

AUTORES

Roberto Denis Valle
 Miguel Cabrera Castellanos
 Arelis Núñez Labañino
 Jesús Triff Oquendo
 Leandro Peñalver Hernández

*Instituto de Geología y Paleontología,
 Servicio Geológico de Cuba.
 Calle Vía Blanca No. 1002. / Río
 Luyanó y Prolongación de Calzada
 de Güines, Reparto Los Ángeles. San
 Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.
denis@igp.minem.cu*

05.
 RECIBIDO: ABRIL, 2019

10.
 ACEPTADO: MAYO, 2019

CARACTERIZACIÓN GEÓLOGO-GEOMORFOLÓGICA DE LA ZONA COSTERA CUBANA Y VULNERABILIDAD ANTE EL ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR

E Se realizó la caracterización geólogo-geomorfológica de la zona costera cubana para establecer la Línea Base del estado geoambiental; identificar los factores y procesos actuantes; estudiar la evolución morfodinámica por tramos costeros y obtener variables para la determinación del Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC). Se ejecutaron: cartografía de los tipos de costa; análisis multitemporal de la línea de costa mediante fotografías aéreas e imágenes satelitales de distintas épocas; levantamiento en el terreno y procesamiento de la información requerida y cálculo del IVC a partir de seis variables (cuatro geólogos – geomorfológicas y dos meteorológicas). Las salidas gráficas fueron: mapa a escala 1: 25 000 de los tipos y subtipos de costa según Decreto Ley 212/2000 para la Gestión de la Zona Costera; representación cartográfica a escala 1: 25 000 del movimiento neto de la línea de costa con áreas erosionadas y acrecionadas en 28 ventanas o sectores, asociados a núcleos poblacionales u objetivos económicos; mapa de Resistencia a la Abrasión Marina de la Zona Costera a escala 1: 100 000 y cartografía del IVC a escala 1: 25 000 para 20 de los sectores. Las conclusiones resaltan el amplio predominio de la costa clasificada como baja de manglar; la prevalencia de la erosión sobre la acreción en la mayoría de los sectores analizados y la constitución por rocas y depósitos no resistentes a la abrasión marina de más de tres cuartas partes de las costas del archipiélago. Además, en algunas de las ventanas estudiadas, los valores obtenidos de IVC requieren atención.

RESUMEN

Palabras clave: Geología; Geomorfología; zona costera; ascenso del nivel medio del mar; vulnerabilidad costera.

Las zonas costeras, por su ubicación, características y la existencia en ellas de importantes asentamientos humanos, así como de recursos naturales necesarios en diversas actividades, son vitales para el desarrollo socioeconómico de cualquier nación; de lo cual se deriva la importancia de su estudio. A la vez y por esas mismas razones, unidas a las afectaciones derivadas del cambio climático, están sometidas a fuertes presiones que han originado a nivel mundial una situación de deterioro con tendencia al incremento en las próximas décadas. En correspondencia, han cobrado auge internacionalmente los estudios para evaluar la vulnerabilidad o susceptibilidad de dichas zonas para enfrentar, sobre todo, los efectos adversos del mencionado fenómeno que incluyen la variabilidad y los eventos extremos.

La zona costera cubana ha sido cubierta por varias investigaciones geológicas de carácter regional en el marco de los levantamientos geológicos a escala 1: 250 000 realizados en las décadas del 70 y 80 del pasado siglo, en todo el territorio nacional, por la entonces Academia de Ciencias de Cuba en colaboración con sus homólogos de los antiguos países socialistas; posteriormente, tuvieron lugar el Mapa de los Depósitos Cuaternarios del Archipiélago Cubano a escala 1: 250 000 (Peñalver et al., 2008); la monografía *Naturaleza geológica del territorio marino-costero de Cuba en el Cuaternario* (Cabrera y Batista, 2009) y el Mapa Geológico Digital de la República de Cuba a escala 1: 100 000 (IGP, 2016). En estas investigaciones, tanto la cartografía como el estudio de los depósitos y del corte estratigráfico tienen un carácter general, dado tanto por la escala de los trabajos como por las dificultades para el acceso al lugar.

En el Nuevo Atlas Nacional de Cuba aparece la regionalización geomorfológica

(Acevedo, 1989) y el mapa geomorfológico a escala 1:1 000 000 de Cuba (Portela et al., 1989), en los cuales se representan generalizaciones de los tipos de relieve y ejemplos aislados de las formas. Datos fisiográficos sobre esa zona litoral se encuentran en el *Derrotero de las costas de Cuba* (2004). No existe, por tanto, caracterización geólogo-geomorfológica, ni cartografía del área a escalas más detalladas, las cuales se destinaron a zonas más favorables para el hallazgo de minerales útiles. Una excepción la constituyen, los trabajos de caracterización geólogo-geomorfológica realizados en un conjunto de áreas protegidas marino-costeras ubicadas, principalmente, en la costa sur de la isla de Cuba (Cabrera et al., 2013).

Actualmente, la Agencia de Medio Ambiente (AMA) lidera la ejecución del Macroproyecto “Escenarios de Peligro y Vulnerabilidad de la Zona Costera Cubana, asociados al ascenso del nivel medio del mar para los años 2050 y 2100”, del cual se han realizado ya dos ciclos con participación en ambos del IGP.

Iturralde (2012, 2015) junto con la división en tramos de las costas de Cuba, adoptada por el Macroproyecto, propone tres tipos de los mismos (Figura 1), generalizados desde una óptica regional, que no se corresponde con el trabajo a escalas detalladas:

- Tramos costeros de substrato arenolimo-turboso, parcialmente inundados.
- Tramos costeros de substrato rocoso acantilados, sin terrazas marinas.
- Tramos costeros de substrato rocoso con terrazas marinas emergidas.

El mismo autor presenta un Mapa de Susceptibilidad Costera, ante las amenazas derivadas de la elevación progresiva del nivel del mar y eventos asociados, para las dos islas más importantes del archipiélago, sobre la

INTRODUCCIÓN

base de factores geólogo-geomorfológicos combinados con el grado de deterioro de los ecosistemas (Iturralde, 2015).

