que

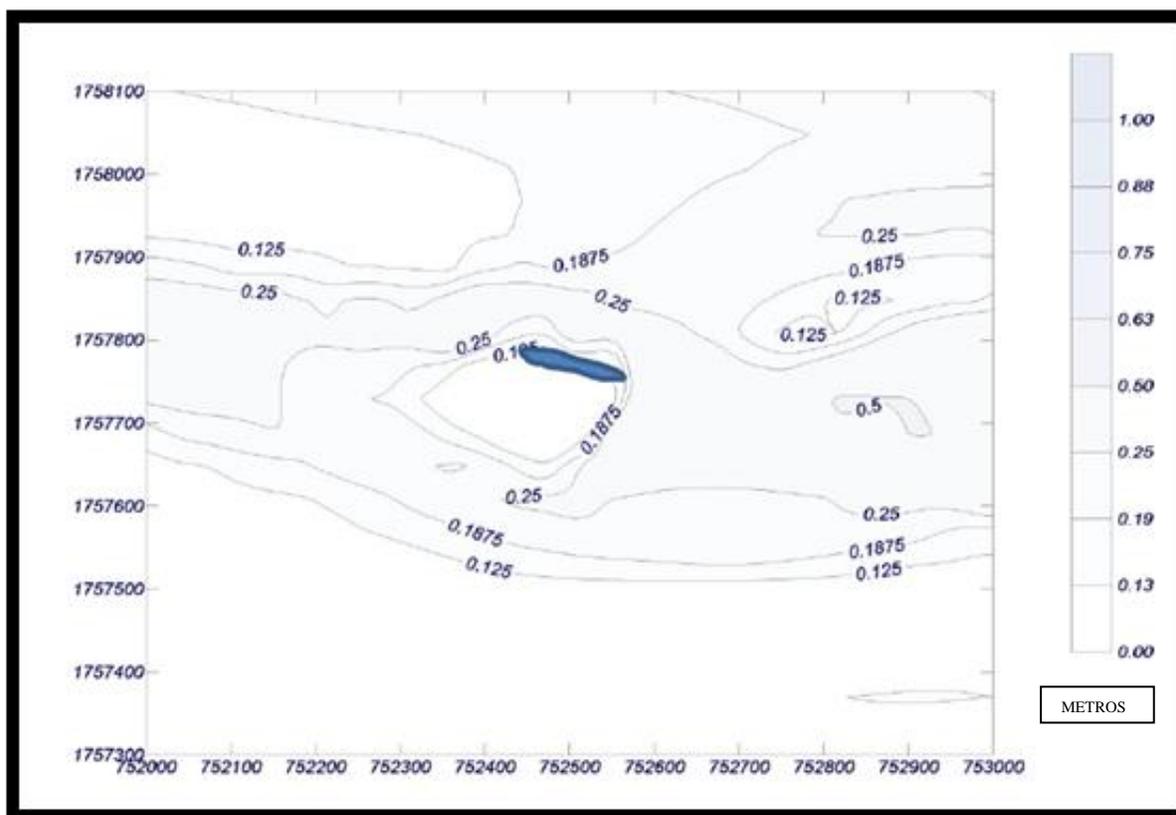


Figura 7 Altura de ola significativa en Bajo Nuevo en condiciones medias de oleaje

Son niveles similares. Sin embargo, demuestra cómo alcanza un oleaje muy alto al cayo y no tiene mayor defensa frente a él para romperlo (ENAP, Colciencias, 2010).

3.1.3 Balance de erosión y sedimentación de Bajo Nuevo

El análisis de erosión y sedimentación, producto de las variaciones de las corrientes de deriva litoral provenientes de las roturas del oleaje, muestra que las condiciones de oleaje alrededor del cayo son tales que, en la media, la condición generalizada en todas las playas tiende a la erosión (Figura 8). Al entender que el retroceso en el cayo no ha hecho cambiar su área en las últimas décadas de manera sustancial, se atribuye entonces esta tendencia al aumento del oleaje, ya sea debido a su cambio de dirección, a la disminución de la cantidad de arena que llega o a una mayor profundidad de la barrera arrecifal (ENAP, Colciencias, 2010).

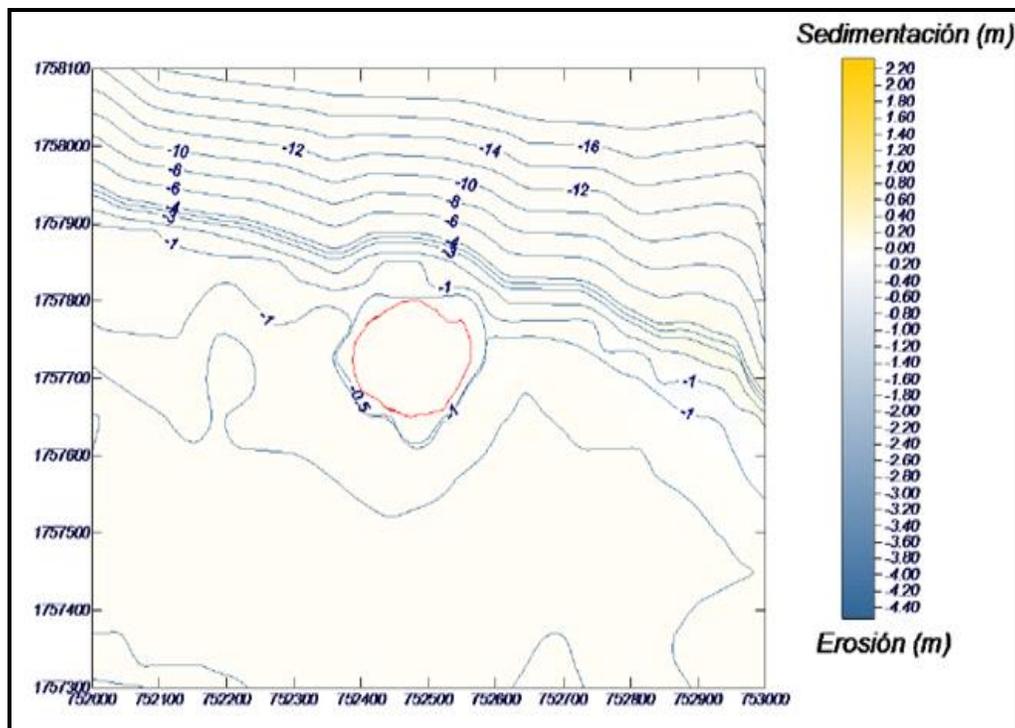


Figura 8. Resultado del modelo de balance erosión/sedimentación para un régimen medio del oleaje actual

Capítulo 4. Objetivos

Teniendo en cuenta la necesidad del Estado colombiano de establecer una estrategia para estructurar sus argumentos en respuesta a las posibles pretensiones de terceros Estados sobre su territorio, en defensa de la integridad territorial y de la soberanía nacional (como está establecido en la Constitución Política), dentro de las actividades de investigación científica contempladas para este fin, la Dirección General Marítima (DIMAR) adelantó durante 2014 el proyecto “Determinación del máximo y mínimo nivel del mar producido por marea astronómica en las Islas Cayos del Norte”. Como contribución a este último esfuerzo de investigación, estudiantes del programa de pregrado en Oceanografía Física de la Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla” (ENAP) han planteado el desarrollo de un trabajo de grado relacionado con la caracterización geomorfológica de las Islas Cayos del Norte de Colombia.

4.1 Objetivo general

Realizar el análisis geomorfológico de la Isla Cayo de Bajo Nuevo con base en datos e imágenes de sensores remotos como complemento al estudio desarrollado por la Dirección General Marítima (DIMAR) para la determinación del máximo y mínimo nivel del mar producido por marea astronómica en las Islas Cayos del Norte.

4.2 Objetivos específicos

- Describir la conformación geomorfológica de la Isla Cayo de Bajo Nuevo

- Establecer las características geomorfológicas de la Isla Cayo de Bajo Nuevo a través del tratamiento digital de ortofotografías digitales e imágenes de sensores remotos
- Generar la cartografía digital geomorfológica de detalle (1:2000) de la Isla Cayo de Bajo Nuevo como complemento para la determinación del máximo y mínimo nivel del mar producido por marea astronómica en las Islas Cayos del Norte

Capítulo 5. Marco teórico

La palabra *geomorfología* proviene de los vocablos griegos $\gamma\epsilon\omega$ (la tierra), $\mu\omicron\rho\Phi\eta$ (forma) y $\lambda\omicron\gamma\omicron\zeta$ (discurso), es decir, un discurso acerca de las formas de la tierra (Huggett, 2007). Como disciplina, se conoce como geomorfología al estudio de las características físicas de la superficie de la tierra y sus formas. Específicamente, la geomorfología tradicional está relacionada con las formas terrestres locales sobre la superficie de la tierra y su proceso de evolución a través del tiempo. En algunas ocasiones, dentro del alcance de la geomorfología se incluyen las formas terrestres submarinas (República de Colombia, Dimar, CIOH, 2013).

La geomorfología costera trata tanto la formación de las características costeras (formas terrestres) como su evolución (Bird, 2008). También explora las relaciones entre las formas terrestres costeras y sus procesos, afectados por factores asociados con climatología, oceanografía, mecánica de fluidos, sedimentación y geofísica (Hsu, 2005). Estas distintas formas terrestres son producidas por interacciones variables, debidas a la prevalencia de factores oceanográficos y meteorológicos, como también a la geología de las unidades fisiográficas (Hsu, 2005).

Muchas formas terrestres tienen larga historia y su forma actual no siempre se relaciona con los procesos involucrados en ella. Algunas de ellas fueron producidas bajo condiciones ambientales diferentes, sobreviviendo actualmente como relictos. La geomorfología, entonces, tiene una importante dimensión histórica, la cual es el dominio particular de la geomorfología histórica. En pocas palabras, la geomorfología moderna estudia tres aspectos clave de las formas terrestres: la *forma*, los *procesos* y la *historia* (Huggett, 2007).

Los complejos de arrecifes oceánicos en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina han desarrollado las mejores formaciones coralinas, incluyendo atolones, barreras coralinas, arrecifes de borde y parches de arrecife de coral (Díaz, 1996). Hay aproximadamente unos 2800 km² de área de arrecifes de coral en aguas del Caribe colombiano de los cuales la gran mayoría (cerca de tres cuartos) pertenece al Archipiélago de San Andrés (Díaz, 2000).

Las principales islas de este archipiélago están habitadas permanentemente. Las islas cayos y atolones son visitados ocasionalmente por pescadores, quienes desarrollan la economía de estos puntos, mientras que el personal de la Armada Nacional de Colombia permanece en puestos militares para ejercer soberanía.

El 75% del área total del archipiélago está ocupado por arrecifes coralinos y representa una de las áreas de coral más extensas del Atlántico occidental. Sus islas y atolones tienen una larga historia geológica, en la cual la subsidencia de los sótanos volcánicos originales y la simultánea nivelación de las montañas submarinas de aguas poco profundas, con carbonatos de la era terciaria y cuaternaria, condujeron a la formación de atolones y bancos actuales (Garzón-Ferreira y Díaz, 2003).

Las islas y atolones tienen varias características geomorfológicas en común: la presencia de frentes de coral, terrazas de arrecifes periféricas casi continuas en el lado de barlovento, consecuente desarrollo de arrecifes al lado de sotavento y formación de lagunas que abren hacia el océano a lo largo de su margen (Garzón-Ferreira y Díaz, 2003).

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, para llevar a cabo la caracterización geomorfológica de las Islas Cayos del Norte, se hace necesario conocer un poco más a fondo el concepto de *arrecife de coral*. Así mismo, se hará una breve descripción de sus tipos de clasificación y zonificación.

El coral es un invertebrado marino, del *Phylum cnidria*, compuesto por una unidad estructural conocida como pólipo que forma colonias para desarrollar procesos fisiológicos. Alcanza su máximo desarrollo en ambientes relativamente someros, ya que viven en simbiosis con algas microscópicas llamadas zooxantelas.

Los arrecifes de coral son estructuras complejas formadas por las estructuras externas de los corales resultantes de procesos de acumulación y erosión de carbonatos (Choat y Bellwood, 1991), limitadas por una necesidad de agua cálida con una temperatura mínima promedio en invierno de 18°C. Por esta razón, se encuentran solo en pocas áreas fuera de los trópicos (Hopley, 2006).

Estos arrecifes crecen de forma masiva como tractos de corales y se convierten, de esta manera, en grandes estructuras resistentes a las olas (Done, 2011), generando cambios en la batimetría. Los arrecifes de coral también constituyen un ambiente altamente fragmentado con parches a diferentes escalas espaciales y temporales, relacionados con su origen biogénico y el grado de disturbio al que se encuentren sometidos (Choat y Bellwood, 1991).

Los arrecifes de coral han sido objeto de interés científico durante el último medio siglo. Charles Darwin fue uno de los primeros científicos en realizar estudios enfocados a la

evolución del hundimiento de las islas volcánicas que posteriormente se convertirían en atolones, arrecifes de barrera y arrecifes franjeantes (Finkl, 2011). Según Garzón-Ferreira y Díaz (2003), los bancos del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, tales como Bajo Nuevo, Roncador y Serrana, son considerados atolones; así mismo, los bancos de Quitasueño y Serranilla son considerados como arrecifes de coral.

