



EROSIÓN COSTERA EN LA ISLA DE SAN ANDRÉS



INFORME TÉCNICO FINAL

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras
"José Benito Vives De Andrés" - INVEMAR
Vinculado al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

EROSIÓN COSTERA EN LA ISLA DE SAN ANDRÉS

INFORME TÉCNICO FINAL

CUERPO DIRECTIVO

Director
Francisco A. Arias Isaza

Subdirector
Coordinación Científica (SCI)
Jesús Antonio Garay Tinoco

Coordinadora
Coordinación de investigación e información
para la Gestión Marina y Costera (GEZ)
Paula Cristina Sierra Correa

Coordinador
Programa Biodiversidad y Ecosistemas
Marinos (BEM)
David Alejandro Alonso Carvajal

Coordinador
Programa Valoración y Aprovechamiento de
Recursos Marinos (VAR)
Mario Rueda Hernández

Coordinadora
Programa Calidad Ambiental Marina (CAM)
Luisa Fernanda Espinosa

Coordinadora
Programa de Geociencias Marinas (GEO)
Constanza Ricaurte Villota

Coordinador
Coordinación de Servicios Científicos (CSC)
Julián Mauricio Betancourt Portela

Subdirector
Subdirección Administrativa (SRA)
Sandra Rincón Cabal

INVESTIGADORES

Coordinación del Proyecto
Constanza Ricaurte Villota

Erosión Costera
David Fernando Morales Giraldo
Oswaldo Coca Domínguez

Clima y Oceanografía
Martha Lucero Bastidas Salamanca
Deisy Alejandra Romero Rodríguez

Febrero de 2015 - Santa Marta - Colombia

Cítese como: INVEMAR-GEO. 2015. Erosión costera en la isla de San Andrés. Informe técnico final. Actividad GEO - BPIN INVEMAR. Santa Marta. 71 p.

Imagen portada: Playas Sprat Bight y frente al hotel Decámeron San Luis afectadas por erosión costera en San Andrés Isla. Tormenta tropical captada por sensor MODIS (Junio 2005)



INVEMAR - Calle 25 No. 2-55 Playa Salguero
Santa Marta – Colombia
Tel: (57) (5) 432 8600 Fax: (57) (5) 432 8694
<http://www.invemar.org.co>

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	4
2. ALCANCES DEL ESTUDIO.....	5
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	5
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
3. AREA DE ESTUDIO	6
3.1. LOCALIZACIÓN	6
3.2. GEOLOGÍA.....	6
3.2.1. <i>Evolución Geológica</i>	6
3.2.2. <i>Estratigrafía de la Isla de San Andrés</i>	7
3.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	9
3.4. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS	10
3.4.1. <i>Morfología Costera</i>	10
3.4.2. <i>Morfología de Plataforma Arrecifal Periférica Emergida</i>	13
3.4.3. <i>Morfología de Colinas</i>	13
3.4.4. <i>Depósitos Cuaternarios</i>	13
3.5. AMENAZAS NATURALES (EROSIÓN COSTERA).....	13
3.6. CLIMA Y OCEANOGRAFÍA.....	14
3.6.1. <i>Vientos</i>	14
3.6.2. <i>Temperatura del aire y precipitación</i>	16
3.6.3. <i>Eventos extremos</i>	18
3.6.4. <i>Hidrodinámica</i>	20
4. METODOLOGÍA.....	22
4.1. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA	22
4.2. VARIABILIDAD CLIMÁTICA RECIENTE Y SU INFLUENCIA EN EL RÉGIMEN DE OLEAJE DEL SECTOR.	25
4.3. ANÁLISIS DE LA AMENAZA Y VULNERABILIDAD POR EROSIÓN COSTERA.....	25
5. RESULTADOS	32
5.1. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA Y SUS CAUSAS	32
5.1.1. <i>Playa Sprat Bight</i>	32
5.1.2. <i>Playa Rocky Cay</i>	34
5.1.3. <i>Playa Sound Bay</i>	36
5.1.4. <i>Playa Decamerón – Smith Channel</i>	38
5.1.5. <i>Playa Bowies Bay</i>	39
5.1.6. <i>Jhonny Cay</i>	41
5.2. VARIABILIDAD CLIMÁTICA RECIENTE Y SU INFLUENCIA EN EL RÉGIMEN DE OLEAJE DEL SECTOR.	43
5.3. ANÁLISIS DE LA AMENAZA Y VULNERABILIDAD POR EROSIÓN COSTERA.....	51
5.3.1. <i>Playa Sprat Bight</i>	53
5.3.2. <i>Playa Rocky Cay</i>	54
5.3.3. <i>Playa Sound Bay</i>	56
5.3.4. <i>Playa Decamerón – Smith Channel</i>	58
5.3.5. <i>Playa Bowies Bay</i>	60
5.3.6. <i>Jhonny Cay</i>	62
6. CONCLUSIONES.....	65
7. BIBLIOGRAFÍA	67

1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto se encuentra enmarcado dentro de la actividad: "Identificar las causas de la erosión costera en los litorales Caribe y Pacífico colombianos, que permitan implementar un Programa nacional de prevención y mitigación de dicha erosión en los sectores afectados" a cargo del programa de Geociencias Marinas y Costeras, la cual hace parte del proyecto BPIN: "Apoyo para el fortalecimiento de la gestión del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR", Colombia.

La erosión costera es una de las amenazas naturales de origen marino que afectan la isla de San Andrés (INGEOMINAS, 1996; Ossa, 2004; Posada y Guzmán, 2007; Posada *et al.*, 2011). Cerca de 7 km de esta isla se encuentran amenazados por los procesos erosivos presentes en esta isla, la cual corresponde al 16% del total de esta. La población de la isla ha tenido un aumento desde mediados del siglo 20, ubicándose en las zonas costeras de baja altura, las cuales son susceptibles frente a las amenazas naturales de origen marino. Además presenta ecosistemas estratégicos como manglares, arrecifes de coral y pastos marinos que se ven afectados por la dinámica de cambios en la línea de costa y fondos someros.

El área, los habitantes y los ecosistemas marino-costeros están expuestos a situaciones de riesgo por eventos climáticos extremos. Los cambios en las condiciones meteorológicas, producen respuestas en el océano, como el aumento del nivel del mar, oleaje fuerte, cambios en el sistema de circulación del agua e intensa entrega de calor. Las fluctuaciones del viento a corto plazo no afectan el nivel del mar, pero si los vientos soplan en la misma dirección durante un período considerable (un día o más) pueden provocar cambios significativos. La presión y el viento generan cambios del nivel del mar en mares poco profundos o zonas costeras; cuando la presión aumenta, el nivel del mar disminuye y viceversa (Stewart, 2004)

Los eventos extremos, repercuten en el medio ambiente y en las actividades socioeconómicas (Cadena, 2010); por lo cual, una parte de la presente investigación, tiene como objetivo describir y analizar las condiciones climáticas históricas recientes (vientos y presión), sus implicaciones en eventos extremos y su influencia en el régimen de oleaje.

En el año 2013 se realizó el estudio de amenaza y vulnerabilidad por erosión costera para las islas de Providencia y Santa Catalina, donde se determinó que en cuatro sectores de la isla la amenaza por erosión costera es muy alta, siendo estos sectores donde predominan los asentamientos humanos. Con el presente estudio se espera completar el análisis de vulnerabilidad para el archipiélago de San Andrés y Providencia, proyectando la realización de este en la isla de San Andrés.

2. ALCANCES DEL ESTUDIO

2.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar el estudio de diferentes aspectos relacionados con la erosión costera en la isla de San Andrés con el fin de enfocar la realización de obras de mitigación.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la evolución reciente de línea de costa y sus causas en sectores considerados por amenaza de erosión costera alta en la isla de San Andrés.
- Describir y analizar la variabilidad climática reciente (vientos y presión), sus variaciones en eventos extremos y su influencia en el régimen de oleaje del sector.
- Determinar la amenaza y vulnerabilidad por erosión costera en algunas playas de la isla de San Andrés.

3. AREA DE ESTUDIO

3.1. LOCALIZACIÓN

El Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, está ubicado en el sector occidental del mar Caribe o de las Antillas, al noroeste del territorio continental nacional de Colombia, aproximadamente a 700 km de la costa norte colombiana, siendo así, el territorio más septentrional del país. El Archipiélago consta de tres islas: San Andrés (Figura 3.1), Providencia y Santa Catalina, además de un conjunto de cayos, cuya elevación sobre el nivel del mar en general es apenas de 1 a 6 m.

El área de interés de este trabajo, corresponde a la isla de San Andrés, esta se encuentra entre $12^{\circ}28'55''$ y $12^{\circ}35'37''$ de latitud Norte y $81^{\circ}40'49''$ y $81^{\circ}43'23''$ de longitud W, tiene un contorno alargado en sentido NNE con 12.6 km de longitud, 3.7 km de ancho máximo y una superficie promedio de 28 km².

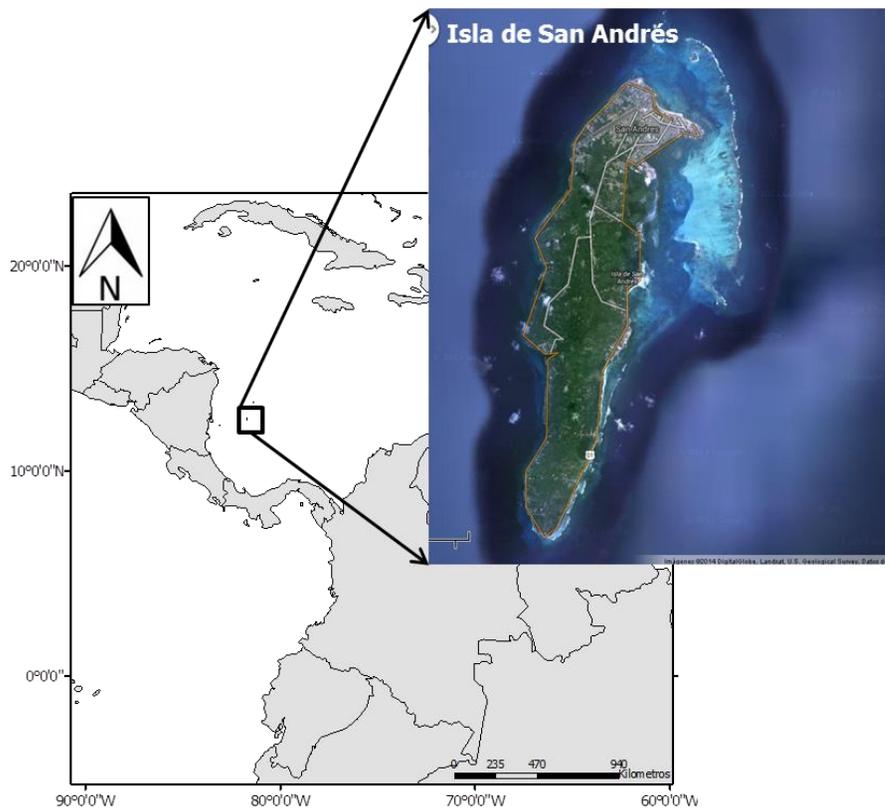


Figura 3.1 Localización de la Isla de San Andrés

3.2. GEOLOGÍA

3.2.1. Evolución Geológica

El archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, junto con los bancos y atolones parecen haber tenido un origen geológico común (Geister y Gorin, 2007). A lo largo de zonas de falla del Alto de Nicaragua, con orientación nor-noroeste y suroeste se formaron conos

volcánicos durante el Cenozoico temprano que subieron al nivel o sobre el nivel del mar. Hubo subsidencia lenta de los volcanes y colonización de sus topes por arrecifes de coral, que permitieron la formación de plataformas carbonatadas bordeadas de arrecifes someros, que llegaron a ser atolones una vez se paró la subsidencia.

San Andrés también se originó a partir de un antiguo atolón. Sin embargo, este empezó a bascularse hacia el este cuando la parte oriental de la fosa San Andrés/Old Providence empezó a levantarse en el Mioceno inferior. Así la margen occidental del atolón se levantó gradualmente para formar una isla calcárea alta, que sin embargo sufrió meteorización y erosión subaérea continua hasta alcanzar el tope de los 87 m sobre el nivel del mar que tiene hoy. Como resultado del basculamiento, la margen oriental del atolón continuó la subsidencia hasta el presente permaneciendo una plataforma carbonatada productiva, que hoy corresponde a la moderna barrera arrecifal que se extiende al oriente de la isla.

3.2.2. Estratigrafía de la Isla de San Andrés

Geister y Gorin (2007) mantienen su clasificación inicial en la isla de San Andrés según la cual está constituida principalmente por tres formaciones más los depósitos de escombros en la base de las colinas, sin embargo, Vargas (2004) con base en el trabajo realizado para INGEOMINAS (1996) presentaba la geología de la isla de San Andrés en la presente con mayor detalle las unidades del Cuaternario (Figura 3.2).

- **Formación San Andrés**

Conforma el cinturón de colinas que se extienden por el centro de la isla. Está constituida por depósitos de laguna arrecifal con moluscos, parches de coral y pequeños arrecifes. Incluye depósitos de la plataforma oriental, ahora cubiertos por carbonatos más jóvenes. Se originó en la etapa del atolón del Mioceno y en ella se pueden observar los notches fósiles de los cambios del nivel del mar que ocurrieron en el Pleistoceno.

- **Formación San Luis**

Es el nombre dado a los depósitos de caliza del Pleistoceno que surgieron fuera de la terraza terrestre alrededor de la isla y subyacen el complejo arrecifal del Holoceno y los depósitos de playa (Geister, 1975). Consiste de al menos dos unidades estratigráficas superpuestas separadas por una inconformidad: El Miembro Calcáreo de la Terraza Baja más Vieja, del Pleistoceno medio, está conformado por una nueva plataforma carbonatada producto de la truncación de arrecifes periféricos precedentes. Subyace el complejo arrecifal del Sangamoniano. El Miembro Calcáreo de la Terraza Baja más Joven, también pertenece a un antiguo complejo de arrecifes de coral formados durante un importante evento transgresivo en el Pleistoceno. Forma la periferia terrestre de la isla y se conoce como la terraza del Sangamoniano (Geister, 1975).

- **Formación Bahía**

Conformada por los depósitos de playa y de manglares producto de la erosión de las formaciones calcáreas del Holoceno que produjeron material suelto que se sedimentó sobre las formaciones Pleistocénicas. Denominados por Vargas (2004) como arenas de playa, depósitos de arenas y gravas, depósitos lagunares, depósitos asociados a manglares.

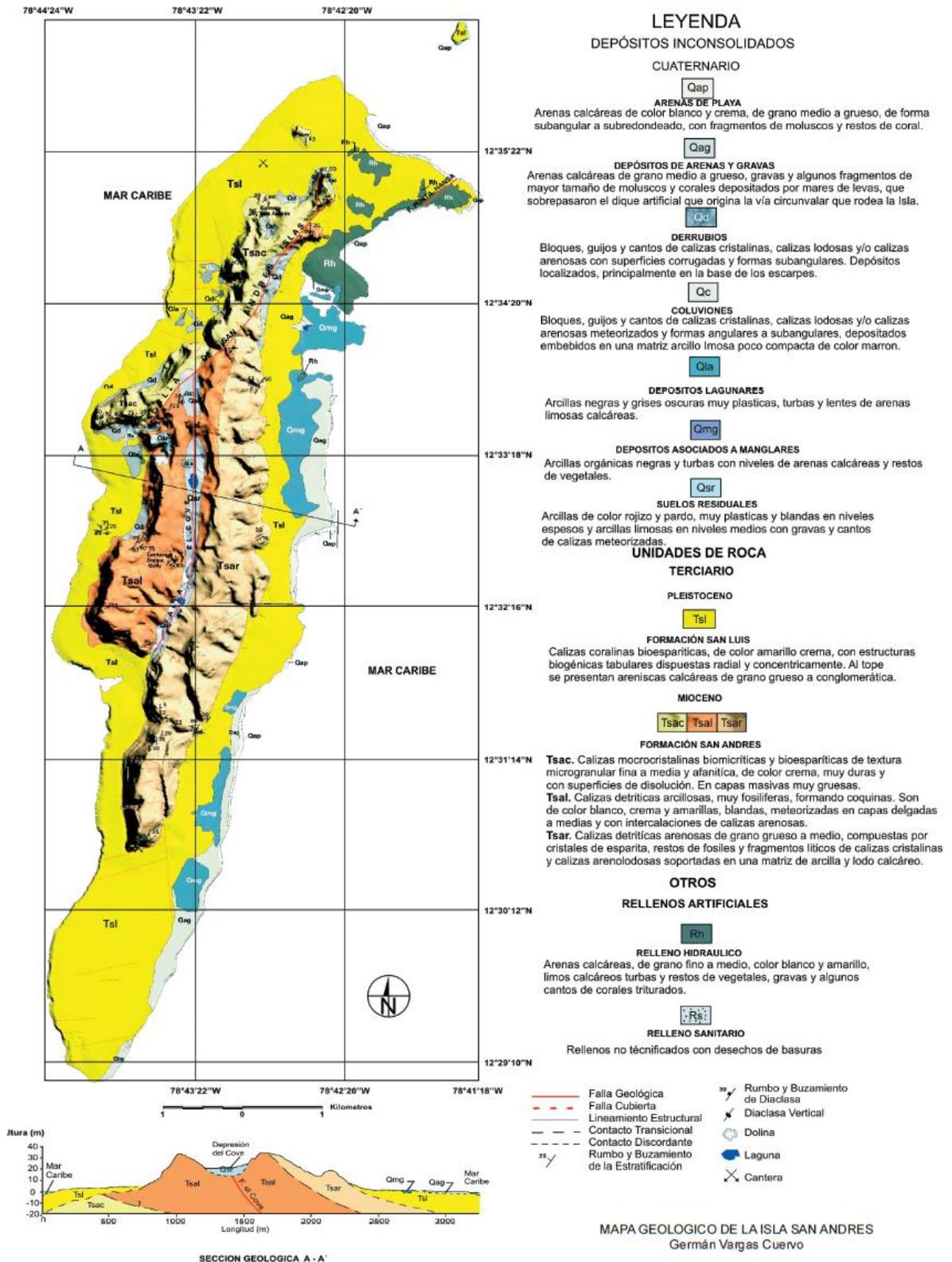


Figura 3.2 Mapa geológico de la isla de San Andrés (Vargas, 2004).

- ***Depósitos cuaternarios de ladera***
Se originaron a partir de la caída de escombros y bloques de los escarpes presentes en la Formación San Andrés. Se distribuyen alrededor de las colinas en la isla y alcanzan una franja entre 100 y 3500 m de ancho. Denominados por Vargas (2004) como Derrubios, Coluviones y suelos residuales.
- ***Rellenos antrópicos***
Fueron realizados después de los años 70 para adecuar algunos terrenos para la construcción, principalmente en el sector noreste de la isla. Denominados por Vargas (2004) como rellenos hidráulicos.

3.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina se encuentra en la zona de convergencia de las placas tectónicas del Caribe, Suramericana, Nazca, Cocos y el Bloque Panamá. (INGEOMINAS, 1996). Gran parte de los bancos, atolones e islas del archipiélago tienen una tendencia NNE, igual que el Alto de Nicaragua. Algunas de estas estructuras y plataformas de islas están alineadas en la misma dirección NNE lo que sugiere una zona de falla submarina con tendencia NNE y en la cual se asientan las formaciones volcánicas identificadas. La tendencia NW de algunos atolones e islas igualmente sugiere la presencia de una zona de falla NW subyaciendo estas estructuras (Geister, 1992). Courtown, San Andrés y Serrana, parecen yacer sobre puntos triples de intersección de placas (Geister y Gorin, 2007).

La isla de San Andrés está dividida a grandes rasgos en dos provincias estructurales correspondientes a los bloques separados por la falla de San Andrés. En el Bloque Norte no se reconocieron fallas ni pliegues de importancia, mientras el Bloque Sur está dividido longitudinalmente por la Falla del Cove (INGEOMINAS, 1996).

- ***Falla de San Andrés Isla***
Esta estructura se localiza sobre la zona montañosa de la isla en su costado noroeste, presenta dirección de N45°E y se caracteriza por su expresión rectilínea, formación de silletas y contraste morfológico. No se conoce con certeza la edad de la falla, si es Mioceno o posterior, ya que las evidencias se presentan en afloramientos de la Formación San Luis (INGEOMINAS, 1996). La dirección del plano de esta estructura no se conoce con precisión, pero se estima que es una falla tipo normal con un plano inclinado 20 a 30 grados al Oriente, teniendo en cuenta datos de las perforaciones en cercanías de Cliff (INGEOMINAS, 1996).
- ***Falla de Punta Hansa***
Se localiza en la parte NE de la isla, con una dirección N55°E que muestra claramente un movimiento de rumbo sinistral, en el cual el bloque oriental se desplazó hacia el noreste y el bloque occidental hacia el suroeste, con una longitud de desplazamiento de 50 m. Teniendo en cuenta que esta falla afecta las rocas del Plioceno de la Formación San Luis y muestra sus efectos sobre la barrera coralina, se estima que fue generada en el periodo Cuaternario (<1.5 M.a), lo cual implica actividad tectónica reciente en la isla (INGEOMINAS, 1996).

- **Falla del Cove**

Es una estructura subvertical cuyo trazo presenta una orientación N-S en la porción norte (donde choca con la Falla San Andrés) y SSW en el sector meridional. El cambio de orientación del trazo es suave, indicando una geometría del plano axial convexa hacia arriba. Su dirección de movimiento e inclinación del plano de falla se desconoce (INGEOMINAS, 1996).

3.4. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

En la Isla de San Andrés se encuentran de manera general tres tipos de unidades morfológicas (Figura 3.3).

3.4.1. Morfología Costera

- **Playas**

Se ubican en el sector norte y oriental de la isla, siendo las más importantes las localizadas en Sprat Bight (Norte de la isla), La Mansión, Rocky Cay, Sound Bay, Decamerón San Luis, Tom Hooker y Elsy Bar. Tienen amplitudes variables entre los 10 y 15 m, a excepción de la playa del norte donde alcanza hasta 60 m. En el sector oriental las pendientes del frente de playa tienen valores promedio entre 8° y 10°, mientras al norte, junto a la Avenida Newball los valores son entre 6° - 8° y adyacente a la Avenida Colombia se alcanzan pendientes máximas de 15°. La composición es calcárea de color crema y tamaño de arena medio-grueso. Un rasgo particular se presenta en la parte sur oriental, donde segmentos de playa relativamente angostos, limitan hacia el mar con franjas de superficies endurecidas denominadas *beachrock*, entre las que se generan canales interiores con amplitudes de 2 a 3 m y fondos arenosos. Los *beachrock* se levantan entre 50 y 80 cm de la superficie del agua, el ancho alcanza entre 1 y 3 m, y tienen una suave inclinación hacia el mar. Estas rocas se forman a partir de algas que retienen sedimentos y con el tiempo terminan compactándose.

- **Borde Costero Arrecifal**

Corresponde a la parte de la plataforma arrecifal del Sangamoniano, próxima al mar y levantada con respecto a su nivel entre 4 y 6 m en el sector occidental y entre 0,5 y 1 m en el sector oriental y norte. Es una superficie plana de 5 m de ancho en promedio, fuertemente afectada por procesos de disolución, desnuda o localmente con vegetación rastrera, de pastos y malezas y con un borde acantilado en el cual se observa el *notch* o hendidura producido por el nivel del mar actual (olas y mareas; bioturbación); localmente hay cavernas, fracturas y fallas rellenas y un sin número de estructuras de arrecife y borde costero como testigos de su ambiente de formación. Bloques de diferentes tamaños dejados ahí por tsunamis o tormentas muy fuertes se observan a todo lo largo del borde occidental. Limita hacia el continente con depósitos de tormenta.

- **Depósitos de tormenta**

Son cuerpos elongados paralelos a la costa y localizados hacia atrás del borde arrecifal costero y muchas veces en el límite con la vía circunvalar. Consisten de fragmentos de roca coralina de tamaño desde cantos a gránulos, acumulados durante eventos de tormentas o mares muy fuertes en el sitio de máxima marea y que ahora forman un

cordón de hasta 4 m de ancho, 60 cm de alto y pendientes $> 15^\circ$, que se extiende por encima de la terraza arrecifal. Se han identificado en toda la costa occidental en forma casi ininterrumpida y en la costa sur oriental, en donde localmente se funden con la berma de las playas. Es muy probable que la construcción de la vía circunvalar haya removido estos depósitos parcial o totalmente.

- ***Pantanos***

Emergen en la parte oriental de la isla sobre zonas bajas deprimidas adyacentes a la costa, en sectores de las lagunas arrecifales protegidos y muy someros; el sustrato es de turbas y lodos, mezclados con arenas. Se desarrolla principalmente mangle rojo (*Rhizophora* sp.), con grandes raíces sub-aéreas que atrapan sedimentos y sirven de protección contra oleajes fuertes. En la parte interior de los manglares, hay también manglar blanco y negro.

Según un estudio multitemporal realizado por INGEOMINAS (1996), la cobertura de manglar entre 1944-1996 disminuyó por rellenos antrópicos para viviendas y otra infraestructura urbana en el noreste de la isla. En el sector de San Luis, sin embargo, se consolidó una franja que va desde bahía Hooker hasta Rocky Cay; el resto de las áreas se conservan prácticamente iguales. El POT (Gobernación Departamento Archipiélago San Andrés, Providencia y Santa Catalina, 2003) reporta sólo 165 hectáreas de manglar, dispersas en los sectores de bahía Honda - bahía Hooker, cabecera de la pista del aeropuerto, Cocoplum, Cotton_Cay, el Cove, Faith Pond, Foie, Little Gough, Salt Creek, Smith Channel y Sound Bay (Posada *et al*, 2011).

Entre el Hotel Decamerón San Luis y el área de Sound Bay se encuentra una zona de manglar alargada de 150-180 m de ancho en promedio y al sur de este segmento llega a alcanzar amplitud de 400 m. Esta zona se encuentra aislada del mar por la carretera circunvalar y el área hotelera y residencial del sector de San Luis.

Desde Rocky Cay hacia el norte inicia una zona de manglar alargada de 400-500 m de ancho, también separada de la línea de costa pero que en ocasiones se acerca bastante a ella. Esta zona se extiende hasta Bahía Hooker, donde el manglar se encuentra directamente sobre el agua del mar caracterizado por un paisaje sombrío con especies vegetales sobre arenas entremezcladas con turbas y restos de plantas. Es un sector altamente intervenido por potrerización y presencia de huecos de más de dos metros de profundidad por extracción de arena (Gobernación Departamento Archipiélago San Andrés, Providencia y Santa Catalina, 2003).

- ***Depósitos Antrópicos***

Ocupan un área bastante amplia en el sector noreste de la isla. Constituyen terrenos planos, la mayoría de ellos aledaños a la línea de costa, rellenos con arenas coralinas que conforman localmente pequeñas playas. Sobre ellos se construyó parte del terminal marítimo, muelles y vías de acceso.

