

Determinación de la variación morfológica costera de la Bahía de Tumaco, a partir de análisis multitemporal con sensores remotos

Determination of the coastal morphological variation of the bay of Tumaco, from multi-temporal analysis with remote sensing

DOI: 10.26640/22159045.439

Fecha de recepción: 2018-02-16 / Fecha de aceptación: 2018-04-30

Diana C. Niño P.* y Fernando Oviedo B.**

Niño, D. y Oviedo, F. (2018). *Determinación de la variación morfológica costera de la Bahía de Tumaco, a partir de análisis multitemporal con sensores remotos*. Bol. Cient. CIOH (36):71-86. ISSN 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045 DOI: 10.26640/22159045.439

RESUMEN

A partir de insumos obtenidos de sensores remotos, se ha realizado el análisis multitemporal de la evolución del borde costero de la bahía de Tumaco, en aproximadamente 780 km, permitiendo identificar, describir, vectorizar y evaluar los cambios debido a procesos de erosión y acreción, e invasiones antrópicas, a los que está sometido este borde costero, en el sur del Pacífico colombiano; empleando herramientas de información geográficas. Como complemento, se obtuvo información bibliográfica referente a las condiciones oceanoatmosféricas y geológicas de la bahía, permitiendo relacionar la influencia de estos parámetros en los procesos de erosión y acreción de la misma. Se encontró que hacia el norte de la bahía predominan los procesos de erosión, hacia el sur predomina la acreción de sedimentos que da lugar a la formación de planicies fluvio-marinas y hacia el centro de la bahía no se presentan cambios tan significativos, mostrando una relativa estabilidad del terreno. Del total de la extensión de la línea de costa de la bahía, el 24.18 % se ha estado erosionando, el 31.14 % presenta acreción, el 43.16 % ha permanecido estable o no ha sufrido cambios significativos. El 1.52 % los espacios intermareales han sido invadidos con construcciones palafíticas y en algunos casos han sido rellenados con diferentes materiales para elevar el terreno y evitar la inundación durante la marea alta. Como complemento se trató de relacionar estos datos con los parámetros oceanoatmosféricos y geológicos del sector de estudio. Con la entrega de estos resultados se busca generar una línea base de investigación y generación de acciones basadas en la necesidad del conocimiento detallado de la evolución del litoral a través del tiempo, que ofrezca elementos de planificación, gestión ambiental y territorial de la costa pacífica colombiana.

PALABRAS CLAVE: línea de costa, borde costero, sensores remotos, SIG, erosión, acreción, litoral.

ABSTRACT

From inputs obtained from remote sensors, a multitemporal analysis of the evolution of the coastal edge of Tumaco Bay has been carried out, in approximately 780 km. The analysis allowed to identify, describe, vectorize and evaluate the changes due to processes of erosion and accretion, and anthropic invasions, to which this coastal edge is subjected, in the south of the Colombian Pacific; using geographic information tools. As a complement, bibliographic information was obtained referring to the oceanic and atmospheric and geological conditions of the bay, allowing relating the influence of these parameters in the processes of erosion and accretion of it. Towards the north of the bay it was found the erosion processes predominate, towards the south the accretion of sediments predominates that gives rise to the formation of fluvio-marine plains and towards the center of the bay there are not so significant changes, showing a relative stability of the terrain. Of the total extension of the coastline of the bay, 24.18 % has been eroding, 31.14 % has accretion, 43.16 % has remained stable or has not undergone significant changes, in 1.52 % the intertidal

* Geóloga. Correo: dnino@dimar.mil.co

** SJ MHI. Center for Oceanographic and Hydrographic Research of the Pacific. Correo: SOviedoBarrero@dimar.mil.co

spaces have been invaded with stilt houses as constructions and in some cases have been filled with different materials to raise the terrain and avoid flooding during high tide. With the delivery of these results, it is sought to generate a base line of research and generation of actions based on the need for detailed knowledge of the evolution of the coastline over time, offering elements of planning, environmental and territorial management of the Colombian Pacific coast.

KEYWORDS: *Coastline, coastal edge, remote sensing, GIS, erosion, accretion, litoral.*

INTRODUCCIÓN

Las costas son áreas muy dinámicas por la convergencia de diferentes procesos naturales de origen marino y continental, y por procesos antrópicos, convirtiéndola en un sistema frágil sujeto a constantes variaciones (Brocal, López y Pardo, 2001). Como consecuencia de estos procesos, la costa presenta erosión y acreción de sus áreas. La erosión es un problema global ya que al menos el 70 % de las playas arenosas del planeta están sufriendo este proceso (Bird, 1985) en (Rondón Ramirez, 2011), implica pérdida de terrenos debido a la invasión del mar, en un lapso de tiempo lo suficientemente largo que permite descartar efectos temporales o cíclicos debidos básicamente al clima; y la acreción costera implica acumulación de sedimentos y la consolidación de terrenos por encima del nivel de las mareas (Navarrete, 2014). Los procesos de acreción son propios de costas bajas y dan lugar a la formación de playas, espigas, islas barrera, y otras formas de acumulación costera (Carter, 1988) en (Navarrete, 2014), y los procesos de erosión se asocian más a costas altas con presencia de acantilados, aunque también se pueden presentar en costas bajas.

La erosión y acreción debido a procesos naturales, se ve intensificada por la acción del hombre, debido a la elevada demanda demográfica que tiene la costa, por su atractivo paisajístico y los recursos que ofrece (Brocal *et al.*, 2001), conllevando a problemas de tipo económico, social y medio ambiental, por ejemplo: las estructuras de origen antrópico, como carreteras, viviendas, malecones, hoteles, etc., se ven, en gran medida, afectadas por los procesos de erosión, provocando deterioro parcial y hasta pérdida total de las estructuras, además de volver estas áreas más vulnerables a los riesgos naturales costeros como tormentas y tsunamis, la erosión también se convierte en un problema para los ecosistemas que habitan cerca de la línea de costa.

Las costas colombianas actualmente se enfrentan a una problemática de erosión costera

debido al cambio climático y a la dinámica natural de los litorales. En la costa pacífica, esta situación se ve agravada por la continua extracción de arena de las playas para rellenar y estabilizar áreas adyacentes al mar y por la tala de manglares.

La bahía de Tumaco hace parte de la zona sur del litoral pacífico colombiano, y debido a su ubicación, se convierte en una zona muy dinámica por las condiciones geográficas en las que se encuentra.

La bahía de Tumaco presenta un tipo de línea de costa compuesta, por la presencia de zonas acantiladas (al norte) que dejan ver roca sedimentaria expuesta a la abrasión del oleaje, producto de levantamientos tectónicos. Hacia el Sur y centro de la bahía, se observan grandes planicies fluviomarinadas producto de la interacción entre el mar y los ríos que desembocan allí.

La climatología de Tumaco es compleja por los diferentes factores océanoatmosféricos que interactúan en esta zona. Por un lado, el clima de Tumaco durante el primer semestre del año, está directamente influenciado por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), encargada de que se presente en esta época, la mayor cantidad de precipitación (entre 270 y 380 mm) durante el año (Peñaranda, 2012). Por otro lado, las macro mareas semi-diurnas, las corrientes y oleaje que entran hacia la bahía provenientes del SW y SSW (J. C. Restrepo, Otero y López L, 2009), son los encargados de transportar los sedimentos que aporta el río Mira (río con mayor caudal medio anual de la zona $868 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y que mayor influencia tiene sobre esta) durante la época de lluvias, período en el que presenta su mayor caudal (MADS-INVEMAR, 2012 en Barajas y García, 2014). Estas condiciones océanoatmosféricas y geológicas, promueven la erosión y sedimentación, dando lugar a la formación de diferentes morfologías litorales dentro de la bahía de Tumaco.

