

ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO DE LA ISLA CAYOS DE SERRANA Y LA ISLA
CAYOS DE SERRANILLA CON BASE EN DATOS LIDAR E IMÁGENES DE
SENSORES REMOTOS

Teniente de Fragata BARON VARGAS JORGE ÁNDRES

Teniente de Fragata PAUWELS ROMERO STEPHANIE

ESCUELA NAVAL DE CADETES “ALMIRANTE PADILLA”

FACULTAD DE OCEANOGRAFIA FISICA

PROGRAMA DE OCEANOGRAFÍA FÍSICA

CARTAGENA DE INDIAS D.T Y C

2015

ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO DE LA ISLA CAYOS DE SERRANA Y LA ISLA
CAYOS DE SERRANILLA CON BASE EN DATOS LIDAR E IMÁGENES DE
SENSORES REMOTOS

Trabajo de grado para optar al título de Oceanógrafo Físico

TFESP BARON VARGAS JORGE ANDRES

TFESP PAUWELS ROMERO STEPHANIE

DIRECTOR:

MSc. Andrés Fernando Orejarena Rondón

ESCUELA NAVAL DE CADETES “ALMIRANTE PADILLA”

FACULTAD DE OCEANOGRAFIA FÍSICA

PROGRAMA DE OCEANOGRAFÍA FÍSICA

CARTAGENA DE INDIAS D.T Y C

2015

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Escuela Naval “Almirante Padilla” para optar el título de Oceanógrafo Físico.

Jurado

Jurado

Cartagena de Indias D.T. y C., Julio de 2015

Dedicatoria.

A Dios Todopoderoso, a Sergio Iván Rueda Forero, mi esposo, quien durante este periodo me acompañó de manera incondicional, con su ejemplo y sabiduría me ayudo a cumplir esta gran meta propuesta. A mis padres Nubia y Jorge, mis hermanos Carlos e Ivonne quienes con su apoyo y guía me han impulsado también, a cumplir este gran sueño.

Stephanie

Dedicatoria.

Primero quiero dedicarle este trabajo a Dios, por haberme guiado y no haberme dejado desfallecer, a mis padres Jorge y Claudia, mis hermanos Nicolás y Sofía, quienes me apoyaron y motivaron en todo momento para poder llevar a cabo este importante trabajo, cumpliendo este sueño, con el cual alcanzo un nuevo logro, terminando un ciclo más en mi vida profesional. Infinitas gracias.

Jorge Andrés

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a las personas que con su motivación, aportes y tiempo dedicado a nuestra orientación y apoyo hicieron posible el desarrollo de este trabajo.

Primero agradecemos a Dios, por habernos guiado y no dejarnos desfallecer.

A nuestros padres y hermanos, quienes nos apoyaron y motivaron en todo momento para poder llevar a cabo este importante trabajo.

Al Señor Teniente de Navío Sergio Iván Rueda Forero, quien nos apoyó incondicionalmente con su experiencia, dedicación y consejos.

Al señor Capitán de Fragata Hermann León, MSc Fernando Afanador y MSc Andrés Orejarena, quienes aportaron su conocimiento, tiempo y disposición, orientándonos hasta la culminación de nuestro trabajo.

A la Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”, la Facultad de Oceanografía Física y a los docentes del programa académico, quienes con su trabajo silencioso, nos permitieron en este tiempo, terminar las materias y cumplir con todos los requisitos para subir este nuevo peldaño en nuestras vidas profesionales.

Finalmente a nuestros amigos y compañeros de curso, quienes nos acompañaron incondicionalmente, durante las horas dedicadas a nuestro trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
2.1 Antecedentes del problema.....	7
2.2 Descripción general del problema	7
2.3 Formulación del problema.....	8
3. JUSTIFICACIÓN.....	9
4. OBJETIVOS.....	10
4.1 Objetivo general.....	10
4.2 Objetivos específicos	10
5. ÁREA DE ESTUDIO	12
5.1 Condiciones climáticas generales	12
5.2 Corrientes en el Mar Caribe colombiano	14
5.3 Oleaje en en el Mar Caribe colombiano	16
5.4 Mareas en el Mar Caribe colombiano.....	17
5.5 Descripción del área de estudio	19
5.6 Isla Cayos de Serrana.....	22
5.6.1 Características hidrodinámicas.....	23
5.6.2 Características morfodinámicas.....	27

5.7	Isla Cayos de Serranilla	30
5.7.1	Características hidrodinámicas.....	31
5.7.2	Características morfodinámicas.....	35
6.	MARCO TEÓRICO.	37
6.1	Clasificación básica de arrecifes por Charles Darwin (1842).....	40
6.1.1	Arrecife franjeante (Fringing reef).....	42
6.1.2	Arrecifes de barrera (Barrier reef).....	42
6.1.3	Arrecife de atolón (Atoll reefs).....	43
6.2	Clasificación por Wiens (1962).....	44
6.2.1	Outer reef (Arrecife exterior).....	44
6.2.2	Reef Rim (Arrecife de borde).....	45
6.2.3	Lagoons (Lagunas).....	45
6.3	Clasificación por Hopley (2006).....	46
6.3.1	Pendiente frontal de arrecife (Fore reef slope).....	47
6.3.2	Cresta del arrecife (Reef crest).....	47
6.3.3	Planicie arrecifal externa (Outer reef flat).....	47
6.3.4	Cresta de algas (Algal crest).....	47
6.3.5	Zona detrítica (Ditrital zone).....	48
6.3.6	Planicie arrecifal interna (The inner reef flat).....	48
6.3.7	Zona de arrecife posterior (Back reef zone).....	48
6.3.8	Laguna (Lagoons).....	48
6.3.9	Pendiente arrecifal de sotavento (Leeward reef slope).....	48
6.4	Otras clasificaciones de arrecifes.....	49
6.4.1	Clasificación según Fairbridge (1950).....	49
6.4.2	Clasificación por Maxwell (1968).....	52
6.5	Sensores remotos.....	52
6.6	La fotointerpretación.....	55

7. METODOLOGÍA PROPUESTA	61
7.1 Recopilación de información	62
7.2 Procesamiento de la información	67
7.2.1 Isla Cayos de Serrana	67
7.2.2 Isla Cayos de Serranilla.....	82
7.2.3 Generación de la base de datos geográfica (Geodatabase).....	87
7.2.4 Generación de cartografía geomorfológica digital e impresa.	88
7.2.5 Generación de metadatos:	89
8. RESULTADOS	90
8.1 Resultados Isla Cayos de Serrana	90
8.1.1 Clasificación según Darwin (1842)	90
8.1.2 Clasificación según Wiens (1962).....	91
8.1.3 Clasificación según Hopley (2006).	92
8.2 Resultados Isla Cayos de Serranilla.....	95
8.2.1 Clasificación según Darwin (1842).	95
8.2.2 Clasificación según Wiens (1962).....	96
8.2.3 Clasificación según Hopley (2006).	97
9. CONCLUSIONES	100
10. ANEXOS	103
BIBLIOGRAFÍA	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva espectral de diferentes bentos de arrecifes.	4
Figura 2. Posición de la Zona de Convergencia Intertropical en el Caribe	13
Figura 3. Corrientes superficiales del Caribe (El área de estudio representada por el círculo rojo).	15
Figura 4. Nivel relativo del mar en San Andrés y Bajo Nuevo.	18
Figura 5. Área general del Mar Caribe	19
Figura 6. Posición geográfica de la Isla Cayos de Serrana	23
Figura 7 A) Curva de probabilidad acumulada para el régimen medio del nivel del mar en Banco Serrana. B) Régimen de nivel del mar para Banco Serrana – Distribución Weibull de mínimos	24
Figura 8. Régimen extremal del nivel de marea en Banco Serrana.....	26
Figura 9. Imagen satelital Ikonos-2 pancromática de Cayo Serrana, con la línea de costa de 2009 en color rojo, con los frentes de oleaje característicos resaltados.	27
Figura 10. Evolución línea de costa de la Isla Cayos de Serrana desde 1984 hasta 2009.	28

Figura 11. Posición geográfica de la Isla Cayos de Serranilla.....	31
Figura 12. A. Curva de probabilidad acumulada para el régimen medio del nivel del mar en Serranilla, B. Régimen del nivel del mar para Serranilla.....	32
Figura 13. Régimen extremal de nivel de marea en la Isla Cayos de Serranilla. ...	34
Figura 14. Evolución línea de costa de la Isla Cayos de Serranilla.	36
Figura 15. Clasificación de arrecifes según Darwin (1842).....	41
Figura 16. Clasificación según Darwin 1842, A. Arrecife franjeante, B. Arrecife de barrera y C. Arrecife de atolón.	43
Figura 17. Clasificación de atolones según Wiens 1962 en (Hopley D. , 2011)....	44
Figura 18. Esquema de la Clasificación morfológica superficial de atolones según Wiens 1962.	45
Figura 19. Clasificación según Hopley.	46
Figura 20. Diagrama de clasificación por Hopley 2006.	49
Figura 21. Clasificación Morfológica de arrecifes según Fairbridge.....	50
Figura 22. Diseño metodológico.....	61

Figura 23. A. Ortofotomosaico desplegado en ArcMap sin tratamiento digital, B Ortofotomosaico con ajuste de 40% en contraste. Obsérvese la zonación de corales más definida.	68
Figura 24. Imagen Landsat 8 de Serrana en Banda 2 con 5% de ajuste en contraste.	69
Figura 25. A. Visualización del archivo LAS Dataset en LAS Classification code. B. Archivo TIN a partir del Shape File de contorno creado con los LAS Dataset.	70
Figura 26. TIN de batimetría resultante de la transformación de las isobatas suministradas por el IGAC.	71
Figura 27 A. Isla Serrana vista desde el Ortofotomosaico, B. , Isla Serrana en LAS Classification code, C. Superposición de los datos LAS Dataset y el Ortofotomosaico, empleando la opción swipe para completar la interpretación	74
Figura 28 Ortofotomosaico. Islas y cayos de arena identificados en el área de estudio 1. Isla Serrana, 2. Islas del sur. 3. Isla Sur Este 4. Isla del Norte.	75
Figura 29 Raster a partir de LAS Dataset. Islas y cayos de arena identificados en el área de estudio 1. Isla Serrana, 2. Islas del sur. 3. Isla Sur Este 4. Isla del Norte.	76

Figura 30. TIN a partir de LAS Dataset. Islas y cayos de arena identificados en el área de estudio 1. Isla Serrana, 2. Islas del sur. 3. Isla Sur Este 4. Isla del Norte.	77
Figura 31. Ampliaciones de las Islas y Cayos identificadas en el Ortofotomosaico, comparación entre los archivos Raster y TIN resultante de los datos LiDAR.	78
Figura 32 Perfil del transepto que pasa por la laguna del atolón de Serrana.	79
Figura 33. Shape File.shp con entidades tipo polígono con su respectiva topología acuerdo clasificaciones establecidas para la Isla Cayos de Serrana A. Clasificación según Darwin, B. Clasificación según Wiens, C. Clasificación según Hopley.	81
Figura 34. Imagen Landsat 8 en Banda 2 de la Isla Cayos de Serrana.	83
Figura 35 Modelo digital batimétrico Isla Cayos de Serranilla	84
Figura 36. Mosaico de 148 imágenes raster (Ortofotografías) de la Isla Cayos de Serranilla.	85
Figura 37. Shape File.shp con entidades tipo polígono Isla Cayos de Serranilla con su respectiva topología acuerdo clasificaciones establecidas A. Clasificación según Darwin, B. Clasificación según Wien, C. Clasificación según Hopley.	86
Figura 38 Diagrama de la Geodatabase generada para las áreas de estudio.	88

Figura 39. Clasificación de la Isla cayos de Serrana de acuerdo con la clasificación de Darwin 1842.	90
Figura 40. Clasificación de la Isla cayos de Serrana de acuerdo con la clasificación de Wiens de 1962.	92
Figura 41. Clasificación de la Isla cayos de Serrana de acuerdo con la clasificación de Hopley de 2006.	94
Figura 42. Clasificación de la Isla cayos de Serranilla de acuerdo con la clasificación de Darwin de 1842.	95
Figura 43. Clasificación de la Isla cayos de Serranilla de acuerdo con la clasificación de Wiens de 1962.	96
Figura 44. Clasificación de la Isla cayos de Serranilla de acuerdo con la clasificación de Hopley de 2006.	98

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Dirección predominante (frecuencia en porcentaje (%)) del viento y oleaje en aguas del Caribe colombiano</i>	17
Tabla 2 Tabla con las opciones tecnológicas disponibles para la Isla Cayos de Serrana e Isla Cayos de Serranilla.....	62
Tabla 3. Tabla de decisión para la selección de fuentes cartográficas en la Isla Cayos de Serrana..	64
Tabla 4. Tabla de decisión para la selección de fuentes cartográficas en la Isla Cayos de Serranilla.....	64
Tabla 5. Datos e imágenes disponibles para la Isla Cayos de Serrana.	64
Tabla 6. Datos e imágenes disponibles para la Isla Cayos de Serranilla.	65
Tabla 7. Listado de investigaciones recopiladas para el área de estudio.....	66
Tabla 8. Ejemplo tabla de atributos asociados utilizados en la zonación de corales en el área de estudio.....	80
Tabla 9. Área total de la zona para la clasificación según Darwin 1842.....	91
Tabla 10. Áreas totales de las zonas para la clasificación según Wiens.....	92
Tabla 11. Áreas totales de las zonas para la clasificación según Hopley	94

Tabla 12. Área total de la zona para la clasificación según Darwin de 1842.....95

Tabla 13. Áreas totales de las zonas para la clasificación según Wiens.....97

Tabla 14. Áreas totales de las zonas dentro de la clasificación según Hopley98

GLOSARIO

AEROFOTOGRAFIAS: Fotografía tomada desde una plataforma aérea o espacial para fines militares, cartográficos o científicos.

ARRECIFE: Estructura rocosa generalmente coralina, la cual emerge sobre el nivel del mar o se encuentra a poca profundidad. Representa un peligro para la navegación.

BAJAMAR: Nivel mínimo alcanzado por una marea vaciante en un día cualquiera.

BANCO (SHOAL): Accidente del fondo constituido por materiales no consolidados que representan un peligro para la navegación de superficie.

CAYO: Extensión de tierra rasa rodeada de agua marina, que se encuentra por arriba del nivel de la pleamar máxima, derivado de la acumulación de materiales no consolidados de naturaleza calcárea, de textura rocosa o arenosa, con una cubierta vegetal tropical permanente, que se desarrolla en las aguas cálidas del Mar Caribe y cuya dinámica de formación está estrechamente ligada a los sistemas de arrecifes coralinos.

GEOREFERENCIACIÓN: Proceso de asignar coordenadas cartográficas a los datos de una imagen.

IMAGEN SATELITAL: Representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial.

ISLA: Una isla es una extensión natural de tierra, rodeada de agua, que se encuentra sobre el nivel de ésta en pleamar.

LINEAS BASE: La línea de base normal es el elemento básico a partir del cual se determina el mar territorial y otras zonas marítimas, y se define como la línea de bajamar

a lo largo de la costa, tal como aparece marcada en cartas a gran escala del Estado ribereño.

ORTOFOTOGRAFIA: Representación fotográfica de una zona de la superficie terrestre, en la que todos los elementos se presentan en la misma escala, libre de errores y deformaciones, con la misma validez de un plano cartográfico. Una Ortofotografía se consigue mediante un conjunto de imágenes aéreas (tomadas desde un avión o satélite) que han sido corregidas digitalmente para representar una proyección ortogonal sin efectos de perspectiva, y en la que por lo tanto es posible realizar mediciones exactas.

RESOLUCIÓN ESPACIAL: La resolución espacial se refiere al nivel de detalles visibles en una imagen: cuanto menor es el área terrestre representada por cada píxel en una imagen digital mayores son los detalles que pueden ser captados y mayor es la resolución espacial.

SENSORES REMOTOS: Los sensores remotos o teledetección, son una técnica que detectan a la distancia, fotografías, e imágenes de registros eléctricos, magnéticos, perfiles, las características físicas o biológicas de los objetos. Los elementos que constituyen la superficie terrestre como rocas, suelos, vegetación, agua, etc., así como los de origen antrópico (construcciones urbanas, vías.), absorben, reflejan o emiten una cantidad de energía que depende de la longitud de onda, y de la intensidad del rayo electromagnético, las características de absorción de los objetos y la orientación de los objetos respecto al sol o el origen del rayo incidente. El principio de los sensores remotos está basado sobre la noción del espectro electromagnético.

SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRAFICA: Un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, en inglés (Geographic Information System)) es una integración de hardware, software y de datos geográficos diseñado para capturar,

almacenar, manipular, analizar y desplegar la información geográficamente para resolver problemas.

SISTEMAS DE PROYECCIÓN CARTOGRAFICO: Es cualquier sistema diseñado para representar la superficie de una esfera o de un esferoide (tal como la Tierra) sobre un plano.

TELEDETECCIÓN: Consiste en utilizar las radiaciones en el intervalo del ultravioleta y las microondas. Aquí se captan las variaciones de absorción, emisión o reflexión de los objetos de la superficie o próximos a ésta y permite una restitución bajo la forma de un producto fotográfico a partir de un registro digital.

ZONA COSTERA: Se define como la zona de transición donde la tierra se encuentra con el agua, región directamente influenciada por procesos hidrodinámicos marinos o lacustres, se extiende hacia afuera hasta el punto de quiebre de la plataforma continental y hacia adentro hasta el primer cambio mayor en la topografía por encima del alcance de las olas de tormentas.

RESUMEN

Las Islas del Caribe Colombiano, como lo son la Isla Cayos de Serrana y la Isla Cayos de Serranilla, ubicadas geográficamente al norte del Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, son islas coralinas de origen volcánico, las cuales se caracterizan por ser lugares geográficos de difícil acceso, debido a su posición geográfica y sus características morfológicas, dificultando la recolección de información y por ende, su estudio. Debido a la complejidad de los arrecifes de coral y las dificultades que se presentan al estudiar su geomorfología, éstos han sido unos de los primeros ecosistemas en obtener ventaja de las técnicas de sensoramiento remoto. Estas técnicas han sido utilizadas en diversos estudios de arrecifes de coral durante los últimos 50 años. En este trabajo de grado se realizó una clasificación geomorfológica de las Islas Cayos de Serrana y Serranilla, a través del tratamiento digital de imágenes con el empleo del software especializado (ArcGis 10.1), utilizando como fuente de información imágenes de sensores remotos (aéreas y satelitales), datos LiDAR y datos de batimetría, estableciendo como resultados del trabajo, tres mapas temáticos que describen su conformación y características geomorfológicas, los cuales se basaron en tres clasificaciones diferentes de zonas de coral (Darwin (1842), Wiens (1962) y Hopley (1982)), partiendo desde la clasificación más básica y general, hasta la más compleja y detallada respectivamente, las cuales fueron las que mejor se adaptaron y aplicaron para las áreas de estudio. La cartografía digital geomorfológica de detalle generada para la Isla Cayos de Serrana, fue en escala de 1:70000 y para la Isla Cayos de Serranilla en escala de 1:105000.

Palabras Claves: Isla, Serrana, Serranilla, Arrecifes de Coral, Geomorfología, Datos LiDAR, Sensores Remotos, Caribe colombiano.

1. INTRODUCCIÓN

Los arrecifes de Coral son los ecosistemas con la mayor productividad y abundancia de especies en el planeta, se caracterizan por ser zonas ecológicas claves, de especial valor para mantener la productividad de los recursos marinos y además, por ser un indicador importante del medio marino sano (Jingping & Dongzhi, 2014, pág. 19). Son también considerados ecosistemas bentónicos de gran arquitectura y complejidad, donde su rugosidad y forma son el principal parámetro que caracteriza la hidrodinámica de la zona donde se encuentran (Hearn, 2008, pág. 512) en (Ruiz de Alegria et al, 2013, pág 69).

La aparición y el desarrollo de tecnologías de sensoramiento remoto, ofrecen un nuevo camino para el monitoreo regional de los ecosistemas de arrecifes de coral, proporcionando una nueva forma de observación que permite caracterizar estos ecosistemas con mayor rapidez, observando un área relativamente grande, a lo largo del tiempo de forma repetitiva, convirtiéndose de esta forma en un importante medio complementario de los métodos de observación convencionales.

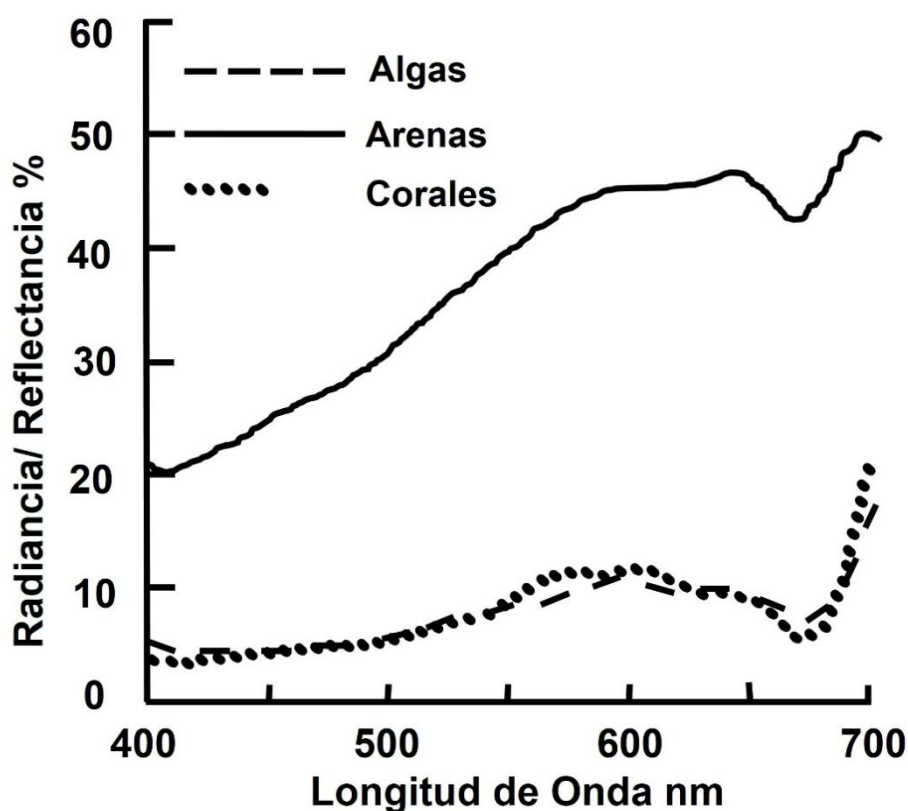
Dentro del sensoramiento remoto de los ecosistemas de arrecifes, se incluye la supervisión de propiedades ecológicas y ambientales, las cuales se llevan a cabo con el fin de obtener información sobre su distribución , su geomorfología, la composición bentónica del sustrato y la salud de los mismos, entre otras (Jingping & Dongzhi, 2014). Realizar la extracción de información usando la tecnología de sensores remotos sobre los arrecifes coralinos, requiere de técnicas basadas en análisis de imágenes y estadística, además de depender de las características espectrales de los diferentes sustratos bentónicos para su clasificación (Jingping & Dongzhi, 2014, pág. 19).

Por ejemplo, la fotografía aérea de color puede proporcionar ligeramente mayor información ecológica detallada en hábitats de arrecife, pero para propósitos generales de mapeo, la imagen satelital es más efectiva, puesto que tiene ligeramente mayor exactitud y se utiliza mucho menos tiempo de trabajo a baja altitud. 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, las restricciones de la altitud de la cobertura aérea de cada fotografía, limita este método y lo hace únicamente apropiado para áreas pequeñas (Green *et al.*,2000)

Por otro lado, 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, donde los corales y algas, contienen clorofila y otros pigmentos fotosintéticos de magnitud y forma espectral similar, la cual depende en gran medida de las características de absorción y fluorescencia de las diferentes composiciones de pigmentos (Jingping & Dongzhi, 2014, pág. 20).

En contraste, los valores de la curva espectral de la arena son más altos, sin embargo en todos los tipos de fondo, las curvas espectrales entre 600nm y 650 nm, se caracterizan por presentar un patrón grabado de doble alcance de su punto máximo, permitiendo utilizar la banda 2 del espectro electromagnético para resaltar estos patrones característicos, como se puede observar en la Figura 1 (Jingping & Dongzhi, 2014, pág. 20).

Figura 1. Curva espectral de diferentes bentos de arrecifes.



Fuente: (Jingping & Dongzhi, 2014, pág. 20).

Estas propiedades se utilizan principalmente para el mapeo de distribución de arrecifes y su geomorfología. Las zonas típicas incluyen el arrecife de borde, arrecife plano, laguna arrecifal, etc. Los arrecifes de coral se cubren generalmente con un gran número de corales y algas que tienen absorción selectiva de la luz, como se mencionó anteriormente. Las zonas geomorfológicas se distribuyen a menudo a diferentes profundidades, cubiertas de diferentes biomas. Como resultado de ello, la identificación efectiva de los arrecifes de coral y de su geomorfología, puede ser adquirida a partir del color, forma, textura y otras características de imágenes de sensores remotos (Jingping & Dongzhi, 2014).

Estudios como el desarrollado por Yamano *et al.*, 2006 en Majuro Atoll, capital de las islas Marshal, muestran el análisis a cinco bandas de diferentes sensores remotos, dentro de un estudio para la extracción de la línea de costa en ambientes de arrecife coralino. Se compararon diferentes regiones de longitud de onda (infrarrojo cercano [NIR] e infrarrojo de onda corta [SWIR]) y así mismo, diferentes resoluciones espaciales (4 m ,15 m y 30 m) llegando a la conclusión, de que el sensor remoto “TERRA-ASTER Banda 3”, es el más rentable (costo-precisión) para el mapeo y la extracción de la línea de costa en hábitats y ambientes de arrecifes de coral, teniendo en cuenta que la región de longitud de onda del Infrarrojo cercano es donde los arrecifes de coral presentaron mayor reflectancia y donde la precisión en la estimación de la línea de costa, está directamente relacionada con la resolución espacial del sensor.

En Colombia, se han llevado a cabo en los últimos años diversos estudios y publicaciones enfocados en los arrecifes de coral , tales como el trabajo realizado por Jaime Garzón Ferreira y Juan Manuel Díaz, denominado “*Los arrecifes de Coral en el Caribe Colombiano*” publicado en el año 1997, donde un grupo multidisciplinario de investigadores realizó una recopilación bibliográfica del área de estudio que data desde 1970, con el fin de posteriormente hacer un levantamiento general de las áreas de arrecifes de coral existentes en el territorio marítimo colombiano. Así mismo, en el año 2000, el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives De Andreis” (INVEMAR), desarrolló un trabajo denominado “Áreas Coralinas de Colombia” mediante el análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales , donde se identificaron algunas características geomorfológicas, biológicas y ecológicas de las Islas Cayos del Caribe Colombiano, incluyendo la Isla Cayos de Serrana. Sin embargo, se evidenció la necesidad de llevar a cabo por primera vez una caracterización geomorfológica de detalle de la Isla Cayos de Serranilla, así como una actualización de las características geomorfológicas de detalle de la Isla Cayos de Serrana, teniendo en cuenta la necesidad y gran importancia, de aportar nueva información que sirva para

demostrar ante entes internacionales la soberanía de los espacios marítimos colombianos.

El trabajo tiene como meta la elaboración de tres mapas temáticos geomorfológicos para cada una de las áreas de estudio (Isla cayos de Serrana e Isla cayos de Serranilla), que describan su conformación y características geomorfológicas, a partir de tres clasificaciones diferentes de zonas de coral (Darwin (1842), Wiens (1962) y Hopley (1982)), iniciando desde la clasificación más básica y general, hasta una más compleja y detallada, seleccionadas por ser las que mejor se adaptaron a las áreas de estudio.

Una vez realizada la distribución geomorfológica de cada una de las Islas Cayos en el presente estudio, se pretende dar esta herramienta a la Autoridad Marítima (DIMAR), con el propósito de aportar los resultados obtenidos a la defensa que presentará Colombia ante la Corte Internacional de Justicia dentro del juicio de delimitación de los espacios marítimos en disputa con Nicaragua.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Antecedentes del problema

La delimitación de los territorios insulares en el Mar Caribe Colombiano aún no ha sido determinada en forma definitiva, debido en parte a la confianza depositada del Gobierno Nacional en el tratado Esguerra– Bárcenas firmado en 1928 (Pantojas, 1928), 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 se delimita la plataforma continental y las zonas económicas exclusivas de la República de Nicaragua y la República de Colombia por líneas geodésicas, conectando los puntos con las coordenadas que se estipularon en el fallo, hasta que alcance el límite de 200 millas náuticas desde las líneas de base desde las cuales se mide el mar territorial de Nicaragua.

2.2 Descripción general del problema

De acuerdo con lo anterior Colombia requiere determinar la conformación geomorfológica de las Islas Cayos del Norte y generar su cartografía con base en argumentos técnicos debidamente sustentados, tales como información actualizada sobre las características geomorfológicas y oceanográficas del área de interés, las cuales son fundamentales para sustentar ante la Corte Internacional de Justicia el carácter de Islas Cayos, 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 actualizada y debidamente sustentada, Colombia buscará demostrar sus límites marítimos reales, con el fin de revertir el mencionado fallo.

2.3 Formulación del problema

Teniendo como punto de partida los antecedentes y la descripción general del problema presentado anteriormente, se formula el problema que se resolverá, en los siguientes términos:

¿Cuáles son las características geomorfológicas de la Isla Cayos de Serrana y la Isla Cayos de Serranilla?

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 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 para, de esta manera controvertir dicho fallo y mantener los límites marítimos actuales del país.

Por 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 requerida para establecer los puntos y líneas de base, y así sustentar ante los entes internacionales (Corte Internacional de Justicia) principalmente, el carácter de Islas de los Cayos del Norte, de acuerdo con los conceptos establecidos por la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (CONVEMAR) y los lineamientos técnicos de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI).

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

Adicionalmente, este trabajo de investigación se enmarca en la línea de investigación de Oceanografía Física, con un eje temático sobre la caracterización geomorfológica de la isla Cayos de Serrana y la isla Cayos de Serranilla mediante el estudio y procesamiento de imágenes aéreas, satelitales y datos LiDAR.

4. OBJETIVOS

Durante el año 2014, la Dirección General Marítima (DIMAR), en cooperación con la Universidad del Norte (UNINORTE) desarrolló el proyecto “***Determinación del Máximo y Mínimo Nivel del Mar Producido por Marea Astronómica en las Islas Cayos del Norte***”, teniendo en cuenta la necesidad del Estado colombiano de establecer una estrategia para la defensa de las pretensiones de países con fronteras marítimas limítrofes sobre el territorio nacional según lo establecido en la Constitución Política colombiana. El conocimiento y caracterización del territorio es fundamental para contribuir con este propósito por lo cual se planteó el presente trabajo.

4.1 Objetivo general

Realizar el análisis geomorfológico de detalle de la Isla Cayos de Serrana y la isla Cayos de Serranilla 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.

4.2 Objetivos específicos

- a. Describir la conformación geomorfológica de la Isla Cayos de Serrana y la isla Cayos de Serranilla.
- b. Establecer las características geomorfológicas de la Isla Cayos de Serrana y la isla Cayos de Serranilla a través del tratamiento digital de los datos LiDAR, Ortofotografías digitales e imágenes de sensores remotos y la utilización de modelos de clasificación de zonación de corales.

- c. Generar la cartografía digital geomorfológica de detalle (1:70000) de la Isla Cayos de Serrana y (1:105000) la isla Cayos de Serranilla como complemento para la determinación del máximo y mínimo nivel del mar producido por marea astronómica en las Islas Cayos del Norte.

