



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

COBERTURA DE SUELO DE LA CAYERÍA NORTE DE CIEGO DE ÁVILA, CUBA.

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

YUDISLEYVIS VENTURA DÍAZ

DIRECTORA DE TESIS

DRA. OLIVIA SALMERÓN GARCÍA

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, ABRIL, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

A mi hijita que llegó en este momento profesional y me ha hecho más fuerte, me ha dado un nuevo motivo para seguir superándome. Tu afecto y tu cariño son los detonantes de mi felicidad, de mi esfuerzo, de mis ganas de buscar lo mejor para ti. A tu corta edad, me has enseñado y me sigues enseñando muchas cosas de esta vida.

Te agradezco por ayudarme a encontrar el lado dulce de la vida. Fuiste mi motivación más grande para concluir con éxito esta investigación.

Gracias. *María Fernanda.*

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México por apoyarme con una beca durante estos 2 años.

Al Instituto de Geografía y sus profesores e investigadores que formaron parte de mi formación como Maestra en Geografía, Misión Geomática.

Al Centro Mexicano de Innovación en Energía Océano (CEMIE-O), Instituto de Ingeniería, por su apoyo que incluyó una beca de Maestría/Obtención del grado por 6 meses.

A mi directora de tesis Olivia Salmerón García por apoyarme, enseñarme y dirigirme la investigación.

A mis amigos de la Maestría y a mi Familia por tener paciencia y brindarme todo su apoyo sobre todo en el último año de la maestría.

Resumen

Esta tesis está centrada en el análisis de las variaciones espaciales y temporales de las coberturas existentes en los cayos del norte del municipio Morón, Ciego de Ávila, Cuba; y en su influencia sobre la exposición costera ante inundaciones por penetración del mar. A partir de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ correspondientes a los años 2008, 2010, 2012 y 2015, se realizó un proceso de clasificación mediante el empleo del software ERDAS para identificar las coberturas existentes, tanto en la parte terrestre como marinas; así como las variaciones que estas experimentaron entre los años analizados.

Las coberturas identificadas fueron obtenidas mediante un proceso de clasificación supervisada, con la combinación de las bandas 4-2-3 para la zona marina y 5-3-1 para zona de tierra firme. Los cambios de las coberturas entre un año y otro fueron determinados a partir del empleo de la herramienta “detección de cambio” (“change detection”) del ERDAS, mientras que la influencia de dichos cambios en la exposición costera fue calculada a partir de los rangos establecidos para los hábitats naturales en el índice de exposición costera del modelo InVEST, consistente en una herramienta que permite el cálculo de la exposición costera ante surgencia de tormenta a partir de la combinación de siete variables bio-geofísicas.

Con las clasificaciones de las imágenes se identificaron 10 coberturas: Bosque de mangle, Bosque semidecídúo, Bosque siempre verde micrófilo, Comunidades halófitas, Fondo arenoso, Fondo arenoso con escasa vegetación, Fondo con pasto, Fondo con pasto menos denso, Infraestructura y Vegetación secundaria, con un predominio de Fondo con pasto en la parte marina y Bosque semidecídúo en la parte terrestre. La cobertura que más área ganó entre los años 2008 y 2015 fue

Fondo arenoso, con 7,075 ha.; mientras que la que más perdió fue Fondo con pasto, con 7,176 ha. Las características del área de estudio, incluyendo las coberturas identificadas, provocan que el área predominen valores del índice de exposición costera de Moderados a Altos.

Con relación a los cambios de coberturas, las coberturas marinas (Fondo arenoso, Fondo arenoso con escasa vegetación, Fondo con pasto y Fondo con pasto menos denso) fueron las que más cambios experimentaron, resultando las más dinámicas en el período de tiempo analizado. Los cambios de cobertura entre el año 2008 y el 2015 de forma general, provocaron un incremento en el índice de exposición costera de la zona, evidenciando que los ecosistemas han disminuido su función de protección en los cayos del norte del municipio Morón.

Se recomienda, para futuras investigaciones, analizar la influencia de los fenómenos meteorológicos y el desarrollo turístico sobre los cambios de coberturas; así como calcular los valores de la exposición costera mediante la inclusión de valores más precisos de los demás indicadores que se tienen en cuenta en el cálculo del índice de exposición costera de InVEST.

Abstract

This thesis focuses on spatial and temporal variations analysis of land coverage present in northern keys of Moron municipalities, located at Ciego de Avila province, in Cuba. Additionally, the influence of those variations over coastal exposure to coastal flooding are also archived. From Landsat 7 ETM+ images of 2008, 2010, 2012, and 2015, supervised classification was carried out to identify land coverage for marine and terrestrial zones and their spatial and temporal variations.