Cualquier estudio basado en la planeación del territorio, independientemente de cual sea su objetivo, requiere de la existencia de información de detalle. Esta reflexión, a pesar de ser plasmada en diferentes documentos de planificación y administración del territorio, se ve confrontada por la ausencia a veces inexplicable de información sobre el litoral a escalas de detalle (Díaz, Fernández, Prieto y Ojeda, 2012) en (Ojeda Zújar, Díaz Cuevas, Prieto Campos y Álvarez Francoso, 2013).

El monitoreo constante de la línea de costa permite entender el patrón de ciclos de erosión y acreción de la costa, para poder manejar datos de predicción confiable que pueden ser luego incorporados en las políticas de planificación de usos del suelo (Invemar, 2003 en Padilla García y Vargas Hernandez, 2017). La determinación y caracterización de las variaciones en la línea de costa, especialmente la identificación de los cambios debido a la erosión, independientemente de que sean de origen natural o antrópico, no solo permite reconocer las áreas que presentan riesgos naturales costeros (Zújar, 2000), sino también, son referencia necesaria para la planificación y gestión ambiental y territorial de estas zonas (Ojeda Zújar *et al.*, 2013). Por lo anterior, el primer paso para mitigar los efectos de la erosión y acreción costera, es identificar y evaluar los patrones de sus ciclos durante las últimas décadas, con el fin de entender y tratar de predecir el comportamiento del borde costero para, de igual forma, incorporar estas predicciones en la planeación, gestión y administración del litoral.

Los sistemas de información geográfica (SIG) y el tratamiento digital de imágenes, se convierten en una herramienta fundamental que facilita y agiliza este tipo de análisis, al mismo tiempo que permite generar bases de datos de fácil actualización (Pardo y López García, 1998. En Brocal *et al.*, 2001). El presente trabajo tuvo como objetivo generar información técnica y científica, identificando, caracterizando y evaluando los cambios en la configuración de la morfología costera de la Bahía de Tumaco, generados por procesos de erosión, acreción y actividad antrópica, a partir del análisis de ortofotografías y fotografías aéreas tomadas en el área desde el año 1958 hasta el 2013, analizadas a través del software ArcGIS, material cartográfico y bibliográfico. Lo anterior con el fin de obtener

un insumo técnico para orientar las decisiones en cuanto a la protección, preservación y restauración de los litorales, además de ser un estudio base para proyectos de realización de estructuras civiles que mitiguen la erosión costera.

ÁREA DE ESTUDIO

La bahía de Tumaco se encuentra ubicada en el departamento de Nariño, al sur del Pacífico colombiano, en los municipios de Francisco Pizarro y Tumaco, entre la bocana Salahondita, con coordenadas 78°41'45.275" W y 2°06'47.481" N, hasta Bocagrande, con coordenadas 78°51'24.741" W y 1°48'43.841" N. El área de estudio tiene una extensión del borde costero de 780 km y aproximadamente 233 km². En la bahía desembocan los ríos: Chagüí, Colorado, Curay, Imbilpí, Llanaje, Rosario, Tablones. Actualmente, la bahía cuenta con varias poblaciones ubicadas sobre el litoral, siendo estas: Llanaje, La Chorrera, Curay, Colorado, La Caleta, Chajal, Trujillo, San Pedro, Albino, Vaquería, Bocagrande y San Andrés de Tumaco, esta última la más importante dentro del área con 85885 habitantes en la cabecera urbana según el último censo del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) en el año 2005.

METODOLOGÍA

Datos

Como base para el desarrollo de este artículo, se hizo una búsqueda y recopilación de material bibliográfico que permitiera conocer las características geológicas y océano-atmosféricas de la Bahía de Tumaco, influyentes en la configuración de la geomorfología de la misma.

Para el análisis de la variación morfológica costera de la bahía, se utilizaron 163 fotografías aéreas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), archivadas por número de vuelo y año en que fueron tomadas (Tabla 1). Cada paquete de fotografías tiene un cubrimiento parcial de diferentes zonas de la bahía, están a diferentes escalas y diferente nivel de resolución. Igualmente, se utilizaron 315 ortofotografías del año 2006 que cubren totalmente la bahía y 36 ortofotografías que cubren el área urbana de Tumaco y sus alrededores, tomadas en el 2013, con una resolución espacial de 25 cm por pixel.



Figura 1. Mapa área de estudio.

Fotointerpretación

Antes de iniciar la vectorización de las líneas de costa y en general del borde costero, se realizó verificación y control de calidad de la georreferenciación de las fotografías aéreas, proceso que se llevó a cabo previamente durante el desarrollo del proyecto "Zonificación

fisiográfica del litoral pacífico, fase I" en el año 2013. Durante dicho proceso se tuvo en cuenta que cada fotografía georreferenciada tuviera una muy buena exactitud posicional y un error cuadrático medio bajo, para garantizar la no distorsión de las fotografías georreferenciadas (Figura 2).



Figura 2. Georreferenciación de fotografías aéreas del IGAC.

Tabla 1. Inventario de fotografías aéreas del IGAC usadas para el análisis multitemporal.

Año	Vuelo	No. foto
1958	C-836	48, 49 y 50
1962	M-1178	22186, 22187 y 22188
1969	C-1243	23, 24, 25, 28, 30, 33, 35, 36, 38
1971	C-1365	114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 124, 125, 126, 127, 130, 131, 132, 136, 137, 138, 139, 140, 143, 144, 145
1976	C-1664	42, 43, 44, 45, 46, 47
1983	C-2076	124, 125, 126, 127
	C-2079	02
	C-2191	02, 03, 04, 08, 11, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 21, 22, 40
	C-2192	86
1985	C-2193	221
	C-2194	37
1993	R-988	39, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 53, 55, 57, 59, 60, 61, 63, 68, 70, 71, 73, 75, 76, 77, 78, 79, 81, 85, 86, 88, 89, 90, 92 203, 206, 208, 209, 210, 218, 220, 236 242, 243, 244, 245, 246, 249, 257, 258, 260
	C-2509	01, 02, 03, 14, 15, 16, 17, 190, 192, 215, 216
	C-2510	35, 37, 39, 40, 69, 70, 71, 75, 76, 77, 80, 81 146, 148, 150, 165, 167
1998	C-2626	80, 82, 84, 117, 118, 120, 121
2001-2006	C-2788	207, 208, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 220, 221, 222, 224, 225, 226, 227, 228

El estudio de las variaciones en la línea de costa y borde costero, son muy comunes en la fotointerpretación y permiten detectar los cambios entre dos o más fechas (David, Colledge, y Beach, 2003), a partir del reconocimiento y análisis de características como: forma, tono, color, estructura, tamaño, textura, sombreado, patrones y asociaciones (Bermúdez, Álvarez y Niño, 2004). En este estudio se utilizaron once fechas: 1958, 1962, 1969, 1971, 1976, 1983, 1985, 1993, 1998, 2001-2006 y 2014. Para la identificación de los cambios en el borde costero, se digitalizaron a escala 1:2000, las líneas de costa de cada año de acuerdo al entorno del borde costero que se observaba en las fotografías aéreas y ortofotografías (Figura 3). El cubrimiento de cada una de las líneas de

costa no es el mismo, debido a que el número de fotografías aéreas por año varía de 3 fotografías, en el año que menos información hay (1958), hasta 64 fotografías, en el año que mayor información hay (1985), además la escala de captura de cada paquete de fotos es diferente, por ejemplo, de 1993 se tienen 45 fotografías, sin embargo, cubren mayor área en la zona de estudio que el paquete de fotografías de 1985 que tiene 64 fotografías (Figura 4). En cuanto a las ortofotografías, las tomadas en el año 2006 cubren toda el área de estudio mientras que las tomadas en el año 2013 cubren la zona urbana de Tumaco y sus alrededores. Por lo anterior, el análisis de la línea de costa de la bahía, se llevó a cabo por sectores según el cubrimiento de cada paquete de fotos.

