

ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO DE LA ISLA CAYO DE RONCADOR CON BASE
EN DATOS LIDAR E IMÁGENES DE SENSORES REMOTOS

Teniente de Fragata GUZMÁN ROJAS OSCAR JAVIER

ESCUELA NAVAL DE CADETES “ALMIRANTE PADILLA”
FACULTAD DE OCEANOGRAFÍA FÍSICA
PROGRAMA DE OCEANOGRAFÍA FÍSICA
CARTAGENA DE INDIAS D.T Y C

2015

ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO DE LA ISLA CAYO DE RONCADOR CON BASE
EN DATOS LIDAR E IMÁGENES DE SENSORES REMOTOS

Proyecto de grado requisito para optar al título de Oceanógrafo Físico

Teniente de Fragata GUZMÁN ROJAS OSCAR JAVIER

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

2015

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Cartagena de Indias D. T. Y C., 23 de septiembre de 2015

Dedicatoria

A Dios, por sus inmensas bendiciones en todo momento y permitirme hacer mis sueños realidad. A mis padres Amanda y Jairo, por el amor y apoyo constante durante mi vida para lograr mis metas. A mis hermanos Mauricio y Diego, quienes con sus consejos y apoyo me han impulsado en mi formación personal y profesional.

AGRADECIMIENTOS

Al señor M.Sc. Fernando Afanador por su orientación, conocimiento y permanente disposición para hacer posible el desarrollo del presente trabajo. Al Señor Capitán de Fragata Hermann León y Ph.D. Martha Prada por su apoyo y entusiasmo para culminar con éxito este trabajo.

A la Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”, especialmente a la facultad de Oceanografía Física por su apoyo y constante acompañamiento para alcanzar mis metas y brindarme las mejores herramientas para aumentar mi conocimiento profesional.

A la Dirección General Marítima (DIMAR), al Instituto de Investigaciones Marinas Costeras “José Benito Vives De Andrés” (INVEMAR), y al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), por el suministro de la información utilizada para lograr los resultados obtenidos.

Finalmente a mis amigos y compañeros de curso, quienes me acompañaron día tras día en el desarrollo del presente trabajo.

CONTENIDO

Pág.

LISTA DE TABLAS.....	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
2.1. Antecedentes del problema	5
2.2. Descripción general del problema	5
2.3. Formulación del problema.....	6
3. JUSTIFICACIÓN	7
4. ÁREA DE ESTUDIO.....	9
4.1. Circulación superficial.....	11
4.2. Climatología.....	12
4.3. Oleaje	15
4.4. Mareas en el Mar Caribe	17
4.5. Roncador.....	19
4.5.1. Características granulométricas	20

4.5.2. Oleaje en la Isla Cayo de Roncador.....	21
4.5.3. Régimen de corrientes de rotura.....	23
4.5.4. Características hidrodinámicas.....	24
5. OBJETIVOS	25
5.1. Objetivo general.....	25
5.2. Objetivos específicos.....	26
6. MARCO TEÓRICO.....	27
6.1. Clasificación según Darwin (1842).....	31
6.1.1. Atoll reefs (Atolones de arrecife).....	32
6.1.2. Barrier reef (Arrecife de barrera).....	35
6.1.3. Fringing reef (Arrecife franjeante).....	36
6.2. Clasificación según Wiens (1962).....	37
6.3. Clasificación según Hopley (2011).....	39
6.4. Clasificación según Fairbridge (1950).....	42
6.5. Clasificación según Maxwell (1968).....	43
6.6. La percepción remota.....	44
7. METODOLOGÍA PROPUESTA	46
7.1. Materiales y métodos.....	47
7.1.1. Recopilación de la información.....	47
7.1.2. Procesamiento de la información:.....	49
7.1.2.1. Adopción del sistema único de referencia horizontal.....	49

7.1.2.2. Tratamiento digital de imágenes:.....	50
7.1.2.3. Generación de modelos digitales del terreno (MDT) -Datos LiDAR.....	51
7.1.2.4. Modelo Batimétrico Tridimensional (MBT).....	53
7.1.2.5. Superposición de imágenes para interpretación.....	55
7.1.2.6. Interpretación visual de imágenes y análisis de modelos digitales del terreno	56
7.1.2.7. Generación de shapefiles	58
7.1.2.8. Asignación de atributos asociados.....	58
7.1.2.9. Trabajo de campo.....	58
7.1.2.10. Generación de la base de datos geográfica (Geodatabase)	59
7.1.2.11. Generación de cartografía geomorfológica digital e impresa (escala 1:30.000).....	60
7.1.2.12. Generación de metadatos	60
8. RESULTADOS.....	61
9. CONCLUSIONES.....	70
BIBLIOGRAFÍA.....	74
ANEXOS	81

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Metadatos de las aerofotografías digitales y de sensores remotos utilizados.....	48
Tabla 2: Metadatos de los datos LiDAR y batimetría.....	48
Tabla 3: Tratamiento de digital a las imágenes obtenidas.....	50
Tabla 4: Áreas y perímetros de las zonificaciones para las tres clasificaciones en el atolón Roncador.	69

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Curva espectral de diferentes bentos de arrecifes.	3
Figura 2. División geomorfológica del Caribe colombiano.....	9
Figura 3. Localización del área marina del sector de bancos y bajos.....	10
Figura 4. Corriente superficial en la región atlántica tropical noreste	12
Figura 5. Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).	14
Figura 6. Altura de la ola significativa H_s [m]..	16
Figura 7. Velocidad del viento [m/s].....	16
Figura 8. La marea astronómica en las Islas Cayos del Norte, 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.....	18
Figura 9. Posición geográfica del atolón Roncador	19
Figura 10. La posición de las muestras sedimentológicas tomadas en la Isla Cayo de Roncador. El diámetro promedio de los perfiles se encuentra señalado en la gráfica.).	21
Figura 11. Ubicación de los sensores de nivel del mar en la Isla Cayo de Roncador.....	22

Figura 12. Espectro de oleaje obtenido del sensor ubicado al costado expuesto de la Isla Cayo de Roncador.....	22
Figura 13. Espectro de oleaje obtenido del sensor ubicado al costado protegido de la Isla Cayo de Roncador.	23
Figura 14. Vectores de corriente. Régimen medio, Isla Cayo de Roncador.....	24
Figura 15. Clasificación de los arrecifes de coral según Charles Darwin (1842).	31
Figura 16. Distribución global de atolones.....	32
Figura 17. Etapas en la creación de un atolón.	33
Figura 18. Clasificación de atolones según Wiens (1962).....	37
Figura 19. Clasificación de atolones según Hopley (2011).....	39
Figura 20. Zonificación del arrecife de coral, de acuerdo con las clasificaciones según Darwin (1842), Wiens (1962) y Hopley (2011).....	41
Figura 21. Clasificación de atolones según Fairbridge (1950).....	42
Figura 22. Metodología propuesta.....	46
Figura 23. Imagen Landsat 8 banda 2, sin tratamiento digital. Imagen tratada digitalmente con los procedimientos descritos en la tabla 3. Imagen tratada utilizada para realizar el polígono del atolón Roncador.	51
Figura 24. Modelo Digital de Terreno (MDT) de la Isla Cayo de Roncador, a partir de datos LiDAR.....	53

Figura 25. Batimetría 2014 (IGAC). Red de triangulación irregular. Modelo Batimétrico Tridimensional.....	54
Figura 26. Imágenes de diferentes puntos de observación de la superposición de la aerofotografía aérea digital y el Modelo Batimétrico Tridimensional en el atolón Roncador.	55
Figura 27. Interpretación visual de la imagen Landsat 8, encontrando diferencia de tonos o colores, siendo este el factor principal para la realización de la delimitación del atolón, de acuerdo clasificación según Darwin (1862).	56
Figura 28. Visualización de la batimetría y el Modelo Batimétrico Tridimensional, ubicando la forma y contorno del reef rim, acuerdo la clasificación según Wiens (1962).	57
Figura 29. Análisis del Modelo Digital de Terreno, para la realización de la delimitación de la Isla Cayo de Roncador de acuerdo con la clasificación según Hopley (2011).	57
Figura 30. Asignación de atributos al shapefile de la clasificación según Wiens (1962).	58
Figura 31. Generación de metadatos y almacenamiento en una Geodatabase de ArcGIS.....	59
Figura 32. Imagen Landsat 8 con tratamiento, donde se observa la diferenciación de colores. MBT con el polígono del atolón realizado. Mapa geomorfológico del atolón Roncador.	61
Figura 33. Atolón Roncador, acuerdo clasificación según Darwin (1842)	62

Figura 34. Delimitación del outer reef (arrecife exterior) (borde rojo exterior), a partir de la imagen Landsat.	63
Figura 35. Delimitación del reef rim (arrecife de borde), utilizando el MBT y la graficación del transecto del mismo, observando el mayor grado de inclinación de la geoforma.	64
Figura 36. Delimitación del Lagoon (laguna). Izquierda. MBT con visualización de perfil de la laguna. Derecha. Superposición de las aerofotografías digitales con el MBT para complementar la información.	64
Figura 37. Clasificación según Wiens (1962) en el atolón Roncador.	65
Figura 38. Delimitación del reef crest (cresta arrecifal), con base a la aerofotografía digital, obteniendo el polígono de la zona.	66
Figura 39. Delimitación del algal crest (Cresta algal), con base a la aerofotografía digital, obteniendo el polígono de la zona.	66
Figura 40. Perfil del transecto que pasa por la laguna del atolón Roncador, evidenciando los parches de arrecife (patch reef).....	67
Figura 41. Clasificación según Hopley (2011) en el atolón Roncador.	68

GLOSARIO

Aerofotografía digital: Es una fotografía obtenida por una cámara instalada en una aeronave con una vista aérea controlada vertical (con la distancia focal, parámetros de distorsión de lentes y tamaño del marco negativo conocido) montado con el eje óptico de la cámara, en una vertical cerca al plano del terreno (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2012).

ArcGIS: Es Sistema de Información Geográfica (SIG) para trabajar con mapas e información geográfica. Se utiliza para la creación y el uso de mapas; compilación de datos geográficos; análisis de la información; compartir información geográfica; el uso de mapas e información geográfica en una gama de aplicaciones; y la gestión de la información geográfica en una base de datos (ArcGIS).

Atolón: Es un arrecife anular oceánico, por lo general con forma de anillo más o menos circular; también se define como el conjunto de varias islas pequeñas que forman parte de un arrecife de coral. Está compuesto por sedimentos calcáreos, algas y distintos tipos coral, que cierran una laguna interior y en algunos casos, esta se comunica con el mar. Los atolones se forman cuando un arrecife de coral crece alrededor de una isla volcánica, a medida que la isla se va hundiendo en el océano (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives De Andreis" - INVEMAR, 2000).

IKONOS: Es un satélite comercial de teledetección originalmente de la compañía DigitalGlobe. Fue el primero en recoger imágenes con disponibilidad pública de alta resolución con un rango de resolución de 1 metro en pancromático y de 4 metros en multiespectral, permitiendo obtener aplicaciones en el ámbito del planeamiento urbano, manejo de infraestructura, aplicaciones de agricultura, recursos forestales y medio ambiente. (Geoeye).

Landsat 8: Es un satélite estadounidense de observación de la Tierra, lanzado el 11 de febrero de 2013. Es el octavo satélite del programa Landsat y el séptimo en llegar a órbita con éxito. Hace parte de la llamada Misión de Continuidad de Datos de Landsat (Red Nacional de Teledetección, 2010).

LiDAR (Light Detection And Ranging): 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 & Carvajal, 2009).

Modelo Batimétrico Tridimensional (MBT): Es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. Es utilizado para representar en 3D la batimetría del suelo marino (Universidad de Chile, 2010).

Modelo Digital de Terreno (MDT): Es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. Es utilizado para representar en 3D la topografía de una zona terrestre (Universidad de Chile, 2010).

Sensores Remotos: Son sistemas o instrumentos utilizados para observar la superficie de la tierra a distancia e interpretar las imágenes o valores numéricos adquiridos, con el fin de obtener información significativa de objetos particulares en la tierra (Buiten & Clevers, 1993).

RESUMEN

Con el fin de explicar las distribuciones geomorfológicas de la Isla Cayo de Roncador, se realizó un análisis geomorfológico, con base en datos LiDAR 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 la marea astronómica en las Islas Cayos del Norte.

De acuerdo con estudios realizados en estas áreas adelantados 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 y la consulta bibliográfica de investigaciones realizadas con sensoramiento remoto sobre áreas con presencia de arrecife de coral, se logró establecer las características geomorfológicas del atolón Roncador.

El trabajo de grado comprende dos actividades principales: recopilación de información (imágenes de sensores remotos, aerofotografías aéreas digitales, datos de sensor LiDAR, Batimetría con base en imágenes Landsat 8, y la recopilación de estudios existentes en el área de estudio) y procesamiento de la información (adopción del sistema único de referencia horizontal, tratamiento digital de imágenes, generación de Modelo Digital de Terreno (MDT), generación de Modelo Batimétrico Tridimensional (MBT) a través de un sistema de información geográfica.

Con el procesamiento de la información recopilada, se identificó y se realizó la zonificación geomorfológica del atolón, tomando como base las clasificaciones

según Darwin (1842); Wiens (1962) y Hopley (2011). Se obtuvo una base cartográfica actualizada (archivo.gdb), cartografía digital geomorfológica de detalle a escala (1:30.000) del atolón Roncador (formato shapefile) para cada sistema de clasificación utilizado, como elemento adicional de generación de conocimientos

Uno de los resultados más importantes fue la delimitación del arrecife de coral que bordea a la Isla Cayo de Roncador, denominado *reef crest* (cresta arrecifal); acuerdo clasificación según Hopley (2011), con un área de 114.997 m² y un perímetro de 47.180 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 Roncador.

1. INTRODUCCIÓN

Los arrecifes de coral son los ecosistemas con la mayor productividad y abundancia de especies en la Tierra. Se caracterizan por ser zonas ecológicas clave, de especial valor para mantener la productividad de los recursos marinos y un indicador importante del medio marino (Xu & Zhao, 2014). También son considerados ecosistemas bentónicos de gran arquitectura y complejidad, donde su rugosidad es el principal parámetro que caracteriza la hidrodinámica. En términos hidrodinámicos, la función principal de estos ecosistemas, 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 (de Alegria-Arzaburu, Mariño-Tapia, Enriquez, Silva , & Gonzáles-Leija, 2013).

Los arrecifes de coral han sido objeto de gran interés científico en el último siglo y medio. Darwin (1842) realizó la descripción de las formas básicas de arrecife de coral (franjeante, barrera y atolón); todavía estos términos son de uso común. Investigadores como Wiens (1962), zonificó los arrecifes de coral en outer reef (arrecife exterior), reef rim (arrecife de Borde) y lagoon (laguna). Por otra parte, Hopley (2011) zonificó los arrecifes de coral en términos de fore reef slope (pendiente arrecifal frontal), reef crest (cresta arrecifal), outer reef flat (planicie arrecifal externa), algal crest (cresta algal), ditrital zone (zona detrítica), the inner reef flat (planicie arrecifal interna), back reef zone (zona de arrecife posterior), lagoons (lagunas) y leeward reef slope.

En Colombia, se han venido desarrollado diferentes estudios e investigaciones en las islas del departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina por diferentes instituciones colombianas. En estudios enfocados en los arrecifes de coral se resaltan “Los arrecifes de coral en el Caribe colombiano”

(Garzón-Ferreira & Díaz, 2003) y “Áreas Coralinas de Colombia” (Díaz et al., 2000); en cuanto a la geomorfología del Caribe colombiano, se destaca “Geografía submarina del Caribe colombiano” (CIOH-DIMAR, 2009). Sin embargo se identificó la gran importancia de llevar a cabo la actualización de la información relacionada con las características geomorfológicas en detalle de las Islas Cayos del Norte, teniendo en cuenta que actualmente es de gran importancia contribuir a la recopilación de información que permitirá demostrar ante entes internacionales, los espacios marítimos de Colombia.

La aparición y el desarrollo de la tecnología en sensores remotos, proporcionan una nueva forma de la visión regional de los ecosistemas de arrecife de coral (Díaz et al., 2000); permitiendo realizar mapeos cartográficos de líneas de base, mapas geomorfológicos de arrecife y mapas de hábitat arrecifal (Mumby, Green, Edwards, & Clark, 2005); a partir del color, forma, textura y otras características de imágenes de sensores remotos, caracterizándolos con rapidez y observando áreas relativamente grandes a través del tiempo, convirtiéndose en un importante medio complementario de los métodos de producción convencionales como batimetría laser, discriminación acústica de la tierra, QTC, Echoplus y Groundtruthing (Xu & Zhao, 2014).

Generalmente el objetivo de los mapas más detallados, requiere de técnicas sofisticadas de sensores remotos. La mayoría de montajes de sensores están en capacidad de proveer la información de 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% (Mumby et al., 2005).

La mayoría de los sensores remotos con aplicación en arrecifes de coral pertenecen a la categoría de los sensores remotos de aguas someras, teniendo en cuenta que la óptica en aguas poco profundas se observa, cuando la luz del sol

brilla en el agua, de esta forma, parte de la luz penetra y llega a la superficie de los arrecifes coralinos, una es reflejada y otra es absorbida o se presenta una excitación, observándose como fluorescencia (Xu & Zhao, 2014).

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 en gran medida distribuidas 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 dependerá en gran medida, de su absorción y características fluorescentes de pigmentos componentes. En contraste, los valores de curva espectral de la arena son mayores. Los tipos de curvas espectrales de 600-650 nm, se caracterizan por un patrón doble máximo registrado por Hochberg y Atkinson (Xu & Zhao, 2014).

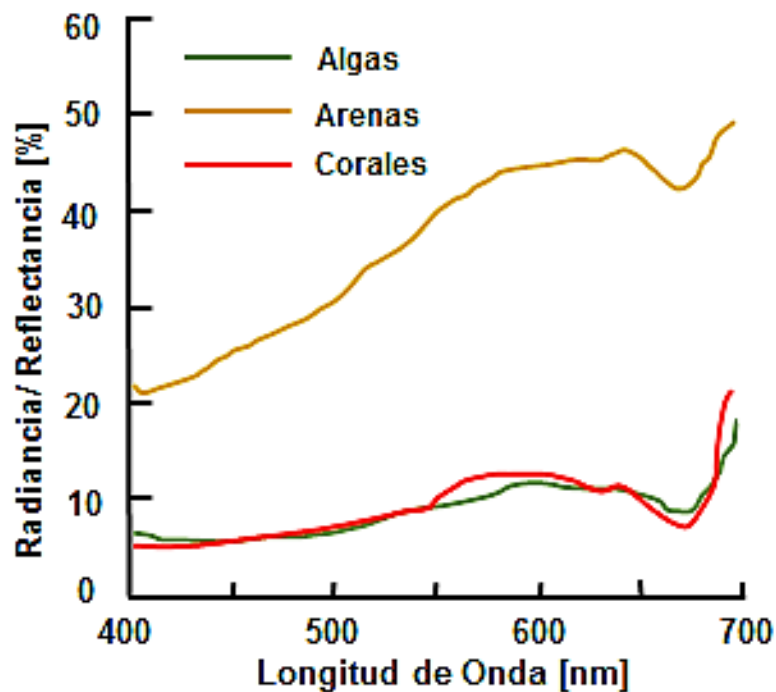


Figura 1. Curva espectral de diferentes bentos de arrecifes. Modificado de Xu & Zhao, 2014.

Adicionalmente, las características espectrales de los arrecifes de coral están afectadas también por factores tales como la profundidad, la calidad del agua y la geomorfología; además de la composición de pigmentos; entre otros (Xu & Zhao, 2014).

La investigación realizada por Yamamo et al. (2006), donde analizaron cinco bandas de diferentes sensores remotos, permitió para concluir 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 (Majuro Atoll- Marshall Islands). Evidenciando algunos de los beneficios que proporcionan los sensores remotos al momento de analizar los arrecifes de coral.

Con base en lo anterior, se evidencia la importancia y ventajas de los sensores remotos para realizar la caracterización geomorfológica de la Isla Cayo de Roncador y la importancia de realizar investigaciones en estas Islas como muestra de soberanía y contribución de información para defender los espacios marítimos de Colombia ante entes internacionales.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Antecedentes del problema

La delimitación marítima entre Colombia y Nicaragua no había sido establecida en forma definitiva, debido en parte a la confianza depositada del Gobierno Nacional en el tratado Esguerra– Bárcenas firmado en 1928 (Mantilla, 2009), donde Colombia y Nicaragua aceptaron y establecieron el límite fronterizo marítimo entre ambos países. El 6 de Diciembre del año 2001, Nicaragua desconoce los títulos de soberanía colombianos firmados en este tratado y presenta 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 decide que la línea de la frontera marítima que delimita la plataforma continental y las zonas económicas exclusivas de la República de Nicaragua y la República de Colombia, se guiará por líneas geodésicas, conectando los puntos con las coordenadas estipuladas en el mencionado fallo.