Durante el Ciclo I del Macroproyecto, el IGP ejecutó una investigación (Cabrera et al., 2012) cuyos resultados fundamentales fueron el Mapa Neotectónico del Archipiélago Cubano y la determinación de la tendencia de los movimientos tectónicos verticales recientes (MTVR) al ascenso diferenciado en bloques, pero sin poder establecer su amplitud, debido a que no fue posible aplicar la metodología de investigación prevista, consistente en mediciones reiteradas del desplazamiento vertical del terreno en los puntos de la Red Geodésica Nacional, al no responder dicha red a los requerimientos de la tarea; por lo que hubo que recurrir al método geólogo - geomorfológico.

El presente artículo se corresponde con las investigaciones realizadas por el IGP durante el II Ciclo (Denis et al., 2018), las cuales tuvieron como objetivo principal o general profundizar en la caracterización geológica y geomorfológica de la zona

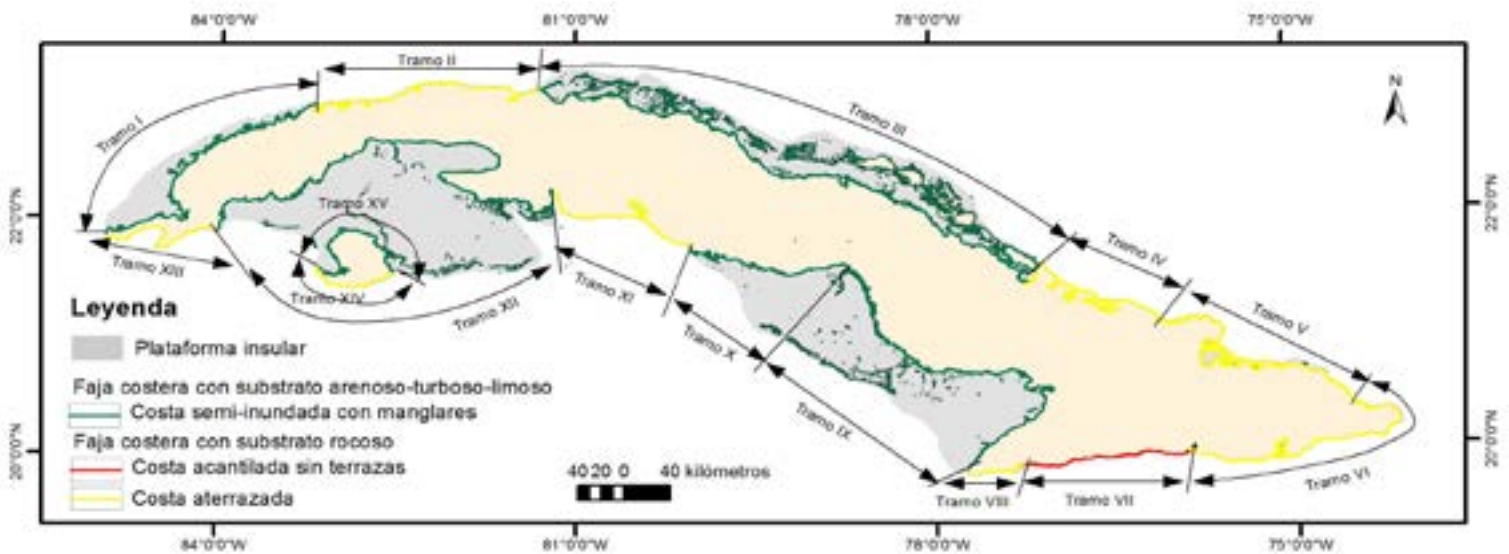
costera del archipiélago cubano como contribución a la conformación de escenarios de peligro y vulnerabilidad asociados a la elevación del nivel medio del mar (NMM).

Los objetivos específicos fueron:

- Establecimiento de la Línea Base del estado geoambiental de la zona costera para su utilización como referente en futuras investigaciones y monitoreos.
- Identificación de los factores y procesos actuantes (evolución morfodinámica por tramos costeros).
- Obtención de variables para la determinación del Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC) y la estimación del mismo.

La metodología empleada, así como los resultados obtenidos fueron expuestos y discutidos en talleres metodológicos, donde han participado especialistas de otras investigaciones incluidas en el Macroproyecto y han sido presentados en diferentes eventos internacionales dedicados a las ciencias geológicas, marinas y medioambientales.