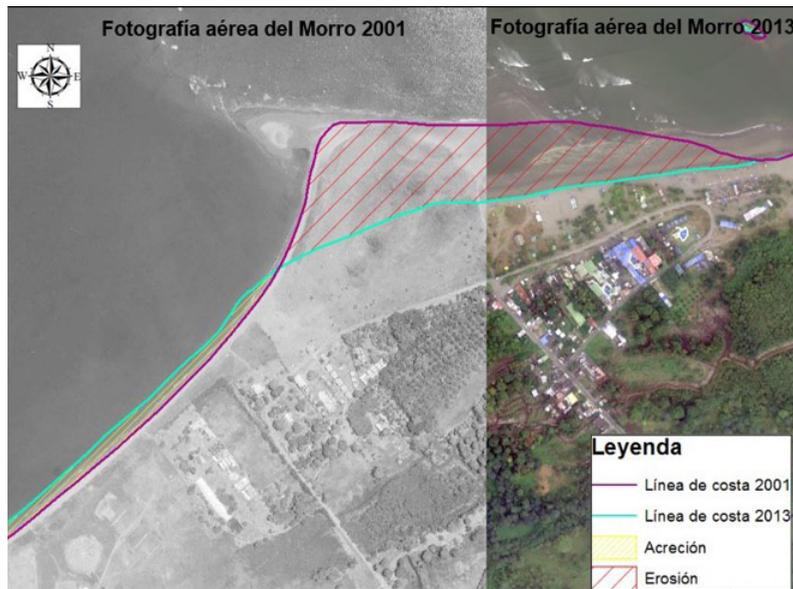


Figura 3. Ejemplo del análisis multitemporal de la línea de costa.

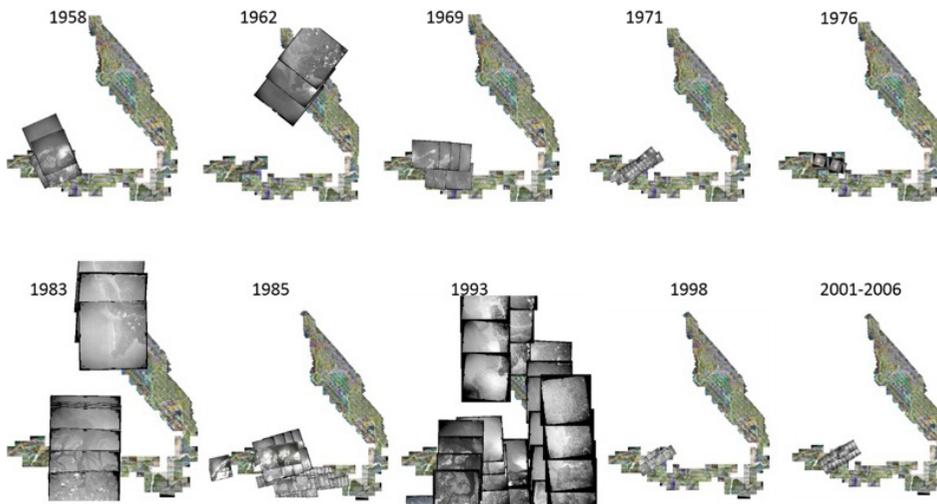


Figura 4. Cubrimiento fotografías antiguas del IGAC por año en la bahía de Tumaco.

La línea de costa, es la línea que forma el límite entre la tierra y el agua (Allen, 1972). Debido a que en el área de estudio se presentan macro mareas semi-diurnas, se hace más difícil definir el límite entre la tierra y el agua, ya que realmente en este caso no es una línea, sino una zona de transición delimitada por la línea de bajamar y la línea de pleamar. En este sentido, la línea de costa en este estudio se trazó de la siguiente manera: en donde hay playas se tomó como la máxima marca de agua en el terreno

(Figura 5a), que viene siendo la línea de más alta marea para el momento de la toma de la fotografía aérea; en zonas de bajamares vegetados y no vegetados, la línea se trazó por el borde del bajamar vegetado, que en este caso sería por el borde de los manglares que diariamente cubre la marea y que limita con los bajamares no vegetados (Figura 5b); y en las zonas de costa elevada, se trazó esta línea por el borde de los acantilados (Figura 5c).

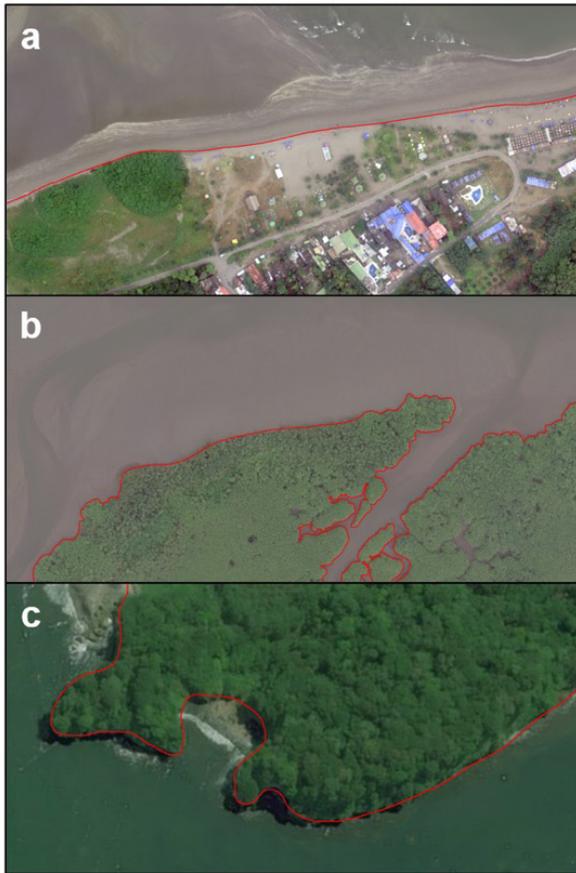
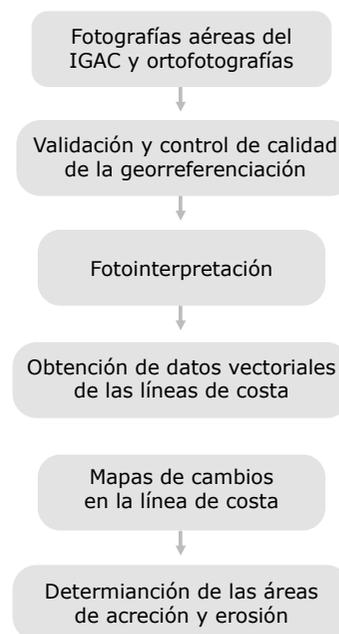


Figura 5. (a) Línea de costa trazada a partir de la marca de agua en el terreno que deja la pleamar. (b) Línea de costa trazada por el borde del manglar dentro de la zona intermareal. (c) Línea de costa trazada por el borde del acantilado.