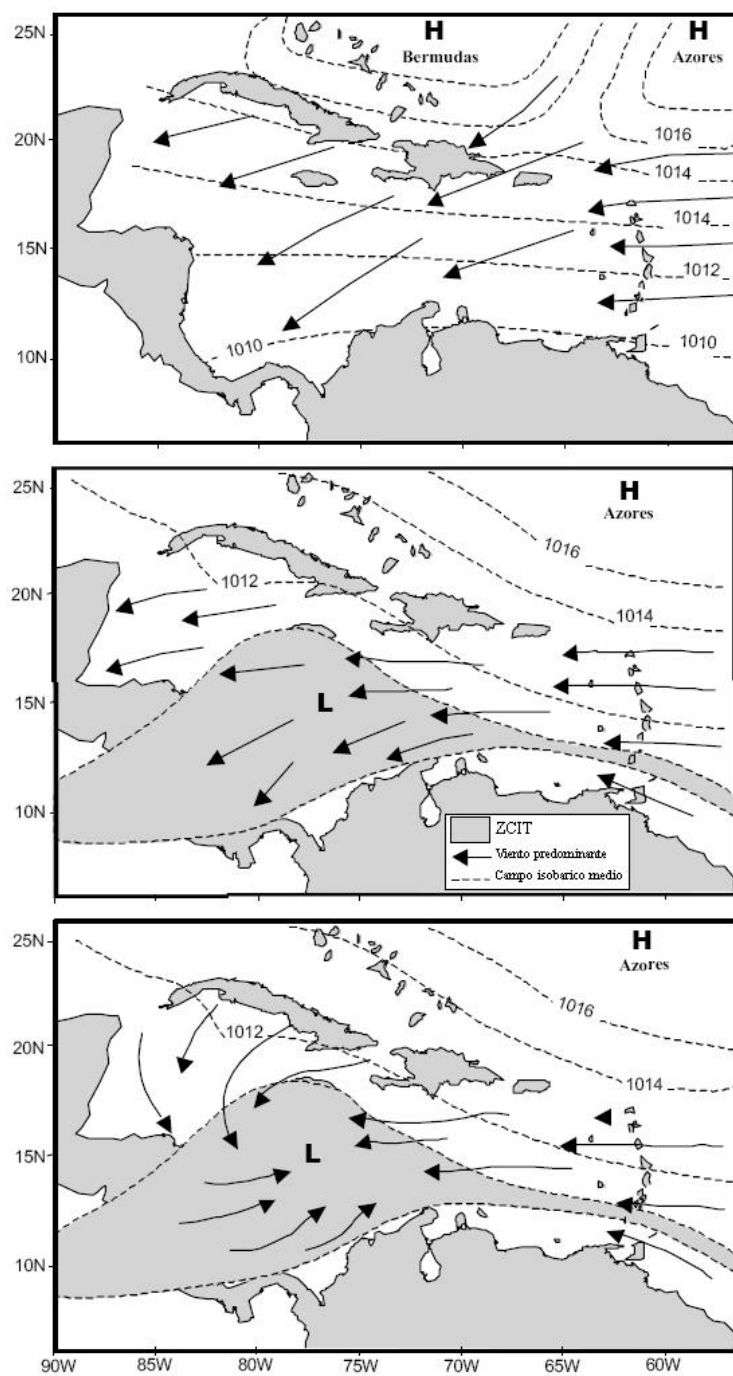
5. ÁREA DE ESTUDIO

5.1 Condiciones climáticas generales

El Caribe colombiano se encuentra en una zona de bajas latitudes donde predominan los vientos Alisios (vientos del norte y noroeste) y está influenciado por los desplazamientos norte- sur de la zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Figura 2.) y por la llegada del Sistema del Monzón Americano (el movimiento zonal de la estación lluviosa a lo largo del año) en los trópicos que causa variaciones en el ciclo anual de vientos y oleaje (Posada et al., 2008) en (Andrade, 2000) presentando un clima que se define como “tropical semiárido”, el cual se caracteriza por tener dos períodos climáticos anuales principales conocidos como época seca (verano) y época húmeda (invierno) y una época de transición conocida localmente como veranillo de San Juan, determinada por vientos uniformes que marcan el inicio de la temporada de huracanes (Olarte & Gómez , 2011). En general, la humedad promedio es del 90% y presenta un ciclo de lluvias mono modal que comienza en mayo, disminuyendo en los meses de junio y julio (época de transición) y se extiende hasta el mes de noviembre (Rueda , 2014).

Los vientos son principalmente del E-NE, con velocidades medias mensuales que varían desde 3,2 hasta 6,2 m / seg (Zambrano , 2010).

Figura 2. Posición de la Zona de Convergencia Intertropical en el Caribe



Fuente: (Andrade, 2000).

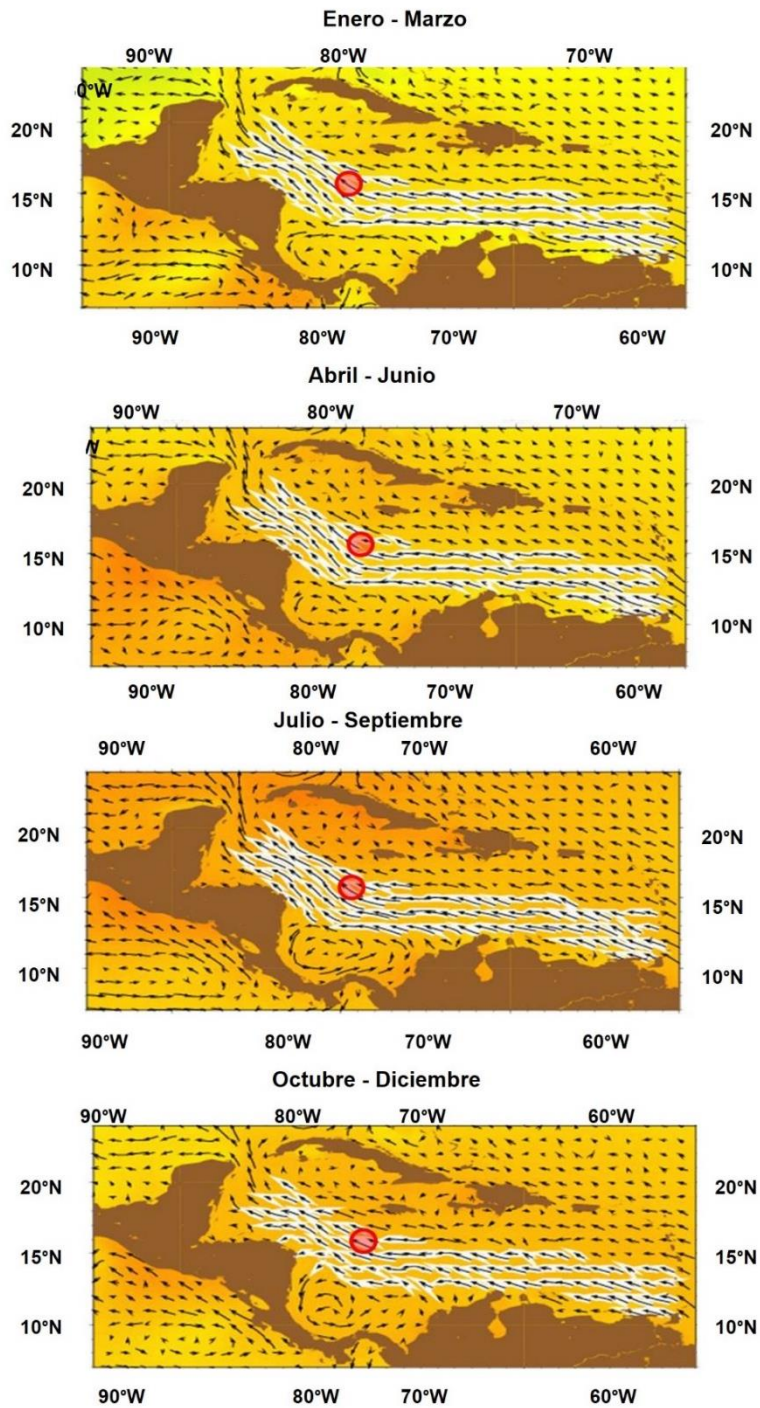
La temperatura del aire es uniforme a lo largo de todo el año; presenta valores de 26.7 °C, variaciones promedio de 1 grado en los valores mensuales; sin embargo, es afectado por el paso de ondas del este, ciclones tropicales y los efectos causados por frentes fríos del norte (Zambrano , 2010).

La pluviosidad en el área presenta un promedio multianual que se sitúa alrededor de 1850 mm, con una distribución mono modal con los periodos asociados a la posición de la zona de convergencia intertropical ya descritos. Suponiendo que la temporada de lluvias coincide con la de la parte continental, la mayoría de la lluvia cae de junio a diciembre (Zambrano , 2010).

5.2 Corrientes en el Mar Caribe colombiano

Las corrientes oceánicas superficiales en la Cuenca de Colombia están influenciadas por la Corriente del Caribe que fluye hacia el noroeste (Figura 3) hacia el Mar Caimán cuando confronta la Elevación Centroamericana. Al estar ubicado en un área bajo la influencia de los vientos alisios, las corrientes de agua superficial, tienen su origen en la confluencia de las corrientes no ecuatorial y sur ecuatorial del planeta (Zambrano , 2010). En temporada seca (diciembre –marzo) la corriente en el Caribe se orienta hacia el oeste con una velocidad promedio de 60-80 cm/s (Andrade, 2000); mientras que en la estación húmeda disminuye su intensidad y se hace variable su dirección a causa del desplazamiento de las masas de aire por la ubicación de la Zona de Convergencia Intertropical (Zambrano , 2010).

Figura 3. Corrientes superficiales del Caribe (El área de estudio representada por el círculo rojo).



Fuente: (Zambrano , 2010).

5.3 Oleaje en en el Mar Caribe colombiano

En el mar Caribe colombiano, se generan tres direcciones de oleaje dominantes a saber: El 99% de la dirección del oleaje corresponde a direcciones procedentes del Este y Noreste. En la zona de la Contracorriente Colombia se presenta un comportamiento físico similar, donde la dirección de la ola que prevalece es en un 94% del Noreste; y la tercera dirección predominante de oleaje corresponde en un 25% del Sureste (Tabla 1), con mayor frecuencia entre agosto y octubre (Rueda , 2014).

Según el análisis realizado por la Universidad de Cartagena (2010), la distribución espacial de la ola en el Caribe colombiano presenta alturas significativas entre 2 y 3 metros con períodos casi estacionarios de 7 a 8 segundos en los meses de enero a abril. Además, debido a la presencia de los vientos alisios y la intensidad de vientos locales durante la época antes mencionada, presenta valores entre 15 y 21 m/s. En el segundo semestre del año la altura significativa de la ola desciende a valores entre 0.6 y 1.9 metros así como su periodicidad que es de 6 a 7 segundos; lo anterior está asociado a la dirección norte a sur que toma la ZCIT en los meses de agosto – noviembre y por la influencia de la contracorriente de Panamá – Colombia.

Tabla 1. Dirección predominante (frecuencia en porcentaje (%)) del viento y oleaje en aguas del Caribe colombiano

Dirección	Mar Caribe (Mar Adentro)		Contracorriente de Colombia (Mar Caribe)	
	Viento	Oleaje	Viento	Oleaje
N	2	1	23	0
NE	71	51	38	94
E	46	48	3	1
SE	5	1	3	2
S	2	0	3	0
SW	2	0	18	25
W	1	0	4	0
NW	0	0	9	0

Fuente: Modificado de Universidad de Cartagena – IDEAM (2010)

5.4 Mareas en el Mar Caribe colombiano

Según (Wiedemann, 1973), quien realizó las primeras apreciaciones de las mareas en el Caribe, éstas 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 (Zambrano , 2010).

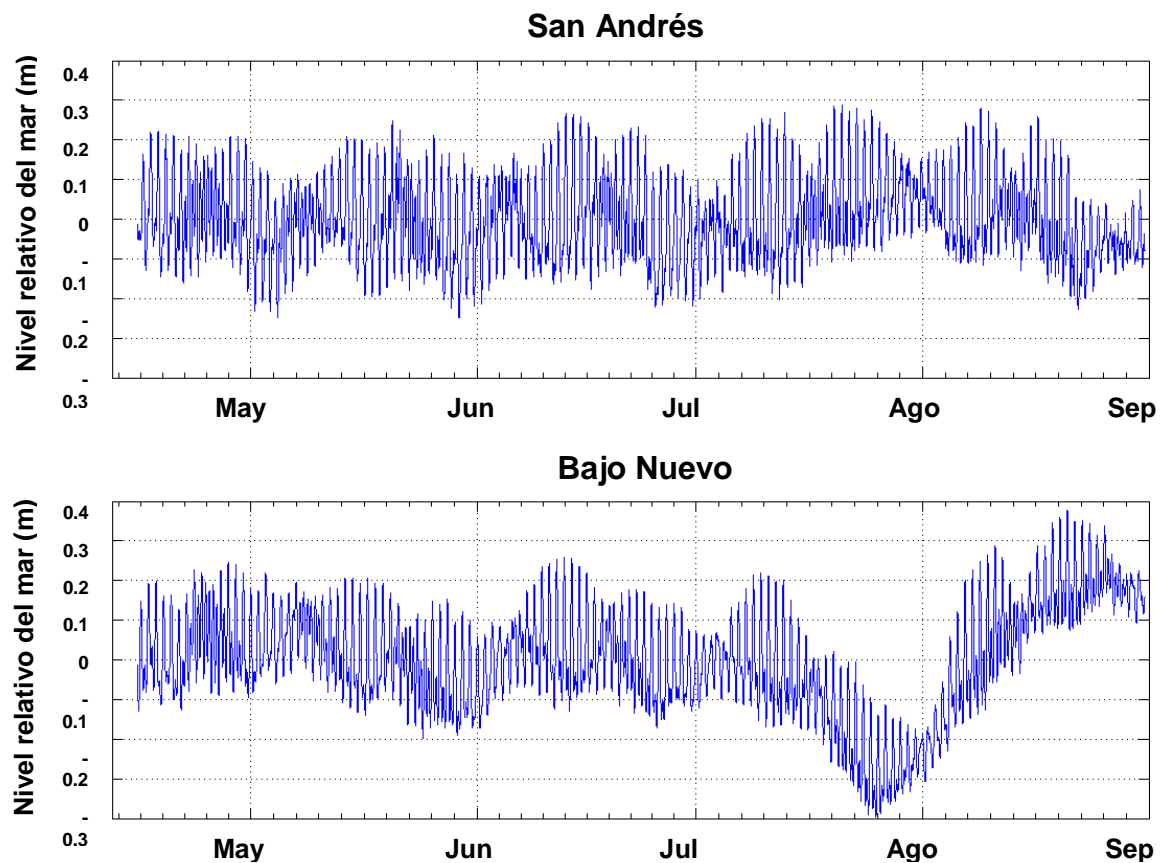
Otra referencia conocida se encuentra en (Kjerfve & Dinnel, 1983) el cual empleando información de varias estaciones de marea del Caribe, construyó cartas de marea empleando las componentes M2, S2, K1, N2, O1 y P1, determinando un rango micro mareal en la mayor parte de la cuenca Caribe menor a 20 cm.

Para el área de San Andrés, Providencia e Islas Cayos, la marea astronómica es mixta semidiurna con una amplitud de alrededor de 30 centímetros (ENAP, 2010). Además, existen anomalías del nivel del mar ocasionadas por la presión atmosférica y las condiciones conocidas como ondas de tormenta (storm surge), que tienen tanta o más amplitud en algunas ocasiones que la componente astronómica (ENAP,

2010), lo que sumado a las amplitudes de marea astronómica genera alturas del nivel del mar importantes en esta zona.

Por otro lado, de acuerdo con el estudio, (UNINORTE, 2014), para San Andrés, el registro instrumental mínimo del nivel del mar registrado fue -0.249 m; mientras que el máximo fue 0.2886 m, por lo que el rango de nivel relativo del mar es de 0.5376 m. El rango de variación del nivel relativo del mar fue mayor en Bajo Nuevo. El registro instrumental mínimo fue -0.3958 m, y el máximo fue 0.378 m cuyo rango de nivel relativo del mar de 0.7738 m (Figura 4). En ambos casos, las mayores variaciones del nivel relativo del mar se presentaron entre finales de julio y agosto.

Figura 4. Nivel relativo del mar en San Andrés y Bajo Nuevo.

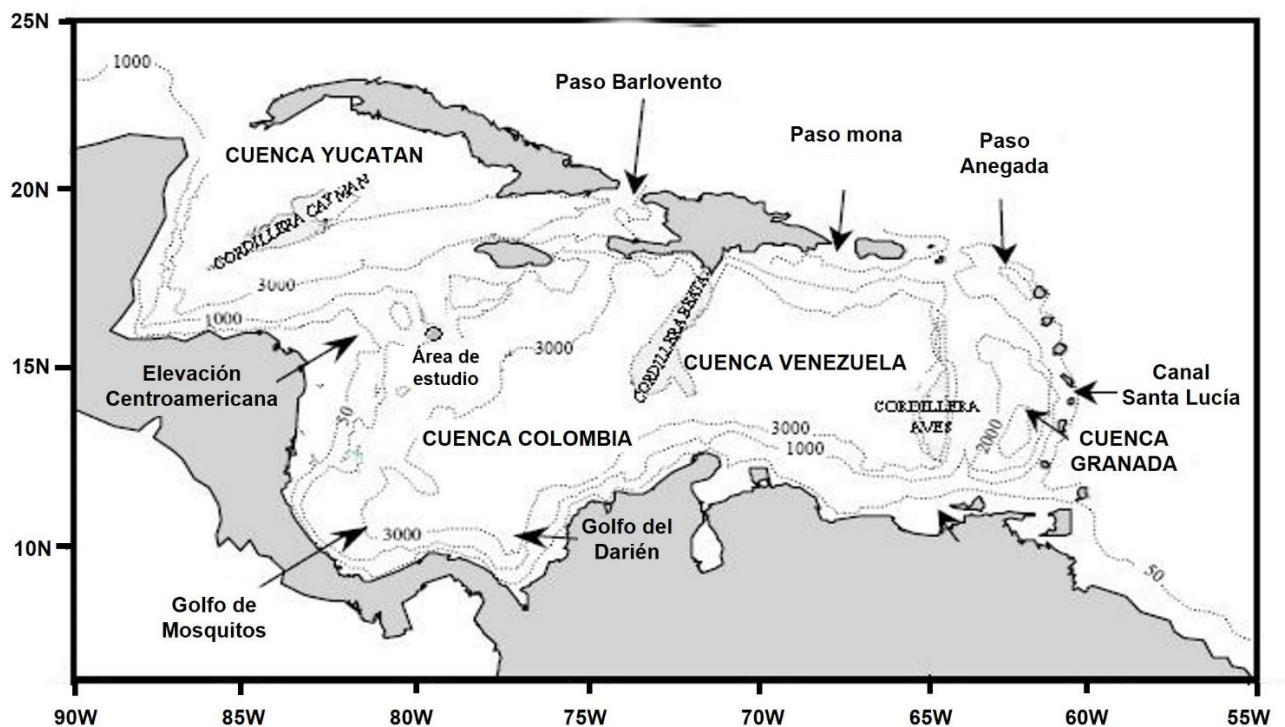


Fuente: (UNINORTE, 2014).

5.5 Descripción del área de estudio

El archipiélago de San Andrés y Providencia se ubica al noroeste de Colombia sobre el Mar Caribe, entre los paralelos 12° y 16° latitud norte, y los meridianos 78° y 82° longitud oeste de Greenwich, al Noroeste de la Cuenca Colombia (Figura 5). Este se encuentra conformado por dos islas oceánicas altas y permanentes y una plataforma de atolones, bancos de coral y bajos alineados en una dirección de NNE (Molares, 2004) que comprenden un área de 3300 Km² y emergen de una profundidad de 1500 m (Zambrano , 2010).

Figura 5. Área general del Mar Caribe



Fuente: Adaptada de (Andrade, 2000) Circulación y Variabilidad de la Cuenca de Colombia en el Mar Caribe.

El archipiélago hace parte de la placa Caribe, la cual está limitada por las placas de Norte América, Suramérica, Nazca y Cocos, conformando un sistema tectónico complejo donde se generan movimientos y esfuerzos de compresión y extensión, los cuales han actuado a través del tiempo (no antes del periodo Triásico) (Tabares et al., 1996). El área más afectada por estos esfuerzos es el talud continental de Panamá y Colombia, ya que es el lugar donde hay subducción y desplazamiento hacia el NE de la placa Caribe con respecto al continente, resultando en un frente de deformación generado como consecuencia del enfrentamiento entre las placas Caribe y Suramérica (Tabares et al., 1996).

La placa Caribe, reconocida mundialmente por presentar todo tipo de geoformas, tales como cordilleras, amplios abanicos, montes submarinos y pequeñas colinas, valles y cañones, cuenta con el mayor accidente geomorfológico que es la cuenca Colombiana, la cual es una gran receptora de sedimentos y que a su vez contiene algunos de los rasgos mencionados (Tabares et al., 1996).

Este es el único departamento de Colombia conformado por islas, atolones e islotes sobre una plataforma volcánica del occidente del mar de las Antillas, donde se encuentra uno de los sistemas arrecifales más productivos del Caribe (ENAP, 2010), los cuales pertenecen a Colombia por herencia histórica en virtud del principio *utti possidetis juris*, desde 1803, cuando el rey de España otorgó al Virreinato de Santa Fe o Nueva Granada (del cual Colombia es sucesor), las islas de San Andrés y la costa de Mosquitos, desde el Cabo Gracias a Dios hasta el río Chagres (ENAP, 2010).

El esquema tectónico regional del fondo marino se caracteriza por zonas de fractura, siendo la más conspicua la fractura de San Andrés. Todas las islas, atolones y bancos coralinos del archipiélago se originaron aparentemente a partir de volcanes dispuestos a lo largo de fracturas tectónicas de la corteza submarina, orientadas predominantemente hacia el NNE y el SW (ENAP, 2010).

Las islas cayos de Serrana y Serranilla objetos del presente estudio, se encuentran ubicadas al NNE en el sector de los bancos y cayos de la cuenca colombiana, la cual conforma un conjunto de geformas (mesetas, valles, planicies y depresiones) que se caracteriza por presentar formas más amplias y contornos circulares, los cuales comienzan con una plataforma amplia que tiene una amplitud de 149,67 km en el sector norte y 69,20 km hacia el sur, extendiéndose hasta los 200 m de profundidad donde se presenta un marcado cambio en la pendiente para dar paso al talud continental, el cual se prolonga a profundidades mayores de 1000 m de profundidad (Tabares et al., 1996).

5.6 Isla Cayos de Serrana

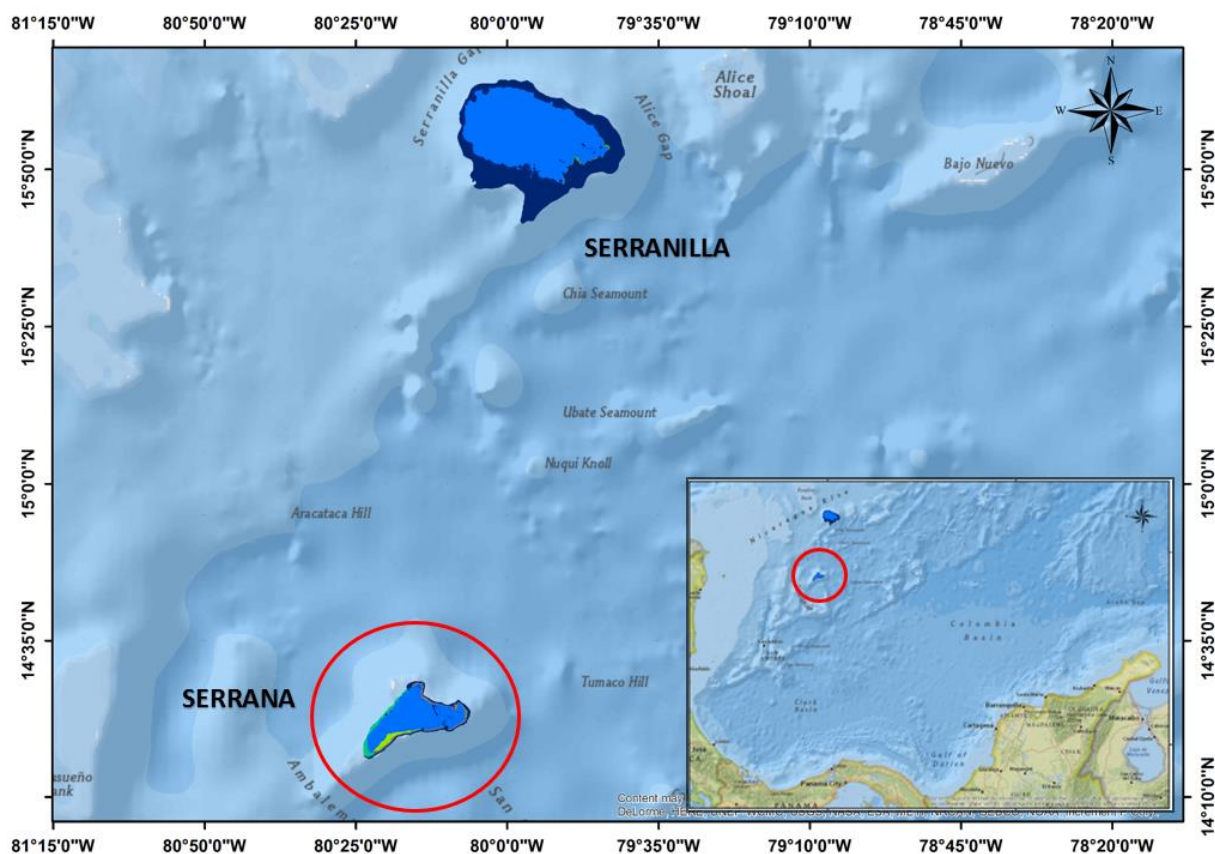
La Isla Cayos de Serrana ($14^{\circ} 23'N$; $80^{\circ} 14'W$) está localizada a 143 Km al noreste de Providencia y 70 Km al Este del Banco Quitasueño (Figura 6). Mide aproximadamente 15,5 Km en dirección SW-NE y 33,4 Km en sentido W-N, hasta la isobata de 30 metros (ENAP, 2010). Es el cayo principal del Banco de Serrana, localizado cerca del extremo suroeste del arrecife periférico, del cual también hacen parte otros 6 cayos pequeños que no sobrepasan los 100 m² (Díaz, 2010, pág. 121). En la Isla cayos de Serrana se presentan siete porciones de tierra emergida; sin embargo, una de ellas es de mayores proporciones, la cual se encuentra hacia el norte ($14^{\circ} 16'N$, $80^{\circ} 23' W$), siendo la única que presenta vegetación arbustiva (ENAP, 2010).

Según (García, 2003, pág. 59), Banco Serrana es un extenso banco de forma triangular - ameboide, originado a partir de un atolón, el cual mide aproximadamente 37 Km en dirección oeste-suroeste y 30 Km en sentido Sur-Oeste - Nor-Este. En él se encuentra un arrecife periférico bien desarrollado, de más de 50 km de longitud; el banco encierra por el norte, este y sur, una enorme cuenca lagunar que está comunicada por el oeste con el mar abierto por una amplia abertura. Alrededor del Banco Serrana se encuentra una de las barreras arrecifales más largas del país (50 kilómetros) (Díaz, 2010).

La Isla Cayos de Serrana hace memoria a Pedro Serrana, único sobreviviente de un galeón español que naufragó allí hacía 1520, y permanecido por espacio de siete años en el Cayo antes de ser rescatado por un navío inglés (ENAP, 2010).

Actualmente el Cayo se encuentra habitado por el personal de Infantería de Marina de Colombia de manera permanente. Sus dimensiones aproximadas son alrededor de 1,5 km de largo por ochocientos metros (800 m) de ancho, con vegetación arbustiva densa (ENAP, 2010).

Figura 6. Posición geográfica de la Isla Cayos de Serrana



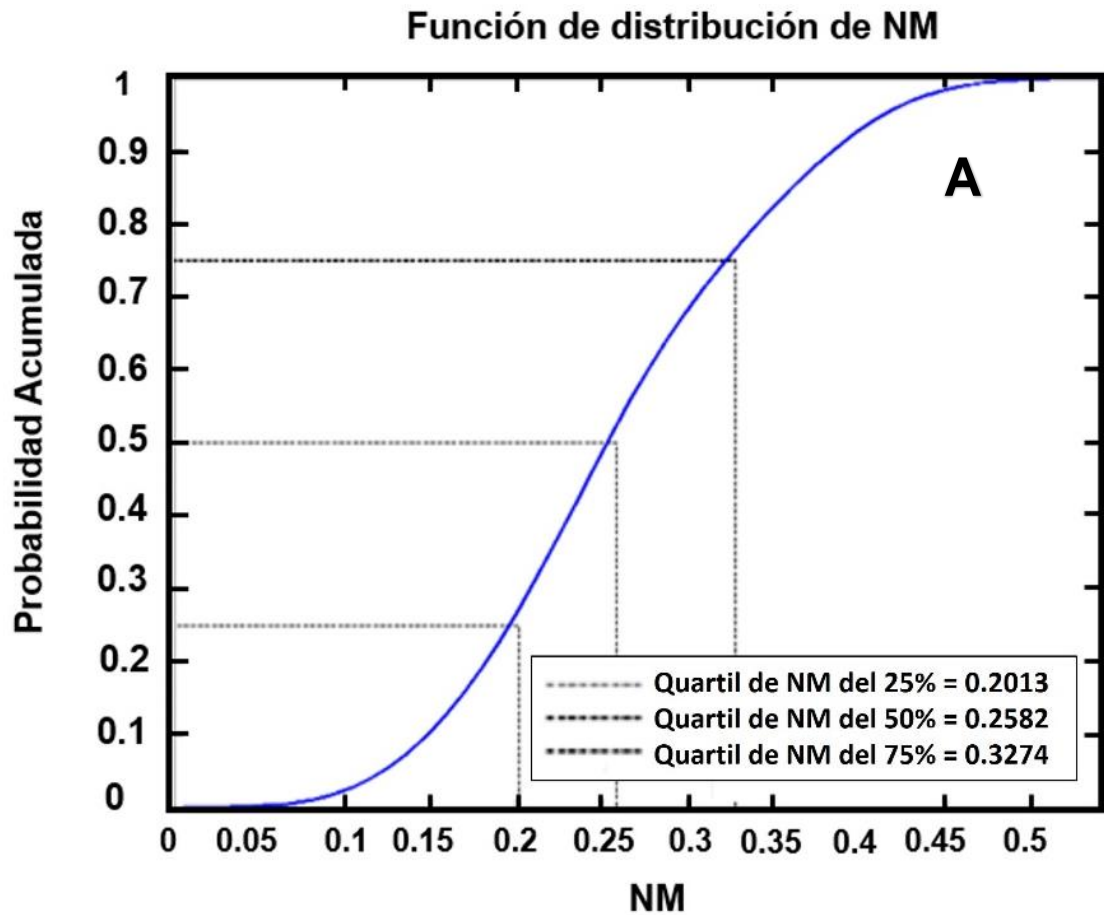
Fuente: Autores

5.6.1 Características hidrodinámicas

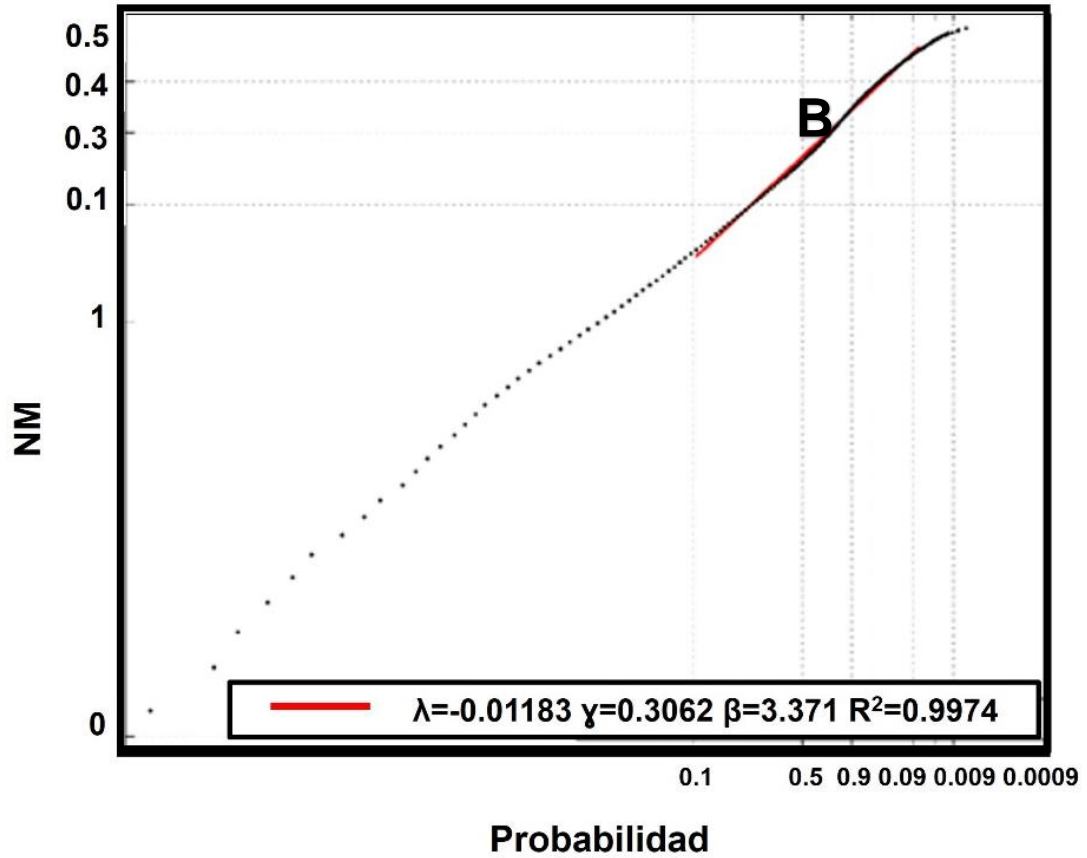
De acuerdo con (UNINORTE, 2014), se determinó que en la Isla Cayos de Serrana la marea es mixta con predominio semi-diurna; donde el rango mareal promedio se estimó en 0.140 m, y los rangos mareales promedio durante sicigia y cuadratura fueron 0.1868 m y 0.068 m, respectivamente. Además del análisis de armónicos, se calcularon los valores de la marea astronómica más alta (HAT) y la marea astronómica más baja (LAT) utilizando la serie completa de 24.12 años. Los valores encontrados para este punto muestran que este presenta un valor de LAT de -0.2643 m y un valor de HAT de 0.2801 m, para un máximo rango de marea astronómica de 0.544 m (UNINORTE, 2014).