2.2. Descripción general del problema

De acuerdo con los antecedentes mencionados anteriormente, Colombia requiere de argumentos técnicos debidamente sustentados tales como información actualizada sobre las características geomorfológicas y oceanográficas de detalle, las cuales son fundamentales para sustentar ante la Corte Internacional de Justicia el carácter de 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). Con esta información Colombia pretende demostrar sus límites marítimos reales, con el fin de revertir el mencionado fallo. En este sentido, se hace necesario determinar la conformación

geomorfológica de la Isla Cayo de Roncador, generando su cartografía correspondiente como un elemento adicional de generación de conocimiento y de argumentos técnicos para la defensa ante la Corte Internacional de Justicia.

2.3. Formulación del problema

Con base en los antecedentes y la descripción general del problema mencionado anteriormente, la formulación del problema se basa en el siguiente interrogante ¿Cuáles son las características geomorfológicas de la Isla Cayo de Roncador en escala 1:30.000?

3. JUSTIFICACIÓN

Con base en la sentencia de la Corte Internacional de Justicia (CIJ) el día 19 de Noviembre de 2012, donde se falló en contra de Colombia sobre el litigio por los espacios marítimos con Nicaragua, se inició por parte del Estado colombiano una labor prioritaria con el fin de demostrar que Colombia no solo cuenta con las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina; sino que también cuenta con seis (06) islas más (Presidencia de la República Colombia, 2013), para de esta manera controvertir dicho fallo y mantener los límites marítimos actuales del país.

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, para 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 (1982).

En el marco de la fundamentación del carácter de Islas Cayos del Norte; que adelanta la DIMAR, el análisis geomorfológico de la Isla Cayo de Roncador, que se llevó a cabo en la presente investigación, a través de recopilación bibliográfica y actualización de la información existente, se constituye como uno de los argumentos técnicos de importancia nacional para fortalecer la sustentación que el país presentará ante la CIJ.

Por otro lado, este trabajo de investigación se enmarca en la línea de investigación de sensores remotos, mediante el estudio de procesos físicos y biológicos empleando sensoramiento remoto y la aplicación de los Sistemas de Información

Geográfica (SIG) para la solución de problemas concretos, mencionados en el planteamiento del problema.

.

4. ÁREA DE ESTUDIO

El Caribe colombiano tiene una extensión de 589.560 km² y presenta gran diversidad de geoformas que han sido divididas en cuatro sectores principales; plataforma continental Caribe colombiano, talud continental, cuenca colombiana y bancos y bajos (Figura 2), conformados por diferentes tipos de relieve (Tabares, Soltau, Díaz, David, & Landazabal, 2009).

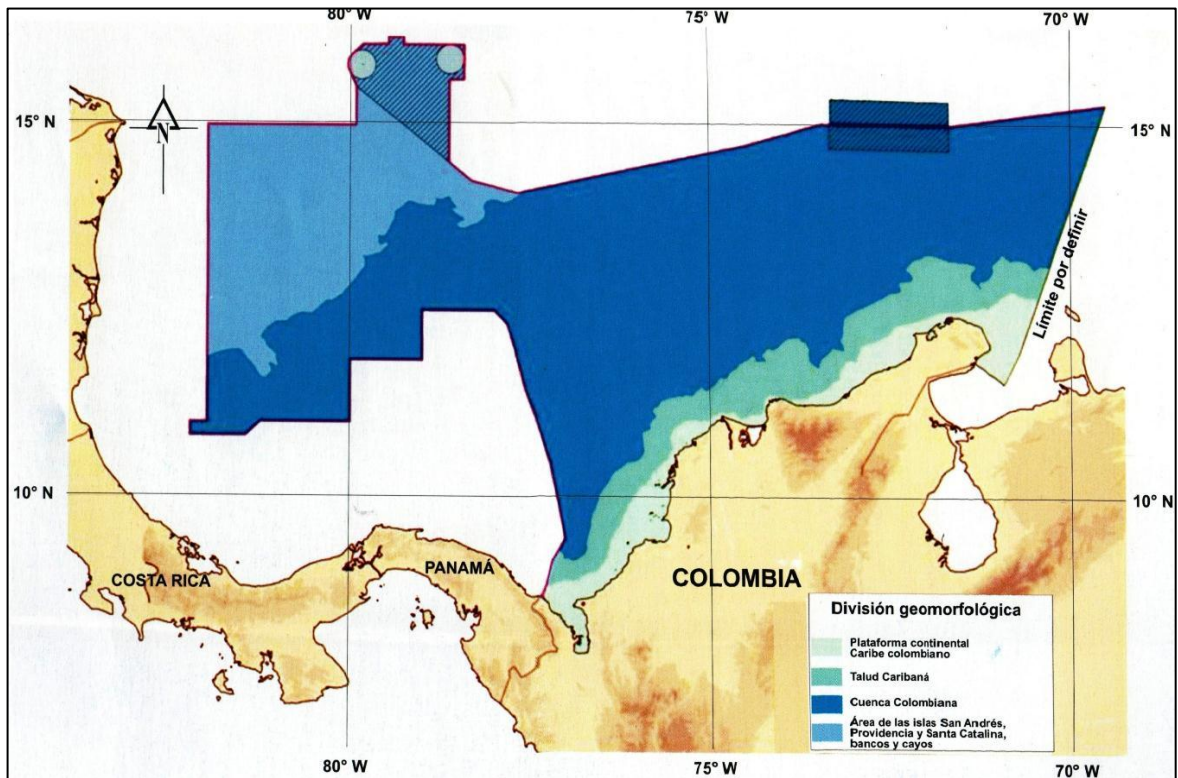


Figura 2. División geomorfológica del Caribe colombiano. (CIOH-DIMAR, 2009).

El sector de bancos y bajos abarca un arco de islas, atolones y bancos coralinos de formas amplias y de contornos semicirculares (Tabares, et al., 2009), de origen aparentemente a partir de volcanes situados sobre una plataforma volcánica del

occidente del mar de las Antillas, donde se encuentra uno de los sistemas arrecifales más productivos del Caribe (Escuela Naval Almirante Padilla, 2010).

Geister & Diaz (2008) afirman que estas islas, atolones y bancos coralinos hacen parte del Archipiélago de San Andrés y Providencia, las cuales aparentemente están relacionadas con el origen y la formación de la elevación de Nicaragua en el mar Caribe (Figura 3). El esquema tectónico regional del fondo marino se caracteriza por zonas de fractura, siendo la más conspicua la fractura de San Andrés (Escuela Naval Almirante Padilla, 2010).

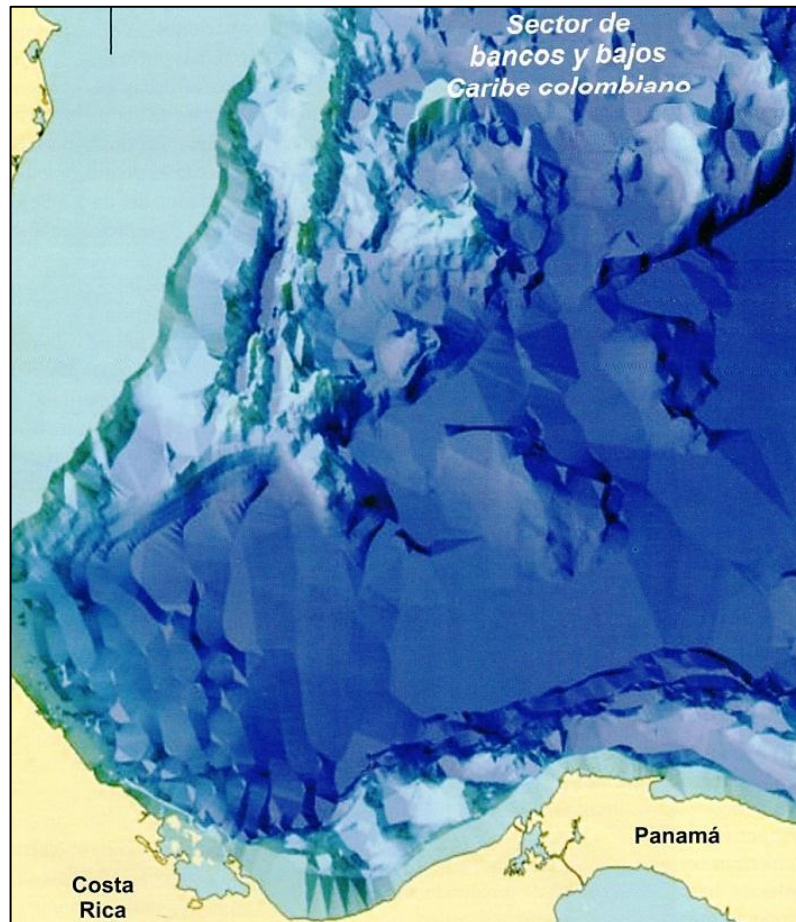


Figura 3. Localización del área marina del sector de bancos y bajos. (Tabares-Gaviria et al., 1996).

4.1. 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).

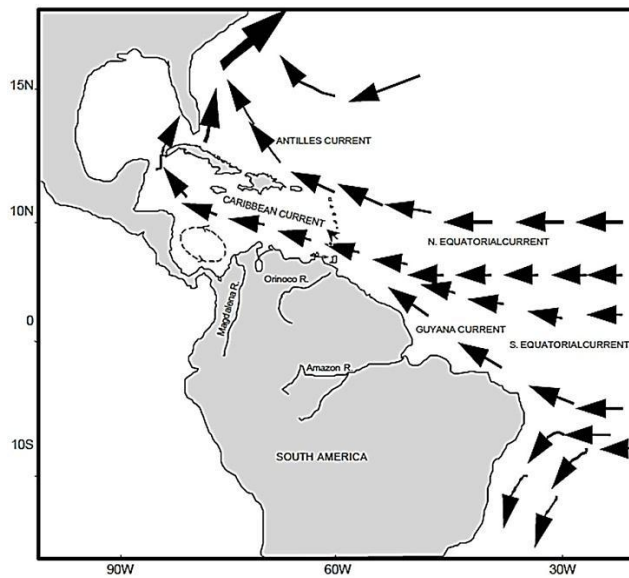


Figura 4. Corriente superficial en la región atlántica tropical noreste (Andrade, 2000)

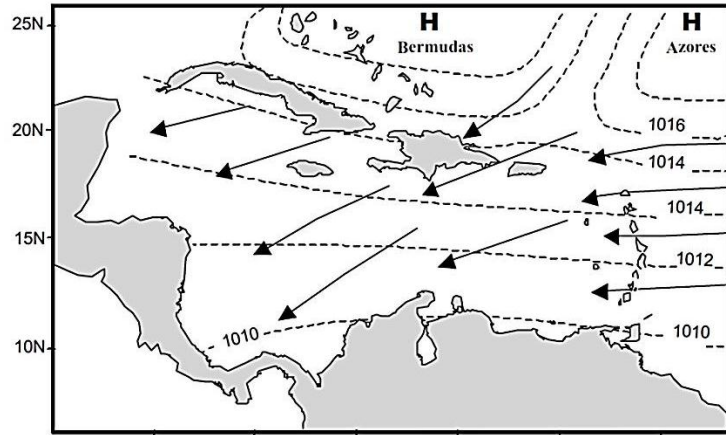
4.2. Climatología

El clima sobre el área de las Islas Cayos del Norte, se encuentra dominado por la presencia de la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ZCIT) que a su vez modula la dirección y la intensidad de los vientos alisios, los cuales se caracterizan por una gran uniformidad, con oscilaciones temporales que van desde las semanas con el paso de los frentes fríos que vienen del Oeste, o el paso de las ondas atmosféricas que vienen del Este, hasta la oscilación estacional. Durante la época de vientos predominan vientos del Noreste (NE) y principalmente del este (E), con vientos de tormenta poco frecuentes. La época es seca en los meses de febrero a marzo y de agosto a octubre hay un aporte importante de precipitación. De mayo a noviembre los vientos tienen dirección e intensidad variable y en los meses de mayo a julio se presenta la época de transición, con vientos débiles (Andrade & Barton, 2000). (Figura 5a)

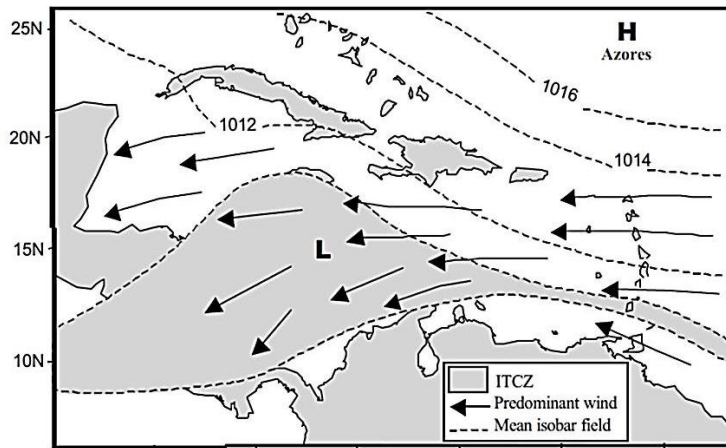
En la estación seca y de vientos, la ZCIT, se encuentra localizada más al sur (0°-5°S) y por eso, en este periodo dominan los vientos del norte, con velocidades

promedio de 8 m/s y máximos diarios de 15m/s (Andrade et al., 2003). Durante el Veranillo en el mes de julio los vientos alcanzan velocidades de hasta 12m/s, pero con un aumento de las condiciones de calma en el mar en esta época de transición, antes de iniciarse la temporada de lluvias, se incrementan los vientos del noreste, inhibiendo la precipitación (Figura 5b). Durante la época húmeda, de agosto a octubre, la intensidad de los vientos medios disminuye sustancialmente (Figura 5c). El descenso en el viento hace que aumente la temperatura en toda la región (Escuela Naval Almirante Padilla, 2010).

a)



b)



c)

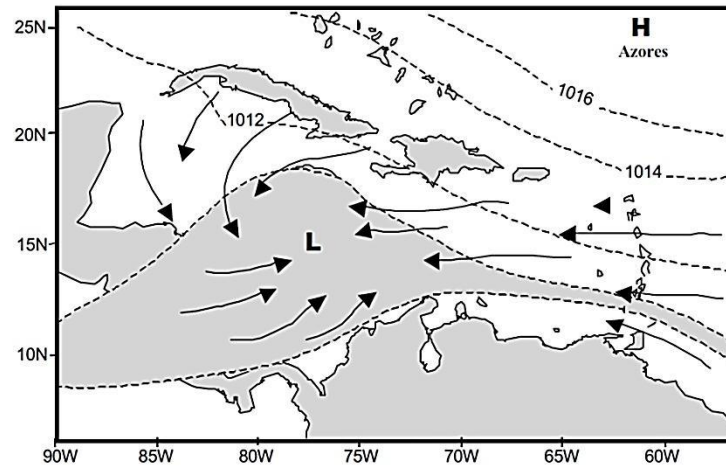


Figura 5. Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Posiciones a) viento b) transición y c) temporada de lluvias. (Andrade, 2000).

4.3. Oleaje

La variabilidad espacio temporal de los vientos en el Caribe es de vital importancia en la formación de los patrones del oleaje (magnitud, dirección); pues estos definen los forzadores principales del oleaje (Osorio, Montoya, Mesa, & Bernal, 2009).

Teniendo en cuenta lo anterior, existe una relación directa de la altura de ola significativa (H_s) con el ciclo anual de los vientos en el Caribe; se presenta un comportamiento bimodal de la altura de ola significativa (H_s) con un período más intenso entre (Diciembre - Enero - Febrero) y un período más débil entre (Junio - Julio - Agosto) cuando los vientos alisios del este se debilitan. A partir del mes de marzo se presenta un primer período de debilitamiento importante en los vientos alisios del este con una asociada disminución en la altura de ola significativa (H_s) que continúa hasta los meses de abril y mayo. El período más débil de altura de ola significativa se presenta entre los meses de (Septiembre – Octubre - Noviembre) donde los vientos alisios alcanzan valores mínimos en las zonas costeras del Caribe colombiano. Los máximos y mínimos valores de altura de ola significativa se presentan en los meses de febrero y octubre respectivamente. Para analizar la variabilidad espacial asociada con el ciclo anual del oleaje en el Caribe colombiano, en la (figura 6) se muestra la altura de ola significativa (H_s) empleando los datos corregidos y en la figura (figura 7) se muestra la magnitud y las direcciones predominantes de los vientos de NCEP/NCAR. (Osorio et al.,2009)

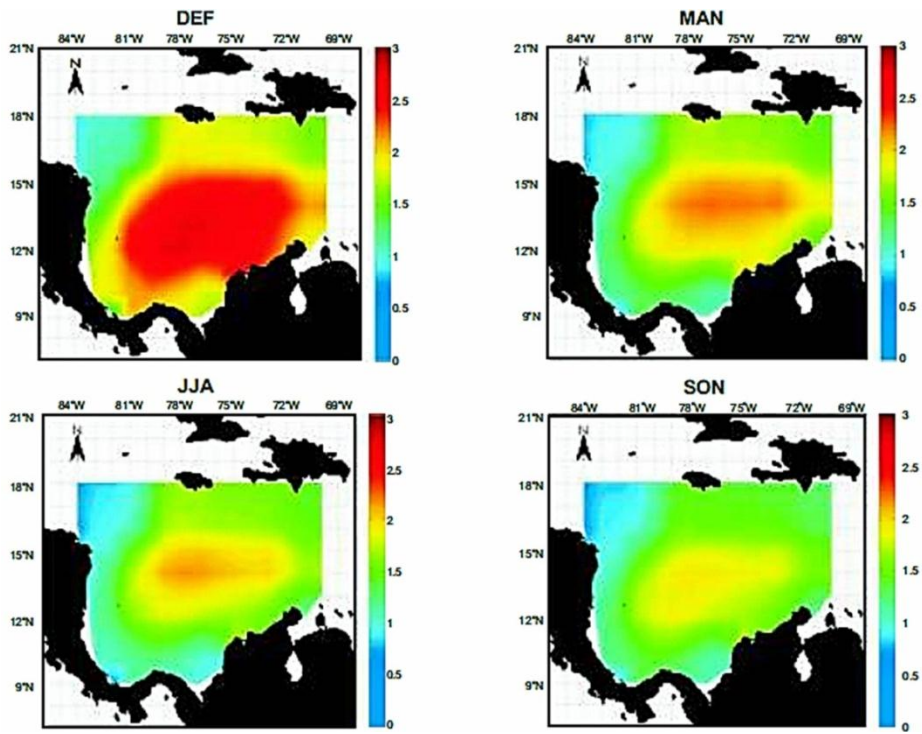


Figura 6. Altura de la ola significativa H_s [m]. (Osorio et al., 2009).

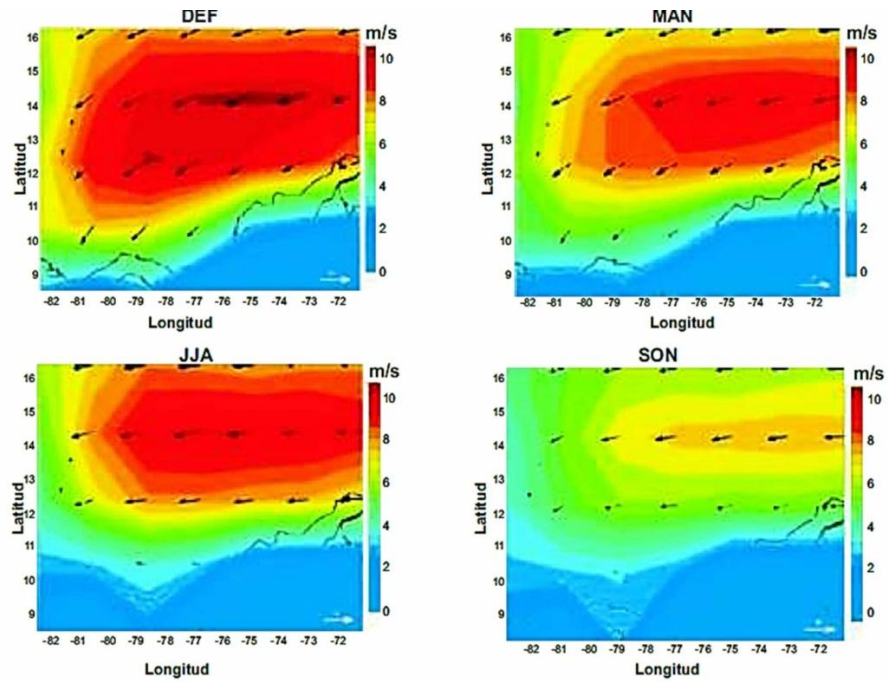


Figura 7. Velocidad del viento [m/s]. (Osorio et al., 2009).