Respecto a las clasificaciones de los arrecifes coralinos, es crucial el trabajo de Darwin *The structure and distribution of coral reefs*, publicado en 1842, que contiene la primera parte de geología del viaje del Beagle, bajo el comando del Capitán Fitzroy (1832- 1836). En este libro, en los capítulos I, II y III, el autor mencionó por primera vez las tres formas en la que se podía establecer una clasificación de los arrecifes: atolones de arrecife (*atoll reefs*), barrera de arrecifes (*barrier reefs*) y arrecifes franjeantes (*fringing reefs*). (Figura 9)

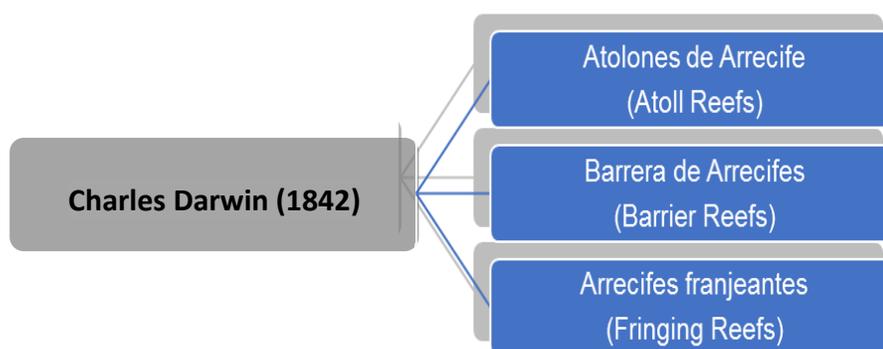


Figura 9. Clasificación básica de arrecifes por Charles Darwin (1842)

En dichos capítulos, de acuerdo con sus propias observaciones y las obras de otros investigadores, Darwin describió las diferentes geo formas del océano Pacífico e Índico que dieron base a estos tres conceptos. Lo más importante de su legado es que hoy en día tales definiciones siguen vigentes para clasificar los arrecifes de coral.

5.1 Atolones de arrecife (*atoll reefs*)

Los atolones son arrecifes anulares en medio del océano; el arrecife soporta islotes o islas casi continuas, que están compuestas por arena o grava consolidada petrificada y generalmente encierran una laguna central.

Los atolones se encuentran, por lo general, en las cadenas de islas o archipiélagos. La gran mayoría de ellos se concentran en el océano Pacífico y, en segunda posición, en el océano Índico. El departamento Archipiélago de San Andrés está dentro de la estadística mundial de los lugares que cuenta con atolones como se observa en la . 10.

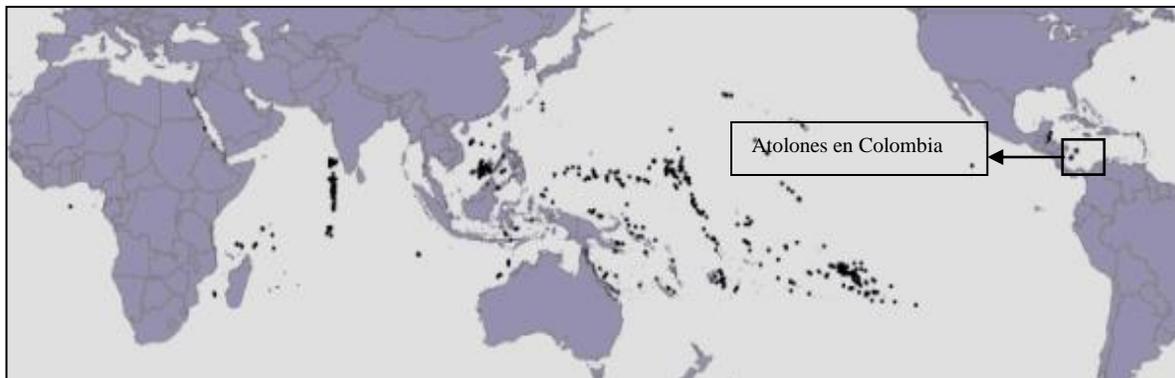


Figura 10. Distribución global de atolones

Las plataformas arrecifales que forman atolones se caracterizan porque los arrecifes alcanzan el nivel del mar especialmente por el sector de barlovento de la plataforma de arrecife, aunque hay una considerable variación cuando la cresta de arrecife es continua alrededor del perímetro de la laguna arrecifal.

Las definiciones de un atolón varían, aunque se destacan varios factores en común. Por ejemplo, esta es la definición de Shepard de atolón: “Arrecifes de coral repujados rodeando

una laguna, en la que hay una isla, arrecifes ligeramente emergidos o pequeños cayos de arena” (Shepard, 1948, p. 251, como se cita en Hopley, 2011).

Para Wiens, quien elaboró un libro sobre atolones, esta definición no era lo suficientemente regular, así que sugirió la formulada por Kuenen: “Los atolones son arrecifes más o menos continuos alrededor de una laguna claramente profunda con o sin laguna arrecifal, la cual podría levantarse desde grandes profundidades evitando el crecimiento de corales (Newell y Rigby, 1957, p. 21, como se citan en Hopley, 2011). No obstante, Wiens también estableció su propia definición: “Un atolón está constituido por arrecifes calcáreos someramente emergidos más o menos continuos con una laguna claramente profunda o varias lagunas sin islas volcánicas emergidas, que están aparte de otras islas y la parte superior en donde está la pendiente más empinada y que da hacia el mar genera residuos calcáreos los cuales se acumulan en el fondo volcánico el cual favorece al crecimiento de nuevos arrecifes”. (Wiens, 1962, p. 8, como se cita en Hopley, 2011).

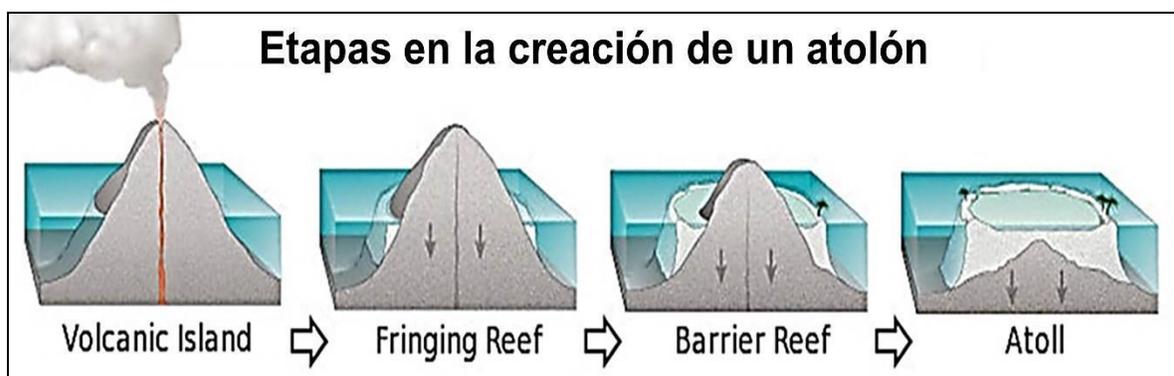


Figura 11 Etapas en la creación de un atolón. Modificada de <http://www.wpclipart.com>.

Es importante anotar que los atolones son relativamente raros en el Caribe: en 1963 Stoddart sugirió que había un total de 27, pero en 1973 Milliman consideró solamente diez, entre los cuales se encontraba Roncador.

Existen rasgos claves en los atolones. El contorno exacto del anillo que rodea una laguna sin proyecciones hacia tierra puede estar influenciado por la forma de la base sobre la que el arrecife descansa, pero este carácter anular se explica principalmente por la posición ecológica favorable para la construcción de áreas pobladas cerca del margen submarino. Factores que controlan el crecimiento de organismos en el arrecife incluyen la profundidad del agua, la agitación, el oxígeno, el suministro de alimentos, nutrientes y sales. (Figura 11)

Para fines descriptivos, los atolones pueden dividirse en dos grupos: los que se elevan desde el fondo del mar (*deep-sea atolls*) y los que se encuentran en la plataforma continental (*shelf atolls*).

- *Atolones de aguas profundas (deep-sea atolls)*. Los atolones de aguas profundas son estructuras aisladas y varían considerablemente en tamaño. Sus pequeños anillos, generalmente sin islotes de coral, pueden ser menores de una milla de diámetro, aunque muchos atolones alcanzan un diámetro de hasta 20 millas y cuentan con una docena o más de islotes. Este es el caso de los atolones de Kwajalein, Islas Marshall, en el océano Pacífico y de Suvadiva, Maldivas, en el océano Indico, que cubren un área de 700 millas² y se consideran los más largos existentes.

El principal factor que controla la distribución de los atolones en las profundidades de los océanos parece ser la actividad volcánica submarina, un proceso que proporciona los numerosos conos aislados de dos millas o más por encima del fondo

del océano y que individual o colectivamente puede disminuir a un ritmo lento, lo que permite el crecimiento de arrecifes.

- *Shelf atolls*. Se encuentran en muchas partes del mundo: cerca de Australia, en Indonesia, en el mar Caribe y el golfo de México. Algunos pequeños atolones que se elevan desde las laderas de la isla más grande como pedestales también pertenecen a esta categoría. Para denominarlos, se han propuesto nombres especiales como “estante de atolones”, propuesto por MacNeil (1954), o “banco de arrecife”, propuesto por Davis (1928), y dependiendo de la presencia o ausencia de islas, “banco de barrera” o “banco de atolones” (como se citan en Ladd, 1977). A los pequeños atolones situados dentro de las lagunas se les llamó “atolones de laguna” (Davis, 1928, como se cita en Ladd, 1977).

5.1.1. Morfología superficial de los atolones

La topografía general y la geomorfología de los atolones fueron descritas en el libro *Atoll environment and ecology* (1962) de Wiens, basado en el estudio detallado de las Islas Marshall en el Pacífico y otros atolones ubicados en ese mismo océano (como se cita en Hopley, 2011). Este trabajo fue revisado por Storrdart en 1969, versión en la que se mencionaron tres de sus características distintivas: arrecife exterior (*outer reef*), arrecife de borde (*reef rim*) y laguna (*lagoon*). (Figura 12)

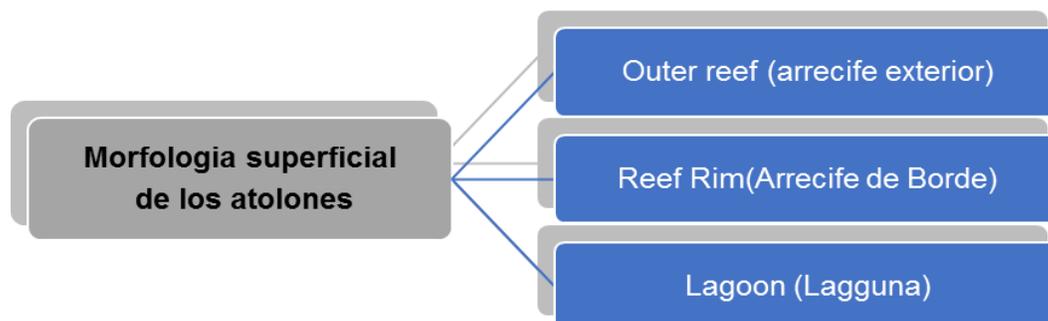


Figura 12. Clasificación de atolones según Wiens (1962) en Woodroffe & Biribo (2011).

- *Arrecife exterior (outer reef)*. El arrecife exterior puede ser continuo y generalmente está expuesto al fuerte oleaje que rompe por todos sus lados. El borde de barlovento de atolón (donde entra el viento) generalmente es mucho más continuo que el de sotavento (por donde sale el viento). En muchos casos, se ha observado que las islas coralinas se aglomeran en el sector de barlovento. El frente arrecifal es empinado y se eleva abruptamente desde el fondo del océano. Otras veces, la energía de la ola que rompe contra el arrecife genera sedimentos calcáreos que se van acumulando y van formando condiciones óptimas para el desarrollo de más arrecifes.
- *Arrecife de borde (reef rim)*. Puede tener diferentes medidas de ancho e incluso, en algunos casos, puede tener islas o una amplia planicie arrecifal (*reef flats*). Por lo general, estas planicies arrecifales se encuentran en aguas someras y comúnmente pueden estar expuestas durante la marea más baja. Estas zonas se pueden identificar por estar cerca de la superficie.
- *Lagunas (lagoons)*. La laguna está resguardada en el atolón y puede contener parches arrecifales dispersos, también conocidos como pináculos (*pinnacles*) o montículos (*knoll*). Algunas lagunas solo tienen unos pocos parches, pero hay otras que poseen grandes cantidades que forman una malla de arrecifes poco profundos. Las lagunas pueden variar considerablemente su profundidad, ser poco profundas o, por el contrario, llegar a alcanzar grandes profundidades.

Las lagunas son características más propias de los atolones. Generalmente, al interior de las lagunas se encuentra gran cantidad de sedimentos calcáreos producidos por los arrecifes más productivos y expuestos al fuerte oleaje, aunque en

ocasiones estos sedimentos pueden terminar también al borde de los arrecifes.(Figura 12)

5.2 Arrecife de barrera (*barrier reef*)

Los arrecifes de barrera se definen como un conjunto de arrecifes de coral separados de tierras no arrecifales por una profunda laguna. En este orden de ideas, un atolón con arrecife de borde no es un arrecife de barrera. Darwin, por ejemplo, mencionó que los arrecifes de barrera son producto del hundimiento de una isla volcánica que fue creando lentamente una laguna entre la barrera de coral y tierra.