INTRODUCCIÓN



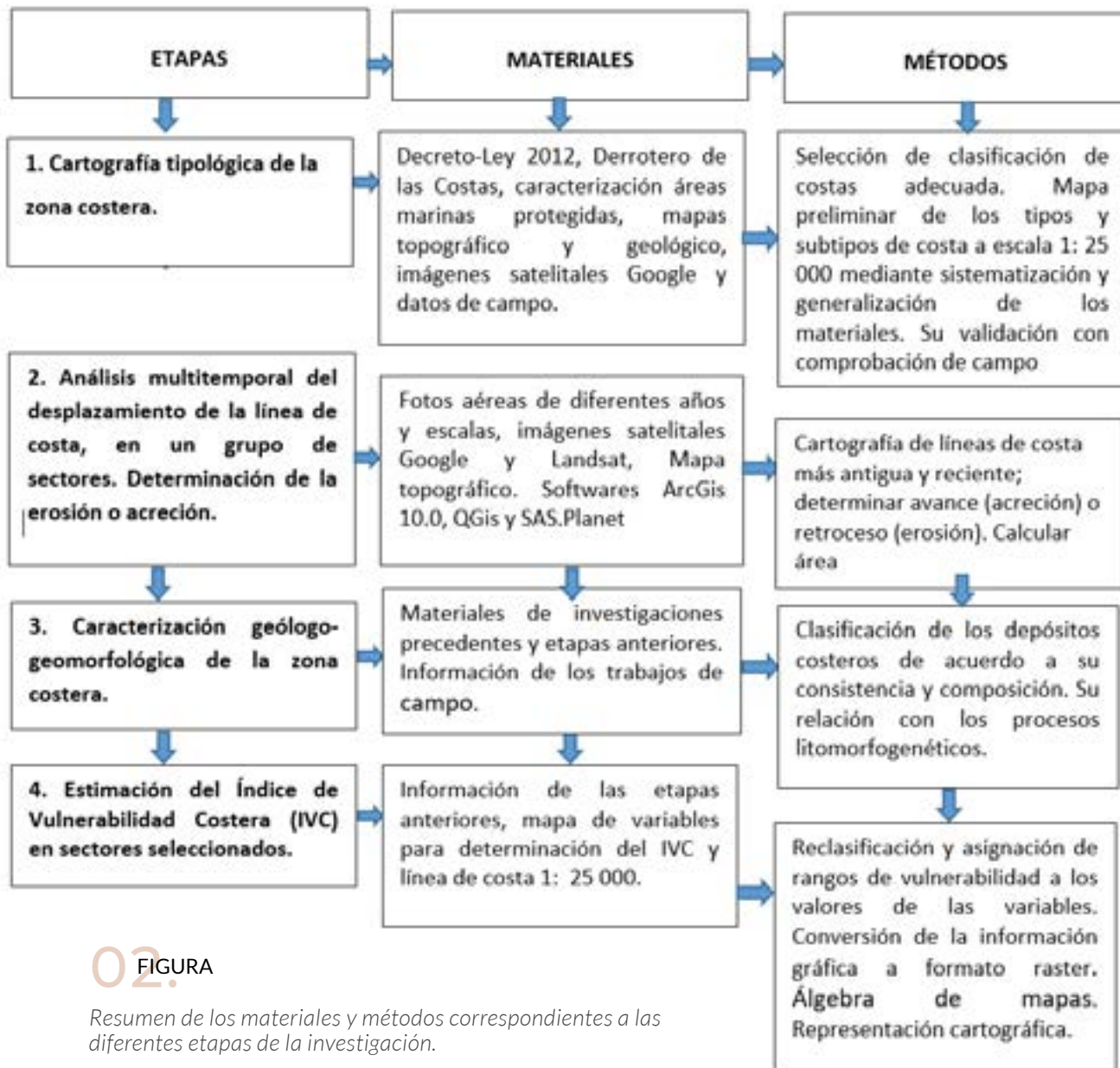
03. FIGURA

Tramos costeros del archipiélago cubano, según clasificación del Macroproyecto

En la Figura 2 se resumen los materiales y métodos empleados en las distintas etapas que conformaron la investigación.

Entre las diversas clasificaciones propuestas para las costas cubanas por autores nacionales y extranjeros, se adoptó la utilizada en el Decreto-Ley 212/2000 de Gestión de las Zonas Costeras por ser una clasificación actual, con un marco legal, relativamente sencilla, operativa y apropiada para la toma de decisiones; además puede ser correlacionada con cualquier otra

clasificación al corresponderse los tipos de costas con tipos de relieve y los subtipos estar determinados por la presencia de formas específicas del relieve (Tabla 1). Se incluyó una modificación al denominar “Antropizada” a la costa correspondiente a los sectores que, por causas naturales o artificiales, no es posible identificar dentro de los tipos anteriores, al estimar que dichas causas son, mayoritariamente, resultado de la actividad humana. Los puntos de contacto entre los diferentes tipos o subtipos fueron georreferenciados con GPS para su traslado al mapa.



02 FIGURA

Resumen de los materiales y métodos correspondientes a las diferentes etapas de la investigación.

Para el análisis multitemporal de la línea de costa se utilizaron, como registro histórico más antiguo, las fotografías aéreas del año 1956 a escala 1: 62 000 (Vuelo ASC); en su ausencia u otro, fueron sustituidas por fotografías aéreas de los años 1970-72 a escala 1: 37 000 (Vuelo K - 10); con menor antigüedad de la información de referencia, pero con mayor resolución espacial, en correspondencia con su escala. Las fotos que no se encontraban en formato digital fueron escaneadas y georreferenciadas.

Como registro más actual se tomó el mosaico de imágenes Google del año 2013, descargadas a través de la aplicación SAS. Planet, tomando como base de referencia las hojas topográficas a escala 1: 25 000 (GEOCUBA), a un zoom 18, lo que equivale a una resolución de 1,10 m/píxel.

Para los sectores Isla de la Juventud y archipiélago Sabana-Camagüey se tomó como registro más antiguo, las imágenes satelitales Landsat 5 de 1986 - 87 y como más reciente, Landsat 8 de 2015-2016.

El procesamiento digital de las imágenes obtenidas a partir de las fotos aéreas incluyó correcciones geométricas, determinación de las magnitudes de error, selección de los indicadores, visualmente discernibles, para determinar la posición de la línea de costa (Tabla 2) y por último la vectorización de la misma en cada imagen. En los tramos costeros ubicados en la Isla de la Juventud y el archipiélago Sabana - Camagüey se empleó la variante de digitalización automatizada en imágenes satelitales Landsat 5 de 1986 - 87 y Landsat 8 de 2015 - 16. Para ello se trabajó con las bandas 3 y 5 mediante la ecuación conocida como Índice de Agua Normalizado, NDWI por sus siglas en inglés (Infrarrojo cercano-Verde visible/ Infrarrojo Cercano+verde visible). El resultado se representó a escala 1: 100 000 en correspondencia con la menor resolución de las imágenes satelitales empleadas.