4.4. 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 8)

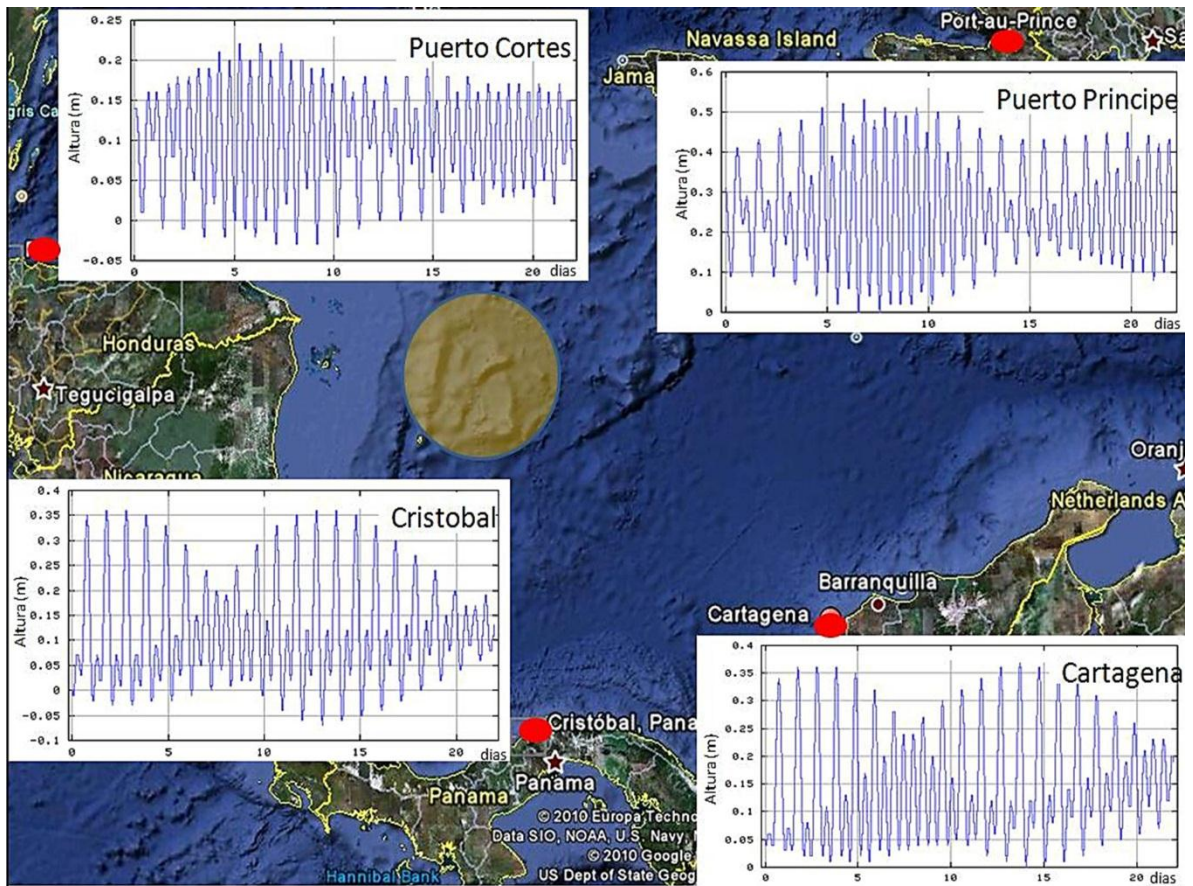


Figura 8. La marea astronómica en las Islas Cayos del Norte, inferida desde la observación de la modelación realizada en el Servicio Francés de Hidrografía para los Puertos de Cartagena, Cristóbal, Puerto Príncipe y Puerto Cortés. (Escuela Naval Almirante Padilla, 2010).

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.

4.5. Roncador

Roncador es un atolón localizado en posición $13^{\circ} 48' N$; $80^{\circ} 02' W$; y $13^{\circ} 58' N$; $80^{\circ} 06' W$; sobre un banco con una longitud de 15 km y una anchura de 7 km (Figura 9). Se encuentra a 320 millas náuticas de la costa continental de Colombia y 140 km al Este de Providencia (Corte Internacional de Justicia, 2012). Tiene forma de aguacate y su arrecife periférico describe la figura de un anzuelo que se prolonga en dirección suroeste hasta profundidades de 600 m. En el extremo norte del arrecife periférico, resultado de la acumulación de escombros coralinos y sedimentos, se encuentra la única isla (Isla Cayo de Roncador) de dimensiones considerables (Diaz et al., 2000); (Tabares et al., 2009).

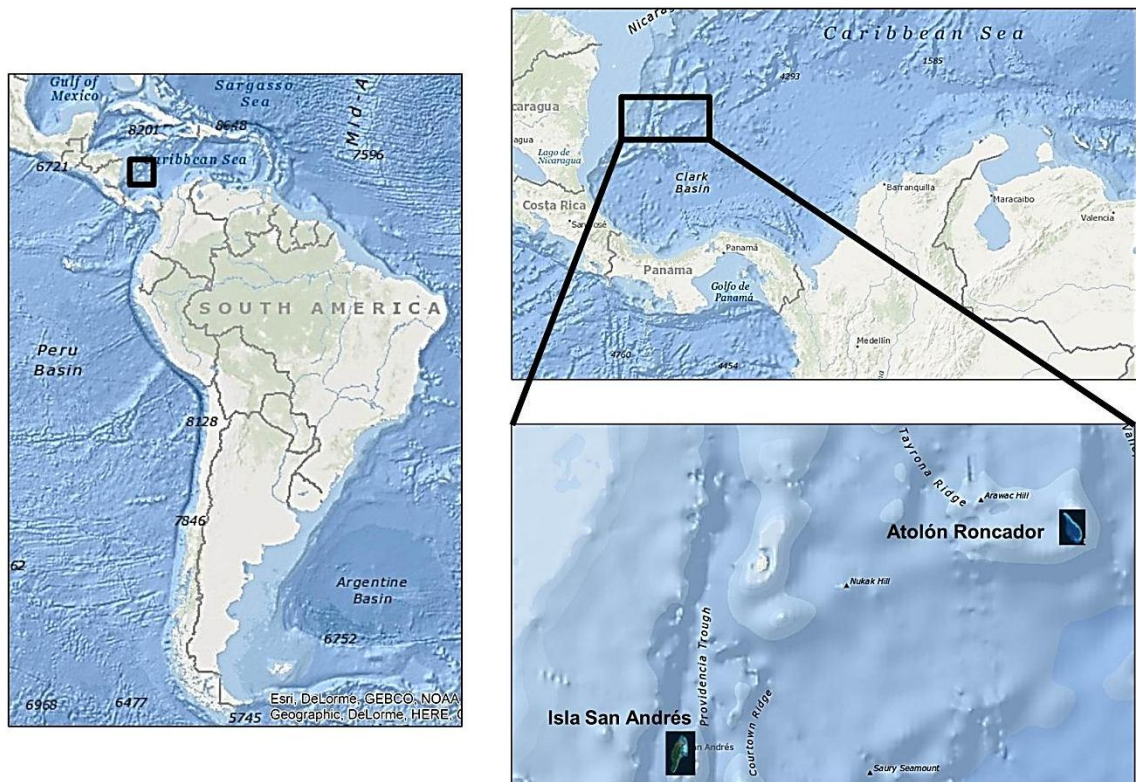


Figura 9. Posición geográfica del atolón Roncador

La Isla Cayo de Roncador se encuentra ubicada en 13° 34' N y 80° 05' W, a una distancia de 150 Km E de Isla Providencia y 210 km NE de la Isla de San Andrés, de origen coralino y formación rocosa que sostiene zonas de playa de arena de grano fino a mixto hacia todos los frentes, a excepción de la zona Norte, donde predomina el depósito de restos de corales de gran tamaño. Tiene un área aproximada de 6.8 hectáreas. Esta Isla Cayo no presenta alturas superiores a los 3 m, pero en general es más alto al occidente, contando además con una laguna interior hacia el costado Norte y vegetación principalmente de enredaderas baja, típicas de esta Isla Cayo (Tabares-Gaviria, Soltau, & Diaz, 1996); (Escuela Naval Almirante Padilla, 2010).

Esta Isla Cayo hace parte del conjunto de geoformas emergidas en alta mar (Archipiélago de San Andrés y Providencia), al noroccidente de la cueca de Colombia (Tabares et al., 1996).

4.5.1. Características granulométricas

De acuerdo con Escuela Naval Almirante Padilla (2010), el diámetro medio de la arena en los perfiles tomados en la Isla Cayo de Roncador muestra una arena relativamente gruesa (0.6 mm), muy especialmente en la parte que enfrenta la barrera arrecifal, en la cual el D50 es mayor a 1mm y en la única parte donde se encontró arena mediana es la punta sur del Cayo, donde el D50 es de 0.3 mm. (Figura 10)

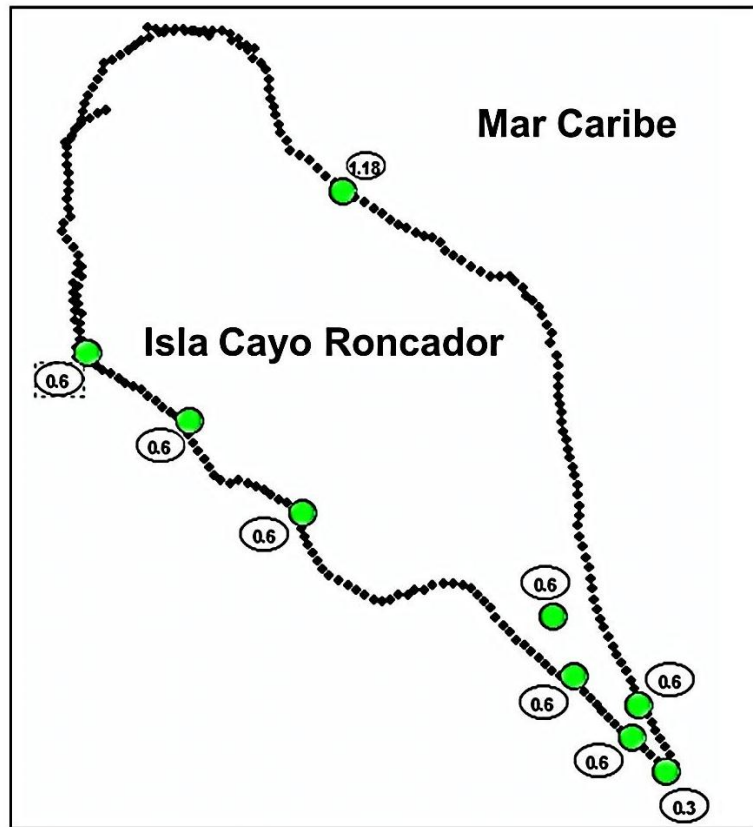


Figura 10. La posición de las muestras sedimentológicas tomadas en la Isla Cayo de Roncador. El diámetro promedio de los perfiles se encuentra señalado en la gráfica. (Escuela Naval Almirante Padilla, 2010).

4.5.2. Oleaje en la Isla Cayo de Roncador

La base de datos empleada para la obtención del régimen medio del oleaje en la Isla Cayo de Roncador, se desprendió a partir de los valores reportados de los parámetros del clima marítimo correspondientes con el retro-análisis. Con base en esos datos se entregaron las condiciones de contorno a los modelos numéricos con el propósito de propagar el oleaje desde las aguas con profundidad indefinida hasta las playas de la Isla Cayo (Figuras 11, 12 y 13). En el presente se demuestra el resultado de la modelación para la condición media del clima del área, y para el oleaje extremo que se produce con las tormentas en el año (Escuela Naval Almirante Padilla, 2010).

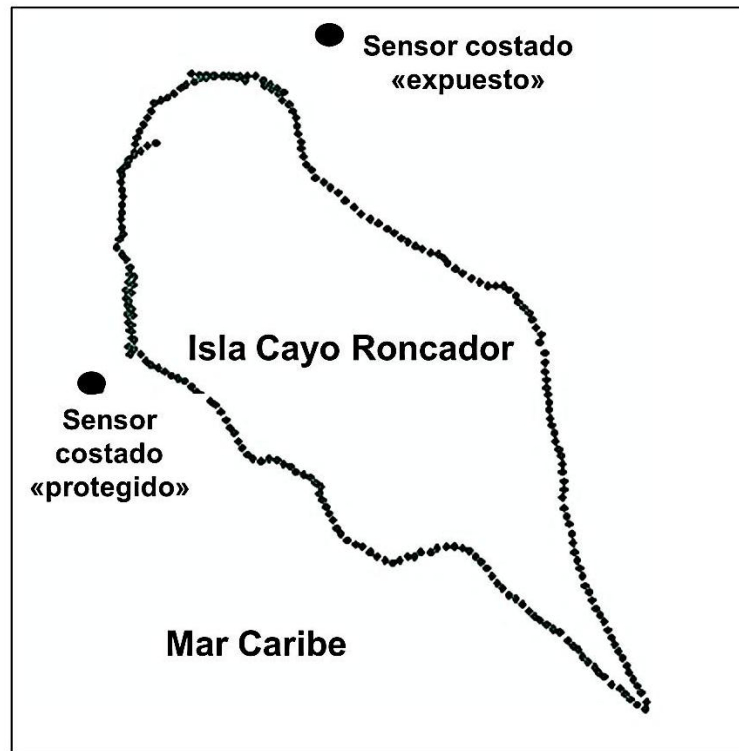


Figura 11. Ubicación de los sensores de nivel del mar en la Isla Cayo de Roncador.

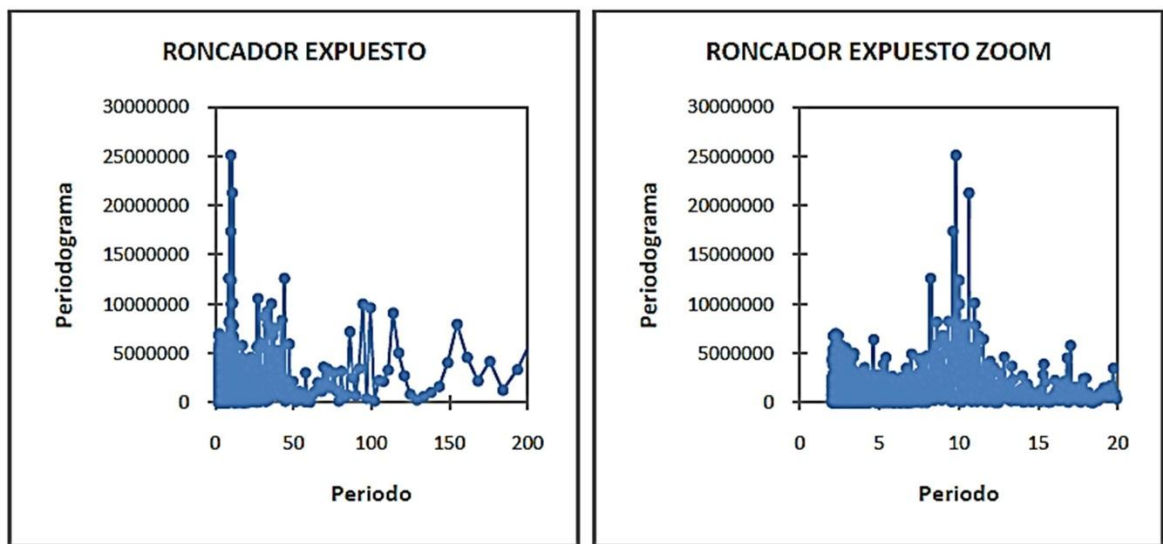


Figura 12. Espectro de oleaje obtenido del sensor ubicado al costado expuesto de la Isla Cayo de Roncador. (Escuela Naval Almirante Padilla, 2010).

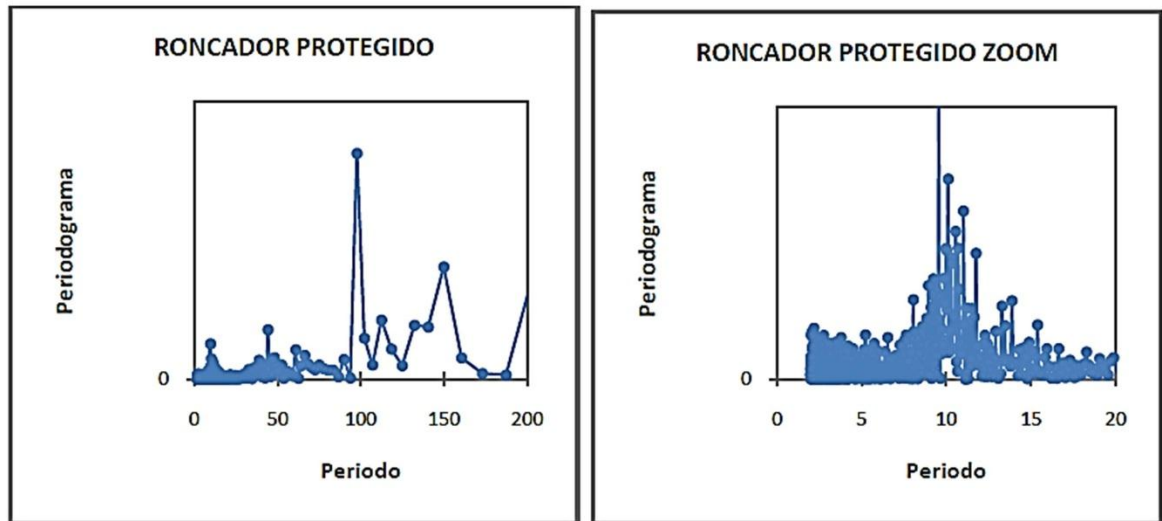


Figura 13. Espectro de oleaje obtenido del sensor ubicado al costado protegido de la Isla Cayo de Roncador. (Escuela Naval Almirante Padilla, 2010)

4.5.3. Régimen de corrientes de rotura

Las corrientes que se producen por la rotura del oleaje alrededor de la Isla Cayo de Roncador debido al régimen medio del oleaje se representan en la figura 14.

En ella se observa una corriente hacia el sur de ~ 40 cm/s a lo largo del costado noreste de la Isla Cayo producida por el oleaje incidente sobre la rompiente. También se hace evidente que la corriente se intensifica en la punta oriental de la Isla Cayo y que es mucho menor en el otro costado. (Escuela Naval Almirante Padilla, 2010)

En relación con la simulación de las corrientes alrededor en la Isla Cayo de Roncador, cuando ocurre oleaje extremo que viene en la dirección del flujo medio de energía, se observa un comportamiento similar al que ocurre en el régimen medio; pero las corrientes se intensifican al interior de la laguna y alrededor de la punta sur de la Isla Cayo con valores cercanos a 0.5 m/s. (Escuela Naval Almirante Padilla, 2010)

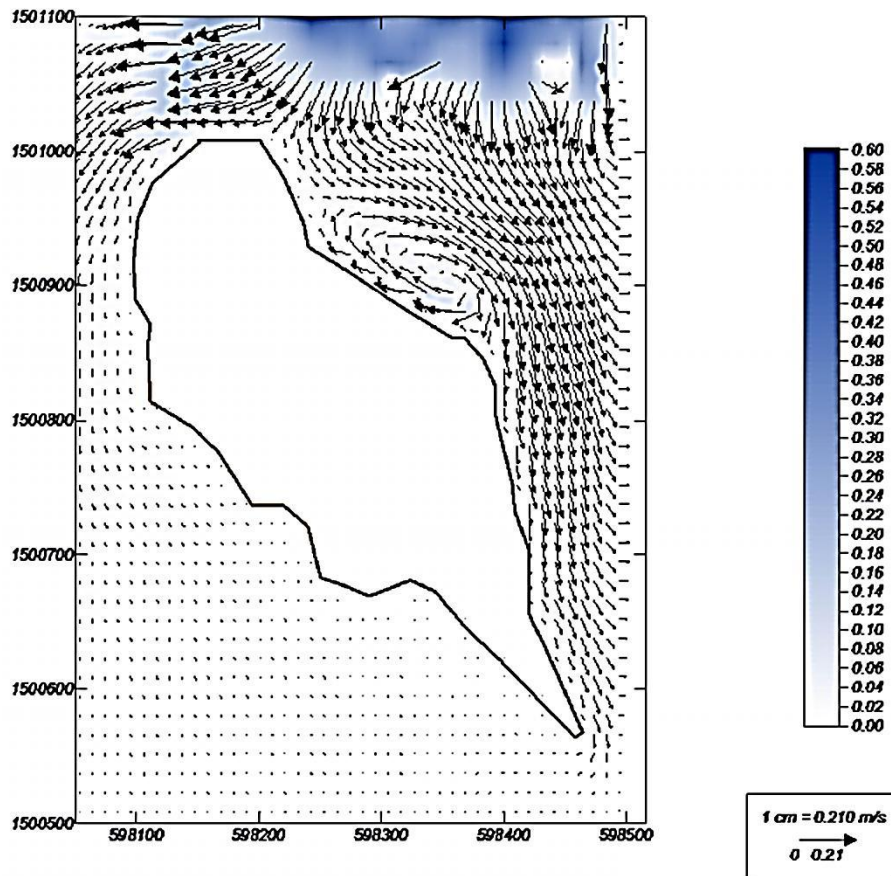


Figura 14. Vectores de corriente. Régimen medio, Isla Cayo de Roncador. (Escuela Naval Almirante Padilla, 2010).