Una vez obtenidas cada una de las líneas de costa, se procedió a identificar y evaluar las áreas que durante este periodo de tiempo (1958-2014) han sufrido procesos de erosión, acreción de sedimentos o áreas en las que se presenta una relativa “estabilidad” del borde costero, además del análisis de la expansión de las áreas urbanas, debido a la invasión principalmente de construcciones palafíticas. Para establecer si determinado sector de la bahía estaba sufriendo procesos de erosión, acreción o ha permanecido “estable”, se hicieron análisis en toda la bahía de la evolución de la línea de costa en un periodo de tiempo de al menos 10 años, según el cubrimiento de las fotografías. También se cuantificaron en hectáreas (ha) y tasas de erosión y acreción, los cambios en las principales

islas pobladas de la bahía. Para esto se generaron polígonos de las islas en los diferentes años y se procedió a determinar el área perdida o ganada para cada polígono. El proceso de validación y control de calidad de la georreferenciación de las fotografías aéreas del IGAC; la obtención de datos vectoriales y el análisis de la variación de las diferentes líneas de costa; y en general el geoprocesamiento, se realizó en el software ArcGIS versión 10.3 de ESRI.

Diagrama de flujo de la metodología de la investigación:



Geología

La bahía hace parte de la cuenca Tumaco, que tiene una extensión desde el sistema de fallas de Garrapatas (norte) hasta la frontera Ecuatoriana (sur) (Ortiz y Valencia, 2013), y esta a su vez hace parte del Sur del Pacífico Colombiano dentro del Terreno Suprayacente Atrato – San Juan – Tumaco (Etayo-Serna *et al.*, 1983). Esta cuenca representa una cuenca de ante arco (Forearc Basin) asociada a un sistema de subducción terciario, por la colisión y subducción de la placa oceánica y la continental, y en la cual afloran rocas del Cretáceo Superior que constituyen el basamento y rocas sedimentarias Cenozoicas, desde el Eoceno hasta el Plioceno, formadas en ambientes marinos profundos (Ortiz y Valencia, 2013).

Las formaciones litológicas en la bahía, se constituyen principalmente de roca sedimentaria de origen marino y fluvial (Posada, Henao y Guzmán, 2009), en las cuales predominan conglomerados, arcillolitas y lodolitas frecuentemente con pequeñas capas de hojas de dicotiledóneas, de las formaciones Naya (Mioceno) y Guapi (Plioceno) (Etayo-Serna *et al.*, 1983). Los afloramientos rocosos presentes a lo largo de la línea de costa de la bahía (Punta Cascajal en Isla del Gallo, Punta Laura y El Morro), hacen parte de los restos de una serie de anticlinales alargados en sentido Noreste y formados por movimientos tectónicos de los Andes hacia el final del Pleistoceno Inferior (Van der Hammen, 1958. En Muñoz, Cossio, Salazar y Rodríguez, 2003). Los depósitos del Cuaternario reciente de la Bahía de Tumaco, se encuentran asociados a la planicie deltaica de Nariño, enmarcada dentro de un ambiente litoral asociado con la dinámica marina y fluvial caracterizada por el desarrollo de los ríos Patía y Mira, los principales en esta zona (Tejada *et al.*, 2003).

La geomorfología de la bahía está asociada a geoformas erosivas y deposicionales. Las geoformas erosivas se presentan como acantilados, pilares, arcos, cavernas y bloques caídos a lo largo de las colinas de la bahía. Las geoformas deposicionales de origen fluvio-marino, están constituidas principalmente por arenas y limos, se presentan como barreras de arena, islas barreras, llanuras y playas, ubicadas de forma paralela a la línea de costa debido a la dirección de la deriva litoral (Muñoz *et al.*, 2003).

Parámetros oceanoatmosféricos que influyen en la dinámica de la morfología de la bahía de Tumaco

El clima de la bahía de Tumaco está directamente influenciado por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), debido a que durante su desplazamiento Norte-Sur-Norte, influye directamente en los procesos de precipitación en el Sur del Pacífico colombiano, durante los meses de enero, febrero y marzo (Gómez y Peñaranda, 2012), generando una época de lluvias durante el primer semestre del año (Barajas y García, 2014). Este fenómeno se da cuando los vientos Alisios del Hemisferio Norte convergen con los vientos alisios del Hemisferio Sur, generando una baja presión y como consecuencia aumento de la nubosidad, las lluvias, presencia de vientos variables y débiles, y tormentas (Barajas y García, 2014). Según los valores promedios mensuales multianuales para la estación meteorológica del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP) durante el periodo 1958-2010 (Gómez y Peñaranda, 2012), la precipitación alcanza su valor máximo en mayo con 310 mm, desciende a 250 y 145 mm entre junio y julio, alcanzando los valores más bajos entre agosto y noviembre con un mínimo en noviembre y octubre de 110 mm. Los valores se incrementan entre diciembre y abril, ascendiendo desde 165 a 295 mm, con un pico en enero de 300 mm (Figura 6).

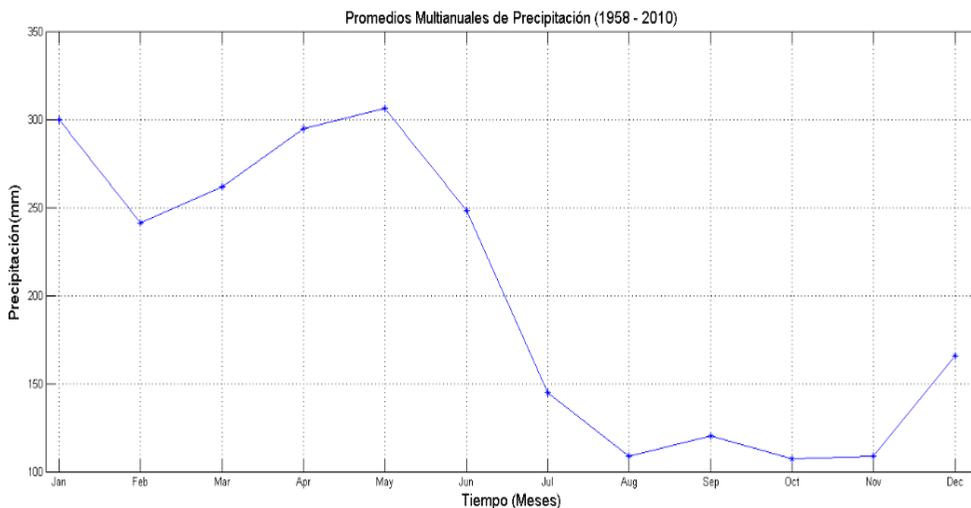


Figura 6. Precipitación promedio mensual multianual, periodo 1958-2010 (Gómez y Peñaranda, 2012).

Los principales ríos que desembocan en el área de estudio y sus alrededores son los ríos Mira y Patía. Sin embargo, el que más aporta sedimentos en suspensión y mayor influencia tiene sobre la bahía es el Río Mira. Su desembocadura se encuentra a aproximadamente a 24 millas náuticas al Suroeste del extremo Sur de la bahía (Barajas y García, 2014). Su delta tiene una superficie subaérea de 520 km², que se extiende desde su cúspide hasta aproximadamente 20 km de la línea de costa (J. C. Restrepo *et al.*, 2009). Su caudal medio anual es de 868 m³/s y su concentración de sedimentos en suspensión, de acuerdo al rango de caudales medios, es de 0.35 kg/m³ (J. D. Restrepo y López, 2008). La cuenca del río presenta un régimen hidrológico bimodal, en donde los máximos caudales se presentan en los meses de abril-mayo (máximo en mayo de 1105 m³/s) y noviembre-enero; el periodo de mínimo caudal en los meses de julio a septiembre (mínimo en el mes de agosto con 553 m³/s) y una temporada de transición durante los demás meses del año (Barajas & García, 2014) (MADS-Invemar, 2012. En Barajas y García, 2014).