Para el registro de los datos de campo se utilizó un protocolo o guía para el levantamiento de toda la información acorde con los objetivos específicos

Tipo de costa	Subtipo
Terraza baja	Con camellón de tormenta
	En ausencia del camellón
	En ausencia del camellón y en presencia del acantilado en un segundo nivel de terraza
	En ausencia del camellón si el área colindante a la terraza baja es una laguna costera con manglar
Acantilada	
Baja de manglar	
Playa	Con dunas
	En ausencia de dunas
	En ausencia de dunas con acantilado.
	En ausencia de dunas si el área colindante a la berma, resultara ser una laguna costera con manglar.
Desembocadura de ríos	
Imposible de identificar dentro de los tipos descritos	

01. TABLA

Tipos y subtipos de costa según Decreto - Ley 212/2000

propuestos, la cual incluye los datos referentes a la identificación y ubicación del punto de observación de las personas que realizaron el trabajo de campo; fecha, hora; la numeración de las fotos realizadas; la descripción geológica y la geomorfológica (descripción general, tipos y subtipos de costa, tipos y formas del relieve, génesis, estado de conservación, procesos activos, evidencias de movimientos tectónicos, evidencias de desplazamientos de la línea costera) además de cualquier otra observación o elemento de interés no contemplado en los puntos anteriores.

Se tomaron alrededor de 300 puntos de observación en todo el territorio nacional. Fue empleada la fotografía digital, a modo de documentación gráfica, para complementar las descripciones textuales, certificar e ilustrar la clasificación de los tipos de costa, evidencias del desplazamiento del contacto tierra - mar, las características y el estado de conservación de las formas del relieve, a modo panorámico o resaltando determinados detalles.

En la mayoría de los sectores, se procedió al levantamiento de la línea de costa actual mediante georreferenciación con GPS. Este procedimiento se usó para validar la cartografía obtenida por identificación visual en las imágenes satelitales recientes.

Los parámetros a tener en cuenta para la caracterización fueron: el tipo de costa, la ocurrencia de erosión o acreción y la

resistencia a la abrasión marina sobre la base de la constitución litológica. Como parte de la caracterización también se describieron los procesos morfolitogénicos predominantes, es decir los principales procesos y factores (tectónicos, climáticos, quimiogénicos, fluviales, biogénico, antropogénicos y otros) que se manifiestan en los distintos tipos de costa y han jugado un papel determinado en su evolución morfodinámica.

Para la estimación del IVC se utilizó la fórmula $\sqrt{(a.b.c.d.e.f)}/6$ (Tabla 3, definición de las variables y sus rangos), la cual constituye una adaptación de la empleada por Gornitz (1990) para dicho cálculo y que ha sido ampliamente utilizada por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés)) (Gornitz 1990 y Gornitz et al. 1994, 1997; Shaw et al. 1998; Hammar-Klose y Thieler, 2001; Pendleton et al. 2005, 2010); también por el Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad de Buenos Aires (Kokot et al., 2004) y la Consejería de Medio Ambiente de Santa Lucía en colaboración con la Universidad de Sevilla (Méndez et al., 2011).

En la zona costera de la Isla de la Juventud se aplicó la fórmula $\sqrt{(a.b.c.d.f)}/5$ al no contar con la variable e-Cambio del NMM del mar (mm/año) ya que para esos tramos costeros no hay mediciones mareográficas de largo plazo disponibles para calcular la tasa lineal de ascenso (Iturralde y Serrano, 2015).

Tipos de costa	Indicadores para delimitar la línea de costa
Terraza baja	Límite exterior de la terraza
Costa acantilada	Pie de acantilado o el límite de afloramiento rocoso
Playa	Línea instantánea de agua
Costa baja de manglar	Límite externo de la copa del mangle que colinda con el mar.
Costa antropizada	Límite externo de infraestructuras que colindan con el mar

02. TABLA

Indicadores de posición de la línea de costa, utilizados

Variable	Rango del Índice de Vulnerabilidad Costera				
	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
	1	2	3	4	5
a- Tipos de costa	Acantilada	Terraza	Desembocadura de río	Playa y Baja de manglar	Playa con acantilado y Antropizada
b-Erosión /acreción de la línea de costa (m/año)	> (0,1]	0	(-0,1) a (-1)	(-1) a (-2)	<(-2)
c-Pendiente costera (° y %)	>5° (>8,75%)	3° a 5° (5,26 - 8,75%)	1° a 2,99° (1,75 - 5,25%)	0,5° a 0,99° (0,88 - 1,75%)	<0,5° (<0,88%)
d-Resistencia a la abrasión	Muy resistente (ígneas y metamórficas)	Resistente (carbonatado – síliceas, dolomíticas, recristalizadas)	Moderadamente resistente (efusivo – sedimentarias y carbonatadas)	Poco resistente (terricenas)	No resistente (sedimentos no litificados)
e-Cambio relativo del NMM (mm/año)	<1,8	1,8 - 2,5	2,5 - 3,0	3,0 - 3,4	>3,4
f-Oscilación extrema de la marea (cm)	<60	60 - 80	81 - 100	101 - 120	>120

03. TABLA

Variables utilizadas para la estimación del Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC) y rangos asignados a sus valores

MATERIALES Y MÉTODOS

- Los valores de la variable a fueron aportados por la cartografía de los tipos de costa (Etapa 1) y se tuvo en cuenta que el rango de vulnerabilidad Muy alto correspondiera con los tipos de costa que estén amenazados de desaparecer ante la elevación del NMM y no cuenten con espacio para retroceder en dirección hacia tierra, de forma gradual, en una adaptación a las nuevas condiciones.
- La variable b es el resultado del análisis multitemporal del desplazamiento de la línea costera. Mediante la herramienta Digital Shore Analysis System (DSAS), desarrollada por el USGS, se obtiene un conjunto de vectores que indican tanto la tasa de variación como su sentido, o sea, valores negativos indican erosión y los positivos, acreción. A partir de las tasas de cambio arrojadas, se clasificó cada segmento de costa de acuerdo a los rangos expuestos en la Tabla 3, que se expresan como: Muy bajo para cualquier valor de acreción (avance de la línea costera en dirección al mar), Bajo para las líneas de costa

estable y como Moderado, Alto y Muy alto, valores progresivos de erosión (retroceso en dirección a tierra).