4.5.4. Características hidrodinámicas

El rango mareal promedio se estimó en 0.148 m, y los rangos mareales promedio durante sicigia y cuadratura fueron de 0.199 m y 0.069 m, respectivamente. (Escuela Naval Almirante Padilla, 2010). Los valores de elevación mínimos del nivel del mar (LAT) encontrados para la Isla Cayo de Roncador muestran que este presenta un valor LAT de -0.2844 m y un valor de elevación máxima del nivel del mar (HAT) de 0.3107 m, para un máximo rango de marea astronómica de 0.5951 m. (Universidad del Norte, 2014).

5. OBJETIVOS

Teniendo en cuenta la necesidad del Estado Colombiano, de establecer una estrategia para estructurar los argumentos que permitan responder posibles pretensiones de terceros Estados sobre territorio colombiano, que tenga como objetivo la defensa de la integridad territorial y de la soberanía de Colombia, como está establecido en la Constitución Política, dentro de las actividades de investigación científica contempladas en el proyecto para la defensa de esta integridad territorial y de la soberanía del país, la Dirección General Marítima (DIMAR) durante el año 2014, adelantó el proyecto denominado “***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.

5.1. Objetivo general

Realizar el análisis geomorfológico de la Isla Cayo de Roncador con base en datos LiDAR 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.

5.2. Objetivos específicos

1. Describir la conformación geomorfológica de la Isla Cayo de Roncador, de acuerdo con los esquemas de clasificación según Darwin (1842), Wiens (1962) y Hopley (2011).
2. Establecer las características geomorfológicas de la Isla Cayo de Roncador a través del tratamiento digital de los datos LiDAR, ortofotografía digitales e imágenes de sensores remotos, de acuerdo con los esquemas de clasificación según Darwin, Wiens y Hopley.
3. Generar la cartografía digital geomorfológica de detalle (1:30.000) de la Isla Cayo de Roncador como complemento para la determinación del máximo y mínimo nivel del mar producido por marea astronómica en las Islas Cayos del Norte.

6. MARCO TEÓRICO

La palabra geomorfología proviene de las palabras griegas **γη** (la tierra), **μορφή** (forma) y **λογος** (discurso), es decir, un discurso acerca de las formas de la tierra (Huggett, 2007). La geomorfología es el estudio de las características físicas de la superficie de la tierra y sus formas, donde 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 se incluyen las formas terrestres submarinas dentro del alcance de la geomorfología (CIOH-DIMAR , 2013).

La geomorfología costera trata con la formación de las características costeras (formas terrestres), los procesos que trabajan en ellas y los cambios que se presentan (Bird, 2011). 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 que actuaron sobre ella. Algunas formas terrestres fueron producidas bajo condiciones ambientales diferentes, sobreviviendo actualmente como relictos. La geomorfología entonces, tiene una importante dimensión histórica, la cual es el dominio de la geomorfología histórica. En pocas palabras, la geomorfología moderna estudia tres aspectos clave de las formas terrestres: la *forma*, los *procesos* e *historia* (Huggett, 2007).

Díaz et al. (1996) afirma que los complejos de arrecife 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. 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) pertenecen al archipiélago de San Andrés (Garzón-Ferreira & Díaz, 2003).

Las principales islas del Archipiélago están habitadas permanentemente. Las islas cayos y atolones son visitados ocasionalmente por pescadores quienes desarrollan en estos puntos la economía mientras que el personal de la Armada Nacional de Colombia, permanece con puestos militares para ejercer soberanía. Las islas y atolones del Archipiélago tienen una larga historia geológica, subsidencia de la capa original volcánica y nivelación simultánea de los montes submarinos desde la superficie (Garzón-Ferreira & 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 desarrollando arrecifes al lado de sotavento, dando como resultado la formación de lagunas que abren hacia el océano a lo largo de su margen (Garzón-Ferreira & Díaz, 2003).

Para llevar a cabo el estudio de caracterización geomorfológica de las Islas Cayos del Norte se hace necesario conocer un poco más a fondo el concepto de arrecife de coral, los tipos de clasificación y zonificación de los mismos.

El coral es un invertebrado marino, del *phylum cnidria*, compuestos por una unidad estructural conocida como pólipos que forman colonias para desarrollar procesos

fisiológicos. Alcanzan su máximo desarrollo en ambientes relativamente someros porque viven en simbiosis con algas microscópicas llamadas zooxantellas.

Los arrecifes de coral son estructuras complejas formadas por las estructuras externas de los corales resultantes de procesos de acumulación y erosión de carbonatos y una fuente del sedimento detríticos (Kench, 2014); (Choat & Bellwood, 1991), limitados por una necesidad de agua cálida con una temperatura mínima promedio en invierno de 18 °C, por lo tanto son escasos los arrecifes de coral que se encuentran en áreas fuera de los trópicos (Hopley D. , 2006). El entendimiento de la transición de la estructura geomorfológica y la estabilidad de los arrecifes es una cuestión de importancia fundamental, pero requiere un buen entendimiento de los controles y procesos dinámicos que afectan a los arrecifes de coral, la evolución de los arrecifes de relieve y cambio a través de múltiples escalas temporales y espaciales (Kench, 2014).

Los arrecifes crecen de forma masiva como tractos de corales, convirtiéndose 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 & Bellwood, 1991).

Los arrecifes de coral han sido objeto de interés científico durante el último siglo y medio, 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 en arrecifes franjeante (Finkl, 2011).

En el departamento Archipiélago de San Andrés y Providencia (Colombia), el 75% del área total, está ocupada por arrecifes de coral, representando una de las áreas más extensas de coral en la región Atlántico Occidental (Garzón-Ferreira & Díaz, 2003).

Un aspecto no menos importante fue que en el año 2000 se generó, un cambio sustancial de cómo la Nación y el mundo, concebían al Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina; ya que fue en ese entonces, donde se declaró al Archipiélago como Reserva de la Biósfera Seaflower por la ONU-UNESCO y posteriormente, se declaró por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, el Área Marina Protegida (AMP) Seaflower (65.000 km²); de esta manera Colombia entró a ser parte del 1.7% del mar del mundo que se encuentra bajo un esquema de protección (CORALINA-INVEMAR, 2012).

Estas islas y atolones del archipiélago tienen una larga historia geológica, donde la subsidencia de los sótanos volcánicos originales y simultánea nivelación de las montañas submarinas de aguas poco profundas, con carbonatos de la era terciaria y cuaternaria, condujeron a la formación de estos atolones y bancos actuales (Garzón-Ferreira & Díaz, 2003).

Según Garzón-Ferreira (2003), los Bancos del Archipiélago de San Andrés y Providencia, como lo son el Banco de Roncador y Banco Serrana son considerados como atolones; así mismo los Bancos de Quitasueño y Serranilla son considerados como arrecifes de coral.

En relación con lo planteado por varios autores para los arrecifes de coral, en el año de (1842), fue publicado el libro "The Structure and Distribution of Coral Reefs". En este libro Charles Darwin mencionó en los Capítulos I, II y III por

primera vez, las tres formas en la que se podía llevar a cabo la clasificación de los arrecifes de coral.

6.1. Clasificación según Darwin (1842)

El autor realizó la descripción de acuerdo con sus propias observaciones y con base en las obras de otros investigadores. Lo más importante del legado que dejó Darwin, es que hoy en día se siguen contemplando estas definiciones para llevar a cabo la clasificación de los arrecifes de coral.

A continuación se presenta una descripción de los tres principales conceptos de clasificación de arrecifes de coral, con base en lo descrito por Darwin y demás autores que han enfocado sus estudios a estos temas. (Figura 15)

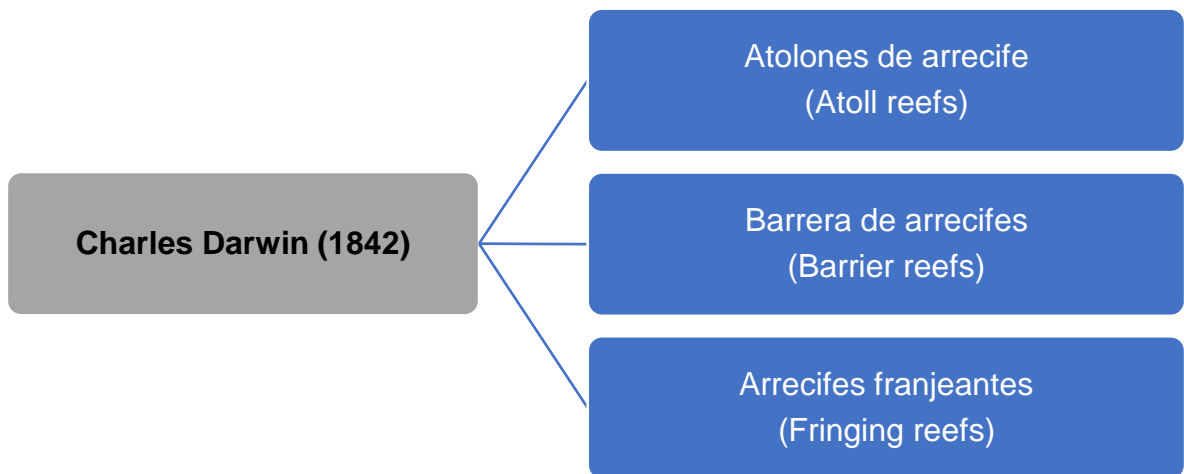


Figura 15. Clasificación de los arrecifes de coral según Charles Darwin (1842).

6.1.1. Atoll reefs (Atolones de arrecife)

Los atolones se encuentran por lo general en medio del océano a menudo en las cadenas de islas o archipiélagos (Woodroffe & Biribo, 2011); el arrecife soporta islotes o islas casi continuas, están compuestas por arena o grava consolidada petrificada y generalmente encierran una laguna central (Diaz et al., 2000); (Woodroffe & Biribo, 2011). En el pacífico se centran la gran mayoría de atolones, en segunda posición se encuentra el océano Índico. El Departamento Archipiélago de San Andrés está dentro de los países que cuenta con atolones. (Figura 16)

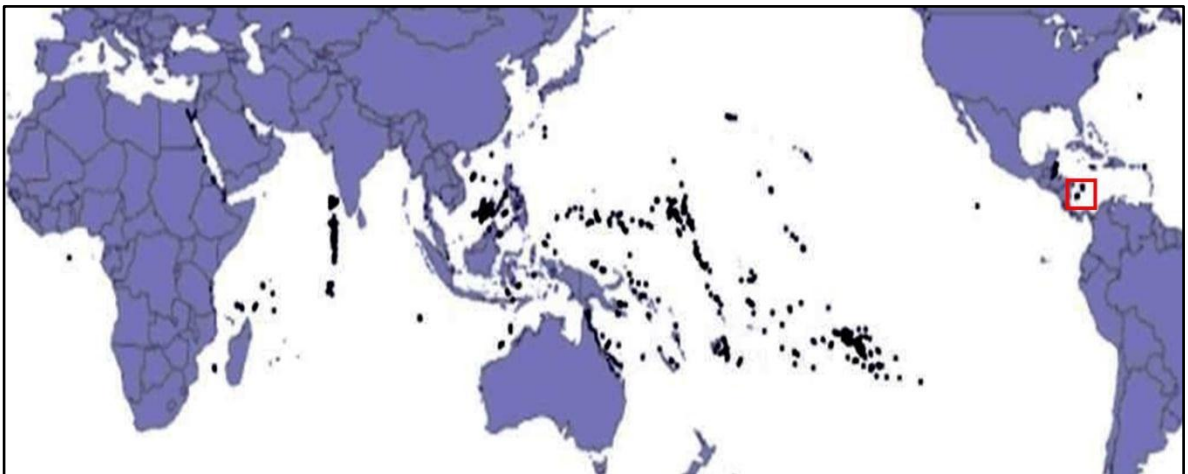


Figura 16. Distribución global de atolones. El cuadrado en color rojo corresponde al área de estudio. Modificada de <http://coraldigest.org>

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 (Woodroffe & Biribo, 2011).

Las definiciones de un atolón varían; sin embargo se destacan varios factores en común. Shepard (1948) considera que un atolón es: “Arrecifes de coral repujados

rodeando una laguna, en la que hay una isla, arrecifes ligeramente emergidos o pequeños cayos de arena”. (Figura 17)

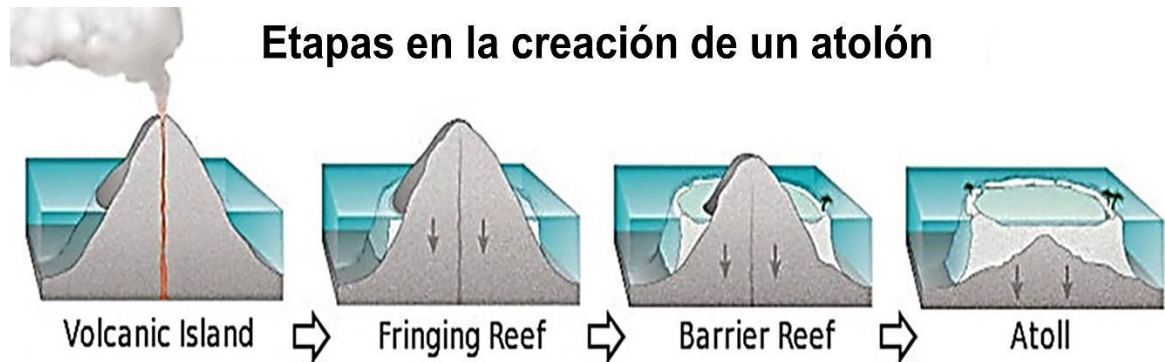


Figura 17. Etapas en la creación de un atolón. Modificada de <http://www.wpclipart.com>.

Wiens quien elaboró un libro sobre atolones mencionó que la definición dada por Shepard no era lo suficientemente regular, así que sugirió la definición dada 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 & Rigby, 1957).

No obstante Wiens (1962) también planteó 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 a parte 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, favoreciendo el crecimiento de nuevos arrecifes”. Los atolones son relativamente raros en el Caribe, sin embargo Stoddart (1965) sugirió que habían 27, pero Milliman (1973) consideró solamente 10, entre esos el Banco de Roncador.

El contorno exacto del anillo que rodea una laguna sin proyecciones hacia tierra pueden estar influenciadas por la forma de la base sobre la que el arrecife descansa, pero el carácter anular del arrecife 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, agitación, oxígeno, suministro de alimentos, nutrientes y sales (Ladd, 1977).

Para fines de descripción, 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*); (Ladd, 1977). Los *deep-sea atolls*, atolones de aguas profundas son estructuras aisladas y varían considerablemente su tamaño. Pequeños anillos, generalmente sin islotes de coral, podría ser menores de una milla de diámetro pero muchos atolones pueden tener un diámetro, de hasta 20 millas y tener una docena o más de islotes. Como ejemplo, Kwajalein en las islas Marshall, en el Pacífico y Suvadiva - Maldivas en el Océano Indico; éstos son los más largos atolones existente, cada uno cubriendo un área de 700 Millas² (Ladd, 1977).

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 (Ladd, 1977).

Los *shelf atolls* o arrecifes de plataforma, son pequeños atolones que se elevan desde las laderas de la isla más grande como pedestales y se encuentran en muchas partes del mundo, cerca de Australia, en Indonesia, en el mar Caribe y el Golfo de México. Otras investigaciones como la de MacNeil (1954), han descrito

estos arrecifes de plataforma como "Estante de atolones"; Davis (1928) como "Banco de arrecife", dependiendo de la presencia o ausencia de islas, los llamó "Banco de barrera" y "Banco de atolones", y a los pequeños atolones situados dentro de las lagunas los describió como "Atolones de laguna".

6.1.2. Barrier reef (Arrecife de barrera)

Los arrecifes de barrera se definen como un conjunto de arrecifes de coral separados de tierras no arrecifales por una profunda laguna (Battistini, 1975). En este orden de ideas un atolón con arrecife de borde no es un arrecife de barrera (Figura 17). Darwin (1842) por ejemplo, mencionó que los arrecifes de barrera son el producto del hundimiento de una isla volcánica que fue creando lentamente una laguna entre la barrera de coral y tierra (Andréfouët & Cabioch, 2011).

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) (Andréfouët & Cabioch, 2011).

Multiple-barrier (Barrera múltiple). Está compuesto por una serie de planicies arrecifales muy cercanas unas de las otras, incluso en muchos casos están conectadas (Andréfouët & Cabioch, 2011).

Faro-barrier (Barrera de Faro). Es una estructura conformada por múltiples faros, en otras palabras son arrecifes de coral con una laguna central. (Andréfouët & Cabioch, 2011).

Imbricated-barrier (Barrera de superficie ondulada). Es una sección de la barrera que está girando sobre sí mismo, cambia su parte exterior a su parte interior cambiando completamente su grado de exposición y los tipos de hábitats. Este tipo de barrea puede terminar en la laguna de una segunda barrera separada (Andréfouët & Cabioch, 2011).

Coastal-barrier (Barrera de costa). 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 (Andréfouët & Cabioch, 2011).

Fringing-barrier (Barrera franjeante). Es una sección de la barrera que alberga largas islas, mostrando así diferentes tipos de hábitats entorno a la barrera exterior (Andréfouët & Cabioch, 2011).

6.1.3. Fringing reef (Arrecife franjeante)

Se desarrollan cerca de la costa y en aguas marinas bien iluminadas, donde la temperatura y el suministro de oxígeno son favorables y se encuentra algún tipo de fondo firme. Los sitios ideales para el crecimiento de estos arrecifes, son las zonas tropicales y las costas rocosas e islas volcánicas jóvenes; así como también pueden desarrollarse en deltas de manera discontinua (Figura 17), aunque estas condiciones son menos favorables, ya que los corales no prosperan en aguas turbias (Ladd, 1977); (Smithers, 2011).

La mayoría de los arrecifes franjeantes son estructuras geomorfológicas sencillas, generalmente formadas por un revestimiento relativamente delgado de sedimentos carbonatados y espesantes hacia el mar y a través de topografía no arrecifal (Steers & Stoddart, 1977). A pesar de su aparente simplicidad, se han realizado

amplias investigaciones en décadas pasadas, basadas en datación por radiocarbono de los arrecifes del holoceno (Hopley D. , 2011) y últimamente se han realizados estudios morfo-estratigráficos y geocronológicos de cadenas de cadenas de arrecifes, comprobando que los arrecifes franjeantes pueden desarrollarse de diferentes maneras (Kennedy & Woodroffe, 2002).

La geomorfología de los arrecifes franjeantes se puede dividir en tres grandes zonas: arrecife frontal (fore-reef), cresta arrecifal (reef-crest) y trasarrecife (back-reef). Estos tienden a ser arrecifes relativamente estrechos, donde la pendiente submarina es empinada y más amplia en la que es suave (Smithers, 2011); (Darwin, 1842).

6.2. Clasificación según Wiens (1962)

La topografía general y la geomorfología de los atolones fue descrita en un libro publicado por Wiens (1962) titulado “Atoll Environment and Ecology”, basado en el estudio detallado de las Islas Marshall en el Pacífico y otros atolones ubicados en ese mismo océano. Este trabajo fue revisado por Storddart (1969), donde se mencionó que se distinguen tres características: outer reef, reef rim y lagoon (Woodroffe & Biribo, 2011). (Figura 18)

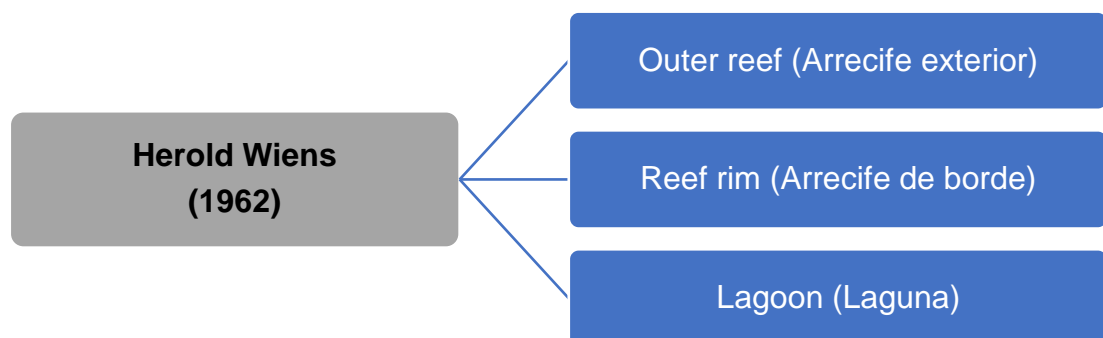


Figura 18. Clasificación de atolones según Wiens (1962) en Woodroffe & Biribo (2011).

Outer Reef (Arrecife exterior). El arrecife exterior puede ser continuo y generalmente está expuesto al fuerte oleaje que rompe por todos sus lados (Figura 20). 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. En muchos casos, la energía de la ola que rompe contra el arrecife genera sedimentos calcáreos que se van acumulando y generan condiciones óptimas para el desarrollo de otros arrecifes (Woodroffe & Biribo, 2011).

Reef Rim (Arrecife de borde). Puede tener diferentes medidas de ancho; incluso en algunos casos puede llegar a contener islas o puede tener una amplia planicie arrecifal (Reef flats), (Figura 20). Generalmente estas planicies arrecifales se encuentran en aguas someras y pueden estar expuestas durante la marea más baja. Estas zonas se pueden identificar por estar cerca de la superficie (Woodroffe & Biribo, 2011).