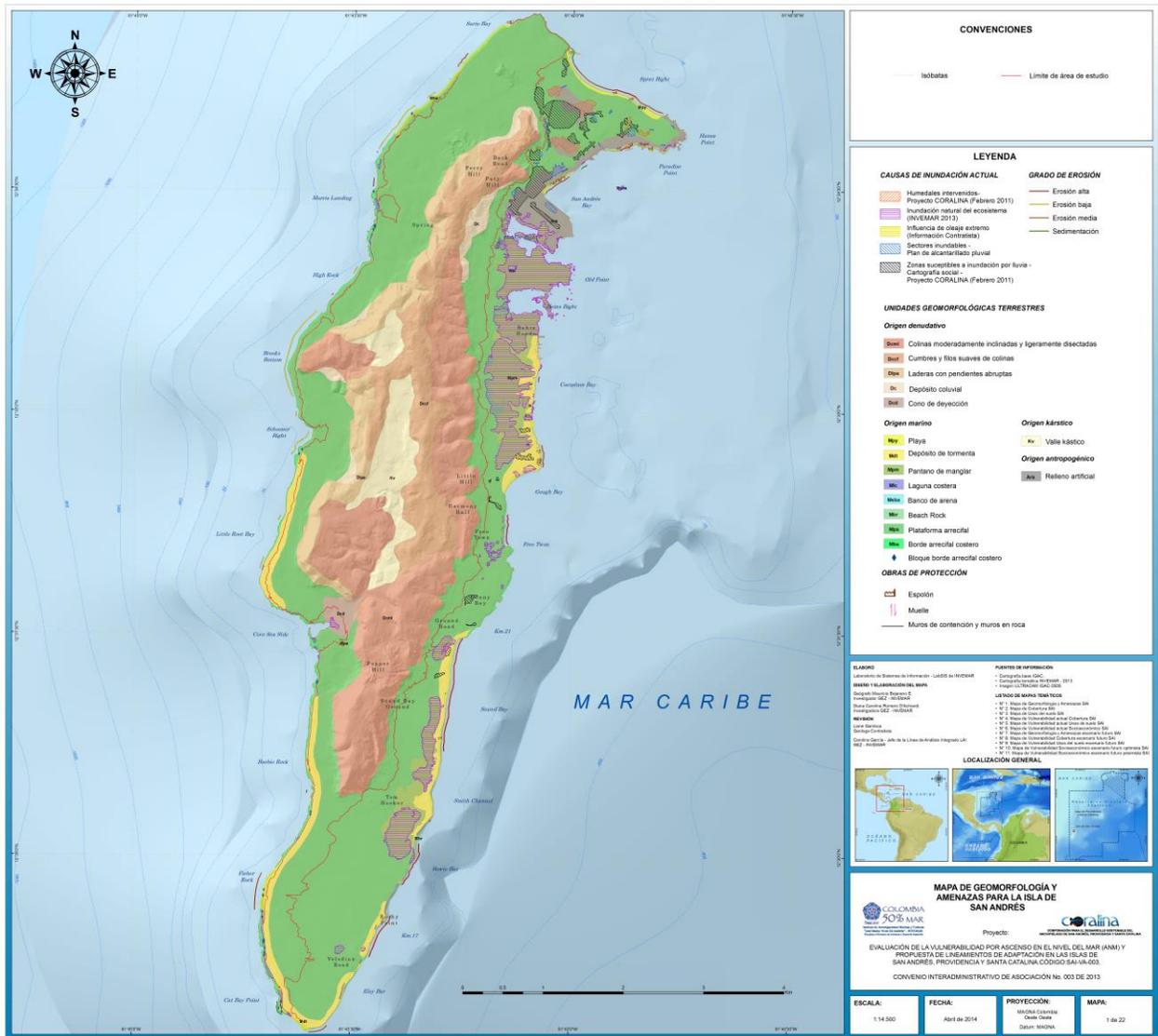


Figura 3.3 Mapa de geomorfología y amenazas para la isla de San Andrés (INVEMAR, 2014)

3.4.2. Morfología de Plataforma Arrecifal Periférica Emergida

Corresponde a una plataforma o terraza arrecifal de la Formación San Luis, Miembro más joven, caracterizada por una morfología plana a suavemente ondulada que bordea la zona de colinas hasta el borde costero; sobresalen pequeñas ondulaciones y colinas residuales de la Formación San Andrés. Es un área dedicada básicamente al cultivo de coco con arbustos, gramíneas y algo de bosque seco; hacia la periferia está urbanizada, igual que todo el sector norte-noreste (North End). Se presentan procesos erosivos naturales con surcos y escorrentía y los antrópicos moderados por el uso del suelo.

3.4.3. Morfología de Colinas

Se encuentran en la parte central de la isla en dirección norte – noreste y alcanzan una altura máxima de 87 msnm; su longitud es de 9 km y 1.5 km de ancho promedio. Corresponde a la Formación San Andrés, constituida por depósitos de laguna arrecifal y de arrecifes pequeños. Esta pequeña cordillera se caracteriza por presentar en su parte alta una morfología plana a ligeramente inclinada, limitada en el sector NNE por pendientes abruptas o escarpadas; en el sector oeste por una depresión plana a suavemente inclinada, en donde además se encuentra una morfología kárstica con dolinas, lagunas y cavernas alineadas. El sector oriental es de colinas suaves con dirección E-W y un drenaje discreto con cauces paralelos. Hacia el sureste-sur, aumenta el tamaño de las colinas y su orientación N es controlada estructuralmente; el drenaje es incipiente (INGEOMINAS, 1996).

Predominan las pendientes menores de 10° a excepción de los escarpes al noroeste y oeste suroeste donde pueden alcanzar más de 40°. Las mayores alturas se encuentran en Sam Wright Hill (suroeste), Cove Hill (oeste) y Mission Hill (centro). Se presenta fenómenos de remoción en masa representados por caída de bloques y escombros, más frecuentes hacia el sector del Cove y Sam Wright Hill por estar las rocas más fracturadas que en el sector entre Mission y Perry Hill (incluida cantera junto al aeropuerto), en donde las rocas son más masivas y poco fracturadas. En la zona con rasgos kársticos, hay procesos de hundimiento lento del terreno y caída de bloques y suelos; son zonas susceptibles a colapsos de las estructuras kársticas (INGEOMINAS, 1996).

3.4.4. Depósitos Cuaternarios

Corresponden principalmente a los depósitos de bloques y escombros que se encuentran al pie de las colinas, principalmente en las zonas acantiladas del nor-noroeste de la isla y del noreste, asociado a un escarpe de la falla de San Andrés. Son cuerpos irregulares, que ocupan áreas máximas de hasta 0,5 km², y están cubiertos por vegetación de arbustos, rastrojos y malezas, y cultivos de coco principalmente.

3.5. AMENAZAS NATURALES (EROSIÓN COSTERA)

Si bien son varias las amenazas que se han descrito para la isla de San Andrés como movimientos de remoción en masa, inundaciones y ascenso del nivel del mar entre otros (INGEOMINAS, 1996; Vargas, 2004; INVEMAR, 2014), el énfasis del presente informe se da en el análisis de la amenaza por erosión costera. El retroceso de la línea de costa ha sido un punto

crítico de investigación y gestión por el cual se ha desarrollado la adquisición de información geológica, geomorfológica, oceanográfica y climatológica (Ossa, 2004; Posada y Guzmán, 2007; FONADE, 2010; INVEMAR, 2014).

Gamboa *et al* (2012) presentan el registro de la erosión costera en el borde de San Andrés isla, considerando el borde occidental susceptible a los procesos de disolución y atravesado por múltiples fracturas que lo hace más propenso a los ataques de los agentes erosivos. Las playas y pantanos de manglar al norte y oriente están más expuestos a los agentes marinos y por tal razón son más propensos a sufrir cambios relacionados con la dinámica.

Los sitios reportados con erosión media a alta son South End, Elsy Bar, vía circunvalar en Tom Hooker, Sector frente al hotel Decamerón, Sound Bay, San Luis y Sprat Bight (Gamboa *et al*; 2012), aunque cada sitio tiene sus rasgos erosivos se destacan entre ellos el desprendimiento de bloques, el socavamiento de la bancada de la vía circunvalar, afectaciones sobre la vegetación de dunas y palmeras, y la formación de escarpes erosivos.

Se han considerado con mayor detalles los sectores de Sound Bay hacia la vía circunvalar entre el Km 17 y 21 (FONADE, 2010; Sáenz *et al*, 2009) y Sprat Bight (FONADE, 2010; Martín-Prieto *et al*, 2013) en los cuales existen intervenciones antrópicas con obras que incluyen rellenos de arena, espolones, muros, enrocados, bolsacretos y restauración de dunas con vegetación (Ossa, 2004; INVEMAR, 2014). Aun cuando se han considerado otras alternativas como la relocalización de la vía circunvalar, posicionamiento de *reef balls* y relleno de playas (FONADE, 2010) estas aún no han sido aprobadas por la entidad ambiental CORALINA.

Como recomendación general se enfatiza en la necesidad de cuantificar el fenómeno erosivo en las playas y sectores acantilados de la isla y el desarrollo de estudios detallados sobre dinámica costera (Ossa, 2004; FONADE, 2010). La gobernación de San Andrés ha invertido en obras de ingeniería para la recuperación de la playa, sin resultados exitosos. Previo a la realización de otras intervenciones, es necesario entender los patrones de oleaje, vientos y corrientes, generando modelos que permitan definir las ventajas y desventajas de cualquier alternativa en corto, mediano o largo plazo (Martín-Prieto *et al*, 2013).

3.6. CLIMA Y OCEANOGRAFÍA

3.6.1. Vientos

Los vientos Alisios que entran en el Caribe forman el chorro de bajo nivel del Caribe o chorro de San Andrés (Poveda, 1998). Este se localiza en las capas superficiales de la atmósfera, entre los 850 hPa y 1000 hPa y están asociados con fuertes gradientes de temperatura entre océano-tierra-atmósfera (Stensrud, 1996). El chorro de San Andrés se intensifica en los meses de diciembre, enero y febrero, mientras que en los meses de septiembre, octubre y noviembre, disminuye. Durante el veranillo de San Juan, debido a la intensificación temporal del sistema de alta presión del Atlántico Norte, la velocidad es máxima pero concentrada en la menor área de cobertura.

Específicamente, el área de San Andrés y Providencia se encuentra influenciado por este chorro, el cual presenta velocidades máximas por encima de los 10 m/s en los trimestres de diciembre a

febrero y junio a agosto y velocidades mínimas de 6 m/s en el trimestre de septiembre a noviembre (Bernal *et al.*, 2006). Adicionalmente, las condiciones océano-atmosféricas del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina se encuentran condicionadas por otros factores como la corriente cálida del Golfo de México, los frentes fríos que se originan en Norte América, el paso de ondas tropicales que vienen del este en dirección oeste y los huracanes que se forman en el Caribe, como los registrados en los años 1961 (Hattie), 1971 (Edith), 1988 (Joan), 1996 (Cesar), 2005 (Wilma y Beta) (NOAA, 2012).

El clima del área es tropical seco y estacional debido a la influencia de los cambios de posición de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Nystuen y Andrade, 1993) y a los vientos Alisios del noreste (NE). La velocidad promedio anual del viento es 4,5 m/s; a principio de año, cuando la ZCIT está en la posición más sur se presenta la época seca en el Caribe (diciembre a marzo) y los vientos predominantes son del N y NE; entre los meses de abril a julio es la época conocida como "veranillo de San Juan" y en el mes de julio los vientos son más fuertes (6 a 7 m/s); entre agosto y noviembre la ZCIT se encuentra en la posición más norte, se genera la época de lluvias y los vientos en los meses de septiembre y octubre son más suaves (2 a 3 m/s) (Mesa et al., 1997; González y Hurtado, 2012). La dirección del viento predominante es NE (Figura 3.4), aunque en los meses de junio, julio y septiembre la dirección predominante es E (González y Hurtado, 2012).

Por otro lado, los eventos El Niño – Oscilación del Sur (ENOS) también afectan la climatología de la zona. Se ha corroborado que la magnitud del chorro de San Andrés está ligado con los eventos ENOS (Carmona et al., 2010). En los meses de diciembre a mayo, la velocidad del chorro de San Andrés es menor durante El Niño y mayor durante La Niña; sin embargo, en el período de junio a noviembre, la velocidad aumenta durante El Niño y se suaviza durante La Niña (Poveda y Mesa, 1999).

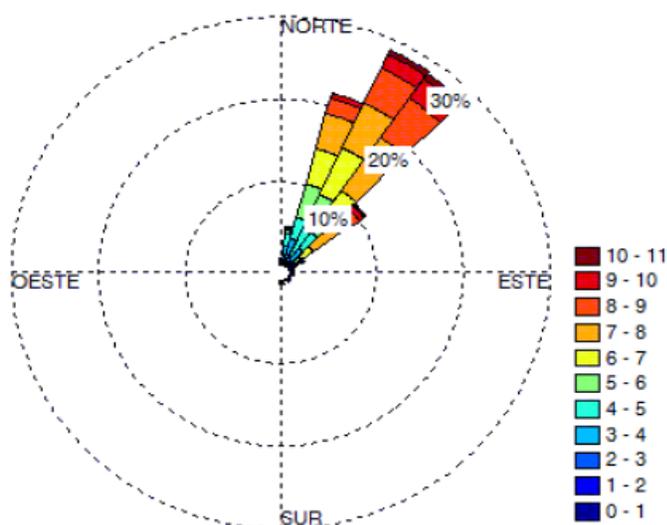


Figura 3.4 Rosa de vientos para el periodo comprendido entre enero de 1948 y octubre de 2013. Tomado de INVEMAR 2013.

Un análisis preliminar del campo de vientos a partir de datos del reanálisis NCEP/NCAR (Figura 3.5), evidencia un comportamiento diferente entre la componente zonal - U del viento (componente este-oeste) y la componente meridional - V (componente norte-sur). En ambas componentes (U y V) dominan los valores negativos, indicando sentido hacia el oeste y hacia el sur de los vientos, lo que se traduce en vientos provenientes del noreste (NE); sin embargo, en magnitud absoluta, son mayores los valores de la componente U (más negativos) y se identifica una pendiente positiva, evidenciando una disminución de la magnitud de esta componente en la serie. Caso contrario ocurre con la componente V, cuyos valores son menores en magnitud y se identifica una pendiente negativa, indicando un leve aumento de la magnitud absoluta de esta componente.

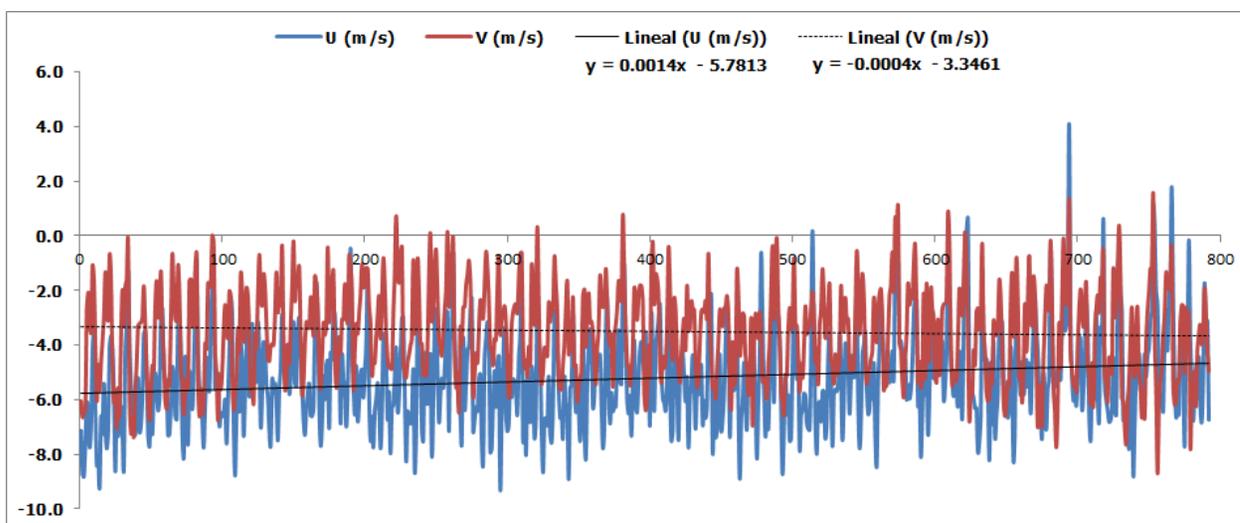


Figura 3.5 Serie de tiempo de las componentes zonal - U (este-oeste) y meridional – V (norte-sur) del viento para un punto cerca de la isla de San Andrés. Fuente: Reanálisis NCEP-NCAR.

3.6.2. Temperatura del aire y precipitación

Las variables más utilizadas para describir el comportamiento climático de una región son la temperatura del aire y la precipitación, ya que sintetizan el comportamiento de fenómenos oceánicos y atmosféricos de una región (Pabón et al., 2001). La temperatura del aire (T_a) media anual es de 27.4 °C, presenta valores bajos durante los primeros meses del año, aunque desde el mes de marzo se identifica un crecimiento exponencial de la misma, el cual tiene una estabilización entre los meses de mayo y agosto cuando empieza la disminución. El mes de menor T_a es febrero (26.6 °C) y el de mayor es junio (Figura 3.6).

Los datos del reanálisis NCEP/NCAR de la NOAA en un punto adyacente a la isla, también muestran un marcado ciclo anual (Figura 3.7). La temperatura promedio histórica es de ~26.02 °C, la mínima temperatura registrada es 23,8 °C y la máxima 27.45 °C. Con la media móvil a 12 meses se identifican dos períodos principales de altas temperaturas: 1987- 1989 y 1997-1999, además se identifica que en los últimos 9 años la T_a ha sido más alta.

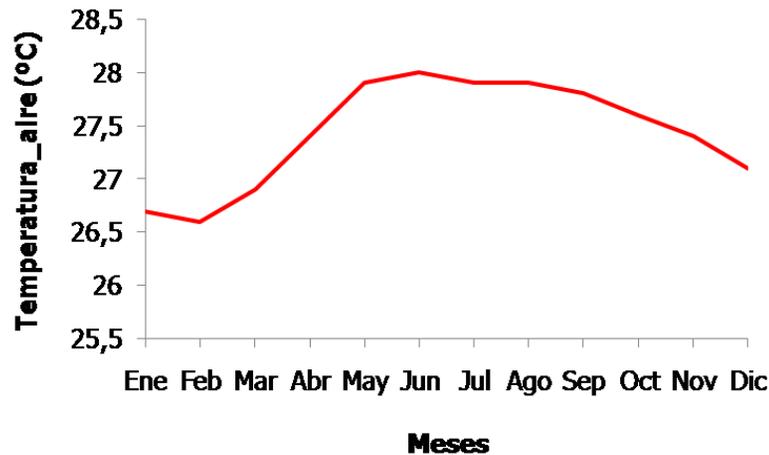


Figura 3.6 Valores medios mensuales de temperatura. Fuente de datos: González y Hurtado (2012).

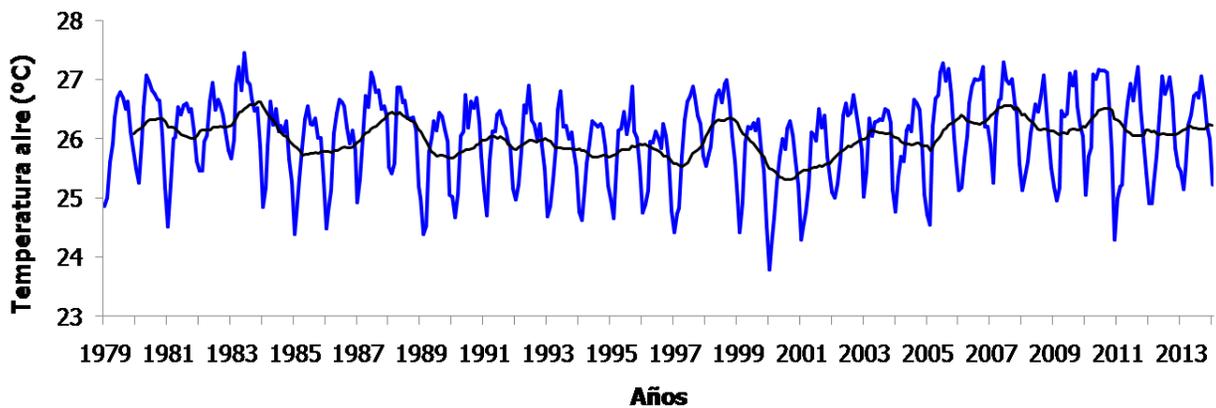


Figura 3.7 Temperatura del aire en un punto cercano al área de estudio. Línea negra: media móvil a 12 meses. Fuente de datos Reanálisis NCEP/NCAR

De otro lado, la precipitación anual promedio es de ~1900 mm repartidos irregularmente en una temporada seca (promedio mensual inferior a 50 mm) y una lluviosa (promedio mensual mayor a 150 mm) (Díaz et al., 1996; González y Hurtado, 2012). Con los datos de la estación meteorológica del IDEAM en el aeropuerto Rojas Pinilla, se identifica que durante los primeros meses del año, entre enero y abril, la precipitación es muy baja; mientras que durante los meses de mayo y agosto la precipitación es prácticamente tres veces mayor a la época seca y finalmente durante los meses de septiembre y noviembre la precipitación es máxima con promedio de 250 mm (Figura 3.8).

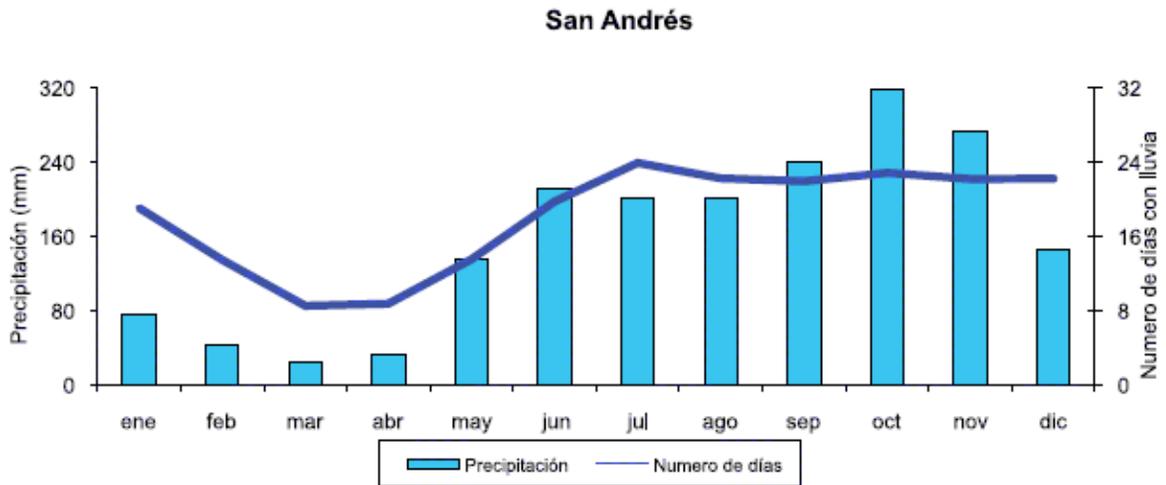


Figura 3.8 Precipitación en la isla de San Andrés. Tomada de: González y Hurtado (2012).

3.6.3. Eventos extremos

El cuarto reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), proyecta que para el año 2100 la temperatura media del planeta podría incrementarse en hasta $\sim 2^{\circ}\text{C}$, afectando así la variabilidad del clima y causando un aumento de eventos extremos tales como tormentas y huracanes entre otros (IPCC, 2007; Galindo y Samaniego, 2010). La temporada de huracanes en el Caribe tiene lugar entre el 1 de julio y el 30 de noviembre. En el Caribe se han presentado un 80% de los casos de tormenta y un 94% de los huracanes intensos (categorías 3 y 4), siendo el mes de septiembre el que posee la mayor ocurrencia de tormentas tropicales 34%, de huracanes 39% y un 49% de los huracanes intensos con categorías 3, 4 y 5 (Gonzalez y Hurtado, 2012) (Figura 3.9).

Los huracanes son eventos comunes en el océano Atlántico, debido a la convergencia de los vientos del este y del oeste (Mo et al., 2001). Los eventos extremos más significativos en el área del archipiélago de San Andrés y Providencia han sido la Tormenta N° 2-4 (1911), huracán Hattie (1961), huracán Alma (1970), huracán Joan (1988), huracán Cesar (1996), tormenta tropical Katrina (1999) y el huracán Beta (2005). En la base de datos HURDAT de la Agencia Nacional de la Atmósfera y el Océano (NOAA), se identifica los ciclones tropicales que han afectado el área cercana a la isla de San Andrés entre 1979 y 2013 (Tabla 3.1).

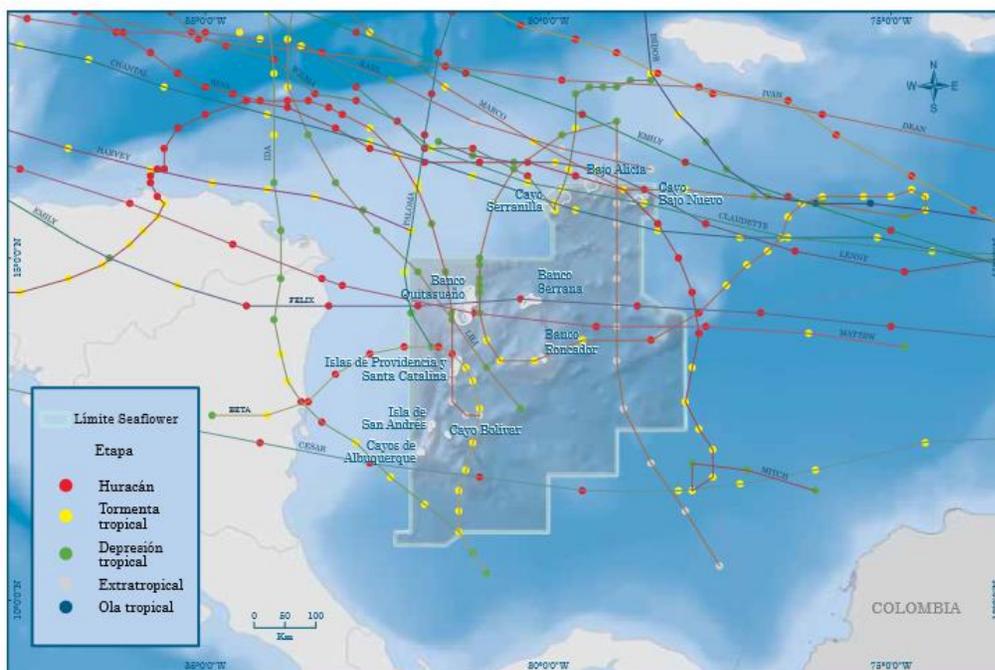


Figura 3.9 Trayectoria de huracanes, tormentas tropicales y depresiones tropicales en el área de la reserva de la biósfera Seaflower (1996-2001). Tomado de González y Hurtado (2012)

Tabla 3.1 Huracanes y ciclones tropicales registrados en el área del archipiélago en los últimos 34 años. Fuente: HURDAT- NOAA (2014)

Año	Evento	Año	Evento
1979	Depresión Tropical 19	1996	Huracán- 1 César Huracán- 1 Marco Huracán- 3 Lili
1980	Depresión Tropical 15 Huracán- 2 Jeanne Tormenta Tropical Hermine	1998	Huracán- Mitch
1981	Depresión Tropical 17 Depresión Tropical 2	1999	Huracán- 4 Lenny Tormenta Tropical Katrina
1985	Depresión Tropical 14	2001	Huracán- 4 Michelle
1986	Tormenta Tropical Danielle	2003	Huracán- 1 Claudette Tormenta Tropical Odette
1987	Depresión Tropical 8	2005	Huracán- 5 Emily Huracán- 3 Beta Tormenta Tropical Gamma
1988	Huracán- 4 Joan Tormenta Extratropical- 1 Keith	2007	Huracán- 5- Felix
1990	Huracán- 2 Diana	2008	Huracán- 4 Paloma
1993	Huracán- 2 Gert Tormenta Tropical Bret	2009	Huracán- 2 Ida
1994	Huracán- 1 Gordon	2010	Huracán- 2 Paula Huracán- 2 Tomas Tormenta Tropical Matthew
1995	Huracán- 3 Roxanne		

3.6.4. Hidrodinámica

En la circulación general de la cuenca Colombia se destacan la corriente Caribe (CC), el centro de surgencias de la Guajira, el Giro ciclónico de Panamá - Colombia (GPC) y la contracorriente Panamá-Colombia (CCPC), que es la porción costera del GPC en el Golfo del Darién (Molinari et al., 1980; Andrade y Barton, 2005; Bernal et al., 2006 - Figura 3.10). La corriente principal en el área de estudio es la Corriente del Caribe (CC) con dirección este-oeste proveniente de la zona ecuatorial del Atlántico con dirección al golfo de México. También se encuentra una corriente superficial suroccidental denominada Giro Panamá- Colombia (GPC), el cual se divide en dos brazos, el brazo sur, que se conoce como la contracorriente del GPC (Andrade et al., 2003), con una intensidad elevada y constante; y el brazo norte, que depende de la intensidad del viento. Si la fuerza de los vientos Alisios del norte es lo suficientemente fuerte, el giro continúa, en caso contrario, la corriente se dirige fuera de la cuenca Colombia con dirección al mar Caimán.