Según (Hopley 1982) y con base en estudios realizados en la Gran Barrera de Australia, los arrecifes de barrera se dividen en cinco tipos: barrera múltiple (*multiple-barrier*), barrera de faro (*faro-barrier*), barrera de superficie ondulada (*imbricated-barrier*), barrera de costa (*coastal-barrier*) y barrera franjeante (*fringing-barrier*). (Figura 13)

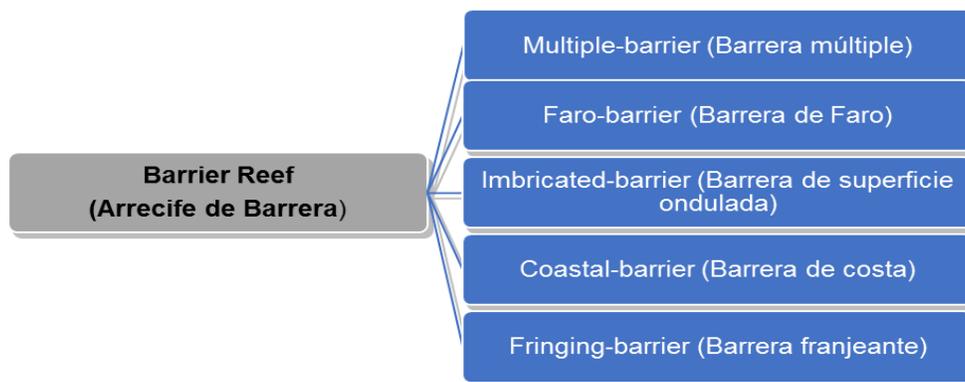


Figura 13. Morfología de *barrier reef*

- *Barrera múltiple (multiple-barrier)*. Está compuesta por una serie de planicies arrecifales, muy cercanas unas de las otras, e incluso en muchos casos están conectadas.
- *Barrera de faro (faro-barrier)*. Es una estructura conformada por múltiples faros; en otras palabras, son arrecifes de coral con una laguna central.
- *Barrera de superficie ondulada (imbricated-barrier)*. Es una sección de la barrera que está girando sobre sí misma; cambia su parte exterior a su parte interior cambiando completamente su grado de exposición y los tipos de hábitats. Este tipo de barrera puede terminar en la laguna de una segunda barrera separada.
- *Barrera de costa (coastal-barrier)*. Es una configuración intermedia entre una barrera y un arrecife de borde, no tiene una laguna profunda, pero tiene una terraza superficial sedimentaria que separa claramente los hábitats del arrecife externo plano de los hábitats franjeantes.
- *Barrera franjeante (fringing-barrier)*. Es una sección de la barrera que alberga largas islas, mostrando así diferentes tipos de hábitats entorno a la barrera exterior.

5.3 Arrecifes franjeantes (*fringing reefs*)

Crece cerca del continente o de costas de islas volcánicas altas. Habitualmente, están cerca de la orilla, aunque las áreas en la parte posterior pueden estar levemente sumergidas. La mayoría de los arrecifes franjeantes están constituidas por estructuras simples geomorfológicamente y pueden dividirse en tres principales zonas: arrecife frontal (*foreereef*), cresta arrecifal (*reef crest*) y arrecife posterior (*back reef*)(figura 14). Tienden a

ser relativamente angostos y la pendiente submarina suele ser muy empinada, después de la cual hay una capa de sedimentos calcáreos depositados sobre el sustrato rocoso.

Se desarrollan principalmente en aguas claras y oxigenadas y con fondos firmes. Sus sitios ideales son los trópicos y las costas rocosas e islas volcánicas jóvenes; también pueden aparecer en deltas, de manera discontinua, aunque estas condiciones son menos favorables, ya que los corales no prosperan en aguas turbias.

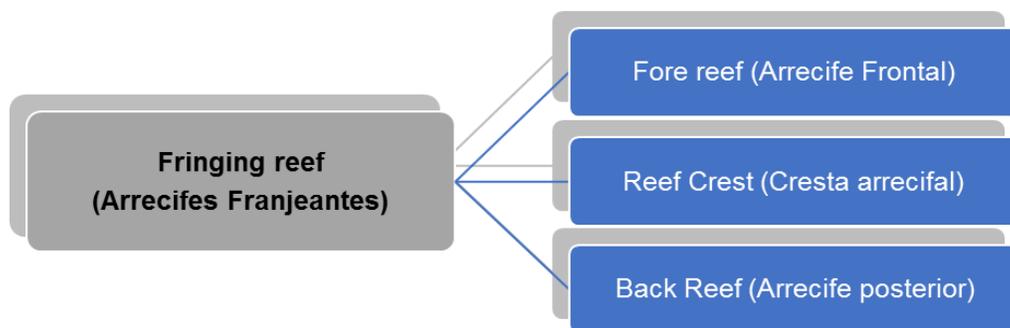


Figura 14. Clasificación arrecife franjeante (*fringing reef*)

5.4 Clasificación por Fairbridge (1950)

(Fairbridge 1950) se centró principalmente en la Gran Barrera de Coral (GBR), donde la clasificación de los arrecifes del Holoceno y el Pleistoceno cubre las morfologías del arrecife más destacadas, reconociendo a las formas franjeantes, de barrera, atolones y de plataforma como las formas básicas de los arrecifes de coral, las cuales, a su vez, pertenecen a cinco diferentes variedades de islas de coral.

Haciendo uso de sus datos geocientíficos, basados en la interpretación de las características estructurales, geomorfológicas y de perforación del arrecife, Fairbridge postuló que las formas de los arrecifes de coral son controladas generalmente por el viento, las olas y

corrientes, y las formas más complejas podrían estar influenciadas además por la topografía del fondo antecedente, la sedimentación y las fluctuaciones eustáticas.

En lo que se refiere a tipos de arrecife de coral, casi todas las formas “normales” están incluidas en franjeantes, de barrera y atolones. Sin embargo, los arrecifes de forma irregular que no encajan en ninguna categoría estándar se clasifican como arrecifes de plataforma o parche, también alternativamente denominados bancos o montículos arrecifales (Fairbridge, 1950). (Figura 15)

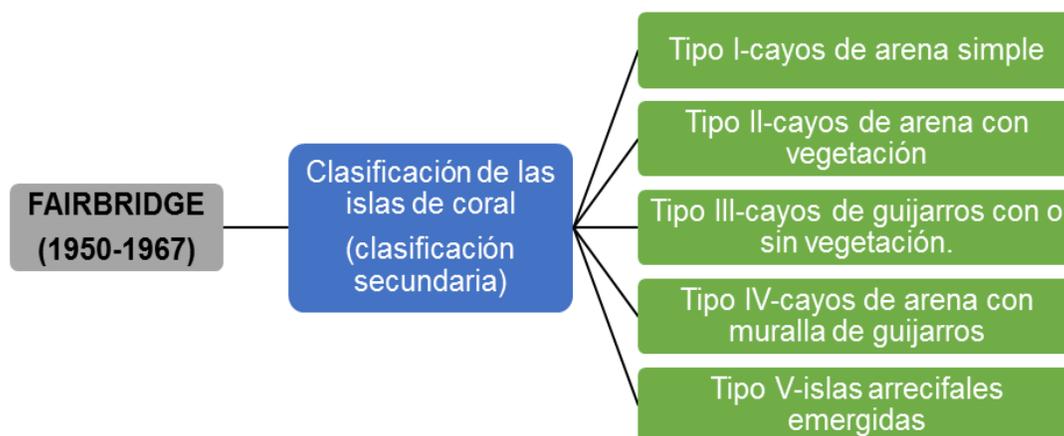


Figura 15: isla expuesta de antiguos materiales de arrecife de coral

5.5 Clasificación por Maxwell (1968)

Maxwell intentó dar más detalles sobre el esquema de clasificación Fairbridge y ambos creían que podían observar patrones de división “que apoyen la idea de que representan diferentes etapas de desarrollo arrecifal” (Maxwell, 1968). Además, el autor reconoció los siguientes tipos de arrecifes de plataforma:

- Circular, forma elíptica, crecimiento radial (*Circular-elliptical shape, radial growth*)
- Plataforma (*platform*)

- Plataforma alargada (*elongate platform*)
- Plataforma lagunar (*lagoonal platform*)
- Forma alargada (*elongate shape*)
- Pared (*wall*)
- Cúspide (*cusplate*)
- Diente (*prong*)
- Delantal compuesto (*composite apron*)
- Anillo abierto (*open ring*)
- Malla abierta (*open mesh*)
- Anillo cerrado (*closed ring*)
- Malla cerrada (*closed mesh*)
- Forma reabsorbente (*resorbed shape*)
- Reabsorbente (*resorbed*)

Además, Maxwell (1968) reconoció el arrecife alto de la plataforma (*high reef*), que en otros lugares se considera como una isla, es decir una “isla boscosa baja” (*low wooded island*) (Flood, 2011).

No obstante, en particular para el área de estudio, este tipo de clasificación es muy detallado y algunas geoformas o características no se correlacionan con lo descrito por Maxwell.

5.6 Clasificación por Hopley (1982)

Hopley planteó el siguiente esquema de clasificación de la geomorfología de los atolones. (Figura 16):

Fore reef slope (Pendiente arrecifal frontal). Es el arrecife que se encuentra en la parte exterior que da hacia mar, desde la cresta arrecifal de cara a mar abierto (Figura 17). El coral que se forma en esta zona de arrecife es denso y se encuentra a una profundidad de 10 a 15 metros (Hopley D., 2011).

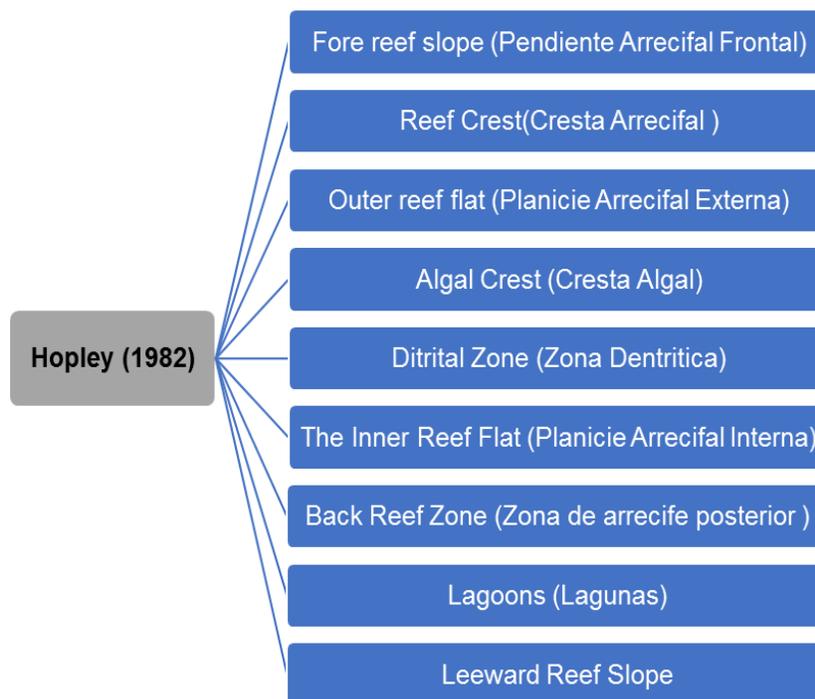


Figura 16. Clasificación de atolones según Hopley (2011).

Reef Crest (Cresta arrecifal). Son arrecifes resistentes, así mismo se encuentran en zonas poco profundas y es la que recibe directamente la energía de la ola (Figura 17). Su forma los hace cumplir función de espolones. Se encuentra entre el arrecife posterior y el arrecife frontal (Hopley D. 2011).

Outer reef flat (Planicie arrecifal externa). Las cimas cubiertas de coral están continuas a la parte más externa de la planicie arrecifal, como zonas de coral viviente, con formas incrustantes y de crecimiento resistentes al nivel de más baja marea (Figura 17). Está área está compuesta de distintas zonas morfológicas; plataforma de algas, banda de escombros, hileras de coral fusionados, hileras de coral no fusionados, parches de coral y plataforma de arena (Hopley D. , 2011).

Algal Crest (Cresta algal). El borde de atolones arrecifales de alta energía oceánica lo forman algas coralinas costrosas que se elevan casi hasta el nivel del mar (Figura 17). A medida que baja la energía estas se convierten en pavimento de sedimentos calcáreos. En donde la energía es mínima domina los céspedes algales (Hopley D. , 2011).

Ditrital Zone (Zona detrítica). Después de la cresta algal incluso sobre la cresta, se depositan sedimentos calcáreos o material grueso derivados del arrecife (Figura 17), se acumulan en la parte frontal del arrecife formando bancos irregulares (Hopley D. , 2011).

The Inner Reef Flat (Planicie arrecifal interna). La planicie arrecifal interna se encuentra en la parte posterior interna donde absorbe la energía, en el cual puede haber crecimiento de corales (Figura 17), ya que provee de un constante flujo de agua sobre la cresta arrecifal (Hopley D. , 2011).

Back Reef Zone (Zona de arrecife posterior). Es una laguna poco profunda con un cuerpo generalmente alargado que se encuentra paralelo a la costa y separada del mar abierto por una barrera natural (Hopley D. , 2011). (Figura 17)

Lagoons (Lagunas). La laguna de arrecife es la que se encuentra resguardada del atolón y la que recibe poca energía de la ola, la cual al interior puede contener diferentes parches de arrecifes de forma dispersa (Figura 17). Las lagunas de arrecife generalmente son de poca profundidad, sin embargo existen sectores profundos, en general son de forma circular o alargada (Hopley D. , 2011).

Leeward Reef Slope. Es una zona donde no hay una energía alta de la onda ya que se encuentra en sotavento del arrecife y existe un crecimiento de coral que no se acerca a la superficie y su forma es de entrada de ramas (Hopley D. , 2011).