- Para otorgar rangos a la variable c se reclasificaron los valores de pendiente, adecuando las clases a la zona costera, para lo cual se usó como referente el Glosario de Términos del Macroproyecto y el Mapa de Ángulos de las Pendientes del Nuevo Atlas de Cuba (Magaz, 1989).
- Los rangos de la variable d se determinaron, a partir del levantamiento de todas las unidades (formaciones geológicas) presentes en el área de contacto mar – tierra y la clasificación de las rocas que las componen, así como de los depósitos innominados, de acuerdo a su consistencia y composición, en cinco clases según el método ya explicado para la Etapa 3.
- La asignación de rangos a los distintos valores de la variable e se hizo tomando como referencia la metodología empleada por el USGS.

MATERIALES Y MÉTODOS



03 FIGURA

Fotomontaje que muestra el deslizamiento reportado en 2008 (D1) y que destruyera parcialmente un almacén perteneciente a la empresa de Campismo Popular.

• En el caso de la variable f, los valores de oscilación extrema de las mareas en el archipiélago cubano, medidos por la red de estaciones mareográficas (Díaz LLanes, 1989) se dividieron, por dispersión, en cinco clases y se les otorgó rangos de vulnerabilidad en sentido creciente.

El método adoptado para la estimación del IVC se centra en la evaluación solamente del componente de la Vulnerabilidad conceptualizado como “exposición del medio físico/abiótico”, que de conjunto con la Sensibilidad componen la Susceptibilidad e Impacto Potencial, es decir la llamada “Vulnerabilidad Bruta”; a la cual se suma la Capacidad de adaptación para determinar la “Vulnerabilidad Neta” (Figura 3).

Las salidas gráficas se obtuvieron mediante la combinación de los rangos asignados a los valores de las diversas variables. En cada una de las ventanas se utilizó una línea de costa patrón (1: 25 000 de GEOCUBA), la cual se rasterizó y se le asignó un tamaño de pixel de 25 m. Esta línea fue utilizada como máscara para extraer los valores de cada una de las variables. El cálculo se realiza con cada variable rasterizada con un campo de valores comprendidos entre 1 y 5. En el Spatyal Analyst tools de

ArcGis/Map Algebra/Raster Calculation se realizó el cálculo que derivó al Índice de Vulnerabilidad Costera, expresado en los cinco rangos ya mencionados, a cada uno de los cuales le corresponde un color: azul, verde, amarillo, naranja y rojo (de Muy bajo a Muy alto).

Los principales obtenidos están estrechamente ligados a los métodos aplicados en las diferentes etapas de investigación (Figura 2):

MAPA A ESCALA 1: 25 000 DE LOS TIPOS Y SUBTIPOS DE COSTA SEGÚN DECRETO LEY 212/2000

Se obtuvo como resultado de la Etapa 1 (Figuras 4, 5 y 6) en el mismo se aprecia que el tipo de costa predominante en la isla de Cuba es el de baja de manglar seguida, con mucha menor ocurrencia, por las costas de terraza baja y de playa, cada una con sus subtipos.

En el archipiélago Sabana-Camagüey existe un amplio predominio de la costa baja de manglar, principalmente en el litoral sur de los cayos. Lo mismo ocurre en el tramo costero XV (norte de Isla de la Juventud).

MATERIALES Y MÉTODOS

RESULTADOS Y DISCUSIÓN



05. FIGURA

Mapa y representación estadística de la ocurrencia de los tipos y subtipos de costa, según Decreto Ley 212/2000, en el archipiélago Sabana - Camagüey.

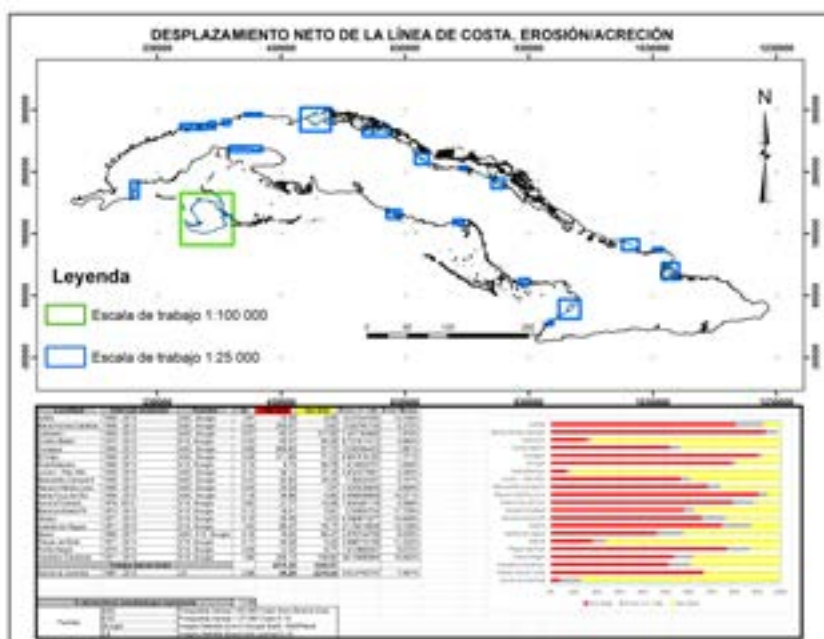
FIGURA 06.

Mapa y representación estadística de la ocurrencia de los tipos y subtipos de costa, según Decreto Ley 212/2000, en la Isla de La Juventud



07. FIGURA

Resumen de los resultados del análisis multi-temporal del desplazamiento de la línea de costa en 19 sectores de la Isla de Cuba y en la Isla de la Juventud



MAPA DE RESISTENCIA A LA ABRASIÓN DE LA ZONA COSTERA A ESCALA 1: 100 000

Constituye el primer resultado de la Etapa 3 (Figuras 8, 9 y 10). De acuerdo al mismo las rocas y depósitos expuestos directamente a la acción del mar clasifican como no resistentes a la abrasión marina en el 80,37% de la zona costera de la isla mayor del archipiélago cubano; aunque en los tramos II, V, VI, VII, VIII, XI y XIII existe presencia notable de rocas moderadamente resistentes. Las costas de la Isla de la Juventud y de los cayos del archipiélago Sabana - Camagüey contienen una proporción aún mayor de depósitos no resistentes a la abrasión marina (87,77% y 86,76%, respectivamente).