La circulación oceánica del área del Archipiélago de Isla de San Andrés, Providencia y Santa Catalina depende principalmente de la limitación geográfica que ofrece el paso Chibcha a las aguas de la corriente del Caribe y que fluyen hacia el mar Caimán (Andrade et al., 1996; Andrade, 2000). La circulación oceánica también depende de la configuración batimétrica de la región que obliga a la recirculación de las aguas que vienen del este y en el área giran cada vez más hacia el sur, hasta llegar al golfo de Mosquitos donde reside una celda ciclónica casi permanente (Andrade, 2001).

El oleaje responde a los patrones de variación espacio-temporal de los vientos en el Caribe (Mesa *et al.*, 1997). La dirección, periodo y la altura del oleaje en el Caribe colombiano están directamente relacionados con el patrón de los vientos. Según Mesa-García (2009) y basado en los datos derivados de satélite extraídos en una malla de 1° x 1° para el Caribe colombiano, el comportamiento del oleaje muestra una conducta bimodal asociada al comportamiento de los vientos Alisios del noreste, presentando dos periodos de vientos y oleajes intensos (bajas precipitaciones) y dos períodos de vientos y oleajes débiles (altas precipitaciones).

Respecto a la marea, esta es mixta principalmente diurna en el Caribe colombiano (Kjerfve, 1981), es decir, presenta dos pleamares y dos bajamares durante el día pero una más alta y más baja que la otra. El rango de la marea en el Caribe oscila entre 20 y 30 cm, rara vez excede los 50 cm, catalogándola como micromareal (Wiedeman, 1973; CCI, 2009). Según el IDEAM (2012), el monitoreo de las mareas en San Andrés se lleva a cabo en una estación mareográfica ubicada en las instalaciones de la base naval San Luis de la Armada Nacional, la cual registra datos desde enero de 1997 hasta la fecha. Los datos derivados de esta estación muestran que las mareas en San Andrés son de tipo diurno mixto con valores máximos del nivel del mar (pleamar) entre los meses de enero y julio y los mínimos (bajamar) en abril y octubre (INVEMAR, 2013).

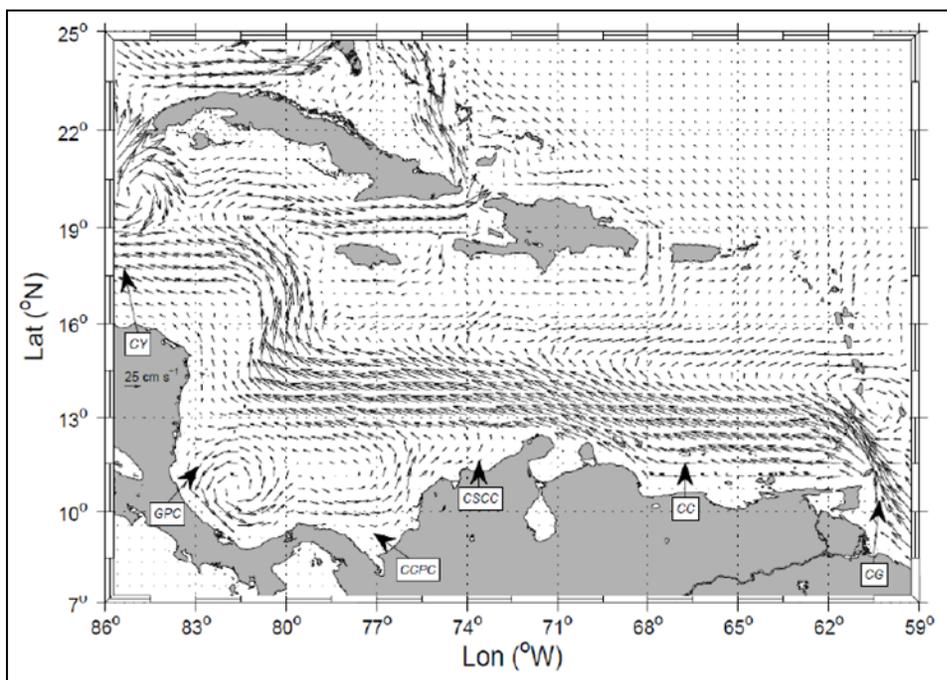


Figura 3.10 Circulación general en el Caribe. CG: Corriente de Guayana; CC: Corriente del Caribe; CSCC: Contracorriente Subsuperficial Costera del Caribe; CCPC: Contracorriente Panamá-Colombia; GPC: Giro Panamá-Colombia; CY: Corriente de Yucatán. Tomada de Ruiz-Ochoa (2011)

4. METODOLOGÍA

4.1. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

Se realizó un análisis de la geomorfología y procesos costeros utilizando como insumo la cartografía geomorfológica disponible del litoral en la zona de estudio (INGEOMINAS, 1996, Sáenz *et al.*, 2009, Posada *et al.*, 2011). Esto con el fin de realizar la actualización y proponer una cartografía de detalle, (>1:25.000) en sitios de interés por su importancia socio-económica o ambiental. La información se estructuró en un SIG para delimitar las unidades geomorfológicas utilizando como base la clasificación propuesta por Gómez *et al.*, (2012), y así se representó los procesos de erosión recientes frente a la línea de costa, específicamente en las zonas de interés socio-económico y ambiental. Mediante observaciones de campo se validaron las unidades geomorfológicas, la presencia de infraestructura y procesos costeros, además incluyó las respectivas anotaciones de campo acerca de la extensión percibida de la geoforma y su geometría, registro fotográfico y un archivo con datos GPS para la ubicación de datos de interés, esta información también incluyó las obras civiles realizadas para el control de la erosión costera.

El estudio de la evolución litoral a mediano plazo se realizó calculando los cambios semi-cuantitativos (acumulación y/o erosión) a lo largo de una costa determinada a partir de la comparación de fotos aéreas, imágenes de satélite y recorrido en campo con un Sistema de Posicionamiento Global GPS (Thieler *et al.*, 2010). Se realizó la consulta de imágenes satelitales según la disponibilidad en LabSIS (Laboratorio de Sistemas de Información - INVEMAR) o las entidades ambientales de la región. Para el año 2014 se levantó en las zonas críticas establecidas una línea de costa mediante GNSS, con corrección DGPS en post-proceso.

Las imágenes empleadas en el estudio (ej. foto aérea y/o imagen de satélite) fueron almacenadas en archivos raster. En este almacenamiento se comprobó la escala de píxel ya que una mayor compresión podría producir distorsiones significativas en la imagen. Posteriormente se realizó la georreferenciación de las imágenes y/o fotografías aéreas, con el objetivo de ajustarlas a un único sistema de referencia y minimizar dentro de ellas las distorsiones propias derivadas del proceso de adquisición de la imagen (Moore y Griggs, 2002). Se llevó a cabo utilizando una ortofotografía o imagen previamente georreferenciada como documento base para ajustar las imágenes a un sistema de coordenadas determinado (UTM – WGS 84). El proceso se realizó en un software SIG partiendo de una serie de puntos de control comunes entre cada fotograma y la ortofotografía digital de referencia. Para esto se siguieron los criterios de número, localización y distribución de los puntos de control (Thieler y Danforth, 1994).

Se utilizaron imágenes de tres fechas diferentes en los últimos 25 años con resolución igual o menor a 10 m (Tabla 4.1) en las cuales se evaluó la posición de la línea de costa en sectores seleccionados del territorio insular. En el análisis reportado por CORALINA (2006) y Martín-Prieto *et al.* (2013), se procesaron fotografías aéreas para evaluar los cambios ocurridos en el litoral durante los años 1944, 1956, 1984, 1990, 1996 y 1997 e identificar las playas sobre las cuales realizaron perfiles de playa y así establecer zonas de comparación; debido a la falta de material para un análisis multi-temporal de toda la isla, centraron el estudio específicamente en la zona norte (INVEMAR, 2014).

Tabla 4.1 Relación de imágenes de sensores remotos

Sensor	Fuente	Espectro	Resolución	Fecha Imagen
Fotografía aérea	IGAC			1990
Ikonos	Proyecto INVEMAR	NIR,R,G,B	1m, 4m	01/12/2002
Ultra Cam	IGAC	R,G,B,Pan	0.07m	17/04/2007

Para cada año disponible se delimitó la línea de costa en un archivo de tipo shapefile el cual sirvió para la determinación de la evolución litoral a mediano plazo. Una vez tenidas todas las líneas de costa usadas, se mediaron las variaciones empleando la extensión de ARCGIS Digital Shoreline Analysis System – DSAS (USGS). Esta extensión permitió calcular parámetros que ayudan a determinar el estado evolutivo dentro del intervalo de tiempo estudiado (Thieler et al., 2010), con el fin de representar la tasa de retroceso por año se utilizó el parámetro EPR resultado del análisis con la herramienta DSAS en transectos definidos cada 50 m de seis sectores (playas) considerados como críticos frente a la erosión costera y con interés socioeconómico y ambiental (Figura 4.1).

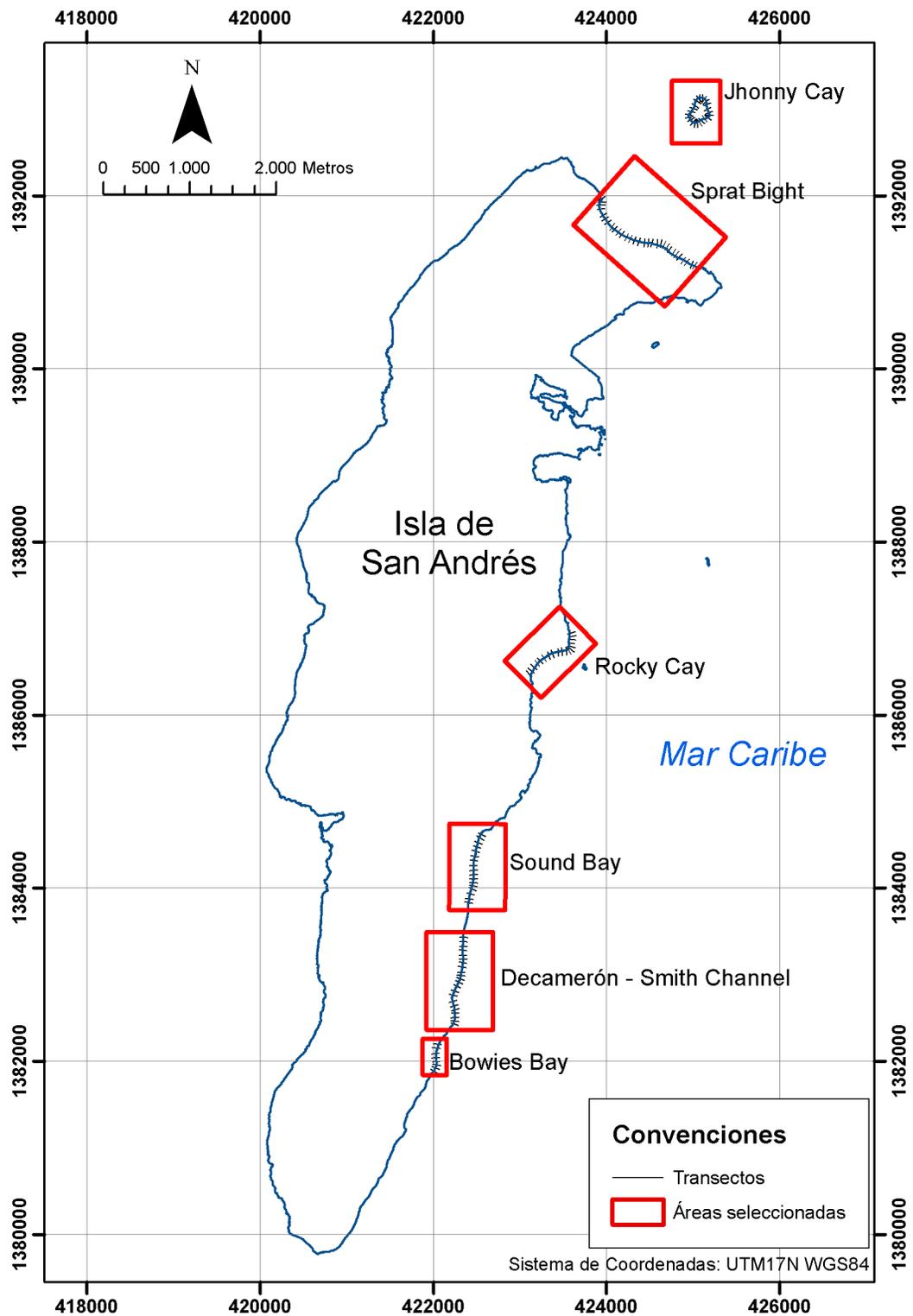


Figura 4.1 Localización de las áreas para análisis de variación de la línea de costa en la isla de San Andrés.

4.2. VARIABILIDAD CLIMÁTICA RECIENTE Y SU INFLUENCIA EN EL RÉGIMEN DE OLEAJE DEL SECTOR.

Para describir y analizar la variabilidad climática reciente en el área de San Andrés, se utilizaron las variables: vientos, presión atmosférica e índices climáticos. Las fuentes de datos para analizar el campo de vientos serán el Reanálisis NCEP/NCAR (2.5° aproximadamente 270 km), el escaterómetro QuikSCAT (0.25°, 27 km aproximadamente) y la estación INAP perteneciente al sistema GOOS y administrada por el INVEMAR que contiene datos desde el año 2009 hasta la actualidad y disponibles a través del Sistema Global de Observación de los Océanos (GOOS).

Con el objetivo de comparar la fuente de datos de vientos y presión satelital con los datos medidos in situ en la estación INAP, con los datos de los años 2009 al 2013 se hicieron diagramas de dispersión y cálculos de estadísticos: error cuadrático medio (RMSE), para identificar las diferencias en promedio entre los valores de reanálisis y los medidos, sesgo (BIAS) para indicar la tendencia del reanálisis a sobreestimar o subestimar los datos medidos in situ y el coeficiente de correlación lineal de Pearson (rp) para medir el grado de asociación lineal entre las variables.

En cuanto a variabilidad, para el ciclo anual de la dirección del viento, se utilizó la serie de 10 años (1999-2009) del escaterómetro QuikSCAT y se graficaron en planta los vectores mes a mes en el programa Ocean Data View. Las series de tiempo mensuales (1979-2013) de la magnitud del viento y la presión del Reanálisis se promediaron mensualmente para identificar el ciclo anual de cada una. Estos resultados se compararon con el ciclo identificado a través de otras fuentes (IDEAM, INAP y QuikSCAT). A las series de tiempo de las variables vientos y presión, se les calculó la estadística descriptiva básica (media, máximo, mínimo y desviación estándar) para establecer los valores en condiciones normales.

Posteriormente y para analizar los valores extremos, se calcularon los percentiles 5 y 95 de las series de tiempo (Rusticucci y Barrucand, 2001), los cuales indican los valores extremos con base en su posición en la serie ordenada de menor a mayor. Finalmente y con el objetivo de identificar posibles asociaciones de las variables estudiadas con eventos macroclimáticos, se emplearon índices atmosféricos: Índice de Oscilación del Sur (IOS) y la Oscilación del Atlántico Norte (OAN) e índices oceánicos, asociados con la temperatura superficial de mar (TSM): Índice del Caribe (CAR), que indica las anomalías promedio de la TSM del mar Caribe y el golfo de México y el índice del Atlántico Norte Tropical (NTA por sus iniciales en inglés) indica las anomalías de la TSM promediadas sobre un cuadrante comprendido entre las coordenadas 10-60 ° O, 6-20 ° N. Los índices fueron obtenidos de la página web de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA; www.cpc.ncep.noaa.gov/) y fueron comparados con las anomalías estandarizadas de vientos y presión para identificar asociaciones y correlaciones.

4.3. ANÁLISIS DE LA AMENAZA Y VULNERABILIDAD POR EROSIÓN COSTERA

Sobre las seis playas seleccionadas anteriormente se efectuó la integración y análisis de la información en una cuadrícula de 100 x 100 m. Estos sectores hacen parte de las áreas críticas por erosión costera obtenidas como resultado del informe técnico del convenio INVEMAR-CORALINA (2013).

A partir de los resultados de la evolución litoral a corto y mediano plazo y la variabilidad climática del área de estudio, se realizó la evaluación de la amenaza por erosión costera a las playas mediante un análisis multicriterio a través de la ponderación y el cruce de variables físicas y oceanográficas. El análisis de la amenaza se generó a partir de dos factores intrínsecos al fenómeno: su magnitud y la ocurrencia, y un componente intrínseco a la susceptibilidad del terreno (Alcántara, 2008; Invemar-GEO, 2014), las cuales determinaron la tendencia o probabilidad que la línea de costa se vea afectada por la erosión costera (MOVE, 2010; Ojeda, 2001; Gornitz, 1994).

En la evaluación de la vulnerabilidad se tuvo en cuenta tres componentes: el primero que se abordó se relaciona con los elementos expuestos de cada área (Tabla 4.2) (sociedad y ecosistemas); el segundo componente fue la fragilidad de los distintos sistemas o dimensiones (física, social, económica, ecológica, institucional y cultural) (Tabla 4.3 a 4.7); y el tercer componente tiene que ver con la falta de resiliencia (incapacidad de enfrentar, incapacidad de respuesta e incapacidad de anticipar) (Tabla 4.8 a 4.11), modificados de Invemar-GEO (2014) e Invemar-GEO (2013). La vulnerabilidad total que se obtuvo como el resultado de la sumatoria de estos tres componentes; los resultados de amenaza y vulnerabilidad alta son zonas prioritarias y requieren acciones de mitigación inmediata (MOVE, 2010; Ojeda, 2001; Gornitz, 1994).

Tabla 4.2 Exposición (E)

Nº	VARIABLE	RANKING					FACTOR
		Muy Bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy Alto (5)	
1	Distancia de coberturas vegetales	Más de 80 m	50 a 80 m	30 a 50 m	10 a 30 m	Menos de 10 m	1
2	Densidad de viviendas	0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 - 20	Más de 20	1
3	Número de personas por vivienda	1 a 2	2 a 4	4 a 6	6 a 8	Más de 8	1
4	Número de construcciones (viviendas, servicios, etc.)	Menos de 20	20 a 40	40 a 80	80 a 140	Más de 140	1

Tabla 4.3 Fragilidad (F) - Fragilidad Física (FF)

Nº	VARIABLE	RANKING					FACTOR
		Muy Bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy Alto (5)	
1	Material de construcción	Madera + 80%	Madera 60 a 80%	Concreto 40 a 60%	Concreto 60 a 80%	Concreto + del 80%	1
2	Estado de las viviendas	Buen estado	Bueno - Regular	Regular estado	Regular - Malo	Mal estado	1
3	Índice K - Estructuras	Extremo (K mayor de 1)	Máximo (K=0.51-1)	Promedio (K= 0.11-0.5)	Mínimo (k= 0.0001-0.1)	No estructuras (K=0)	1
4	Infraestructura de Servicios	Más de 10	9 y 8	7 y 5	4 y 3	Menos de 2	1
5	Comunicación Vías	Vías principales, secundarias	Vías carreteable	Caminos, trocha	Fluvial	Puentes en madera	1

Tabla 4.4 Fragilidad (F) - Fragilidad Social (FS)

Nº	VARIABLE	RANKING					FACTOR
		Muy Bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy Alto (5)	
1	Edad de la población (mayoría)	De 18 a 55 años		> de 55 años		< de 18 años	1
2	Empleo	Más de 80% Sector Turismo-servicios	Entre 1 y 3	Más de 80% Servicios	Entre 3 y 5	Más de 80% Pesca	1
3	Educación población	Más de 80% Profesional / técnico	Entre 1 y 3	Más de 80% Secundaria	Entre 1 y 3	Más de 80% Primaria / sin educación	1
4	Establecimientos educativos	Profesional / técnico / secundaria / primaria		Secundaria / Primaria	Primaria	Sin establecimientos	1
5	Servicio de Salud	Nivel III		Nivel II	Nivel I	Sin servicio	1

Tabla 4.5 Fragilidad (F) - Fragilidad Ecológica (FE)

Nº	VARIABLE	RANKING					FACTOR
		Muy Bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy Alto (5)	
1	Cobertura vegetal x unidad de estudio	Más del 80%	Entre 80 y 60%	Entre 50 y 30%	Entre 30 y 10%	Menos del 10%	1
2	Conservación de especies o hábitat representativos	Presencia permanente de aves y tortugas marinas		Presencia ocasional de aves y tortugas marinas		Ausencia de aves y tortugas marinas	1
3	Aumento de la contaminación	Ausencia de basuras		Presencia ocasional de basuras		Acumulación continua de basuras	1
4	Aguas residuales	Ausencia		1 canal de aguas		Más de 2 canales de aguas	1

Tabla 4.6 Fragilidad (F) - Fragilidad Económica (FEc)

Nº	VARIABLE	RANKING					FACTOR
		Muy Bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy Alto (5)	
1	Vocación Turismo	Turística todo el tiempo		Turismo temporal		No hay turismo	1
2	Actividades económicas	Turismo, servicios y otras actividades (comercio, servicios)		Turismo y servicios		Pesca única actividad	1
3	Servicios ecosistémicos	Alimentaria materiales turismo		Dos servicios		De 0 a 1 servicio	1
4	Usos del suelo	Turismo, recreación, comercio, servicios	Portuario, transporte	Agrícola, ganadero	Habitacional	Conservación	1

Tabla 4.7 Fragilidad (F) - Fragilidad Cultural (FC)

Nº	VARIABLE	RANKING					FACTOR
		Muy Bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy Alto (5)	
1	Prácticas forestales tradicionales	Presencia		Ocasional		Ausencia	1
2	Prácticas culturales en la playa	Presencia		Ocasional		Ausencia	1
3	Comunidades étnicas	Presencia				Ausencia	1

Tabla 4.8 Fragilidad (F) - Fragilidad Institucional (F_I)

Nº	VARIABLE	RANKING					FACTOR
		Muy Bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy Alto (5)	
1	Organismo de socorro, prevención y atención de desastres	Presentes permanentemente	Presentes temporadas por	A distancia	En momentos críticos	Ausencia	1
2	Organización comunitaria	Presentes permanentemente	Presentes temporadas por	A distancia	En momentos críticos	Ausencia	1
3	Presencia del estado	Presentes permanentemente	Presentes temporadas por	A distancia	En momentos críticos	Ausencia	1

Tabla 4.9 Falta de Resiliencia – (R) - Incapacidad de Anticipar (ICA)

Nº	VARIABLE	RANKING					FACTOR
		Muy Bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy Alto (5)	
1	Obras de mitigación	Más del 80%	80 y 60%	Entre 50 y 30%	Entre 30 y 10%	Menos del 10%	1
2	Tipo de Construcción viviendas	Madera Más del 80%	Madera 60 a 80%	Madera - Concreto 50 a 60%	Concreto 60 a 80%	Concreto más del 80%	1
3	Conocimiento sobre la erosión costera de la población (capacitados, ancestral)	Más del 80%	80 y 60%	Entre 50 y 30%	Entre 30 y 10%	Menos del 10%	1
4	Plan de emergencia	Plan de emergencia por erosión costera				No tienen	1

Tabla 4.10 Falta de Resiliencia (R) - Incapacidad de Enfrentar (ICE)

Nº	VARIABLE	RANKING					FACTOR
		Muy Bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy Alto (5)	
1	Distancia organismo de socorro	En la cabecera poblacional		Población cercana rango de 5 Km		Otra población a más de 5 Km	1
2	Acceso (vías)	Terrestre en buen estado		Aéreo		Agua	1
3	Ruta de evacuación	Tienen rutas de evacuación				No tienen rutas de evacuación	1
4	Aislamiento de la comunidad (distancia a cabecera municipal)	Menos de 5 km (cualquier acceso)	5 a 10 km	10 a 20 km acceso limitado		Más de 20 Km y acceso por agua o aire	1

Tabla 4.11 Falta de Resiliencia (R) - Incapacidad de Respuesta (ICR)

Nº	VARIABLE	RANKING					FACTOR
		Muy Bajo (1)	Bajo (2)	Medio (3)	Alto (4)	Muy Alto (5)	
1	Techos	Livianos		Intermedio		Pesados (concreto)	1
2	Viviendas	Madera Más del 80%	Madera 60 a 80%	Madera - Concreto 50 a 60%	Concreto 60 a 80%	Concreto más del 80%	1
3	Seguros del hogar	Tienen				No tienen	1
4	Respuesta de la vegetación	Cobertura vegetal presente		Intermedio		Cobertura vegetal no presente	1
5	Organización comunitaria	Hacen parte de alguna organización comunitaria o asociación		Temporal		No hacen parte de ninguna organización	1

5. RESULTADOS

5.1. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA Y SUS CAUSAS

En la identificación de segmentos con erosión costera actual se determinó que las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina cuentan con 5242,8 metros lineales de fenómenos relacionados con erosión costera de categoría alta, 8131,3 metros lineales de erosión costera media y 7114,8 metros lineales de erosión costera baja, siendo las zonas más críticas sectores tales como Sprat Bight, San Luis, vía circunvalar al occidente de la isla y Sound Bay, para la isla de San Andrés (Guzmán *et al*, 2007; Posada *et al*, 2009; FONADE, 2010; INVEMAR, 2014).

5.1.1. Playa Sprat Bight

Ubicada en el sector norte de la isla la playa de Sprat Bight tiene una longitud de 1590 m desde el antiguo sector de La Fonda Antioqueña (ahora Juan Valdez) al oriente, hasta la Cooperativa de pescadores en el extremo occidental. Está limitada por el paseo peatonal, el cual fue construido entre los años 2004 y 2005. Se pueden reconocer en ella tres sectores delimitados por las estructuras antrópicas que han afectado su desarrollo, el primer sector queda delimitado al occidente por el espolón frente al Hotel Tiuna, corresponde a una playa con ancho máximo de 42 m, cuya playa trasera está poblada por palmeras que ayudan a formar montículos de arena en la base de sus troncos, la pendiente en esta zona es baja ($<1^\circ$), la posterior presencia del frente de playa se vio reflejada en el aumento de la pendiente que alcanza los 11° , las alturas del terreno varían cerca de 1,5 m, el depósito arenoso continúa hacia la playa sumergida, donde aparecen esporádicamente ondulitas de fondo, pastos marinos y bloques antrópicos.

El segundo sector está delimitado por los dos espolones principales en el centro de la playa Sprat Bight, entre el Hotel Tiuna y el final de la avenida 20 de Julio, la restricción provocada por estas estructuras parece desfavorecer la acumulación de sedimentos, por tanto, la playa es corta y controlada por la presencia de vegetación de dunas en formación por el proyecto de restauración de CORALINA (Figura 5.1a). El frente de playa alcanza pendientes de 11° y el depósito desaparece en la zona sumergida donde queda al descubierto la terraza arrecifal.