Covers identified were obtained by a supervised classification process with band combination 4-2-3 to marine zone and 5-3-1 to terrestrial zone. Changes of covers between one year and another were determined using “change detection” tool from ERDAS software. Coastal exposure index from InVEST model allowed calculating the influence of cover changes on coastal exposure to hurricane and coastal flooding. We selected InVEST model because it includes all ecosystems and covers that we can find in coastal zone. Hence, this model proposes a ranking for coastal exposure to each cover or habitat existing on coastal zone.

Image classification allows to identify ten covers: 1) Mangrove forest, 2) Semideciduous forest, 3) Green small-leaves forest, 4) Halophytes communities, 5) Sandy bottom, 6) Sandy bottom with scarce vegetation, 7) Seagrass, 8) Low dense seagrass, 9) Infrastructure and 10) Secondary vegetation. Seagrass was the predominant marine cover while Semideciduous forest was the predominant terrestrial cover. Sandy bottom was the cover who won more area, while Seagrass was the cover who lost more area. Coastal exposure index has range from Moderate to Height.

About cover changes, marine covers experienced a more changes than terrestrial covers, resulting the most dynamic covers from 2008 to 2015. Cover changes between 2008 and 2015 provokes an increment of coastal exposure, showing that ecosystems has decreased their protective function. There is correspondence between spatial and temporal changes of covers and its influence on coastal exposure index behavior.

We recommend analyzing the influence of meteorological phenomena and tourism development over cover changes, as well as compute coastal exposure by inclusion of more accurate values of the others indexes taken into account in InVEST coastal exposure index.

Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
IMPORTANCIA DEL TEMA.....	5
OBJETIVOS.....	7
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES Y CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	8
1.2 ESTUDIOS REFERENTES AL TEMA.....	8
1.3 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	16
1.3.1- Geología.....	17
1.3.2- Geomorfología.....	18
1.3.3- Vegetación.....	21
1.3.4 Hidrogeología.....	24
1.3.5 Clima.....	24
1.3.6 Dinámica costera.....	25
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	27
2.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA INVESTIGACIÓN	27
2.1.1 Surgencia de tormenta.....	27
2.1.2 Índice de exposición costera	28
2.1.3 Percepción remota.....	29
2.1.4 Imagen de Satélite.....	30
2.1.5 Cobertura vegetal.....	31
2.2 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.....	32
2.3 MODELO INVEST. ÍNDICE DE EXPOSICIÓN COSTERA (IEC).....	35
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	39
3.1- METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAS IMÁGENES	39
3.2 – ÍNDICE DE EXPOSICIÓN COSTERA DEL MODELO INVEST	45

CAPÍTULO 4: RESULTADOS	50
4.1. CAMBIOS DE LA COBERTURA VEGETAL DEL ÁREA DE ESTUDIO PARA EL PERIODO 2008 AL 2015	50
4.2 VARIACIONES DE LAS COBERTURAS VEGETALES EN EL ÁREA DE ESTUDIO Y SU EFECTO SOBRE EL ÍNDICE DE EXPOSICIÓN COSTERA.....	58
CONCLUSIONES	82
RECOMENDACIONES.....	84
REFERENCIAS	85

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de Ubicación de la cayería norte de Morón, Ciego de Ávila. Cuba (Área de estudio).....	16
Figura 2. Niveles de reflectancia, referidos a la unidad (1), para los diferentes tipos de vegetación a distintas longitudes de onda. Fuente: Hernández (2011, p. 9).	32
Figura 3. Firmas espectrales de diferentes coberturas. Fuente: Castro (1999. p. 22)	35
Figura 4. Combinaciones de bandas empleadas para zona de mar 4-1-3	41
Figura 5. Combinaciones de bandas empleadas para zona de tierra firme 5-3-1	41
Figura 6. Distribución anual de las coberturas identificadas en el área de estudio, en valores porcentuales respecto al área total. (B. de mangle: Bosque de mangle; B. s. v. micrófilo: Bosque siempre verde micrófilo; B. semidecídúo: Bosque semidecídúo; Fondo a. e. veg.: Fondo arenoso con escasa vegetación).....	52
Figura 7. Coberturas identificadas en el año 2008.....	53
Figura 8. Coberturas identificadas en el año 2010.....	54
Figura 9. Coberturas identificadas en el año 2012.....	55
Figura 10. Coberturas identificadas en el año 2015.....	56
Figura 11. Distribución espacial del índice de exposición costera para el año 2008.....	61
Figura 12. Distribución espacial del índice de exposición costera para el año 2010.....	62
Figura 13. Distribución espacial del índice de exposición costera para el año 2012.....	63
Figura 14. Distribución espacial del índice de exposición costera para el año 2015.....	64
Figura 15. Cambios de cobertura ocurridos entre los años 2008 y 2010.....	67
Figura 16. Variaciones del índice de exposición costera entre los años 2008 y 2010 como resultado de los cambios en los tipos de coberturas identificadas en estos años.....	69