La altura del nivel del mar en La Isla Cayos de Serrana supera el 50% de las veces la altura de 0.25 m. Por otra parte, el 75% de las veces la altura del nivel del mar supera los 0.34 m (Figura 7) (UNINORTE, 2014).

Figura 7 A) Curva de probabilidad acumulada para el régimen medio del nivel del mar en Banco Serrana. **B)** Régimen de nivel del mar para Banco Serrana – Distribución Weibull de mínimos.



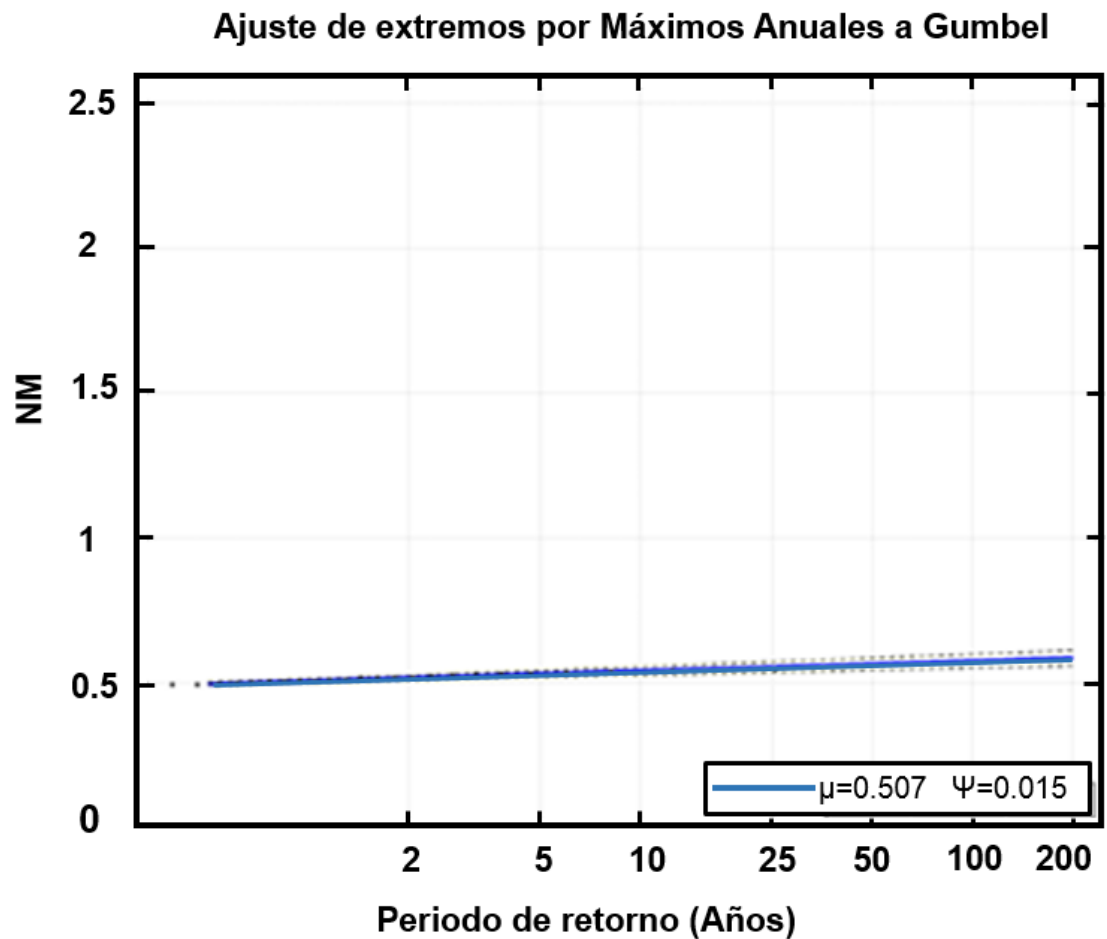
Papel Weibull de mínimos



Fuente: (UNINORTE, 2014).

Los incrementos en el nivel del mar para los periodos de retorno de 50 años y 200 años son de 0.55 m y 0.6 m respectivamente (Figura 8) (UNINORTE, 2014).

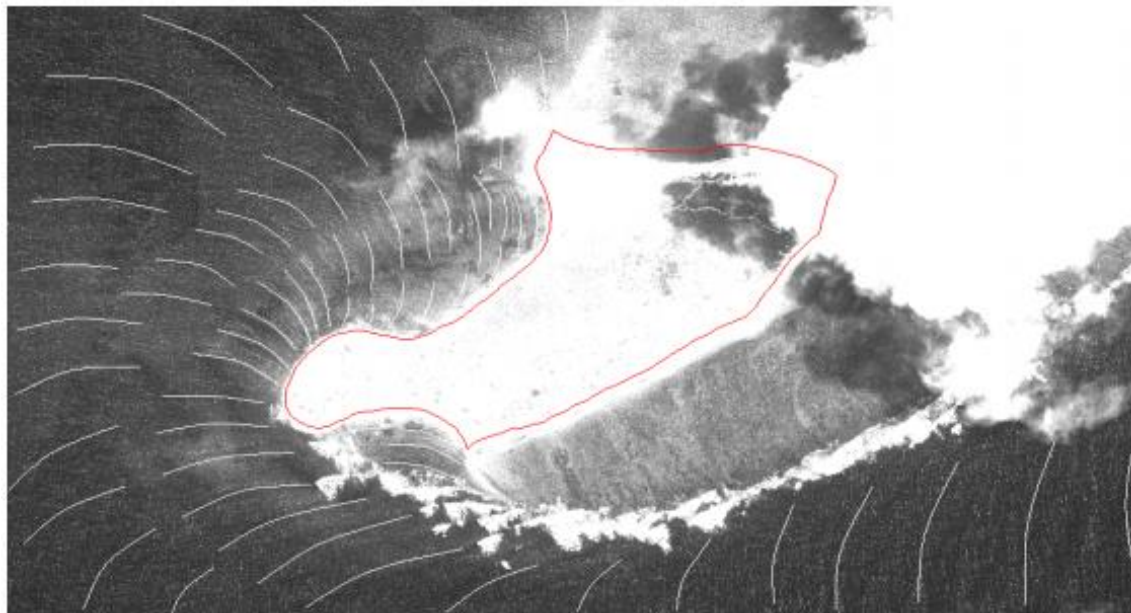
Figura 8. Régimen extremal del nivel de marea en Banco Serrana



Fuente: (UNINORTE, 2014).

Según (Díaz, 2010), “los trenes de oleaje característicos en la isla Cayos de Serrana provienen del este. Estos trenes a medida que se acercan a la Isla Cayo, se refractan por la disminución de la profundidad y, a su vez, se encuentran con una barrera coralina que se extiende por toda la parte este del Banco que corresponde al borde del arrecife periférico; es en esta área donde depositan de manera fuerte casi toda su energía, con lo cual se explica el comportamiento de las aguas calmas que se observan al interior de la laguna de este complejo arrecifal”, como se puede observar en la figura 9.

Figura 9. Imagen satelital Ikonos-2 pancromática de Cayo Serrana, con la línea de costa de 2009 en color rojo, con los frentes de oleaje característicos resaltados.



Fuente: (Diaz, 2010).

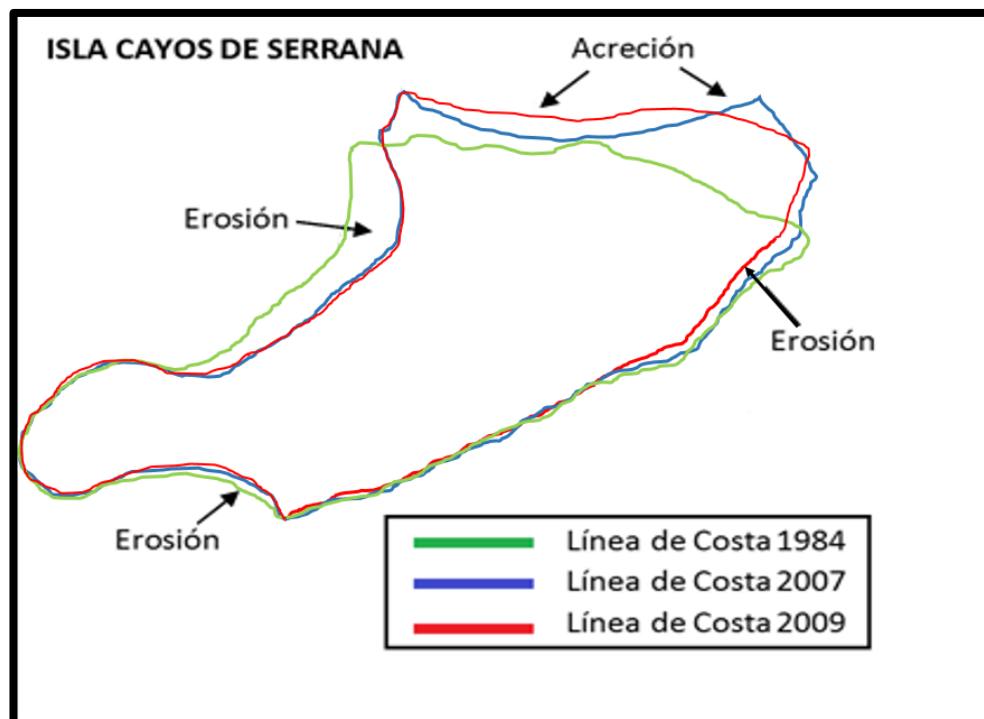
Asimismo, la imagen muestra la difracción de los trenes de olas refractados del este como consecuencia del contacto al final de la rompiente coralina y posteriormente en la punta sureste de la Isla Cayo; los otros trenes de olas que no alcanzan dicha rompiente quedan circundando en toda la franja oeste del mismo. Dichos trenes continúan refractándose por la disminución de la profundidad en esta zona, generando la deformación completa de las ondas hasta romperse por acción del shoaling o asomeramiento sobre el fondo; este último se ocasiona debido a que en este sector su longitud de onda supera más de la mitad de la profundidad.

5.6.2 Características morfodinámicas

La isla Serrana está formada principalmente por escombros coralinos sobre los que crece una vegetación rastrera poco densa y un sitio de anidamiento de pájaros bobos (*Sula spp*) y fragatas (*Fregata magnificens*) que han permanecido desde la época de la explotación del guano en todo el Cayo. Tiene playas de arenas blancas,

principalmente de tipo biodetrítico, originadas como producto de la erosión de los arrecifes coralinos que la bordean y por restos de otros organismos marinos como moluscos, macro algas calcáreas; con vegetación arbustiva densa especialmente del genero *Euphorbia* y *Tournefortia* (Diaz, 2010), apenas penetrado por senderos en el centro y sobre las dunas costeras principalmente del norte, las cuales con el transcurrir de los años, han presentado acreción incrementando su tamaño notablemente (Figura 10). Posee una península alta en su extremo oeste, la cual remata la zona de rompiente del banco arrecifal conformando una playa cóncava en la parte sur y una playa corta y redondeada por el oleaje que se refracta hacia el noroeste. La parte noreste de la península apoya la playa del noroeste de la Isla, la cual se encuentra enfrentando un foco de difracción en la punta norte (ENAP, 2010).

Figura 10. Evolución línea de costa de la Isla Cayos de Serrana desde 1984 hasta 2009.



Fuente: (Diaz, 2010).

Serrana presenta mayores alturas de las formaciones sobre el nivel medio del mar ligeramente menores a 6m y hasta 4m (ENAP, 2010). Las dunas del oeste se encuentran totalmente ocupadas por vegetación muy tupida y solo puede ser recorrida por los senderos que comunican los distintos puntos de la isla. Hacia el costado oriental se hace evidente que la Isla Serrana ha venido creciendo mediante la acumulación de arena en dunas que han sido ocupadas por vegetación que las ha venido fijando (ENAP, 2010).

En el estudio realizado por (Diaz, 2010), de los porcentajes del tipo de sedimento y tipo específico de grava y arena encontrados en cada muestra, se corroboró que la arena es el sedimento dominante en la línea de costa; esto se determinó al tener en todas las muestras un porcentaje de arena superior al 98.5 %.

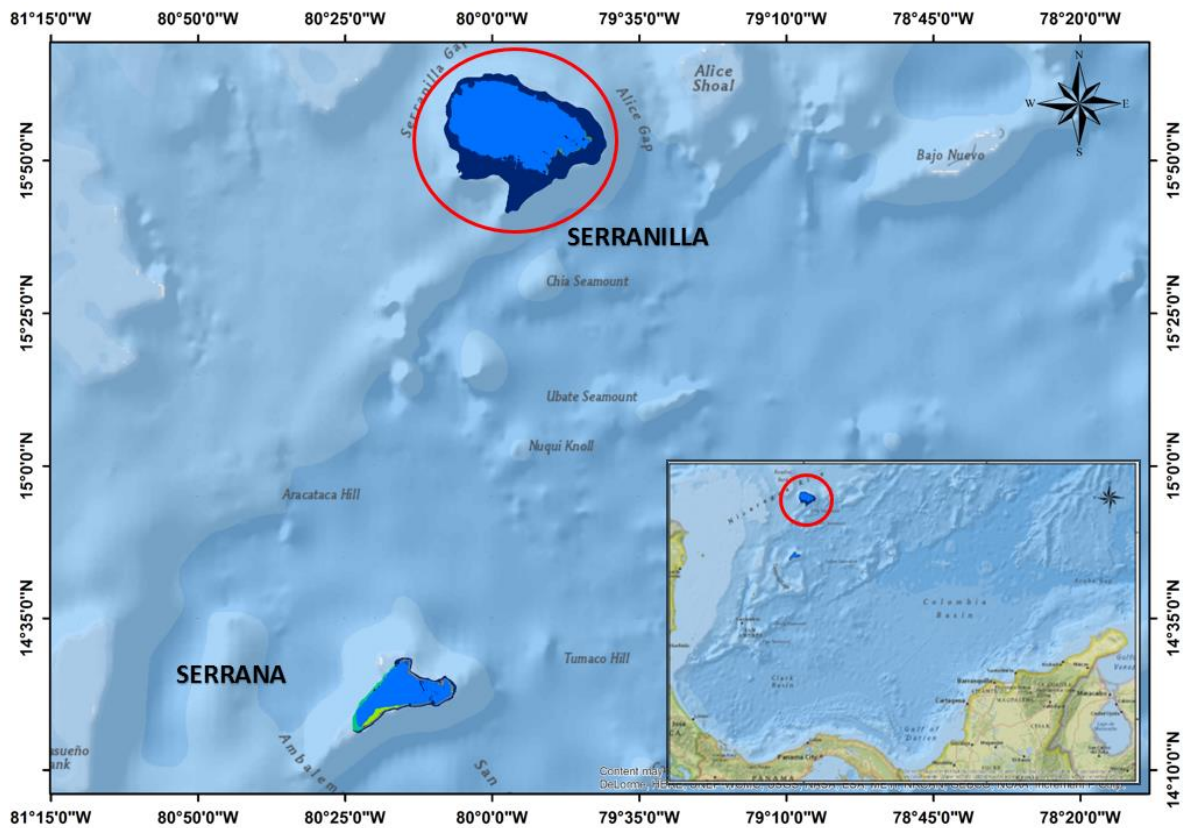
5.7 Isla Cayos de Serranilla

Localizada a 130 km al Norte de la Isla Cayos de Serrana, tiene forma ovalada y un diámetro máximo de 50 km (Figura 11). Presenta porciones de tierra que afloran en superficie como lo son el Cayo del Medio, Cayo del Este y Cayo Serranilla; todos ubicados en el sector este de la Isla. El Cayo Serranilla es la porción de tierra habitada por el personal de Infantería de Marina de Colombia (ENAP, 2010).

Este banco es relativamente profundo (la mayoría entre 10 m y 40 m) y está bordeado por riscos empinados. El perímetro de la plataforma se caracteriza por tener bahías redondeadas, las cuales son particularmente comunes en el margen Sur. Solamente los márgenes Este y Sur-Este están ocupados por una estructura arrecifal periférica que emerge localmente durante las bajas mareas. Los recursos tróficos en el área, aparentemente exceden los niveles suficientes para mantener poblaciones coralinas, pero en cambio favorece comunidades algales y esponjas. (ENAP, 2010).

La zona de rompiente se encuentra hacia el costado Este del cayo y lo protege de la acción directa de la energía del oleaje. De esta manera el costado Este de Serranilla presenta dunas bajas estabilizadas por vegetación arbustiva seguidas de playas de arena de grano medio hacia la zona litoral de alta marea (seco), que se convierte gradualmente en sustrato rocoso a medida que la acción del oleaje disipado incide sobre él. La zona norte del Cayo está conformada por playas de arena de grano fino que se han acumulado gracias a la presencia de la zona de rompiente al Este, que disipa la energía del oleaje proveniente del NE y cuya corriente dispersa el grano por los contornos del Cayo (ENAP, 2010).

Figura 11. Posición geográfica de la Isla Cayos de Serranilla.



Fuente: Autores.

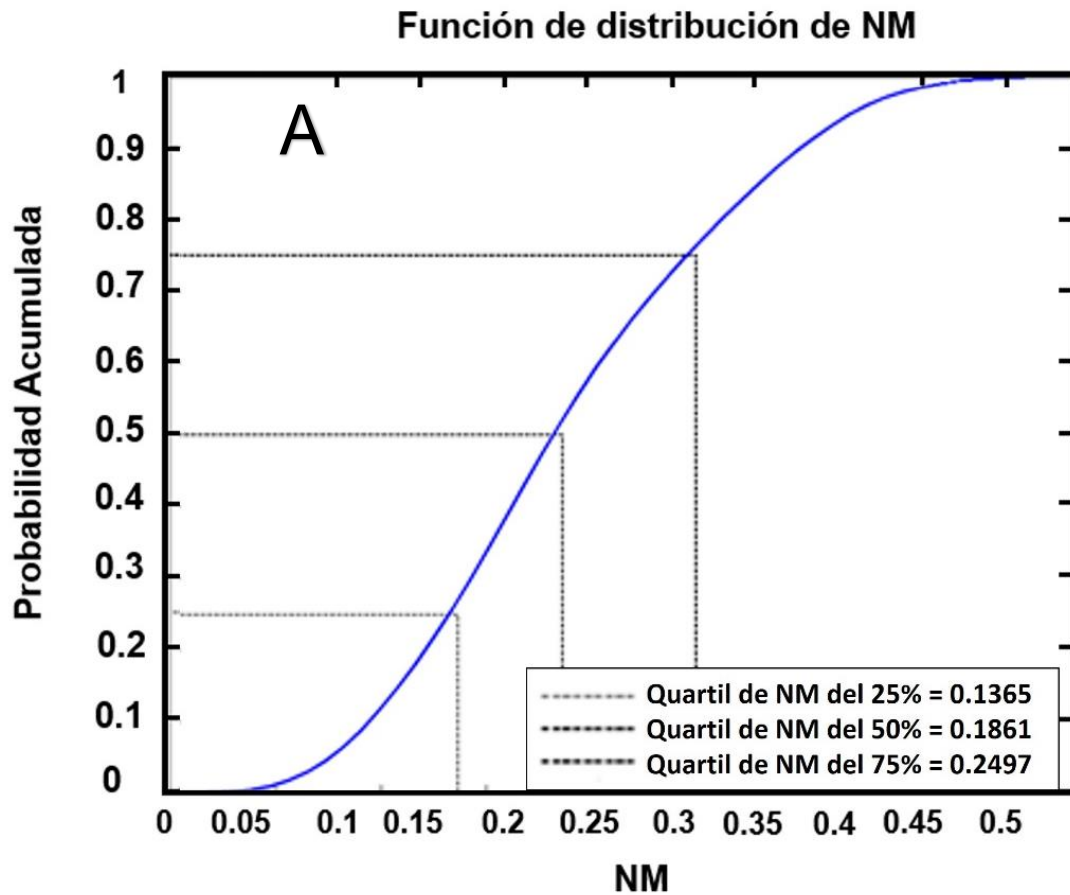
La Isla está bordeada por una formación coralina emplazada sobre basamento volcánico rodeado de aguas profundas (Correa., 1999).

5.7.1 Características hidrodinámicas

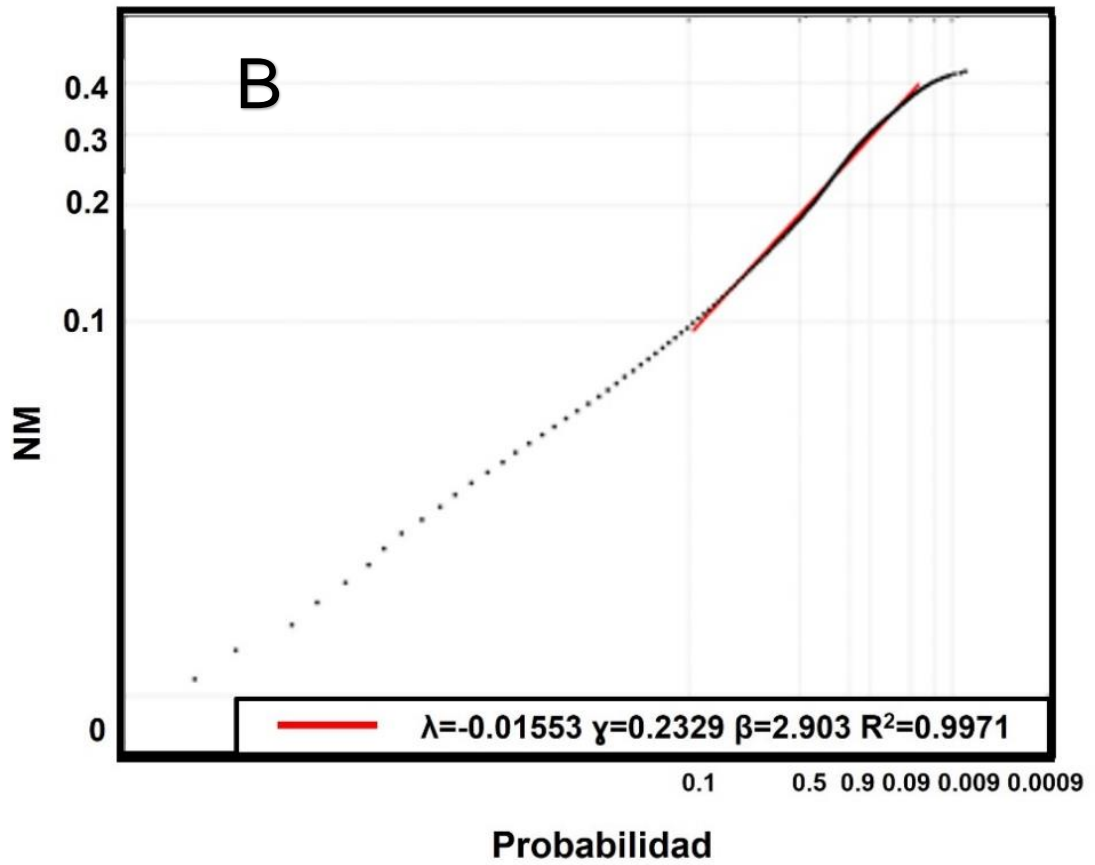
Al igual que la isla Cayos de Serrana, Serranilla presenta marea de tipo mixta con predominio semi-diurno (UNINORTE, 2014). El valor encontrado de marea astronómica más alta HAT fue 0.2374 m y el valor de la marea astronómica más baja LAT fue de -0.1985 m. Con relación a los rangos de marea se encontró que para el punto ubicado en la Isla Cayos de Serranilla, el rango mareal promedio es

de 0.115 m, el rango mareal promedio durante las sicigias y cuadratura son de 0.148 m y 0.0618 m, respectivamente. El rango máximo de marea astronómica fue de 0.4359 m. De las curvas de probabilidad acumulada del régimen se evidencia que la altura del nivel del mar toma valores de 0.186m con una probabilidad del 50% (Figura 12). Con la altura del nivel del mar hay una probabilidad de 75% que indica que durante 18.5 años el nivel del mar estaría por debajo de 0.249m con respecto al nivel medio del mar (UNINORTE, 2014).

Figura 12. A. Curva de probabilidad acumulada para el régimen medio del nivel del mar en Serranilla, **B.** Régimen del nivel del mar para Serranilla.



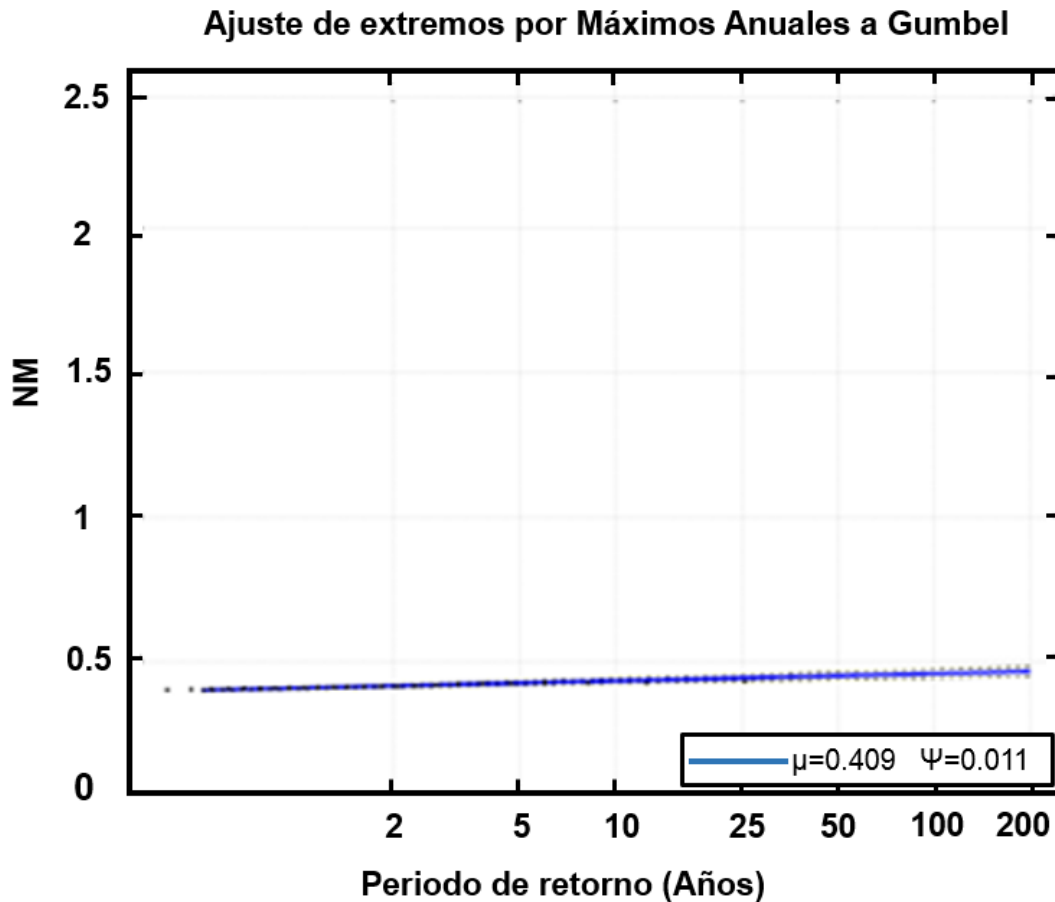
Papel Weibull de mínimos



Fuente: (UNINORTE, 2014).

Para el Banco Serranilla el nivel del mar será 0.48 m para un periodo de retorno de 50 años y de 0.5 m para un periodo de 200 años (Figura 13) (UNINORTE, 2014).

Figura 13. Régimen extremal de nivel de marea en la Isla Cayos de Serranilla.



Fuente: (UNINORTE, 2014).

De acuerdo con el análisis de oleaje realizado por (Zambrano , 2010), se obtuvo que los principales procesos responsables del transporte de sedimentos son los cambios del nivel del mar, las mareas, el oleaje y las corrientes. Acorde con la conformación del cayo y la ubicación de las playas, estas reciben energía de mayor a menor en su orden la del norte, sur y la playa oeste.