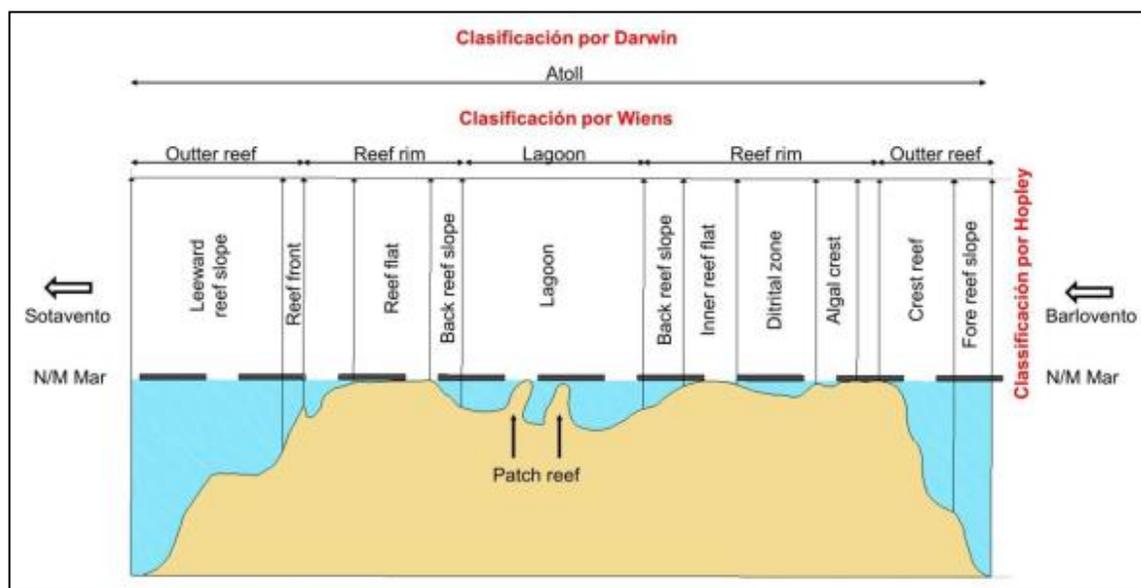


Figura 17 Zonificación del arrecife de coral, de acuerdo con las clasificaciones según Darwin (1842), Wiens (1962) y Hopley (2011).

5.7 La percepción remota

La percepción remota o sensoramiento remoto es una técnica a través de la cual se obtiene información de un objeto sin un contacto directo con él, lo cual es posible gracias a la relación sensor-cobertura que se expresa a través de la llamada radiación electromagnética. Esta relación se puede presentar de tres formas: emisión, reflexión y emisión-reflexión. La

energía captada por un sistema de percepción remota sufre interacciones fundamentales que deben entenderse para interpretar apropiadamente los datos captados (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2007). Otros autores como Floyd y Sabins (1996) la definen como la ciencia de adquirir, procesar e interpretar imágenes que graban la interacción entre la energía electromagnética y la materia.

La información cuantitativa de alta resolución obtenida por los sensores remotos, cuyas principales características son la exactitud y su actualidad, permite realizar una descripción de la geomorfología en áreas de difícil acceso, sea vía marítima o aérea, donde no se puedan realizar actividades de investigaciones *in situ* (Stumpf, Holderied y Sinclair, 2003).

Dentro de los sensores aerotransportados que permiten llevar a cabo investigación en áreas de difícil acceso se encuentra el LiDAR (Light Detection and Ranging) o escaneo láser. Es un sistema de sensoramiento activo que permite efectuar mediciones a distancia sobre la superficie terrestre, a partir de un sensor dispuesto en el interior de una aeronave. El sensor obtiene puntos tridimensionales (x, y, z), a partir de los cuales se pueden generar Modelos Digitales de Elevación (DEM). La tecnología se basa en el principio LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) que amplifica la luz por simulación de emisión y radiación (Afanador y Carvajal, 2009).

A lo largo de las últimas décadas, el desarrollo de la ortofotografías digital ha sido muy importante y está en relación directa con el uso creciente de cartografía en el soporte digital y con el empleo en diferentes ámbitos de los Sistemas de Información Geográfica (Afanador y Carvajal, 2009).

El análisis y clasificación de las formas terrestres son básicos para el estudio del terreno debido a que estas surgen de procesos naturales con una composición definida y un rango de características físicas y visuales, de tal forma que dichos procesos, las rocas, los suelos, los arrecifes de corales, el agua y la vegetación, ejercen una influencia sobre cada una para formar un equilibrio natural particular (Figura 17).

No obstante lo anterior, con el auge del desarrollo tecnológico, se han incorporado nuevas fuentes de información que posibilitan la realización del análisis cuantitativo y la modelación de algunos procesos clave de la geomorfología, por lo que resultan fundamentales los modelos digitales del terreno y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el desarrollo de estas labores.

Capítulo 6. Metodología

Dado el nivel de detalle y de exactitud posicional de estos sensores que se convierten en herramientas tecnológicas, así como también la necesidad de un estudio geomorfológico que permitiera la identificación de las islas desde el punto de vista de sus características físicas, se implementó la utilización de estos métodos de teledetección, enfocados hacia la realización de análisis geomorfológicos en las islas del Caribe colombiano.(Figura 18)

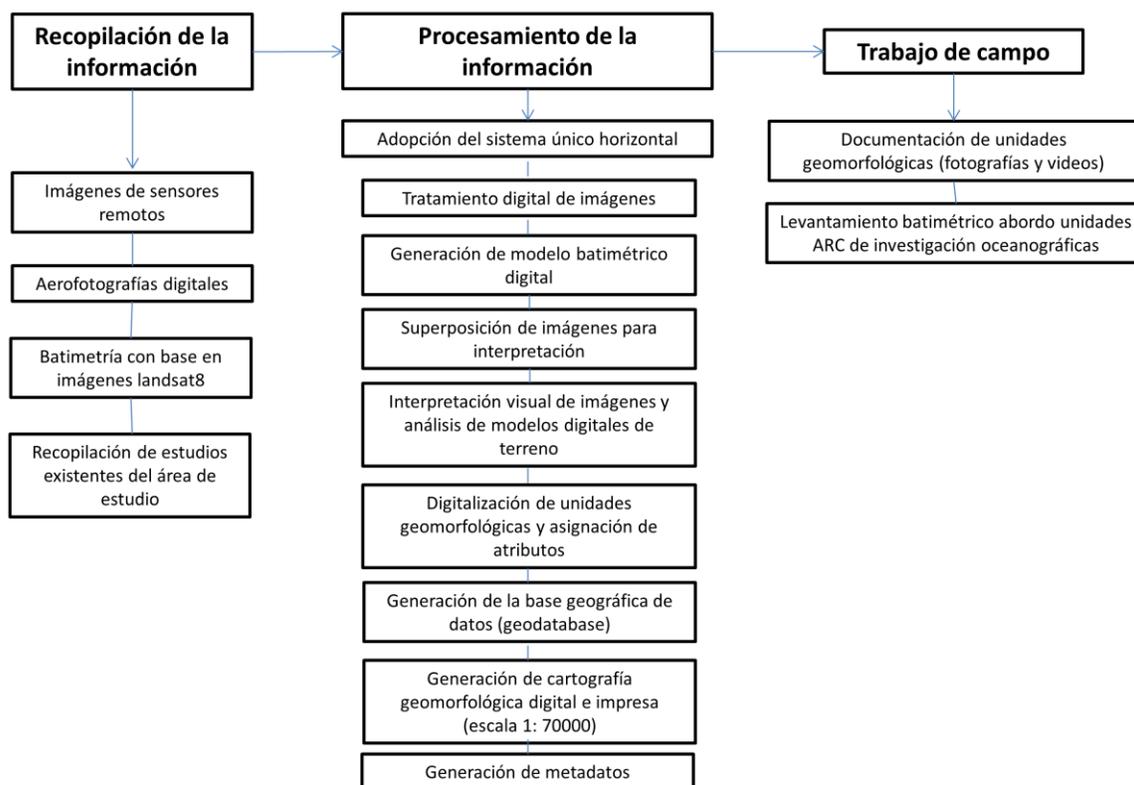


Figura 18. Flujograma del procesamiento de la información.

En la presente investigación, se realizó la descripción geomorfológica del atolón Bajo nuevo en vez de la Isla cayo bajo nuevo, considerando que la información recopilada, permitió extender la descripción geomorfológica al atolón Bajo nuevo.

6.1 Materiales y métodos

Desde el punto de vista metodológico, el trabajo de grado comprendió tres actividades principales: recopilación de información; procesamiento de la información y trabajo de campo (Figura 18).

6.1.1 Recopilación de la información

Esta actividad consistió en llevar a cabo el establecimiento y la recopilación de las fuentes de información primaria y secundaria para el análisis geomorfológico de la Isla Cayo de Bajo Nuevo.

Tabla 1. *Origen de la información recolectada*

Datos	Entidades	Observaciones
Landsat 8	Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)	NA
Batimetría	Dirección General Marítima de Colombia (DIMAR-CIOH)	Proyecto mancomunado con el IGAC
Ortofotografías	Dirección General Marítima de Colombia (DIMAR)	NA

En la tabla 2 se muestran las características de los datos que fueron entregados por las diferentes entidades:

Tabla 2. Características de la información recolectada *de sensores remotos utilizados*

Fuente de información	Fecha de toma	Resolución espacial	Resolución radiométrica	Bandas	Sistema de referencia
Batimetría	20090801 20090831	-----	----	-----	WGS84-UTM-zona 17N
Landsat 8	20140527	30 m	16 bit	1 bandas	WGS84-UTM-zona 17N
Ortofotografías	20130704	0.5 m	16 bit	RGB	Magna_Colombia_ Oeste_oeste

6.1.2 Procesamiento de la información

6.1.2.1 Sistema único de referencia horizontal

Con el objetivo de contar con un sistema de referencia único (Figura 19) que permita superponer la totalidad de la información espacial y temporal recopilada (fotografías aéreas antiguas, imágenes del área de estudio), se efectuó la transformación digital al sistema de referencia horizontal denominado MAGNA, origen cartográfico Oeste Oeste-MAGNA y sistema de proyección de coordenadas WGS 84 UTM zona 17N , lo que permitió estar de acuerdo con el sistema de coordenadas oficial del país implementado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

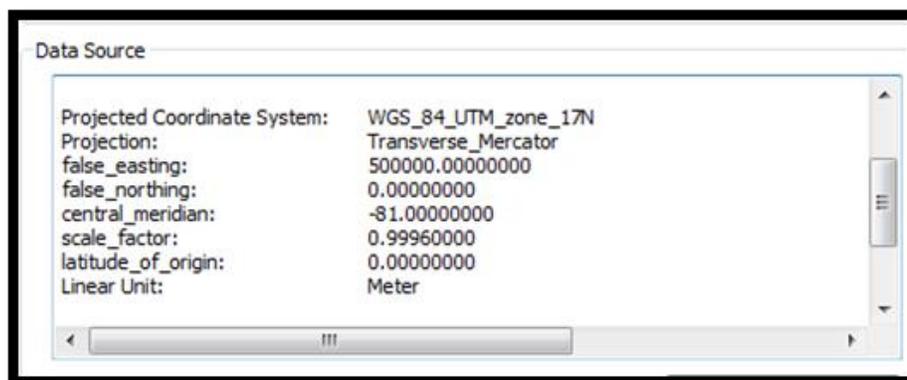


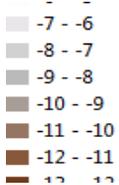
Figura 19. Sistema de coordenadas de proyección asignado al shapefile atolón de Isla Cayo de Bajo Nuevo

6.1.2.2 Tratamiento digital de imágenes

El tratamiento de imágenes se ejecutó utilizando el software PCI-Geomática. Los principales tratamientos digitales permitieron contar con imágenes más claras que facilitaron, de forma más sencilla, la interpretación visual del contenido de las imágenes, enfocado hacia la identificación y delimitación más precisa de las unidades geomorfológicas.

De acuerdo con la tabla 3, en los datos de ortofotografías se modificaron las tres bandas, adaptando la rampa de colores, dado que esta fue la manera más efectiva para identificar la geomorfología de la Isla Cayo de Bajo Nuevo.

Tabla 3. *Características digitales para el tratamiento de la información*

Fuente de información	Contraste	Brillo	Transparencia	Sistema de referencia	Tipo de formato	Rampa de color
Ortofotografías	10%	4%	2%	WGS 84 – UTM-ZONA 17 N	.TIF	
Landsat 8	10%	8%	0%	WGS 84 – UTM-ZONA 17 N	.TIL	
Batimetría	NA	NA	4%	WGS 84 – UTM-ZONA 17 N	.TIN	 -7 - -6 -8 - -7 -9 - -8 -10 - -9 -11 - -10 -12 - -11 -13 - -12

En la figura 20 se exponen los tratamientos digitales que se le realizaron a la imagen Landsat 8, para la delimitación del atolón según Darwin. Así mismo, en los datos de batimetría se trabajó la profundidad con intervalos de 1 metros hasta llegar a una máxima proximidad de 30 metros, para una mayor discriminación, alternando la rampa de colores para una mejor identificación de la geomorfología de la Isla Cayo de Bajo Nuevo.

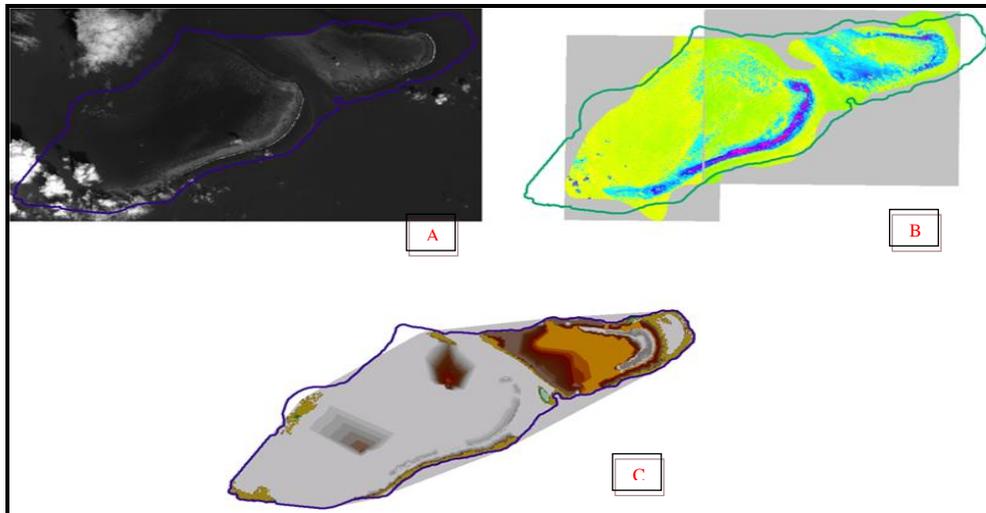


Figura 20. Superior izquierda: imagen Landsat 8 sin tratamiento delimitado según Darwin (A). Superior derecha: imagen tratada digitalmente con los procedimientos descritos en la tabla 3 (B). Imagen inferior batimetría 3D del área(C).