Lagoons (Lagunas). La laguna está resguardada en el atolón y puede contener parches arrecifales dispersos, también conocidos como pináculos (pinnacles) o montículos (knoll), (Figura 20). Algunas lagunas solo tienen unos pocos parches pero hay otras que poseen grandes cantidades de parches que forman una malla de arrecifes poco profundos. Las lagunas pueden variar considerablemente su profundidad, pueden ser poco profundas o por el contrario, pueden llegar a alcanzar grandes profundidades (Woodroffe & Biribo, 2011).

Las lagunas son características más propiamente 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 (Woodroffe & Biribo, 2011).

6.3. Clasificación según Hopley (2011)

Hopley planteó el siguiente esquema de clasificación de la geomorfología de los atolones. (Figura 19)

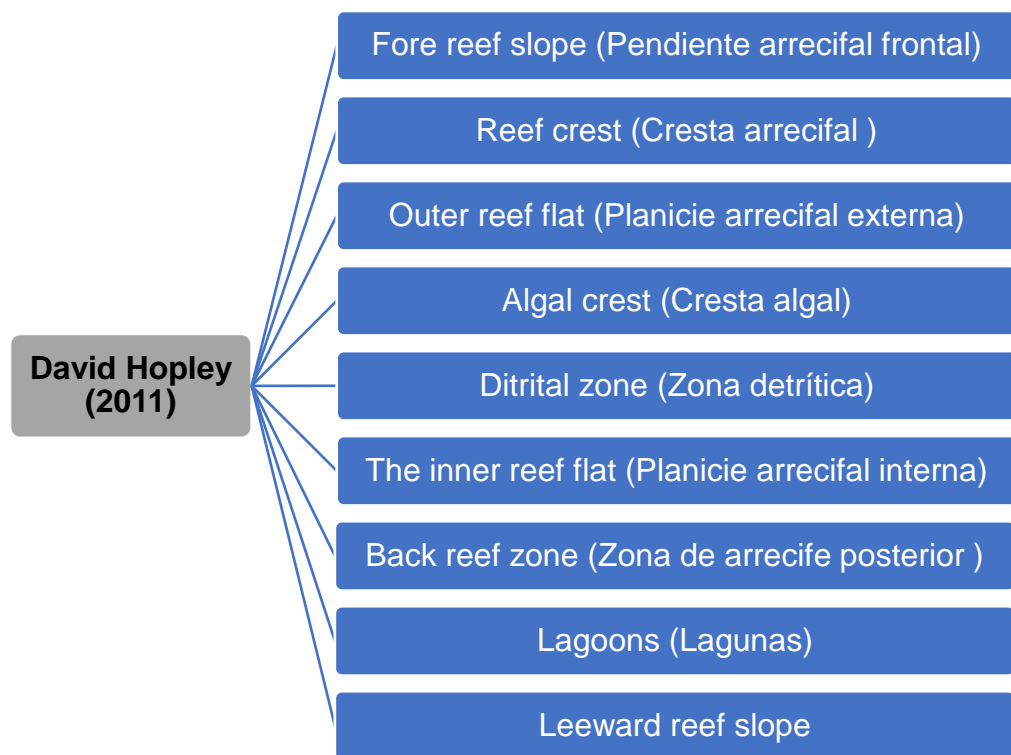


Figura 19. Clasificación de atolones según Hopley (2011).

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 20). 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).

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 20). 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 20). 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 20). 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 20), 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 20), 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 20)

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 20). 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 20)

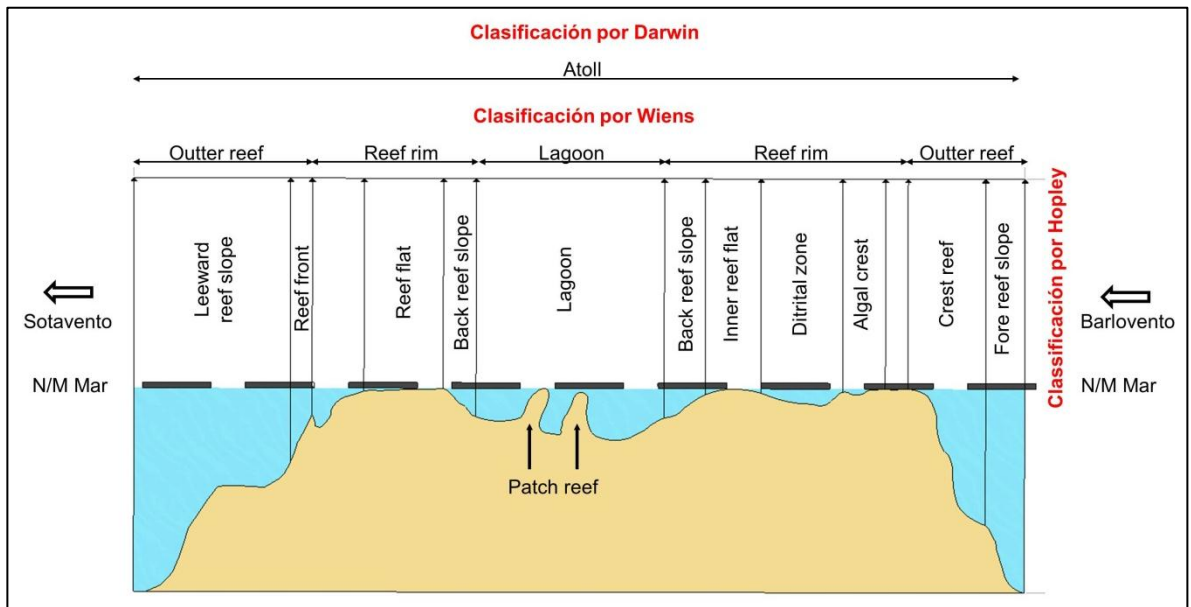


Figura 20. Zonificación del arrecife de coral, de acuerdo con las clasificaciones según Darwin (1842), Wiens (1962) y Hopley (2011).

Es importante mencionar que existen otros sistemas clasificaciones; ejemplo Fairbridge (1950) y Maxwell (1968), los cuales se hacen referencia solamente con fines académicos y de conocimiento del estado del arte en la clasificación de arrecifes de corales.

6.4. Clasificación según Fairbridge (1950)

Fairbridge (1950), se centró principalmente en la Gran Barrera de Coral (GBR), donde la clasificación de los arrecifes del Holoceno y Pleistoceno cubre las formas morfológicas del arrecife más destacadas, reconociendo a las formas franjeantes, de barrera, atolones y de plataforma (Figura 21)., como las formas básicas de los arrecifes de coral y que estas a su vez pertenecen a cinco diferentes variedades de islas de coral (Finkl, 2011).

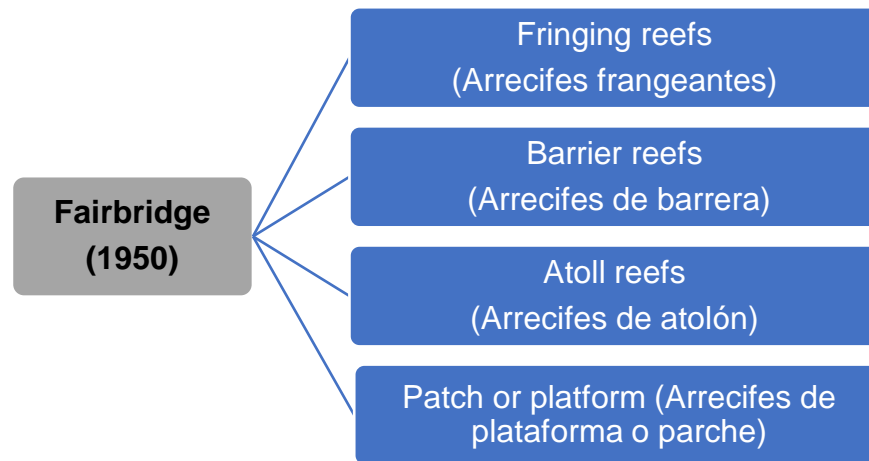


Figura 21. Clasificación de atolones según Fairbridge (1950) en Finkl (2011).

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 las corrientes de forma compleja, donde

formas más complejas podrían también estar influenciadas por la topografía del fondo antecedente, la sedimentación y las fluctuaciones eustáticas (Finkl, 2011).

En lo que se refiere a los 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 los arrecifes de plataforma o parche, también alternativamente denominados bancos o montículos arrecifales (Finkl, 2011).

6.5. Clasificación según Maxwell (1968)

De forma similar al numeral anterior, este esquema se menciona solo con fines académicos y del conocimiento del estado del arte. Maxwell (1968) intentó dar más detalles sobre el esquema de clasificación según Fairbridge, y ambos creían que podían observar patrones de división "que apoyen la idea de que representan diferentes etapas de desarrollo arrecifal" (Flood, 2011).

Maxwell planteó los siguientes tipos de arrecifes de plataforma:

- Circular – elliptical shape, radial growth (Circular, forma elíptica, crecimiento radial)
- Platform (Plataforma)
- Elongate platform (Plataforma alargada)
- Lagoonal platform (Plataforma lagunar)
- Elongate shape (Forma alargada)
- Wall (Pared)
- Cuspate (Cúspide)
- Prong (Diente)
- Composite apron (Delantal compuesto)

- Open ring (Anillo abierto)
- Open mesh (Malla abierta)
- Closed ring (Anillo cerrado)
- Closed mesh (Malla cerrada)
- Resorbed shape (Forma reabsorbente)
- Resorbed (Reabsorbente)

6.6. 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; esto es posible gracias a la relación sensor-cobertura, la cual 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, 2007).

Otros autores como Floyd F & 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, & Sinclair, 2003). Es por ello que la percepción remota es útil para el análisis de los arrecifes coralinos, permitiendo realizar el mapeo de distribución de arrecifes y su geomorfología. Algunos sensores remotos ópticos de resolución

moderada y alta, son utilizados para el monitoreo de estos arrecifes, como Landsat, SPOTHRV, ASTER, IKONOS, Quickbird, etc. (Xu & Zhao., 2014).

Dentro de los sensores aerotransportados que permiten llevar a cabo investigación en áreas de difícil acceso se encuentra el LiDAR o escaneo láser (Afanador & Carvajal, 2009). Según Brock et al., (1999), el LiDAR permite la recolección rápida de datos de elevación (nube de puntos) de forma muy precisa sobre grandes extensiones de terreno y desde los principios del presente siglo, ha sido ampliamente aplicado en el mapeo de la geomorfología costera, con el fin de mejorar el entendimiento de los procesos geomorfológicos costeros.

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 (Mumby, et al., 2005).

Es importante señalar que las fotografías aéreas después de un proceso de rectificación digital de errores y deformaciones, se convierten en ortofotografías, las cuales combinan las características del detalle de una fotografía aérea con las propiedades geométricas de un plano. Estas ortofotografías se convierten en un insumo digital muy importante para el desarrollo de estudios en diferentes áreas de investigación; como ejemplo, en la elaboración de mapas geomorfológicos.

7. METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología que se aplicó en la presente investigación se encuentra esquematizada en la figura 22.

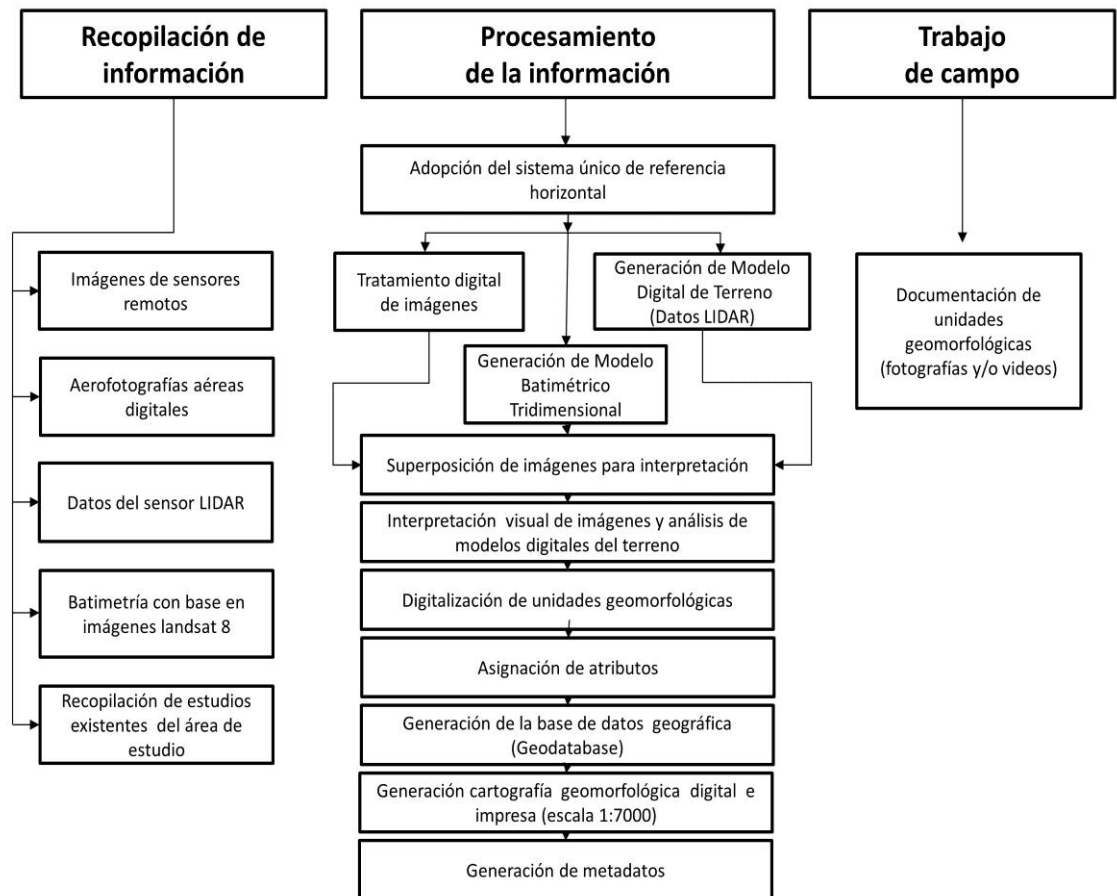


Figura 22. Metodología propuesta

En adelante; en la presente investigación, se realizó la descripción geomorfológica del atolón Roncador en vez de la Isla Cayo de Roncador, considerando que la información recopilada, permitió extender la descripción geomorfológica al atolón Roncador.

Teniendo en cuenta la necesidad de efectuar el análisis geomorfológico, para lograr la identificación de la geomorformas del atolón Roncador, se utilizó las tecnologías de teledetección, dado el nivel de detalle y de exactitud posicional que estas herramientas tecnológicas ofrecen.

7.1. 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 22).

7.1.1. Recopilación de la información

Se realizó la recopilación de las fuentes de información que se encontraban a disposición para efectuar el análisis geomorfológico del atolón Roncador.

- Aerofotografías aéreas digitales; suministradas por la DIMAR - CIOH
- Imágenes de sensores remotos de diferentes resoluciones espaciales y temporales; Suministradas por la DIMAR, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y Fuerza Aérea Colombiana (FAC).
- Datos de sensor LiDAR; Suministradas por la DIMAR.
- Batimetría; Suministrada por el IGAC.
- Recopilación de estudios existentes del área de estudio.

En las siguientes tablas 1 y 2, se observan parte de los metadatos de la información recopilada

Tabla 1: **Metadatos de las aerofotografías digitales y de las imágenes de sensores remotos utilizadas.**

Fuente de información	Fecha de toma	Resolución espacial	Resolución radiométrica	Bandas	Sistema de referencia
Aerofotografías digitales	20090801 20090831	25 cm	8 Bit	RGB	Colombia_west_west _zone
Landsat 8	20140527	30 m	16 Bit	11 bandas	WGS84-UTM-zona 17N
Ikonos	20070423	1 m	8 Bit	RGB	Magna_Colombia_ Oeste_oeste
Fotografía aérea FAC	20130704	7.5 m	16 Bit	RGB	Magna_Colombia_ Oeste_oeste

Tabla 2: **Metadatos de los datos LiDAR y batimetría empleada.**

Fuente de información	Fecha de toma	Resolución espacial	Resolución radiométrica	Bandas	Sistema de referencia
Datos LiDAR	20090801 20090831	25 cm	---	---	Colombia_west_west _zone
Batimetría (Landsat 8- IGAC)	20010626	---	---		WGS_1984_UTM_ zone_17N

7.1.2. Procesamiento de la información:

7.1.2.1. Adopción del sistema único de referencia horizontal

Se adoptó un sistema de referencia único que permitiera superponer la información recopilada (aerofotografías aéreas digitales, imágenes de sensores remotos, datos LiDAR y batimetría existente del área de estudio), realizando la transformación digital a un solo sistema de referencia horizontal MAGNA, origen cartográfico MAGNA Colombia Oeste Oeste - (4° 35' 46.3215" N; 80° 04' 39. 0285" W), cumpliendo con el sistema de coordenadas oficial del país, implementado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en el año 2005. Para la transformación digital de la información recopilada al sistema de referencia horizontal cartográfico MAGNA Colombia Oeste Oeste, se utilizó el software ArcGIS 10.1.

Para definir un sistema de referencia en la información cartográfica recopilada y generada en el proyecto, se utilizó la herramienta de transformación y proyección denominada, *define projection*, la cual se encuentra en la siguiente ruta:

ArcToolbox\data management tools\projections and transformations\raster\define projection\input dataset or feature class (agregar imagen RASTER)\coordinate system\projected coordinate system\national grids\south america\MAGNA Colombia Oeste Oeste

Tomando como origen cartográfico *MAGNA Colombia Oeste Oeste*, teniendo en cuenta que el área de estudio se encuentra dentro de plano de proyección de este sistema de referencia horizontal cartográfico.

7.1.2.2. Tratamiento digital de imágenes:

Utilizando el software ArcGIS 10.1 se realizaron los tratamientos digitales a las imágenes (Tabla 3). Fundamentalmente se realizaron modificaciones al contraste y a la gama de colores utilizada para representar las imágenes.

Tabla 3: **Tratamiento digital a las imágenes utilizadas.**

Fuente de información	Banda utilizada	Contraste	Color	Efecto de sombreado
Aerofotografías digitales	RGB	40%	Cambio de rampla de color	Z:25
Landsat 8	2 (roja)	30%	Cambio de rampla de color	---
Ikonos	2 (roja)	30%	Cambio de rampla de color	---
Fotografía aérea FAC	RGB	30%	Cambio de rampla de color	---

En la figura 23 se muestran los tratamientos digitales que se le realizaron a la imagen Landsat 8, para la delimitación del atolón según Darwin.

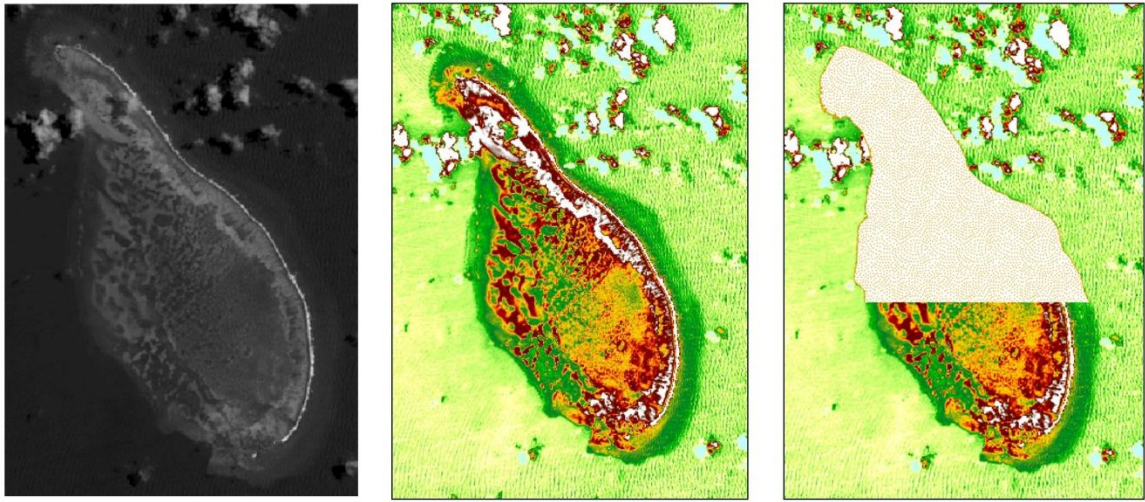


Figura 23. Izquierda: Imagen Landsat 8 banda 2, sin tratamiento digital. Central: Imagen tratada digitalmente con los procedimientos descritos en la tabla 3. Derecha: Imagen tratada utilizada para realizar el polígono del atolón Roncador (polígono en color beige).

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.

7.1.2.3. Generación de modelos digitales del terreno (MDT) -Datos LiDAR

Con base en los datos obtenidos en el área de estudio por el sensor LiDAR, se generó un Modelo Digital del Terreno (MDT), a través del software ArcGIS, efectuando las interpolaciones respectivas para obtener una representación tridimensional digital del terreno, es decir, suelo descubierto, sin presencia de vegetación ni de construcciones.