Según (ENAP, 2010) el oleaje que llegó a la Isla cayos fue de una altura promedio de 10 cm, con periodos de 8 segundos. La Isla recibe el oleaje del Este y lo “filtra” en la rompiente de manera importante generando chorros de arena entre las cabezas de coral. Como el costado suroriental de la Isla Cayos hace parte de la

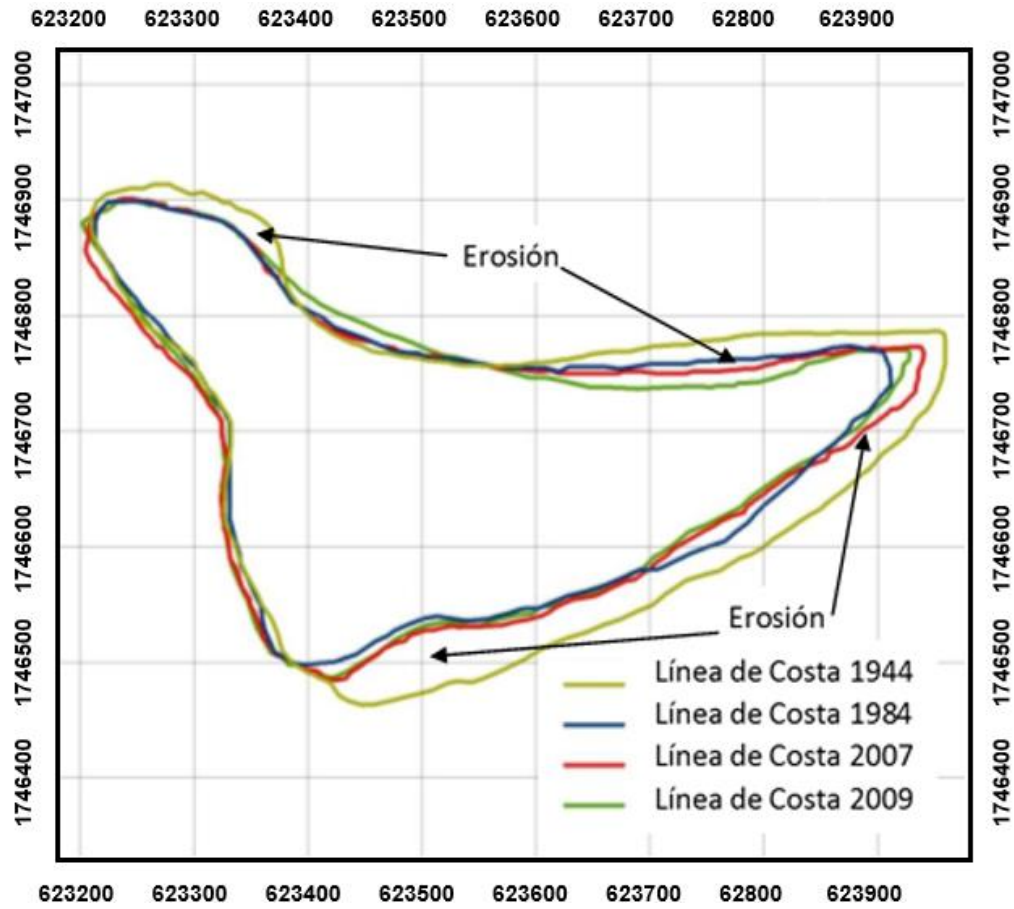
rompiente, este recibe el oleaje de manera muy cercana haciendo que la costa se encuentre muy expuesta de manera permanente en ese costado.

5.7.2 Características morfodinámicas

En cuanto a la forma de las playas, se presenta una comparación de imágenes históricas de la Isla (Figura 14). Se identificó el cambio ocurrido en el Cayo con el paso del tiempo el cual parece ser erosivo. La línea de costa del año 1944 muestra que las playas de Serranilla se encontraban más llenas de arena en casi todo el perímetro. La playa del norte estaba más avanzada hacia el este y la línea de costa más reciente, muestra un avance en el costado oeste en una especie de “basculamiento” con respecto del centro de esa línea de costa. El retroceso de la línea de costa en el costado sureste que se encuentra sobre la rompiente, es evidente en las imágenes recientes; mientras que el costado suroeste se mantiene igual. En balance, Serranilla parece haber perdido arena significativamente especialmente de su costado sureste, en la zona de rompiente donde grandes terrazas calcáreas hoy se encuentran desnudas de arena. Por otro lado, la península del noroeste ha cambiado poco en el tiempo, tiene las bermas más altas y contiene la mayor y más vegetada duna del Cayo (ENAP, 2010).

Serrana como Serranilla posee una península alta en su extremo oeste, la cual remata la zona de rompiente del Banco arrecifal conformando una playa cóncava en vista planta definida por el oleaje que se refracta. La parte NE de la península sirve de amarre de la playa NW del Cayo, la cual se encuentra enfrentando un foco de difracción en la punta norte.

Figura 14. Evolución línea de costa de la Isla Cayos de Serranilla.



Fuente: (Zambrano , 2010).

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 (Hugget, 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 como la ciencia, trata de la descripción y el estudio de la génesis, clasificación, procesos y evolución de las formas antiguas y actuales del terreno (tanto terrestres como submarinas) y su relación con las estructuras infrayacentes (geoformas), enfocándose al análisis de la superficie de la tierra en donde interactúan la litósfera, la hidrósfera, la atmósfera y la biosfera. Para esto se debe entender que las geoformas por definición son la expresión superficial del terreno, de la interacción dependiente de los materiales constituyentes de las mismas y su disposición estructural, de los procesos geomórficos que interactúan según el ambiente morfogenético específico donde se desarrollan, y el tiempo de duración de la acción de los mencionados procesos (Gregory, 1978) en (Rockwell & Keller, 1984).

Para reconocer dichos procesos es vital identificar las geoformas con su topografía, drenaje, textura, tono, vegetación natural y uso del suelo. Segundo es, reconocer los materiales que la componen y le son característicos: como grava, arena, limo, arcilla o cuerpos de rocas; tiene una génesis (tiempo) y por lo tanto una dinámica que explica los materiales que la forman y deducir el grado de consolidación de los

materiales y el origen (Florez, 2003). En síntesis, las geoformas están definidas por los siguientes factores así:

Geoformas = Materiales (Litología + estructuras) + procesos + tiempo.

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. Estas distintas formas terrestres son producidas por interacciones variables debidas a la prevalencia de factores oceanográficos y meteorológicos, como también a la geología (tipos de rocas, sedimentos y estructuras) 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 y actualmente se estudian tres aspectos claves de las estructuras del sustrato: la *forma*, los *procesos* e *historia* (Hugget, 2007).

Para llevar a cabo el estudio de caracterización geomorfológica de las islas cayos del norte, fue necesario conocer un poco más a fondo el concepto de arrecife de coral, sus tipos de clasificación y zonación de forma descriptiva.

De acuerdo con el Diccionario Hidrográfico, un Cayo es una isla de arena, de coral, etc, baja y plana que aflora o vela en bajamar, y menciona que este termino, es usado generalmente para designar a los islotes coralinos situados alrededor de islas del Mar Caribe.

Los arrecifes de coral, son edificaciones complejas formadas por las estructuras externas de los corales, resultantes de procesos de excreción, erosión, acumulación de fragmentos de carbonatos (Choat & Bellwood, 1991), limitadas por una necesidad de agua cálida con una temperatura mínima promedio en invierno de 18 °C, por lo tanto, los arrecifes de coral, se encuentra sólo en pocas áreas fuera de los trópicos (Hopley, 2006, pág. 343).

Estos arrecifes crecen de forma masiva como tractos de corales, convirtiéndose de esta manera en grandes estructuras resistentes a las olas (Hopley, 2011, pág. 261), 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 franjeantes (Finkl, 2011).

En el departamento del Archipiélago de San Andrés y Providencia (Colombia), el 75% del área total, está ocupada por las mejores formaciones coralinas, incluyendo atolones, barreras coralinas, arrecifes de borde y parches de arrecife de coral, con aproximadamente 2100 km² de área de arrecifes de coral representando una de las áreas más extensas de coral en la región Atlántico Occidental (Garzón & Diaz, 2003).

Estas formaciones coralinas del archipiélago tienen una larga historia geológica, donde la subsidencia de los tuneles volcánicos originales y simultánea nivelación de las montañas submarinas de aguas poco profundas, con rocas calcáreas del

Terciario y Cuaternario, condujeron a la formación de estos atolones y bancos actuales (Garzón & Diaz, 2003).

Según (Garzón & Diaz, 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.

Las islas y atolones, tienen varias características geomorfológicas en común, como lo son 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 & Diaz, 2003).

Por lo tanto, basados en la información recopilada en los diferentes estudios acerca de las características geomorfológicas, descripciones de cada una de las Islas Cayos y basados en las diferentes clasificaciones de zonas de coral investigadas y los objetivos propuestos en el presente trabajo, se decidió que, las clasificaciones que mejor se adaptan y aplican para realizar la caracterización geomorfológica en el área de estudio, serían las establecidas por Darwin (1842), Wiens (1962) y Hopley (2006), partiendo con la clasificación más básica y general hasta la más compleja y detallada respectivamente.

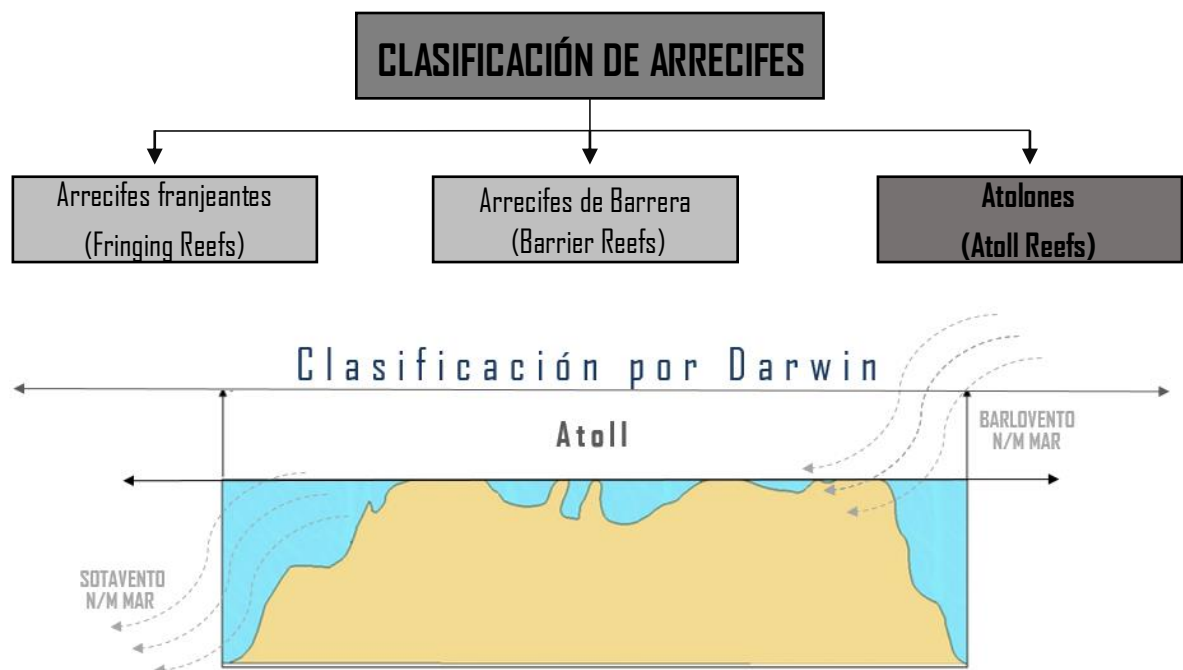
6.1 Clasificación básica de arrecifes por Charles Darwin (1842).

En el año de 1842 fue publicado el libro “The Structure and Distribution of Coral Reefs” de la primera parte de geología del viaje del Beagle escrito por Charles Darwin. Se menciona en los capítulos I, II y III; por primera vez, las tres formas en las que se podía llevar a cabo la clasificación de los arrecifes (Arrecifes franjeantes

(Fringing Reefs), Arrecife de Barrera (Barrier Reefs) y Arrecife de Atolón (Atoll reefs)), (Figura 15), los cuales representan etapas sucesivas en una secuencia evolutiva basada en la hipótesis de desarrollo de arrecifes de coral por subsidencia (Encyclopedia of Modern coral reefs, 2011, p. 1062).

En cada uno de los capítulos se llevó a cabo la descripción de diferentes geoformas del Océano Pacífico y del Océano Indico, y con base en las diferentes características se determinaron estos tres conceptos mencionados anteriormente.

Figura 15. Clasificación de arrecifes según Darwin (1842).



Fuente: Autores

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

6.1.1 Arrecife franjeante (Fringing reef).

Se desarrollan cerca del continente o cerca de costas de islas volcánicas altas. Generalmente se encuentran ubicados cerca a la orilla, aunque las áreas en la parte posterior pueden estar levemente sumergidas. La mayoría de los arrecifes franjeantes se describen como estructuras geomorfológicamente simples, que se dividen en tres principales zonas: Arrecife frontal (Fore reef), cresta arrecifal (Reef crest) y arrecife posterior (Back Reef). Estos arrecifes generalmente tienden a ser angostos, caracterizados por una pendiente submarina muy empinada, los cuales presentan, una capa de sedimentos calcáreos depositados sobre el sustrato rocoso después de la pendiente submarina (Hopley, 2011, p. 432). El Arrecife Franjeante es el primero en la secuencia de la teoría Darwiniana, basada en la hipótesis de desarrollo de arrecifes de coral por subsidencia. Generalmente son arrecifes jóvenes y tienden a desarrollarse en zonas estables o costas resientes (Darwin, 1842).

Los arrecifes franjeantes (Figura 16 A), se desarrollan principalmente en aguas claras, oxigenadas y con fondos firmes. Los sitios ideales son los trópicos, las costas rocosas e islas volcánicas jóvenes; sin embargo también pueden desarrollarse en deltas de manera discontinua, aunque estas condiciones son menos favorables, teniendo en cuenta que los corales no prosperan en aguas turbias (Hopley, 2011, p. 431)

6.1.2 Arrecifes de barrera (Barrier reef).

Los arrecifes de barrera, se definen como un conjunto de arrecifes de coral separados de tierras no arrecifales por una profunda laguna. De acuerdo con lo anterior, un atolón con arrecife de borde, no es considerado como un arrecife de barrera. Darwin afirmó que los arrecifes de barrera, son el producto del hundimiento de islas volcánicas, que fueron creando lentamente una laguna entre la barrera de coral y la tierra (Figura 16 B) (Hopley, 2011, p. 102).

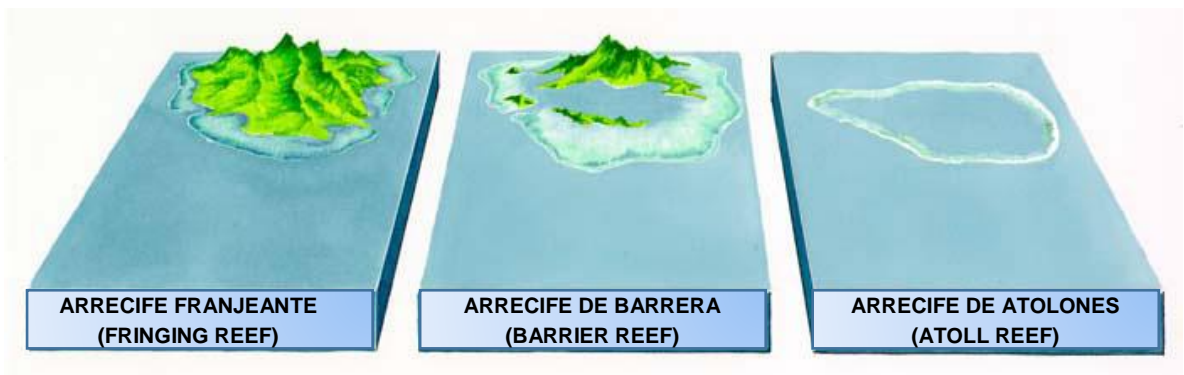
6.1.3 Arrecife de atolón (Atoll reefs).

Los atolones son arrecifes anulares en medio del océano; el arrecife soporta islotes o islas casi continuas, están compuestas por arena o grava consolidada petrificada y generalmente encierran una laguna central (Figura 16 C).

Los atolones se encuentran por lo general en medio del océano, a menudo en las cadenas de islas o archipiélagos. En el Pacífico se localizan la gran mayoría de atolones; en segunda posición se encuentra el océano Índico (Hopley D. , 2011, p. 51). El Departamento Archipiélago de San Andrés está dentro las zonas que cuenta con atolones en el Mar Caribe (Hopley, 2011, p. 52).

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.

Figura 16. Clasificación según Darwin 1842, **A.** Arrecife franjeante, **B.** Arrecife de barrera y **C.** Arrecife de atolón.



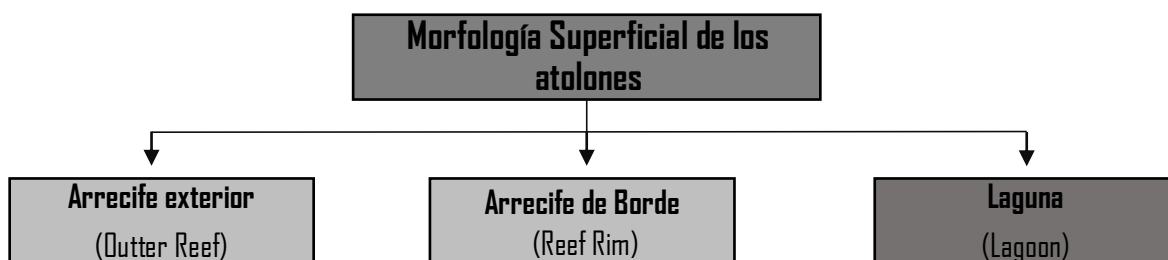
Fuente: Modificado de (www.marinebio.net/marinescience/04benthon/crform.htm).

6.2 Clasificación por Wiens (1962)

La topografía general y la geomorfología de los atolones fue descrito en un libro publicado por Wiens, 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 (Wiens, 1962) en (Hopley, 2011, pág. 53).

Wiens afirmó que la geomorfología superficial de los atolones estaba compuesta por tres geoformas o características claramente distinguibles: outter reef, reef rim y lagoon (Figura 17).

Figura 17. Clasificación de atolones según Wiens 1962 en (Hopley, 2011).



Fuente: Fuente: Autores.

6.2.1 Outer reef (Arrecife exterior)

El arrecife exterior usualmente es continuo y por lo general está expuesto al fuerte oleaje que rompe por todos sus lados. El borde de barlovento del atolón (donde entra el viento) (Figura 18), 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, donde 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 ((Wiens, 1962) en (Hopley, 2011, pág. 53).

6.2.2 Reef Rim (Arrecife de borde)

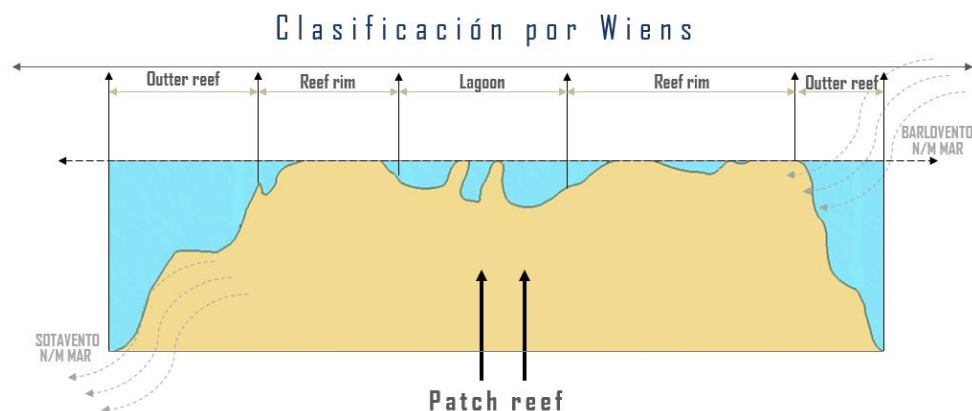
Estos arrecifes puede tener diferentes medidas de ancho, incluso en algunos casos puede llegar a contener islas o una amplia planicie arrecifal (Reef flat). Generalmente estas planicies arrecifales se encuentran en aguas someras, comúnmente expuestas durante la marea más baja. Estas zonas se pueden identificar por estar cerca de la superficie (Wiens, 1962) en (Hopley, 2011, pág. 54).

6.2.3 Lagoons (Lagunas)

La laguna está resguardada en el atolón y puede contener parches arrecifales dispersos, también conocidos como pináculos (pinnacles) o montículos (knolls) (Figura 18). 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, estas pueden llegar a ser poco profundas o por el contrario, pueden alcanzar grandes profundidades (Wiens, 1962) en (Hopley, 2011, pág. 56).

Las lagunas, son características de los atolones propiamente. Generalmente al interior de las lagunas, se encuentra gran cantidad de sedimentos calcáreos, producidos por los arrecifes más productivos y expuestos al fuerte oleaje, sin embargo en algunas ocasiones, estos sedimentos pueden terminar también en el borde de los arrecifes (Wiens, 1962) en (Hopley, 2011, pág. 57) (Figura 18).

Figura 18. Esquema de la Clasificación morfológica superficial de atolones según Wiens 1962.

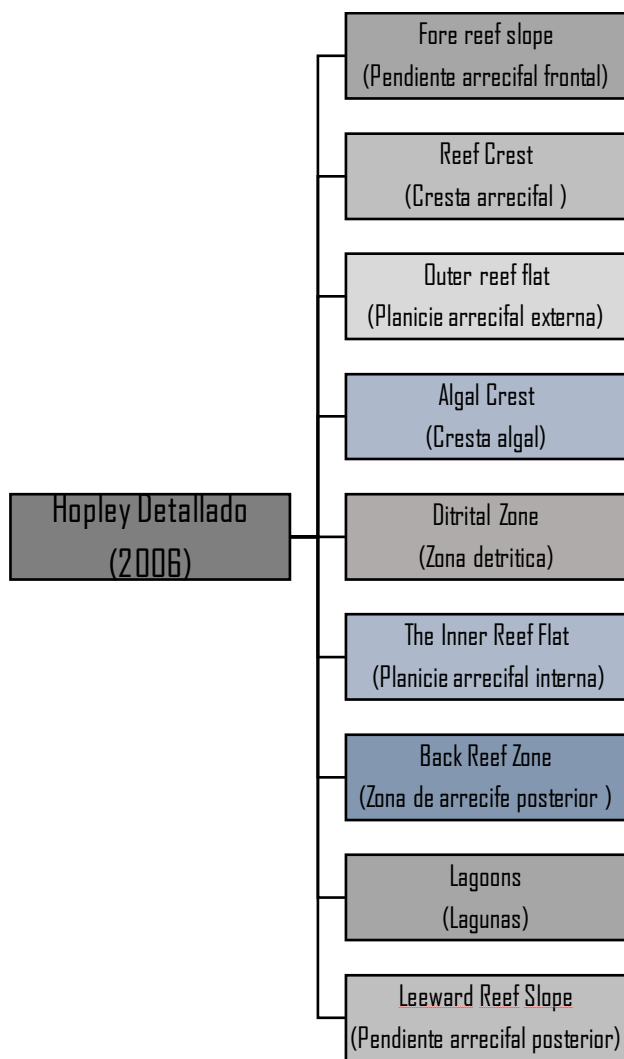


Fuente: Autores.

6.3 Clasificación por Hopley (2006).

En el año 2006 Hopley realizó la clasificación por desarrollo de zonación de arrecifes de coral (Hopley, 2006, pág. 347), donde estableció una clasificación a través de un procedimiento analítico detallado para denotar la tipología basándose en factores tales como su morfología, edad y tamaño, entre otros.

Figura 19. Clasificación según Hopley.



Fuente: Modificado de (Hopley, 2006, pág. 347).

La clasificación descrita anteriormente (Figura 19), se deriva de los trabajos realizados por (1982), (2003) y (2006), basados en la evolución de la plataforma continental de los arrecifes de coral en la Gran Barrera de Coral durante el Holoceno.

6.3.1 Pendiente frontal de arrecife (Fore reef slope).

Es el arrecife que se encuentra en la parte más externa que da hacia el 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, 2006, pág. 347).

6.3.2 Cresta del arrecife (Crest Reef).

Son arrecifes resistentes, los cuales se encuentran en zonas poco profundas y reciben la energía de las olas directamente. Su forma los hace cumplir función de espolones y se ubican entre el arrecife posterior y el arrecife frontal (Hopley, 2006).

6.3.3 Planicie arrecifal externa (Outer reef flat).

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. El área está compuesta por distintas zonas morfológicas, como lo son: la plataforma de algas, banda de escombros, hileras de coral fusionado, hileras de coral no fusionadas, parches de coral, plataformas de arena y progradación colectiva de cuerpos de arena (Hopley, 2006).

6.3.4 Cresta de algas (Algal crest).

El borde de los atolones arrecifales de alta energía oceánica, lo conforman algas coralinas costrosas que se elevan casi hasta el nivel del mar. A medida que baja la energía, estas se convierten en pavimento de sedimentos calcáreos. En los lugares donde la energía es mínima, dominan los céspedes algales (Hopley, 2006).

6.3.5 Zona detrítica (Ditrital zone).

Después de la cresta algal e incluso sobre la misma, se depositan sedimentos calcáreos o material grueso derivados del arrecife. Estos sedimentos se acumulan en la parte frontal del arrecife formando bancos irregulares (Hopley, 2006).

6.3.6 Planicie arrecifal interna (The inner reef flat).

La planicie arrecifal interna se encuentra ubicada en la parte posterior interna, y es en ésta donde se absorbe la energía de las olas. En la planicie se puede presentar crecimiento de corales, ya que provee de un flujo de agua constante sobre la cresta arrecifal (Hopley, 2006, pág. 347).

6.3.7 Zona de arrecife posterior (Back reef zone).

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, 2006, pág. 347).

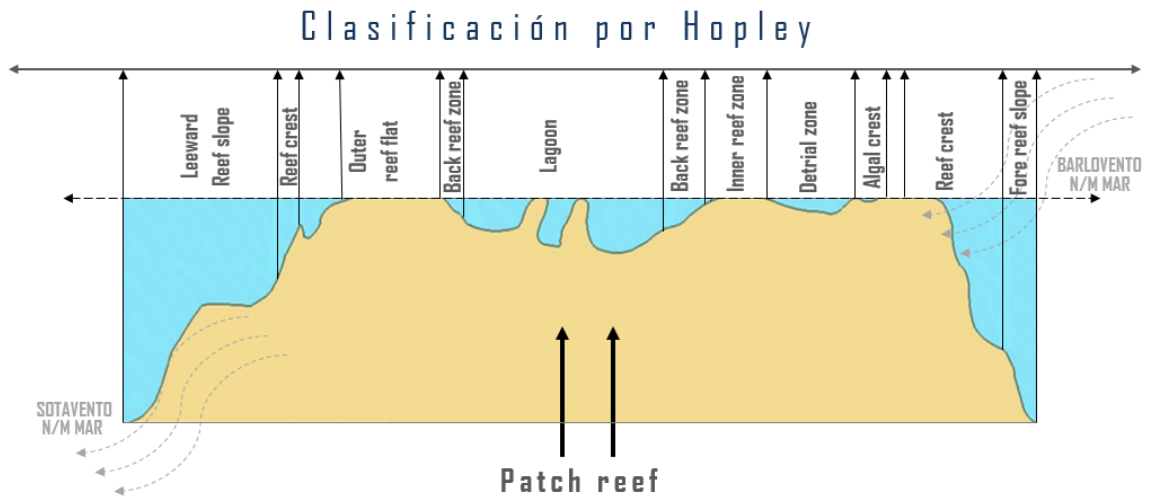
6.3.8 Laguna (Lagoons).

La laguna del arrecife se encuentra resguardada por el atolón originando que esta reciba poca energía de las olas. Las lagunas arrecifales generalmente presentan forma circular o alargada, las cuales pueden contener en su interior diferentes parches de arrecifes de formas dispersas. Estas lagunas usualmente son poco profundas, sin embargo en algunos casos, se pueden presentar lagunas o sectores de ellas con profundidades mayores (Hopley, 2006, pág. 347).

6.3.9 Pendiente arrecifal de sotavento (Leeward reef slope).

En esta zona no se presenta gran energía proveniente de las olas, se caracteriza por ser una zona tranquila de poca energía, la cual debido a su ubicación en sotaventó del arrecife, permite el crecimiento del coral que no se acerca a la superficie. Generalmente presenta una forma de entrada de ramas (Hopley, 2006, pág. 348).

Figura 20. Diagrama de clasificación por Hopley 2006.



Fuente: Autores.

6.4 Otras clasificaciones de arrecifes

Según la Enciclopedia of Modern coral reefs. Structure, form and process, (2011) varios autores describen otras clasificaciones de arrecifes de coral, tales como Fairbridge (1950) y Maxwell (1968). Estas clasificaciones no fueron empleadas en la presente investigación. Sin embargo, se presentan a continuación una breve descripción de sus principales características como información de referencia.

6.4.1 Clasificación según Fairbridge (1950).

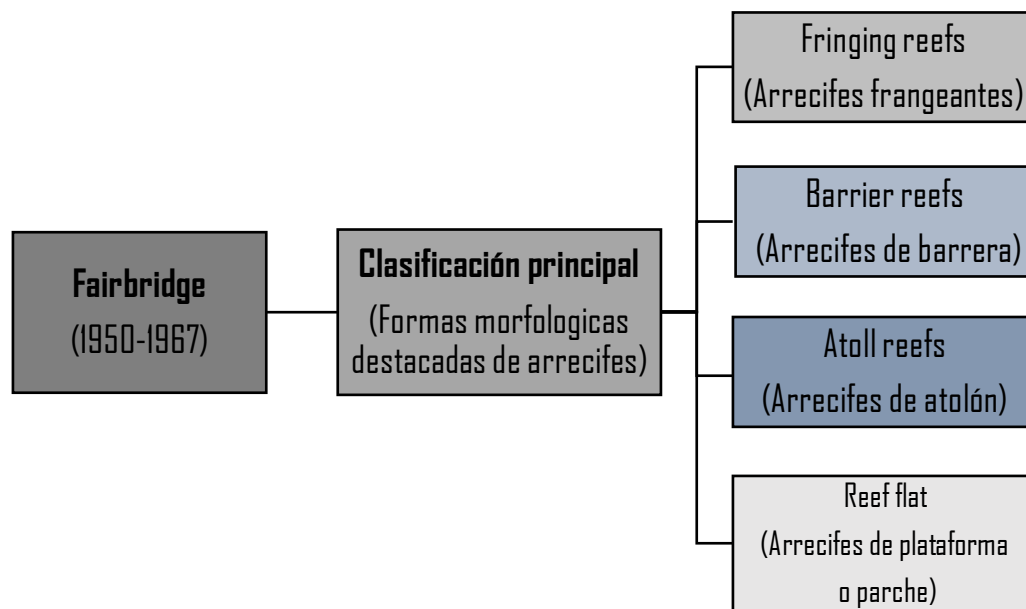
Se centró principalmente en la Gran Barrera de Coral (GBR), realizando una clasificación de los arrecifes de coral del Holoceno y Pleistoceno, la cual cubre las formas morfológicas del arrecife más destacadas, reconociendo a las formas franjeante, de barrera, atolones y de plataforma, como las formas básicas de los arrecifes de coral y que éstas a su vez, pertenecen a cuatro diferentes variedades de islas de coral (Hopley, 2011).

Haciendo uso de sus datos geocientíficos, basándose en la interpretación de las características estructurales, geomorfológicas y de perforación del arrecife,

Fairbridge postuló que las formas de los arrecifes de coral son controladas generalmente por el viento, las olas, y corrientes de forma compleja, donde formas más complejas podrían también estar influenciadas por la topografía del fondo antecedente, la sedimentación y las fluctuaciones eustáticas.

En lo que se refiere a los tipos de arrecife de coral, casi todas las formas "normales" están incluidas en franjeante, 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 de parche, también alternativamente denominados bancos o montículos arrecifales (Hopley, 2011) (Figura 21).

Figura 21. Clasificación Morfológica de arrecifes según Fairbridge.



Fuente: Autores.

Clasificación de Atolones según Fairbridge (1950)

Dentro de la clasificación primaria de los arrecifes, Fairbridge (1950) estableció una clasificación de atolón. 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*) (Hopley, 2011).

6.4.1.1 Deep-Sea atolls (Atolones de aguas profundas).

Los atolones de aguas profundas, son estructuras aisladas que 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. Un ejemplo de este tipo de atolón es el Kwajalein en las islas Marshall, en el Pacífico y Suvadiva - Maldivas en el Océano Indico, siendo los atolones existente más largos, cada una cubriendo un área de 700 Millas² aproximadamente.

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, pueden disminuir a un ritmo lento, lo que permite el crecimiento de arrecifes (Hopley, 2011).