Es importante mencionar que no se le realizó corrección atmosférica y corrección de columna de agua a las imágenes de sensores remotos, debido a que las correcciones atmosféricas y de columna de agua requieren de procedimientos especializados que no están dentro del alcance de la presente investigación. En cuanto a las aerofotografías digitales, debido a su baja altitud, no requieren de corrección atmosférica.

6.1.2.3 Modelo batimétrico

El IGAC mediante el procesamiento de la imagen Landsat ETM+ a nivel 2 (Ortorectificada) - path/row: 014/, que data del al 26 de julio 2001, realizó la geodatabase Batimetría 2014; la cual está compuesta por isobatas de las Islas San Andrés, Providencia, de las Islas Cayos de Roncador, Serrana, Serranilla, Quitasueño, Albuquerque, Providencia, Bajo Nuevo y las del Este Sudeste, obtenidas a través de imágenes de los sensores remotos IKONOS y Landsat), para determinar la profundidad de la zona sub-litoral de las áreas mencionadas (Ariza, Roa , & Ramirez , 2014).

La geodatabase Batimetría 2014 fue cargada en ArcGIS 10.1 para su visualización, seleccionando el área del atolón Bajo nuevo, posteriormente se procedió a realizar el MBT mediante los pasos siguientes:

Arc Toolbox\3D analyst tools\Data managment\TIN\Output TIN (Nombre archivo salida) - Coordinate (Magna_Colombia_Oeste_Oeste)\Input feature (Nombre archivo a cargar).

Con el anterior procedimiento, se generaron unas de redes irregulares de triangulación en base a imágenes Landsat, las cuales permitieron graficar un Modelo Batimétrico Tridimensional (Figura 23), obteniendo finalmente la batimetría del atolón Roncador y la transformación digital al sistema de referencia horizontal cartográfico MAGNA Colombia Oeste Oeste.

6.1.2.4 Interpretación visual de imágenes y análisis de modelos digitales del terreno

Con la superposición de las imágenes disponibles, se procedió a la verificación de los siguientes aspectos:

- Resolución espacial y radiométrica de las imágenes disponibles
- Color, textura, formas, patrón, tono o color, textura y asociación de las unidades geomorfológicas
- Batimetría
- Dirección del viento barlovento y sotavento

De forma simultánea se efectuó el análisis del terreno, con base en el modelo digital del terreno obtenido, a través del software ArcGIS, para generar vistas en perspectiva, mapa de

pendientes del terreno, y formas de clasificación y despliegue de rangos de altura del terreno del atolón Roncador (Figura 24).

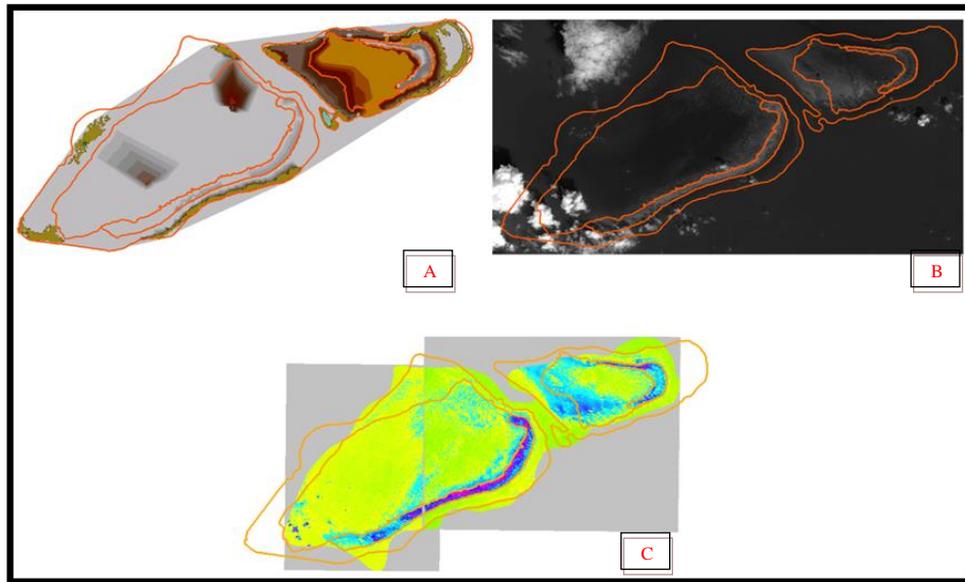


Figura 21 Izquierda imagen datos batimétricos (A), Imagen derecha: Imagen Landsat 8 banda 2, sin tratamiento digital (B). Central: Imagen tratada digitalmente con los procedimientos descritos en la tabla 3 (C). Se realiza la interpretación de la imagen de acuerdo Wiens línea color naranja.

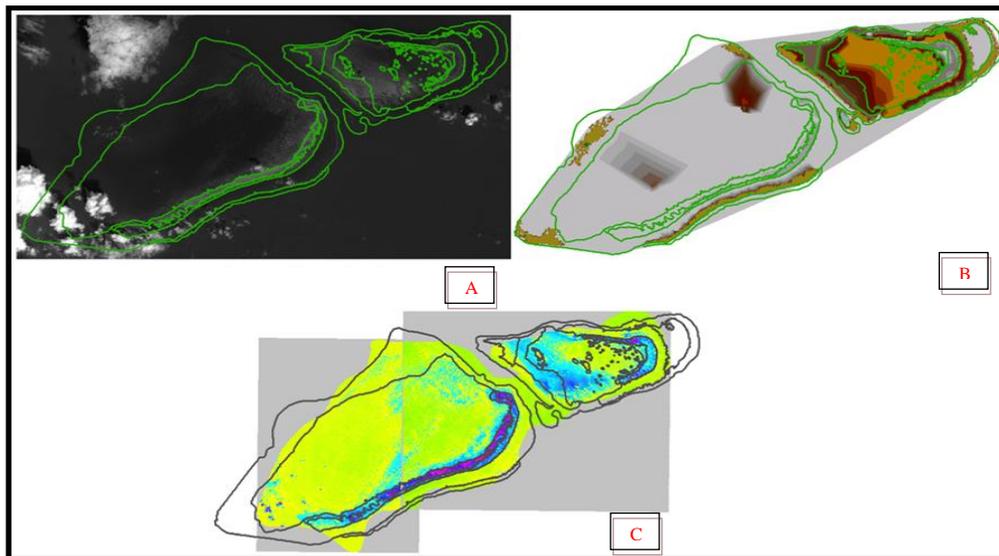


Figura 22 Interpretación de imagen de acuerdo con Hopley (detallado); imagen superior izquierda línea verde fondonegro landsat 8 banda 2, Imagen superior derecha datos batimetricon con profundidades con intervalos de 1 metro, imagen inferior central con los procedimientos descritos en la tabla 4

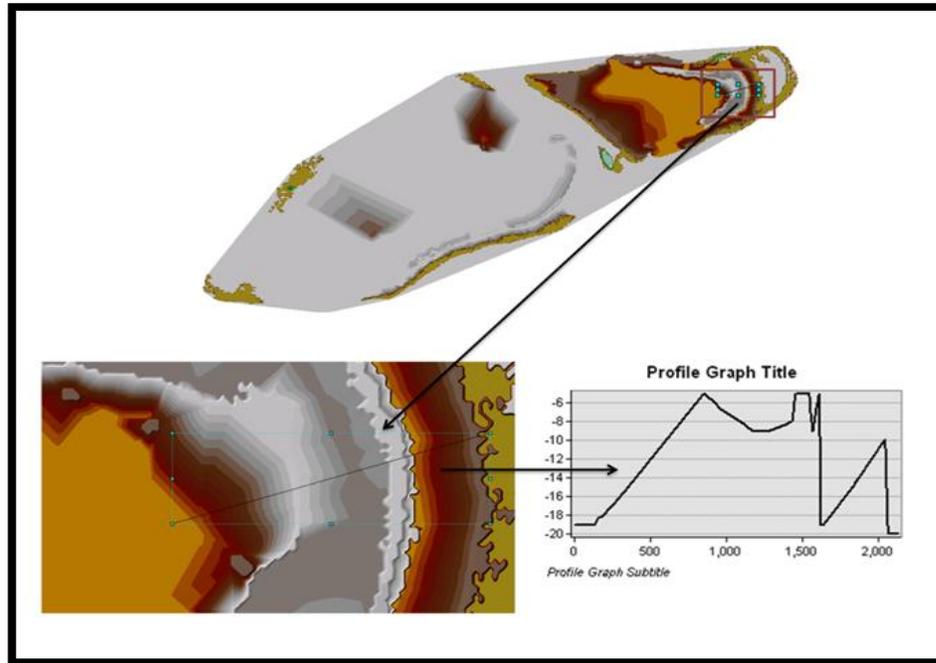


Figura 23. Perfil del transecto que pasa desde la laguna hasta la cresta algal del atolón de Bajo Nuevo, corroborando las profundidades

6.1.2.5 Generación de shapefile

Se generaron archivos shapefile de geometría polígono, con las delimitaciones de las geoformas, acuerdo clasificaciones según Darwin (1842); Wiens (1962) y Hopley (2011) y se le asignaron atributos para la identificación de las geoformas presentes en cada una de las clasificaciones.

6.1.2.6 Asignación de Atributos

Con la generación de los shapefiles, se procedió a asignar atributos (tipo de shapefile, sistema de clasificación, , nombre de la zonificación, datum horizontal, fuente cartográfica

y formato digital de la imagen con la que se realizó la interpretación de las unidades geomorfológicas) para que el usuario pueda identificarlas en el área de estudio. (Figura 25)

Sis_Clas	Nombre_Sis	Fuente_Car	Año_Fre_Ca	Datum_Hor	Forr
Clasificación por Wiens	Outer reef (arrecife exterior)	13NOV05160451-S2AS-053224676010_01_P002.TIL	<Null>	Magna-West-West	TIL
Clasificación por Wiens	Lagoon (lagunas)	13NOV05160451-S2AS-053224676010_01_P002.TIL	<Null>	Magna-West-West	TIL
Clasificación por Wiens	Outer reef (arrecife exterior)	13NOV05160451-S2AS-053224676010_01_P002.TIL	<Null>	Magna-West-West	TIL
Clasificación por Wiens	Reef Rim (arrecife de borde)	13NOV05160451-S2AS-053224676010_01_P002.TIL	<Null>	Magna-West-West	TIL
Clasificación por Wiens	Lagoon (lagunas)	13NOV05160451-S2AS-053224676010_01_P002.TIL	<Null>	Magna-West-West	TIL
Clasificación por Wiens	Reef Rim (arrecife de borde)	13NOV05160451-S2AS-053224676010_01_P002.TIL	<Null>	Magna-West-West	TIL

Figura 24 Asignación de atributos al shapefile de la clasificación según Wiens (1962).

6.1.2.7 Trabajo de Campo

Se realizó en el área de estudio un levantamiento hidrográfico a bordo del Buque Oceanográfico ARC Malpelo, donde se logró recolectar información batimétrica en 1138 millas náuticas, con la ayuda de la ecosonda multi haz Kongsberg EM-302, y datos meteorológicos con la estación que el buque tiene a bordo, durante 15 días. En la (figura 26) se observa las rutas y rumbos que realizó el buque oceanográfico ARC Malpelo en el área de estudio.

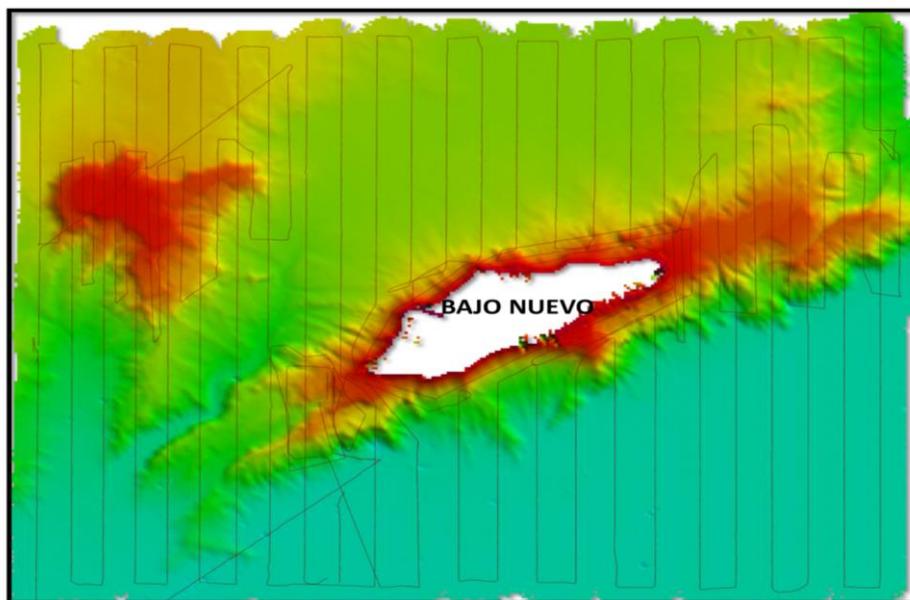


Figura 25 Trabajo de campo área general de Bajo Nuevo, rutas y maniobras realizadas por el ARC Malpelo aguas profundas.