Este resultado, además de brindar la información geológica la estimación del IVC, también revela criterios cualitativos sobre la erosión /acreción de la línea de costa, en particular para el diagnóstico de su futuro avance o retroceso.

IDENTIFICACIÓN DE LOS PRINCIPALES FACTORES Y PROCESOS ACTUANTES

Constituye el segundo resultado de la Etapa 3. La zona costera, como toda la superficie del planeta, está sometida a una continua transformación bajo la acción de

múltiples procesos, que en el caso de Cuba son mayoritariamente de origen externo o exógeno (a excepción de los vinculados con los movimientos tectónicos de la corteza terrestre). Dichos procesos también pueden diferenciarse en dos grandes grupos de acciones opuestas, pero coexistentes que se complementan en el modelado de la zona costera.

- **Destructivos:** incluye la disgregación mecánica y/o disolución química de las rocas y el arrastre del material detrítico. Al conjunto de estos procesos se le denomina “denudación”, aunque su nombre varía en dependencia de los agentes que ejecutan el proceso, siendo “abrasión” el término más usado para la acción denudativa del mar.
- **Deposicionales (sedimentación):** consisten en la acumulación de los residuos transportados mecánicamente o en solución, además de los materiales originados por la acción o los restos de organismos vivos.

De manera más específica, los procesos mencionados se clasifican como litomorfogenéticos por su influencia en la constitución geológica, el modelado del relieve y el origen de la zona costera; están asociados a un conjunto de agentes:

- **Biogénicos.** Tienen su mayor expresión en el desarrollo del manglar que cumple con la función de: a) fijar las formas acumulativas sobre las que se desarrolla; b) servir de

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTADOS Y DISCUSIÓN



08 FIGURA

Mapa y representación estadística de la Resistencia a la Abrasión de la zona costera de la Isla de Cuba



05 FIGURA

Mapa, a escala 1: 100 000 y representación estadística de la Resistencia a la Abrasión Marina de la Zona Costera, de los tramos costeros XIV y XV (Isla de la Juventud)

FIGURA 10.
 Mapa, a escala 1: 100 000 y representación estadística de Resistencia a la Abrasión Marina de la Zona Costera de los cayos mayores del archipiélago Sabana - Camagüey (tramo costero III)



FIGURA 11.

Izquierda: camellón de tormenta en Brisas del Mar, al este de La Habana. Esta forma del relieve se origina por la acción acumulativa de los agentes hidrogénicos, pero la prevalencia posterior de la abrasión determina su destrucción; la cercanía a la línea de costa no se corresponde con la baja pendiente e indica el retroceso hacia tierra. Derecha: detalle del material de la base del camellón.



fuelle de aporte de materia orgánica (hojas, madera, raíces y su microbiota asociada y c) retener en el entretrejido de sus raíces las arenas transportados desde el mar por las olas, el viento y corrientes. Esto permite el crecimiento del manglar hacia el mar, cambiando la morfología de la línea de costa con gran rapidez, tanto en los cayos como en las tierras firmes emergidas. En estas últimas existen, además, hierbazales de macíos y cortaderas, que sirven de fuente de aporte de materia orgánica en descomposición y retienen los sedimentos transportados por las corrientes fluviales.

- Hidrogénicos. Están formados por: a) las olas, b) las corrientes y c) las mareas. a) las olas regularmente son débiles, cobrando fuerza solo durante los fuertes vientos, cuando se convierten en un agente abrasivo de la costa (Figura 11). b) las corrientes, por lo general son de tipo lateral, con carácter local, debidas al oleaje y transportan material biodetrítico (conchas, caracoles en distintos grados de conservación, corales, algas, etc.) y c) las mareas, en todo el archipiélago cubano son débiles, pero en los canales, donde las aguas se confinan producen corrientes de flujo (pleamar) y reflujo (bajamar). Durante el flujo alcanzan su mayor velocidad, por la influencia del oleaje, lo cual posibilita aumentar la carga de sedimentos a transportar hacia las costas de tierra firme y de los cayos.

- Fluviales. La erosión fluvial y laminar, principalmente; así como el desplazamiento gravitacional a ritmo muy lento, propician el traslado de grandes volúmenes de material de composición heterogénea, desde las partes más elevadas hacia la zona costera, donde es reelaborado por los agentes hidrogénicos.

- Climáticos. La génesis de gran parte de las formas del relieve de la zona costera, así como las rocas en ella presentes, está relacionada con transgresiones (elevación del NMM y avance hacia tierra de la línea de costa) y regresiones (descenso del NMM y retroceso de la línea de costa) marinas, ocurridas durante el Cuaternario y provocadas, principalmente, por condiciones paleoclimáticas como aumento o descenso de las temperaturas, crecimiento o reducción de casquetes polares y glaciares. El trazado de la línea de costa actual es resultado de la última transgresión marina que comenzó hace 11000 años y aún continúa (transgresión holocénica). En la actualidad el clima continúa relacionándose con la génesis y evolución de los depósitos y las formas del relieve, debido a que: a) el mismo es favorable para la existencia de flora y fauna productora de sedimentos y protectora del relieve; b) las variaciones climáticas producen cambios en la dinámica de los sedimentos y el desarrollo de las formas del relieve. Por ejemplo, durante el paso de sistemas frontales o fenómenos de carácter tropical, como tormentas y huracanes, en

la zona costera aumenta la intensidad del oleaje y por consiguiente la abrasión en los sectores costeros, con afectación del manglar como barrera protectora; también ocurre la penetración del mar, con el consiguiente arrastre de sedimentos hacia tierra, o un aumento considerable del volumen del material arrastrado por las corrientes fluviales, cuando se producen abundantes precipitaciones atmosféricas. La relevancia de estos procesos debe aumentar en la presente centuria si, como consecuencia del Cambio Climático, ocurre el ascenso pronosticado del NMM, lo cual transformaría drásticamente la geografía de esta área, al quedar parte de su territorio cubierta de agua.