El tercer sector corresponde a las inmediaciones del Hotel Isleño, es una playa ancha controlada en su parte trasera por las dunas del proyecto de restauración de CORALINA, frente de playa que alcanza los 10° y tiene una curvatura en la parte occidental; luego de cruzar el límite del paseo peatonal, la playa colinda con la vía circunvalar y tiene un canal de desagüe de aguas residuales, además esta área es utilizada como zona de fondeo para las barcas pesqueras artesanales (Figura 5.1b). En algunos momentos del año este sector presenta una alta acumulación de fanerógamas en el frente de playa, que ayudan a la retención de sedimentos.



Figura 5.1 Playa Sprat Bight a) Obras de protección y restauración de dunas, b) sector de la cooperativa de pescadores.

La evaluación general de los cambios en la línea de costa en Sprat Bight (Figura 5.2) mostró un retroceso entre 0,1 y 1,8 m/año entre 1990 y 2014, sin embargo, hay que considerar que el marco de referencia de 1990 está relacionado con la realización de un relleno de playa (Prada y Hawkins, 2005 en Martín-Prieto *et al*, 2013). Aun cuando el panorama general en cuanto a erosión costera es desfavorable para esta playa, la evaluación con respecto a las líneas de costa entre 2002, 2007 y 2014, refleja un aporte significativo de sedimento hacia el sector noroccidental, de igual manera la prevención de salidas de arena a partir de las obras para recuperación de dunas y vegetación en el borde del paseo peatonal favorecen el sostenimiento de la playa, aun así la erosión acentuada en el margen deriva abajo de los espolones es un aspecto a considerar a corto plazo para la gestión adecuada del sector.

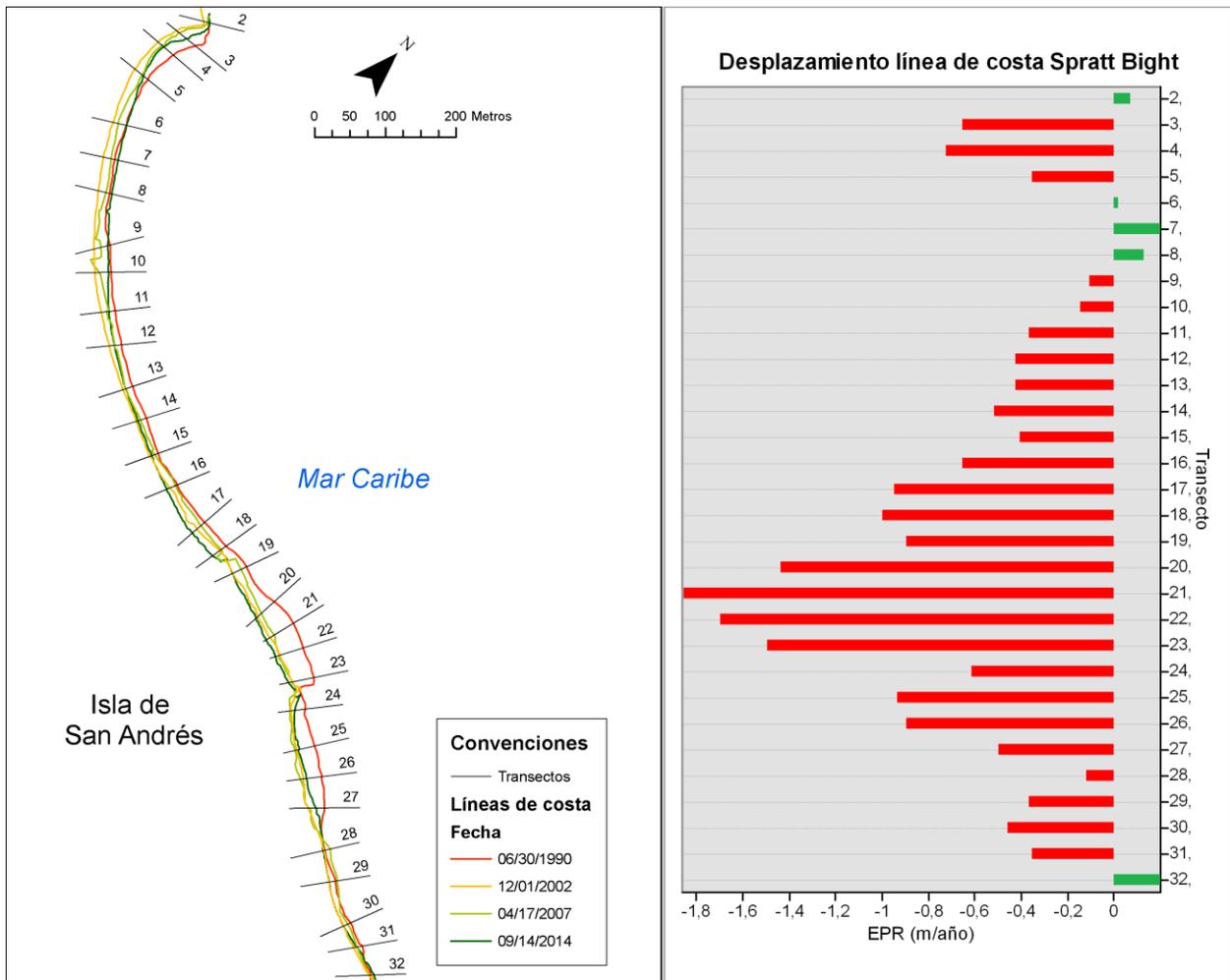


Figura 5.2 Desplazamiento de la línea de costa en la playa Spratt Bight entre 1990 y 2014.

5.1.2. Playa Rocky Cay

La playa de Rocky Cay se puede seguir en un trayecto de 790 m longitudinalmente, ubicada en la punta formada hacia el cayo al que debe su nombre, en el costado oriental de la isla de San Andrés. Hacia el nororiente se cierra contra una terraza arrecifal, la cual está afectada antrópicamente por la presencia de muros y enrocados (Figura 5.3a), es un sector de playa angosto con pendiente promedio de 3°. El frente de playa alcanza pendientes de 11°, el mismo y la playa sumergida se caracterizan por la abundancia de fanerógamas marinas las cuales al acumularse en el frente de playa son removidas o enterradas por los encargados del mantenimiento (Figura 5.3b). A partir de la punta en la cual cambia la dirección de la playa la amplitud de la misma aumenta hasta 65 m, hacia el suroccidente se forma sobre una bahía en la que la acumulación de sedimentos toma una forma cóncava vista en planta. El análisis de desplazamiento de la línea de costa (

Figura 5.4) mostró el retroceso generalizado del costado nororiental con tasas hasta de 1,3 m/año desde el año 1990, sin embargo la relación entre las líneas de costa de 2002, 2007 y

2014 muestra periodos de erosión y acreción a lo largo de todo el sector de Rocky Cay, mostrando lugares de recuperación en el área central de esta playa.



Figura 5.3 Playa Rocky Cay, a) playa angosta en el costado nororiental, con enrocados y muros, b) remoción de residuos orgánicos (pastos marinos) del frente de playa.

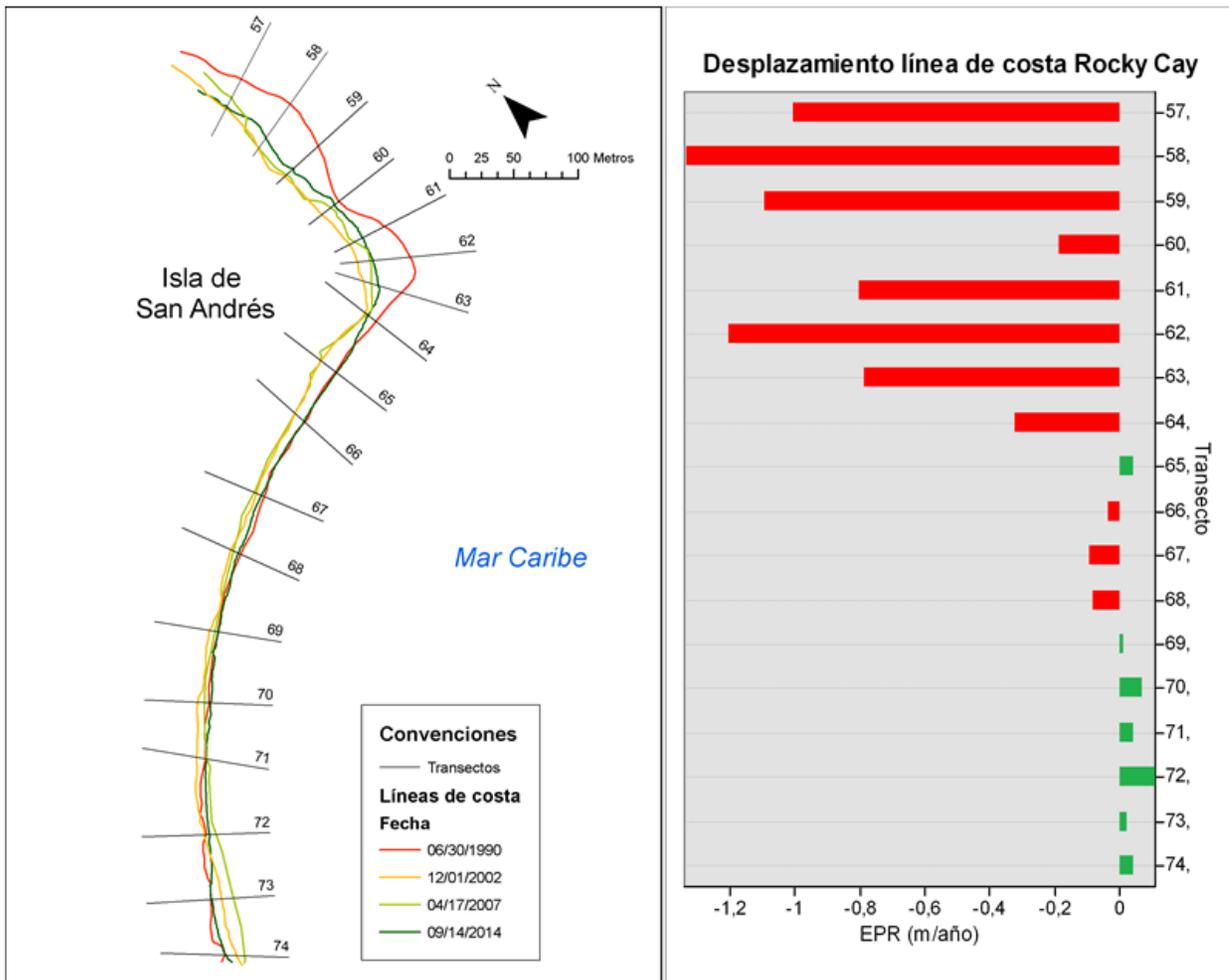


Figura 5.4 Desplazamiento de la línea de costa en la playa Rocky Cay entre 1990 y 2014.

Esta playa de alto desarrollo turístico está limitada hacia la isla por cerramientos de predios privados, las construcciones se encuentran a una distancia mayor a 30 m de la línea de costa. En la playa trasera se ha mantenido la vegetación de palmeras y hay crecimiento de plantas rastreras sobre dunas incipientes. En el área central de Rocky Cay se evidenció la formación de un escarpe de playa de 30 cm, este se formó entre la berma con pendientes entre 0 y 1° y el frente de playa con 6° de inclinación.



Figura 5.5 Playa Rocky Cay, a) sector centro, área turística con construcciones alejadas de la playa trasera y cerramientos en buen estado, b) sector suroccidental, playa amplia con vegetación de palmeras y salida de un desagüe, colindante con la terraza marina terciaria.

5.1.3. Playa Sound Bay

La playa de Sound Bay está limitada al norte por la terraza arrecifal de San Luis, en el sector donde se encuentra la Iglesia Católica San José, allí el depósito de playa se encuentra cubriendo las unidades del Terciario. La playa tiene un ancho aproximado de 15 m, su playa trasera está cubierta por palmeras y vegetación rastrera, se forma un escarpe de berma que alcanza los 60 cm, y un frente de playa con pendiente promedio de 9°.

Con una longitud de 895 m, la playa trasera está limitada por la presencia de viviendas, solo algunos sectores se han mantenido libres como lotes baldíos, o espacios para recreación y acceso peatonal. En el área central, a la altura del restaurante "El Paraíso" la zona de playa alcanza un ancho de 20 m, el área trasera frente a las viviendas esta descubierta, la línea de costa se demarca por la acumulación de algas y la pendiente de 5° en el frente de playa, que se reduce a 2° en el área sumergida. En el área sur de Sound Bay, la playa es estrecha entre los residuos de viviendas abandonadas y el frente de playa, el ancho permitido para la formación del depósito es menor a los 8 m, la pendiente en la parte expuesta es de 5° en promedio, sin embargo en la parte sumergida la inclinación de la playa alcanza los 14°.

El retroceso de la línea de costa de este sector es generalizado desde 1990 con tasas entre 0,5 y 1,2 m, la erosión evidenciada por la caída de viviendas es más notoria en el área sur de esta

playa. El área central (Figura 5.7: Perfiles 79 a 85) muestra una mayor estabilidad de la playa con periodos de erosión y acreción de acuerdo con las líneas de costa entre 2002 y 2014.



Figura 5.6 Playa Sound Bay, a) sector norte, playa trasera con viviendas, acumulación de pastos en la línea de costa, al fondo se observa la terraza marina de San Luis, b) vivienda abandonada al verse afectada por la erosión costera.

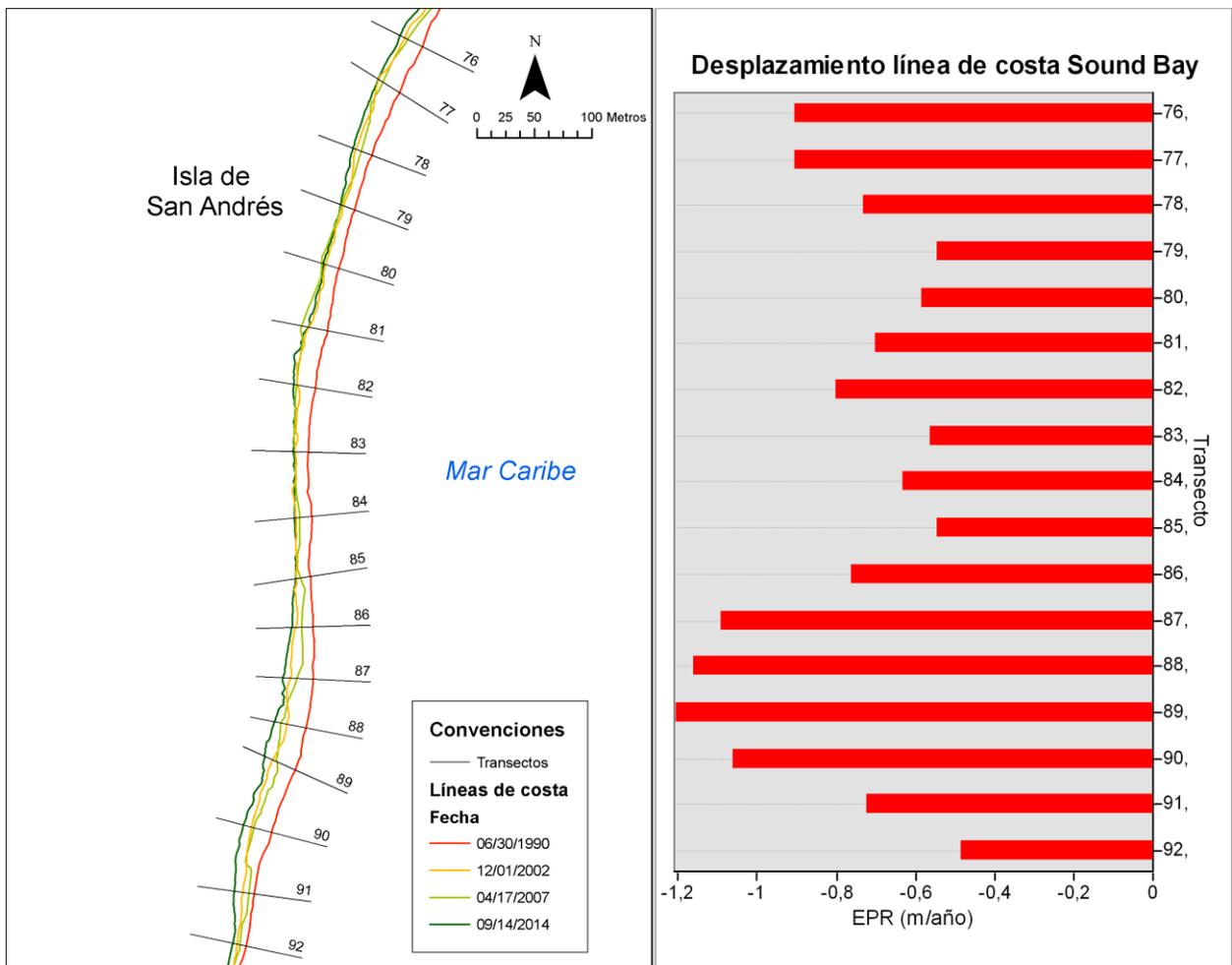


Figura 5.7 Desplazamiento de la línea de costa en la playa Sound Bay entre 1990 y 2014.

5.1.4. Playa Decamerón – Smith Channel

Esta playa puede seguirse a lo largo de 1100 m en el costado oriental de la isla de San Andrés, a partir de la localidad del hotel Decamerón San Luis hasta el sector de Smith Channel, incluyendo las inmediaciones de Tom Hooker. El depósito se encuentra limitado al norte por la presencia de terrazas marinas antiguas, expuestas a la acción del mar frente al borde escarpado formado por el terraplén de la vía circunvalar, en este sector fuertemente afectado por la erosión costera, se han realizado diversas obras de intervención, como son: i) protección con bolsacretos, ii) relleno con arenas, iii) revegetación sobre enrrocados antiguos y iv) revegetación de dunas.

La playa frente al hotel Decamerón es angosta, con un ancho que oscila entre los 5 y 10 m, el área trasera es utilizada como espacio de recreación turística, con escasas palmeras, y la presencia del quiosco “Kela’s” el cual se ha visto afectado por la remoción de sedimentos en sus bases. La pendiente en el frente de playa alcanza los 11°, posterior a esta se forma una depresión que se puede identificar en algunos lugares entre el hotel y el sector de Smith Channel, la presencia de la misma queda limitada a la formación de *beachrock* (Figura 5.8 a). Esto favorece la formación de piscinas naturales en las que el flujo de agua puede acarrear sedimentos en sentido sur-norte.

Hacia el sur del hotel, se ha mantenido la vegetación de arbustos, pastos y palmeras entre la vía y la playa trasera, favoreciendo el sostenimiento de la duna como proveedora de arenas al medio natural de la playa (Figura 5.8 b). Aun así, las tasas de retroceso de la línea de costa entre 1990 y 2014, se encuentran con valores entre 0,2 y 0,8 m/año, siendo mayores en cercanías del hotel Decamerón y la punta al sur de la vía Tom Hooker (Figura 5.9)



Figura 5.8 a) Playa frente al hotel Decamerón, depresión formada por la erosión de la playa limitada por la presencia de *beachrock*, b) playa en el sector Tom Hooker, con restos de algas y vegetación en la playa trasera.

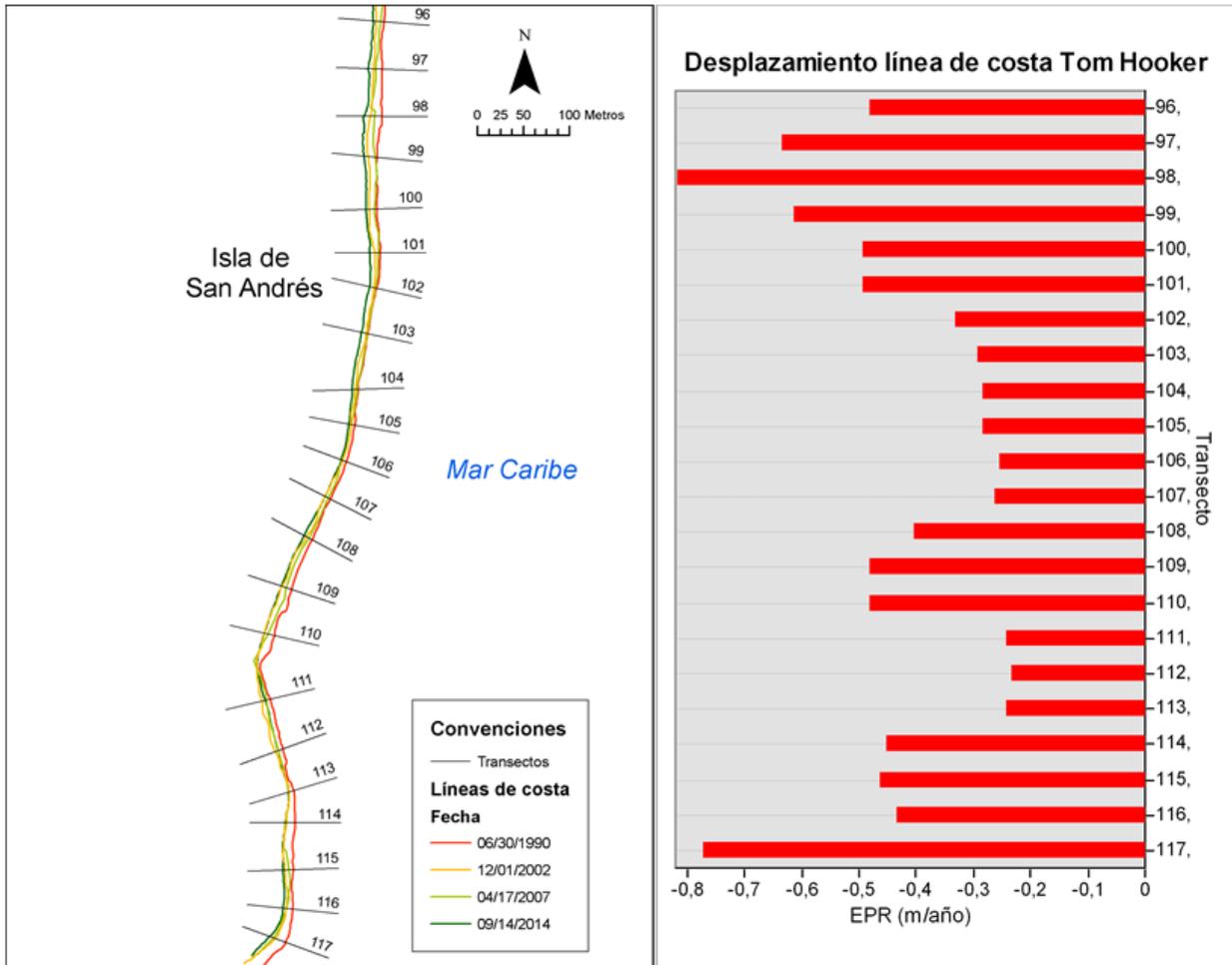


Figura 5.9 Desplazamiento de la línea de costa en la playa del sector Decamerón, Smith Channel, Tom Hooker, entre 1990 y 2014.

5.1.5. Playa Bowies Bay

Ubicada al sur de Tom Hooker, esta playa angosta con 8 m de amplitud máxima se puede seguir en una longitud de 411 m. En la bahía que se forma en el sector de "Bengue's", se caracteriza por la exposición del depósito de playa a modificaciones eólicas, remoción de arenas hacia la vía circunvalar, debido a la ausencia de vegetación en la playa trasera. El frente de playa descende con una pendiente de 13° hacia una piscina natural formada por la presencia de la terraza marina (Figura 5.10a), esto favorece la existencia de una corriente en dirección sur-norte. Hacia el sur con el cambio de orientación de la línea de costa el depósito de playa también varía en sus condiciones. Allí se encuentra limitado entre la vegetación arbustiva que protege la duna y por tanto el movimiento de sedimentos hacia la vía, y la terraza marina en la parte inferior del frente de playa (Figura 5.10b). El retroceso de la línea de costa entre 1990 y 2014 para este sector se diferencia según la dirección en que está expuesta la línea de costa (Figura 5.11), para el área de "Bengue's" en sentido norte – sur, las tasas de erosión se encuentran entre 0,4 – 0,6 m/año. El sector al sur, Bowies Bay, con orientación suroeste – noreste presentó tasas alrededor de los 0,3 m/año.



Figura 5.10 a) Playa en el sector "Bengue's" con una playa expuesta a erosión eólica, nótese la piscina natural entre la playa y la terraza marina, b) playa hacia el sector Bowies Bay, angosta con vegetación en la parte trasera y terraza marina expuesta limitando el depósito en el frente de playa.

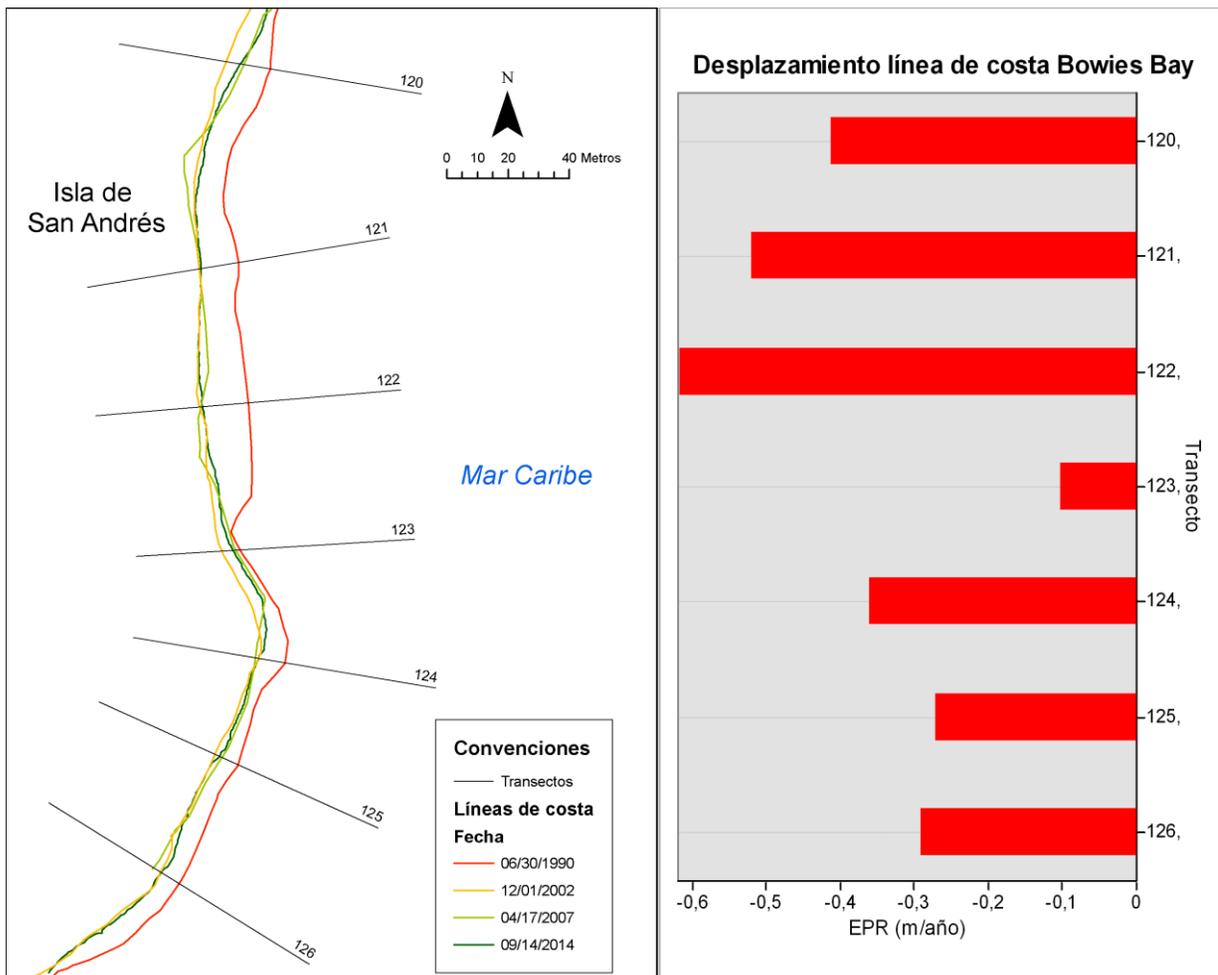


Figura 5.11 Desplazamiento de la línea de costa en la playa del sector Bowies Bay entre 1990 y 2014.