6.1.2.8 Generación de la base de datos

La información espacial (fotografías, imágenes, mapas, capa de unidades geomorfológicas, modelos digitales del terreno, datos de campo y la cartografía geomorfológica), se organizó en una sola base de datos geográfica (Geodatabase- Archivo .gdb), con el fin de facilitar su organización digital y su acceso y consulta. (Figura 27)

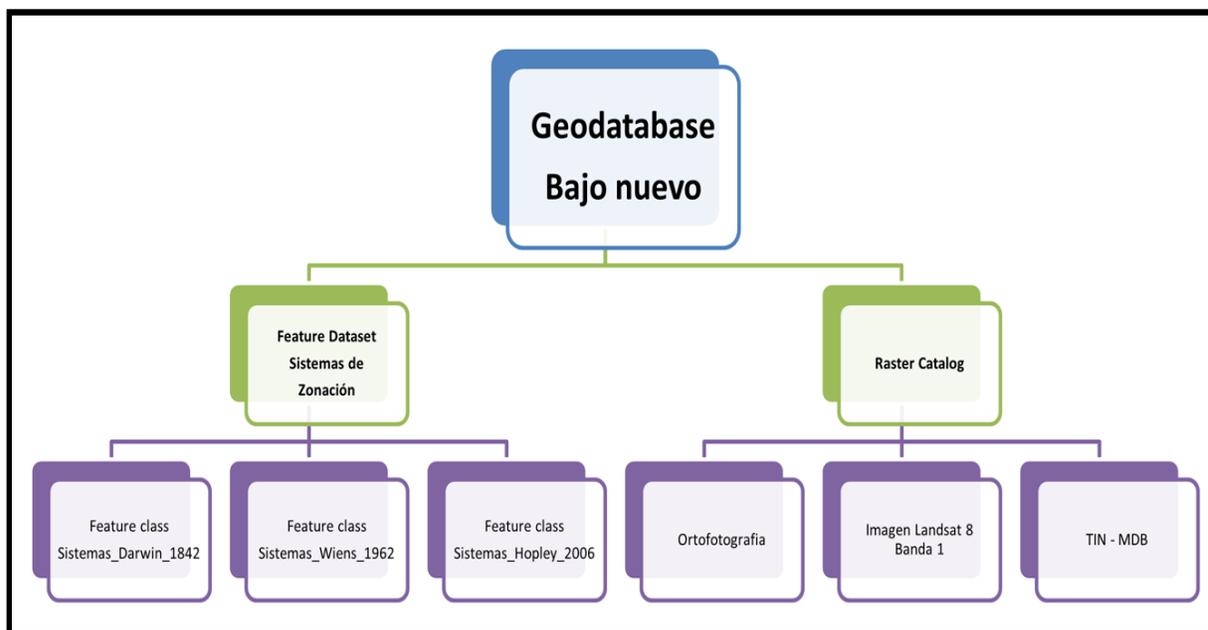


Figura 26 Geodatabase de las zonificaciones del atolón Bajo Nuevo

Esta Geodatabase está compuesta por tres feature dataset, el primero contiene los sistemas de clasificación según Darwin (1842), Wiens (1962) y Hopley (2011), el segundo contiene el catálogo de las imágenes Landsat 8, ortofotografías y modelo digital batimétrico (MDB).

6.1.2.9. Generación de cartografía geomorfológica digital e impresa (escala 1:30.000)

Se generó la cartografía geomorfológica del atolón Bajo Nuevo en escala 1:30.000 de las clasificaciones según Darwin, Wiens y Hopley (Anexos A, B y C), y la creación de un paquete de mapas (.mpk), los cuales permitirán contar con la cartografía y la información digital para realizar análisis, correcciones o mejoras de los productos elaborados.

6.1.2.10 Generación de Metadatos

Los datos de importancia para la trazabilidad de la cartografía geomorfológica generada dentro del desarrollo del trabajo de grado, fueron documentados a través del diligenciamiento de una plantilla de metadatos en ArcGIS 10.1.

7 RESULTADOS

Zonificación del atolón de Bajo Nuevo, de acuerdo con el sistema de clasificación según Darwin de 1842

Para esta clasificación se tomaron como insumos la imagen Landsat 8 y el Modelo Batimétrico Tridimensional (MBT). Con el tratamiento digital realizado a la imagen Landsat 8 (tabla 3), se realizó un trabajo de campo aborde del buque oceanográfico e hidrográfico ARC Malpelo obteniendo como resultado datos batimétricos donde se logró demostrar que el tratamiento de imagen realizada con landast 8 y los datos batimétricos concuerdan para la clasificación según Darwin. Así mismo se evidencia un cambio significativo de colores; de un tono naranja a un tono amarillo permitiendo observar la geoforma del Atolón Bajo Nuevo. Además se verificó su forma a través de la visualización del MBT (Figuras 28, 29, 30,31)

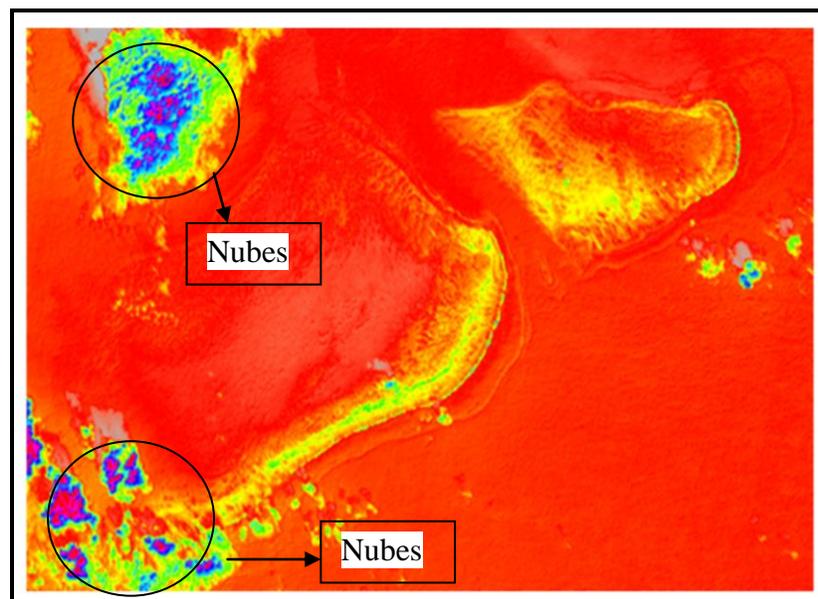


Figura 27 Imagen Landsat 8 área general Bajo Nuevo con tratamiento digital en banda 1, donde se observa la diferenciación de colores de un tono naranja a un tono amarillo y verde claro, significa formación geomorfológica coralina.

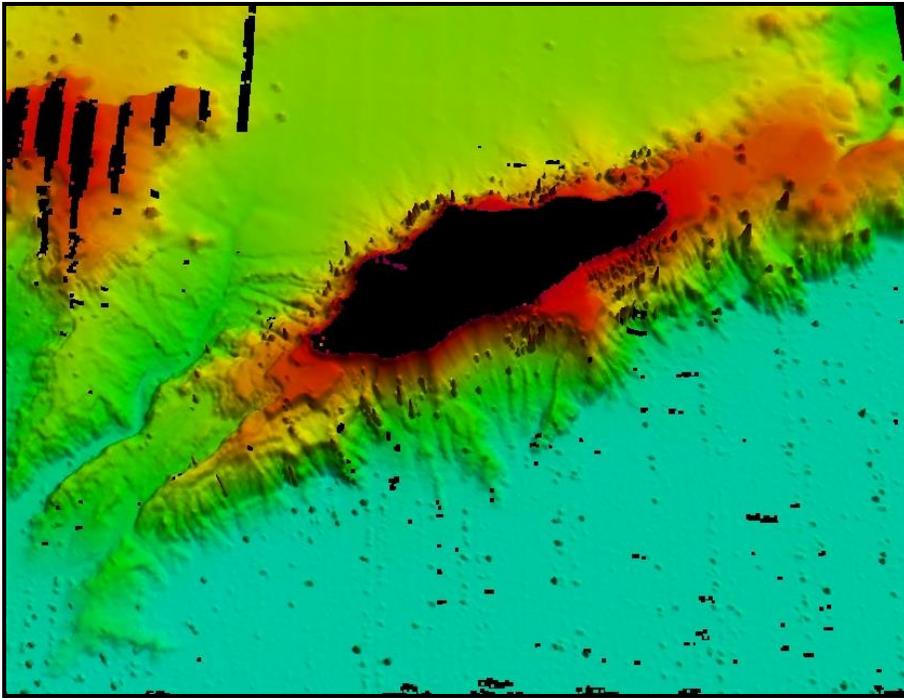


Figura 28 batimetría del área general de bajo Nuevo, realizado en trabajo de campo mes de septiembre de 2016. (Centro de investigación oceanográfica e hidrográfica)

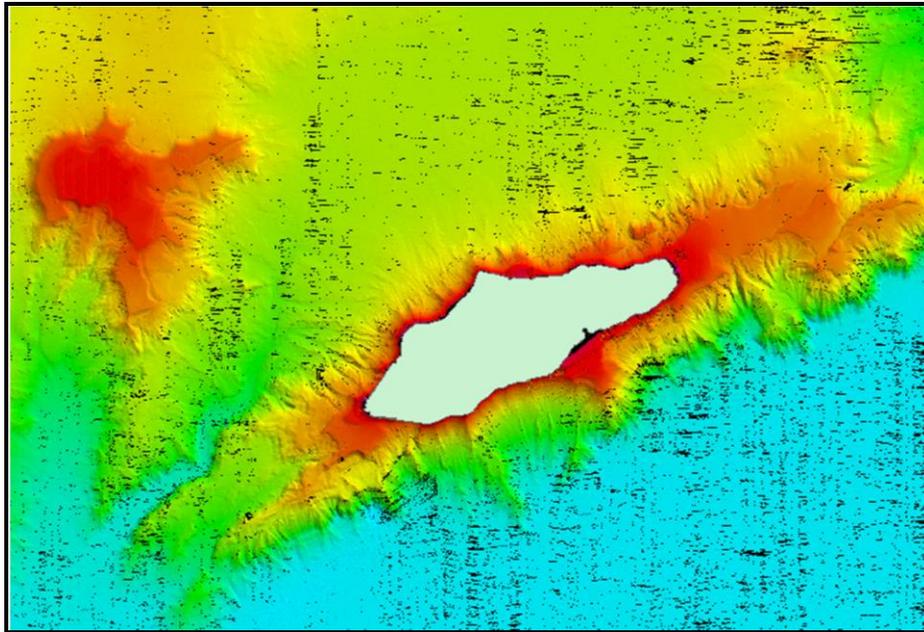


Figura 29 Atolón Bajo Nuevo de acuerdo con clasificación según Darwin (1842) (Centro de investigación oceanográfica e hidrográfica)



Figura 30 Atolón Bajo Nuevo, de acuerdo con la clasificación según Darwin (1842).

Zonificación del atolón de Bajo Nuevo, de acuerdo con el sistema de clasificación según Wiens de 1962

Para esta clasificación se tomaron como insumos las aerofotografías digitales, las imágenes Landsat 8, el MDT y el MBT, realizándoles el tratamiento digital mencionado (tabla 3), con el fin de delimitar las geformas presentes en el atolón Bajo Nuevo. (Figura 33)

Outer reef (arrecife exterior): Se utilizó la imagen Landsat. La delimitación se realizó desde el inicio del atolón de arrecife hasta el frente arrecifal, donde la energía de la ola rompe contra arrecife y genera espuma blanca, como se observa en la (figura 32).

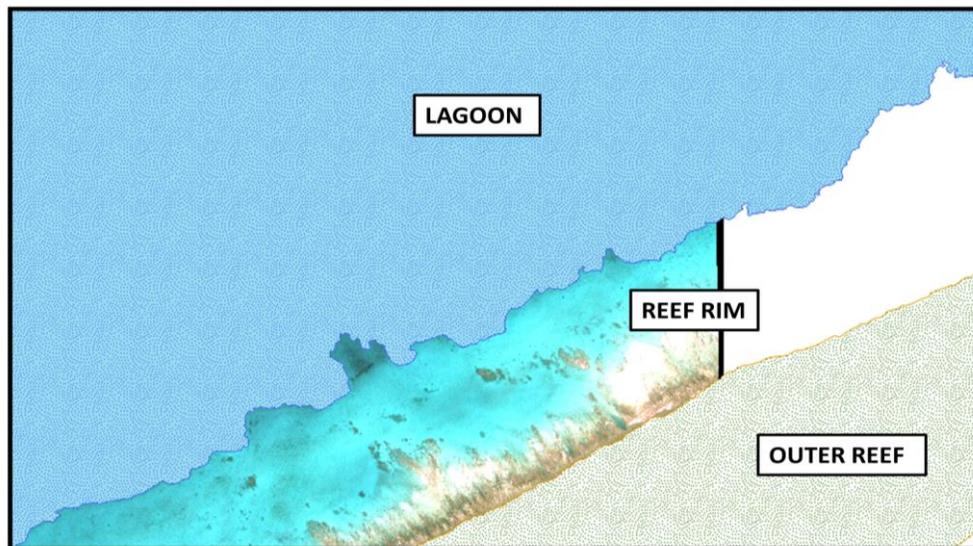


Figura 31 Delimitación del outer reef, arrecife exterior; a partir de la imagen Landsat 8.