- Eólicos: La acción de los vientos tiene relación directa con el aumento de la magnitud del oleaje y las corrientes, bajo estos efectos se transportan los sedimentos hasta acumularse en la costa, donde son sometidos a fuertes cambios morfológicos, por las variaciones climáticas. Existe una forma del relieve (las dunas) que son originadas directamente por este tipo de agentes y procesos.
- Quimiogénicos. Tienen su expresión en la disolución de las rocas carbonatadas, con la consiguiente formación del relieve cársico y en la litificación de los sedimentos hasta constituirse en rocas. En el caso de las rocas de playa, esta transformación ocurre de forma acelerada, debido a que se forman en la zona intermareal, donde abundan los carbonatos y el nivel de las aguas marinas fluctúa, facilitando su desecación periódica, con la consiguiente recristalización en los vacíos interclastos.
- Tectónicos. Influyen en la morfología del litoral, específicamente en la definición del límite entre el terreno emergido y el mar, en la naturaleza del paso o transición entre ambos. Los de ascenso han tenido un papel fundamental en la génesis de las costas levantadas y de las terrazas marinas emergidas. Los movimientos tectónicos verticales recientes (MTVR) pueden, en dependencia de su sentido, mitigar o acentuar

los efectos de la elevación del NMM.

- Antropogénicos. Las intervenciones humanas en el medio natural pueden ocasionar notables transformaciones de las características geológico - geomorfológicas: afectaciones o destrucción de formas del relieve; interrupción o aceleración de procesos.

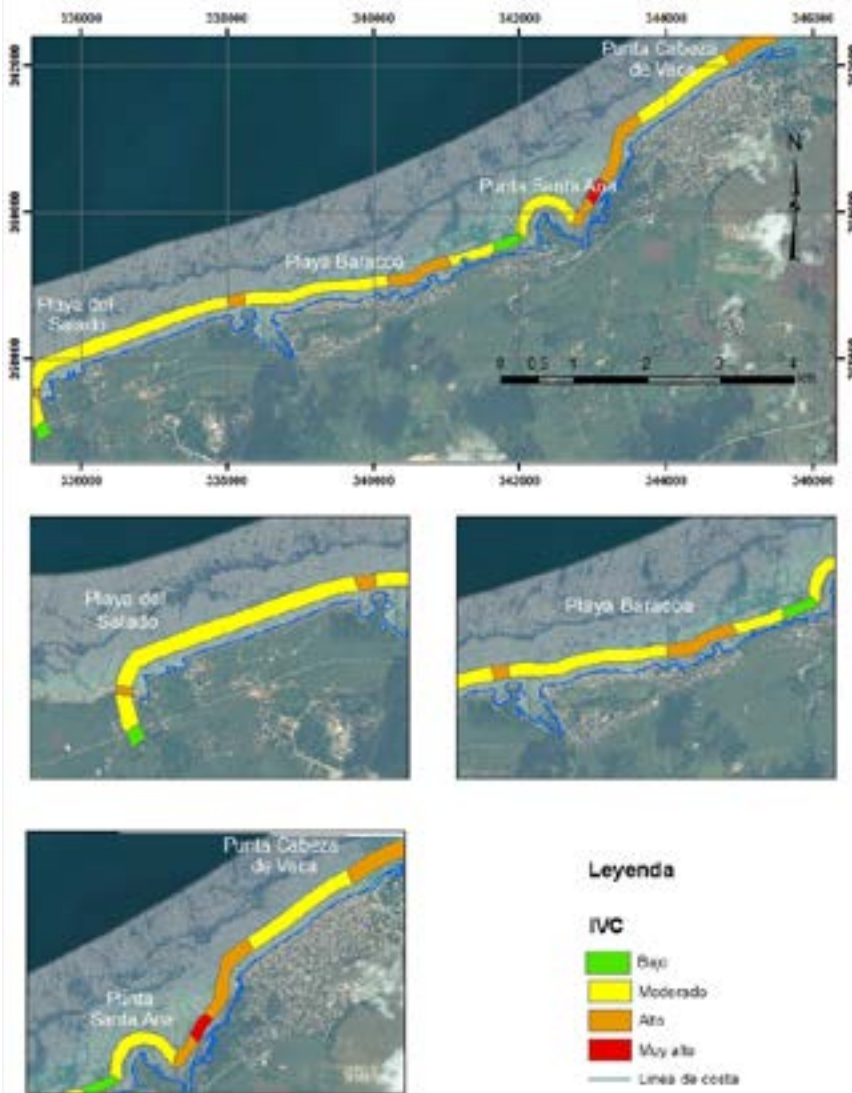
Este resultado contribuye a establecer la Línea Base del estado geoambiental del área estudiada, como punto de partida para el monitoreo a los procesos de transformación costera ante el ascenso del NMM, acelerado por el Cambio Climático.

ESTIMACIÓN Y CARTOGRAFÍA DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD COSTERA (IVC) A ESCALA 1: 25 000

Se obtuvo como resultado de la Etapa 4 y se realizó en 20 sectores asociados a núcleos poblacionales u objetivos económicos. En algunas de estas “ventanas” estudiadas se obtuvieron valores de IVC, que requieren atención. Un de ellas posee intervalos con clasificación de Muy Alto (Figura 12): playa Baracoa (Moderado= 54,75%, Alto= 36,83%, Muy Alto= 2,05%). Otras poseen valores notables para las clases Alto y Moderado: Isabela de Sagua (Alto=51,86% y Moderado=48,14%); Varadero (Alto= 42,48% y Moderado=50,81%); Playa Cunagua (Alto 38,83% y Moderado 32,65%) y Playas del Este - Rincón de Guanabo (Alto= 22,54%) y Moderado= 48,75%).