El oleaje entra hacia la bahía, provienen del SW y SSW, con alturas que se encuentran entre 0.29 y 2.23 m, y periodos que varían entre 5.0 y 23.0 s, en aguas profundas (Restrepo, 2007). El oleaje durante su tránsito hacia aguas someras y después de sufrir los efectos de asomeramiento, refracción-difracción, disipación con el fondo y rotura del oleaje, ocasionan cambios significativos en la altura de la ola, generando zonas de aumento de energía del oleaje con alturas superiores a 3 m en proximidades a la línea de costa (MADS-Invemar, 2012. En Barajas y García, 2014), en los sectores de Punta Cascajal en Isla del Gallo y en general al Norte de la bahía. En la zona Sur de la bahía, el oleaje entra con dirección W – NW y altura significativa del oleaje de 0.2 y 1.2 m. Hacia el E y centro de la bahía, el oleaje entra en dirección WSW y altura significativa del oleaje de 0.2 a 0.8 m, aproximadamente.

Otro aspecto importante que interfiere en la dinámica de la morfología de la Bahía de Tumaco es la amplitud de la marea. Según el Ideam (2007), el Pacífico colombiano presenta macro mareas semi-diurnas, con amplitud media de marea de hasta 4.5 metros. Empezando con una elevación máxima (pleamar), para luego durante las siguientes 6

horas una retirada de las aguas (reflujo) donde el nivel llegara al mínimo (bajamar) y después de lo cual volverá a aumentar el nivel del agua (flujo) para llegar de nuevo a la pleamar. Las mareas en la costa Pacífica colombiana se les llama semidiurnas regulares, debido a que se presentan dos mareas altas y dos mareas bajas por día, con un periodo de aproximadamente 12.25 horas (Gidhagen, 1982 en Ideam, 2007).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El uso y análisis de sensores remotos en un Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite la determinación de los cambios en la línea de costa, de forma precisa y detallada (Rangel-Buitrago y Posada-Posada, 2013), en este caso para el periodo 1958 – 2014. Los datos obtenidos fueron útiles para mostrar la variabilidad de los cambios en diferentes puntos de la bahía, permitiendo establecer posibles patrones de erosión y/o acreción.

Los afloramientos de rocas sedimentarias del Mioceno y Plioceno, son rocas no cohesivas que se caracterizan por ser poco resistentes al embate de las olas en la base de los acantilados (Martínez, 1993. En Posada *et al.*, 2009), frágiles poco consolidadas, altamente deleznable y afectadas por fracturas (Posada *et al.*, 2009), que facilitan la erosión de las zonas acantiladas que presentan en los sectores de Punta Cascajal en Isla del Gallo, Punta Laura cerca a la desembocadura del río Curay, Colorado cerca a la bocana del río Colorado y en el sector de El Morro. Las planicies de origen fluvio-marino que se encuentran principalmente hacia el sur y centro de la bahía, son producto del transporte de sedimentos de la interacción del mar con los ríos que desembocan allí, sin embargo, estas planicies en ciertos sectores presentan algún grado de erosión.

Como se observa en la Figura 7, en la bahía se presentan zonas en donde han predominado procesos de erosión, acreción de sedimentos o en las que se presenta una relativa “estabilidad” del borde costero, es decir, áreas en las que la línea de costa varia muy poco, debido a que se presenta cíclicamente una leve erosión seguida de una leve acreción de sedimentos, evitando así, que se presente cambios abruptos en la regresión o transgresión de la línea de costa.

De los 780 km de borde costero que se analizaron en la Bahía de Tumaco, se encontró que, al menos durante el periodo de tiempo analizado, el cual puede ser diferente para cada sector de la bahía, en el 24.18 % han predominado los procesos de erosión; en el 31.14 % ha predominado la

acreción de sedimentos; el 43.16 % de la costa ha mantenido una relativa estabilidad durante el periodo desde 1993 hasta el 2006; y el 1.2 % de línea de costa ha presentado regresión, debido a que las invasiones de estructuras antrópicas le han ganado terreno al mar.

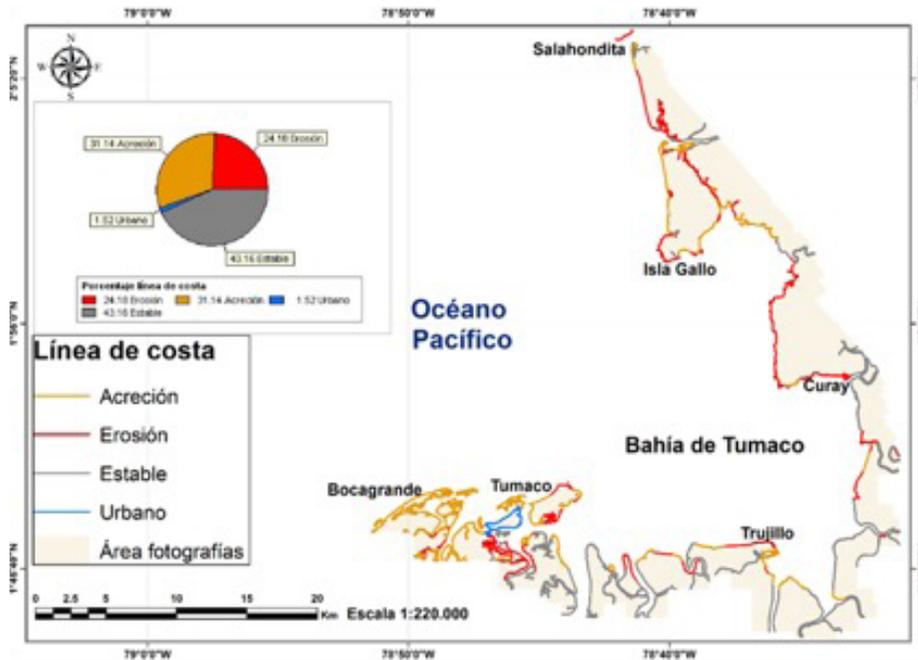


Figura 7. Erosión y acreción costera en la bahía de Tumaco.

A continuación se describen y se muestran las áreas de la bahía de Tumaco que más han sido afectadas debido a los procesos de erosión y acreción.

Sector de Bocagrande e Isla Vaquería

La Figura 8 muestra la evolución de la línea de costa de la espiga Bocagrande, Isla Vaquería y los alrededores de este sector, durante el periodo 1969-2006. La espiga Bocagrande en 1969 (línea verde claro) tenía un área de 91.45 ha, no estaba unida al bajo firme y se encontraba aproximadamente a 400 m al NW de su posición en 2006. En 1985 (línea amarilla) la espiga se hace más delgada, se divide en dos y se extiende más hacia el NE. Para 1993 (línea roja), la espiga aumenta su grosor y se desplaza hacia el SW, quedando de nuevo a

aproximadamente 400 m hacia el NW de la posición que toma para el año 2006. En el 2006, la espiga nuevamente se desplaza hacia el SE, aumenta su área a 193.86 ha debido a la acreción, disminuye su grosor al mismo tiempo que aumenta su longitud en dirección NE. Se puede observar que el comportamiento de la espiga durante este periodo de tiempo, es engrosarse y por lo tanto desplazarse aproximadamente 400 m hacia NW, al mismo tiempo que su longitud disminuye, seguido a lo anterior, se adelgaza desplazándose aproximadamente 400 m hacia el SE y aumentando su longitud en dirección NE. En la Isla Vaquería y en general en las demás áreas que muestra la Figura 6, se han presentado procesos de acreción de sedimentos, provocando que por ejemplo la la Isla Vaquería pasara de un área de 139.77 ha en 1969 a 172.15 ha en 2006.