5.1.6. Jhonny Cay

Jhonny Cay, es un islote ubicado a 1,4 km al nor-noreste de San Andrés, que puede divisarse desde Sprat Bight. Con un perímetro de 750 m, el sector de playa se desarrolla con mayor incidencia hacia el sur y occidente (490 m), mientras que al norte y oriente se encuentra expuesta la terraza marina (260 m). El depósito de playa se ha acumulado por encima de la terraza marina de origen coralino, tiene amplitudes entre 5 – 15 m condicionadas con la orientación de la línea de costa, al ser esta la limitante en la exposición de los sedimentos a la acción de factores oceanográficos. El costado sur presenta el mayor desarrollo de playa, con una playa trasera de 15 m, limitada por la zona de vegetación rastrera, arbustiva y palmeras, el frente de playa con pendientes de 10° permite el desarrollo de un área de lavado amplia (10 m) que está relacionada con la altura del oleaje incidente (Figura 5.12a).

En la parte sumergida la presencia de bloques aparentemente relictos de la terraza marina limita la continuidad del depósito hacia profundidades mayores a los 80 cm. En el costado occidental el depósito está limitado por la vegetación sobre la parte más consolidada de la isla y la terraza marina o beachrock, este frente de playa tiene una pendiente de 12° (Figura 5.12b). Las variaciones en la línea de costa entre 1990 y 2014 muestran el completo retroceso de la isla, siendo más significativa la pérdida de playas en el área sur y occidente con tasas de pérdida mayores a 1,5 m/año, en el norte las tasas se encuentran alrededor de 0,3 m/año.



Figura 5.12 a) Playa en el área sur de Jhonny Cay amplia, con vegetación y bloques relictos de obras costeras, b) playa en el costado occidental de Jhonny Cay limitada por la terraza marina en la parte sumergida.

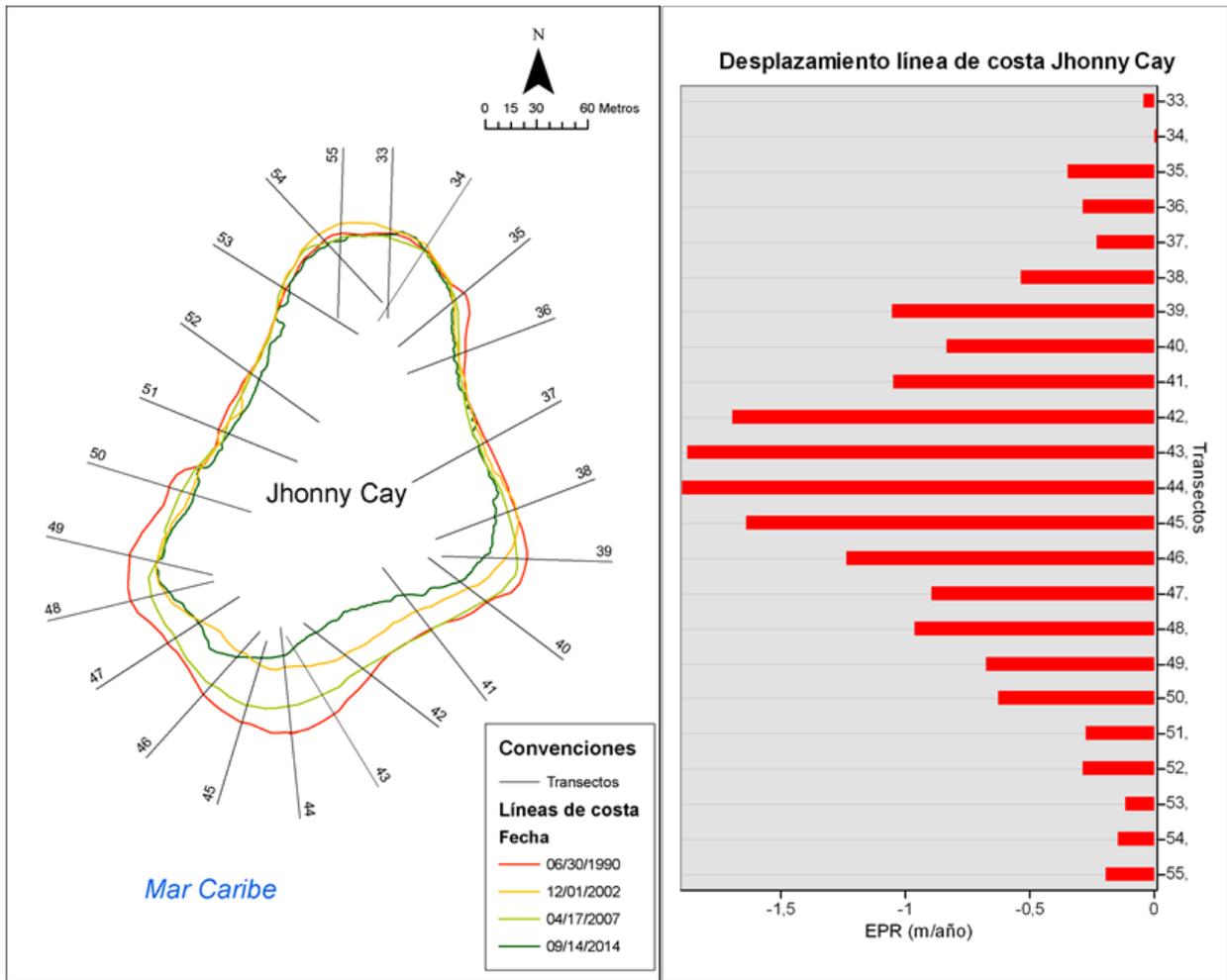


Figura 5.13 Desplazamiento de la línea de costa en el litoral del cayo Jhonny Cay entre 1990 y 2014.

5.2. VARIABILIDAD CLIMÁTICA RECIENTE Y SU INFLUENCIA EN EL RÉGIMEN DE OLEAJE DEL SECTOR.

En el diagrama de dispersión de la magnitud del viento del periodo comprendido entre diciembre de 2009 y noviembre de 2013 (Figura 5.14A), se identificó una tendencia a la sobreestimación de los datos del reanálisis con respecto a los del INAP, ya que tanto vientos débiles como fuertes estuvieron por encima de la recta 1:1; esto se confirmó con el sesgo del 109%. De otro lado, el RMSE entre los datos fue del 171% indicando una diferencia en promedio muy alta entre los valores satelitales y los registrados en la estación. No obstante, la asociación lineal entre las dos fuentes de datos fue buena ($r=0.67$ y valor $p= 0,000$).

Con respecto a la presión atmosférica (Figura 5.14B), se verificó que el desempeño de los datos del reanálisis estuvo relacionado con los datos del INAP y que entre ellos hubo una correlación alta positiva. Se identificó que los valores de presión >1013 hPa tienden a ser subestimados por el reanálisis, nótese en la figura que cuando los datos del INAP oscilan entre 1013 y 1014 hPa, en el reanálisis están entre 1012.5 y 1013 hPa. El sesgo de los datos fue de 41.87 %, que al ser positivo indicó una tendencia a la sobreestimación de los datos reales por parte de los del reanálisis. El RMSE entre los datos fue de 64.17 % indicando un buen desempeño de los datos del reanálisis. Por su parte la asociación entre las dos fuentes fue alta, $r=0.92$ con un valor $p=0.00$.

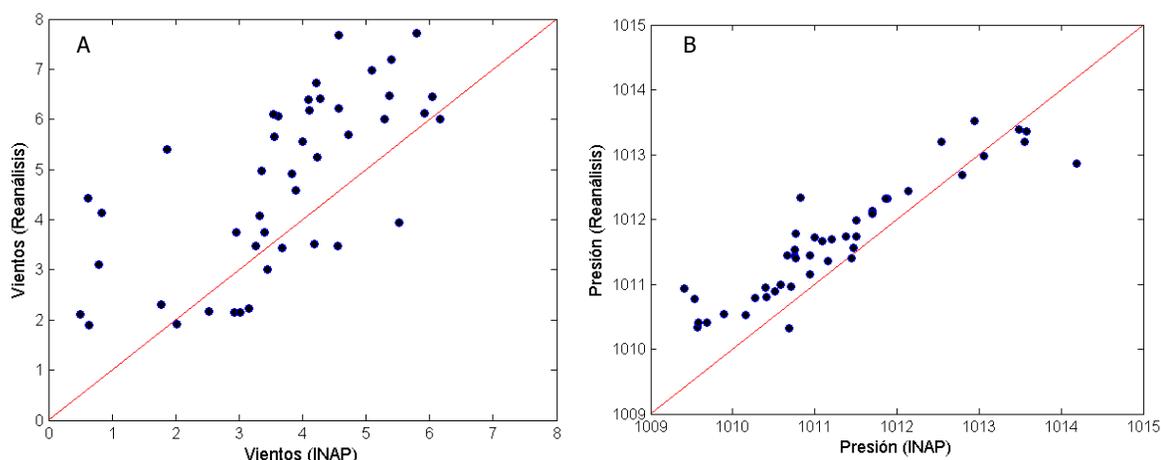


Figura 5.14 Diagrama de dispersión entre los datos de A) Vientos, B) Presión, del INAP y de reanálisis

En la Figura 5.15 se muestra la variabilidad espacial mensual de la magnitud del viento derivada de datos del QuikSCAT entre 1999 y 2009. Durante los meses de noviembre a abril, la dirección predominante del viento es noreste (NE) a suroeste (SO); mientras que de mayo a octubre la dirección predominante es ENE a ONO. El ciclo anual identificado con esta fuente de datos es similar al observado con el reanálisis. En el mes de enero se presenta la mayor velocidad del viento, la cual disminuye en marzo en más de 1m/s. En los meses de abril y mayo, los vientos son débiles e incrementan en el mes de julio. En el mes de septiembre los vientos son los más bajos del año e incrementan a partir de octubre, tal que para diciembre el promedio es similar al mes de enero. En general, se aprecia que el costado este de la isla presenta vientos más fuertes; a excepción del mes de noviembre en el cual los mayores valores se presentaron en el

costado noroeste. Entre los meses de diciembre, enero y febrero los vientos fueron fuertes especialmente en el costado este. Durante marzo, abril y mayo los vientos fueron prácticamente homogéneos a ambos lados de la isla y con menor magnitud que los meses anteriores.

Se identificó el ciclo anual de las variables empleando las series mensuales desde 1979 hasta 2013 del viento (Figura 5.16) y la presión (Figura 5.17). Las variables mostraron unos patrones estacionales bien marcados durante el año. Durante los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y abril, la magnitud del viento osciló entre 5.7 y 6.4 m/s, lo que caracterizó a este período por fuertes vientos. Durante mayo y junio la magnitud disminuyó oscilando entre 4.02 y 4.27 m/s; mientras que en el mes de julio presentó un pico de 5.7 m/s.

Entre agosto y septiembre nuevamente descendió la magnitud hasta alcanzar el valor promedio (2.7 m/s) más bajo de todo el ciclo; finalmente, entre octubre y noviembre volvió a incrementar con valores que oscilaron entre 3.1 y 4.9 m/s. Se aprecia que los valores máximos y mínimos difieren en aproximadamente dos unidades del valor medio, pero siguen el mismo comportamiento. El ciclo anual identificado, fue similar al observado desde diferentes fuentes de datos como INAP (2009-2013), QuikSCAT (1999-2009) y el IDEAM (2005-2010) que tiene una estación fija en el aeropuerto Rojas Pinilla de San Andrés (Figura 5.17).

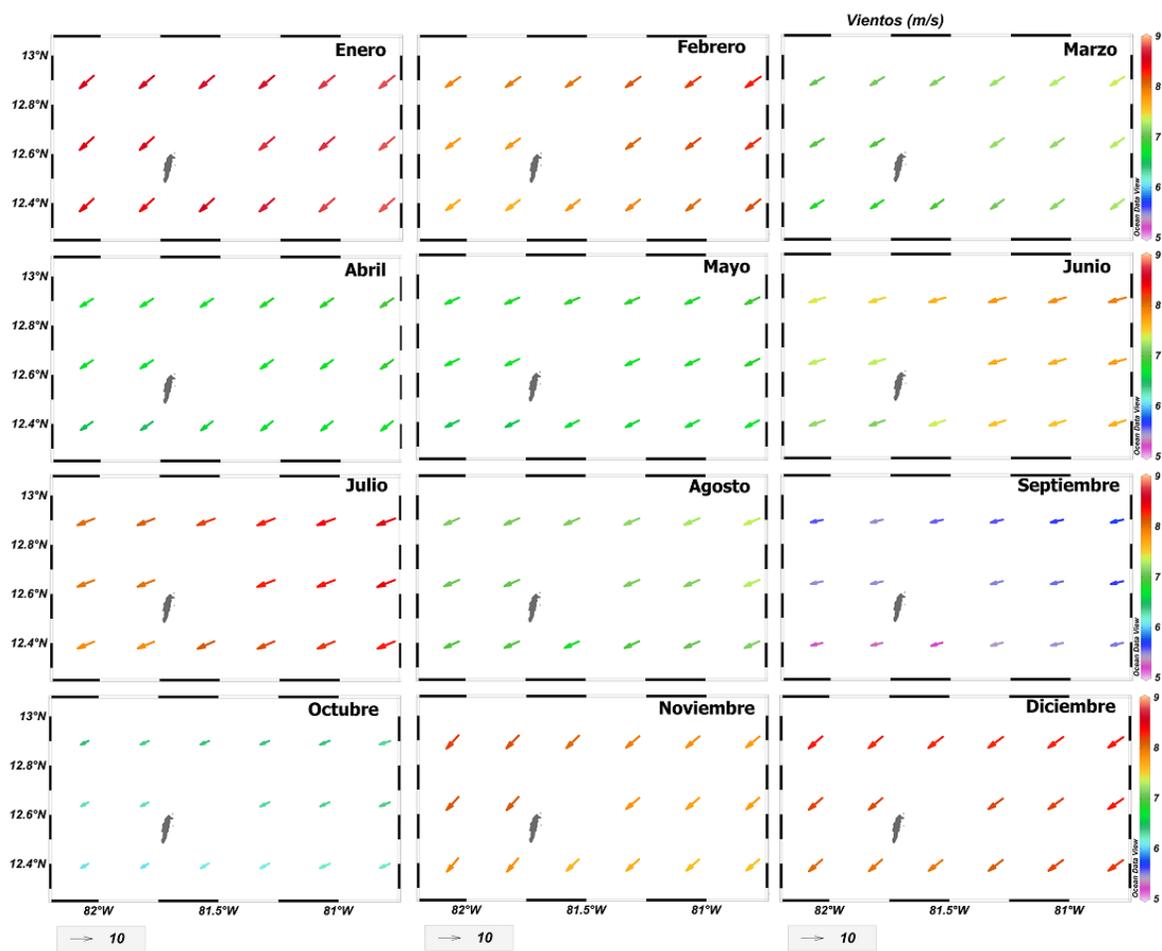


Figura 5.15 Variabilidad espacial de la magnitud del viento. Fuente de datos QuikSCAT (1999-2009)

El ciclo anual de la presión atmosférica (Figura 5.16B), tuvo valores máximos durante los meses de diciembre, enero, febrero y marzo (~ 1013 hPa), durante los meses de abril y mayo la presión disminuyó (~ 1011.7 hPa); entre los meses de junio, julio y agosto incrementó levemente (~ 1011.8 hPa), mientras que en septiembre, octubre y noviembre disminuyó (~ 1011.2 hPa). Los valores máximos y mínimos siguieron el comportamiento de la media, variando en aproximadamente 0.5 de la unidad. Al comparar este ciclo, con los datos del INAP se aprecia que siguen un comportamiento muy similar a excepción del mes de marzo, en cual los valores del INAP no disminuyen, como si lo hacen los valores del reanálisis (Figura 5.16B).

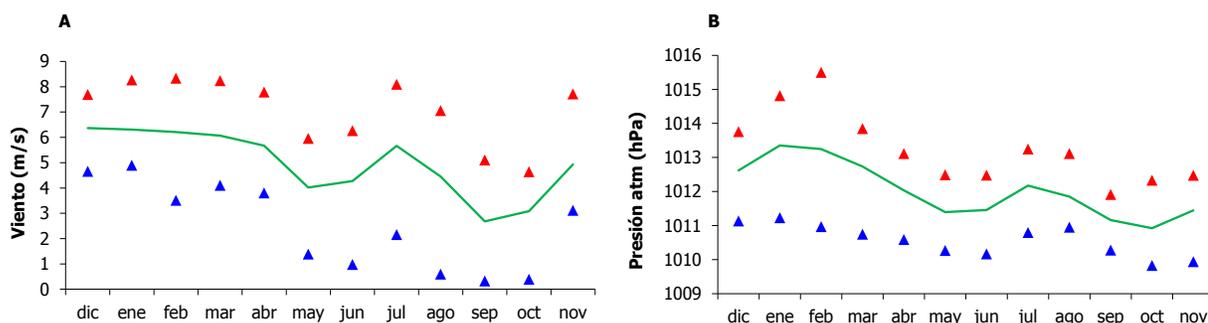


Figura 5.16 Ciclo anual en San Andrés. Magnitud del viento (A) y Presión atmosférica (B). Valores medio (línea verde), máximos (triángulos rojos) y mínimos (triángulos azules). Fuente de datos: Reanálisis NCEP/NCAR.

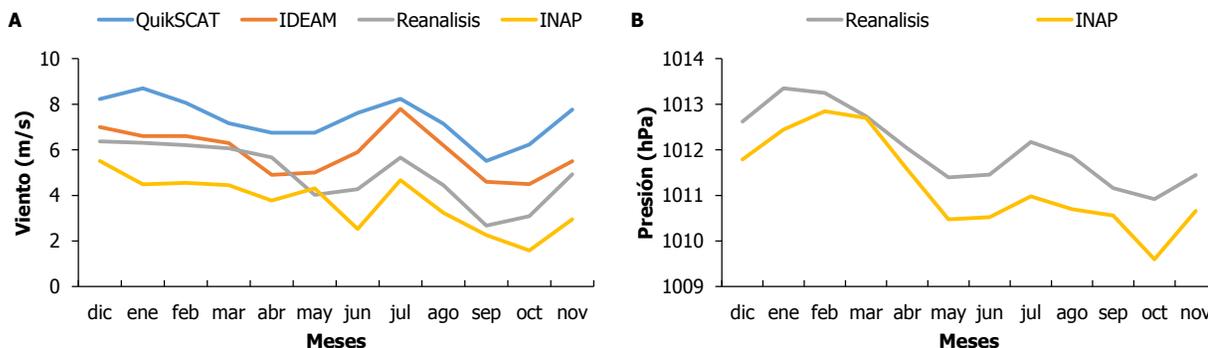


Figura 5.17 Ciclo anual en San Andrés. Magnitud del viento (A) y Presión atmosférica (B) determinada por diferentes fuentes.

En el ciclo anual de la altura significativa de ola (Hs) al este y oeste de la isla (Figura 5.18), se identificaron valores promedio altos entre diciembre, enero, febrero y marzo (~ 2 m), la cual disminuyó en el mes de mayo (~ 1.3 m); mientras que en los meses de junio, julio y agosto incrementó levemente (~ 1.5 m). Finalmente, en los meses de septiembre, octubre y noviembre, la altura fue baja (~ 1.16 m). Los valores máximos mensuales en el segundo periodo del año son mayores a los identificados en el ciclo medio, es decir que superan la variación estacional.

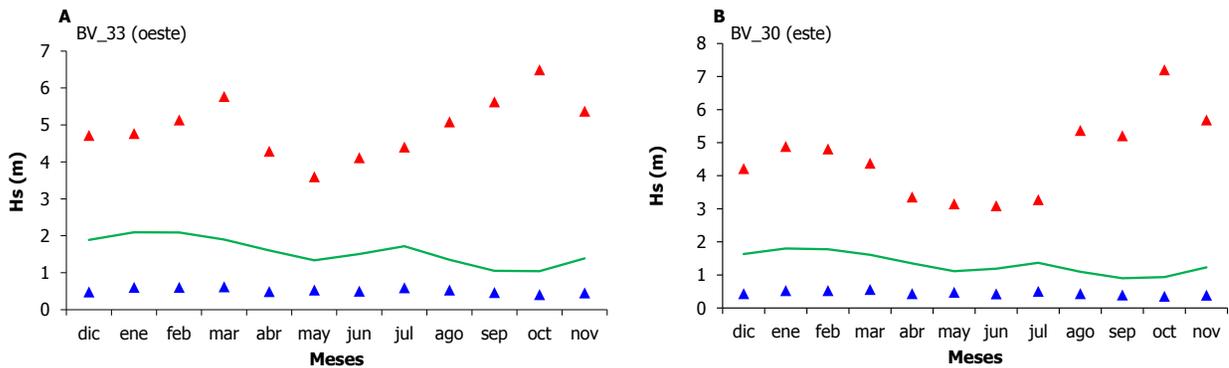


Figura 5.18 Ciclo anual de la altura de ola, a partir de las boyas virtuales de San Andrés (1979-2011)

Del análisis direccional se identifica que el oleaje más frecuente en el oeste de la isla proviene del NE con una probabilidad por encima del 30 %, este oleaje es seguido por la dirección ENE con una probabilidad de ~26 %. Por su parte, al este de la isla el oleaje más frecuente proviene del ENE con un porcentaje de datos cercano al 40 %, las demás direcciones provienen del E y NE pero no superan el 20% de los datos (Figura 5.19). En la Tabla 5.1 queda reflejado que la mayor probabilidad de dirección del oleaje en el oeste (BV_30) es del NE y en el este del ENE. El oleaje de mayor altura (Hs) en ambos sectores es el que proviene del N, cuyas frecuencias son de 10 y 5 %, respectivamente; sin embargo es de destacar que también hay oleajes altos que coinciden con las direcciones más frecuentes NE y ENE.

En la Figura 5.20 se muestran las series de tiempo de los valores medios, máximos y mínimos anuales de las variables magnitud del viento, presión atmosférica y altura significativa de la ola. Se identificó que la velocidad promedio del viento entre 1979 y 2013 fue 4.98 m/s con oscilaciones entre 0.3 – 8.3 m/s. Los valores medios no muestran una tendencia al incremento, mientras que los valores máximos si tiene una leve pendiente positiva que se acentúa en los últimos años. Por su parte, en la serie de la presión se identificó un promedio de 1012 hPa y una oscilación de los valores entre 1010 y 1015 hPa. No se identificó una tendencia relevante en los valores medios o máximos y es de notar que los valores máximos se identificaron con intervalos de tiempo de aproximadamente cada cuatro años. En cuanto a la serie de tiempo del oleaje de ambas boyas virtuales, los valores medios no tienen una tendencia al cambio, mientras que los valores máximos si presentan una leve tendencia al incremento y al aparecer los eventos extremos han incrementado en los últimos ocho años.

Para el análisis de condiciones extremas, se tomaron como extremos, los valores que superaron el percentil 95 de la serie de datos y se graficaron como histogramas mensuales y anuales por cada variable. Para el análisis mensual (Figura 5.21), se puede apreciar que los primeros meses del año son los más afectados en cuanto a la ocurrencia de eventos extremos mensuales. En enero y febrero la mayor cantidad de extremos se presentaron en la serie de oleaje, mientras que en marzo, julio y diciembre la mayor cantidad es de los vientos. De este gráfico se advierte que hay un buen grado de asociación entre los valores extremos encontrados y la media estacional de todas las variables previamente descrita, puesto que la mayor cantidad de eventos extremos se presentaron en los mismos meses en los que ya se habían identificado los valores fuertes o altos del ciclo anual.