6.4.1.2 Shelf Atolls (Atolón de plataforma).

Estos se encuentran en muchas partes del mundo. Cerca de Australia, en Indonesia, en el Mar Caribe y el Golfo de México. Algunos pequeños atolones que se elevan desde las laderas de la isla más grande como pedestales, también pertenecen a esta categoría. Se han propuesto nombres especiales como el propuesto por (MacNeil, 1954) en (Ladd, 1977), "Estante de atolones", "Banco de arrecife" y, dependiendo de la presencia o ausencia de islas, les llamó " Banco de barrera" y "Banco de atolones". A los pequeños atolones situados dentro de las lagunas se les llamo "Atolones de Laguna" (Ladd, 1977).

6.4.2 Clasificación por Maxwell (1968).

Maxwell intentó dar más detalles sobre el esquema de clasificación de Fairbridge. Ambos pensaban que podían observar patrones de división "que apoyarían a la idea de representación de diferentes etapas del desarrollo arrecifal" (Maxwell, 1968) en (Hopley, 2011, pág. 854).

Maxwell reconoció los siguientes tipos de arrecifes de plataforma: Circular, forma elíptica, crecimiento radial (Circular – elliptical shape, radial growth), Plataforma (Platform), Plataforma alargada (Elongate platform), Plataforma lagunar (Lagoonal platform), Forma alargada (Elongate shape), Pared (Wall), Cúspide (Cuspate), Diente (Prong), Delantal compuesto (Composite apron), Anillo abierto (Open ring), Malla abierta (Open mesh), Anillo cerrado (Closed ring), Malla cerrada (Closed mesh), Forma reabsorbente (Resorbed shape) y Reabsorbente (Resorbed) (Flood, 2011).

Para el desarrollo del presente estudio, se adoptaron tres de las clasificaciones anteriormente descritas, principalmente por considerarse las más adecuadas para caracterizar las áreas de estudio. Para ello se inició desde la clasificación más básica de arrecifes de coral (Clasificación por Darwin, 1842), finalizando con una más detallada (Clasificación por Hopley, 2006).

6.5 Sensores remotos

Las extensas áreas de hábitats marinos (costeros e insulares) a nivel mundial carecen de caracterizaciones apropiadas, debido a la escasez de información cartográfica con la suficiente precisión y continuidad como para soportar la amplia gama de necesidades de la sociedad (Ariza et al 2014).

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 denominada

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 & Sabins, 1996), la definen como la ciencia de adquirir, procesar e interpretar imágenes que graban la interacción entre la energía electromagnética y la materia.

En términos generales, 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 et al, 2003).

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

La tecnología LiDAR representa un avance significativo en el mapeo de los cambios costeros a gran escala y en periodos de tiempo largo. El LiDAR, tanto para propósitos topográficos como batimétricos, ha experimentado grandes desarrollos desde el inicio de la década de los setenta y especialmente favorecida por los

avances en las velocidades de dispositivos electrónicos y análogos, el incremento en la capacidad de memoria y velocidad de los computadores, las dramáticas reducciones de costos de obtención y procesamiento de información espacial, el desarrollo y auge del sistema GPS (Brock & Purkis, 2009).

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 al mapeo de la geomorfología costera con el fin de mejorar el entendimiento de los procesos geomorfológicos costeros (Brock et al, 1999).

Otra forma de recolección de información remota, son las ortofotografías. Una ortofoto es la representación fotográfica de una zona de la superficie terrestre, en la que todos los elementos se presentan en la misma escala, libre de errores y deformaciones, con la misma validez de un plano cartográfico. Una ortofotografía se consigue mediante un conjunto de imágenes aéreas (tomadas desde una plataforma como un avión o satélite) que han sido corregidas digitalmente para representar una proyección ortogonal sin efectos de perspectiva, y en la que por lo tanto, es posible realizar mediciones exactas. (ENAP, 2010).

A lo largo de las últimas décadas, el desarrollo de la ortofotografía digital ha sido muy importante, y está en relación directa con el uso creciente de cartografía en el soporte digital y con el empleo en diferentes ámbitos de los Sistemas de Información Geográfica (Afanador et al, 2000).

En este contexto, la fotografía aérea digital, empleando cámara métrica digital, ha sido una técnica relativamente reciente, que ha encontrado en la información

obtenida con el sensor LiDAR, un buen nivel de complementación, especialmente para la modelación y análisis del terreno (Afanador et al, 2006).

Las fotografías aéreas digitales entre otras ventajas, presentan la de su estabilidad dimensional, ya que no les afectan las variaciones de temperatura del medio ambiente y no son objeto de una manipulación directa por parte de los usuarios. Sin embargo, la principal ventaja de la fotografía aérea digital es la representación pictórica de grandes extensiones del terreno, lo que facilita en gran medida, las labores de fotointerpretación y análisis del terreno por parte de los técnicos y profesionales de diversas áreas del conocimiento (Afanador et al, 2006).

6.6 La fotointerpretación

La fotointerpretación es el proceso por el que se extrae la información contenida en una fotografía aérea u Ortofotografía, definida también como la técnica o arte de examinar una imagen fotográfica del terreno (u otros elementos), con el propósito de identificar los diferentes componentes del paisaje, extrayendo información de interés. (Reuter, 2015)

Las técnicas empleadas para la obtención de esta información pueden ser clasificadas en tres categorías así:

- Detección, Reconocimiento e identificación (Foto-lectura)
- Análisis, clasificación y Evaluación (Foto-análisis)
- Deducción e inducción (Foto-interpretación)

Las técnicas de foto lectura se refieren a la detección, reconocimiento e identificación de objetos (edificios, caminos, límites de predios, vegetación, etc.) y

su posición relativa. El foto-lector utiliza la fotografía aérea como un mapa base detallado y toda la información la obtiene por lectura directa de las fotos.

El análisis de fotografías aéreas, consiste en el proceso de separar y analizar las partes que componen un todo y establecer su interrelación, con el fin de identificar el elemento estudiado en base a las características de sus componentes individuales. En el análisis de las fotografías se llega también a algunas conclusiones cuantitativas o semi cuantitativas por el estudio del tamaño y otras características métricas directamente visibles en la fotografía.

La fotointerpretación comprende los procesos anteriores, pero además incluye un estudio detallado de los elementos que aparecen en la fotografías a fin de llegar a una correcta evaluación de los mismos, mediante un estudio deductivo o inductivo.

Para Poder llevar a cabo estos procesos de deducción o inducción, es de fundamental importancia que el foto-intérprete tenga un buen nivel de referencia, es decir, que sus conocimientos teóricos, sus experiencias personales tanto en el campo como en el análisis de fotografías le permitan obtener rápidamente conclusiones bien fundamentadas en el campo de su especialidad. (Reuter, 2015).

Cualitativamente la imagen fotográfica se estudia bajo los siguientes aspectos:

- La Nitidez, que es función de las características del objetivo, el enfoque del sistema, el movimiento de la imagen (producido por vibraciones o tiempo de exposición prolongado), y las características del material fotográfico (poder de resolución, valor de gamma, revelado, etc.).
- El Contraste, que es función de la iluminación solar y condiciones atmosféricas en el momento de tomar la foto ,la reflectividad del objeto y sus alrededores, la

refracción por niebla atmosférica, la sensibilidad espectral de la emulsión (pancromática, infrarroja, etc.), y la transmisión espectral del filtro.

- La Escala, que es función del valor de distancia principal de la cámara y la altura de vuelo sobre el terreno.

Es necesario agregar que la escala de la fotografía, es uno de los factores principales que facilita o dificulta la identificación (por lectura directa o análisis) de elementos de la fotografía.

Es necesario considerar también una serie de elementos que en forma directa o indirecta y analizada en conjunto, ayudan al foto-intérprete a identificar los elementos de su interés, los cuales son:

- El tamaño del objeto observado, puede ser una gran ayuda para su plena identificación. Dos elementos diferentes pueden aparecer en la imagen fotográfica muy parecidos, sin embargo, la diferencia en tamaño puede ser el factor decisivo para su identificación. Las sombras pueden ser también muy útiles para estimar el tamaño de un objeto.
- La forma de los objetos, observada en una fotografía aérea tampoco es la que el observador está acostumbrado a ver y por eso es necesario adquirir experiencia mediante el estudio de muchos pares de fotografías para aprender a ver los objetos desde un punto de vista diferente. La forma contribuye a delimitar la clase a que pertenece un objeto y en muchos casos permite su clara e inequívoca identificación.
- El tono y color, contribuyen positivamente en las fotografías aéreas en colores, permitiendo la fácil identificación de objetos. Su influencia es mucho mayor que la diferenciación de tonos de gris correspondientes a una fotografía en blanco y negro. Para utilizar correctamente las diferencias en tonalidad de las fotografías es necesario conocer los factores que tiene influencia sobre estos tonos sin embargo, no todo cambio de tonalidad

implica necesariamente un cambio en las características del objeto observado. Finalmente la diferente tonalidad, nunca debe ser el único factor determinante de la identificación de un objeto.

- La textura, puede ser definida como la distribución de tonos que presenta un conjunto de unidades, que son demasiado pequeñas para ser identificados individualmente en una fotografía. El tamaño de los objetos que determina la textura, varía con la escala de la fotografía y en algunos casos, puede ser elemento suficiente para la identificación de objetos.
- El patrón, se refiere a la agrupación ordenada de ciertos elementos con características especiales, el drenaje, los cultivos, la vegetación y el uso de tierra pueden presentar ciertos patrones tipos, que permiten deducir o inferir una serie de elementos o características no directamente visibles en las fotografías.

Dentro del contexto del análisis digital de terrenos, el análisis y clasificación de las formas terrestres, es básico para el estudio del terreno, debido a que estas pueden ser definidas como características formadas por procesos naturales con una composición definida y un rango de características físicas y visuales, de tal forma que los procesos naturales, las rocas, los suelos, los arrecifes de corales, el agua y la vegetación, ejercen una influencia sobre cada una, para formar un equilibrio natural particular.

En el año 2013, Colombia generó un proyecto de investigación denominado “Procesamiento Digital de Imágenes Aplicado a Manejo de Zonas Costeras e Insulares Fase I”, realizado entre el Ministerio De Defensa Nacional – la Dirección General Marítima (DIMAR) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el cual generó un Modelo Batimétrico derivado de imágenes de alta resolución y de imágenes Landsat ETM+ y LDCM en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. EL desarrollo de este trabajo, permitió determinar el borde externo

del arrecife o líneas de base, de conformidad con el derecho internacional consuetudinario y la convención de las naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (Ariza et al, 2014).

Esta información batimétrica se presentó como una alternativa metodológica a los datos obtenidos mediante métodos convencionales (eco sondeos), para aquellas zonas donde se desconocía o carecía de información primaria, permitiendo la generación de Modelos Batimétricos Tridimensionales Submetricos en zonas insulares y costeras mediante Imágenes de Sensores Remotos de alta resolución espacial, dado que los métodos de levantamiento por medio de técnicas tradicionales de sondeo a bordo de embarcaciones en zonas de rompiente y aguas someras son de difícil realización, lo que genera un incremento tanto en los costos como en los tiempos de ejecución, y por ende en la carencia de información náutica detallada de ciertas zonas del territorio Colombiano (Ariza et al, 2014).

Para la realización del modelos batimétrico se utilizó la metodología denominada modelo DOP "Deep of penetration" de Jupp (1988), entre otros autores. A partir de imágenes multiespectrales Landsat TM.

La metodología incluyó la obtención de datos de campo mediante un muestreo aleatorio estratificado de puntos de verificación. Las observaciones se realizaron en el mar Caribe, a través de un equipo de georeferenciación de doble frecuencia (GPS) en un sistema de coordenadas UTM para (X, Y Z) sobre el elipsoide WGS84 con un error medio cuadrático RMS no mayor a 1 m. Los valores de profundidad (Z) utilizados en el proceso de validación del modelo DOP, se obtuvieron bajo el sistema mono-haz, mediante una ecosonda Odom Hydrotrac en un sistema de posicionamiento GPS Diferencial DSM 132 TRIMBLE complementado con el paquete hidrográfico HYPACK MAX con una precisión de entre 0,3 - 1,0 m. Para ello se empleó una embarcación hidrográfica de tipo Zodiac con el fin de alcanzar las áreas de poca profundidad (Ariza et al, 2014).

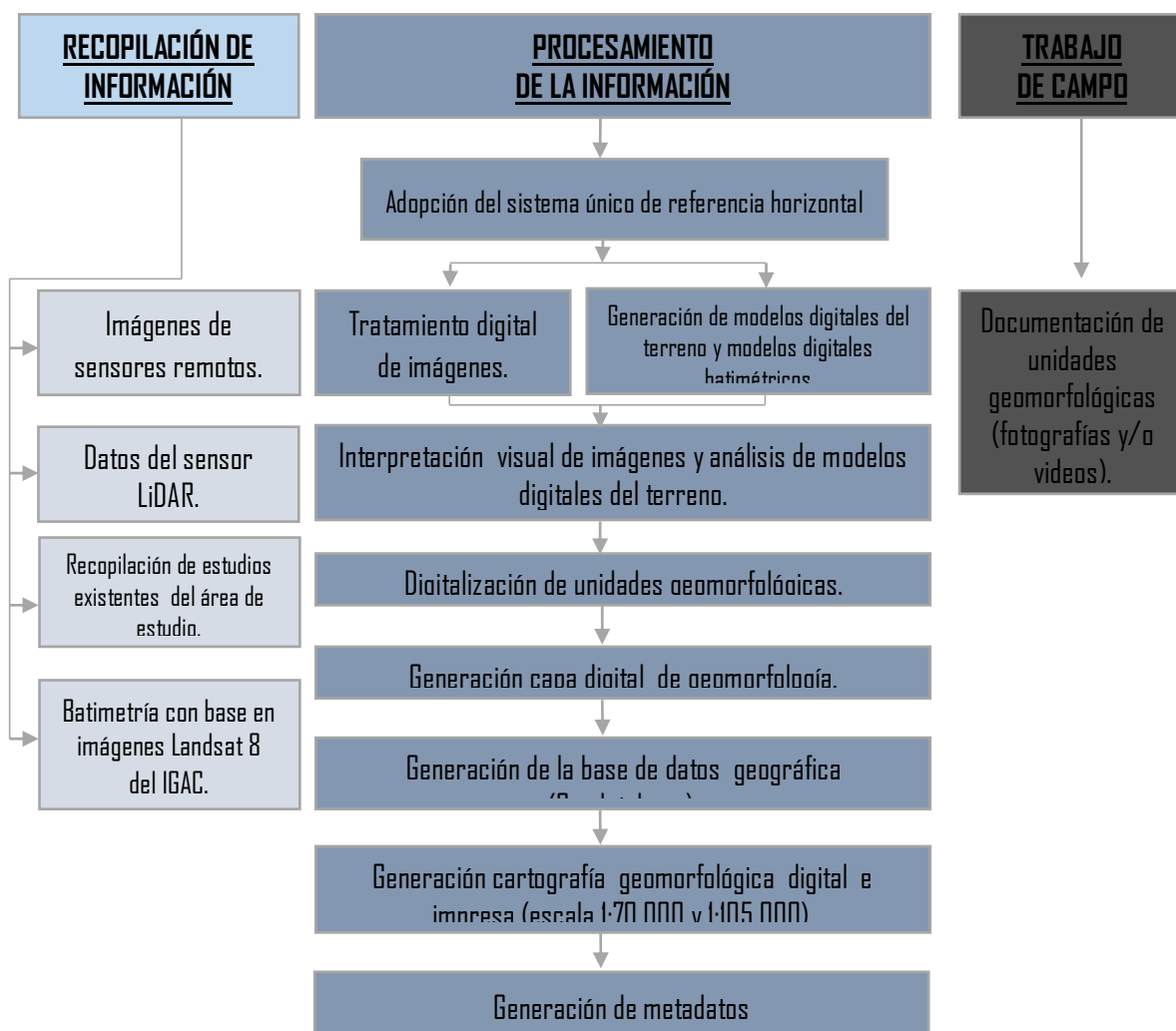
Las mediciones de espectrometría fueron tomadas a través de un espectro radiómetro HR4000 de Oceans Optics, con el cual se obtuvieron las firmas espectrales utilizadas en el proceso de cálculo del coeficiente de atenuación y corrección de la columna de agua. Esta toma de datos se realizó a través del buque oceanográfico “ARC Providencia” del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH) adscrito a la Dirección General Marítima (DIMAR) (Ariza et al, 2014).

Los datos capturados fueron pos-procesados en laboratorio con el fin de validar y correlacionar el modelo DOP, a partir de los valores batimétricos obtenidos en campo contra los datos derivados de la imagen del satélite Landsat ETM+ y de sus valores de radiancia (Li) máxima, media y mínima entre las bandas multiespectrales comprendidas entre el azul e infrarrojo cercano (1 - 4) (Ariza et al, 2014).

7. METODOLOGÍA PROPUESTA

Para el desarrollo de la presente investigación se estableció un diseño metodológico que dado el nivel de detalle y de exactitud posicional de la información de sensoramiento remoto que se tenía disponible, funcionará para efectuar un análisis geomorfológico que permitiera la identificación de las islas del Norte Serrana y Serranilla, desde el punto de vista de sus características físicas, específicamente su zonación geomorfológica (Figura 22).

Figura 22. Diseño metodológico.



Fuente: Autores.

Desde el punto de vista metodológico, el trabajo de grado comprendió tres actividades principales, las cuales se llevaron a cabo por parte del grupo de trabajo así: la recopilación de la información, el procesamiento de la misma y con relación a la fase del trabajo y verificación en campo, a pesar de que no fue posible realizar esta actividad directamente en las áreas de estudio, teniendo en cuenta la disponibilidad de medios (unidades a flote de la Armada Nacional) para llegar a ellas, ya que no existen otros medios marítimos o terrestres para acceder a estas zonas, como resultado de esta situación y con el fin de contar con alguna clave de datos tomados en campo, se optó por utilizar los datos recopilados por el grupo interdisciplinario de la sede central de la Dirección General Marítima, liderada por el Señor Capitán de Fragata Hermann León, quien en el año 2014 a bordo de un helicóptero de la Armada Nacional en un vuelo oficial, tomó imágenes aéreas y videos que fueron utilizados en esta investigación como información de referencia y soporte.

7.1 Recopilación de información

Esta actividad inició en el mes de octubre del 2014. Gracias al apoyo de la Dirección General Marítima quien por intermedio del señor Capitán de Fragata León, suministró toda la información de imágenes disponible para el desarrollo del trabajo. La información recopilada comprendió: imágenes de sensores remotos de diferente resolución espacial, datos de sensor aerotransportado LiDAR e información de batimetría del área de estudio obtenida a través de sensores remotos en el año 2013 por el IGAC (Tabla 2).

Tabla 2 Tabla con las opciones tecnológicas disponibles para la Isla Cayos de Serrana e Isla Cayos de Serranilla.

Isla cayos de Serrana						
Isla Cayos	LiDAR	Ortofotografías	Ikonos	Landsat 8	Ópticas FAC	Aerofotografías métricas digitales
Serrana	si	si	si	si	si	si
Serranilla	no	si	si	si	si	si

Con el fin de seleccionar entre las 6 opciones tecnológicas disponibles, cuáles de ellas serían las más adecuadas, para llevar a cabo la investigación, de acuerdo al objetivo de la misma, se definieron unos criterios técnicos de selección, que permitieron determinar las imágenes y datos disponibles, más adecuados para la realización de una correcta fotointerpretación, que permitiera la identificación de las características geomorfológicas de las áreas de estudio. Los parámetros que se tuvieron en cuenta durante el proceso de selección, fueron los siguientes:

Resolución espacial: 1m o menor, dado el nivel de detalle requerido.

Temporalidad: 2015-2011, dada la necesidad de contar con información actualizada de las áreas de estudio, que permitiera observar sus características geomorfológicas vigentes.

Longitud de onda: 0,52 mm a 0,60 mm, teniendo en cuenta las características de las áreas de estudio, fue necesario aprovechar la banda 2 , dado que es donde mejor reflejan las arenas, los corales y las algas.

Teniendo en cuenta los parámetros anteriormente descritos, se asignaron los valores de 1 en los casos donde las tecnologías disponibles cumplieran con esos parámetros requeridos y 0 en caso contrario, los puntajes finales, resultantes de la sumatoria de los puntos en cada una de las fuentes de información, determinó la conveniencia para su uso en la presente investigación. Como se puede observar en la tabla 3 y tabla 4.

Tabla 3. Tabla de decisión para la selección de fuentes cartográficas en la **Isla Cayos de Serrana**. El valor (1) equivale a cumple, el valor (0) equivale a no cumple.

Isla cayos de Serrana						
Criterios de selección	LiDAR	Ortofotografía	Ikonos	Landsat 8	Ópticas FAC	Aerofotografías métricas digitales
Resolución espacial (0.25 - 1 metro)	1	1	1	1	1	1
Longitud de onda	1	1	1	1	1	1
Temporalidad (Año min -Año max)	1	1	0 (2007)	1	1	1
Total	3	3	2	3	3	3

Fuente: Autores.

Tabla 4. Tabla de decisión para la selección de fuentes cartográficas en la **Isla Cayos de Serranilla**. El valor (1) equivale a cumple, el valor (0) equivale a no cumple.

Isla Cayos de Serranilla						
Criterios de selección	LiDAR	Ortofotografía	Ikonos	Landsat 8	Ópticas FAC	Aerofotografías métricas digitales
Resolución espacial (0.25 - 1 metro)	0	1	1	1	1	0
Longitud de onda	0	1	1	1	1	0
Temporalidad (Año min -Año max)	0	1	0 (2007)	1	1	0
Total	0	3	2	3	3	0

Fuente: Autores.

Una vez se seleccionaron las fuentes de información a utilizar, se realizó la recopilación de las mismas, como se relaciona en la tabla 5 y tabla 6.

Tabla 5. Datos e imágenes disponibles para la **Isla Cayos de Serrana**.

Isla cayos de Serrana			
Fuente cartográfica	Nombre archivo	Resolución espacial	Formato digital
Ortofotomosaico	Serrana_Magna_far-West.ecw	0.5 m x 0.5 m	.ecw
Imagen satelital Landsat 8 en Banda 2	LC80130502014132LGN00_B2	30 m x 30 m	.tiff
TIN Dataset Batimetría con base en isobatas	Tin_bat_serrana.tiff		.TIN Dataset
LAS Dataset (249 LAS Files)	SERRANA_COM.lasd	LAS Point172,721,098	lasd

Fuente: Autores.

Tabla 6. Datos e imágenes disponibles para la **Isla Cayos de Serranilla**.

Isla cayos de Serranilla			
FUENTE CARTOGRAFICA	NOMBRE ARCHIVO	RESOLUCIÓN ESPACIAL	FORMATO DIGITAL
Ortofotografía	serranilla_geo_ISL00855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000, 100, 1002, 1003.	0.25 m x 0.25 m	Raster
Banda 2	LC80130492014228LGN00_B2	30 m x 30 m	TIFF
Batimetría con base en isobatas	Tin_bat_serranilla.tin		TIN Dataset

Fuente: Autores.

Por otra parte, se realizó la recopilación de estudios, cartografía impresa y digital existente del área de estudio para determinar qué clase de trabajos se llevaron a cabo en la zona y tomarlos como punto de partida para el presente trabajo de grado (Tabla 7).

Tabla 7. Listado de investigaciones recopiladas para el área de estudio.

Título	Autores	Año
Caracterización Geomorfológica del Sector Suroccidental del Mar Caribe.	Natasha Tabares Gaviria (Geóloga) Juan Manuel Soltau (In Hidrógrafo) Jesús Díaz (Cartógrafo Náutico)	1996
Áreas coralinas de Colombia	INVEMAR	2000
The Caribbean coral reefs of Colombia	Jaime Garzón – Ferreira Juan Manuel Díaz	2003
Esquemas espaciales de zonación ecológica y morfología de las lagunas de los atolones y complejos arrecifales de un archipiélago oceánico del Caribe: San Andrés y Providencia (Colombia)	Juan Manuel Díaz	2005
Análisis multitemporal de la línea de costa de Cayo Serrana	José Andrés Díaz Ruiz	2009
Estudio de línea de costa del Cayo Serranilla	Jesús Andrés Zambrano Pinzón	2010
Estabilización Geomorfológica de los cayos del archipiélago de San Andrés y Providencia por la Escuela Naval Almirante Padilla	Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”. ENAP	2010
Atlas de la Reserva de Biósfera Seaflower	INVEMAR - CORALINA	2012

Fuente: Autores.

Así mismo, se tuvo en cuenta la actualización del “Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia” del Instituto de Investigación Marinas y Costeras (INVEMAR) en el año 2014 a una escala de 1:100.000, con lo que fue posible obtener información del área de estudio, para llevar a cabo en el transcurso de la clasificación y zonación de los corales, una comparación de los resultados obtenidos; gracias al apoyo de la Coordinadora de Investigación e Información para la Gestión Marina y Costera GEZ, Ph.D Carolina García Valencia y su equipo de trabajo.

7.2 Procesamiento de la información

Para poder llevar a cabo la interpretación de las imágenes, fue necesario realizar la adopción del sistema único de referencia horizontal, efectuar el tratamiento digital a las imágenes y datos que lo requirieran, generar los Modelos Digitales de Terreno (MDT) para los datos LiDAR y Modelos Digitales Batimétricos (MDB) en el caso de la batimetría. Finalmente se realizó la digitalización de las unidades geomorfológicas en ambiente SIG para así obtener la cartografía de zonación de corales.

7.2.1 Isla Cayos de Serrana

7.2.1.1 Adopción del sistema único de referencia horizontal:

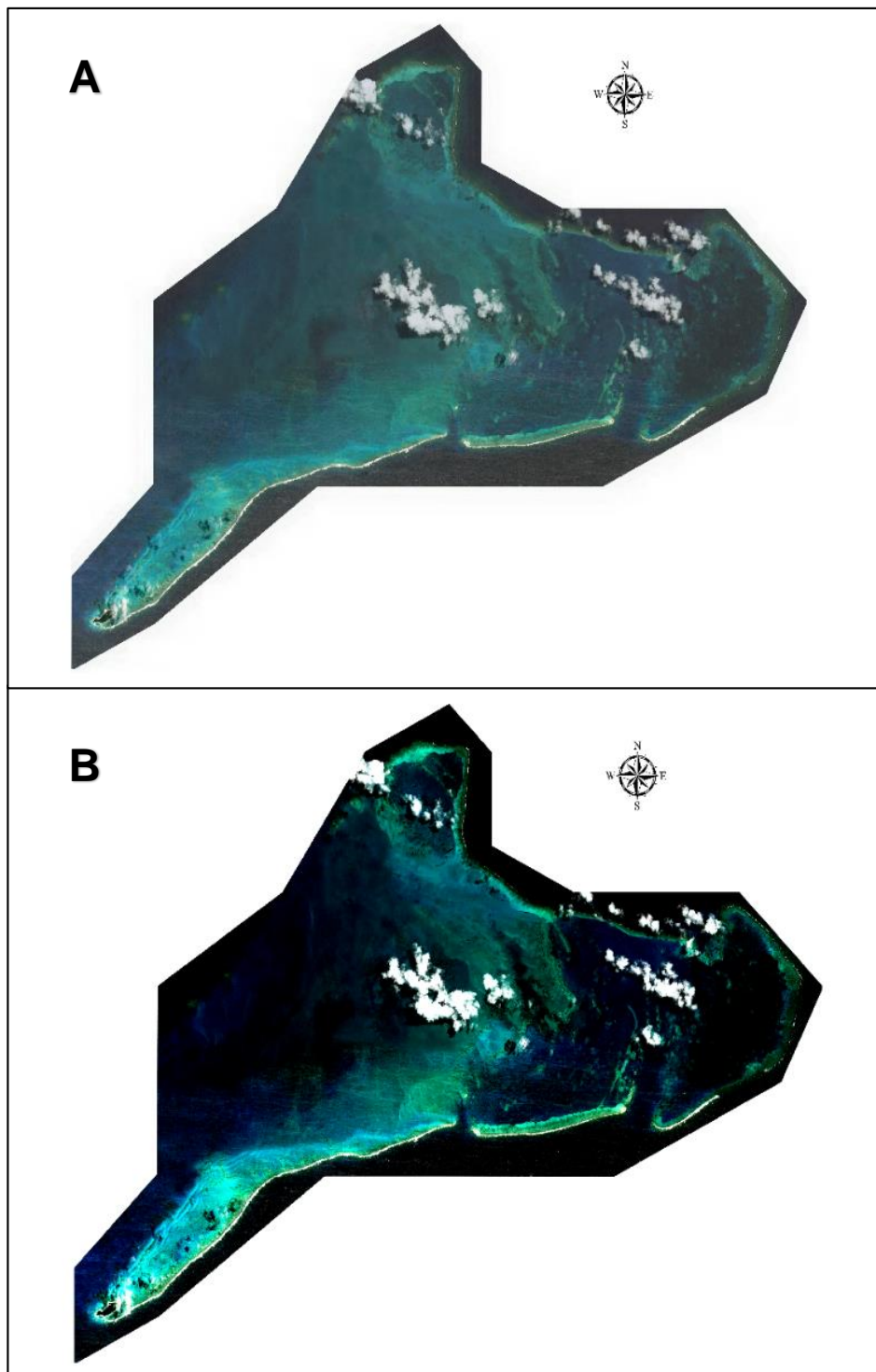
Con el objetivo de contar con un sistema de referencia único que permita superponer espacial y temporalmente la totalidad de la información recopilada (Ortofotografías, imágenes, datos LiDAR y cartografía existente del área de estudio), se efectuó la transformación digital correspondiente para asignar, a la información, el sistema de referencia horizontal denominado MAGNA ,origen cartográfico Oeste Oeste-MAGNA (4°35'46.3215"N; 80°04'39.0285"W), lo que permitió estar de acuerdo con el sistema de coordenadas oficial del país implementado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

7.2.1.2 Tratamiento digital de imágenes:

Se llevó a cabo utilizando el software ArcGIS 10.1 para los principales tratamientos digitales (mejoramientos de la calidad de las imágenes). Esto facilitó y permitió la interpretación visual del contenido de las imágenes, enfocado hacia la identificación y delimitación de la zonación de corales.

Dentro de la información disponible para la Isla Cayos de Serrana se contó con un ortofotomosaico de alta resolución espacial (0.5m x 0.5m), el cual, a primera vista permitió realizar una buena interpretación; sin embargo, se realizó un ajuste en contraste del 40% (Figura 23), lo que permitió mejorar la definición de los límites de la zonación de corales.

Figura 23. A. Ortofotomosaico desplegado en ArcMap sin tratamiento digital, **B** Ortofotomosaico con ajuste de 40% en contraste. Obsérvese la zonación de corales más definida.



Fuente: Autores.

Para la imagen Landsat 8 en banda 2 (Figura 24) se realizó un ajuste en contraste del 5%; de esta manera se pudo identificar las zonas con presencia de coral, algas y arenas, teniendo en cuenta que la reflectancia de estos compuestos es mayor en esta banda. No obstante, la resolución espacial de la imagen (30 m x 30 m) no permitió apreciar específicamente los detalles durante la digitalización debido al gran tamaño de cada pixel. Esta imagen fue necesaria para la digitalización del Atolón, el cual hace parte de la clasificación según Darwin (1842) y para zonas de gran tamaño que hacen parte de las clasificaciones de Wiens (1962) y Hopley (2006).

Figura 24. Imagen Landsat 8 de Serrana en Banda 2 con 5% de ajuste en contraste.