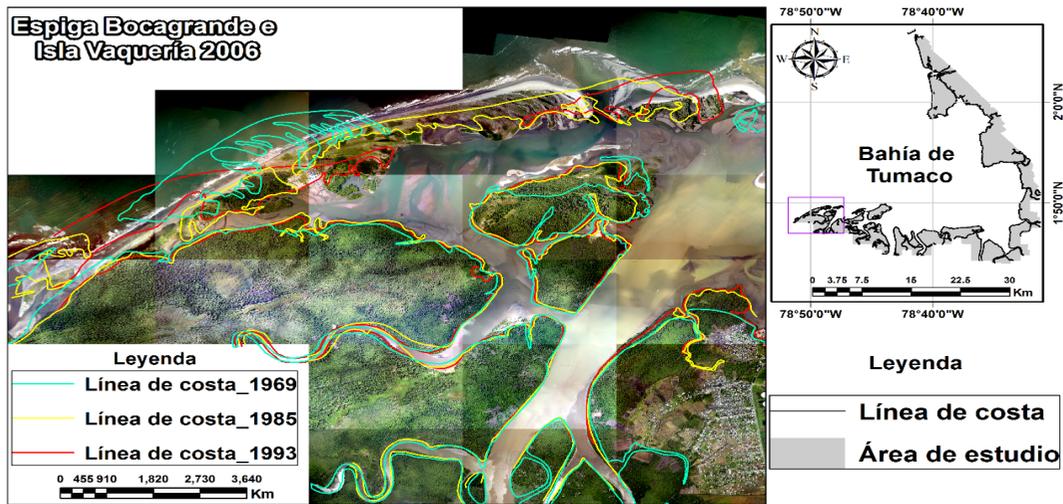


Figura 8. Evolución de la línea de costa del suroeste de la Bahía de Tumaco, periodo 1969–2006.

La Tabla 2 evalúa los cambios en las áreas de la espiga Bocagrande e Isla Vaquería y muestra

cuál es la tasa de acreción o erosión anual durante los 37 años del periodo 1969–2006.

Tabla 2. Cuantificación de los cambios en el área de la espiga Bocagrande e Isla Vaquería de la bahía de Tumaco debido a la erosión y acreción costera.

Zona	Área (ha)	Tasa de erosión o acreción (ha/año)
Bocagrande	De 91.45 a 193.86	Acreción de 2.77
Isla Vaquería	De 139.77 a 172.15	Acreción de 0.88

Islas El Guano, Tumaco y La Viciosa

En la Figura 9 se observa la posición y forma de la Isla del Guano en 1958 y el desplazamiento que tuvo en aproximadamente una década hacia el SE pasando de ocupar 68.46 ha a 59.92 ha en 1969 (línea verde clara), evidenciando durante este periodo una erosión de 0.78 ha/año. Posteriormente, en el año 1979 esta isla desaparece totalmente debido al tsunami que se generó luego del terremoto de magnitud 7.9 en la escala de Richter. La Figura 7 también muestra la Isla de Tumaco en el año 1958, año en el cual comienza la acreción de lo que hoy se conoce como Isla La Viciosa, que se encuentra actualmente adyacente a la de Tumaco. La fotografía aérea y la superposición de las líneas

verde, roja y azul, representan el cambio que tuvieron estas tres islas, Tumaco, La Viciosa y El Guano, durante el periodo 1958–1983. La Isla del Guano presenta un comportamiento similar al de la espiga de Bocagrande, disminuyendo su grosor y desplazándose hacia el SE. En la Isla La Viciosa los procesos que predominaron durante ese periodo, fueron los de acreción de sedimentos, por la formación y aumento de la misma, pasando de ocupar un área de 27.25 ha en 1958 a 30.20 ha en 1983. En cuanto a la isla de Tumaco, también incrementó su área, pero en este caso, fue por las invasiones antrópicas en la periferia de la isla, pasando de un área de 101.57 ha en 1958 a 143.05 ha en 1983.

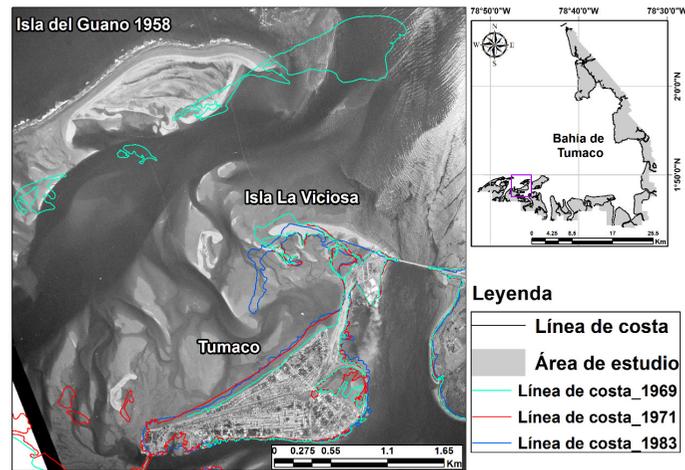


Figura 9. Evolución de la línea de costa de las islas Tumaco, La Viciosa y el Guano en la bahía de Tumaco, periodo 1958–1983.

La Tabla 3 evalúa el cambio en la extensión del área de las islas Tumaco y La Viciosa, además de la tasa de acreción o erosión anual durante los 25 años del periodo 1958–1983.

Tabla 3. Cuantificación de los cambios en las islas Tumaco y La Viciosa de la bahía debido a la erosión y acreción costera entre 1958-1983.

Zona	Área (ha)	Tasa de erosión o acreción (ha/año)
Tumaco	De 101.57 a 143.05	Acreción de 1.65
La Viciosa	De 27.25 a 30.20	Acreción de 0.118

La Figura 10 muestra la evolución de las islas Tumaco y La Viciosa durante el periodo 1985–2014. El aumento debido a la acreción en La Viciosa es considerable, ya que durante este periodo su área aumentó de 49.76 ha a 73.89 ha, aunque en un sector de la misma este aumentó

es debido a las invasiones antrópicas. La isla de Tumaco durante este periodo aumenta su área pero en menor proporción al periodo 1958–1983, también como consecuencia de invasiones de carácter antrópico y pasa de ocupar un área de 149.32 ha a 174.81 ha en 2014.

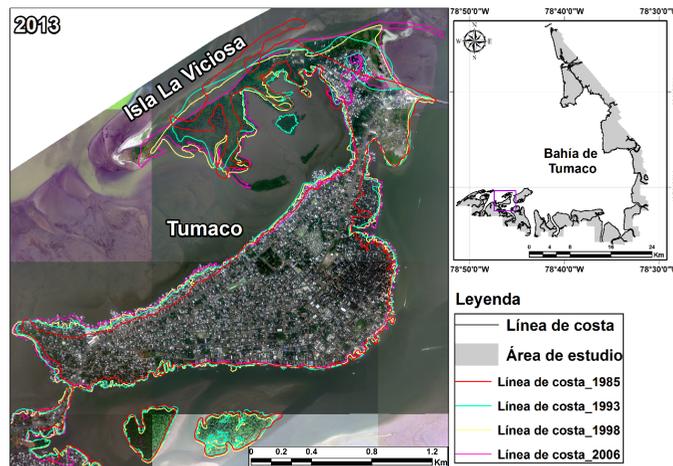


Figura 10. Evolución de la línea de costa de las islas Tumaco y La Viciosa en la bahía de Tumaco, periodo 1985–2014.

La Tabla 4 evalúa el cambio en la extensión del área de las islas Tumaco y La Viciosa, además de la tasa de acreción o erosión anual durante los 28 años del periodo 1985–2014.

Tabla 4. Cuantificación de los cambios en las islas Tumaco y La Viciosa de la bahía debido a la erosión y acreción costera entre 1985-2014.