Figura 17. Distribución porcentual de las áreas de las coberturas que cambiaron entre los años 2008 y 2010. (B. de mangle: Bosque de mangle; F. pasto: Fondo con pasto; F. arenoso: Fondo arenoso; F. p. m. denso: Fondo con pasto menos denso; F. a. e. veg.: Fondo arenoso con escasa vegetación).....	70
Figura 18. Cambios de cobertura ocurridos entre los años 2010-2012.....	71
Figura 19. Variaciones del índice de exposición costera entre los años 2010 y 2012 como resultado de los cambios en los tipos de coberturas identificadas en estos años.....	74
Figura 20. Distribución porcentual de las áreas de las variaciones de coberturas identificadas entre los años 2010 y 2012. (B. de mangle: Bosque de mangle; F. pasto: Fondo con pasto; F. arenoso: Fondo arenoso; F. p. m. denso: Fondo con pasto menos denso; F. a. e. veg.: Fondo arenoso con escasa vegetación).....	75
Figura 21. Cambios de cobertura ocurridos entre los años 2012-2015.....	76
Figura 22. Variaciones del índice de exposición costera entre los años 2012 y 2015 como resultado de los cambios en los tipos de coberturas identificadas en estos años.....	78
Figura 23. Distribución porcentual de las áreas de las variaciones de coberturas identificadas entre los años 2012 y 2015.....	79

Índice de tablas

Tabla 1. Fenómenos meteorológicos que han afectado el área de estudio y que fueron tenidos en cuenta para obtener las imágenes satelitales empleadas.	39
Tabla 2. Resoluciones de las bandas de los sensores del satélite Landsat 7 ETM+.	40
Tabla 3. Aplicaciones de las bandas de los sensores del satélite Landsat 7 ETM+.	42
Tabla 4. Listado de variables bio-geofísicas y sistema de rangos para la exposición costera.	46
Tabla 5. Rango del índice de exposición identificado para el área de estudio. (Modificado de Sharp et al., 2015)	48
Tabla 6. Listado de las coberturas y sus áreas para los años 2008, 2010, 2012 y 2015.	51
Tabla 7. Cambio de áreas para cada cobertura identificada entre los años analizados.	57
Tabla 8. Extensión superficial de los rangos correspondientes a cada variable para los años analizados.	59
Tabla 9. Área y por ciento de los rangos del índice de exposición costera para cada año analizado.	60
Tabla 10. Cambios de cobertura ocurridos entre los años 2008 y 2010.	66
Tabla 11. Cambios de cobertura ocurridos entre los años 2010 y 2012.	72
Tabla 12. Cambios de cobertura ocurridos entre los años 2012 y 2015.	77

Introducción

Los procesos relacionados con el cambio de uso de suelo y pérdida de cobertura vegetal han atraído la atención de un amplio grupo de investigadores en las últimas décadas, desde los dedicados a la modelación de patrones espacio-temporales de la conversión de uso de suelo, hasta aquellos interesados en la comprensión de las causas y consecuencias de estos cambios (Osuna, *et al.*, 2015. Pp 352).

Durante este proceso de cambio, es común que ocurran una serie de fenómenos naturales, tales como huracanes, que afecten de manera importante en la pérdida de cobertura vegetal. Sin embargo, en el último siglo y particularmente durante las últimas décadas, han sido las actividades humanas las que han desencadenado en mayor grado estos efectos, como consecuencia de factores demográficos y económicos (Osuna, A. *et al.*, 2015. pp. 352).

Durante muchos años la cobertura vegetal de los cayos del norte del municipio Morón, provincia de Ciego de Ávila, permanecía en estado más natural, sometida a muy baja presión humana, generalmente se usaban los bosques de manglares para fabricar carbón y se practicaba la pesca de subsistencia. Tampoco vivían muchas personas en los cayos del archipiélago. Las afectaciones mayores a la vegetación eran producidas por acciones de los fenómenos meteorológicos.

A principios de los años 90, Cuba hace un giro en su actividad económica principal y comienza a realizar la actividad de los servicios con el desarrollo del turismo, en la modalidad de sol y playa. El área que se emplearía para esta actividad se centró en la parte norte del país,

principalmente en los cayos de la zona norte entre los que se encuentran los del área de estudio. Es aquí cuando comienza a desarrollarse la actividad turística en el área, actividad que cada vez ocupa mayor extensión.

Las comunidades costeras necesitan entender mejor cómo las modificaciones del medio ambiente físico y biológico (i. e. remoción directa o indirecta de hábitats naturales para desarrollo costero) pueden afectar su exposición a erosión e inundaciones provocadas por tormentas. (Sharp *et al.*, 2015)

Los cambios en la cobertura vegetal de la cayería norte del municipio de Morón no han sido estudiados, y a nivel de país existe muy poca información al respecto. En el área de estudio las investigaciones se han centrado en la caracterización y descripción biológica de los ecosistemas terrestres y marinos y muy poco en el papel de la vegetación y de los ecosistemas marinos-costeros y en su evolución espacio temporal. Igualmente, los cambios producidos en la extensión, así como en las características de los ecosistemas costeros y sus efectos sobre el índice de exposición ante fenómenos meteorológicos han sido poco estudiados.