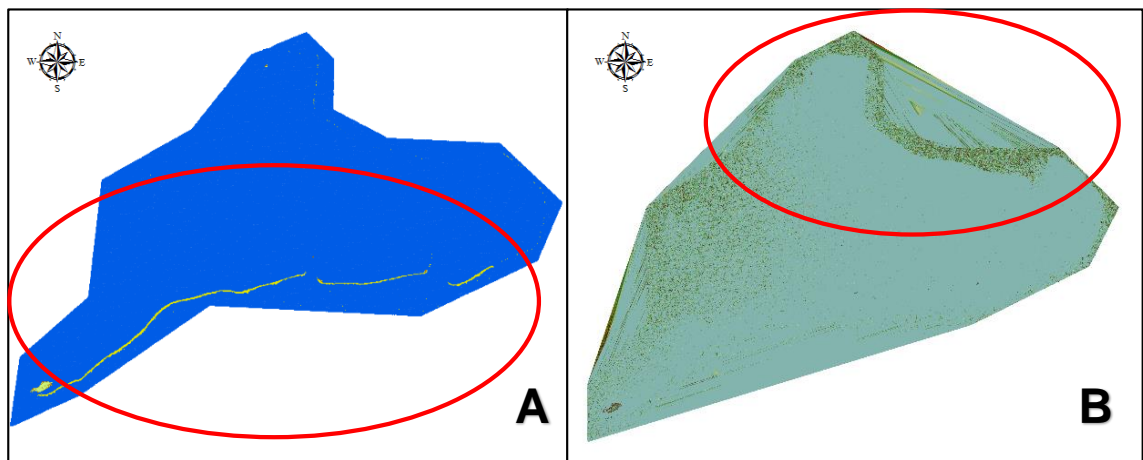
Fuente: Autores.

Con todos los archivos LiDAR (LAS Files) disponibles de la Isla Cayos de Serrana, se creó un archivo de almacenamiento “LAS Dataset” con el nombre de SERRANA_COM.lasd el cual posteriormente fue cargado en el módulo de ArcGis “ArcMap”, para poder visualizar la isla como un todo, dado que la visualización de

la imagen no permitía apreciar en detalle la morfología de la isla fue necesario realizar el ajuste de discriminación de la morfología a través de la herramienta denominada “LAS classification code”, permitiendo observar los puntos de acuerdo con su respectiva clasificación morfológica (Figura 25). Esta forma de visualizar los datos permitió identificar la zona más emergida a digitalizar, la cual se pudo apreciar en mayor proporción en la parte sur de la Isla Cayos de Serrana (Figura 25A). Por otro lado, hacia el sector Este (E), Nor-Este (NE) también se visualiza una zona emergida, pero en menor proporción (Figura 25B).

Para identificar la parte más emergida en el sector Este (E), Nor-Este (NE) del área de estudio, fue necesario realizar un modelo digital de terreno (MDT) y a partir de este se realizó una transformación del archivo LAS Dataset a un archivo Raster, para posteriormente convertirlo a un Shape File de contorno, lo que permitió crear finalmente Triangulated Irregular Network (TIN) (Figura 25 B).

Figura 25. A. Visualización del archivo LAS Dataset en LAS Classification code. **B.** Archivo TIN a partir del Shape File de contorno creado con los LAS Dataset.



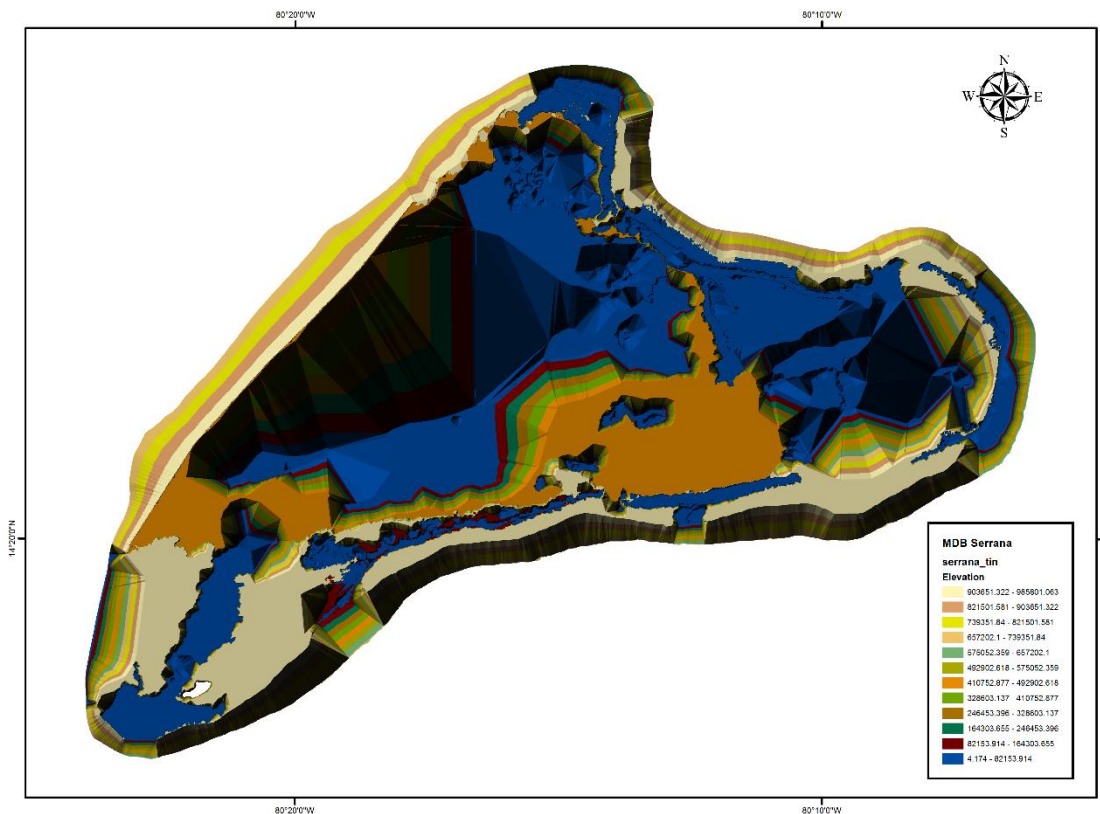
Fuente: Autores.

7.2.1.3 Generación de modelos digitales batimétricos.

Con base en los datos batimétricos (Isobatas) entregados por el IGAC, tomados a partir de imágenes de sensores remotos de la Isla Cayos de Serrana, se generó un Modelo Digital Batimétrico (MDB). Para ello a través de la utilización de software especializado (ArcGIS), se efectuaron interpolaciones mediante la utilización de la opción “Create TIN” (Triangulated Irregular Network)” del Arctool-box, obteniendo una representación tridimensional digital de la batimetría (suelo descubierto, sin presencia de vegetación ni de construcciones) (Figura 26).

El modelo Batimétrico permitió corroborar la zonación en función de su batimetría, facilitando de esta manera la interpretación de sus límites.

Figura 26. TIN de batimetría resultante de la transformación de las isobatas suministradas por el IGAC.



Fuente: Autores

7.2.1.4 Interpretación visual y análisis de imágenes:

Teniendo en cuenta la literatura consultada con relación a la clasificación de zonas de arrecifes de coral y de acuerdo en el cuadro de los tres tipos de clasificación presentado en el marco teórico, fueron claras las características de las zonas a interpretar sobre las imágenes. Como anteriormente se le asignó a todas las imágenes el mismo sistema de referencia horizontal, fue posible sobreponerlas y finalmente visualizar las zonas a digitalizar.

Para la realización del análisis de las imágenes se tomó como base cartográfica un ortofotomosaico. Dada su alta resolución espacial (0.5 m x 0.5 m), permite identificar las zonas requeridas, especialmente en las clasificaciones planteadas por Wiens (1962) y por Hopley (2006), la cuales tienen gran nivel de detalle; sin embargo, en varios sectores se identificó presencia de nubes, lo que no permitió delimitar correctamente algunas zonas, como por ejemplo, en la isla Serrana, la cresta arrecifal (Figura 27A).

Al momento de realizar la identificación de las áreas a digitalizar dentro de la clasificación según Hopley, fue necesario sobreponer la imagen Landsat 8 en banda 2 al ortofotomosaico, con el fin de confirmar la presencia de corales, algas, arenas o detritos; así mismo se tomaron las investigaciones realizadas anteriormente como un elemento de referencia para lo interpretado.

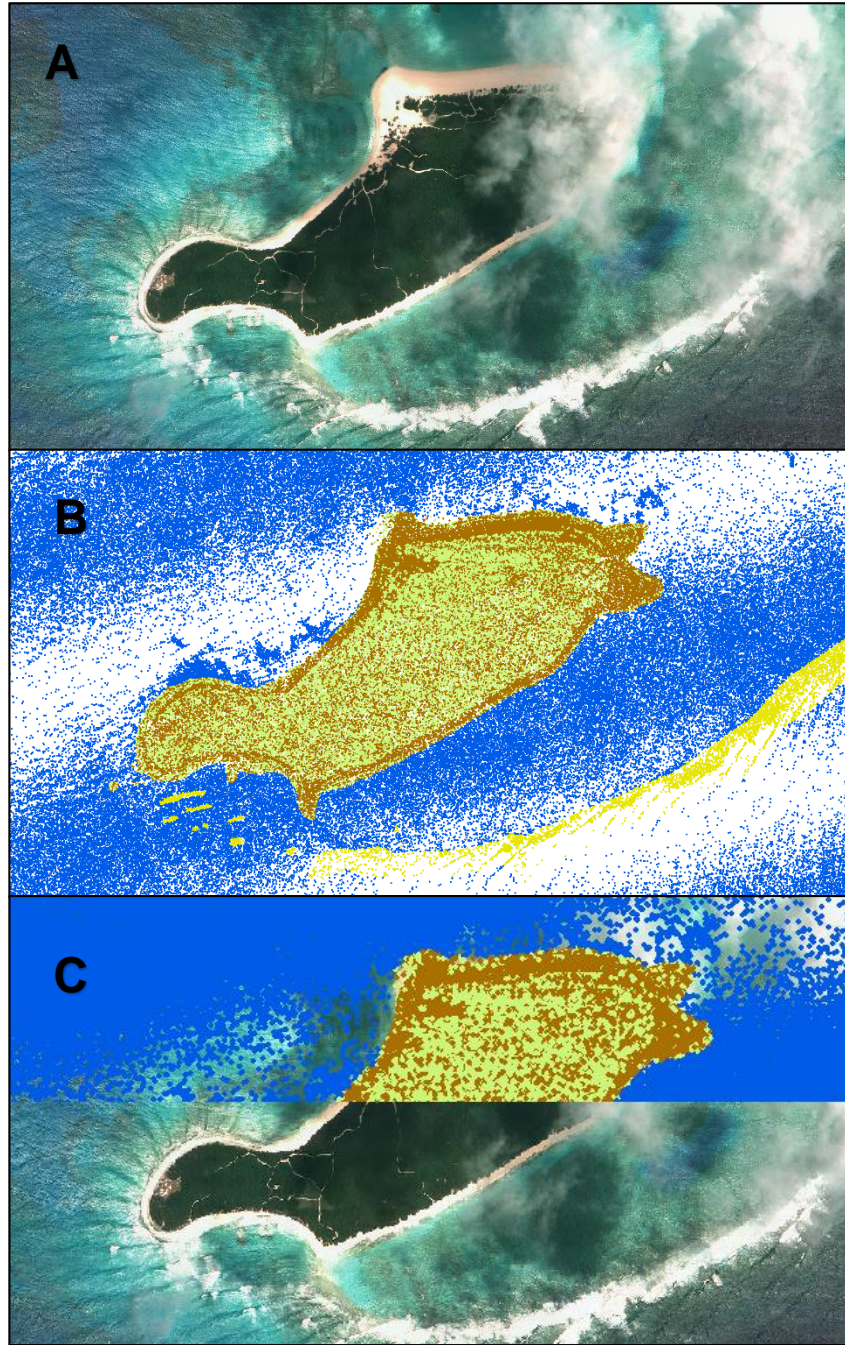
En el caso de los datos LiDAR en la opción LAS Classification code fue posible identificar la zona más somera de la Cresta Arrecifal (Crest Reef) y apreciar claramente la isla Serrana (figura 27B). La principal característica de este tipo de datos es su alta resolución, ya que presentan una densidad aproximada de 4

puntos/m²; lo que permite contar con una representación bastante precisa de las características del terreno, especialmente si se compara con la de los modelos digitales globales de 30, 60 y 90 metros.

Para realizar la interpretación visual e identificar la zonación de corales de acuerdo con las tres clasificaciones previamente establecidas, se utilizó el software ArcGis el cual cuenta con la opción Swipe que permite, una vez se tengan dos imágenes sobre puestas, deslizar una sobre la otra (Figura 27C), de esta manera se corroboró y se completó la interpretación sobre el área de trabajo.

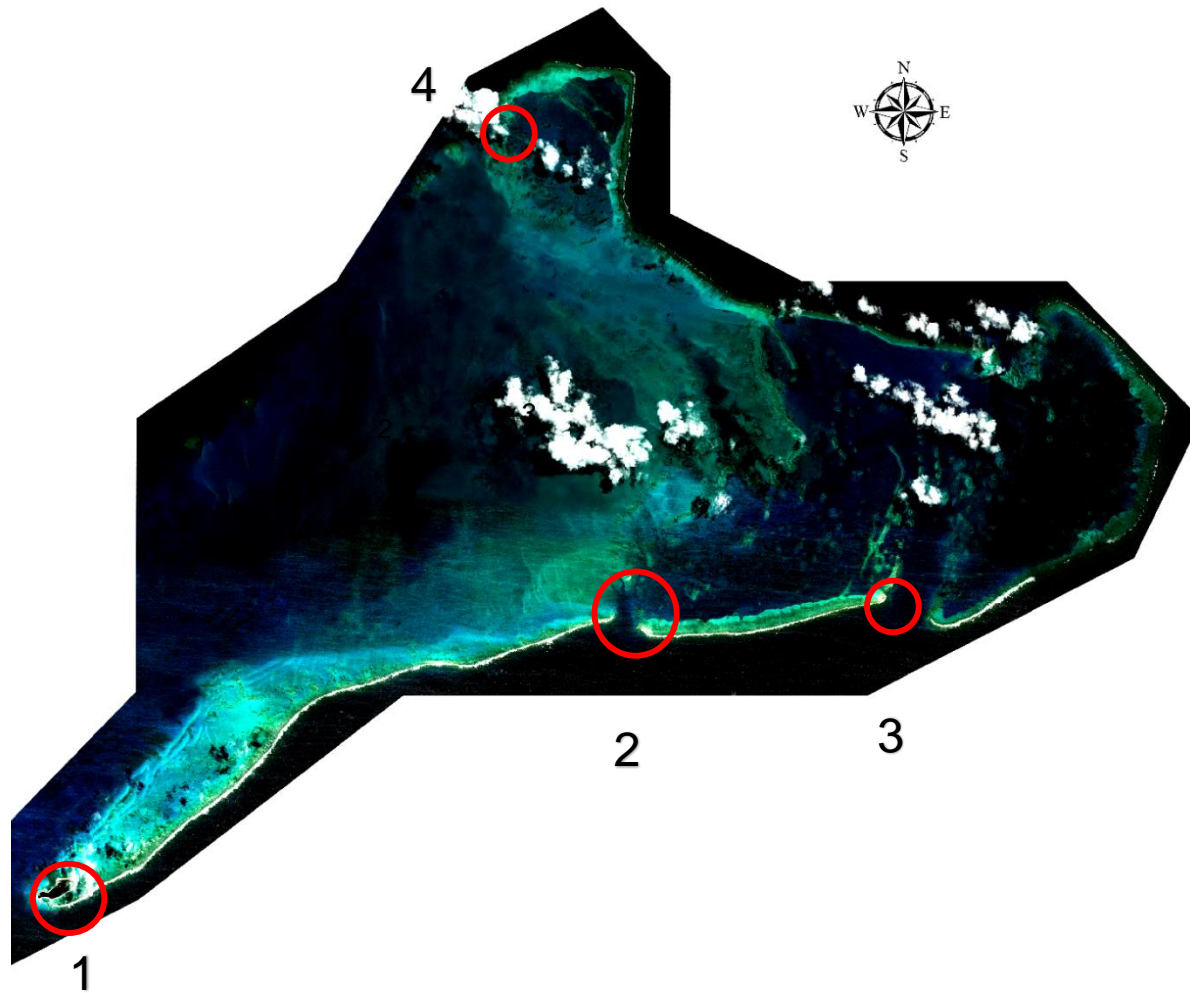
Debido a la alta precisión de los Datos LiDAR, se pudo identificar en el archivo Raster creado a partir de esta información, las zonas emergidas de toda el área de estudio, zonas que cumplen con las características de isla o cayos de arena (Figura 28). Esta información se corroboró con el Raster (Figura 29) y el TIN que se creó a partir del Shape File de contorno extraído de los LAS Dataset (Figura 30).

Figura 27 **A.** Isla Serrana vista desde el Ortofotomosaico, **B.** Isla Serrana en LAS Classification code, **C.** Superposición de los datos LAS Dataset y el Ortofotomosaico, empleando la opción swipe para completar la interpretación



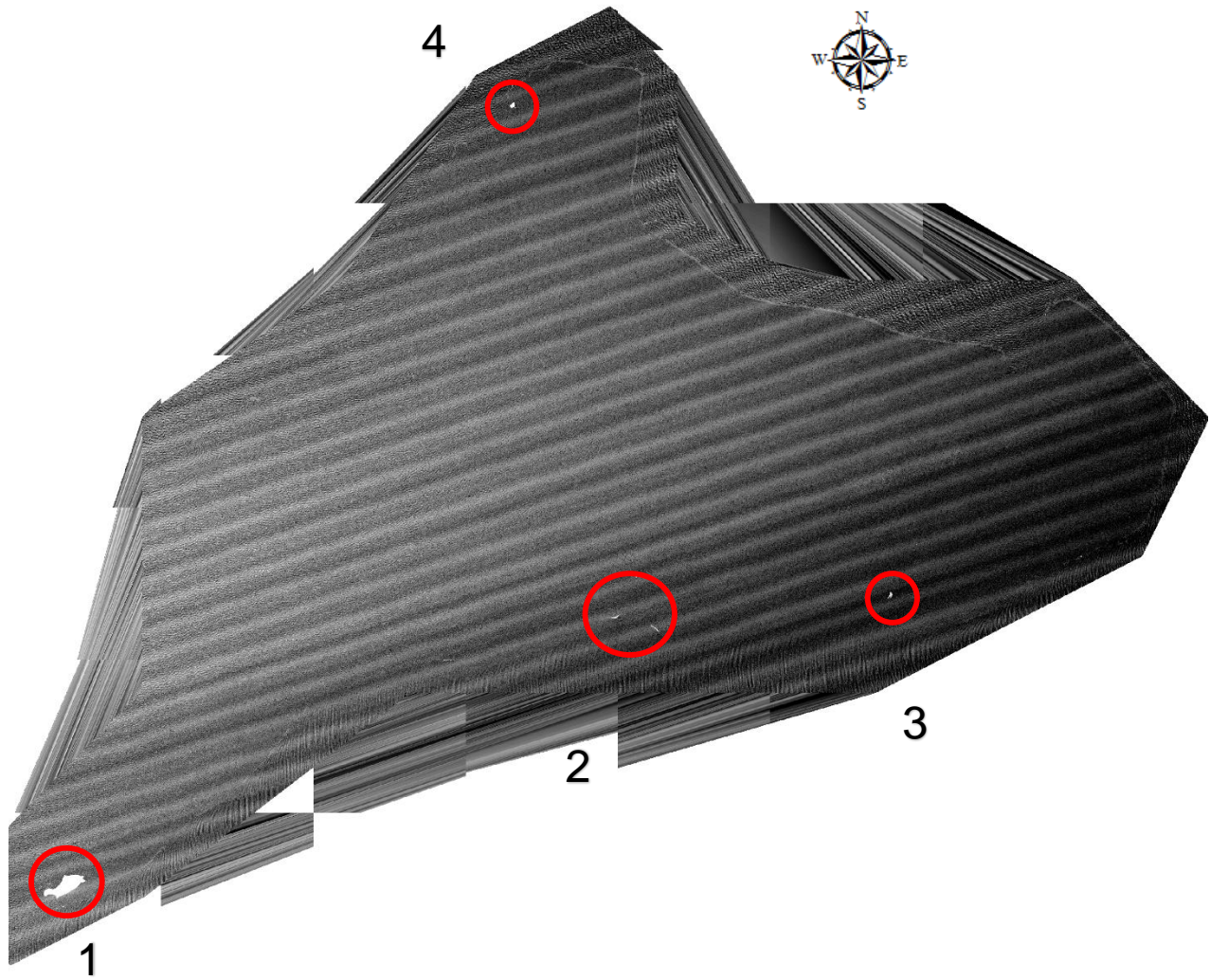
Fuente: Autores.

Figura 28 Ortofotomosaico. Islas y cayos de arena identificados en el área de estudio **1.** Isla Serrana, **2.** Cayo del sur. **3.** Cayo Sur Este **4.** Cayo del Norte.



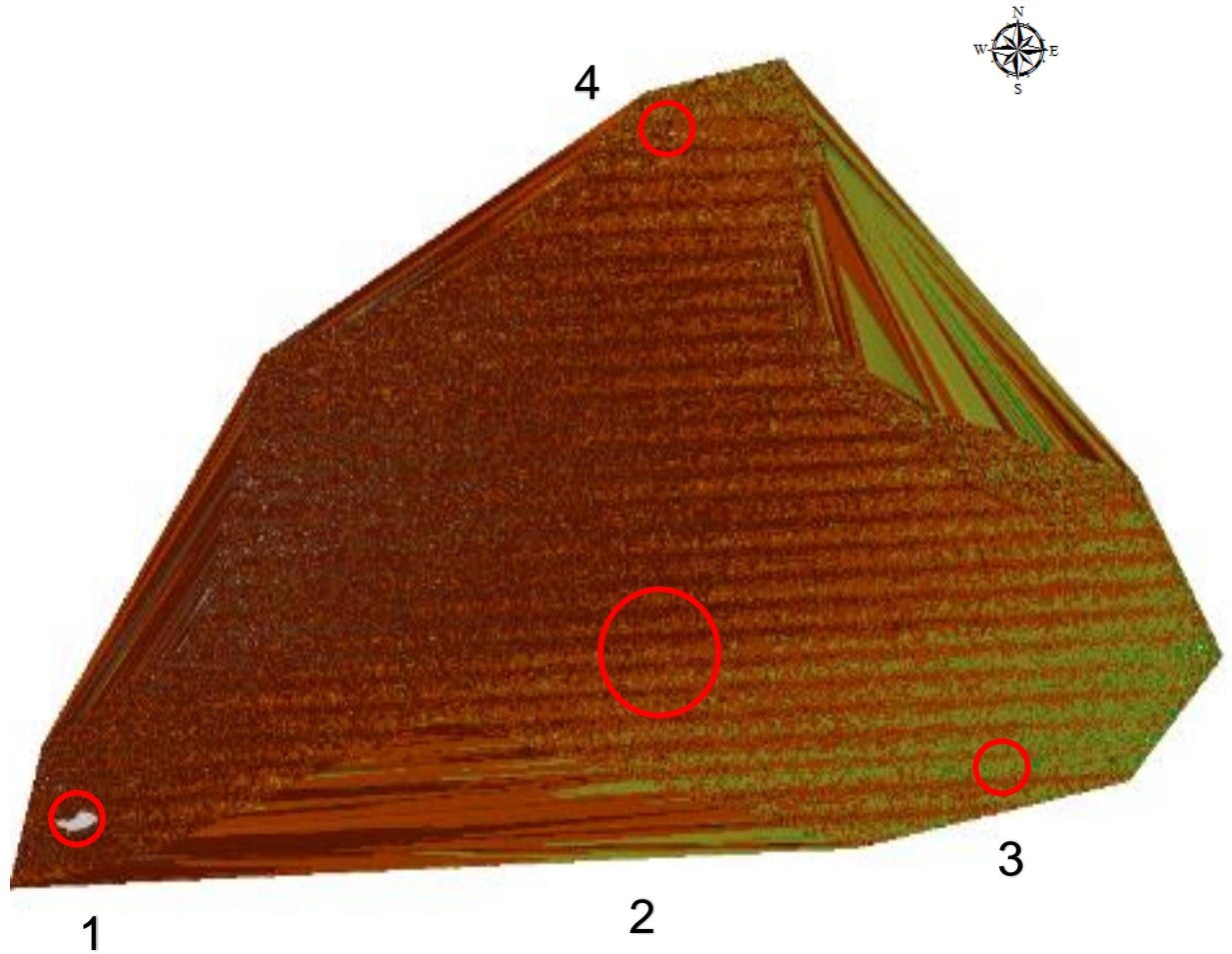
Fuente: Autores.

Figura 29 Raster a partir de LAS Dataset. Islas y cayos de arena identificados en el área de estudio **1.** Isla Serrana, **2.** Cayos del sur, **3.** Cayo Sur Este **4.** Cayo del Norte.



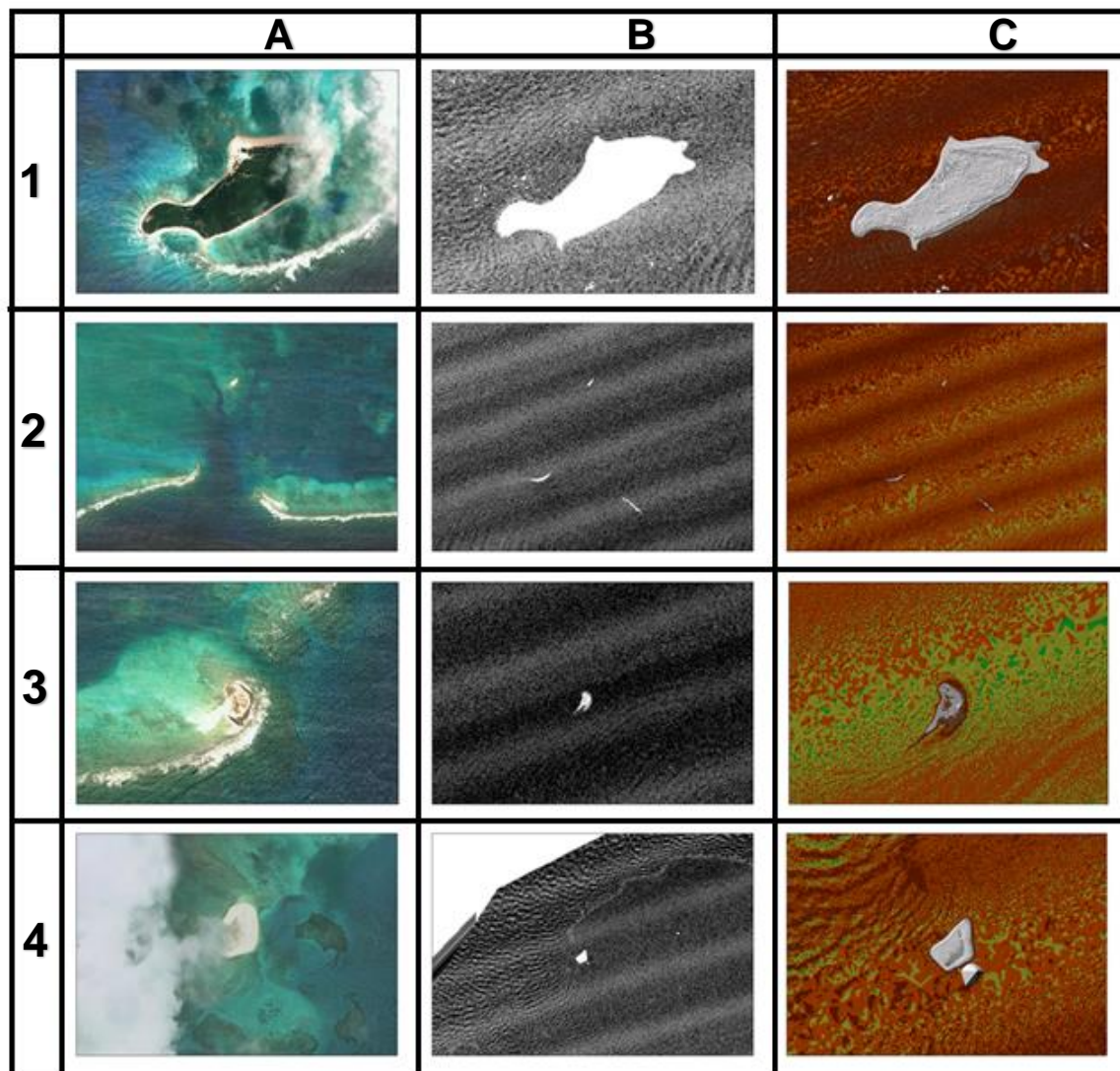
Fuente: Autores.

Figura 30. TIN a partir de LAS Dataset. Islas y cayos de arena identificados en el área de estudio
1. Isla Serrana, 2. Cayo del sur. 3. Cayo Sur Este 4. Cayo del Norte.



Fuente: Autores.

Figura 31. Ampliaciones de las Islas y Cayos identificadas en el Ortofotomosaico, comparación entre los archivos Raster y TIN resultante de los datos LiDAR.
A. Ortofotomosaico **B.** imagen Raster a partir de LAS Dataset, **C.** imagen TIN a partir de LAS Dataset.



Fuente: Autores

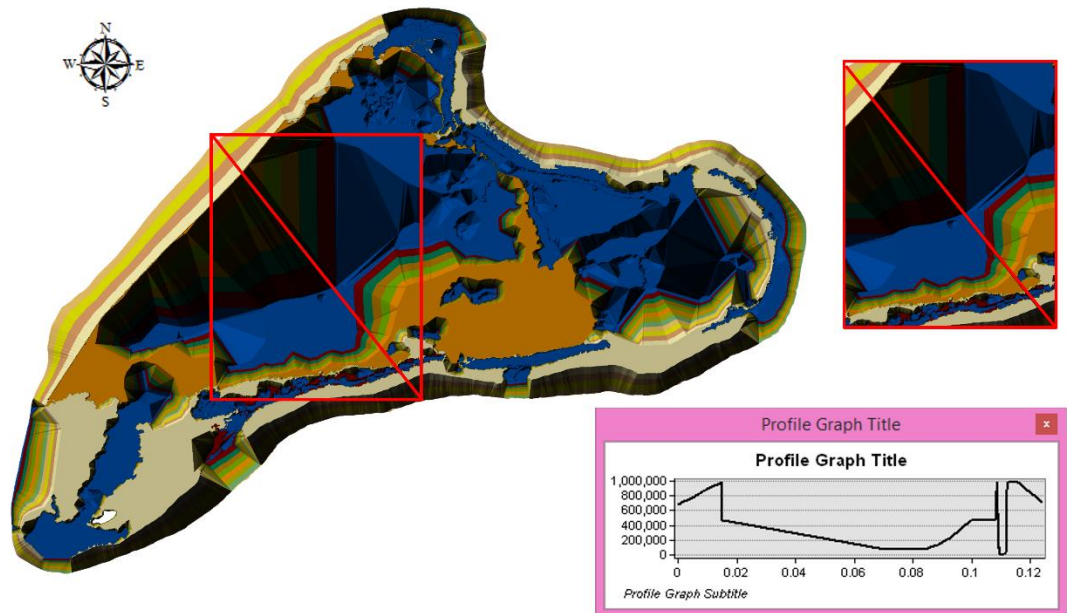
7.2.1.5 Digitalización de unidades geomorfológicas:

Con la utilización de tecnología de SIG (ArcGIS) y empleando las imágenes disponibles, se llevó a cabo sobre un archivo tipo Shape File, la digitalización de las diferentes características geomorfológicas que se observaron en la Isla Cayos de Serrana. Para cada tipo de clasificación de zonación de corales (Darwin 1842,

Wiens 1962 y Hopley 2006), fue necesaria la creación de tres Shape Files, teniendo en cuenta que uno de los resultados finales, será la creación de mapas temáticos donde se ilustrará claramente la zonación de corales en las áreas de estudio.

Sobre cada shape file se realizó la delimitación de la zonación de corales con polylíneas. La digitalización de cada uno de los límites de la zonación, se realizó de forma manual en el software de manera detallada, teniendo en cuenta principalmente la clasificación según Hopley (2006), ya que tiene mayor número de zonas a demarcar; así mismo se realizó una verificación de la zonas geomorfológicas delimitadas a través de transeptos realizados sobre los MDB (Modelos Digitales Batimétricos) (figura 32).