Reef rim (arrecife de borde): La delimitación se realizó desde el frente arrecifal, basándose en las aerofotografías, la cuales tiene mayor resolución espacial, permitiendo observar de mejor forma la franja blanca y café (figura 32), que es la zona donde hay mayor pérdida de energía del oleaje. El MBT se utilizó para delimitar la pendiente que presenta un grado mayor de inclinación, que es allí donde se depositan residuos calcáreos y hay presencia de crestas algales. (Figura 33)

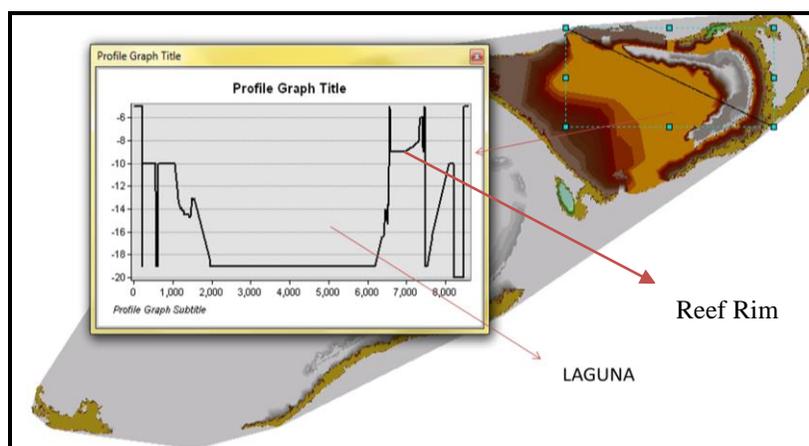


Figura 32 Delimitación del Reef Rim (arrecife de borde), y Lagoon (laguna) utilizando el MBT y la graficación de un transecto del mismo. Se observa el mayor grado de inclinación de la geofoma Reef Rim y el inicio de la laguna en la gráfica del perfil.

Lagoon (laguna): Se realizó con base en la batimetría, visualizando el mayor grado de inclinación y realizando perfiles para corroborar lo observado; además se complementó con la visualización de la superposición de las aerofotografías digitales con el MBT. (Figura 33)

Finalmente se obtuvo la clasificación de las unidades geomorfológicas presentes en el atolón Bajo Nuevo, de acuerdo la clasificación según Wiens. (Figura 34)

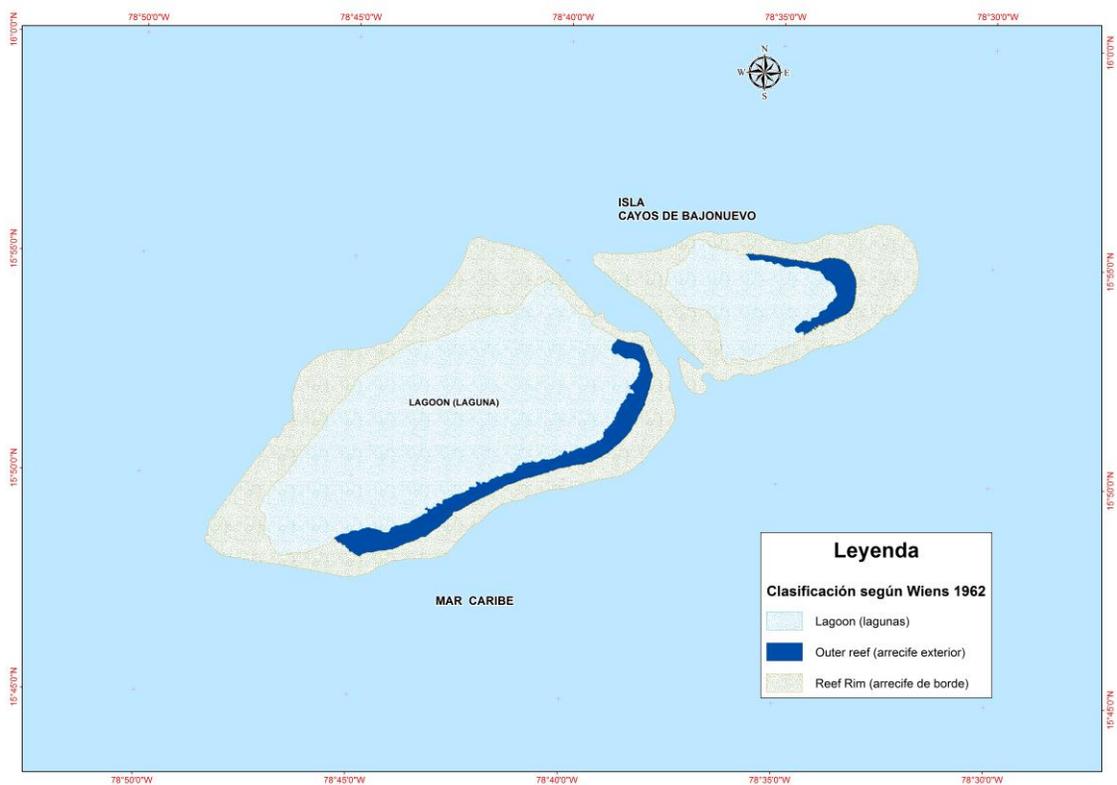


Figura 33 Clasificación de las unidades geomorfológicas en el atolón Bajo Nuevo, de acuerdo al sistema de clasificación según Wiens (1962).

Zonificación del atolón de Bajo Nuevo, de acuerdo con el sistema de clasificación según Hopley de 2011

Fore reef slope (pendiente arrecifal frontal): La delimitación se realizó de la misma forma que la delimitación del Outer reef (arrecife exterior); de acuerdo a la clasificación de

Wiens; teniendo en cuenta que corresponde a la misma geoforma, pero en este caso describe con otro termino. (Figura 35)

Reef crest (cresta arrecifal): La delimitación se realizó de la misma forma que delimitación del reef rim (arrecife de borde); pero en este caso, no se delimita hasta la pendiente de mayor grado de inclinación, sino hasta donde se observa la espuma blanca, producto de la rotura del oleaje. (Figura 35)

Algal crest (Cresta algal): La delimitación se realizó desde el termino del crest reef; donde la energía es mínima y domina los céspedes algales; hasta donde se depositan los sedimentos calcáreos (ditrital zone), como se evidencia en la figura 35, donde hay un cambio significativo de un tono cafe a un tono azul claro.

Ditrital zone (zona detrítica): La delimitación se realizó a partir de observar los cambios de color. En esta zona el color predominante es un color azul claro como se observa en la figura 32 y corresponde a la zona donde se depositan los sedimentos calcáreos o materiales gruesos derivados del arrecife y termina hasta donde inicia la laguna, como se menciona en la clasificación según Wiens.

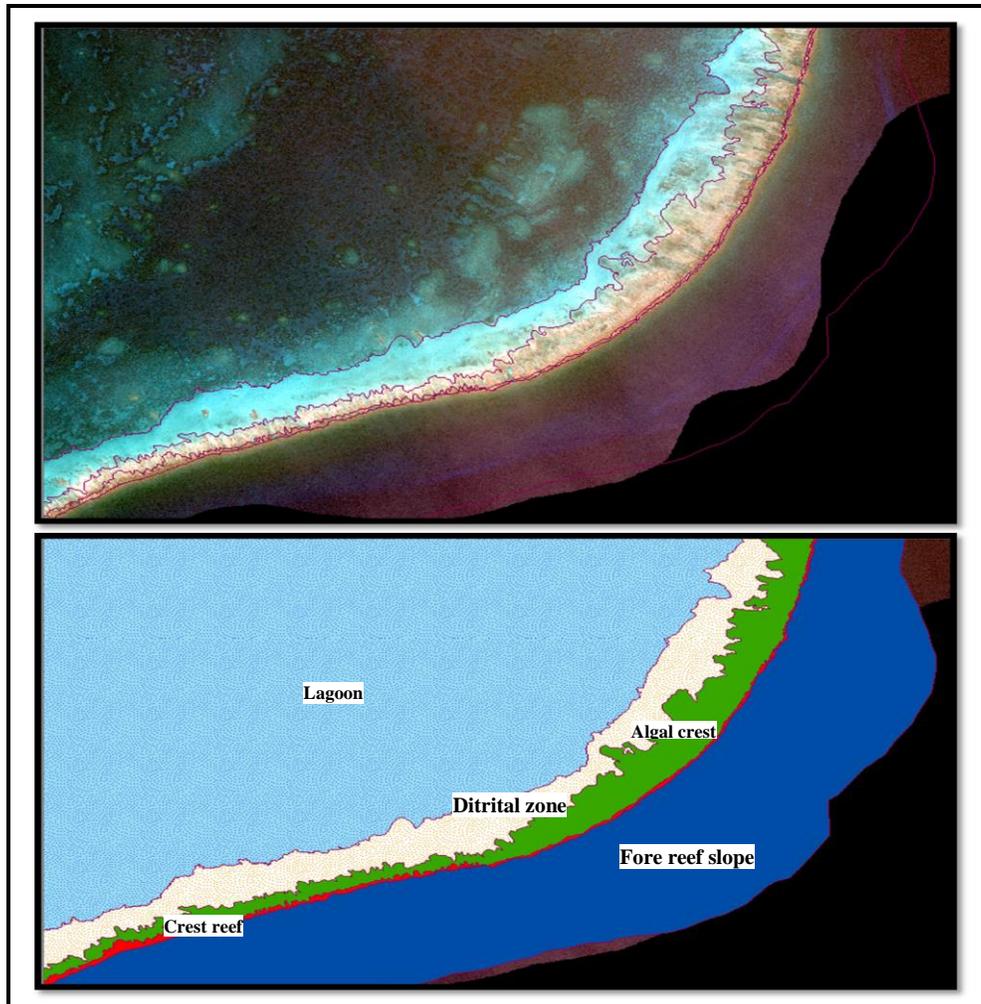


Figura 34 Delimitación del reef crest (cresta arrecifal), con base en la aerofotografía digital, obteniendo el polígono respectivo en color rojo. Delimitación del algal crest (Cresta algal), con base en la aerofotografía digital, obteniendo el polígono de la zona en color verde.

Lagoon (laguna): Se delimito de igual manera como se realizó en la clasificación según Wiens. (Figura 35)

Patch reefs (parches de arrecife): Se identificaron y delimitaron los parches de arrecife, teniendo en cuenta que estas son pequeñas plataformas creadas por el crecimiento de coral dentro una laguna.

Identificando cada una de las unidades geomorfológicas de acuerdo con la clasificación según Hopley (2011), se obtuvo el mapa cartográfico con las unidades geomorfológicas presentes en el atolón Bajo Nuevo. (Figura 36)



Figura 35 Clasificación según Hopley (2011) en el atolón Bajo Nuevo.

Finalmente con la digitalización de las unidades geomorfológicas y la asignación de atributos a los shapefiles, se obtuvo la dimensión del área y perímetro de cada unidad geomorfológica en cada una de las tres clasificaciones, como se muestra en las tablas 4,5 y 6.

Tabla 4. *Clasificación de Darwin: perímetro y área*

Isla	Tipo de clasificación	Perímetro (m)	Área (m²)
Bajo Nuevo	Atolón	8,564	222,758

Tabla 5. *Clasificación de Wiens: perímetro y área*

Isla	Tipo de clasificación	Perímetro (m)	Área (m²)
Bajo Nuevo	Lagunas	2,514	21,302
	Zona de arrecife posterior	4,851	12,171
	Cresta arrecifal	7,322	31,191

Tabla 6. *Clasificación de Hopley: perímetro y área*

Isla	Tipo de clasificación	Perímetro (m)	Área (m²)
Bajo Nuevo	Lagunas	2,514	111,388
	Planicie arrecifal externa	2,497	2,992
	Cresta algal	1,839	7,236
	Zona de arrecife posterior	1,891	7,088
	Parche arrecifal	46,177	41,436
	Cresta arrecifal	46,177	14,656
	Planicie arrecifal interna	2,497	6,244

8. CONCLUSIONES

Para concluir, es importante señalar la necesidad de continuar con los estudios oceanográficos, atmosféricos y biológicos de todos los cayos del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, ya que se encuentra en una zona estratégicamente ubicada entre los territorios marítimos de dos países, y es importante demostrar ante la Corte Internacional de Justicia (CIJ) los intereses territoriales y económicos en el área.

Las fuentes de sensoramiento remoto brindan una gran ventaja para recolectar información en áreas de difícil acceso, como sucede en las del presente estudio, donde se presenta poca profundidad y el oleaje tiene una fuerte dinámica, lo que dificultan la toma de datos y la realización de levantamientos batimétricos. Pero es importante enfatizar que esta recolección in situ es de vital importancia para corroborar que la interpretación realizada sea lo más acertada y obtener así resultados más precisos.

Con los resultados obtenidos de la zonificación de los atolones de arrecife de Bajo Nuevo mediante el software ArcGIS el cual hace parte de un sistema de información geográfica, se demuestra su importancia en el procesamiento de información y generación de cartografía del área de estudio como un elemento adicional para la generación de conocimientos y de argumentos técnicos para la defensa de Colombia ante la CIJ.

Con los diferentes datos obtenidos en la zona de Bajo Nuevo, si bien se lograron los objetivos trazados, se llegó a la conclusión de que estas zonas apartadas del continente

necesitan monitoreo permanente de datos oceanográficos y atmosféricos, con tecnología de punta, para conocer en tiempo real fenómenos y cambios presentados en el área.

Finalmente, se compararon los resultados obtenidos en la presente investigación con los datos trabajados por parte del Invemar y se evidenció su gran similitud. Sin embargo, el nivel de detalle del presente estudio es mayor en cuanto a las resoluciones espaciales de las fuentes utilizadas.