En el área de estudio se han realizado trabajos para conocer el estado de los ecosistemas marino-costeros, como resultados del Proyecto Sabana-Camagüey (Agencia de Medio Ambiente y GEOCUBA), estos se extendieron desde el año 1994 al 1997. Principalmente se realizó una caracterización de la flora marina y la flora terrestre, se dieron medidas para su protección y se estableció un sistema de monitoreo.

También se han desarrollado otras investigaciones en la cayería norte, relacionadas con la extensión de los ecosistemas y las afectaciones que presentan, sin analizar las posibles causas de las afectaciones (González y de La Paz, 1994; Colectivo de autores, 1994; y González de Zayas et al., 2000).

A pesar de que existen trabajos en los que se puede conocer la cobertura vegetal existente, sus características y en algunos casos afectaciones que han presentado, sigue siendo reducido el número de estos, además de no tener un análisis de la evolución espacio-temporal de los mismos, como se muestran en los estudios realizado por Estrada, R. *et al.*, (2013) y los desarrollados por el proyecto “Sabana-Camagüey”, de colaboración científica entre Cuba y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2010). Tampoco existen investigaciones sobre los efectos de las variaciones de los ecosistemas en la evolución de la exposición costera del área de estudio ante fenómenos meteorológicos.

Sin embargo, en otros países de América latina y el Caribe, como Bahamas, Belice, Costa Rica y Haití (Barton et al., 2009; G. M. Verutes et al., 2017; Wyatt, 2017); se han desarrollado investigaciones que analizan la influencia de los ecosistemas, y otras variables bio-geofísicas, sobre la exposición costera ante surgencias de tormenta y la erosión. Dichas investigaciones se han desarrollado empleando, entre otras herramientas, el modelo InVEST, que constituye una herramienta automatizada que permite el cálculo, entre otros, de la exposición costera mediante la combinación de rangos de exposición costera asignados a las variables geomorfología, relieve, hábitats naturales, cambios del nivel del mar, exposición al viento, exposición a las olas y potencial de surgencia (Sharp et al., 2015).

Precisamente, en la evolución espacio-temporal de los ecosistemas marino-costeros existentes en el área de estudio se centra esta investigación, cuyo objetivo es analizar la distribución espacial de los ecosistemas marinos y costeros, su evolución de entre los años 2008 y 2015, y el efecto de las variaciones en el comportamiento del índice de exposición costera del área de estudio. Igualmente, Obtener los porcentajes de cambio en cada una de las formaciones vegetales y ecosistemas marino-costeros para establecer cuáles son más propicias a desarrollarse en el ambiente existente en los cayos, y cuáles son más adaptables o resistentes a las afectaciones, humanas y naturales, que estas han sufrido a lo largo del tiempo.

Importancia del tema

Hoy existe un desconocimiento de los cambios que han experimentado las formaciones vegetales y los ecosistemas marino-costeros en los cayos del norte del municipio Morón, como consecuencia tanto de la expansión de las actividades turísticas como de los eventos naturales que han afectado el área.

Así mismo, no existe un mapa actualizado de la cobertura vegetal y de las formaciones vegetales de las tierras emergidas y sumergidas de los cayos del norte de Ciego de Ávila, ni de las variaciones espacio-temporales que éstas han sufrido a lo largo de los últimos años; por lo que la creación de un mapa actualizado de la cobertura vegetal de los cayos del norte del municipio de Morón sería un elemento de importancia para esta investigación.

Igualmente, el conocimiento de los cambios de cobertura que han tenido lugar en los cayos puede aportar elementos relevantes a la gestión del área de estudio y al desarrollo turístico que se lleva a cabo en la misma. La identificación de las coberturas y ecosistemas más cambiantes servirá a los tomadores de decisiones para determinar cuáles deben ser más conservados, restaurados o sustituidos en los planes de manejo del destino turístico.

Todo ello posibilita no sólo conocer, sino desarrollar medidas que conlleven a lograr un equilibrio entre las actividades que se desarrollan, los fenómenos meteorológicos que afectan y los ecosistemas terrestres y marino-costeros en el área de estudio.

Por ellos, el problema científico de esta investigación radica en la necesidad de conocer los cambios de coberturas que han tenido lugar en la cayería norte del municipio de Morón, entre los años 2008 y 2015, y como estos han influenciado en la exposición costera de la zona ante fenómenos meteorológicos y surgencias de tormentas.