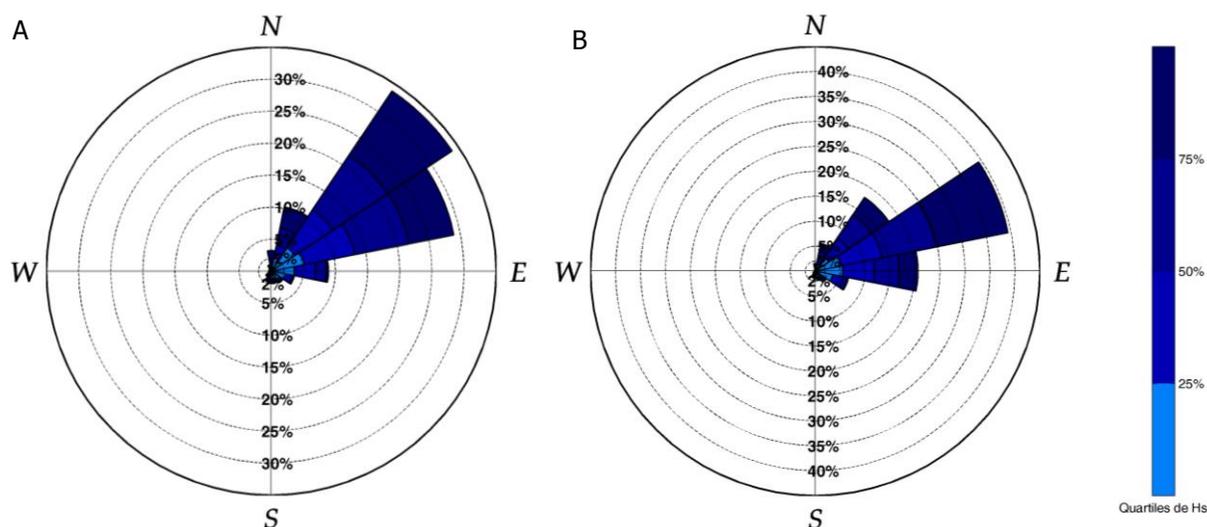


Figura 5.19 Rosa de oleaje de A) BV_30 (oeste) y B) BV_33 (este)

Tabla 5.1 Estadísticos del oleaje de las boyas virtuales BV_30 y BV_33

Dirección procedencia	BV_30		BV_33	
	Probabilidad	Hs	Probabilidad	Hs
N	0,03	5,46	0,01	5,25
NNE	0,10	4,64	0,06	4,83
NE	0,34	3,46	0,18	4,04
ENE	0,29	3,49	0,39	4,51
E	0,09	2,57	0,21	4,29
ESE	0,04	1,79	0,07	3,28
SE	0,02	1,60	0,03	2,24
SSE	0,02	1,65	0,02	2,32
S	0,02	2,56	0,01	2,48
SSW	0,02	2,64	0,01	4,10
SW	0,01	4,24	0,01	3,10
WSW	0,00	3,75	0,00	1,78
W	0,00	2,11	0,00	0,00
WNW	0,00	2,67	0,00	1,42
NW	0,00	2,77	0,00	2,05
NNW	0,01	4,25	0,00	1,97

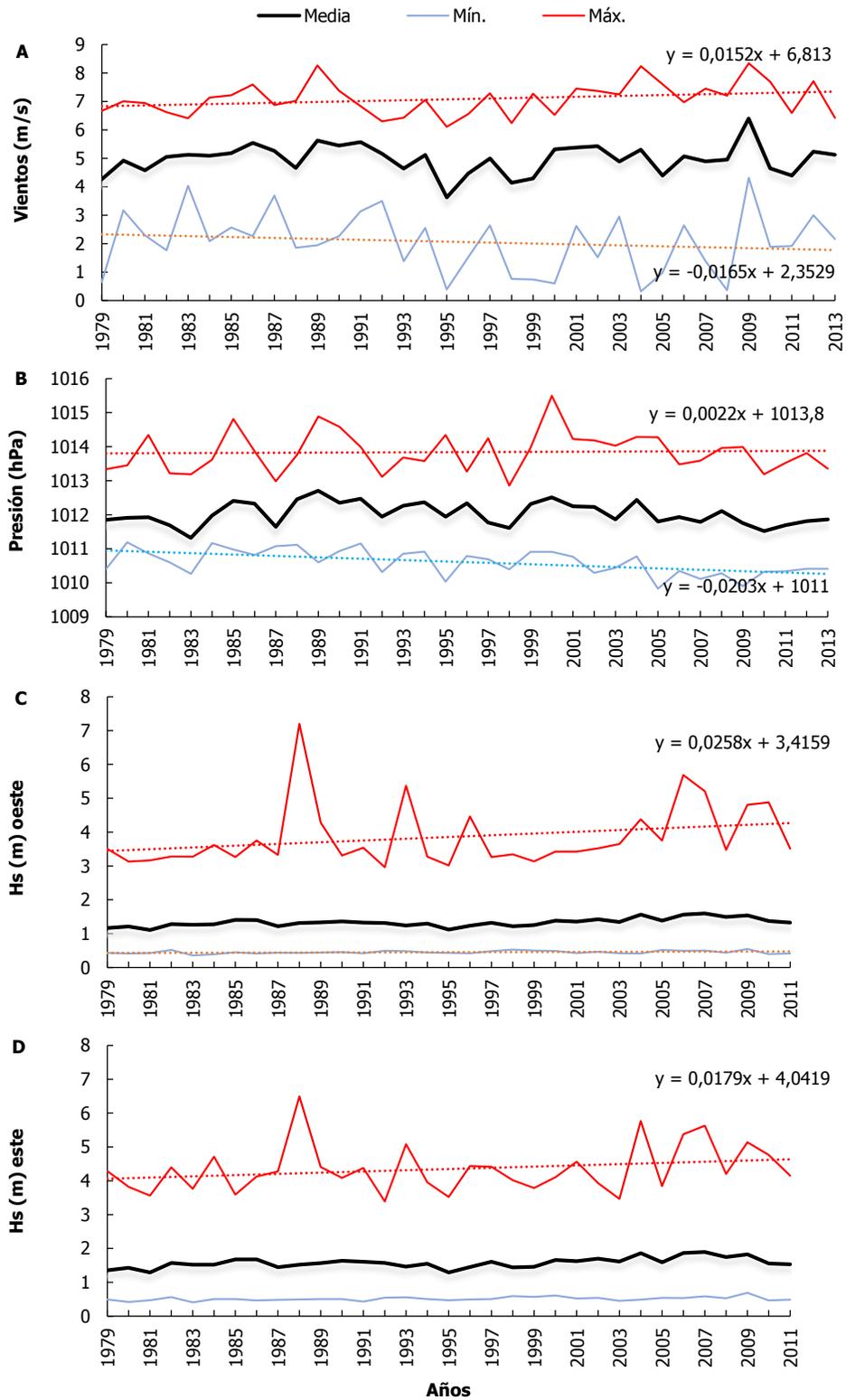


Figura 5.20 Tendencia anual de A) viento, B) presión atmosférica y C) y D) altura de ola en San Andrés

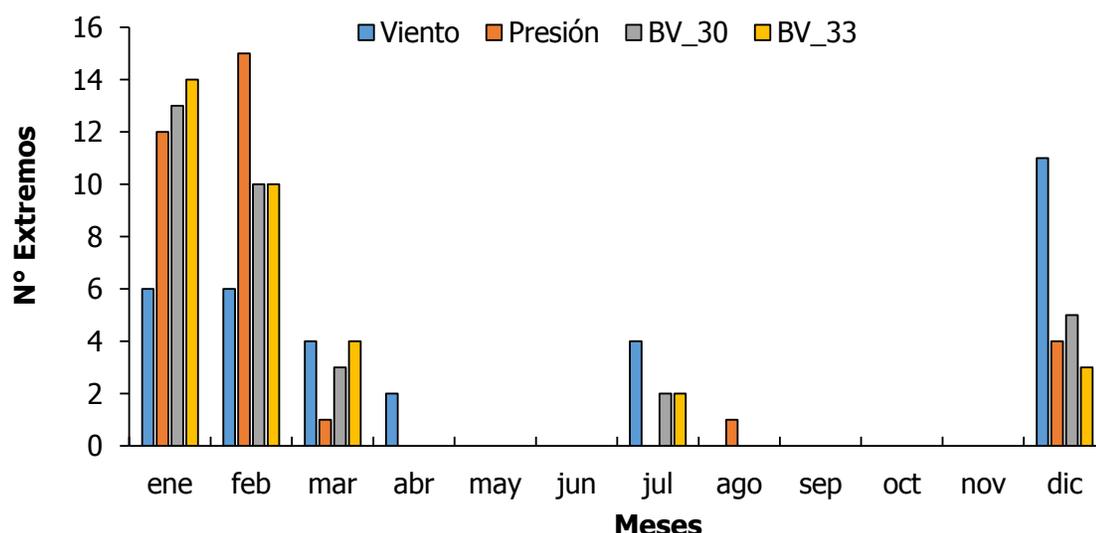


Figura 5.21 Histograma de eventos extremos durante un ciclo anual entre 1979-2011 de las variables estudiadas

Adicionalmente, la Tabla 5.3 se muestra la correlación lineal entre las anomalías de las variables meteomarinas y los principales índices que describen el sistema climático en esta región. A pesar de que todos los índices tienen conexión débil con las variables, son los índices CAR y NTA los que tienen una correlación significativa, los cuales se basan en mediciones de la temperatura superficial del mar. Finalmente, para el análisis anual (Figura 5.22), el histograma del campo de vientos mostró que entre 1979 y 1995, ocurrieron cuatro eventos extremos cercanos al área de San Andrés y entre 1996-2011 ocurrieron 12; para la variable presión, durante 1979 y 1995 se identificaron cuatro eventos de presión extrema y entre 1996 y 2011, 10 eventos. Por su parte, en el oleaje se identificaron cinco extremos al oeste de la isla y seis al este entre 1979 - 1995 y nueve eventos extremos entre 1996-2011. Estos resultados evidencian el incremento de valores extremos durante los últimos 15 años.

Tabla 5.2 Correlación lineal entre los índices y las variables

	NAO	SOI	NTA	CAR
Presión	0.09	0.22	-0.26	-0.20
Viento	0.05	0.01	-0.22	-0.13
Hs30	0.04	0.12	-0.12	-0.05
Hs33	0.03	0.07	-0.14	-0.03

Valores rojos significativos con $p < 0.05$

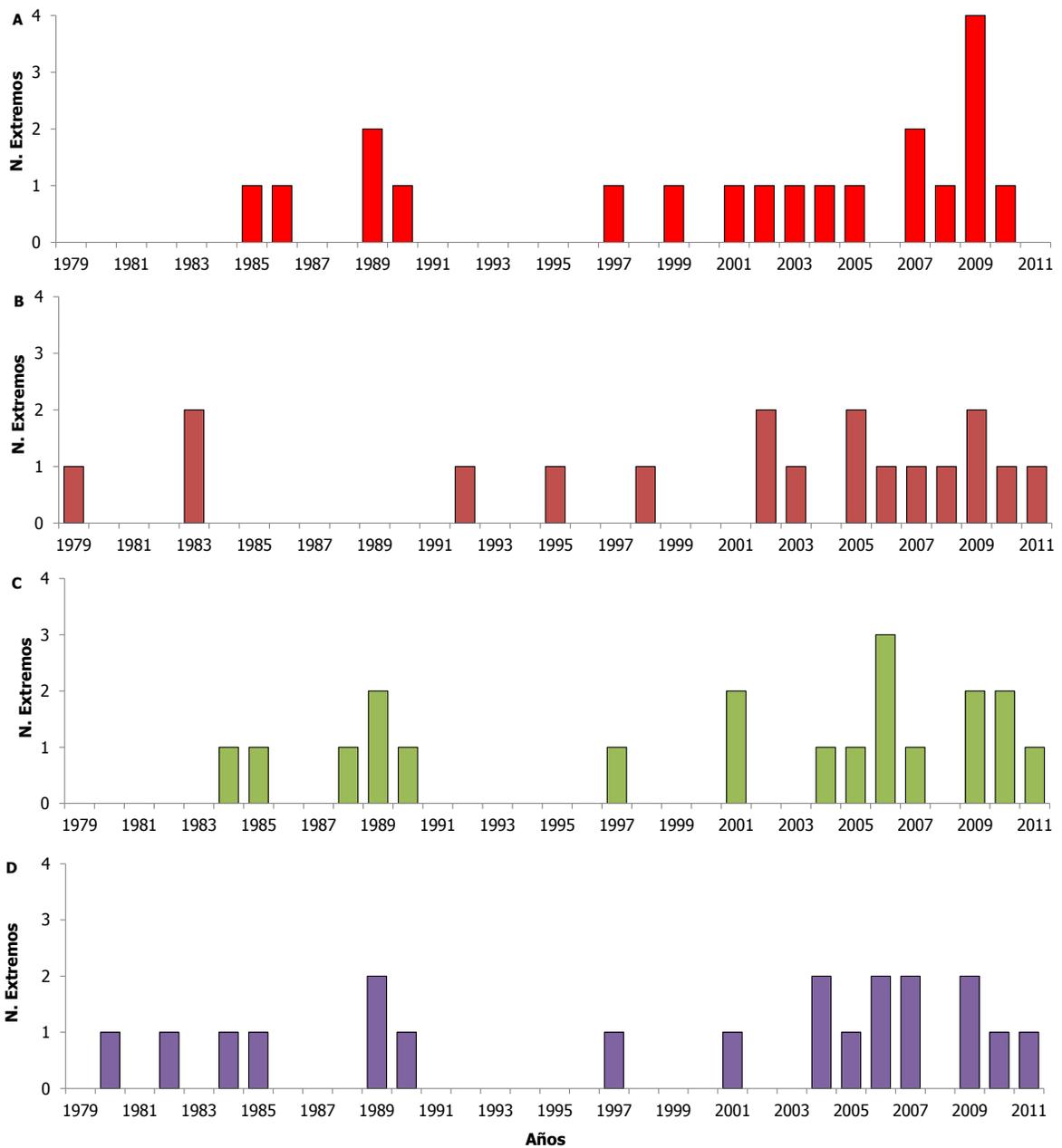


Figura 5.22 Histograma de eventos extremos durante entre 1979-2011 de las variables estudiadas

5.3. ANÁLISIS DE LA AMENAZA Y VULNERABILIDAD POR EROSIÓN COSTERA

Los resultados de la amenaza por erosión costera para las 6 playas estudiadas, consideraron que de 5536 m de longitud de playa estudiados, 4160 m se encontraron en amenaza alta, esto equivale al 75%, los 1376 m restantes llegaron a valores de amenaza media. Las playas de Sprat Bight y Sound Bay, sobre toda su línea de costa la amenaza se clasificó alta; la playa Decamerón – Smith Channel solo presentó un tramo de 200 metros en amenaza media, el resto es amenaza alta; las playas de Rocky Cay, Bowies Bay y Jhonny Cay fue donde se observó menos tramos en amenaza alta y más del 50% de su línea de costa la amenaza es clasificación media (Figura 5.23).

En las 6 zonas estudiadas la vulnerabilidad obtenida fue en clasificación media; para las playas de Sprat Bight y Sound Bay el nivel de exposición fue medio y las playas restantes se clasificaron en exposición baja; la fragilidad total para las playas de Sprat Bight y Decamerón – Smith Channel se clasificó en baja, las 4 áreas restantes obtuvieron una clasificación media; la falta de resiliencia en las 6 zonas estudiadas presentó una clasificación alta (Figura 5.24).

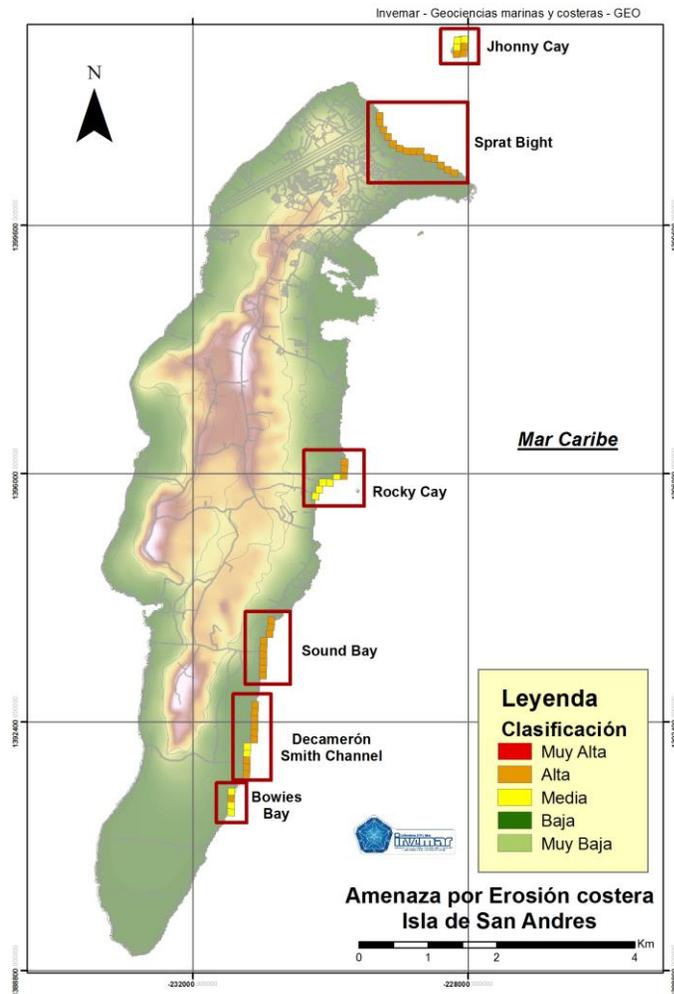


Figura 5.23 Clasificación de amenaza por erosión costera para las seis zonas de estudio (recuadros rojos).

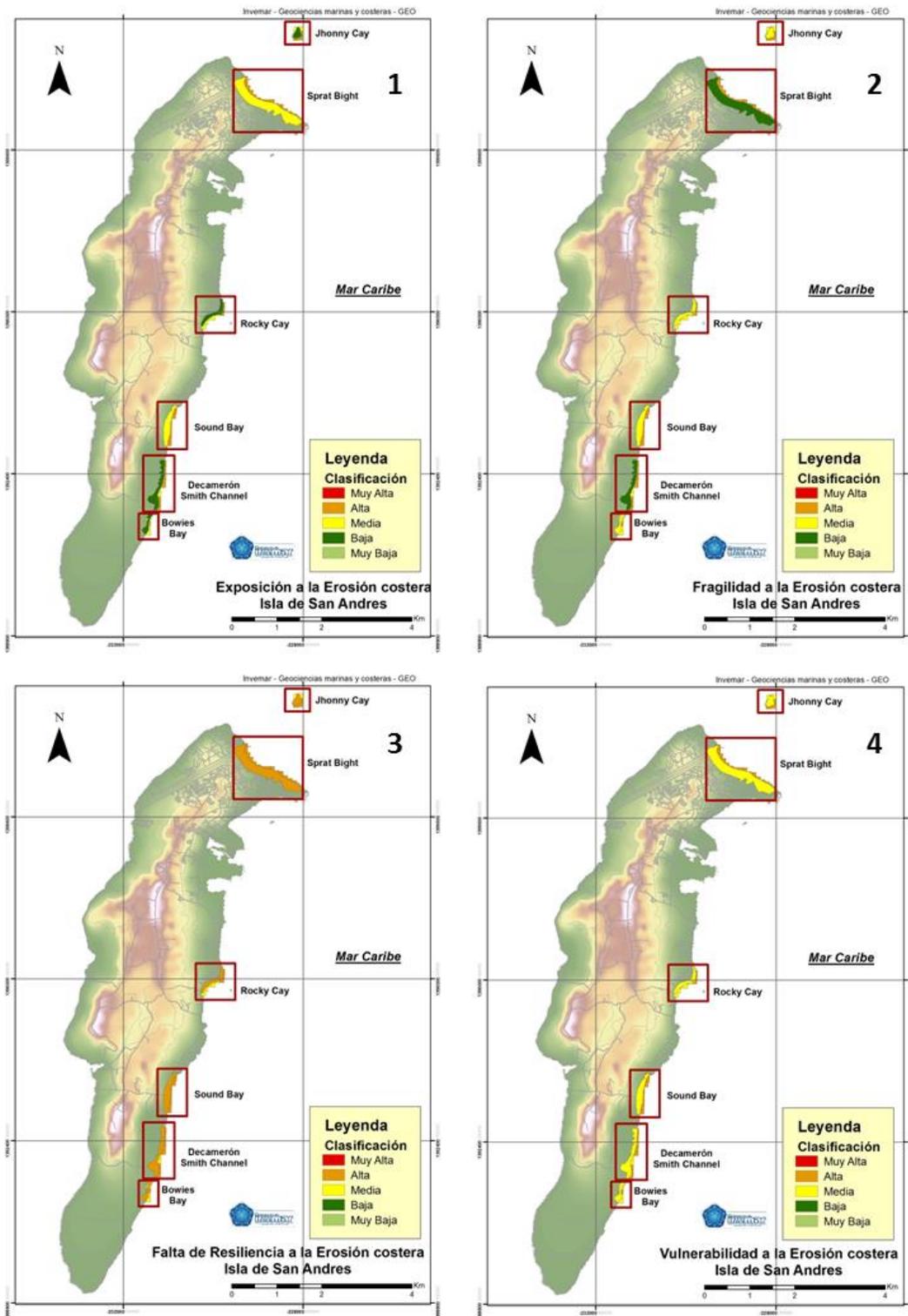


Figura 5.24 Clasificación de vulnerabilidad por erosión costera y sus componentes (1.Exposición, 2.fragilidad y 3.falta de resiliencia) y 4.Vulnerabilidad total, para las seis zonas de estudio (recuadros rojos)

5.3.1. Playa Sprat Bight

En toda la línea de costa de la playa de Sprat Bight se presentó una amenaza por erosión costera alta, los niveles de ocurrencia y susceptibilidad de la playa también presentaron una clasificación alta, solo la magnitud se mantuvo en clase media (Figura 5.25Figura 5.22). El retroceso de la línea de costa se ha venido presentando hace más de 20 años, como lo registra este estudio, dicha ocurrencia presentó tasas de erosión anual mayores 1 m/año, en consecuencia la tendencia de la playa es a seguir viéndose afectada, esta es la característica principal para que en esta zona se obtuviera una amenaza alta.

En cuanto a la vulnerabilidad y sus componentes, se observó que en el componente de exposición de la playa el resultado fue de valor medio, la mayor exposición se dio en variables físicas y poblacionales y la menor exposición en variables ecológicas. La fragilidad en esta zona fue baja, las variables físicas, sociales, económicas e institucionales fueron muy bajas, solo la ecológica presento una fragilidad alta. La falta de resiliencia observada fue alta, la capacidad de adaptación marcada por el material de construcción de las estructuras, las cuales son en concreto y cuya rigidez del material no permite adaptarse de manera fácil al fenómeno, esto influyó en este resultado, la capacidad de respuesta se clasificó en media y la capacidad de enfrentar en baja, esto se da por la cercanía y presencia de instituciones de socorro, mal ubicarse en la cabecera municipal. La sumatoria de estos componentes nos presentó una vulnerabilidad media, pero la amenaza alta observada generaría un riesgo alto para todos sus elementos (Figura 5.26).

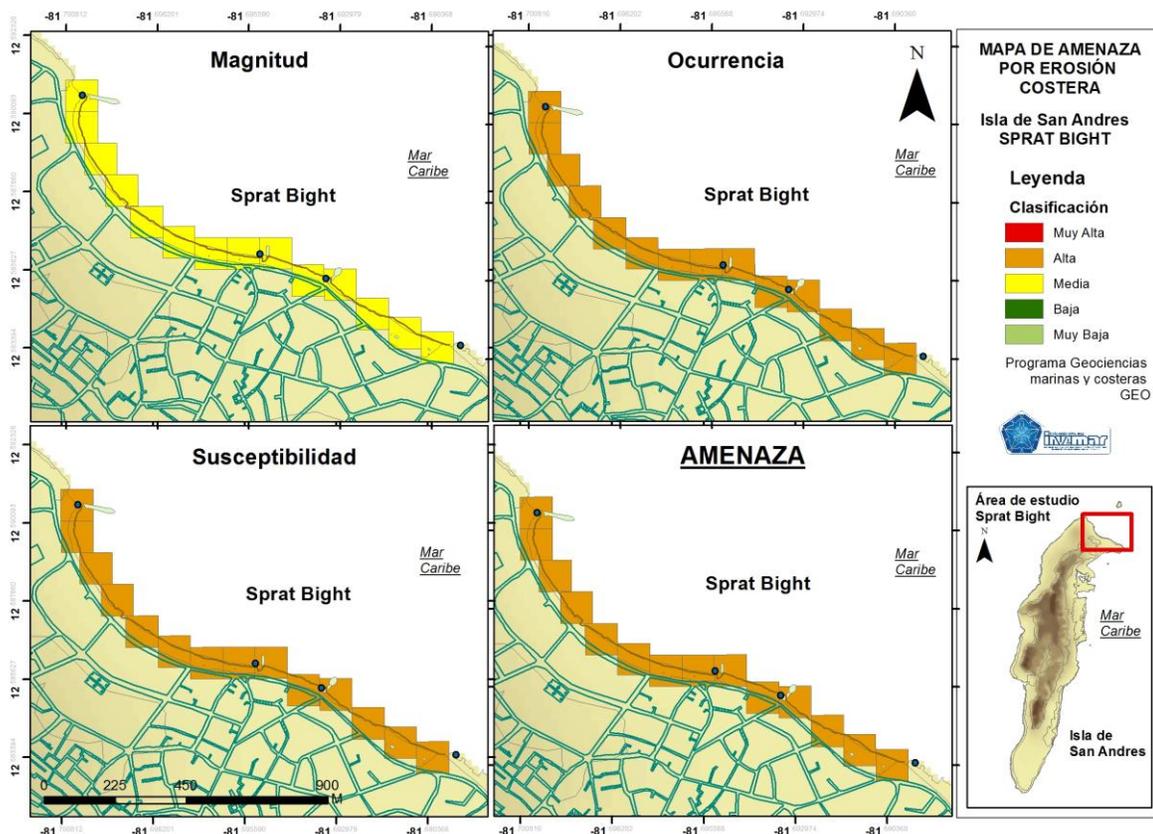


Figura 5.25 Mapa de amenaza por erosión costera y sus componentes (Magnitud, ocurrencia y susceptibilidad) para la playa de Sprat Bight.

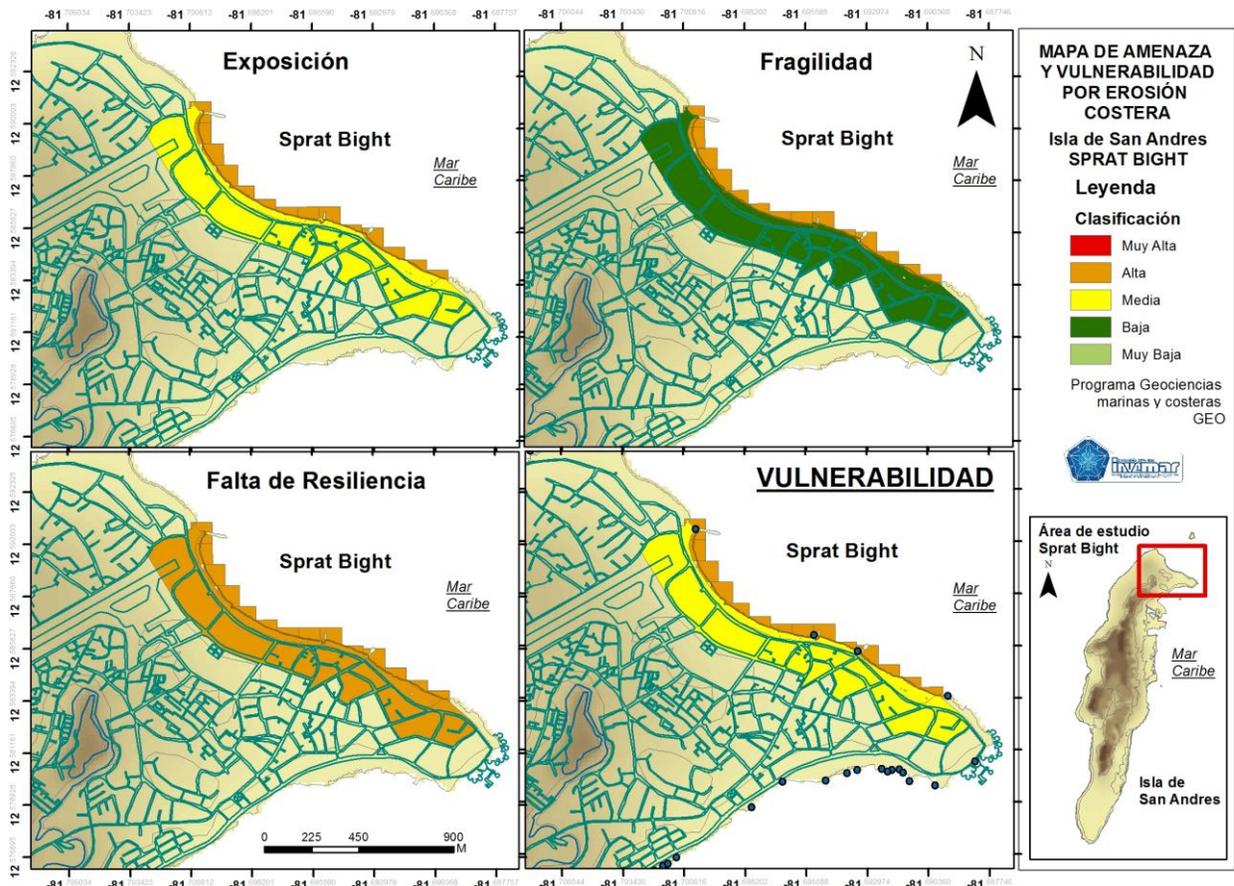


Figura 5.26 Mapa de vulnerabilidad en relación con la amenaza por erosión costera. Los componentes de exposición, fragilidad y falta de resiliencia para la playa de Sprat Bight.

5.3.2. Playa Rocky Cay

La parte norte de la playa de Rocky Cay presentó una amenaza alta a la erosión costera y la zona suroeste una clasificación media, esto es influenciado por la incidencia del oleaje directo proveniente del Este y el Noreste, es decir que en la zona norte el oleaje es directo y la zona suroeste está resguardada del oleaje. De sus 490 m de línea de costa, 300 m se encontraron en amenaza alta, los valores de ocurrencia y la susceptibilidad del terreno fueron los de mayor influencia en este resultado (Figura 5.27).