Los pasos para generar el MDT fueron los siguientes:

1. Convertir los datos LAS en una imagen RASTER

Arc Toolbox\conversion tools\to RASTER\LAS – RASTER

Se realizó el anterior paso, para convertir los datos LiDAR en formato RASTER y así poder seleccionar el área de interés, ya que desde los datos LiDAR no se puede realizar este procedimiento.

2. Cortar el RASTER con un geoprocesamiento a un CLIP, para cortar el polígono deseado.

Data management tools\RASTER\RASTER procesing\CLIP

Convertidos lo datos LiDAR en formato RASTER, se procedió a seleccionar y cortar solamente el área de interés, la Isla Cayo de Roncador.

3. Después de ese polígono cortado, se procede a realizar un TIN:

3D analyst tools\data management\TIN\create TIN

Con el corte del área de interés, se procedió a realizar un Modelo Digital de Terreno (MDT), a través de unas redes irregulares de triángulos (TIN). (Figura 24)

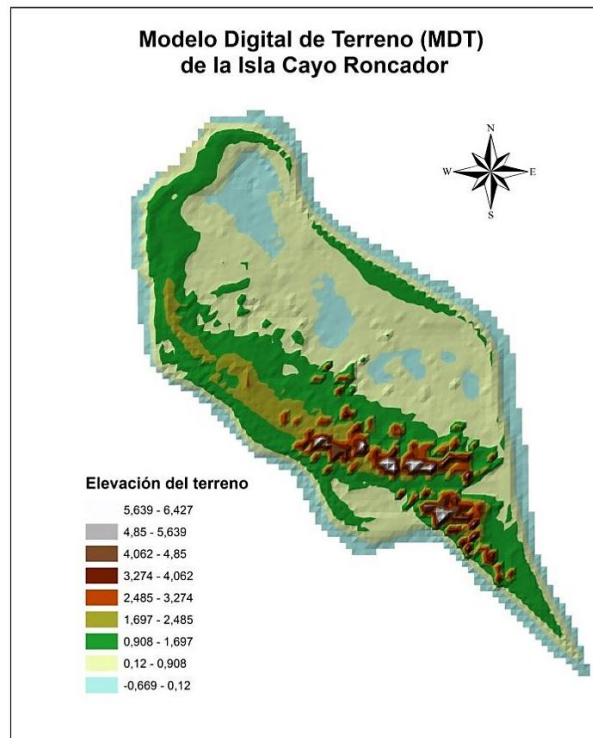


Figura 24. Modelo Digital de Terreno (MDT) de la Isla Cayo de Roncador, a partir de datos LiDAR. Este modelo está referido en alturas verticales elipsoidales, referidas en el elipsoide WGS 84.

7.1.2.4. Modelo Batimétrico Tridimensional (MBT)

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 Roncador, posteriormente se procedió a realizar el MBT mediante los pasos siguientes:

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

Con el anterior procedimiento, se generó una de redes irregulares de triangulación en base a imágenes Landsat, las cuales permitieron graficar un Modelo Batimétrico Tridimensional (Figura 25). Obteniendo finalmente la batimetría del atolón Roncador y la transformación digital al sistema de referencia horizontal cartográfico MAGNA Colombia Oeste Oeste.

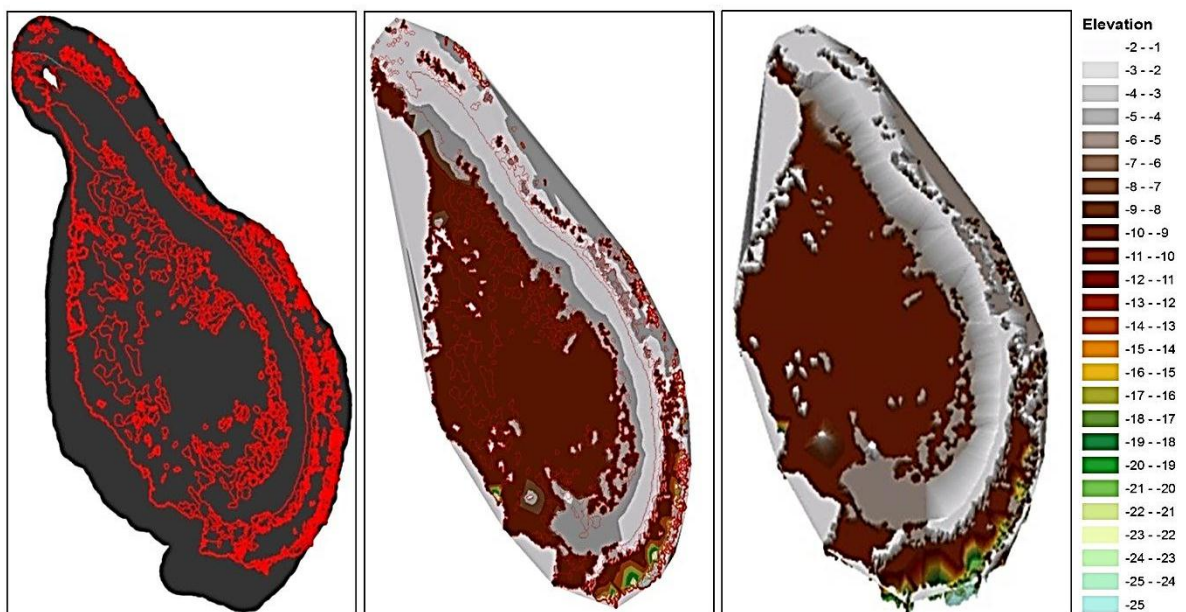


Figura 25. Izquierda. Batimetría 2014 (IGAC). Central. Red de triangulación irregular. Derecha. Modelo Batimétrico Tridimensional.

7.1.2.5. Superposición de imágenes para interpretación

Se realizó la superposición de las imágenes tratadas de Landsat 8 y las aerofotografías digitales con el modelo batimétrico tridimensional, para facilitar la interpretación de las unidades morfológicas. (Figura 26)

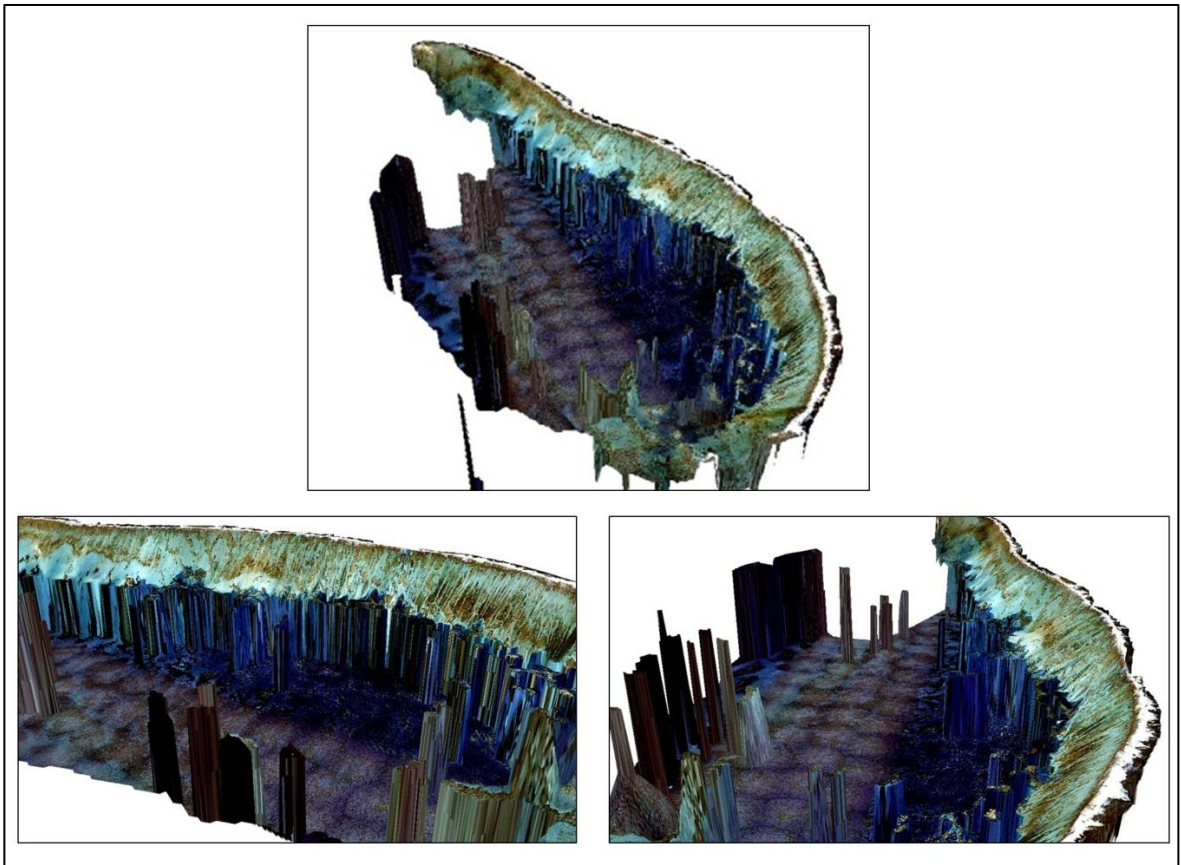


Figura 26. Imágenes de diferentes puntos de observación de la superposición de la aerofotografía aérea digital y el Modelo Batimétrico Tridimensional en el atolón Roncador.

7.1.2.6. Interpretación visual de imágenes y análisis de modelos digitales del terreno

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

- Formas, patrón, tono o color, textura y asociación de las unidades geomorfológicas. (Figura 27)
- Batimetría. (Figura 28)
- Dirección del viento.

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 29).

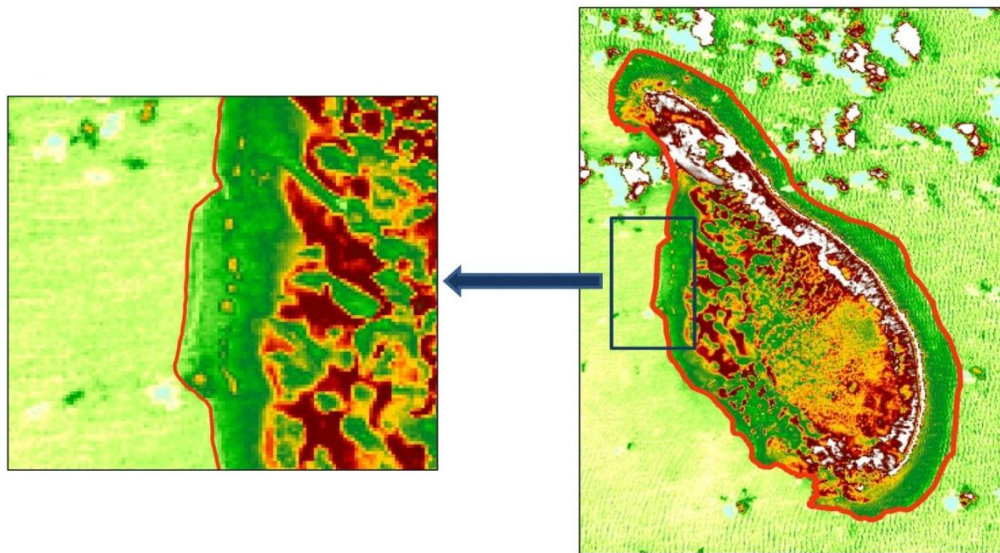


Figura 27. Interpretación visual de la imagen Landsat 8, encontrando diferencia de tonos o colores, siendo este el factor principal para la realización de la delimitación del atolón, de acuerdo con la clasificación según Darwin (1862).

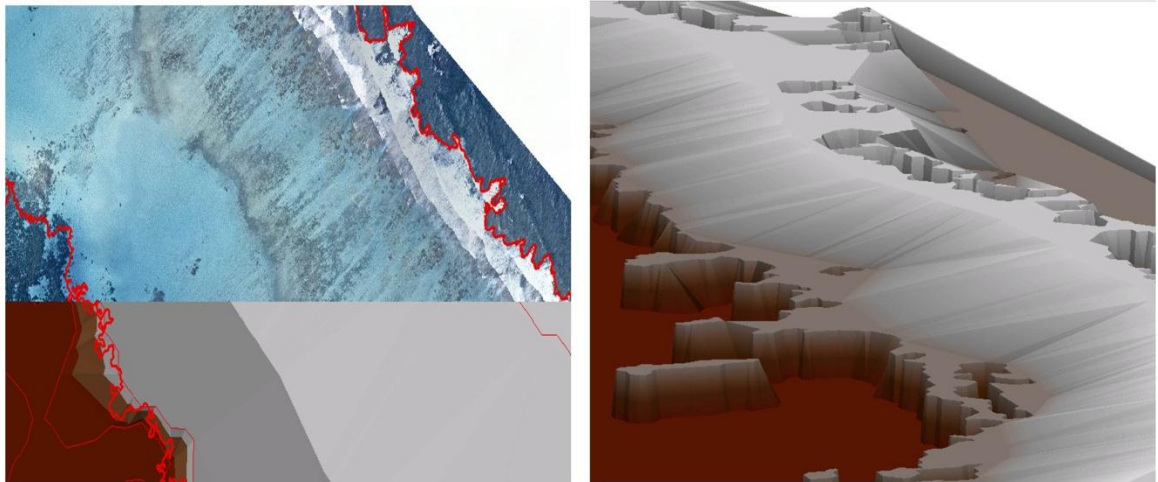


Figura 28. Visualización de la batimetría y el Modelo Batimétrico Tridimensional, ubicando la forma y contorno del reef rim, de acuerdo con la clasificación según Wiens (1962).

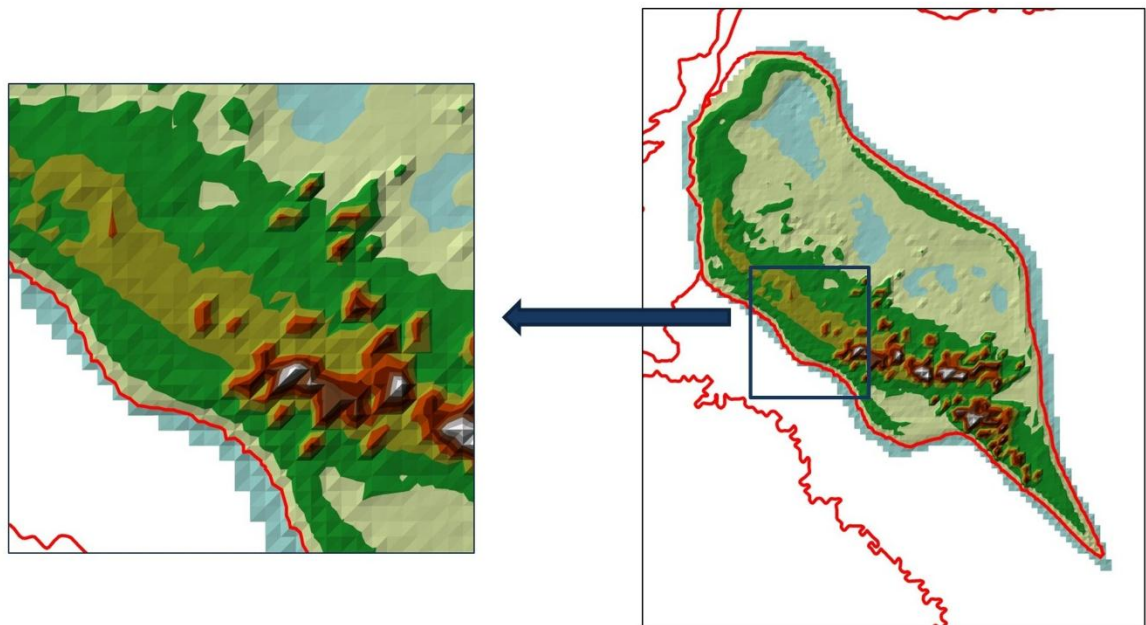


Figura 29. Análisis del Modelo Digital de Terreno, para la realización de la delimitación de la Isla Cayo de Roncador, de acuerdo con la clasificación según Hopley (2011).

7.1.2.7. Generación de shapefiles

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.

7.1.2.8. Asignación de atributos asociados

Con la generación de los shapefiles, se procedió a asignar atributos (tipo de shapefile, sistema de clasificación, área, perímetro, 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 identificar fácilmente las unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio. (Figura 30)

ID	Shape *	Clasificación	Zonas	Area [m2]	Perímetro [m]	Datum Horizontal	Fuente cartográfica	Formato Di
1	Polygon	Clasificación por Hopley (2011)	Island (Isla)	68339,697396	1331,824314	Magna Colombia Oeste Oeste	MDT (2015) - Ortofomosaico (2009)	TIN - ECW
2	Polygon	Clasificación por Hopley (2011)	Reef crest (Cresta arrecifal)	1149972,437495	47180,259722	Magna Colombia Oeste Oeste	Ortofomosaico (2009) - MBT (2014)	ECW - TIN
3	Polygon	Clasificación por Hopley (2011)	Lagoon (Laguna)	23843853,173164	101318,789065	Magna Colombia Oeste Oeste	Ortofomosaico (2009) - MBT (2014)	ECW - TIN
4	Polygon	Clasificación por Hopley (2011)	Fore reef slope (Pendiente arrecifal frontal)	10543972,793622	54879,912645	Magna Colombia Oeste Oeste	MBT (2014) - Landsat8 (2014)	TIN - TIFF
5	Polygon	Clasificación por Hopley (2011)	Patch reef (Parches arrecifales)	1526912,075666	28517,16793	Magna Colombia Oeste Oeste	Ortofomosaico (2009) - MBT (2014)	ECW - TIN
6	Polygon	Clasificación por Hopley (2011)	Diffral zone (Zona dentrónica)	4397096,953045	115940,94201	Magna Colombia Oeste Oeste	Ortofomosaico (2009) - MBT (2014)	ECW - TIN
7	Polygon	Clasificación por Hopley (2011)	Algal crest (Cresta algal)	5694875,494529	90900,313205	Magna Colombia Oeste Oeste	Ortofomosaico (2009) - MBT (2014)	ECW - TIN

Figura 30. Asignación de atributos al shapefile de la clasificación según Wiens (1962).

7.1.2.9. Trabajo de campo

En el desarrollo de la presente investigación no se realizó trabajo campo debido a las difíciles condiciones de acceso por vía marítima (unidades a flote de la Armada Nacional de Colombia) en esta área. Sin embargo se aprovechó el vuelo oficial realizado por la Armada Nacional de Colombia y la DIMAR en el año 2014, a bordo de un helicóptero, donde se realizaron videos y se tomaron fotografías, los

cuales fueron tomados como datos de campo para corroborar los resultados obtenidos en la presente investigación.

7.1.2.10. Generación de la base de datos geográfica (Geodatabase)

La información espacial (fotografías, imágenes, datos LiDAR, 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 31)

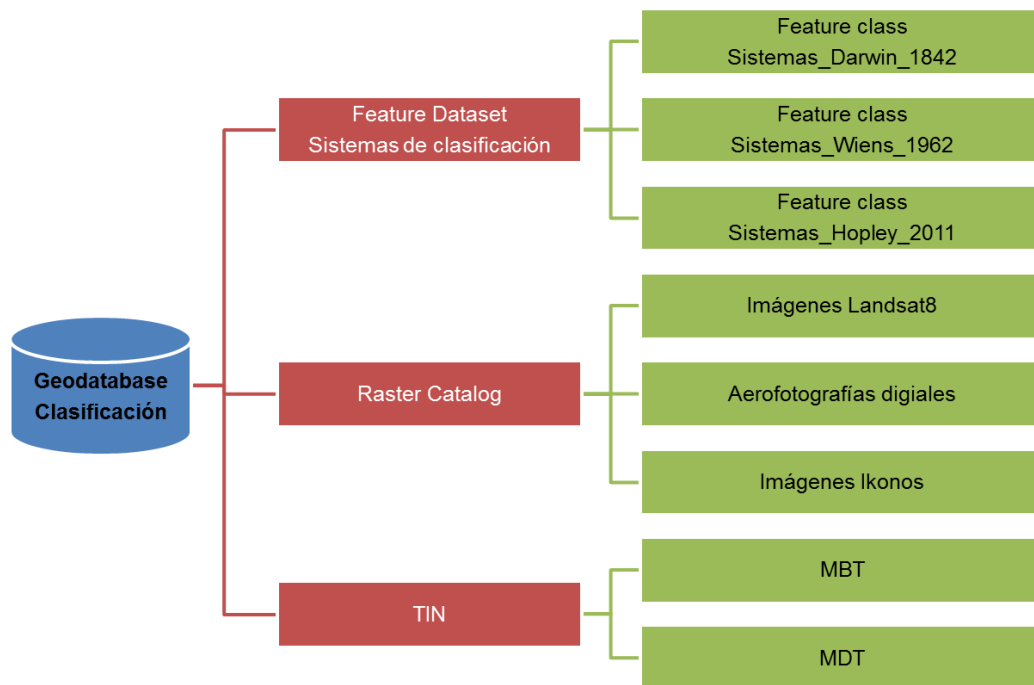


Figura 31. Geodatabase de las zonificaciones del atolón Roncador.