Para dar respuesta a dicha problemática se plantea la hipótesis:

Las variaciones espacio-temporales de las coberturas marino-costeras influyen significativamente en el comportamiento del índice de exposición costera estimado para la cayería norte del municipio Morón, Ciego de Ávila, Cuba.

Objetivos

Objetivo General: Evaluar la influencia de los cambios de las coberturas vegetales (terrestres y marinas) de la cayería norte del municipio de Morón, Ciego de Ávila, Cuba; sobre el índice de exposición costera del modelo InVEST.

Objetivos particulares:

1. Representar los escenarios de cobertura vegetal entre el 2008 y el 2015, obtenidos por clasificación supervisada con los métodos no paramétrico (Paralelepípedo) y paramétrico (Maximun Likelihood).
2. Determinar los ecosistemas que más cambios han experimentado después del paso de un huracán, mediante la comparación de las clasificaciones de imágenes correspondientes a los años analizados.
3. Establecer cuáles han sido las variaciones de las coberturas vegetales en el área de estudio, utilizando la herramienta Detección de cambio de ERDAS.
4. Obtener los cambios en el Índice de Exposición Costera a partir de las variaciones de los ecosistemas identificados en las clasificaciones de imágenes, generando el mapa de los cambios.

Capítulo 1: Antecedentes y caracterización del área de estudio

1.2 Estudios referentes al tema

Cuba es la mayor isla del Caribe, cuyo archipiélago contiene más de 3000 kilómetros de costas y más de 4000 islotes y cayos, lo cual determina su biodiversidad sin par en el Caribe insular. Ecosistemas marinos y costeros como los pantanos de manglares, las praderas de pastos marinos y los arrecifes de coral constituyen áreas de reproducción, cría y alimentación para muchas especies de peces de interés comercial. De la misma manera sostienen especies migratorias como las tortugas marinas, los tiburones y manatíes, algunas de las cuales están consideradas en peligro de extinción. La zona costera de Cuba también concentra los sectores económicos más importantes del país, tales como el turismo, la pesca y el desarrollo energético.

En Cuba se desarrollan diferentes modalidades de turismo, dentro de ellas se encuentra la de sol y playa, con más tiempo en explotación y de las más estudiadas. Pero esta modalidad de turismo, como cualquier actividad económica, requiere de una organización espacial que disponga la forma de uso del territorio de acuerdo con sus condiciones naturales, recursos turísticos, valores espaciales, características de la política turística y la capacidad de carga. (ICGC, 1990, p. 188)

Dada la situación económica del país a principios de los años noventa, fue necesario planificar desarrollos turísticos de sol y playa en muchas zonas que hasta el momento habían permanecido sin un uso intensivo. Tal es el caso de las playas de la cayería norte del municipio Morón, territorio perteneciente al Archipiélago Sabana Camagüey, localizado en la costa norte central de Cuba. (Ventura, 2008, p. 8)

A pesar de que en las zonas costeras de Cuba se desarrollan importantes sectores económicos los estudios realizados en estas regiones son escasos y no se encuentra información referente a estudios de la cobertura vegetal en estas regiones costeras. Y en el resto de las regiones del país los estudios en esta línea son variados.

Una de las pocas investigaciones que se encuentran es: “Análisis multitemporal del Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI) en Cuba”, de Cobos et al., (2015), donde se realizó la evaluación de la variabilidad del índice normalizado de diferencia de vegetación en Cuba, para el periodo 2003-2013. Este análisis multitemporal del NDVI en Cuba se realizó para todo el territorio cubano utilizando 30 capas. Se crearon escenarios que correspondieron a los meses de febrero (temporada seca) y agosto (temporada lluviosa) de todos los años desde 2003 hasta 2012, y a todos los meses del año 2013. Se crearon 1000 puntos aleatorios con base en un mapa del archipiélago cubano. Se extrajeron los valores del índice de todos los escenarios para todas las unidades de muestreo.

Todo este procesamiento se realizó con el programa ArcGis 9.3. Los NDVI se mantuvieron estables durante los 11 años evaluados para el mes de agosto, a diferencia de febrero donde existió mayor variabilidad. Dando como resultado que en todas las comparaciones los valores de NDVI en febrero fueron menores que los de agosto. Aunque los valores medios mostraron diferencias considerables, los valores mínimos y máximos presentaron alta similitud estos resultados se pueden asociar a diferentes factores como por ejemplo a la escala de trabajo. (Cobos *et al.*, 2015. Pp 15-18)

Otra investigación realizada para todo el territorio cubano fue el “Mapa (BD-SIG) de vegetación natural y seminatural de Cuba V.1 sobre Landsat ETM 7 SLC-OFF GAP FILLED”, en el cual se utilizaron imágenes del 2009 y 2012, y se clasificaron las nubes y las sombras que fueron corregidas conjuntamente con los gaps de las imágenes. La clasificación realizada fue de tipo supervisada y obtuvieron clasificaciones de 8 y 12 clases. A las clasificaciones le aplicaron una función de Majority con kernel de 3x3 y al resultado se le eliminaron las áreas menores que 1.5 ha., según el criterio de área mínima empleada. El resultado final fue un mapa de vegetación natural y seminatural a escala de 100 000 de Cuba, corroborado con la superposición de varios mapas, los resultados del NVDI, estaciones de muestreos en todo el país, revisión de los resultados por expertos y las revisiones topológicas. En el mapa solo se representan las vegetaciones naturales y seminaturales, eliminando del resultado obtenido las coberturas que no quedaron dentro de estas categorías.