Zona	Área (ha)	Tasa de erosión o acreción (ha/año)
Tumaco	De 149.32 a 174.81	Acreción de 0.91
La Viciosa	De 49.76 a 73.89	Acreción de 0.86

El Morro

En la Figura 11 se observa el estado de la isla El Morro en el año de 1958. Las líneas roja, verde y amarilla, representan las líneas de costa de El Morro, en los años 1969, 1971 y 1983, respectivamente. Durante este periodo, los

principales cambios se dieron en la punta Noreste de la isla con una erosión de 36.37 ha y acreción hacia la parte Este de la isla, detrás de la colina, de 19.64 ha. El resto de la isla no presenta mayores cambios. Durante este periodo, toda la isla paso de ocupar en 1958 un área de 496.61 ha a 468.48 ha en 1983.

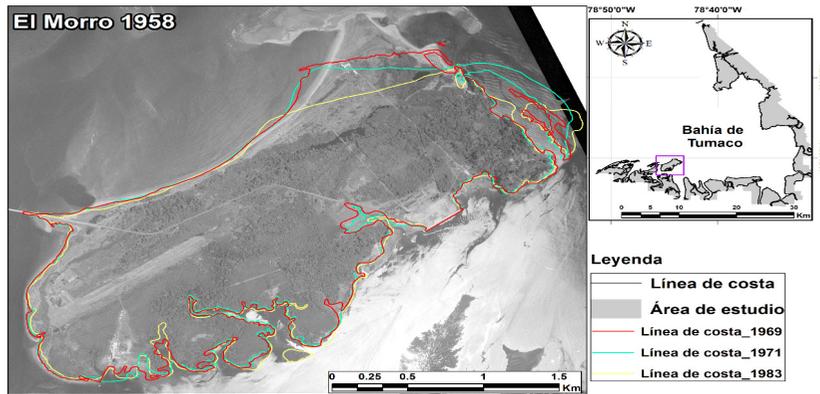


Figura 11. Evolución de la línea de costa de la isla El Morro en la bahía de Tumaco, periodo 1958–1983.

La Tabla 5 evalúa el cambio en la extensión del área de la isla El Morro, además de la tasa de erosión anual durante los 25 años del periodo 1958–1983.

Tabla 5. Cuantificación de los cambios en la isla El Morro de la bahía, debido a la erosión y acreción costera entre 1958-1983.

Zona	Área (ha)	Tasa de erosión o acreción (ha/año)
El Morro	De 496.61 a 468.48	Erosión de 1.13

En la Figura 12 se observa una ortofotografía de El Morro, tomada en el 2014 y las líneas de costa de esta isla en los años 1985, 1993, 1998 y 2006. Se puede observar que desde 1985 hasta 1993 la parte Norte de la isla se erosionó hasta llegar al máximo punto de transgresión de la línea de costa, seguido de un periodo de acreción hasta el 2006 y nuevamente un periodo

de erosión hasta el año 2014, pero solo en la punta Noreste de la isla. La punta Este de las isla, detrás de la colina, presentó un periodo de acreción desde 1985 hasta 1993, seguido de erosión hasta el 2014. Durante este periodo (1985-2014) las isla pasó de ocupar un área de 484.86 ha en 1985 a 500.26 ha en 2014.

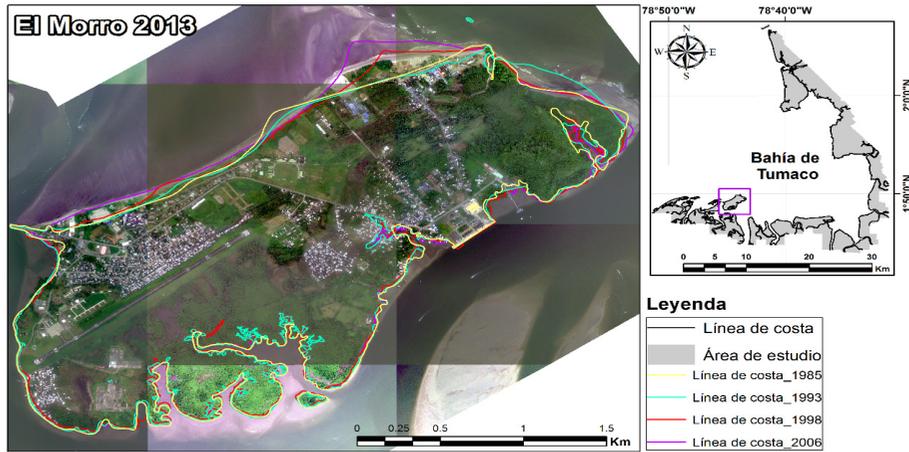


Figura 12. Evolución de la línea de costa de la isla El Morro en la bahía de Tumaco, periodo 1985–2014.

La Tabla 6 evalúa el cambio en la extensión del área de la isla El Morro, además de la tasa de acreción anual durante los 28 años del periodo 1985–2014.

Tabla 6. Cuantificación de los cambios en la isla El Morro de la bahía, debido a la acreción costera entre 1985-2014.

Zona	Área (ha)	Tasa de erosión o acreción (ha/año)
El Morro	De 484.86 a 500.26	Acreción de 0.55

Norte de la bahía: Salahondita e Isla del Gallo

Como se puede observar en la Figura 13, hacia el norte de la bocana de Salahondita, desde 1983 hasta el 2006, presentó erosión y por lo tanto transgresión de la línea de costa, mientras que hacia el Sur de la bocana y en los alrededores de Salahondita se presentó acreción dando lugar a la

formación de nuevas áreas y de la espiga. La zona más al sur de Salahondita, presentó acreción desde 1983 hasta 1993, seguido de erosión hasta el 2006. En la Isla del Gallo, se puede observar que se presentó un periodo de erosión desde 1962 hasta 1993, seguido de un periodo de fuerte acreción hasta el 2006. Esta isla pasó de ocupar 190.59 ha en 1962 a 2060.30 ha en 2006.

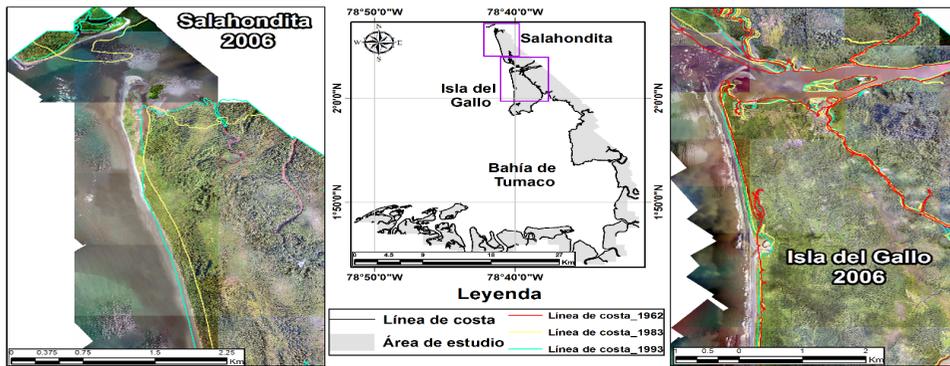


Figura 13. Evolución de la línea de costa en los sectores de Salahondita e Isla del Gallo al norte de la bahía de Tumaco, periodo 1962–2006.

La Tabla 7 muestra el total de los cambios en área de las zonas que más fueron afectadas en la Bahía de Tumaco por procesos de erosión y acreción en determinados periodos de tiempo

y la tasa de erosión o acreción promedio por año, asumiendo que estos cambios presentaban homogeneidad de un año a otro.

Tabla 7. Cuantificación de los cambios en las áreas más afectadas por procesos de erosión y acreción de la bahía.