Figura 32 Perfil del transepto que pasa por la laguna del atolón de Serrana.



Fuente: Autores

7.2.1.6 Generación de la capa digital de geomorfología:

Una vez finalizada la interpretación y digitalización de la zonación de corales con entidades lineales (polylínea) se efectuó la transformación a entidades tipo polígono a través de la herramienta ArcToolbox, de esta manera se obtuvo un shape file tipo polígono al cual, se le incluyeron atributos asociados, con el fin de diferenciar y complementar las zonación de corales (Figura 33). Así mismo a estos shape files se les introdujeron atributos (Tabla 8).

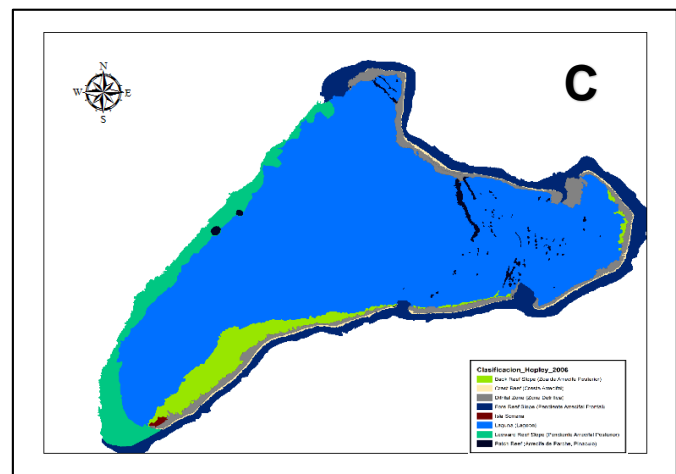
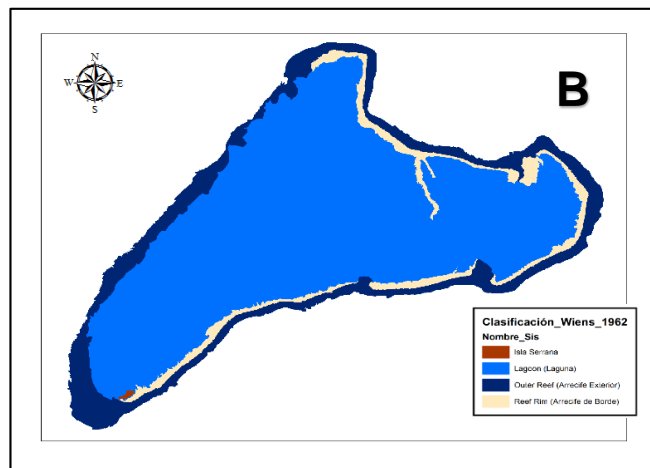
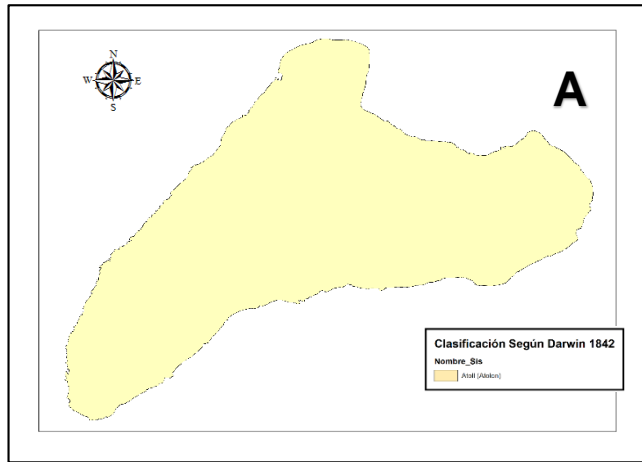
Tabla 8. Ejemplo tabla de atributos asociados utilizados en la zonación de corales en el área de estudio.

Sistema de clasificación	Nombre zonación	Fuente cartográfica	Datum	Formato digital	Resolución espacial
Clasificación según Darwin	Atolón (Atoll)	Serrana_Magna_Far_West, LC80130502014132LGN00_B2	Magna Colombia Oeste	Ecw tiff	0.5 x 0.5 30 x 30

Fuente: Autores.

Los tres tipos de clasificaciones tienen algunas zonas en común, como por ejemplo, la laguna, o la parte más externa, así que por uniformidad se le asignaron barras de colores similares.

Figura 33. Shape File con entidades tipo polígono con su respectiva topología acuerdo clasificaciones establecidas para la Isla Cayos de Serrana **A.** Clasificación por Darwin, **B.** Clasificación por Wiens, **C.** Clasificación por Hopley.



Fuente: Autores.

7.2.2 Isla Cayos de Serranilla

7.2.2.1 Adopción del sistema único de referencia horizontal:

De forma similar a como se describió en el numeral 7.2.1.1 para la isla cayos de Serrana, se adoptó el sistema de referencia horizontal para la Isla de Serranilla.

7.2.2.2 Tratamiento digital de imágenes:

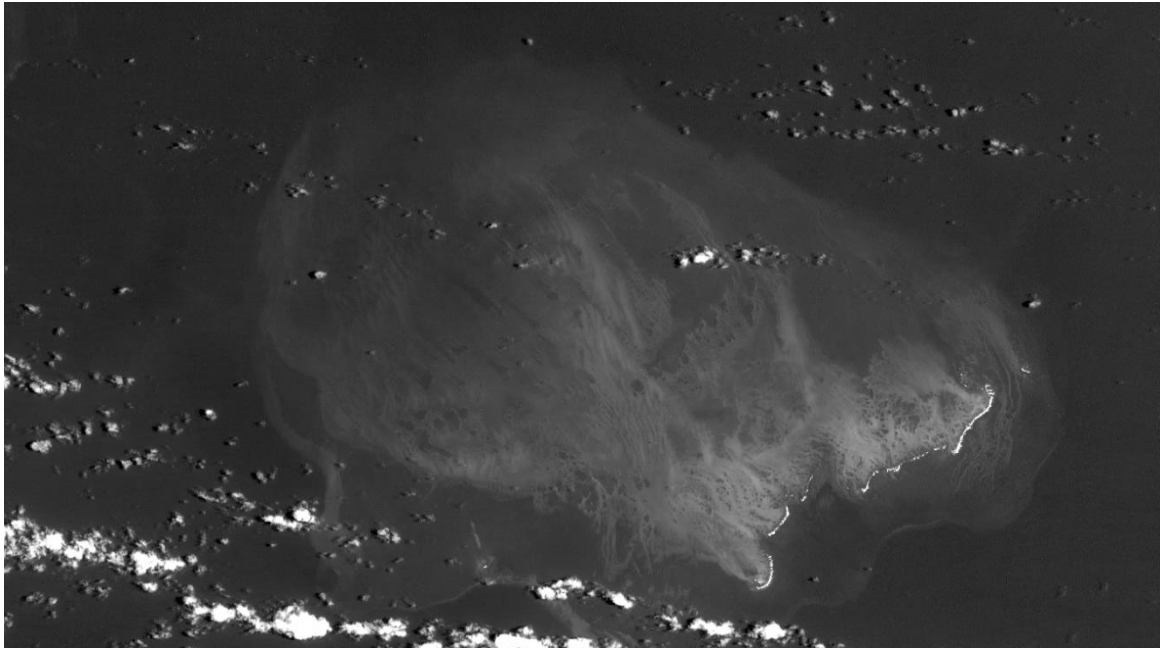
Los principales tratamientos digitales (mejoramientos de la calidad de las imágenes), se llevaron a cabo utilizando el software ArcGIS para cada una de las imágenes disponibles de la Isla Cayos de Serranilla, permitiendo de esta forma, la recopilación y el despliegue de las mismas, orientado hacia la identificación y delimitación de unidades geomorfológicas.

Dentro de los mejoramientos digitales que se realizaron, fue necesario realizar un ajuste en el contraste a la banda 2 de la imagen Landsat 8- **LC80130492014228LGN00_B2** del 5% (Ver figura 34), con el fin de resaltar las zonas con presencia de corales, algas y arenas, teniendo en cuenta que la reflectancia de estos compuestos es mayor en esta banda, facilitando la identificación de las zonas durante el proceso de foto-interpretación.

Con la utilización de la herramienta “Swipe” de ArcGis, permitió hacer una comparación entre las zonas observadas e identificadas en las ortofotografías y las observadas en las imágenes Landsat 8, al mismo tiempo, lográndolo mediante la superposición de estos dos tipos de imágenes, con lo que se logró relacionar las zonas observadas, a pesar de las diferencias en resolución espacial de las mismas. (ortofotografías con resolución espacial de 0,25 m x 0,25 m y las imágenes Landsat 8 con resolución espacial de 30 m x 30 m).

Durante el tratamiento digital de las imágenes, no fue necesario realizar ningún otro mejoramiento, ya que fue fácil llevar a cabo la foto interpretación.

Figura 34. Imagen Landsat 8 en Banda 2 de la Isla Cayos de Serrana.

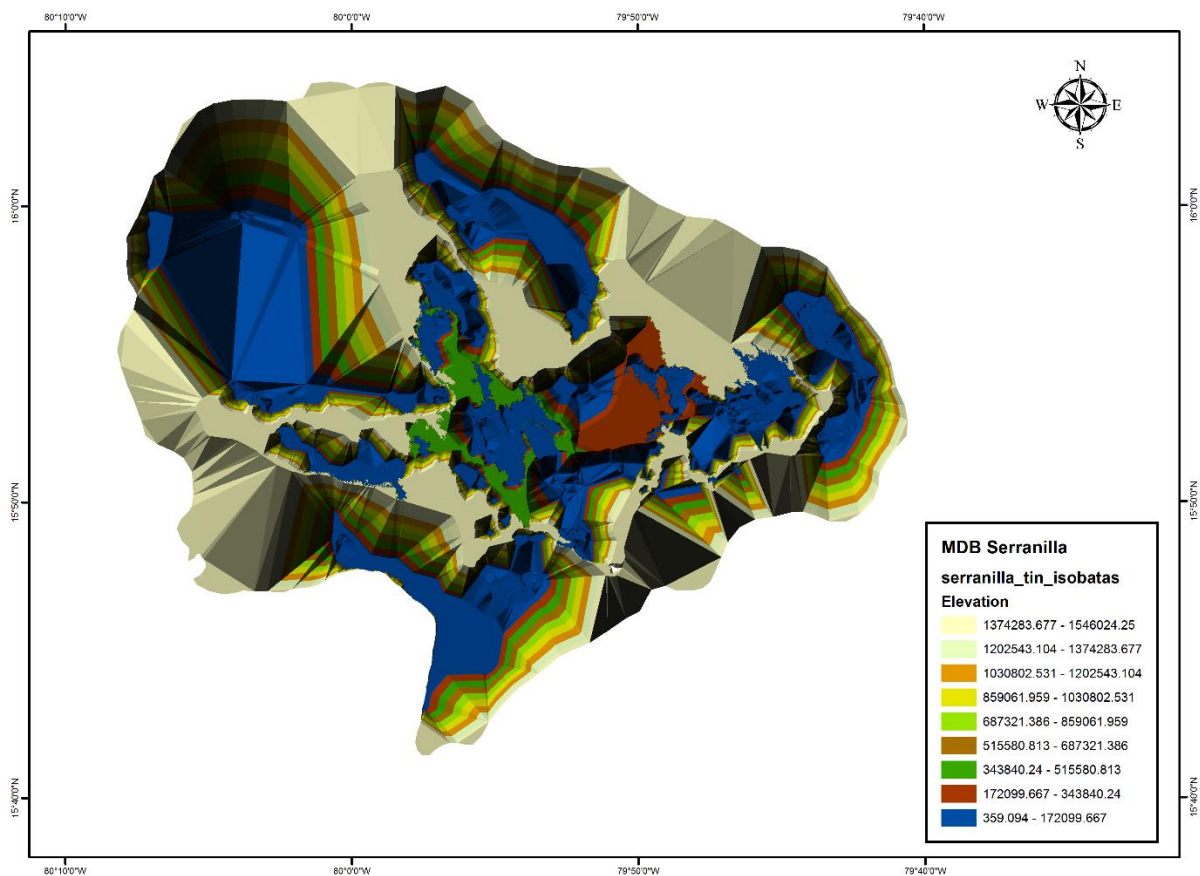


Fuente: Autores.

7.2.2.3 Generación de modelos digitales batimétricos:

Con base en los datos de isobatas, obtenidos a través del Modelo Batimétrico derivado de imágenes de alta resolución y de imágenes Landsat ETM+ y LDCM, en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, obtenidos por intermedio de la Dirección General Marítima, durante el desarrollo del trabajo “Procesamiento Digital de Imágenes Aplicado a Manejo de Zonas Costeras e Insulares Fase I”, realizado entre el Ministerio De Defensa Nacional – Dirección General Marítima (DIMAR) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), se generó un Modelo Digital Batimétrico (MDB). Para ello fue necesario utilizar la herramienta “Create TIN” (Triangulated Irregular Network)” del Arctoolbox del software ArcGIS, dando como resultado una representación tridimensional digital de la batimetría .Este modelo Batimétrico, permitió corroborar la zonación en función de su batimetría, facilitando de esta manera la foto interpretación (Figura 35).

Figura 35 Modelo digital batimétrico Isla Cayos de Serranilla



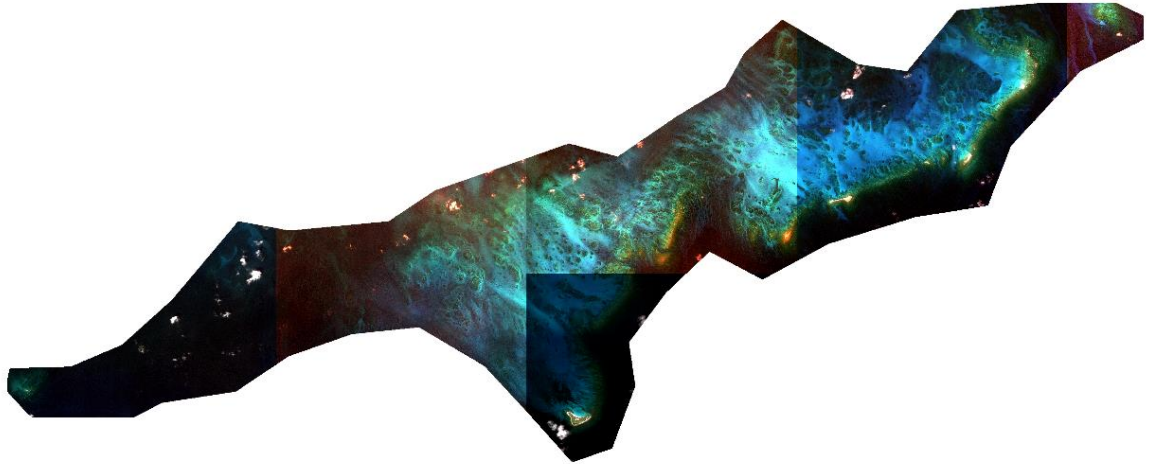
Fuente: Autores.

7.2.2.4 Interpretación visual y análisis de imágenes:

Una vez efectuados los tratamientos digitales de las imágenes disponibles, se establecieron cuáles de ellas eran las más adecuadas para ser utilizadas como base cartográfica.

Sobre la base cartográfica seleccionada (mosaico de 148 ortofotografías-imágenes tipo Raster (Figura 36) y la imagen LANDSAT 8), se efectuó el proceso de interpretación visual, identificando a través de la utilización de las técnicas y metodologías establecidas para la fointerpretación, los elementos y componentes presentes en las mismas, permitiendo con ello extraer las características geomorfológicas del área de estudio (Isla Cayos de Serranilla).

Figura 36. Mosaico de 148 imágenes raster (Ortofotografías) de la Isla Cayos de Serranilla.



Fuente: Autores.

7.2.2.5 Digitalización de unidades geomorfológicas:

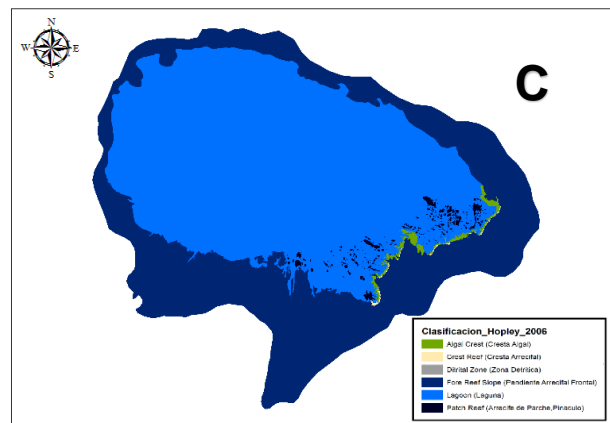
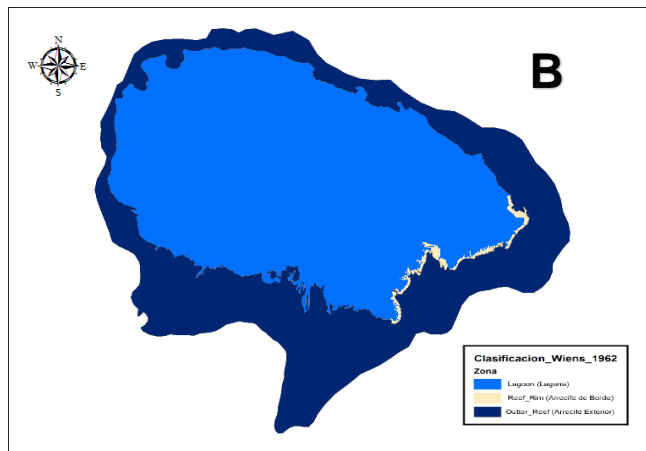
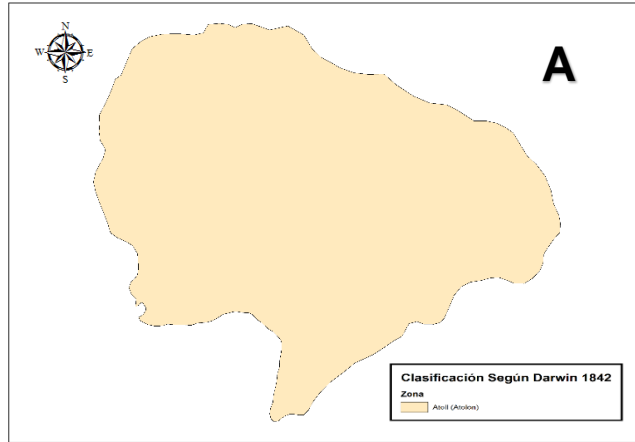
De forma similar a como se describió en el numeral 7.2.1.5 para la isla cayos de Serrana, se realizó la digitalización para la Isla cayos de Serranilla.

7.2.2.6 Generación de la capa digital de geomorfología:

Una vez terminada la interpretación y digitalización de la zonación de corales con entidades lineales, se efectuó la transformación de estas a entidades tipo polígono (Figura 37), a través de la herramienta ArcToolbox, donde de esta manera se obtuvo mediante la transformación un nuevo Shape File tipo polígono para cada clasificación. Así mismo a estos shape files se les introdujeron atributos.

Una vez finalizada la transformación de los tres shape files a entidades tipo polígono con su respectiva topología, fue posible asignar a cada atributo un color con el fin de diferenciar cada una de las zonas anteriormente digitalizada.

Figura 37. Shape File.shp con entidades tipo polígono Isla Cayos de Serranilla con su respectiva topología acuerdo clasificaciones establecidas **A.** Clasificación según Darwin, **B.** Clasificación según Wien, **C.** Clasificación según Hopley.



Fuente: Autores.

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

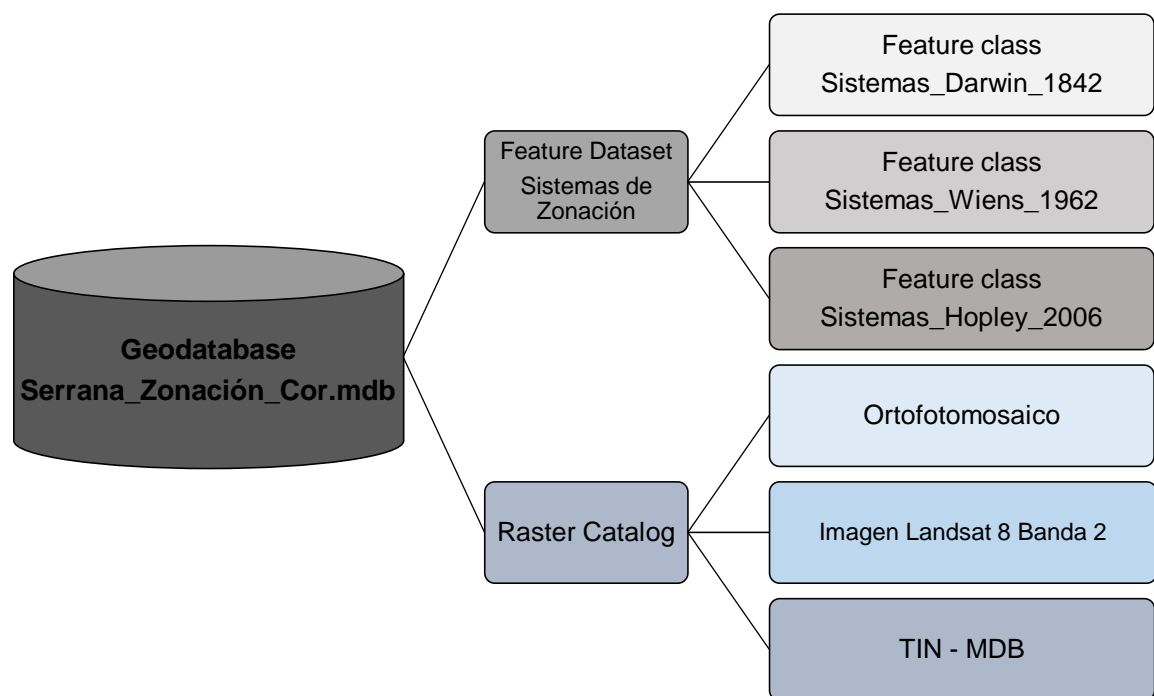
Una Geodatabase es un modelo de datos orientado a objetos que permite almacenar y caracterizar objetos espaciales de una forma más natural a través de la definición de tipos de objetos, relaciones topológicas, espaciales generales e interacciones (Briggs, 2009) en (Gómez & Afanador, 2009).

En general, se compone de Objects (objetos con propiedades y comportamientos que se pueden relacionar con otros objetos a través de relaciones), Object Classes (tablas que almacenan información no espacial relacionada con los objetos), Feature (objetos con forma específica de punto, línea o polígono que representan un objeto de la realidad), Feature Classes (agrupaciones de features con el mismo tipo de geometría, atributos y sistema de referencia espacial), Feature Datasets (contenedores de Feature Classes con la misma referencia espacial), Spatial references (comprende la definición del sistema de coordenadas a utilizar, el dominio espacial o rango de coordenadas permitido y la precisión o resolución a utilizar), Domains (grupo de valores válidos para los campos de los atributos de objetos), Subtypes (distinción de características dentro de una misma capa), Relationships, Relationship Classes, Geometric networks, Labels y Annotations (Briggs, 2009) en (Gómez & Afanador, 2009).

Dentro de los principales beneficios de la utilización de esta Geodatabase, se pueden mencionar el almacenamiento centralizado de los datos espaciales, el mantenimiento de la integridad de los datos espaciales, las capacidades para análisis espacial y la posibilidad de edición. (Gómez & Afanador, 2009).

De acuerdo con el modelo de Geodatabase personal creado para el trabajo como Serranilla_Zonación_Cor (Figura 38), contiene un Feature Dataset correspondiente al “Sistema de Clasificación”, el cual almacena 3 Feature Class con información Georeferenciada correspondiente a los tipos de clasificación de corales del área de estudio.

Figura 38 Diagrama de la Geodatabase generada para las áreas de estudio.



Fuente: Autores

7.2.4 Generación de cartografía geomorfológica digital e impresa.

Acuerdo lo establecido en tercer objetivo específico, se generó en un archivo (.mpk) con la cartografía digital geomorfológica de detalle de las Islas Cayos de Serrana a escala 1:70000 y la Isla Cayos de Serranilla en escala 1:105000. Esto permitirá contar con la información digital requerida para la impresión de la cartografía geomorfológica del área de estudio, utilizando el software ArcGIS.

7.2.5 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.

8. RESULTADOS

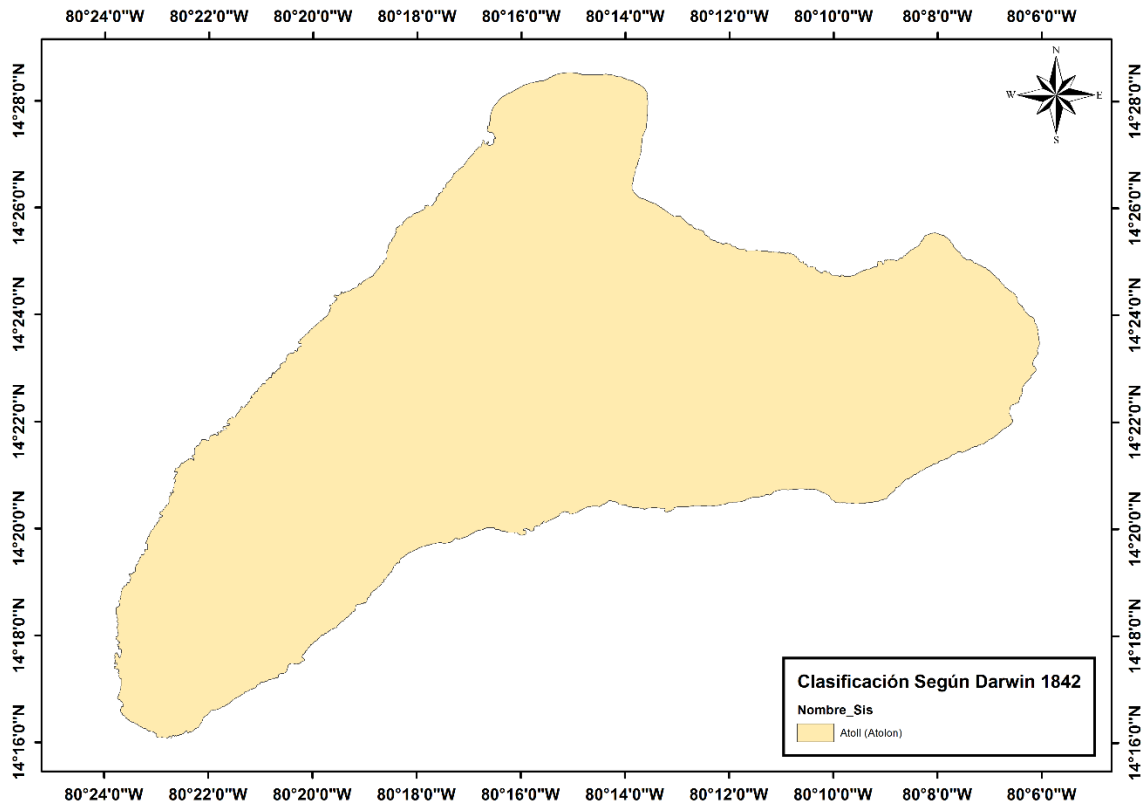
Como producto final, se obtuvieron tres mapas temáticos para cada una de las áreas de estudio, donde se observa la clasificación de arrecifes de coral de acuerdo con cada una de las clasificaciones propuestas por Darwin, Wiens, y Hopley respectivamente. Estos mapas temáticos fueron impresos a una escala de 1:100000.

8.1 Resultados Isla Cayos de Serrana

8.1.1 Clasificación según Darwin (1842)

Según la clasificación propuesta por Darwin, en la Figura 39 se observa, una única geoforma denominada Atolón (atoll), con las dimensiones presentadas en la tabla 9.

Figura 39. Clasificación de la Isla cayos de Serrana de acuerdo con la clasificación de Darwin 1842.



Fuente: Autores.

Tabla 9. Área total de la zona para la clasificación según Darwin 1842.

Nombre del sistema de clasificación	Área
Atoll (Atolón)	316746777.799 m2

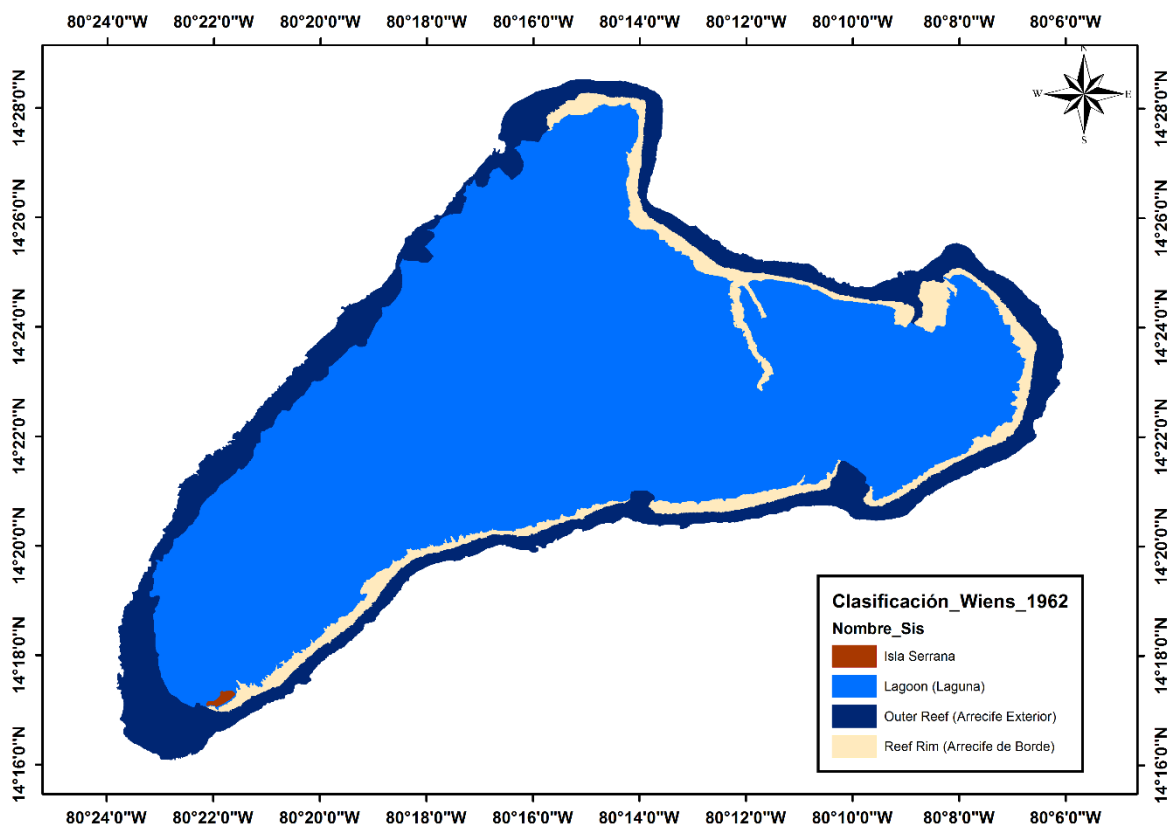
Fuente: Autores.

8.1.2 Clasificación según Wiens (1962).

Una vez se determinó que la Isla Cayos de Serrana, cumplía con las características de un atolón, se realizó una nueva clasificación más detallada, planteada por Wiens en 1962.

En el mapa de clasificación (Figura 40), se observa la laguna con características semi- abiertas, protegida por el Sur y parte del Este por el Arrecife de borde (Reef Rim), ocupando casi el 82% del área del atolón (atoll), como se muestra en la tabla 10. Así mismo se pudo observar que el Arrecife Exterior (Outter Reef), se encuentra casi continuo alrededor de toda la Isla Cayos de serrana.

Figura 40. Clasificación de la Isla cayos de Serrana de acuerdo con la clasificación de Wiens de 1962.