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, aerofotografías

aéreas e IKONOS y el tercer dataset contiene las redes irregulares de triángulos del Modelo Batimétrico Tridimensional (MBT) y del Modelo Digital de Terreno (MDT).

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

Se generó la cartografía geomorfológica del atolón Roncador 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.

7.1.2.12. 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.

8. RESULTADOS

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

Para esta clasificación se tomaron como insumos la imagen Landsat 8 y el MBT. Con el tratamiento digital realizado a la imagen Landsat 8 (tabla 3), se evidenció un cambio significativo de colores; de un tono verde claro a un tono verde más oscuro, permitiendo observar la geoforma del Atolón Roncador. Además se verificó su forma a través de la visualización del MBT y la comparación con el Mapa Geomorfológico del Atolón Roncador (Figuras 32 y 33), registrado en el libro de Áreas Coralinas de Colombia (Díaz et al., 2000).

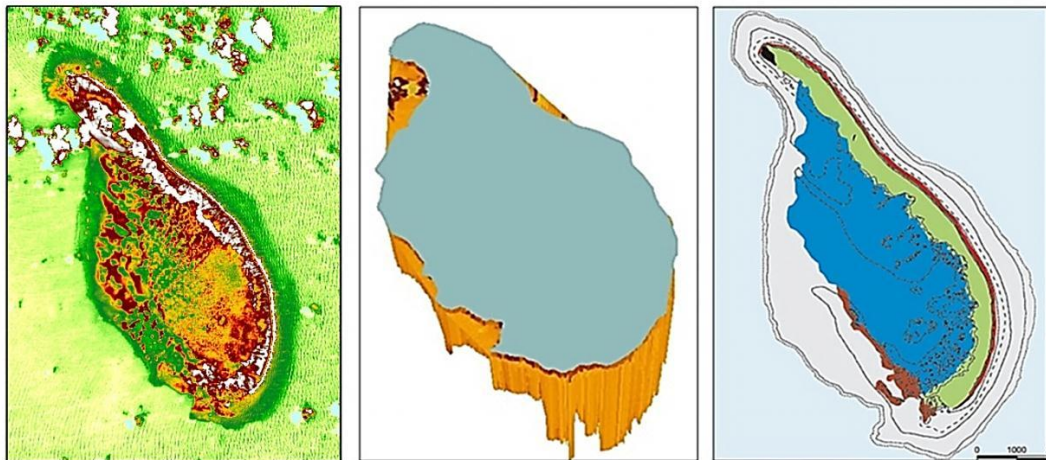


Figura 32. Izquierda. Imagen Landsat 8 con tratamiento, donde se observa la diferenciación de colores de un tono verde claro a un tono verde más oscuro. Central. MBT con el polígono del atolón realizado. Derecha. Mapa geomorfológico del atolón Roncador (Díaz et al., 2000).

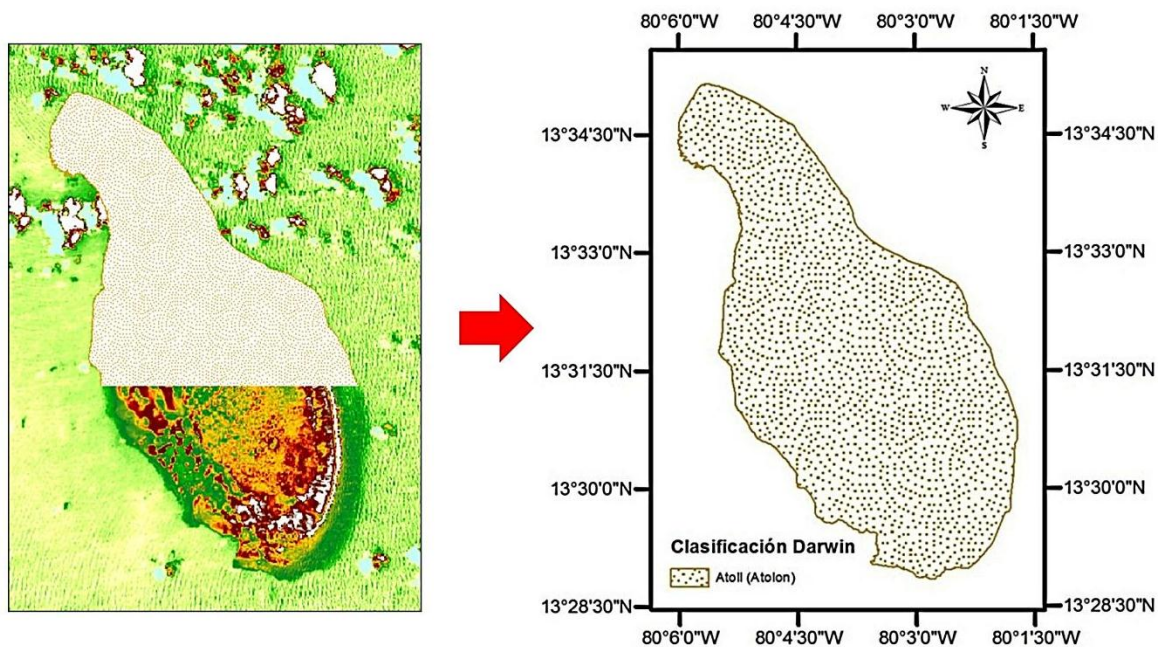


Figura 33. Atolón Roncador, de acuerdo con la clasificación según Darwin (1842).

Zonificación del atolón de Roncador, 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 geoformas presentes en el atolón Roncador. (Figura 37)

Outer reef (arrecife exterior): Se utilizó la imagen Landsat, ya que la aerofotografía digital se encuentra cortada y no permite visualizar esta geoforma. 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 34.

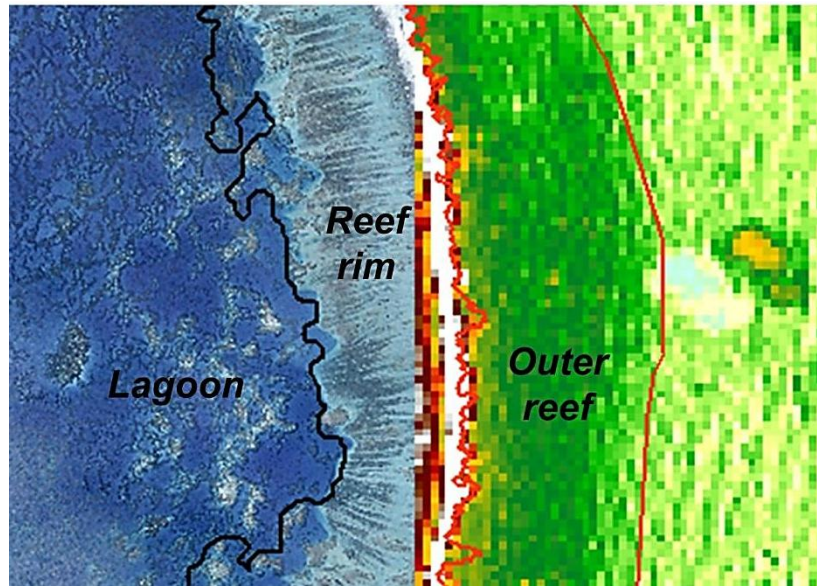


Figura 34. Delimitación del outer reef, arrecife exterior; borde rojo exterior, a partir de la imagen Landsat 8.

Reef rim (arrecife de borde): La delimitación se realizó desde el frente arrecifal, basándose en las aerofotografías aéreas, la cuales tiene mayor resolución espacial, permitiendo observar de mejor forma la franja blanca (figura 34), 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 35)

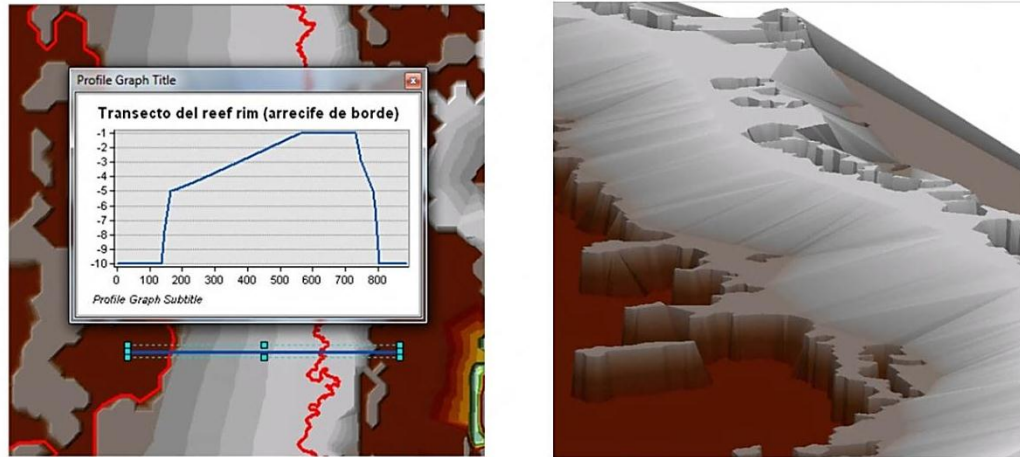


Figura 35. Delimitación del reef rim (arrecife de borde), utilizando el MBT y la graficación de un transecto del mismo. Se observa el mayor grado de inclinación de la geoforma en la gráfica del perfil.

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 36)

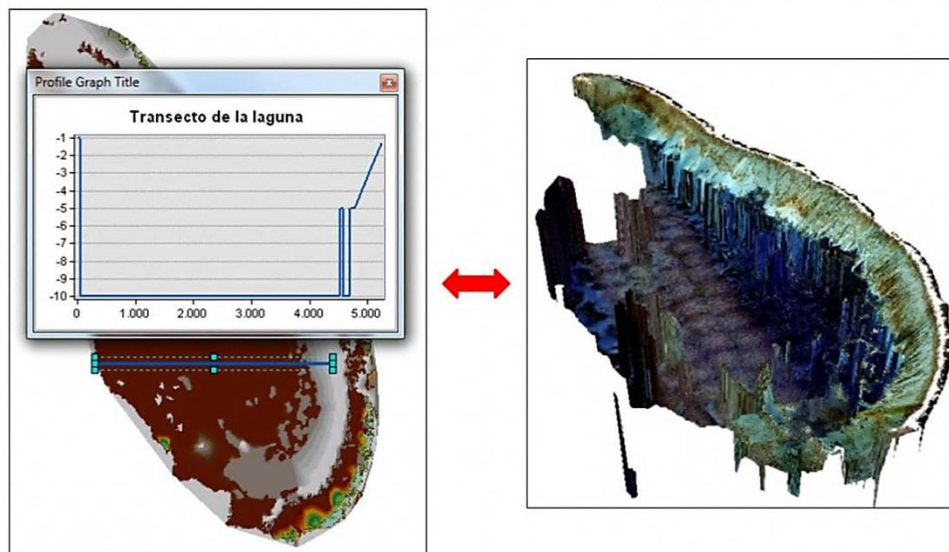


Figura 36. Izquierda. MBT con visualización de perfil de la laguna. Derecha. Superposición de las aerofotografías digitales con el MBT para complementar la información.

Finalmente se obtuvo la clasificación de las unidades geomorfológicas presentes en el atolón Rocardor, de acuerdo la clasificación según Wiens. (Figura 37)

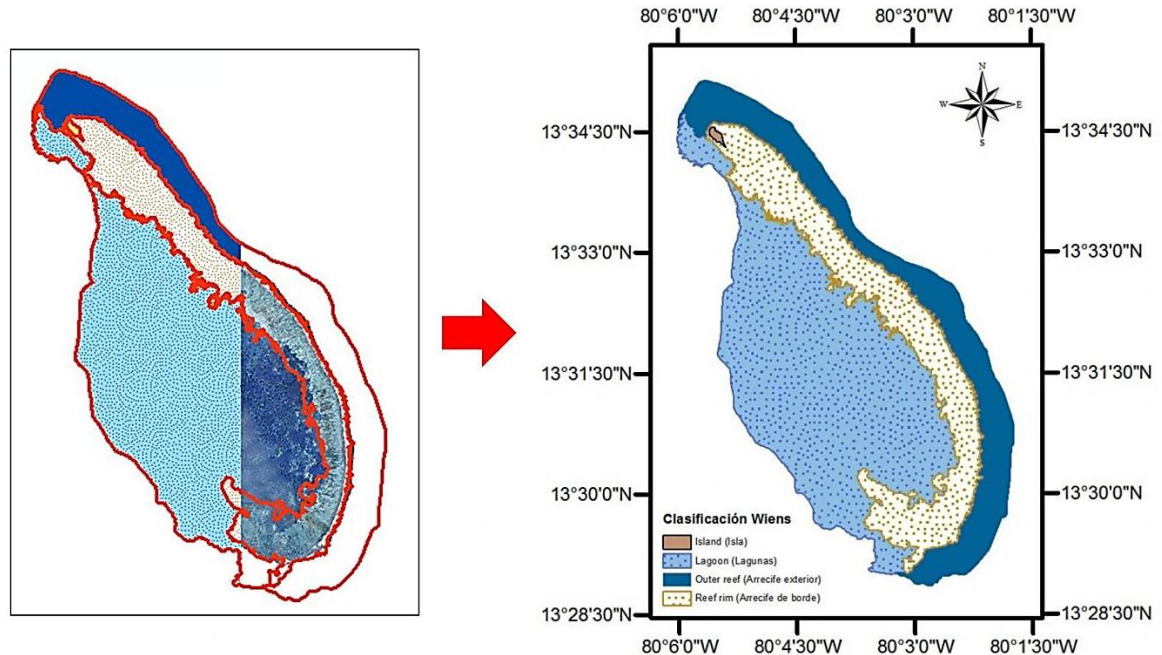


Figura 37. Clasificación de las unidades geomorfológicas en el atolón Roncador, de acuerdo al sistema de clasificación según Wiens (1962).

Zonificación del atolón de Roncador, 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 34)

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 38)

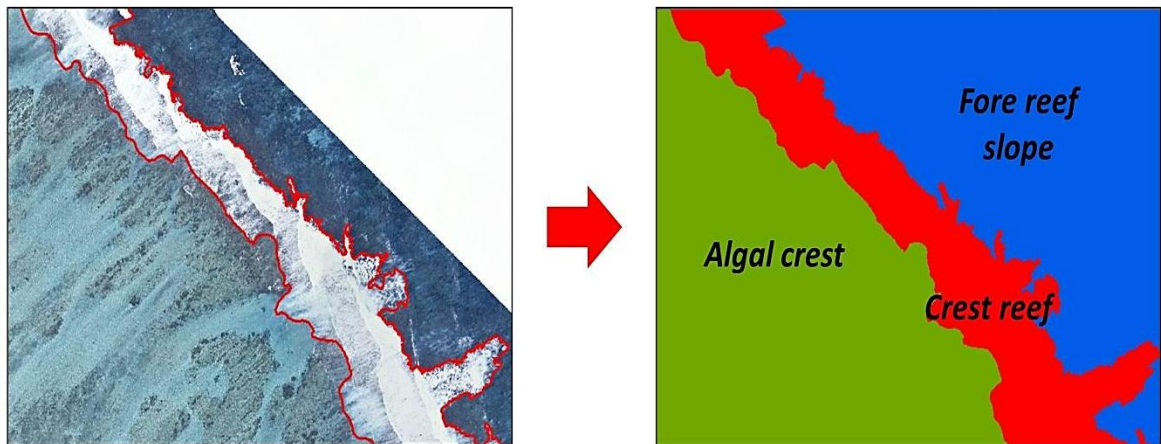


Figura 38. Delimitación del reef crest (cresta arrecifal), con base en la aerofotografía digital, obteniendo el polígono respectivo.

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 39, donde hay un cambio significativo de un tono gris a un tono azul claro.

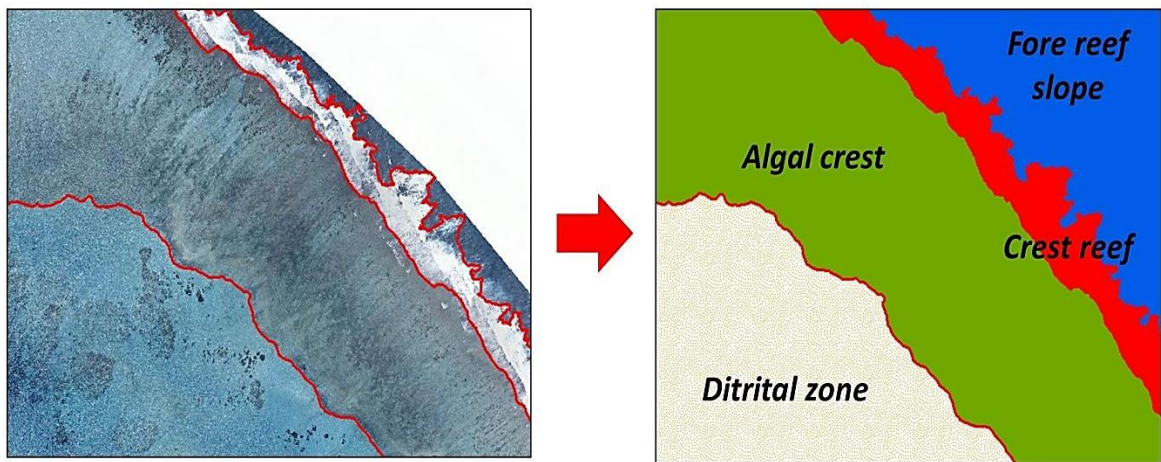


Figura 39. Delimitación del algal crest (Cresta algal), con base en la aerofotografía digital, obteniendo el polígono de la zona.

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 34 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.

Lagoon (laguna): Se delimito de igual manera como se realizó en la clasificación según Wiens. (Figura 36)

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. Para la delimitación se utilizó específicamente el MBT, como se observa en la figura 40.

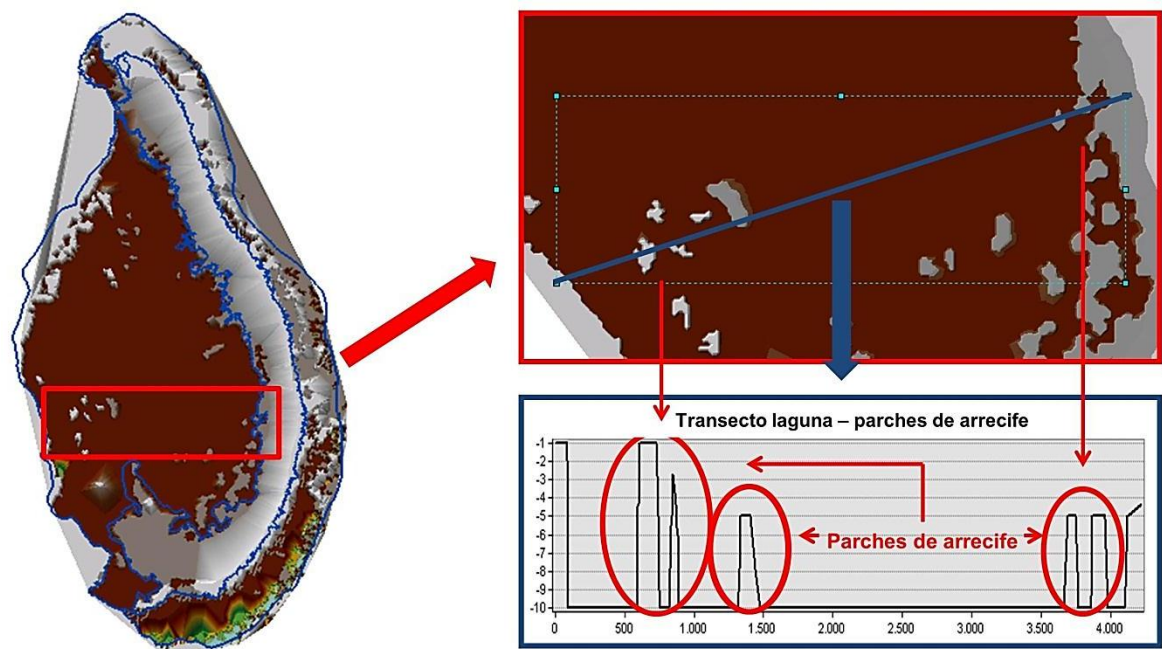


Figura 40. Perfil del transecto que pasa por la laguna del atolón Roncador, evidenciando los parches de arrecife (patch reef), marcados en los círculos de color rojo.