En el trabajo “Cartografía de la cobertura vegetal de un sector del municipio San José de las Lajas, de la provincia Mayabeque” se utilizaron fotografías aéreas, escala 1:37 000, que fueron interpretadas mediante métodos óptico-analíticos apoyados en comprobaciones de campo que permitieron caracterizar las unidades de vegetación. Se delimitaron formaciones vegetales seminaturales (formaciones con poca intervención antrópica), los principales cultivos permanentes y áreas de pastoreo de la región, obteniendo como resultado un mapa de cobertura vegetal de ese sector de San José de las Lajas a escala 1:50 000 donde se identificaron las formas vegetales Bosques, matorrales y comunidades herbáceas secundarias, donde los matorrales fueron de mayor predominancia en el área. (Vilamajó D. *et al.*, 2003. Pp 165-171)

Otro ejemplo de investigación es el “Análisis multitemporal de imágenes Landsat para evaluar las variaciones de la cobertura vegetal emergente en la laguna Leonero, Granma, Cuba”, desarrollado por Denis Ávila, D. (2015) que tuvo como objetivo describir la dinámica histórica de colonización de la vegetación acuática en el espejo de agua del embalse dulce Leonero a partir de una serie de imágenes satelitales Landsat entre 1978 y 2012. Sobre la banda 4, correspondiente al infrarrojo cercano, se ubicaron de forma visual regiones de interés que representarán las zonas cubiertas de vegetación y las zonas de espejo de agua descubierto. Estas se emplearon para hacer una clasificación supervisada de la imagen, a partir del algoritmo de la distancia de Mahalanobis con un error de 0,15. El área de las clases finales (vegetación y agua) fueron expresadas como porcentaje del área total de la laguna para cada estación y año, se promediaron los valores en aquellos casos en que habían más de una imagen disponible. El procesamiento de las imágenes satelitales se realizó en el programa ENVI 4.7. Se obtuvo como resultados mapas históricos de los cambios y el comportamiento de las tendencias generales en variables espaciales de la vegetación (extensión, ubicación, fragmentación). (Ávila, D. 2015. Pp 47-53)

Mientras que García, J. y Orozco, A. (2015) en la investigación del estado de conservación de la flora y la vegetación en los ecosistemas arenoso cuarcíticos de Casilda, Sancti Spíritus, Cuba pudieron establecer la situación de la conservación de la flora y la vegetación de Casilda. Para eso se basaron en la lista florística de las arenas cuarcíticas de Casilda y en observaciones realizadas sobre abundancia de especies invasoras, intensidad y tipo de uso de las plantas y la tierra en 39 expediciones efectuadas entre 1999 y 2015. Obtuvieron como resultado que dentro de los 307 taxones infra-genéricos de la flora de Casilda se destacaron 63 por su distribución restringida o por el riesgo de extinción que enfrentan.

Estos trabajos muestran el uso de la percepción remota y la clasificación de imágenes satelitales para estudios de cobertura y evolución de la vegetación en zonas costeras cubanas, así como la importancia de usar estas herramientas en estudios de evolución de las coberturas del suelo. (García, J. y Orozco, A. 2015. Pp 51-65)

A diferencia de otras áreas de desarrollo turístico del mundo y del propio país, en los cayos del norte de Ciego de Ávila se realizó un plan de ordenamiento del territorio siendo consecuente con la fragilidad de los recursos naturales existentes en el área. Sin embargo, los valores de capacidades de soporte (conocidos como capacidad de carga de las playas) fueron estimados a partir de criterios empleados internacionalmente, usando la cifra de 10 m² por bañista, valor que no posee un fundamento científico razonable. Este plan es nombrado Plan General de Ordenamiento Territorial, desarrollado por el departamento provincial de Planificación Física de Ciego de Ávila. Se realiza por quinquenios, aunque es actualizado anualmente. Desde hace unos años se está revisando la metodología que emplea este plan.