Zona	Periodo	Área (ha)	Tasa erosión/acreción (ha/año)
Tumaco	De 1958 a 2013	De 101.57 a 174.81	Acreción de 1.33
La Viciosa	De 1958 a 2013	De 27.25 a 73.89	Acreción de 0.848
El Morro	De 1958 a 2013	De 496.61 a 501.79	Acreción de 0.0941
Bocagrande	De 1969 a 2006	De 91.45 a 193.86	Acreción de 2.77
Isla El Guano	De 1958 a 1969	De 68.46 a 59.92	Erosión de 0.78
Isla Vaquería	De 1969 a 2006	De 139.77 a 172.15	Acreción de 0.88
Isla del Gallo	De 1962 a 2006	De 1990.59 a 2060.30	Acreción de 1.58

El cálculo de pérdida o ganancia en el área de cada una de las islas que hacen parte de la bahía, demostró que la mayoría de estas durante el periodo 1958-2013, han experimentado un aumento de su área por la acreción de sedimentos, exceptuando la isla El Guano, que durante el periodo 1958-1969 se erosionó con una tasa promedio de 0.78 ha por año. La tasa de acreción de las demás islas varió de 0.0941 ha a 2.77 ha por año.

CONCLUSIONES

El análisis de las líneas de costa de diferentes años nos permitió conocer las áreas en las cuales han predominado procesos de erosión, acreción o han estado relativamente estables en el tiempo. En la bahía, la erosión se presenta principalmente hacia el norte en las zonas acantiladas y en las playas hacia el sur de Salahondita. La acreción es fuerte en el suroeste de la bahía en los sectores de Bocagrande, Isla Vaquería, La Viciosa, El Morro y demás zonas aledañas.

Los resultados mostraron que en las islas Tumaco, La Viciosa, El Morro, Bocagrande, El Guano, Vaquería e Isla del Gallo, se presentan tasas de acreción entre 0.55 y 2.77 ha/año, y de erosión entre 0.78 y 1.13 ha/año.

Según la literatura consultada, las condiciones oceanoatmosféricas y geológicas, promueven la erosión y sedimentación, dando lugar a la formación de diferentes morfologías litorales dentro de la Bahía de Tumaco. Por un lado, la ZCIT afecta el clima

en la zona, creando durante el primer semestre del año una época de lluvias, que aumenta el caudal del Río Mira y a su vez la cantidad de sedimentos en suspensión, que son transportados por la dirección del oleaje en sentido SW SSW hacia la bahía, promoviendo la depositación de sedimentos en el S y E de la misma. Por otro lado, el oleaje que llega en dirección SW hacia el N de la bahía con mayor energía, olas de hasta 3 m y el flujo y reflujos de la marea, promueven la erosión de rocas poco cohesivas que afloran en esta zona.

Las invasiones palafíticas de las áreas de bajamar adyacentes a la isla de Tumaco, incrementaron el área de la misma en un 72%, debido a que pasó de tener una extensión de 101.57 ha en 1958 a 174.81 ha en 2013, con una tasa de incremento anual de 1.33 ha/año.

REFERENCIAS

- Allen, R. (1972). A Glossary of Coastal Engineering Terms by Richard H. Allen (1972).pdf. In M. paper 2-72 (Ed.), Coastal Engineering Manual (p. 60).
- Barajas, S. F., & García, D. H. (2014). Variación decadal de batimetrías en el sector de la barra dentro del canal de tránsito marítimo de Tumaco y su relación con parámetros oceanográficos. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla."
- Bermúdez, C., Álvarez, C., & Niño, D. (2004). Caracterización de la geomorfología costera y sus coberturas vegetales asociadas, a través de sensores remotos, en la costa de Tumaco, Nariño. Boletín Científico CIOH, 32, 27-46.

- Bird, E. C. F. (1985). *Coastline Changes*. Nueva York: Wiley & Sons.
- Brocal, R., López, M., & Pardo, J. (2001). Cambios en la línea de costa mediante fotografía aérea e imágenes IRS-PAN en el litoral Valenciano: Sector Cullera-Tavernes (1956-1999). *Teledetección, Medio Ambiente Y Cambio Global*, 225-228.
- David, V. S., Colledge, B., & Beach, D. (2003). Multi-Temporal Change Detection Analysis of Beach Erosion Using Satellite Remote Sensing.
- Díaz, P., Fernández, M., Prieto, A., & Ojeda, J. (2012). La línea de costa como base para la generación de indicadores de estado y de seguimiento ambiental: modelo de datos y conceptos de líneas de costa en el litoral de Andalucía". In *Tecnologías de la Información Geográfica en el contexto del Cambio Global* (pp. 35-44).
- Etayo-Serna, F., Barrero, D., Lozano, H., Espinosa, A., Gonzales, H., Orrego, A., ... Sarmiento, L. (1983). *Mapa de Terrenos*.pdf.
- Gómez, J., & Peñaranda, J. (2012). Descripción del comportamiento de variables atmosféricas y oleaje en el puerto de Tumaco a partir de observación de datos. *Boletín Científico CIOH*, (30), 75-92.
- IDEAM. (2007). *Pronóstico Pleamares y Bajamares Costa Pacífica Colombiana*.
- Muñoz, R., Cossio, U., Salazar, G., & Rodríguez, G. (2003). *GEOMORFOLOGIA Y GEOLOGIA DE LA PLANCHA 407 - MANGLARES*.
- Navarrete, S. (2014). *Protocolo indicador. Variación línea de costa: perfiles de playa. Indicadores de monitoreo biológico del subsistema de áreas marinas protegidas(SAMP). Serie de publicaciones generales del Invermar. (Vol. 73)*.
- Ojeda Zújar, J., Díaz Cuevas, M. D. P., Prieto Campos, A., & Álvarez Francoso, J. I. (2013). Línea de costa y sistemas de información geográfica: modelo de datos para la caracterización y cálculo de indicadores en la costa andaluza. *Investigaciones Geográficas*, 60, 37-52. <https://doi.org/10.14198/INGEO2013.60.02>
- Ortiz, A., & Valencia, J. (2013). Geología de la Cuenca de Tumaco Norte: Revisión Previa de Información Petrolera Para Perforación de un Pozo Estratigráfico Profundo. *Boletín de Geología*, 35, 16.
- Padilla Garcia, K. J., & Vargas Hernandez, A. (2017). Análisis del comportamiento de la línea de costa y clasificación morfológica de la zona costera de Manzanillo del Mar en la ciudad de Cartagena de Indias.
- Posada, B. O., Henao, W., & Guzmán, G. (2009). Diagnóstico de la erosión y sedimentación en la zona costera del Pacífico colombiano. (C. Gonzales & J. Khatib, Eds.) (Ediprint L). Santa Marta, Colombia.
- Rangel-Buitrago, N. G., & Posada-Posada, B. O. (2013). Determinación de la vulnerabilidad y el riesgo costero mediante la aplicación de herramientas SIG y métodos multicriterio. *Intropica*, 8, 29-42.
- Restrepo. (2007). Aplicación de modelos hidrodinámicos para evaluar la dinámica del oleaje y el nivel del mar en el sistema deltaico del río mira (colombia): bases para la gestión costera, (14), 31-48.
- Restrepo, J. C., Otero, L., & López L, S. a. (2009). Clima De Oleaje En El Pacífico Sur De Colombia , Delta Del Río Mira : Comparaciones Estadísticas. *Ciencias de La Tierra*, 33(128), 357-375.
- Restrepo, J. D., & López, S. A. (2008). Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 25(1), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.09.002>
- Rondón Ramirez, G. A. (2011). Análisis de la variación temporal de la línea de costa y caracterización de la geomorfología litoral: Bahía de Paita, Perú 1946-2007. *Espacio y Desarrollo*.
- Tejada, C. E., Otero, L. J., Castro, L. A., Franco, F. A., Morales, A. D., Solano, J. E., & Fonseca, A. L. (2003). Aportes al entendimiento de la Bahía de Tumaco. *Entorno Oceanográfico, costero y de riesgos*.
- Zújar, J. (2000). Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 103-118. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1122902>.