Este resultado contribuye al estimado de los futuros escenarios relacionados con el ascenso del NMM y por ende al ordenamiento territorial, a la protección y manejo integrado de los recursos naturales y a la toma de decisiones, en cuanto a usos del terreno, ante dicho fenómeno y ante los eventos meteorológicos extremos.

INDICE DE SUSCEPTIBILIDAD COSTERA SECTOR BARACOA-SANTA FE



08. FIGURA

Mapa de Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC) para la ventana Baracoa – Santa Fe del tramo costero II

CONCLUSIONES

1 El tipo de costa predominante en todo el archipiélago cubano es el de baja de manglar seguida, con mucha menor ocurrencia, por las costas de terraza baja y de playa, cada una con sus subtipos.

2. En la amplia mayoría de los sectores de la isla de Cuba y cayos mayores del archipiélago Sabana - Camagüey, sometidos al análisis multitemporal del desplazamiento de la línea de costa, los resultados indicaron la prevalencia del retroceso de la costa hacia tierra. En el análisis para el sector Isla de la Juventud, realizado a una escala menos detallada, se obtuvo un amplio predominio del avance de la costa hacia el mar.

3. A pesar de la evidente relación, en algunos sectores, de la intervención antrópica con el balance erosión/ acreción, en sentido general no se pudo deducir un factor o una condición determinante en el comportamiento de los procesos; tampoco se apreciaron regularidades que permitan establecer una zonalidad por lo que es necesario analizar cada área casuísticamente y valorar las particularidades locales.

4. La zona costera cubana está constituida mayoritariamente por rocas y depósitos no resistentes a la abrasión; aunque en los tramos II, V, VI, VII, VIII, XI y XIII existe presencia notable de rocas moderadamente resistentes.

CONCLUSIONES

5. En algunas de las ventanas estudiadas se obtuvieron valores de Índice de Vulnerabilidad Costera que requieren atención debido a la presencia de sectores con clasificación de Muy Alto (playa Baracoa) y en otros casos valores notables para las clases Alto y Moderado (Isabela de Sagua, Varadero, Playa Cunagua y Playas del Este – Rincón de Guanabo).

6. La metodología empleada, aunque perfeccionable, posibilitó el cumplimiento de los objetivos previstos.

7. Los resultados de la presente investigación, además de contribuir al estimado de futuros escenarios asociados al ascenso del NMM, contribuyen al ordenamiento territorial, a la protección y manejo integrado de recursos y a la toma de decisiones en esas cuestiones.

RECOMENDACIONES

- Realizar estimaciones de tendencia en el análisis multitemporal del desplazamiento de la línea de costa.
- Trabajar en el estudio de las particularidades locales que inciden en el balance entre los procesos erosivos y acumulativos, que determinan el avance o retroceso de la línea de costa.
- Realizar estimaciones de IVC empleando otras variables como las anomalías estacionales del NMM y en los sectores que sea posible, la amplitud de los movimientos tectónicos verticales recientes, obtenidos por distintos métodos. Comparar los resultados obtenidos mediante estimaciones con diferentes variables.
- Comenzar la implementación de la información geomorfológica y geológica en la modelación de la penetración del mar.

REFERENCIAS

- Cabrera, M. y Batista, R. (2009): *Naturaleza geológica del territorio marino-costero de Cuba en el Cuaternario*. La Habana: Editorial CNDIG., Inst. Geol. Paleont., CD-ROM, ISBN: 978-959-7117-17-9.
- , M., Orbera, L., Núñez, A., Pantaleón, G., Núñez, K., Triff, J., et al. (2012): *Neotectónica y Ascenso del Nivel Medio del Mar*. La Habana: Editorial CNDIG y Publicimex. CD-ROM, ISBN 978-959-711732-2.
- , Denis, R., Peñalver, L., Triff, J., Núñez, A., Martín, D., et al. (2013): *Caracterización Geológica – Geomorfológica de las costas y archipiélagos comprendidos entre Guanahacabibes y la provincia Granma*. Archivo del Instituto de Geología y Paleontología, La Habana, Cuba.
- Colectivo de Autores (2015): *Glosario de Términos del Macroproyecto “Escenarios de Peligro y Vulnerabilidad de la Zona Costera Cubana, asociados al ascenso del nivel medio del mar para los años 2050 y 2100”* La Habana: Editorial Academia Agencia de Medio Ambiente, CITMA, 54 p.
- Denis, R., Cabrera, M., Núñez, A., Triff, J., Peñalver, L., Rodríguez, R., et al. (2018): *Geología y Geomorfología Marino-Costeras del Archipiélago Cubano y su Vinculación con los Movimientos Tectónicos Recientes*. Archivo del Instituto de Geología y Paleontología, La Habana, Cuba.
- Díaz LLanes, G. (1989): *Mapa de amplitud y carácter de la marea. Escala 1: 2 000 000*. Nuevo Atlas Nacional de Cuba. La Habana. Cuba.
- Instituto de Geología y Paleontología (2016): *Mapa Geológico de Cuba a escala 1: 100 000*, La Habana, Cuba.
- Iturralde, M. y Serrano H. (Editores Científicos, 2015): *Peligros y vulnerabilidades de la zona marino – costera de Cuba: estado actual y perspectivas ante el Cambio Climático hasta el 2100*. La Habana: Editorial Academia Agencia de Medio Ambiente, CITMA, 72 p.
- Kokot R., Codignotto J.O. y Elissondo M. (2004): *Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en la costa de la provincia de Río Negro*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 59 (3): 477-487.
- Magaz, A. R. (1989): *Mapa de ángulos de las pendientes. Escala 1: 1 000 000*. Nuevo Atlas Nacional de Cuba. La Habana. Cuba.
- Méndez M., Ceacero C. J., Ordoñez P., Guerrero J. J., Ojeda J., Álvarez J. I., et al., (2011): *Análisis preliminar de la vulnerabilidad de la costa de Andalucía a la potencial subida del nivel del mar asociado al Cambio Climático*. Consejería de Medio Ambiente de Santa Lucía en colaboración con la Universidad de Sevilla.