Las investigaciones en el área de los cayos no han sido muchas y se han hecho estudios donde han analizado a los ecosistemas marinos costeros, enfocándose en la caracterización de los mismos, como es en la investigación de: “Estudio de la carga real de las playas del destino turístico Jardines del Rey. Caso de estudio playa Larga, Cayo Coco”, donde se empleó una metodología novedosa que partió del conteo físico del número de personas existentes en diferentes momentos en la playa, de las actividades que realizaban y del área de sol en el momento de la medición. Eso permitió que se estableciera el comportamiento de la ocupación real y de la

carga real. También se midieron variables e indicadores ambientales y sociales que influyeron en el número de personas en la playa y en el área que le corresponde a cada una. Finalmente, el trabajo mostró los valores reales de las variables determinadas para el área de estudio, la relación entre la Carga Real determinada y las variables e indicadores medidos. (Ventura. Y, 2008. Pp 50)

Otra investigación fue la realizada por Rodríguez (2008), “Estudio de las afectaciones provocadas por la limpieza de las playas del destino turístico Jardines del Rey”. Caso de estudio: playa Larga, Cayo Coco”, donde mediante el uso de una metodología basada en la toma y procesamiento de muestras, se determinaron los porcentajes y volúmenes totales de arena dentro de las acumulaciones hechas por la limpieza de playa. Además, esta investigación determinó indicadores (tasa de desplazamiento de arena, porcentaje de afectación del área de sol y grado de afectación por desplazamiento) que dieron la posibilidad de conocer el grado de afectación provocado por las labores de limpieza. Además, se realizó una comparación entre los métodos empleados para la realización de la limpieza de playa y se propusieron algunas acciones a tener en cuenta para reducir los efectos negativos de la actividad. (Rodríguez. Y, 2008. Pp. 47)

Se puede mencionar también los estudios desarrollados por el proyecto “Sabana-Camagüey”, de colaboración científica entre Cuba y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2010), con el objetivo de proteger la biodiversidad y el desarrollo sostenible del ecosistema Sabana-Camagüey. En este proyecto se han desarrollado varias etapas de investigación, desde los años 1993 hasta el 2014, lo que ha permitido realizar una caracterización de los ecosistemas marinos-costeros del área de estudio, establecer acciones de protección a estos ecosistemas, un

sistema de monitoreo para evaluar continuamente el estado de los ecosistemas y la acción del desarrollo turístico en esta zona.

Otros tipos de investigaciones desarrollados en zonas costeras se relacionan con la exposición de estas a fenómenos naturales que las afectan, como los huracanes, las surgencias de tormenta y la sobre elevación del nivel del mar. Dentro de estas investigaciones se encuentran las desarrolladas por “*The Natural Capital Project*”, específicamente con el empleo del modelo InVEST. Dicho modelo permite evaluar diferentes aspectos en las zonas costeras, dentro de los que podemos mencionar los servicios ecosistémicos que existen, la calidad de los hábitats y del agua; así como la exposición de las zonas costeras ante la surgencia de tormenta y la erosión.

Dentro de los trabajos realizados con el empleo del modelo InVEST se pueden mencionar “*Valuing Ecosystem Services: InVEST Tools*” donde realizaron la valoración de los servicios que brindan los ecosistemas, dándole un valor a estos servicios, para que económicamente se conozca el costo de cada uno de los servicios que pueden brindar la naturaleza. Para la implementación de la herramienta InVEST el autor analizó los ecosistemas de manglares; focos contaminantes y adaptación de las comunidades a los cambios climáticos. Esto dio como resultado mapas en los que se reflejaron los valores de los servicios de los ecosistemas, además de conocer las repercusiones que traen la pérdida o las afectaciones en los ecosistemas. Estos mapas son útiles para la toma de decisiones. (Vogl, 2013. Pp 62).

Además, la investigación realizada por Woods (2013), científico Senior de Natural Capital Project (NCP) que emplea el modelo InVEST para obtener la distribución de los ecosistemas

vinculado al desarrollo de la actividad turística, lo que le permitió estimar el número de visitas a los lugares de ocio en función de factores como la ubicación de los hábitats naturales, la accesibilidad, la calidad del agua. Dicho modelo produjo mapas que mostraron los patrones actuales del uso recreativo y, de manera opcional, mapas de uso futuro con escenarios alternativos.

El modelo InVEST ha sido utilizado en varios países de América latina y el Caribe (Belice, Bahamas, Costa Rica y Haití); por lo que emplearlo en Cuba nos permitiría ampliar el área de aplicación del mismo en el Caribe.