El establecimiento de las unidades geomorfológicas presentes en atolón Bajo Nuevo, permitió la generación de la cartografía digital geomorfológica de detalle (1:30.000) de cada una de las clasificaciones mencionadas; sirviendo como complemento para la determinación del máximo y mínimo nivel del mar en las Islas Cayos del Norte, tema de interés estratégico para el país en el marco del litigio con Nicaragua ante la CIJ.

La presente investigación se encuentra dentro de la línea de investigación de sensores remotos, con el estudio de procesos físicos y biológicos mediante el sensoramiento remoto y la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para solución de problemas concretos. En este sentido, la zonificación del atolón Bajo Nuevo, mediante el sensoramiento remoto y la utilización del SIG, para el procesamiento de la información y desarrollo de cartografía del área de estudio, se ha constituido como un elemento adicional de generación de conocimientos y de argumentos técnicos para la defensa de Colombia ante la Corte Internacional de Justicia, dentro del marco del litigio con Nicaragua.

RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta los cambios océano-atmosféricos presentes en el área de estudio y en general del Caribe colombiano; así como la tendencia al aumento del nivel del mar y la variabilidad espacio temporal de los vientos, se considera importante continuar con el monitoreo del comportamiento de los arrecifes de coral en la Reserva de Biosfera Seaflower; frente a estos cambios, debido a que estos afectan directamente su desarrollo y pueden cambiar sustancialmente su geomorfología.

Es importante que el Estado Colombiano, mediante sus Centros de Investigación; como el CIOH, realice cartas oficiales donde se especialice con los signos apropiados el arrecife de coral que bordea la Isla Cayo de Bajo Nuevo, cumpliendo con lo estipulado en la CONVEMAR, y disponer de argumentos técnicos claros para solicitar la modificación de la delimitación del mar territorial, ante la CIJ dentro del litigio con Nicaragua.

Con la revisión de las fuentes bibliográficas, se observó que se describe a Bajo Nuevo de diferentes maneras: atolón, bajo, isla y/o cayo. Con los resultados obtenidos en la presente investigación, es importante discutir lo anterior y asignar un nombre definitivo como por ejemplo el “Bajo Nuevo”, como se han nombrado a varios atolones en el mundo, como en el caso de los atolones que conforman la República de las Islas Marshall.

BIBLIOGRAFIA

- Afanador, F. y Carvajal, A. (2009). LiDAR, ortofotografía digital y SIG en análisis geomorfológicos del Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 27, 112-134.
- Alcolado, P. M. (2004). *Manual de capacitación para el monitoreo voluntario de alerta temprana en arrecifes coralinos*. La Habana: Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente; Proyecto Agencia de Medio Ambiente; PNUD/GEF Sabana-Camagüey; Instituto de Oceanología; MINTUR.
- Ariza, A., Roa, O. y Ramírez, M. (2014). *Procesamiento digital de imágenes aplicado a manejo de zonas costeras e insulares (fase I)*. (Informe técnico final). Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Bird, E. (2008). *Coastal geomorphology. An introduction* (2.^a ed.). John Wiley & Sons, Ltd.
- Brock, J., Sallenger, A. H., Krabill, W., Swift, R., Manizade, S., Meredith, A., Jensen, M. y Eslinger, D. (1999). Aircraft laser altimetry for coastal process studies. *Coastal Sediments '99: Proceedings of the 4th International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Processes* (pp. 2414-2429). Hauppauge, New York: American Society of Civil Engineers.
- Andrade. (2000). *The circulation and variability of the Colombian Basin in the Caribbean Sea. (Tesis doctoral)*. Wales: University of Wales.

- Fu, L., & Holt, B. (1983). Some examples of detection of oceanic mesoscale eddies by the SEASAT synthetic-aperture radar. En ENAP, Estabilización Geomorfológica de los cayos del archipiélago de San Andrés y Providencia (pág. 32).
- Andrade, C., Barton, E., & Mooers, C. (2003). Evidence for an eastward flow along the Central and South American Caribbean Coast. En ENAP, Estabilización Geomorfológica de los cayos del archipiélago de San Andrés y Providencia (pág. 32).
- Brock, J. y Purkis, S. (2009). The emerging role of LiDAR Remote Sensing in Coastal Research and Research Management. *Journal of Coastal Research, Special Issue 53*, 1-5.
- Bruckner, A. (2012). *Global Reef Expedition: San Andres Archipelago, Colombia*. (Field Report. April 9-24, 2012). Landover MD: Khaled bin Sultan Living Oceans Foundation.
- Choat, J. H. y Bellwood, D. R. (1991). Reef fishes: their history and evolution. En P. F. Sale (Ed.), *The ecology of fishes on coral reefs* (pp. 39-66). San Diego: Academic Press.
- Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Coralina). (2010). *Sistema de Información Geográfica (SIG-Coralina)*. San Andrés Isla, Colombia: Autor.
- Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Coralina), Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives De Andrés” (Invemar). (2012). *Atlas de la Reserva de Biósfera Seaflower. Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. Santa Marta, Colombia: Autor.

- Darwin, C. (1842). *The structure and distribution of coral reefs*. Londres: Smith, Elder and Co, 65, Cornhill.
- Díaz, J. M. (Ed.) (1996). *Atlas de los arrecifes coralinos del Caribe colombiano: I. Complejos arrecifales oceánicos*. Santa Marta: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives De Andrés” (Invemar).
- Díaz, J. M. (Ed.) (2000). *Áreas coralinas de Colombia*. Santa Marta: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives De Andrés” (Invemar).
- Díaz Ruiz, J. A. (2010). *Análisis multitemporal de la línea de costa de Cayo Serrana* (Tesis de grado no publicada). Escuela Naval de Cadetes "Almirante José Prudencio Padilla", Cartagena, Colombia.
- Done, T. (2011). Coral reef, definition. En D. Hopley (Ed.), *Enciclopedia of modern coral reefs. Structure, form and process* (p. 261). Netherlands: Springer.
- Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla” (ENAP), Colciencias. (2010). *Estabilización geomorfológica de los cayos del archipiélago de San Andrés y Providencia*. Proyecto de investigación. Cartagena, Colombia: Autor.
- Esri. (2013). Ayuda de ArcGIS 10.1. Recuperado el 6 de noviembre de 2014, de <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#/na/015w0000004100000/0/>
- Fernández García, F. (2000). *Introducción a la fotointerpretación*. Barcelona: Ariel.
- Fernández-Palacios, J. M. y Morici, C. (Eds.) (2004). *Ecología insular / Island ecology*. España: Asociación Española de Ecología Terrestre (AEET), Cabildo Insular de La Palma.

- Finkl, C. W. (2011). Reef classification by Fairbridge (1950). En D. Hopley (Ed.), *Enciclopedia of modern coral reefs. Structure, form and process* (p. 846). Netherlands: Springer.
- Flood, P. (2011). Reef classification by Maxwell (1968). En D. Hopley (Ed.), *Enciclopedia of modern coral reefs. Structure, form and process* (p. 854). Netherlands: Springer.
- Floyd, F. y Sabins, J. (1996). *Remote sensing principles and interpretation* (3.^a ed.). New York: Freeman.
- Garcilaso de la Vega, I. (1609). *Primera parte de los "Comentarios reales" de los incas*. Lisboa: Pedro Crasbeeck.
- Garzón-Ferreira, J. y Díaz, J. M. (2003). The Caribbean coral reefs of Colombia. En J. Cortés (Ed.), *Latin American coral reefs* (pp. 275-302). Amsterdam: Elsevier Science B. V.
- Geister, J. (1977). The influence of wave exposure on the ecological zonation of Caribbean coral reefs. En D. L. Taylor (Ed.), *Proceedings of Third International Coral Reef Symposium Vol. 2: Geology* (pp. 23-29). Miami, Florida: Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science.
- Geister, J. y Díaz, J. M. (2009). *Ambientes arrecifales y geología de un archipiélago oceánico: San Andrés, Providencia y Santa Catalina (mar Caribe, Colombia)*. Bogotá: Instituto Colombiano de Geología y Minas (Ingeominas).
- Graus, R. y Macintyre, I. (1989). The zonation patterns of Caribbean coral reefs as controlled by wave and light energy input, bathymetric setting and reef morphology: computer simulation experiments. *Coral Reefs*, 8, 9-18.

- Green, E., Mumby, P., Edwards, A. y Clark, C. (2005). *Remote Sensing: Handbook for Tropical Coastal Management*. París: Unesco.
- Hopley, D. (2006). Coral reef. En M. Schwartz (Ed.), *Encyclopedia of Coastal Science* (p. 343). Netherlands: Springer Science & Business Media.
- Hopley, D. (2011). *Enciclopedia of Modern Coral Reefs. Structure, Form and Process*. Netherlands: Springer.
- Hsu, J. (2005). Engineering applications of coastal geomorphology. En M. Schwartz (Ed.), *Encyclopedia of Coastal Science*. Netherlands: Springer Science & Business Media.
- Huggett, R. J. (2007). *Fundamentals of Geomorphology* (2.^a ed.). London, New York: Routledge.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2007). *Fundamentos físicos de teledetección*. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.
- Kench, P. S. (2014). Developments in coral reef and reef island geomorphology. *Geomorphology*, 222, 1-2.
- Ladd, H. S. (1977). Types of coral reefs and their distribution. En O. A. Jones y R. Endean (Eds.), *Biology and Geology of Coral Reefs. Vol. IV: Geology 2* (pp. 1-19). New York, London: Academic Press.
- Liévano, E. G. (2011). Colombia insular y San Andrés como archipiélago oceánico. En *Geoscopia: Contenido Geográfico. Visión Geográfica de Colombia*. Recuperado el 14 de octubre de 2014, del sitio web de la Sociedad Geográfica de Colombia, <http://www.sogeocol.edu.co/documentos/Colinsu.pdf>

- Livingstonel, D., Raper, J. y McCarthy, T. (1999). Integrating aerial videography and digital photography with terrain modeling: an application for coastal geomorphology. *Geomorphology*, 29, 77-92.
- Mantilla, S. (Ed.). (2009). *La disputa colombo-nicaragüense por San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Memorias del Foro Internacional "Fronteras en el Caribe"*. San Andrés: Universidad Nacional de Colombia (Sede Caribe), Instituto de Estudios Caribeños.
- Molina, A., Benavides, J., Afanador, F., Gamero, E. y Ospina, H. (2000). Caracterización geomorfológica de la franja litoral del departamento del Atlántico - Caribe colombiano. *Anuario Científico CIOH (1975-2000)*, 1, 37-35.
- Montaggioni, L. F. y Braithwaite, C. J. R. (Eds.). (2009). *Quaternary coral reef systems. History, development processes and controlling factors*. Gran Bretaña: Elsevier.
- Molinari, R., Splillane, M., Brooks, I., Atwood, D., & Duckett, C. (1981). Surface currents in the Caribbean Sea as deduced from Lagrangian observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 6537-6542.
- Ojeda-Zújar, J., Vallejo-Villalta, I., Hernández-Calvento, L. y Álvarez-Francoso, J. (2007). Fotogrametría digital y lidar como fuentes de información en geomorfología litoral (marismas mareales y sistemas dunares): el potencial de su análisis espacial a través de SIG. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 44, 215-236.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1982). *Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar*. Ginebra: Autor.

Parsons, J. J. (1985). *San Andrés y Providencia: una geografía histórica de las islas colombianas del Caribe*. Bogotá: El Áncora.

República de Colombia, Dirección General Marítima (Dimar), Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH). (1999). *Derrotero de las costas y áreas insulares de Colombia*. Recuperado de <http://www.cioh.org.co/pruebaderrotero/index.html>

República de Colombia, Dirección General Marítima (Dimar), Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH). (2013). *Atlas geomorfológico del Litotal Caribe Colombiano (Vol. 8)*. Cartagena de Indias, Colombia: Autor.

República de Colombia, Gobierno Nacional. (2013, septiembre 9). *Decreto 1946 de 2013, por medio del cual se reglamentan los artículos 1°, 2°, 3°, 4°, 5°, 6° y 9° de la Ley 10 de 1978, y 2° y 3° de la Ley 47 de 1993 en lo concerniente al mar territorial, la zona contigua, algunos aspectos de la plataforma continental de los territorios insulares colombianos en el mar Caribe occidental y a la integridad del departamento archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. Colombia: Autor.

Ruiz de Alegría-Arzaburu, A., Mariño-Tapia, I., Enriquez, C., Silva, R. y González-Leija, M. (2013). The role of fringing coral reefs on beach morphodynamics. *Geomorphology*, 198, 69-83.

Stumpf, R. P., Holderied, K. y Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, 48 (1), 547-556.

- Tabares-Gaviria, N., Soltau, J. M. y Díaz, J. (1996). Caracterización geomorfológica del sector suroccidental del Mar Caribe. *Boletín Científico CIOH*, 17, 3-16.
- Universidad del Norte, Colombia. (2014). *Determinación de la elevación máxima (HAT) y mínima del nivel del mar (LAT) producida por la marea astronómica en San Andrés, Providencia y los Cayos del Norte*. Cartagena: Autor.
- Xu, J. y Zhao, D. (2014). Review of coral reef ecosystem remote sensing. *Acta Ecológica Sinica*, 34 (1), 19-25.
- Yamano, H., Shimazaki, H., Matsunaga, T., Ishoda, A., McClennen, C., Yokoki, H. y Kayanne, H. (2006). Evaluation of various satellite sensors for waterline extraction in a coral reef environment: Majuro Atoll, Marshall Islands. *Geomorphology*, 82 (3-4), 398-411.

ANEXOS

Anexo A. Mapa de zonación de arrecife de coral en la Isla Cayo de Bajo Nuevo, de acuerdo con la clasificación según Darwin de 1842.



Anexo B. Mapa de zonación de arrecife de coral en la Isla Cayo de Bajo Nuevo, de acuerdo la clasificación según Wiens de 1962.