Esta es una playa que alberga viviendas y hoteles grandes y de alto costo, esto genera baja densidad estructural y poblacional, como resultado una baja exposición. La fragilidad estructural, social y económica es baja, pero variables ecológicas, culturales e institucionales aumentaron en su nivel, presentando así una fragilidad media para esta playa. Las estructuras mencionadas anteriormente han sido construidas en concreto, siendo esta variable la de mayor influencia para que la falta de resiliencia sea alta. Para Rocky Cay la vulnerabilidad total presentada fue de nivel medio, la zona norte que presentó una amenaza alta, es la parte que requiere atención a corto plazo, pues sus niveles de riesgo serian altos (Figura 5.28).

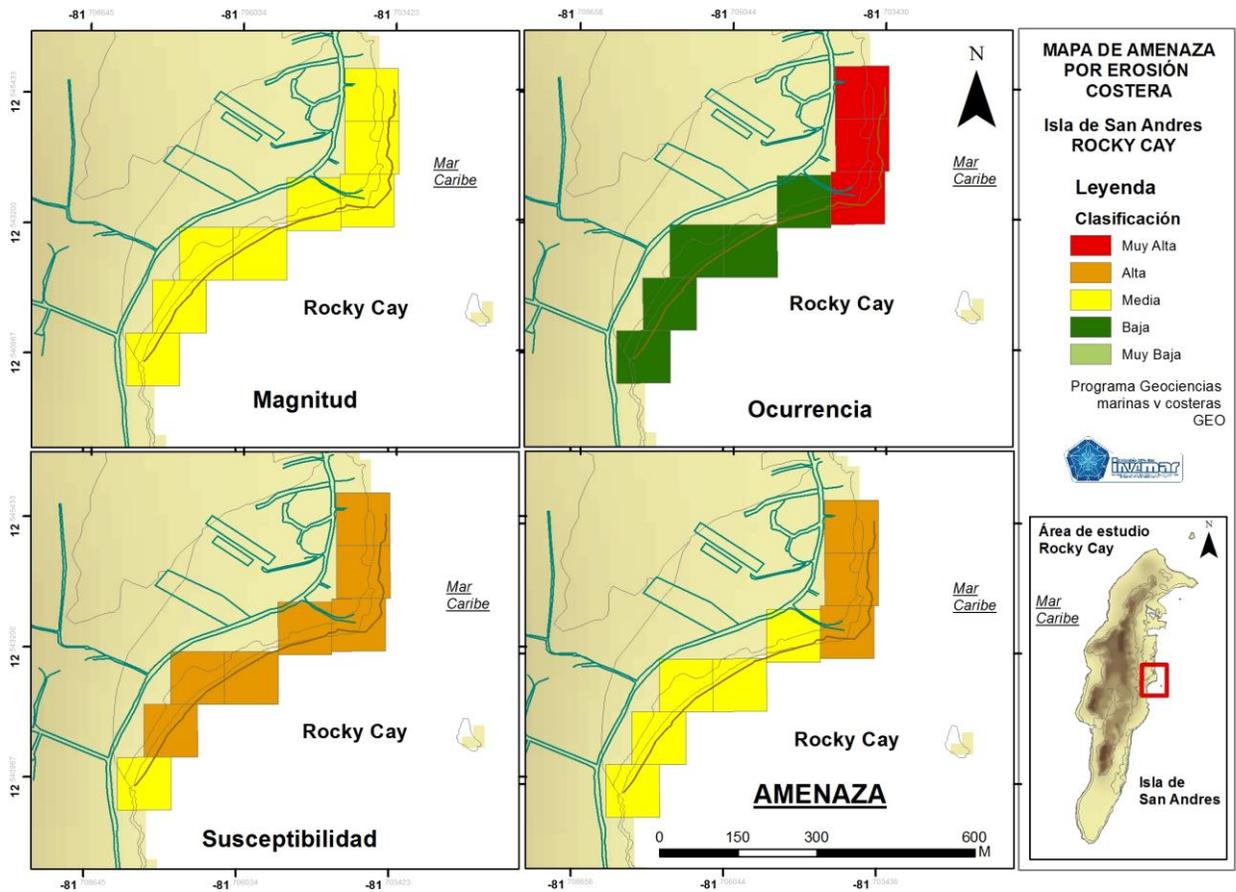


Figura 5.27 Mapa de amenaza por erosión costera y sus componentes (Magnitud, ocurrencia y susceptibilidad) para la playa de Rocky Cay.

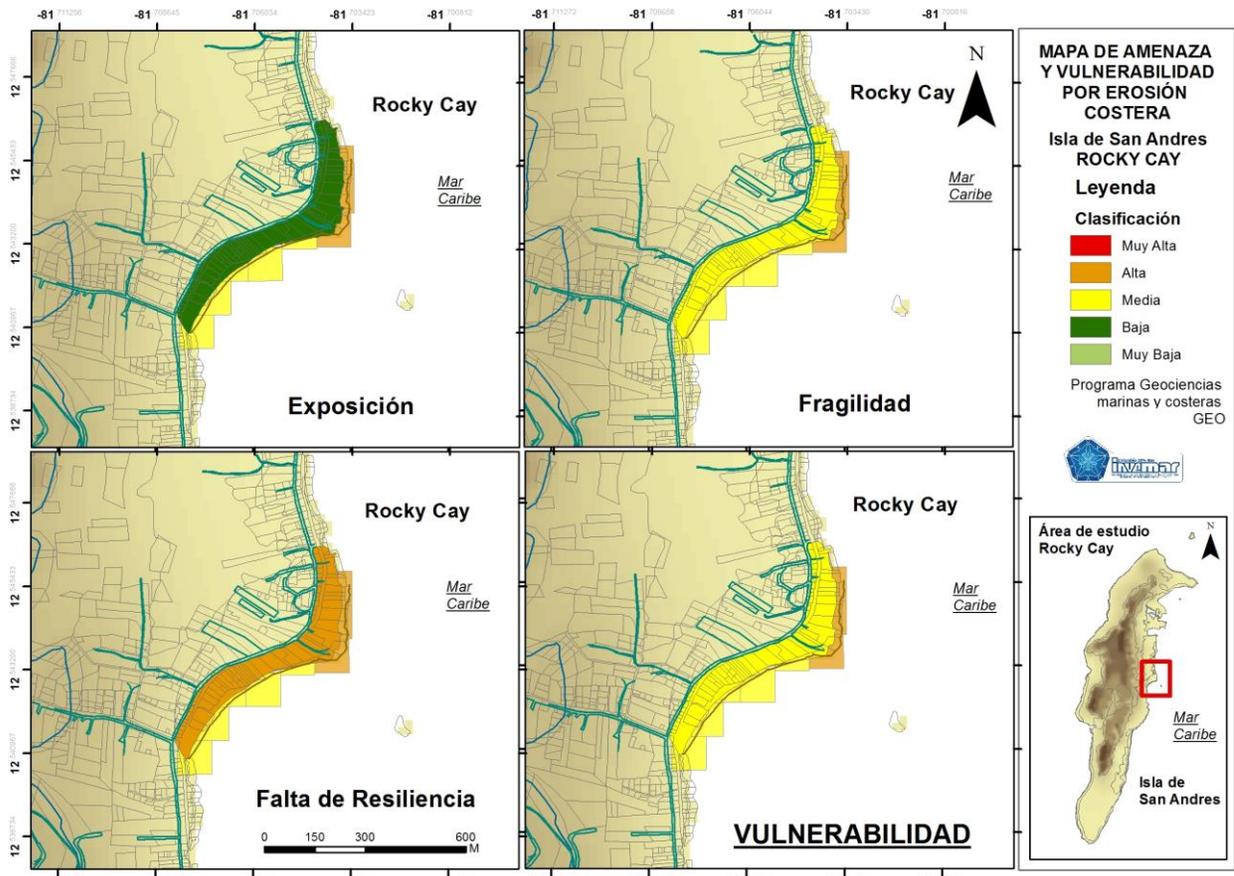


Figura 5.28 Mapa de vulnerabilidad en relación con la amenaza por erosión costera. Los componentes de exposición, fragilidad y falta de resiliencia para la playa de Rocky Cay.

5.3.3. Playa Sound Bay

De sus 890 m de línea de costa, 690 presentó amenaza alta, los 200 m restantes ubicados en el norte de playa se clasificaron en amenaza media. El nivel de ocurrencia y la susceptibilidad del terreno obtuvo valores de amenaza alta, solo la magnitud de eventos externos tuvo un nivel medio. La línea de costa de la zona norte va en dirección Noreste – Suroeste, es paralela a la dirección del oleaje dejándola protegida (Figura 5.29).

En esta playa, al igual que el resto de las playas estudiadas de la isla, la vulnerabilidad fue de valor medio; en esta zona el nivel de exposición es medio, se encuentran aproximadamente alrededor de 80 viviendas lo que representa una de las zonas de mayor densidad estructural de la isla, la cobertura vegetal presentada fue de baja de exposición. La fragilidad en esta zona también fue de valor medio, las dimensiones cultural, ecológica y social fueron las más bajas, solo las dimensiones económica, institucional y física aumentaron a valores altos, es una zona de turismo medio y se encontraron viviendas afectadas y destruidas por la erosión costera (Figura 5.30).

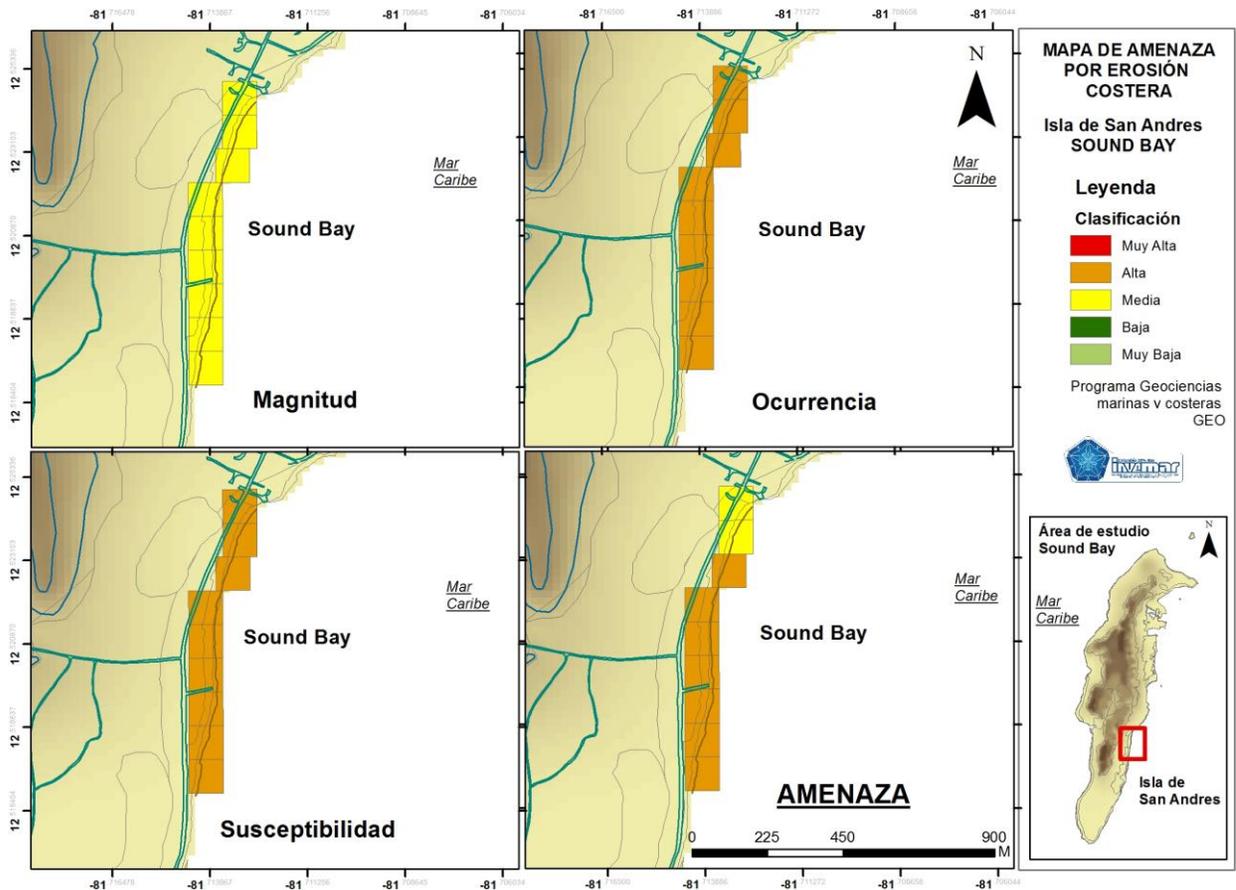


Figura 5.29 Mapa de amenaza por erosión costera y sus componentes (Magnitud, ocurrencia y susceptibilidad) para la playa de Sound Bay.

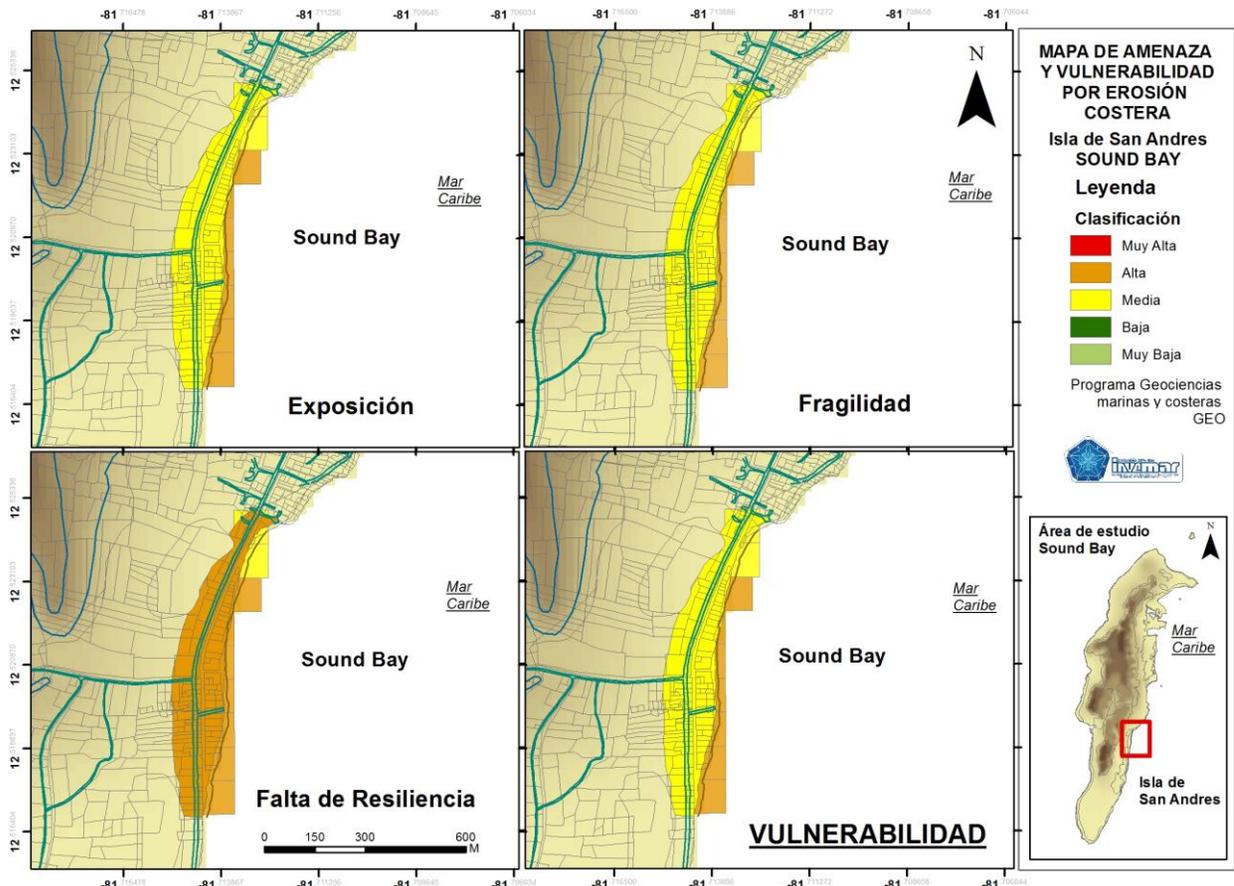


Figura 5.30 Mapa de vulnerabilidad en relación con la amenaza por erosión costera. Los componentes de exposición, fragilidad y falta de resiliencia para la playa de Sound Bay.

5.3.4. Playa Decamerón – Smith Channel

El 80% de la línea de costa en esta zona presentó una amenaza alta a la erosión costera, lo que equivale a 900 m de los 1100 m de toda su longitud, en los 200 m restantes se encontró una amenaza media, en este tramo el oleaje es indirecto. La susceptibilidad del terreno presentó los mismos resultados que la amenaza y la ocurrencia fue alta solo en los extremos norte y sur de la playa, al norte es donde se ubica el hotel Decamerón (Figura 5.31).

Esta es una zona de exposición baja, se encontraron unas pocas viviendas y el hotel Decamerón, el cual alberga la mayor cantidad de estructuras y turismo, la vía es un elemento que se encuentra a pocos metros del mar y en las zonas más críticas ya se han realizado obras de mitigación. En la fragilidad también se observó un valor bajo, las dimensiones económicas, social e institucional presentaron valores bajos, las otras dimensiones apenas alcanzaron una clasificación media. Es una zona que solo por las obras de mitigación realizadas bajó los valores de la falta de resiliencia, pero su falta de capacidad de enfrentar y anticipar es muy alta, lo cual dio para tener una falta de resiliencia alta (Figura 5.32).

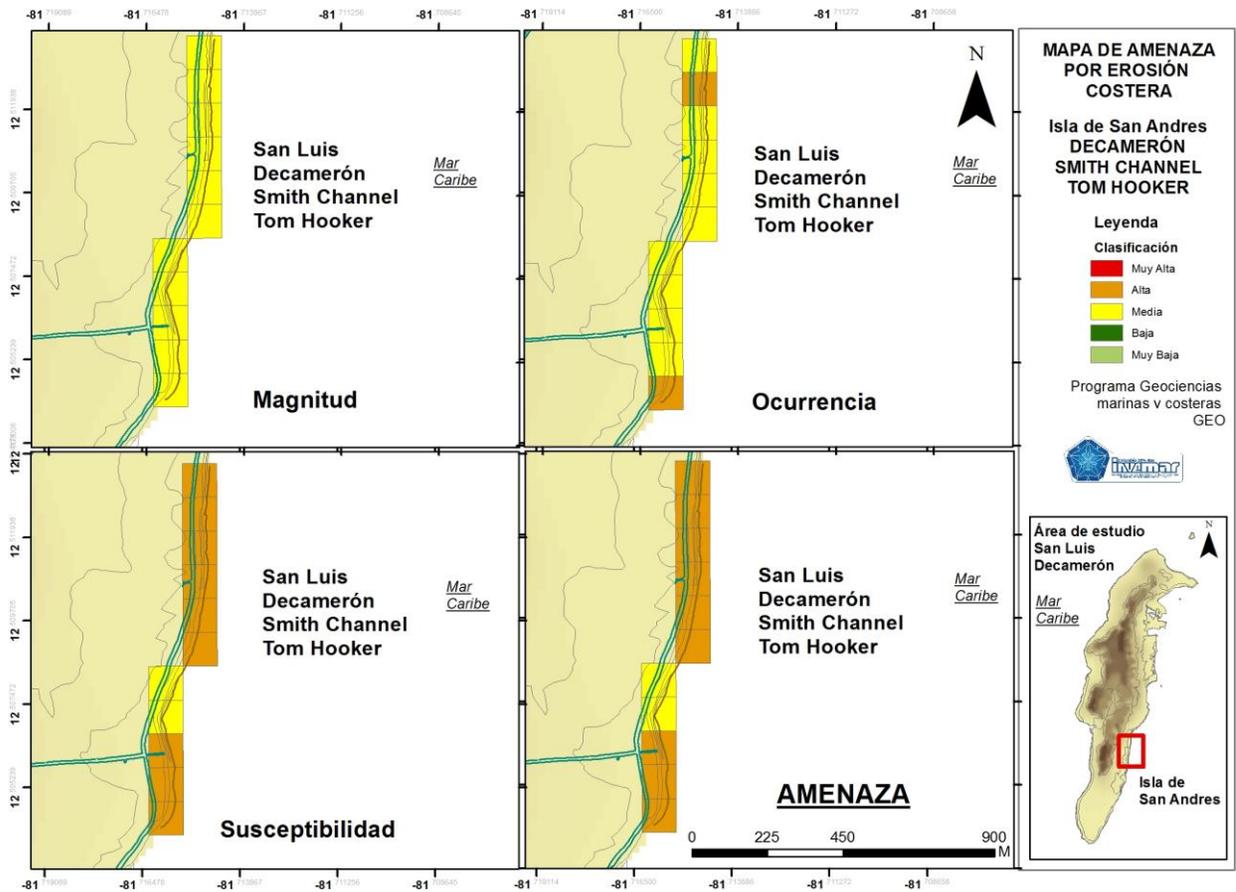


Figura 5.31 Mapa de amenaza por erosión costera y sus componentes (Magnitud, ocurrencia y susceptibilidad) para la playa Decamerón – Smith Channel.

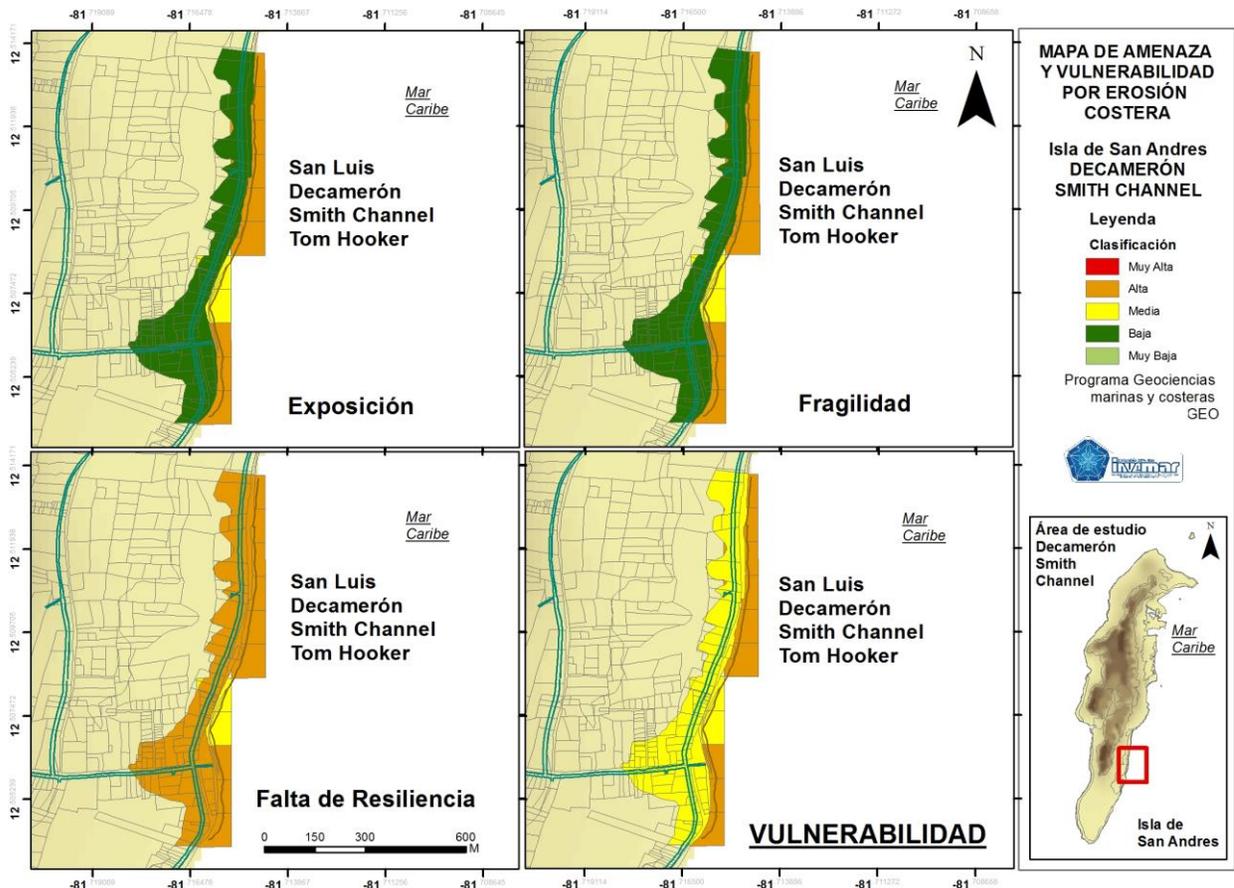


Figura 5.32 Mapa de vulnerabilidad en relación con la amenaza por erosión costera. Los componentes de exposición, fragilidad y falta de resiliencia para la playa Decamerón – Smith Channel.

5.3.5. Playa Bowies Bay

Es la zona de menor longitud de línea de costa estudiada, 411 m de los cuales en solo 100 m se presentó una amenaza alta, siendo la vía circunvarial de San Andrés el elemento más amenazado. La susceptibilidad en esta parte de la isla es alta, es un terreno con tendencia alta a sufrir erosión costera (Figura 5.33).

La exposición en Bowies Bay es baja, es una zona con muy pocas estructuras, solo se encontró un kiosko construido en madera usado como bar y algunas viviendas en la zona sur. La fragilidad es media, dada por valores bajos en la dimensión física, ecológica, cultural y social, solo las dimensiones económica e institucional alcanzaron valores medios. El muro de protección que viene desde la zona sur de Smith Channel y termina en la parte de norte de Bowies, donde inicia la playa, protege la vía, la cual está a pocos metros del mar; la falta de resiliencia es alta, la presencia institucional es media y la falta de capacidad de enfrentar, anticipar y responder es alta (Figura 5.34).

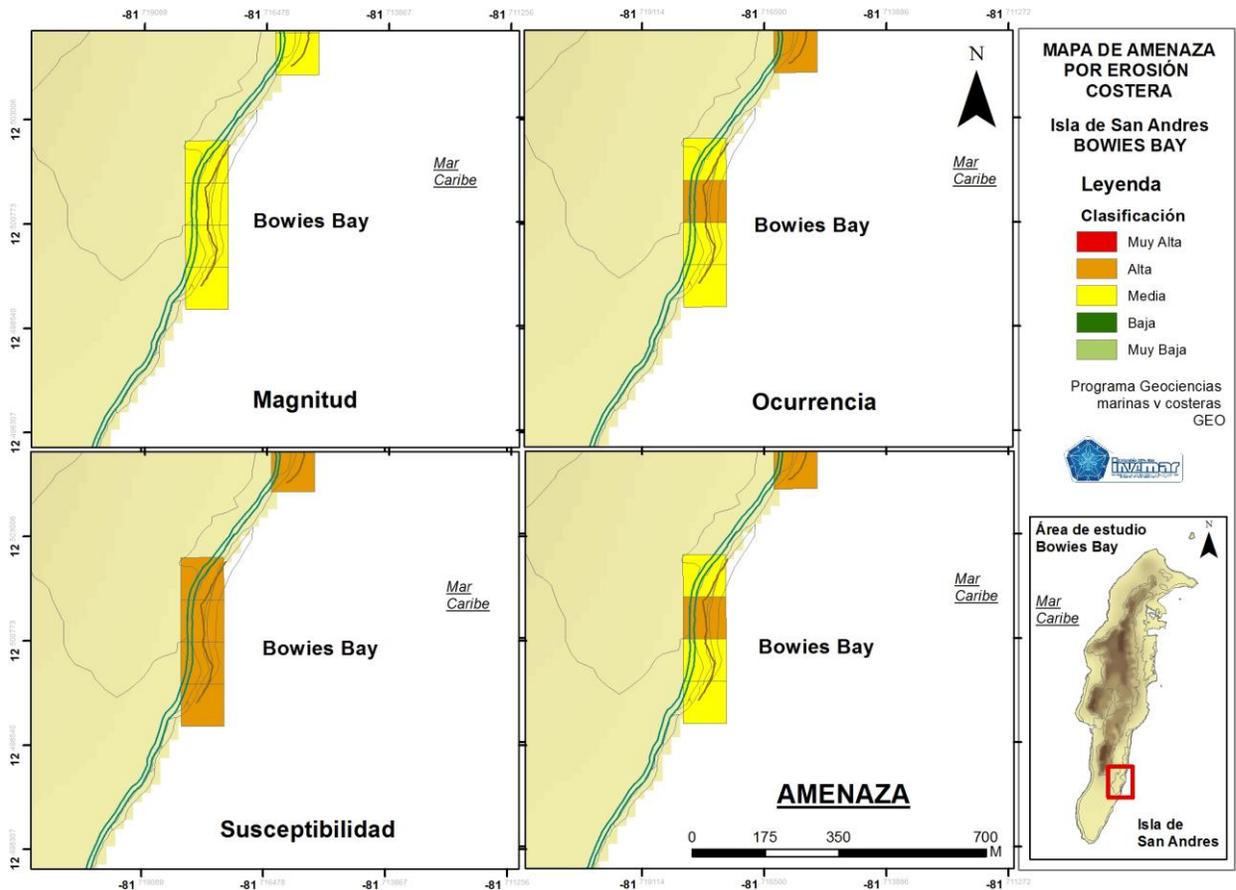


Figura 5.33 Mapa de amenaza por erosión costera y sus componentes (Magnitud, ocurrencia y susceptibilidad) para la playa de Bowies Bay.