Fuente: Autores.

Tabla 10. Áreas totales de las zonas para la clasificación según Wiens.

Nombre del sistema de clasificación	Área
Reef Rim (Arrecife de Borde)	20.902.460.28 m ²
Outer Reef (Arrecife Exterior)	55.068.582.51 m ²
Laguna (Lagoon)	240.775.735 m ²
Isla Serrana	299.598.1939 m ²

Fuente: Autores.

8.1.3 Clasificación según Hopley (2006).

Este sistema de clasificación fue el más completo y detallado que se aplicó, teniendo en cuenta que no solo denota la morfología, si no también, el tamaño, la edad y la hidrodinámica propios de cada geforma que hace parte del área de estudio.

Como se puede observar en el mapa temático (Figura 41), La Isla Cayos de Serrana está rodeada en el sector Sur y Este por la Pendiente Arrecifal Frontal (Fore Reef Slope), la cual se encuentra en la parte exterior que da hacia el mar, desde la cresta arrecifal de cara a mar abierto. El arrecife que se forma en este sector es el más profundo, mientras que en la parte Nor-Oeste, Oeste se encuentra la Pendiente Arrecifal Posterior (Leeward Reef Slope), una zona resguardada de la alta energía de olas, debido a que se encuentra ubicada hacia sotavento del arrecife.

Se observa también en el sector Sur-Sur-Este, la presencia de una zona elevada de rompiente (tabla 11), denominada arrecife de Cresta (Crest Reef), caracterizada por estar compuesta de arrecifes resistentes, los cuales reciben toda la energía de las olas por el sector de Barlovento. Sus geoformas se asemejan a espolones.

Posterior al Arrecife de Cresta (Crest Reef), se puede observar la Zona Detrítica (Ditrital Zone).

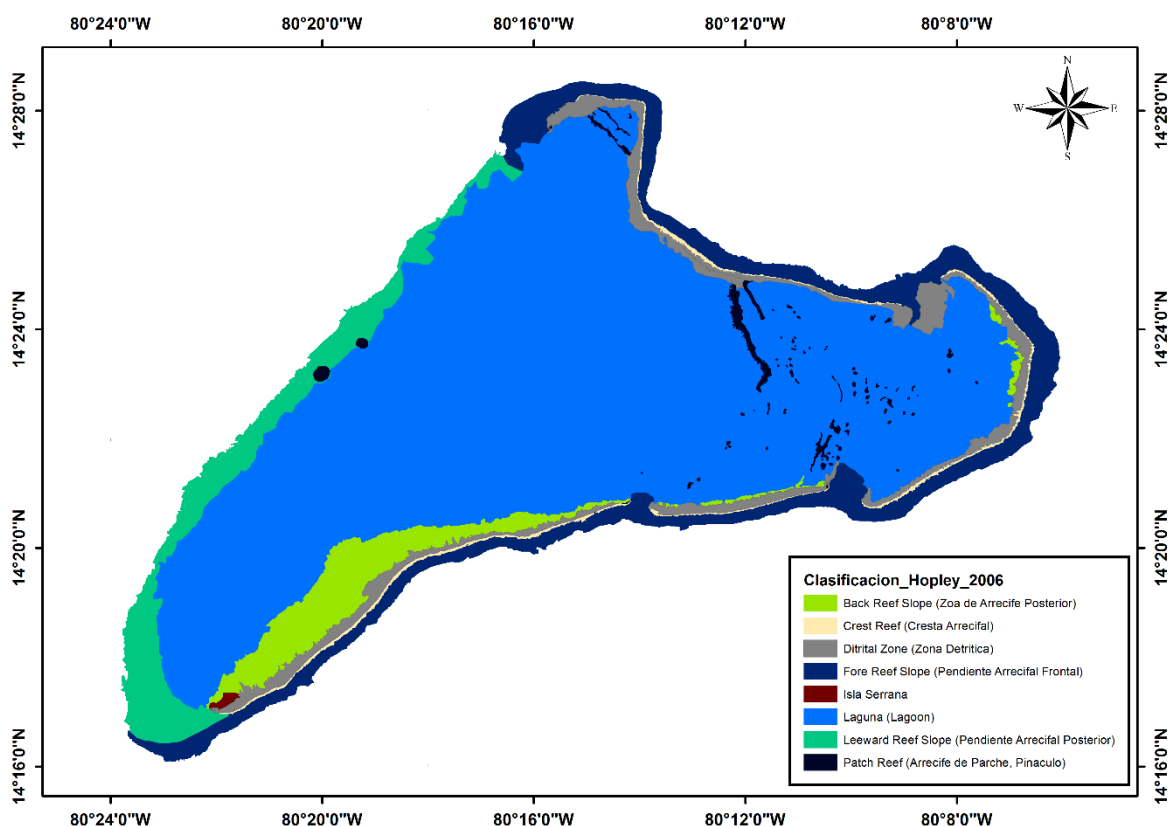
En el sector Sur- Oeste del Atolón, donde finaliza la Zona Detrítica (Ditrital Zone), inicia una leve pendiente que se va conectando con la laguna, denominada Zona de Arrecife posterior (Back Reef Slope).

En esta clasificación es evidente que la laguna se encuentra fragmentada en dos, debido a la presencia de Arrecifes de parche o pináculos, considerándose desde una semi - abierta a una semi – cerrada.

Las dos brechas o canales se pueden observar por barlovento de la Isla Cayos de Serrana.

Los arrecifes de parche o pináculos se observan dispersos en la zona Sur-Este. La gran mayoría se identifican a la altura del canal que se forma más hacia el Sur-Este del atolón.

Figura 41. Clasificación de la Isla cayos de Serrana de acuerdo con la clasificación de Hopley de 2006.



Fuente: Autores.

Tabla 11. Áreas totales de las zonas para la clasificación según Hopley

Nombre del sistema de clasificación	Área
Back Reef Slope (Zona de Arrecife Posterior)	14.958.660,96 m ²
Crest Reef (Cresta Arrecifal)	3.326.017,318 m ²
Ditriral Zone (Zona Detrítica)	15.629.366,73 m ²
Isla Serrana	299.598,1939 m ²
Laguna (Lagoon)	225.007.038.3 m ²
Patch Reef (Arrecife de Parche, Pináculo)	3.042.584,476 m ²
Fore Reef Slope (Pendiente Arrecifal Frontal)	5.4483.509,04 m ²

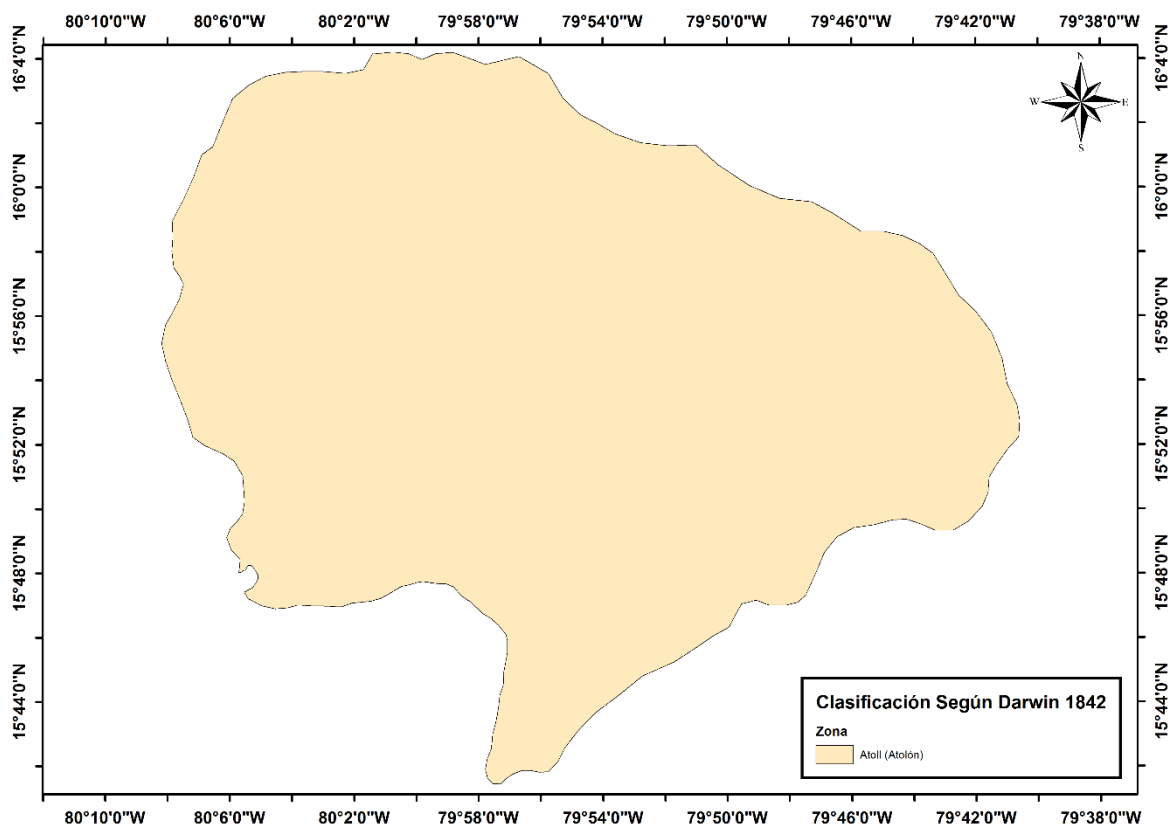
Fuente: Autores.

8.2 Resultados Isla Cayos de Serranilla

8.2.1 Clasificación según Darwin (1842).

Como se puede observar en la Figura 42, según esta clasificación la única geoforma presente, corresponde a un atolón (atoll), con las dimensiones presentadas en la tabla 12.

Figura 42. Clasificación de la Isla cayos de Serranilla de acuerdo con la clasificación de Darwin de 1842.



Fuente: Autores

Tabla 12. Área total de la zona para la clasificación según Darwin de 1842.

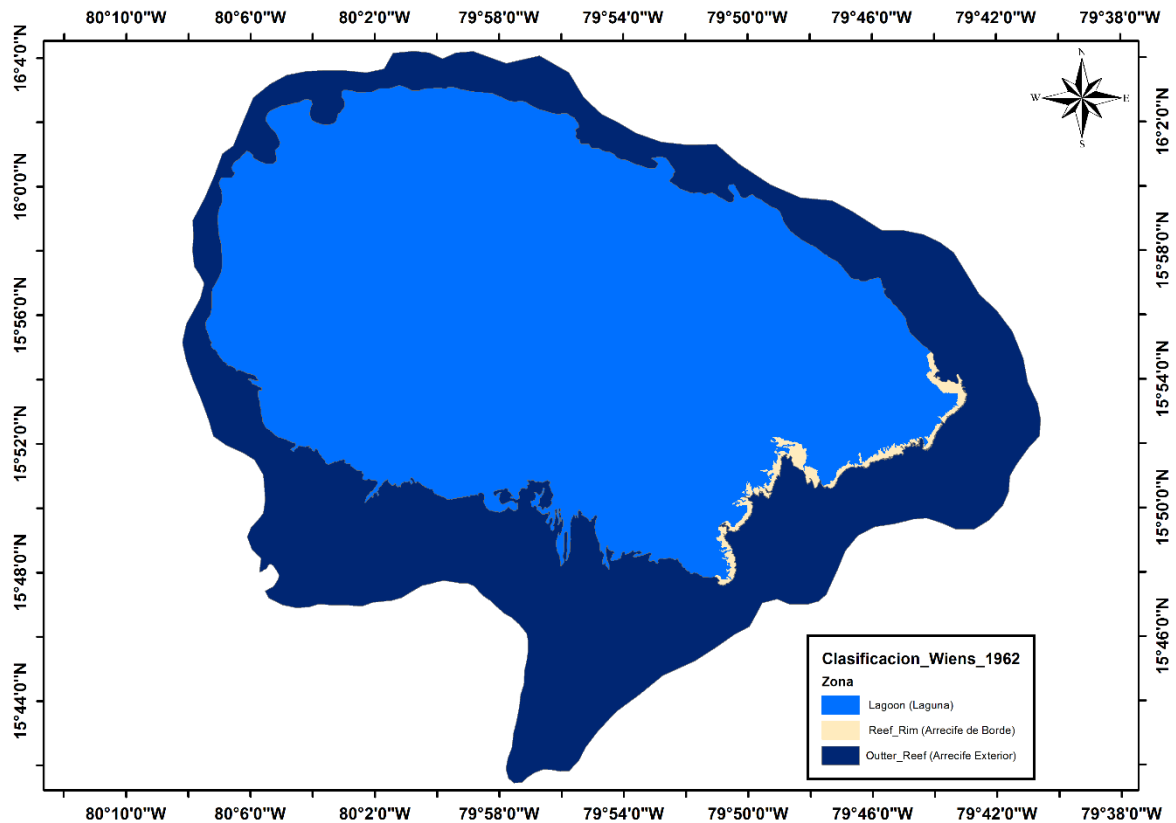
Nombre del sistema de clasificación	Área
Atoll (Atolón)	1.247.231.185,54 m ²

Fuente: Autores.

8.2.2 Clasificación según Wiens (1962)

Este mapa temático de la Isla Cayos de Serranilla (Figura 43), bajo el esquema de clasificación de Wiens, permite observar que el arrecife exterior (Outer Reef), se encuentra continuo alrededor de toda la laguna, con las dimensiones presentadas en la (tabla 13); sin embargo la laguna se encuentra abierta completamente excepto en su zona Sur-Este, en la cual se encuentra protegida por el arrecife de borde (Reef Rim).

Figura 43. Clasificación de la Isla cayos de Serranilla de acuerdo con la clasificación de Wiens de 1962.



Fuente: Autores

Tabla 13. Áreas totales de las zonas para la clasificación según Wiens.

Nombre del sistema de clasificación	Área
Reef Rim (Arrecife de Borde)	12.576.307,7166 m ²
Outer Reef (Arrecife Exterior)	478.552.416,427 m ²
Laguna (Lagoon)	756.102.461,399 m ²

Fuente: Autores

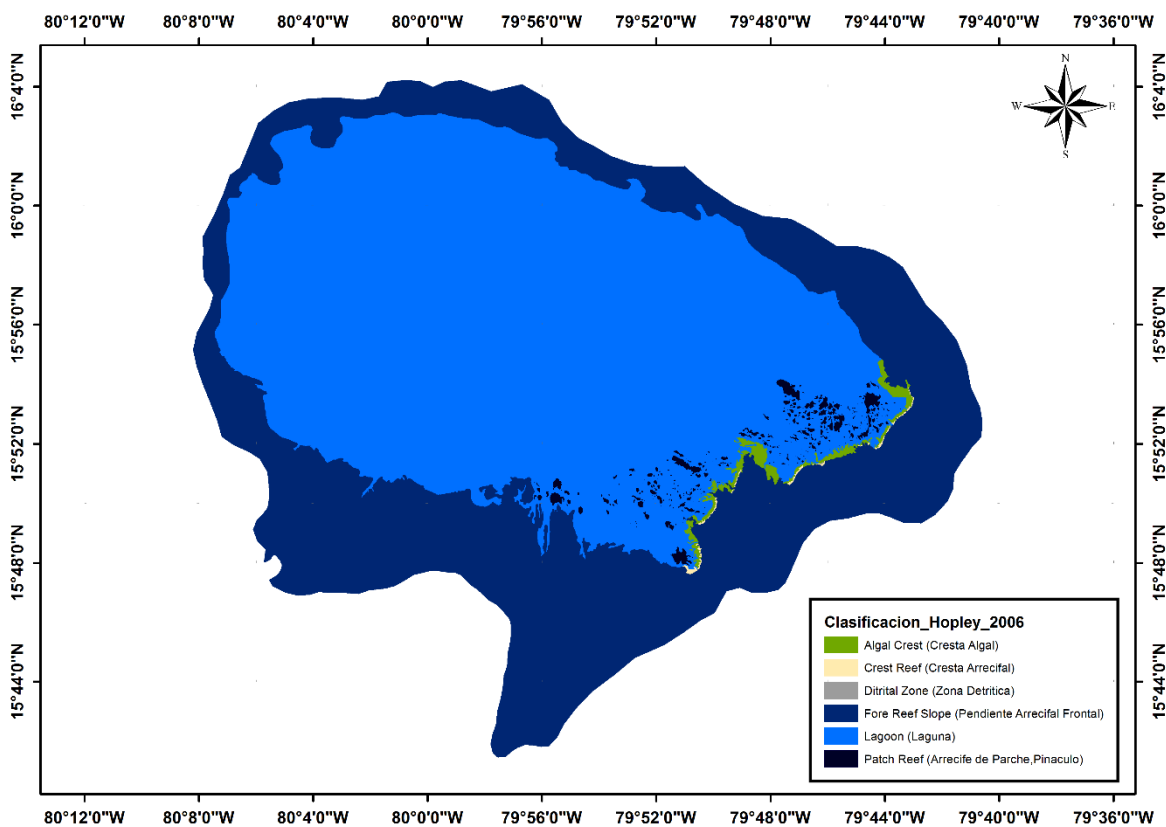
8.2.3 Clasificación según Hopley (2006).

Este mapa temático de la Isla Cayos de Serranilla (Figura 44), bajo el esquema de clasificación de Hopley, permite observar de forma mucho más detallada las geoformas presentes en esta Isla Cayo como se describe a continuación.

En el mapa temático se puede observar que la Isla Cayos de Serranilla se encuentra rodeada completamente por la pendiente arrecifal frontal (Fore Reef Slope) (tabla 14). Así mismo la zona de rompiente elevada denominado arrecife de cresta (Crest Reef), se encuentra ubicado en la zona sur-este de la Isla, fragmentado en once segmentos, la cual a su vez se encuentra antecidida en su parte interior por la cresta algal (Algal Crest).

En la zona posterior al arrecife de cresta (Crest Reef), se pueden observar dos pequeñas zonas detríticas (Ditrital Zone). Esta clasificación muestra también la laguna del atolón completamente abierta, excepto en su zona sur-este, en la cual se encuentra protegida por la cresta algal (Algal Crest) y el arrecife de cresta (Crest Reef), desde adentro hacia afuera respectivamente. La laguna presenta en su interior diferentes parches de arrecifes dispersos, con geoformas variadas, ubicados principalmente al sur-este de la misma.

Figura 44. Clasificación de la Isla cayos de Serranilla de acuerdo con la clasificación de Hopley de 2006.



Fuente: Autores

Tabla 14. Áreas totales de las zonas dentro de la clasificación según Hopley

Nombre del sistema de clasificación	Área
Algal Crest (Cresta Algal)	10.900.287,39 m ²
Crest Reef (Cresta Arrecifal)	1.601.398,911 m ²
Ditrital Zone (Zona Detrítica)	28.615,13916 m ²
Laguna (Lagoon)	740.804.270,8 m ²
Patch Reef (Arrecife de Parche, Pináculo)	15.436.919,46 m ²
Fore Reef Slope (Pendiente Arrecifal Frontal)	478.459.693,8 m ²

Fuente: Autores

También se presentan como resultados el siguiente material digital y cartográfico:

En el anexo "A".se presenta la cartografía digital geomorfológica de detalle a escala de (1:70000) para la Isla Cayos de Serrana y (1:105000) para la isla Cayos de Serranilla.

9. CONCLUSIONES

Dado el nivel de detalle y precisión de los sensores remotos utilizados para generar la cartografía de las Islas Cayos Serrana y Serranilla en el presente trabajo, se pudo evidenciar que estas zonas de estudio cumplen con las características necesarias para ser clasificadas como atolones y que sobre éstos se encuentran las islas denominadas Islas Cayos de Serrana e Islas Cayos de Serranilla. Teniendo en cuenta la anterior afirmación, éstos deberían ser considerados y estudiados como tal y no enfocar las investigaciones únicamente en las pequeñas zonas emergidas, como han sido descritas en distintas investigaciones como las de (ENAP, 2010), (Díaz, 2010) y (Zambrano, 2010).

Esta investigación aporta información importante a estudios anteriores como “The Caribbean coral Reefs of Colombia”, publicado en el año 2003 (Garzón & Díaz, 2003), el cual consideró a la Isla Cayos de Serranilla como un banco de arrecifes de coral a partir de información secundaria y verificación en campo mediante buceo. Los resultados encontrados durante el desarrollo de este trabajo de clasificación geomorfológica de detalle, por primera vez llegaron a la conclusión de que la Isla Cayos de Serranilla, puede ser denominada y considerada como un atolón, además de aportar un mapa temático geomorfológico de detalle que podrá ser referenciado y utilizado para futuros estudios.

Por lo anterior, con base en la definición que presenta la Convención de las Naciones Unidas sobre derecho del mar- CONVEMAR en 1982, la cual menciona que *“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”*; el nuevo concepto de descripción geomorfológica obtenido en el presente estudio, cambiaría en este caso la línea base para medir el mar territorial colombiano, delimitado recientemente en el fallo dictado por la Corte

internacional de Justicia, permitiendo a Colombia sustentar su reclamación con relación al mar territorial perdido en la sentencia.

Por otro lado, en las caracterizaciones geomorfológicas efectuadas, se observó que las crestas arrecifales se encontraban ubicadas en la parte Sur-Este en cada una de las zonas de estudio (como se muestra en las figuras 24, 25, 32, 34, 38, 41) , recibiendo directamente la incidencia del oleaje, donde para el caso de la Isla Cayos de Serrana, coincide con las definiciones de (Garzón & Diaz, 2003) e (INVEMAR, 1996), quienes afirmaron de forma descriptiva y mediante mapas temáticos, respectivamente, que estas formaciones típicas de Atolón se encuentran ubicadas a sotavento de los mismos, recibiendo directamente la energía del oleaje.

Es importante que se sigan desarrollando estudios periódicos en estas zonas denominadas como reserva de la biosfera (Seaflower) para el caso de la Isla Cayos de Serrana, con el fin de identificar cambios que pudieran afectar la geomorfología o cambios en la biodiversidad, debidos a un aumento de la temperatura del océano, al ascenso del nivel del mar o a eventos climatológicos extremos producidos por el cambio climático; no solo por la importancia que tienen para Colombia como parte de su territorio nacional, sino por el rol indispensable que tienen estos ecosistemas para el planeta tierra.

Todas las herramientas y avances tecnológicos en sensoramiento remoto utilizadas en el presente trabajo, fueron indispensables para el estudio de estas zonas de difícil acceso, debido a que se logra la calidad de datos necesarios para una adecuada implementación de nuevos conceptos, que servirán de apoyo para la interpretación y toma de decisiones en el proceso de defensa por el mar territorial colombiano y en los aspectos del manejo ambiental.

Teniendo en cuenta lo anterior, se concluye que el sensoramiento remoto debe ser considerado como una excelente opción para la realización de estudios oceanográficos, considerándolo como una herramienta complementaria fundamental. La metodología expuesta podría aplicarse en otros sectores de

condiciones similares. En calidad de estudiantes del curso de complementación profesional de pregrado en Oceanografía Física de la Escuela Naval “Almirante Padilla”, fue una experiencia enriquecedora el haber utilizado esta herramienta y los conceptos teórico – prácticos⁴ sobre análisis del terreno, lo que pone de manifiesto que es muy importante que se siga dictando y profundizando en el programa académico de la facultad de oceanografía acerca de esta tecnología, promoviendo investigaciones y trabajos de grado que la empleen de forma similar.

10. ANEXOS

BIBLIOGRAFÍA

Afanador , F., & Carvajal, A. (2009). LiDAR, ortografía digital y SIG en análisis geomorfológicos del Caribe Colombiano. En *Boletín Científico CIOH No 27* (págs. 112-134). CIOH.

Afanador, F., Molina, A., Benavides, J., Gamero, E., & Ospina, H. (2000). Caracterización geomorfológica de la franja litoral del Departamento del Atlántico – Caribe Colombiano. En *Boletín CIOH* (págs. 35-37). CIOH.

Afanador, F., Torres, R., Gomez , J., & Gutierrez, J. (2006). LiDAR y fotografía aerea digital en la Determinación del impacto del aumento en el nivel medio del mar en el sector de "La Boquilla", Cartagena de Indias; Caribe Colombiano. *Boletín Científico N.24 CIOH*, 97–98.

Andrade , C. (2000). *Circulacion y Variabilidad de la Cuenca de Colombia en el Mar Caribe*. Cardiff, Gales, Inglaterra: Universidad de Gales.

Ariza, A., Roa, O., & Ramírez, M. (2014). *Informe Técnico Final. "Procesamiento Digital de Imágenes Aplicado a Manejo de Zonas Costeras e Insulares Fase I"*. Bogota: Ministerio de Defensa Nacional, Dirección General Maritima e Instituto Geografico Agustin Codazzi.

Bird, E. (2011). *Coastal geomorphology: an introduction*. John Wiley & Sons. Wiley.

Briggs, R. (29 de abril de 2009). *Data Types and Structure using ArcCatalog, Applied GIS Course*. Godatabase [Online]. Obtenido de <http://www.utdallas.edu/~briggs/poe6382/geodatabase..ppt>

Brock, J., & Purkis, S. (2009). The emerging role of LiDAR Remote Sensing in Coastal Research and Research Management. *Journal of Coastal Research*.

Brock, J., Sallenger, A., Krabill, W., Swift, R., Manizade, S., Meredith, A., & Eslinger, D. (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.

- Choat, J. H., & Bellwood, D. R. (1991). Reef fishes: their history and evolution. En P. Sale, *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.
- CONVEMAR. (1982). *Convención de las Naciones Unidas*. Ginebra: CONVEMAR.
- Correa, M., Valderrama, J., & Montes, S. (1999). *Archipiélagos del Caribe Colombiano*. Cali: Banco de Occidente.
- Darwin, C. (1842). *The Structure and Distribution of Coral Reefs*. Londres: Smith, Elder and Co, 65, Cornhill.
- Diaz, J. (2010). Análisis Multitemporal de la línea de costa de Cayo Serrana. *Proyecto de Grado para obtener el título en Oceanografía Física*. Cartagena: ENAP.
- ENAP. (2010). *Estabilización Geomorfológica de los cayos del archipiélago de San Andrés y Providencia*. Cartagena D.T. y C.
- Finkl, C. W. (2011). Reef classification by Fairbridge (1950). En D. Hopley, *Encyclopedia of Modern Coral Reef-structure, form and process* (pág. 846). Springer Science+Business Media.
- Flood, P. (2011). Reef classification by Maxwell (1968). En D. Hopley, *Encyclopedia of modern coral reefs* (pág. 854). Springer science + Business media B.V.
- Florez, A. (2003). *Colombia: evolución de sus relieves y modelados*. (Unibiblos, Ed.) Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Floyd, F., & Sabins, J. (1996). *Remote sensing principles and interpretation (3rd ed.)*. New York: Freeman.
- García, M. (2003). *Caribbean Archipiélago Biosphre Reserve: Regional Marine Protected Area System*. San Andres Islas: Coralina.
- Garzón, F., & Diaz, J. M. (2003). The Caribbean coral reefs of Colombia. Santa Marta, Colombia: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "Jose Benito Vives De Andreis", INVEMAR.

- Gómez, J. C., & Afanador, F. (2009). Modelo Geodatabase en la estructuración y almacenamiento de información espacial para la administración y control del litoral Caribe Colombiano. *Boletín Científico CIOH No. 27, ISSN 0120-0542*, 135-145.
- Green, E. P., Mumby, P., Edwards, A. J., & Clark, C. D. (2000). *Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management*. Paris: Ed. A. J. Edwards UNESCO.
- Gregory, D. (1978). *Ideology, science, and human geography*.
- Hearn, C. (2008). *The Dynamics of Coastal Models*. New York: 1st ed. Cambridge University Press.
- Hopley. (1982). *The geomorphology of the Great Barrier Reef: Quaternary development of coral reefs*. John Wiley & Sons.
- Hopley. (2006). *Encyclopedia of coastal science*. Springer Science & Business Media.
- Hopley. (2011). *Encyclopedia of Modern coral reefs. Structure, form and process*. Springer Science+Business Media.
- Hopley, D. (2011). *Enciclopedia of Modern coral reefs. Structure, form and process*. Springer Science+Business Media.
- Hsu, J. (2005). *Engineering Applications of Coastal Geomorphology*. Encyclopedia of Coastal Science. Springer.
- Hugget, R. (2007). *Fundamentals of geomorphology. Second edition*. Routledge. Taylor & Francis Group.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2007). *Fundamentos físicos de teledetección*. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.
- INVEMAR. (1996). Atlas de los arrecifes coralinos del Caribe colombiano. I. Complejos arrecifales oceánicos. En J. Díaz, G. Díaz Pulido, J. Garzón Ferreira, & Geister. Santa Marta: INVEMAR.
- Jingping, X., & Dongzhi, Z. (2014). Review of coral reef ecosystem remote sensing. *Acta ecológica sinica Vol 34*. En A. e. 34. Dalian - China: ELSEVIER.

- Kjerfve, B., & Dinnel, S. (1983). *Hindcast hurricane characteristics on the Belize Barrier Reef. Coral Reefs.*
- Ladd, H. S. (1977). Types of coral reefs and their distribution . En O. J. Endean, *Biology and Geology of Coral Reefs V4: Geology 2, 4, 1* (págs. 1-19). Estado Unidos de America: O.A Jones and R. Endean.
- MacNeil, F. (1954). *The shape of atolls; an inheritance from subaerial erosion forms.* American Journal of Science.
- Maxwell. (1968). *Atlas of the great barrier reef.*
- Molares, R. (2004). Aspectos oceanográficos de las aguas sobre la Depresión Providencia en mayo 2004. *Boletín Científico CIOH No 22*, 11-25. Cartagena de Indias, Colombia.
- Olarte , J., & Gómez , W. (2011). Análisis Multitemporal (1937 - 2010) de la línea de costa de la isla de Manzanillo, por efecto del oleaje y procesos antrópicos (Bahía de Cartagena - Colombia). *Proyecto de grado para obtener el título en Oceanografía Física*, 206. ENAP.
- Pantojas, E. (1928). *La disputa Colombo-Nicaraguense por San Andrés, Providencia y Santa Catalina.* Universidad Nacional de Colombia. Sede Caribe. Maestría en Estudios Latinoamericanos –Observatorio Andino. Pontificia Universidad Javeriana., Konrad Adenauer Stiftung - Colombia. INFOTEP. Silvia Mantilla. Recuperado el 2014
- Posada, P., Blanca, O., & Henao, P. (2008). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. (INVEMAR, Ed.) 13, 145.
- Reuter, F. (2015). *Ingeniero Forestal.* Recuperado el 24 de Mayo de 2015, de <http://fcf.unse.edu.ar/archivos/lpr/pdf/p5.PDF>
- Rockwell, T., & Keller, E. (1984). *Tectonic geomorphology, Quaternary chronology and palaeoseismology. Developments and applications of geomorphology.* Berlin: Springer-Verlag.
- Rueda , S. (2014). Pronostico de las Tendencias y Cambios de la Linea de Costa en la Isla de Manzanillo. *Proyecto de grado para obtener el título en Oceanografía Física.* Cartagena: ENAP.

- Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., Ismael, M. -T., Cecilia, E., Rodolfo, S., & Maria, G.-L. (2013). The role of fringing coral reefs on beach morphodynamics. En *Geomorphology* (págs. 69-83). ELSEVIER.
- 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. 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.
- UNINORTE. (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: UNINORTE.
- Wiedemann, H. (1973). *Reconnaissance of the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia: physical parameters and geological history*. Santa Marta.
- Wiens, H. (1962). *Atoll Environment and Ecology*. . New Haven: Yale.
- Yamano, H., Shimazaki, H., Matsunaga, T., Ishoda, A., McClennen, C., Yokoki, H., & Kayanne, H. (2006). *Evaluation of various satellite sensors for waterline extraction in a coral reef environment: Majuro Atoll, Marshall Islands*, 398–411.
- Zambrano , J. (2010). Estudio de linea de costa del Cayo de Serranilla. *Proyecto de grado para obtener el título en Oceanografía Física*. Cartagena: ENAP.