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 Roncador. (Figura 41)

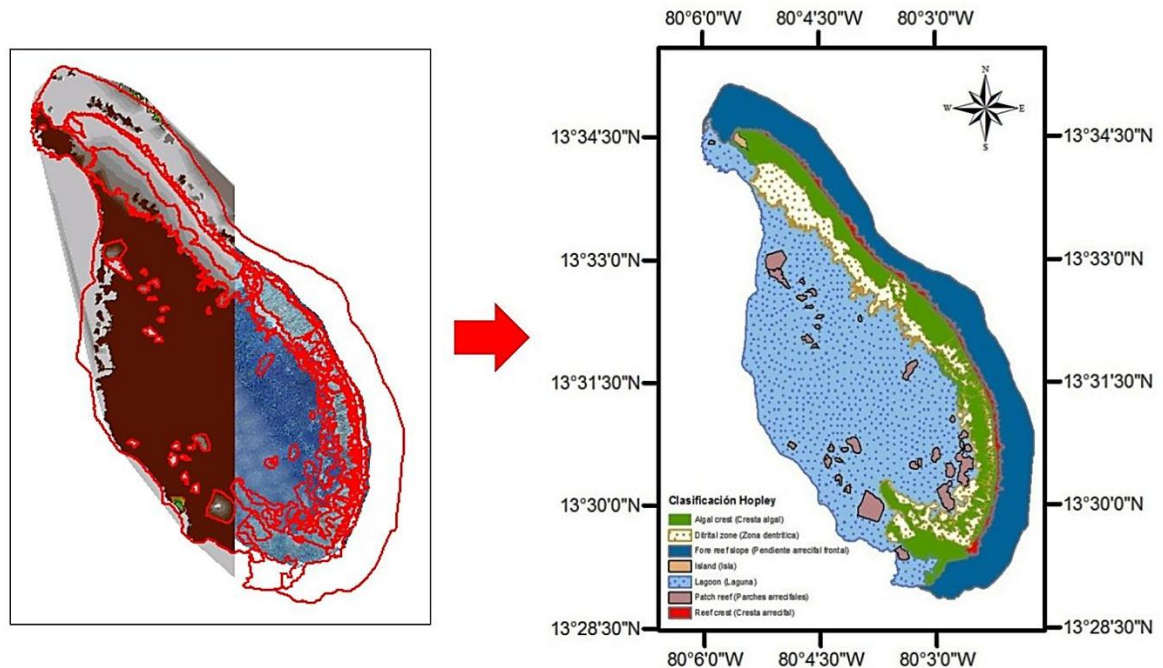


Figura 41. Clasificación según Hopley (2011) en el atolón Roncador.

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 la tabla 4.

Tabla 4: Áreas y perímetros de las zonificaciones para las tres clasificaciones en el atolón Roncador.

Clasificación	Zonificación	Área [m ²]	Perímetro [m]
Darwin (1842)	Atoll (Atolón)	472.273	34.253
Wiens (1962)	Outer reef (Arrecife exterior)	105.458	54.882
	Reef rim (Arrecife de borde)	112.890	88.295
	Lagoon (Laguna)	253.925	72.854
	Island (Isla)	68.340	1.332
Hopley (2011)	Fore reef slope (Pendiente arrecifal frontal)	105.439	54.880
	Reef crest (Cresta arrecifal)	114.997	47.180
	Algal crest (Cresta algal)	569.487	90.900
	Ditrital zone (zona detrítica)	439.709	115.941
	Lagoon (Laguna)	238.438	101.319
	Patch reef (Parches de arrecife)	152.691	28.517
	Island (Isla)	68.340	1.332

9. CONCLUSIONES

Con la consulta bibliográfica sobre esta área y el contenido de la información recopilada, se extendió el análisis geomorfológico al atolón Roncador, en lugar de efectuar solamente el análisis geomorfológico de la Isla Cayo de Roncador.

De acuerdo con los esquemas de clasificación de arrecifes de coral según Darwin (1842), Wiens (1962) y Hopley (2011) y el tratamiento digital de los datos LiDAR, ortofotografía digitales e imágenes de sensores remotos, se realizó la caracterización y descripción de la conformación geomorfológica en el área de estudio. Obteniendo como resultado que geomorfológicamente Roncador es un atolón de arrecife; según la clasificación según Darwin, confirmando lo descrito en investigaciones realizadas en esta área. En la clasificación según Wiens, se encontró las geoformas de *outer reef* (Arrecife exterior), *reef rim* (arrecife de borde) y *lagoon* (laguna) y en la clasificación según Hopley se encontraron las geoformas de *fore reef slope* (pendiente arrecifal frontal), *reef crest* (cresta arrecifal), *algal crest* (cresta algal), *ditrital zone* (zona detrítica) y *lagoon* (laguna).

Uno de los resultados más relevantes, fue la descripción y delimitación del arrecife de coral que bordea a la isla, denominado *reef crest* (cresta arrecifal); de acuerdo con la clasificación según Hopley (2011), con un área de 114.997 m² y un perímetro de 47.180 m. (Anexo C)

Esta delimitación del arrecife de coral constituye un elemento importante para el Estado Colombiano, con el fin de sustentar 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 Roncador, cuya delimitación se realizó de manera irregular y por lo tanto debe ser modificada y ceñirse a lo estipulado en la

CONVEMAR., parte II, artículo 6 *“En el caso de islas situadas en atolones o de islas bordeadas por arrecifes, la línea de base para medir la anchura del mar territorial es la línea de bajamar del lado del arrecife que da al mar, tal como aparece marcada mediante el signo apropiado en cartas reconocidas oficialmente por el Estado ribereño”*. Esta última parte del texto anterior; es motivo de preocupación, ya que hasta el momento, no hay cartas oficiales del Estado Colombiano donde se delimite el arrecife de coral que bordea la Isla.

Las unidades geomorfológicas que se describieron en la presente investigación son diferentes a las encontradas en el libro Áreas Coralinas de Colombia (2000), realizado por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives De Andrés” (INVEMAR), ya que esta institución tomo como referencia el libro Coastal and Marine Ecological Classification Standard (2012) y en la presente investigación, se tomó como referencia a varios autores citados anteriormente, conociendo nuevos conceptos de unidades geomorfológicas y permitiendo entrar un poco más en detalle en la descripción de las mismas y en cálculo de sus dimensiones como el área y el perímetro.

El establecimiento de las unidades geomorfológicas presentes en atolón Roncador, 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 utilización del sensoramiento remoto permitió la toma de información en áreas de difícil acceso; como sucede en el área de estudio de esta investigación, donde el acceso es limitado, debido a factores como la poca profundidad y la fuerte dinámica del oleaje, dificultando la toma de datos y la realización de

levantamientos batimétricos. Es de anotar que el sensoramiento remoto no reemplaza la oceanografía tradicional y las técnicas de toma de datos en ambientes costeros y marinos, sino que al contrario, las complementa.

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 Roncador, 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; 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 Roncador, 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 Roncador 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 “Roncador”, 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.

BIBLIOGRAFÍA

- Afanador, F., & Carvajal, A. (2009). LiDAR, ortografía digital y SIG en análisis geomorfológicos del Caribe Colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 27, 112-134.
- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2012). *Catalogo de productos y servicios*. Bogotá: Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital.
- Andrade. (2000). *The circulation and variability of the Colombian Basin in the Caribbean Sea. (Tesis doctoral)*. Wales: University of Wales.
- Andrade. (2003). El cambio relativo del nivel del mar. En INVEMAR, *Programa holandés de asistencia para estudios de cambio climático, Colombia: definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geo-fisicos y socio-económicos debido a un cambio en el nivel del mar en las zonas costeras colombianas (Caribe y Pacífico)*. Santa Marta, Colombia.
- Andrade, C., & Barton, E. (2000). Eddy development and motion in the Caribbean Sea. En ENAP, *Estabilización Geomorfológica de los cayos del archipiélago de San Andrés y Providencia* (pág. 31).
- 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).
- Andréfouët, S., & Cabioch, G. (2011). Barrier reef (ribbon reef). En D. Hopley, *Encyclopedia of Modern Coral Reefs* (págs. 102-107). Springer.
- ArcGIS. (s.f.). *ArcGis Resources*. Obtenido de <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>

- Ariza, A., Roa , O., & Ramirez , M. (2014). *Informe Técnico Final. "Procesamiento Digital de Imágenes Aplicado a Manejo de Zonas Costeras e Insulares Fase I"*.
- Battistini, R. (1975). Eléments de terminologie récifale indopacifique. *Téthys*, 1-111.
- Bird, E. (2011). *Coastal geomorphology. An introduction*. Second edition. John Wiley & Sons, Ltd.
- Brock. (1999). *Aircraft laser altimetry for coastal process studies. Presented at the Coastal Sediments '99: Proceedings of the 4th International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Processes*. Hauppauge, NY: America Society of Civil Engineers.
- Buiten, H., & Clevers, J. (1993). Land observation by remote sensing: theory and applications. *Gordon and Breach Science Publishers*, 297-321.
- Choat, J. H., & Bellwood, D. R. (1991). Reef fishes: their history and evolution. En *The ecology of fishes on coral reefs* (pág. 39). San Diego: Academic Press.
- CIOH-DIMAR . (2013). *Atlas geomorfológico del Litotal Caribe Colombiano (Vol. 8)*. Cartagena de Indias, Colombia: Serie Publicaciones Especiales CIOH.
- CIOH-DIMAR. (2009). *Geografía submarina del Caribe colombiano (Vol. 4)*. Cartagena de Indias, Colombia: DIMAR, Serie Publicaciones Especiales CIOH.
- CORALINA-INVEMAR. (2012). *Atlas de la Reserva de Biósfera Seaflower. Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. Santa Marta, Colombia: Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR # 28.
- Corte Internacional de Justicia. (2012). *Controversia territorial y marítima (Colombia - Nicaragua)*. La Haya, Países Bajos.
- Darwin, C. (1842). *The structure and distribution of coral reefs*. Berkeley, United States: University of California Press.

- Davis, W. (1928). The coral reef problem. *American Geographical Society*, 9.
- de Alegria-Arzaburu, A., Mariño-Tapia, I., Enriquez, C., Silva, R., & González-Leija, M. (2013). The role of fringing coral reefs on beach morphodynamics. *Geomorphology*, 198, 69-83.
- Díaz, J., Díaz-Pulido, G., Garzón-Ferreira, J., Geister, J., Sánchez, J., & Zea, A. (1996). *Atlas de los arrecifes coralinos del Caribe colombiano, I: complejos arrecifales oceánicos*. Santa Marta: INVEMAR.
- Díaz, J., Garzón - Ferreira, J., Geister, M., Lopez - Victoria, G., Ospina, F., Parra - Velandia, J., y otros. (2000). *Áreas coralinas de Colombia*. Santa Marta, Colombia.
- Done, T. (2011). Coral reef, definition. En D. Hopley, *Enciclopedia of Modern coral reefs. Structure, form and process* (pág. 261). Springer Science + Business Media.
- Escuela Naval Almirante Padilla. (2010). *Estabilización Geomorfológica de los cayos del archipiélago de San Andrés y Providencia*. Cartagena de Indias, Colombia.
- Fairbridge, R. (1950). Recent and Pleistocene coral reefs of Australia. *The Journal of Geology*, 330-401.
- Federal Geographic Data Committee. (2012). *Coastal and Marine Ecological Classification Standard*. Publication# FGDC-STD-018-2012.
- Finkl, C. (2011). Reef classification by Fairbridge (1950). En D. Hopley, *Encyclopedia of Modern Coral Reef. Structure, form and process* (págs. 846-850). Springer Science.
- Flood, P. (2011). Reef classification by Maxwell (1968). En D. Hopley, *Encyclopedia of modern coral reefs. Structure, form and process* (págs. 854-855). Springer.

- Floyd F & Sabins, J. (1996). *Remote sensing principles and interpretation* (Vol. 3). New York: Freeman.
- 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).
- Garzón-Ferreira, J., & Díaz, J. (2003). The Caribbean coral reefs of Colombia. *Latin America Coral Reefs. Elsevier Science*, 275-301.
- Geister, J., & Diaz, J. (2008). *Ambientes arrecifales y geología de un archipiélago oceánico: San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Mar Caribe*. Colombia: Ingeominas.
- Geoeye. (s.f.). *IKONOS*. Obtenido de <http://www.geoeye.com/products/imagery/ikonos/default.htm>
- Hopley, D. (1982). *The geomorphology of the Great Barrier Reef: Quaternary development of coral reefs*. John Wiley & Sons.
- Hopley, D. (2006). Coral reef. En M. Schwartz, *Encyclopedia of coastal science* (págs. 343-349). Springer Science & Business Media.
- Hopley, D. (2011). Coral reefs. En D. Hopley, *Encyclopedia of modern coral reefs* (págs. 343-349). Springer.
- Hsu, J. (2005). *Engineering Applications of Coastal Geomorphology*. Encyclopedia of Coastal Science. Springer.
- Huggett, R. (2007). *Fundamentals of geomorphology*. Routledge.
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives De Andreis" - INVEMAR. (2000). *Áreas coralinas de Colombia*. Santa Marta: Serie Publicaciones Especiales.

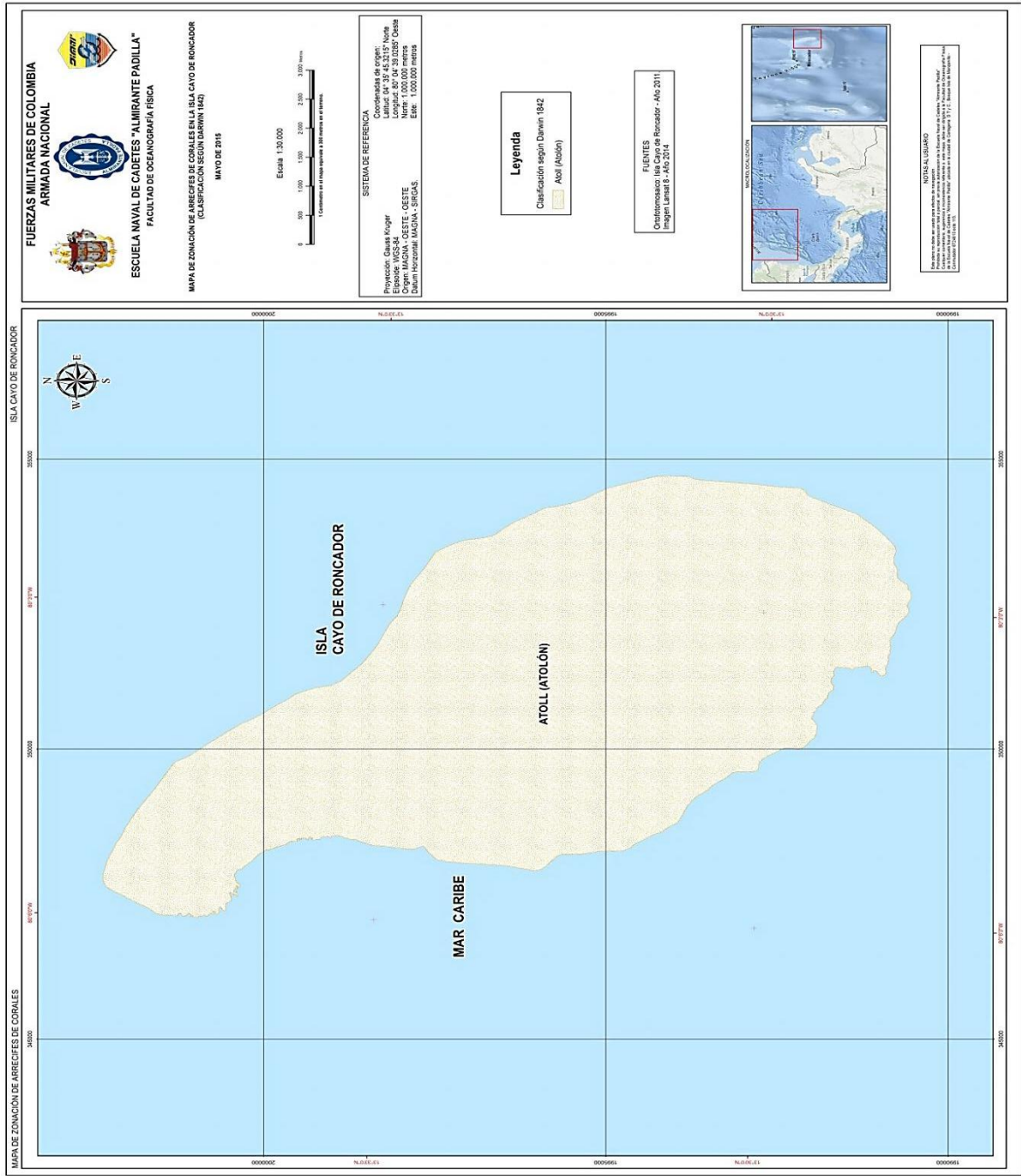
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2007). *Fundamentos físicos de teledetección*. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.
- Kench, P. (2014). Developments in coral reef and reef island geomorphology. *Geomorphology* (222), 1-2.
- Kennedy, D., & Woodroffe, C. D. (2002). Fringing reef growth and morphology: a review. *Earth-Science Reviews* 57, 255–277.
- Kjerfve, B. (1981). Tides of the Caribbean sea. *Journal of Geophysical Research*, 86, 4243-4247.
- Ladd, H. (1977). Types of coral reefs and distribution. En O. Jones, & R. Endean, *Biology and Geology of Coral Reefs* (Vol. 4, pág. 8). Academic Press, INC.
- MacNeil, F. (1954). Organic reefs and banks and associated detrital sediments. 252.
- Mantilla, S. (2009). La disputa colombo nicaragüense por San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Universidad Nacional de Colombia, Sede Caribe, Instituto de Estudios Caribeños. *memorias del foro internacional, Fronteras en el Caribe* (No. 12). Universidad Nacional de Colombia, Sede Caribe, Instituto de Estudios Caribeños.
- Maxwell, W. G. (1968). *Atlas of the great barrier reef*. Amsterdam: Elsevier.
- Milliman, J. (1973). *Caribbean coral reefs. Biology and geology of coral reefs* (Vol. 1).
- 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.
- Morales, R. (2004). Clasificación e identificación de las componentes de marea del Caribe colombiano. En ENAP, *Estabilización Geomorfológica de los cayos del archipiélago de San Andrés y Providencia*. (pág. 40). Cartagena de Indias, Colombia.

- Mumby, P., Green, E., Edwards, A., & Clark, C. (2005). *Remote Sensing: Handbook for Tropical Coastal Management*. UNESCO Publishing.
- Naciones Unidas. (1982). *Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del mar*. Montego Bay, Jamaica.
- Newell, N., & Rigby, J. (1957). *Geological studies on the Great Bahama Bank*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogist, Special Publication.
- Osorio, A. F., Montoya, R. D., Mesa, J. C., & Bernal, G. R. (2009). Reconstrucción de cuarenta años de datos de oleaje en el mar Caribe colombiano empleando el modelo WWIII TM y diferentes fuentes de datos. *Bol. Cient. CIOH*, 27, 37-56.
- Presidencia de la República Colombia. (3 de 9 de 2013). Decreto 1946 de 2013. Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Presidencia de la Republica.
- Red Nacional de Teledetección. (2010). *Teledetección y medio ambiente*. Madrid: Centro de Ciencias Humanas y Sociales.
- Shepard, F. (1948). *Submarine Geology*. New York: Harper.
- Smithers, S. (2011). Fringing reefs. En D. Hopley, *Encyclopedia of Modern Coral Reefs* (págs. 426-445). Springer .
- Steers, J. A., & Stoddart, D. R. (1977). The origin of fringing reefs, barrier reefs, and atolls. En O. A. Jones, & R. Endean, *Biology and Geology of Coral Reefs* (págs. 21-57). New York: Academic Press INC.
- Stoddart, D. (1965). The shape of atolls. En *Marine Geology* (págs. 369-383).
- Stoddart, D. (1969). Ecology and morphology of recent coral. *Biological Review*, 433-498.
- Stumpf, R., Holderied, K., & Sinclair, M. (2003). *Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types (pp. 547–556)*.

- Tabares, N., Soltau, J., Díaz, J., David, D., & Landazabal, E. (2009). Características geomorfológicas del relieve submarino en el Caribe colombiano. En DIMAR-CIOH, *Geografía Submarina del Caribe Colombiano* (Vol. 4, pág. 150). Cartagena de Indias, Colombia: DIMAR, Serie Publicaciones Especiales CIOH.
- Tabares-Gaviria, N., Soltau, J. M., & Diaz, J. (1996). *Caracterización geomorfológica del sector suroccidental del Mar Caribe. Tomado en: Boletín Científico CIOH, No. 17, ISSN 0120-0542*. Cartagena de Indias: CIOH-DIMAR.
- Universidad de Chile. (2010). *La interpolación espacial y los modelos digitales de terreno (MDT)*. Universidad de Chile.
- Universidad del Norte. (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 de Indias: Universidad del Norte.
- Wiens, H. (1962). *Atoll environment and ecology*. New Haven: Yale University Press.
- Woodroffe, C., & Biribo, N. (2011). Atolls. En D. Hopley, *Encyclopedia of Modern Coral Reefs: Structure, Form and Process* (págs. 51-71).
- Xu, J., & Zhao, D. (2014). Review of coral reef ecosystem remote sensing. *Acta ecológica sinica*, 34 (1), (págs. 19-25).
- Yamano, H., Shimazaki, H., Matsunaga, T., Ishoda, A., McClennen, C., Yokoki, H., y otros. (2006). *Evaluation of various satellite sensors for waterline extraction in a coral reef environment: Majuro Atoll, Marshall Islands*, 398–411.

ANEXOS

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



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



Anexo C. Mapa de zonación de arrecife de coral en la Isla Cayo de Roncador, de acuerdo la clasificación según Hopley de 2011.