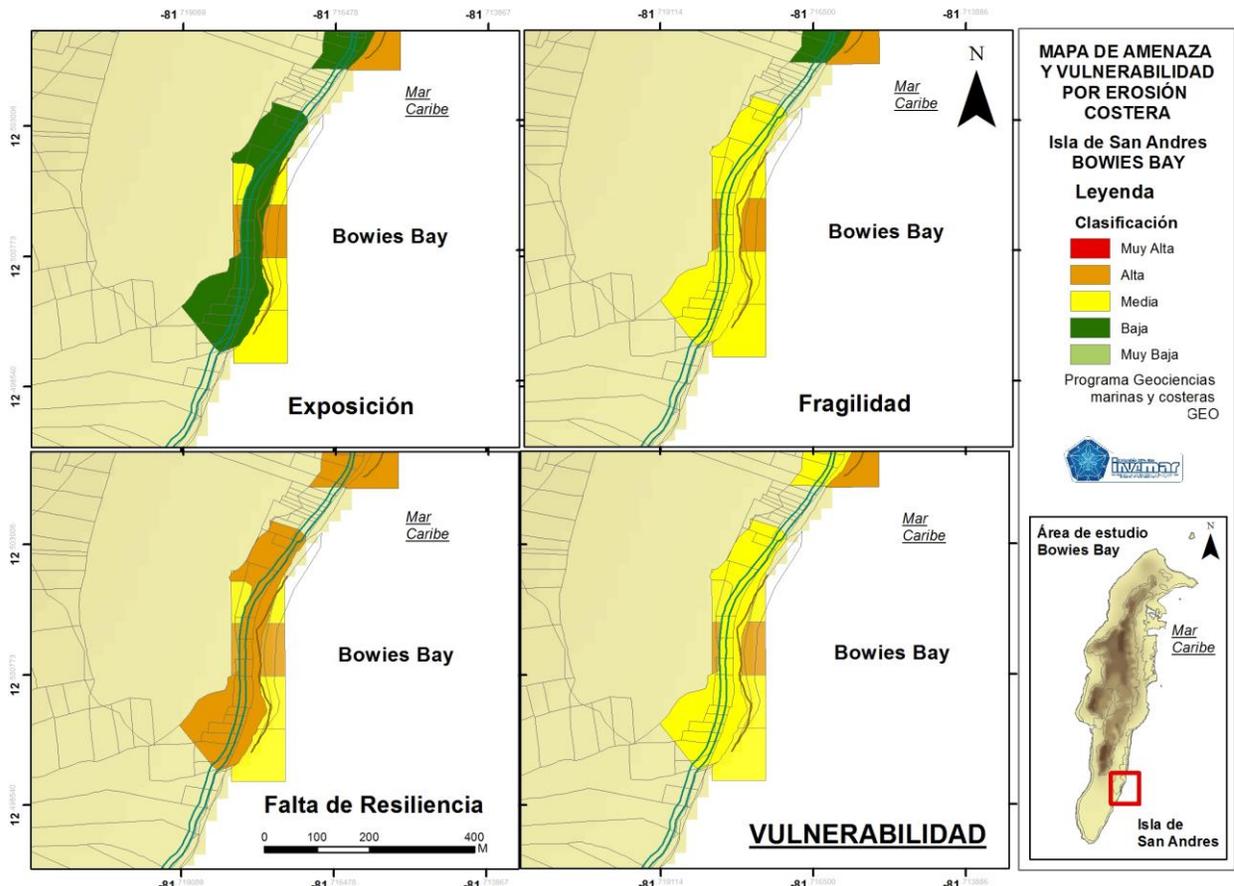


Figura 5.34 Mapa de vulnerabilidad en relación con la amenaza por erosión costera. Los componentes de exposición, fragilidad y falta de resiliencia para la playa de Bowies Bay.

5.3.6. Jhonny Cay

Jhonny Cay en su línea de costa presentó una amenaza alta en la zona Sur y Sureste, es la zona donde se presentan los depósitos de arena o la playa, la parte norte y Noroeste obtuvo valores medios, aquí es donde se localiza la plataforma arrecifal. La zona de playa es donde el nivel de ocurrencia es alto, ya que aquí es donde se ha evidenciado la mayor variación en la línea de costa. La parte Este presentó una susceptibilidad alta, influenciado por la dirección de la línea de costa y la geomorfología del lugar (Figura 5.35).

La exposición en Jhonny Cay es baja, solo alberga unas cuantas pequeñas estructuras dedicadas al turismo como restaurantes y kioscos. La fragilidad es baja, este resultado se dio ya que es una zona de turismo diurno y no alberga personas permanentemente. El acceso por agua, la poca presencia institucional, la organización social ocasional y la rigidez estructural, fueron los responsables de los resultados altos en la falta de resiliencia. Al igual que en el resto de playas de la isla, la vulnerabilidad obtenida fue de clasificación media. Esta es una playa de atractivo turístico y se debe monitorear para así alertar si la pérdida de sedimento se convierte en permanente o solo es por ciertas temporadas o ciclos (Figura 5.36).

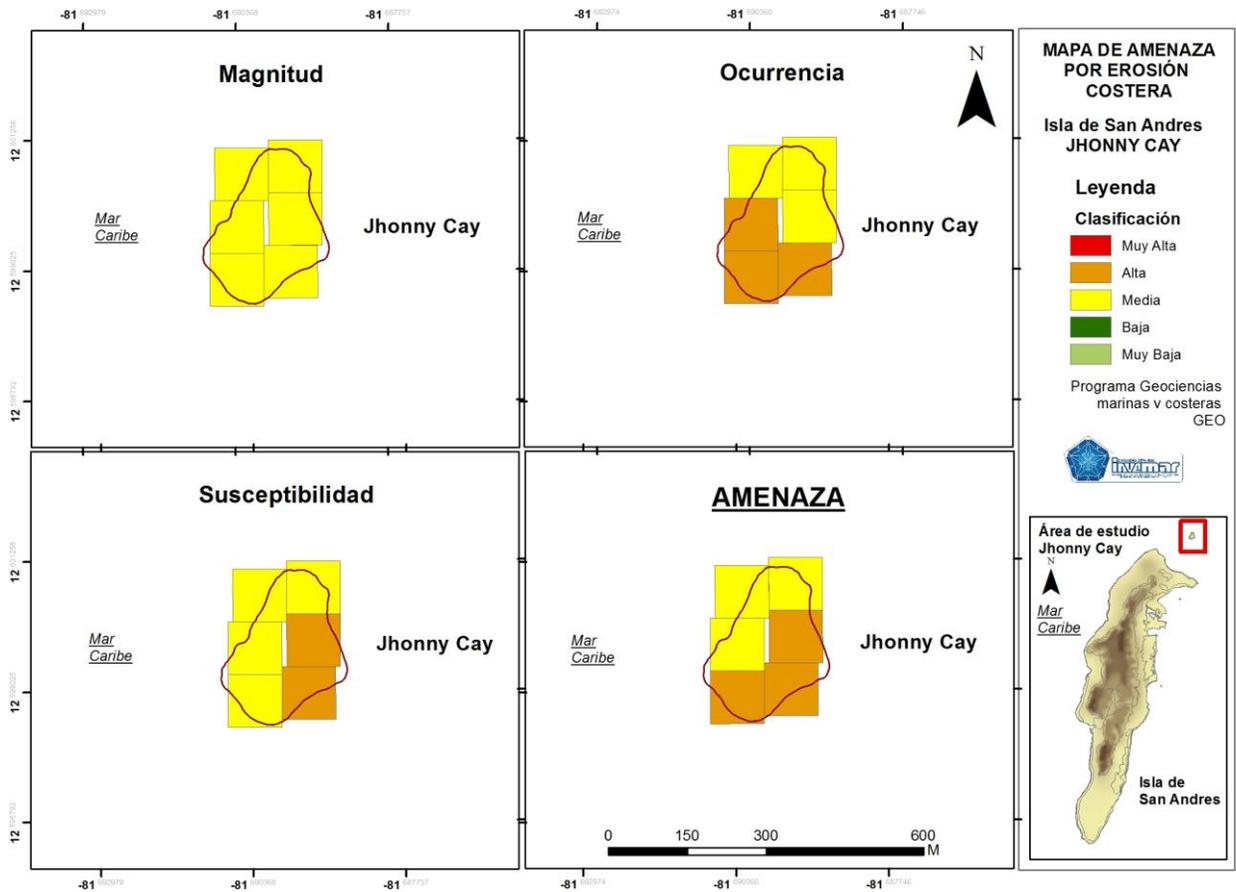


Figura 5.35 Mapa de amenaza por erosión costera y sus componentes (Magnitud, ocurrencia y susceptibilidad) para la playa de Jhonny Cay.

6. CONCLUSIONES

La erosión costera continúa siendo una de las amenazas naturales de gran impacto para el desarrollo de la isla de San Andrés, de acuerdo con el análisis de las líneas de costa en los seis sectores considerados como críticos las tasas de retroceso alcanzan valores por encima de 1,8 m/año. Si bien estos sectores se consideraron al ser depósitos de playa que permiten un seguimiento periódico a corto plazo, y reflejan las modificaciones con mayor facilidad en sensores remotos para un análisis a mediano plazo, cabe anotar que uno de los mayores impactos que causa la erosión es la pérdida de la bancada de la vía circunvalar en el costado oriental de la isla.

Durante la salida de campo se evidencio la existencia de diferentes obras de protección que están actualmente en funcionamiento entre las que se incluyen: i) restauración de dunas, ii) emplazamiento de bolsacretos, iii) relleno de escarpes con arena para perfilamiento de talud y formación de playas. De la misma manera se identificaron los espolones ya reportados (Posada y Guzmán, 2007; INVEMAR, 2014), los cuales no presentan ninguna funcionalidad, han afectado notoriamente las condiciones dinámicas de los sectores en que se encuentran y requieren de recomendaciones especiales de manejo (ej. Retiro de las estructuras) que permitan modelar y diseñar nuevas estrategias de protección frente a la erosión costera, especialmente en los sectores de Hotel Tiuna en Sprat Bight y Hotel Decamerón San Luis.

El análisis detallado del comportamiento del depósito de playa a partir de imágenes satelitales o el monitoreo periódico en Jhonny Cay, Sprat Bight y Rocky Cay, permitiría corroborar si la erosión aquí determinada está relacionada con migración lateral de los sedimentos, de acuerdo con las condiciones hidrodinámicas en relación a la actividad atmosférica y oceanográfica general y sus variaciones temporales a lo largo del año.

El 75% de línea de costa estudiada en la isla de San Andrés se encontró en amenaza alta, es decir que la gran mayoría de sus playas más importantes y sobre las cuales se genera toda la actividad turística se podrían tener una alta probabilidad de verse afectadas por la erosión costera.

Todas las playas estudiadas presentaron una vulnerabilidad media, esto representa que estas zonas que albergan el turismo, el principal ingreso económico y el mayor BIP de la isla, son lugares que tienen una capacidad media para anticiparse, hacer frente y resistir los efectos de la erosión costera

De manera total o parcial, todas las playas de la isla presentaron una vulnerabilidad media y una amenaza alta, estas son zonas críticas, ya que sus niveles de riesgo son altos, esto significa que la probabilidad de sufrir daños y pérdidas es alta. Son zonas las cuales requieren de monitoreo y medidas prevención y mitigación a corto plazo.

Los eventos extremos se pueden evaluar en la amenaza y modelar según los resultados obtenidos en la variabilidad climática, se recomienda incluirlos en un nuevo estudio y así entender cuáles serían las zonas de mayor amenaza ante dichos eventos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, C. 2000. Circulation and variability of the Colombian Basin in the Caribbean Sea. Ph.D. Thesis. University of Wales. 223 p
- Andrade, C. A. 2001. Las corrientes superficiales en la Cuenca de Colombia observadas con boyas de deriva. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Física y Natural*, 96: 321-335.
- Andrade, C. A., Barton, E. D., y Mooers, C. N. 2003. Evidence for an eastward flow along the Central and South American Caribbean Coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 108(C6).
- Andrade, C. 2009. Variaciones temporales termo-halinas en la Cuenca de Colombia. *Boletín Científico CIOH No. 27, ISSN 0120-0542*, pág. 8-21.
- Andrade, C. A., L. Giraldo y S. Lonin. 1996. Nota sobre la circulación de las aguas en el Bajo Alicia y el sector de San Andrés, *Boletín Científico CIOH*, 17: 27-36.
- Andrade, C. y E. Barton. 2005. The Guajira upwelling system *Continental Shelf Research*, 25: 1003-1022.
- Alcántara-Carrió, J. 2008. Los riesgos naturales en el litoral: la amenaza creciente. Servicio de publicaciones Universidad Católica de Valencia, Valencia, España. 28 p.
- Bernal, G., G. Poveda, P. Roldán y C. Andrade. 2006. Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la Costa Caribe Colombiana. *Revista de la Academia Colombiana Ciencias Exactas, Física y Naturales*, 30 (115): 195-208.
- Brito J.N., Coelho L.C. 2002. *Fotogrametría Digital*. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil. 215 p.
- Cadena, M. 2010. Recopilación amenazas costeras. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. SUBDIRECCIÓN DE METEOROLOGÍA Bogotá, D. C. 28 pp.
- Carmona, J., Poveda, G., Vélez, M., Bedoya, M., Vélez, J. 2010. Caracterización de la climatología y los efectos del ENSO sobre la isla de San Andrés, Colombia. Resumen XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica Punta del Este, Uruguay.
- Corporación colombiana internacional CCI. 2009. Eventos Oceanográficos que influyen en la pesca del Caribe colombiano. 1 (5): 23.
- CVC-INGEOMINAS, 2001. Guía metodológica para la evaluación del riesgo por fenómenos de remoción en masa, inundaciones y avenidas torrenciales. Editorial escuela colombiana de ingeniería, Bogotá. 166 pp.

CVC-UNIVALLE, 2009. Zonificación de Amenazas y Escenarios de Riesgo por movimientos en masa, inundaciones y crecientes torrenciales del área urbana y de expansión de los municipios de Buga, Riofrío, Dagua, El Cairo y La Unión – MIDAS. OSSO, observatorio sismológico del sur occidente. Cali.

Díaz, J. M., L. M. Barrios, M. H. Cendales, J. Garzón- Ferreira, J. Geister, M. López- Victoria, G. H. Ospina, F. Parra- Velandia, J. Pinzón, B. Vargas- Angel, F. A. Zapata y S. Zea. 2000. Áreas coralinas de Colombia. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 5, Santa Marta, 176 pp.

Díaz, J. M., G. Díaz- Pulido, J. Garzón- Ferreira, J. Geister, J. A. Sánchez y S. Zea. 1996. Atlas de los arrecifes coralinos del Caribe colombiano, I. Complejos arrecifales oceánicos. INVEMAR, Serie publicaciones especiales 2, Santa Marta, 83 pp.

FONADE-Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo y Gobernación del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. 2010a. Estudios y Diseños Relacionados con la Sostenibilidad de la Playa Norte (Sprat Bight). Informe Final. Convenio Interadministrativo 2009-47. Isla de San Andrés. Universidad del Norte, IDEHA. Barranquilla, Enero de 2010. 215 pp + Anexos.

FONADE-Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo y Gobernación del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. 2010b. Estudios y Diseños de Ingeniería para la Recuperación de la Playa de Sound Bay – San Luis (K19 – K21-440) Universidad del Norte, IDEHA. Barranquilla, Marzo de 2010. 205 pp + anexos.

Galindo, L. M., y Samaniego, J. 2010. La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: algunos hechos estilizados. Revista de la CEPAL, 100, pp. 69-96.

Geister, J., 1975. Riffbau und geologische Entwicklungsgeschichte der insel San Andres. Stuttgarter Beitrage zur Naturkunde, Serie B Geologie an Paläntologie, No 15, 203 pp.

Geister, J., 1992. Modern reef development and Cenozoic evolution of an oceanic island/reef complex: Isla de Providencia (Western Caribbean Sea, Colombia). - Facies 27, 1-70, 17 figs., 17 pls., 4 tables, Erlangen.

Geister, y J.M. Díaz 1997. A field guide to the oceanic barrier reefs and atolls of the southwestern Caribbean (Archipelago of San Andres and Providencia, Colombia). Proc. 8th Int. Coral Reefs Symp. Panama 1: 235-262.

Geister, J. & Gorin, G., 2007. Evolution d'un archipel océanique des Caraïbes (San Andrés et Providencia, Colombie). 3ème Cycle Romand en Sciences de la Terre. Cours de terrain du 14 au 29 septembre 2007. Livret Guide. Univ. Genève.

Gobernación Departamento Archipiélago San Andrés, Providencia y Santa Catalina, 2003. Plan de Ordenamiento Territorial San Andrés Isla 2003 – 2020. Documento Técnico Soporte. 262 pp.

Goda Y. 1988. On the methodology of selecting design wave height. In Proceedings of the twenty-first coastal engineering conference. Malaga, Spain

Gómez, J., J. Carvajal y J. Otero. 2012. Propuesta de estandarización de los levantamientos geomorfológicos en la zona costera del Caribe colombiano. Convenio Especial de Cooperación Colciencias – Gobernación del Magdalena –Invemar. Serie de Publicaciones Especiales No. 54. 110 pp.

González y Hurtado, G. 2012. Caracterización climática del archipiélago de San Andrés y Providencia. Pp (48- 52) en CORALINA- INVEMAR, 2012. Gómez-López, D.I., C. Segura Quintero, P. C. Sierra- correa y J. Garay- Tinoco (Eds). Atlas de la Reserva de Biosfera Seaflower. Archipiélago de San Andrés Providencia y Santa Catalina. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives D Andrés"–INVEMAR y Corporación para el desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina – CORALINA. Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR #28. Santa Marta- Colombia. 180 pp.

Gornitz, V.M., R.C. Daniels, T.W. White y K.R. Birdwell, K. 1994. The development of a coastal risk assessment database: Vulnerability to sea-level rise in the U.S. Southeast. En: Fink, C.W. (Ed) Coastal hazards: Perception, susceptibility and mitigation. J. Coastal Res., SI 12: 327-338.

IDEAM - Instituto De Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. 2012. Servicio Mareográfico pronóstico de pleamares y bajamares en la costa atlántica Colombiana. 129 pp.

INGEOMINAS, 1996. Estudio de las Amenazas Geológicas de la Isla de San Andrés. Convenio No 055-95. Ingeominas-Coralina.

INVEMAR, 2014. Evaluación de la vulnerabilidad por ascenso en el nivel del mar (ANM) y propuesta de lineamientos de adaptación en las islas de San Andrés Providencia y Santa Catalina. Código: SAI-VA-003. Informe técnico final. Convenio Interadministrativo de asociación No. 003 de 2013 INVEMAR-CORALINA. Santa Marta. 359 pp.

INVEMAR-GEO, 2014. Evolución litoral reciente, amenaza y vulnerabilidad por erosión costera de la bocana de la bahía de Buenaventura (Valle del Cauca), Pacifico colombiano. Informe técnico final. Actividad GEO - BPIN INVEMAR. Santa Marta. 85 p.

INVEMAR-GEO, 2013. Vulnerabilidad por erosión costera en las Islas de Providencia y Santa Catalina. Informe Final. Proyecto BPIN INVEMAR, Actividad GEO – Erosión Costera. Santa Marta. 110 pp.

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático).2001. Glosario de Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz,B., O.R. Davidson, R. Swart, y J. Pan (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos, 752 pp.

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, Cambridge UniversityPress.

Kjerfve, B. 1981. Tides of the Caribbean Sea. Journal of Geophysical Reseach, 86: 4243-4247.

Martín-Prieto, J. A., Roig-Munar, F. X., Pons, G. X., Rodríguez-Perea, A., Alvarado, M., & Mir-Gual, M. 2013. Description of erosion processes in Sprat Bight (San Andrés Island, Colombia) using Sequential End Point Rates (EPR). In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O'Hare, T.J. (eds.), Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65, pp. 997-1002, ISSN 0749-0208.

Mesa-Garcia, J. C. 2009. Metodología para el reanálisis de series de oleaje para el Caribe colombiano. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Medellín.

Mesa, O.; Poveda, G. y Carvajal, L. 1997. Introducción al clima de Colombia. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Imprenta Universidad Nacional. Santafé de Bogotá, D.C. 390 pp.

Mo, Kingtse, Gerald D. Bell, Wassila M. Thiaw, 2001: Impact of Sea Surface Temperature Anomalies on the Atlantic Tropical Storm Activity and West African Rainfall. J. Atmos. Sci., 58, 3477-3496.

Molares, R., T. Vanegas, J. Bustamante y C. Andrade. 2004. Aspectos oceanográficos de la aguas sobre la Depresión Providencia en mayo de 2004. Boletín Científico CIOH, 22: 11-25.

Molinari, R. L., Atwood, D. K., Duckett, C., Spillane, M. I. C. H. A. E. L., y Brooks, I. R. V. I. N. G. 1980. Surface currents in the Caribbean Sea as deduced from satellite tracked drifting buoys. In Proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute (Vol. 31, pp. 106-115).

Montenegro, Á. 2009. Análisis espectral (No. 007752). Universidad Javeriana-Bogotá. 24 pp.

Moore L.J., Griggs G.B. 2002. Long-term cliff retreat erosion hotspots along the central shores of the Monterey Bay National Marine Sanctuary. Marine Geology 181: 265-283.

MOVE. 2010. New generic framework addressing vulnerability and disaster risk to natural hazard from a holistic point of view. In B. t. n. f. a. t. guidelines (Ed.) MOVE (pp. 24): EUROPEAN COMMISSION DG ENVIROMENT.

NOAA. 2012. Ciclones tropicales. Guía de preparación. Departamento de comercio de los EE.UU. Agencia Nacional del Océano y la Atmósfera Servicio Nacional de Meteorología. Boletín Científico CIOH No. 25, ISSN 0120-0542, 54-60.

NOAA. 2014. Consultado en <http://www.noaa.gov/>

Nystuen, J.A y C.A. Andrade. 1993. Tracking mesoscale ocean features in the Caribbean Sea using geosat altimetry Journal of Geophysical Research, 98 (C5):8389- 8394.

Oceánicos-UNAL, Gici-UdeM, Uninorte, 2012, "Generación de regímenes de oleaje medios y extrémales en el Caribe Colombiano". Programa de investigación Análisis y Valoración de los procesos erosivos en la Costa continental e Insular del Caribe Colombiano - Convenio Especial de Cooperación 153 entre el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "Jose Benito Vives

de Andrés" INVEMAR y el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación COLCIENCIAS.

Ojeda, O., Castro, E., Valencia, A. y Fonseca, S. 2001. Evaluación de riesgos por fenómenos de remoción en masa. Guía Metodológica. INGEOMINAS – CVC – Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá. 163pp.

Ortiz, J. C. 2007. Huracanes y Tormentas tropicales en el Mar Caribe colombiano desde 1990. Boletín Científico de CIOH, 25: 54- 60.

Ossa, J.M. 2004. Evaluación de la influencia antrópica en los cambios en la línea de costa y la erosión litoral en la isla de San Andrés, Caribe colombiano. Trabajo de grado para optar al título de Geólogo. Universidad EAFIT. 120 pp + anexos.

Pabón, J. D., J. A. Eslava y R. E. Gómez. 2001. Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia. Meteorología Colombiana, 4: 47-59.

Posada, B.O.; D.F. Morales y W. Henao, 2011. Diagnóstico de la erosión costera del territorio insular colombiano. INVEMAR. Serie de Publicaciones Especiales No. 24. Santa Marta. 112 pp.

Posada, B.O. y Guzmán, W., 2007. Diagnóstico de la erosión costera en las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Recomendaciones generales para el manejo y control de la erosión. Investigación elaborada para CORALINA por el INVEMAR, según convenio 010/2006. 102 pp.

Poveda, G. 1998. Retroalimentación dinámica entre el fenómeno El Niño- Oscilación del Sur y la hidrología de Colombia. Tesis como requisito para el título de Doctor en Ingeniería en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia.

Poveda, G. y Mesa, O. 1999. La corriente de chorro superficial del Oeste ("DEL CHOCÓ") y otras dos corrientes de chorro en Colombia: Climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 23(89): 517- 528.

Ruiz-Ochoa, M. A. 2011. Variabilidad de la Cuenca Colombia (mar Caribe) asociada con El Niño- Oscilación del Sur, vientos Alisios y procesos locales. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia - Medellín.

Rusticucci, M., y Barrucand, M. 2001. Climatología de temperaturas extremas en la Argentina consistencia de datos. Relación entre la temperatura media estacional y la ocurrencia de días extremos. Rev. Meteorologica, vol26, 69-84.

Sáenz, H.F., J.M. Betancourt, B.O. Posada, I. Restrepo, D.F. Morales, M.P. Bolaño, D. Vega, L.A. Mejía, A. Merchán, L.A. Gómez Y L.C. Gámez. 2009. Diagnóstico geológico, geofísico, biótico y de caracterización de la calidad de las aguas y sedimentos del proyecto de definición del diseño de las playas entre el hoyo soplador y San Luis en San Andrés Isla. INVEMAR, Coordinación de Servicios Científicos. Informe Técnico Final (ITF), para la Universidad del Norte. Santa Marta. 478 pp.

Solomon, S. (Ed.). 2007. Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC (Vol. 4). Cambridge University Press.

Stensrud, D. J. 1996. Importance of low level jets to climate: A review. *Journal of Climate*, 9: 1698- 1711.

Stewart, R. H. 2004. Introduction to physical oceanography. Texas A & M University.

Thieler, E., Himmelstoss, E., Zichichi, J., and Ergul, A., 2010, Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0; an ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278 v 4.2.

Thieler E.R., Danforth W. 1994. Historical shoreline mapping: improving techniques and reducing positioning errors. *Journal of Coastal Research* 10 (3): 549-563.

Vargas, G. 2004. Geología y aspectos geográficos de la Isla de San Andrés, Colombia. *Geología Colombiana*, 29, 73-89.