1.2 Ubicación del área de estudio

La zona de estudio tiene un área de 14332.83 km² (143,283 ha), y fue establecida a partir de la División Política Administrativa de la República de Cuba. Se encuentra separado de tierra firme por un mar interior de poca profundidad sobre el cual se construyó una carretera marítima de 17 km de longitud que lo vincula con el resto del país. Limita al Norte con el canal Viejo de las Bahamas, al Este con el canal de Paredón Grande, al Sur con la bahía de Los Perros y al Oeste con el canalizo de Baliza Nueva. (Ver figura 1 Mapa de ubicación)

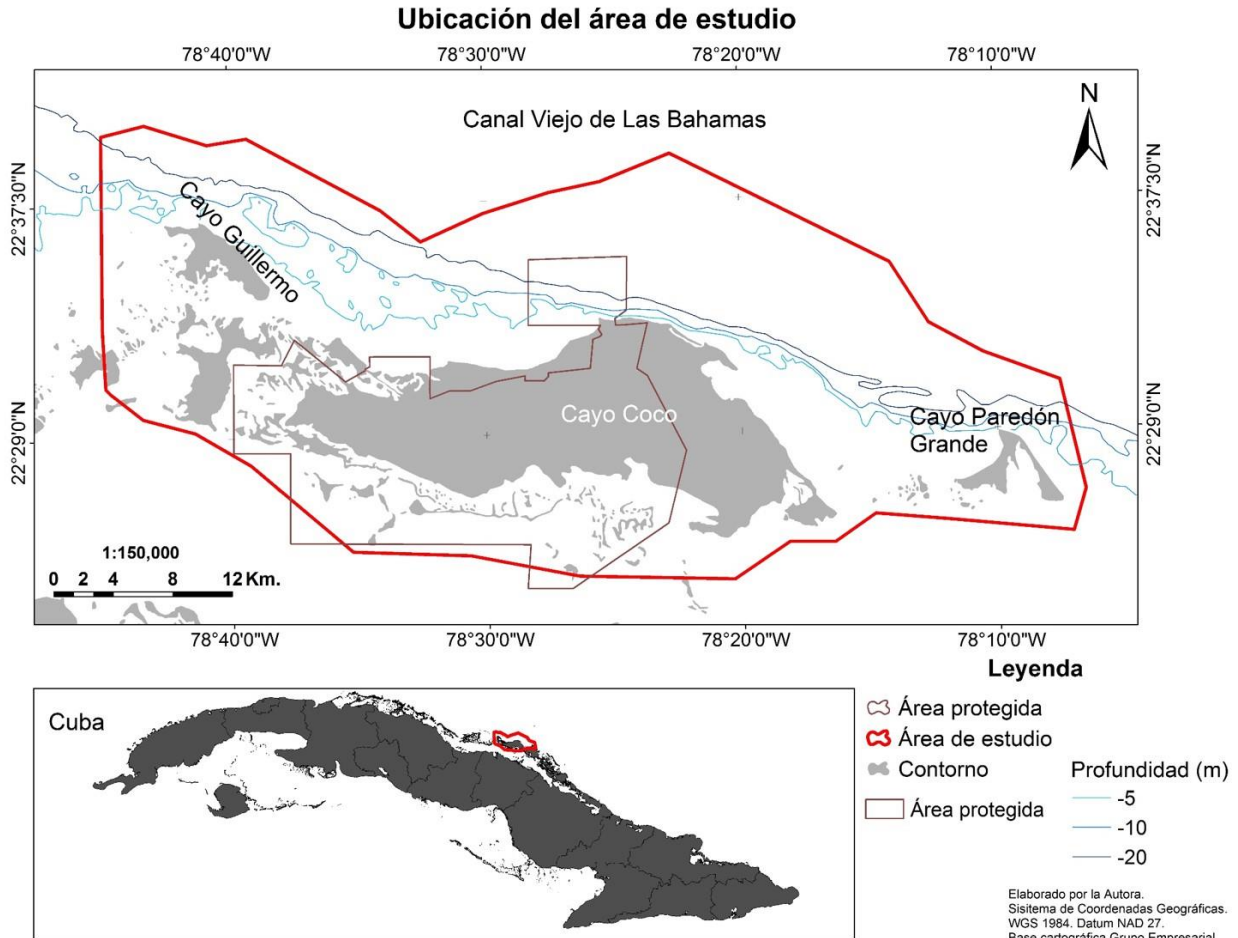


Figura 1. Mapa de Ubicación de la cayería norte de Morón, Ciego de Ávila. Cuba (Área de estudio)

1.3 Descripción del área de estudio

El área de estudio coincide con el destino turístico de Jardines del Rey, que inicia sus actividades en 1990 y actualmente se ubica como tercer destino turístico de sol y playa de Cuba y zona de un creciente desarrollo turístico y recreacional en los últimos años concentrado el norte de los cayos. Las actividades turísticas se concentran en los cayos Coco (cayo de mayor extensión del área de estudio con 370 km²) y Guillermo, con presencia solamente de turismo ocasional en cayo Paredón Grande.

El área de estudio incluye la porción oriental de la barrera coralina del archipiélago Sabana-Camagüey, de 10 kilómetros, con profundidades que van de los 10 a los 30 metros, de aguas muy cristalinas y cuenta con más de 20 sitios de buceo para la actividad de buceo contemplativo. Sus playas, de arenas finas, se extienden por más de 27 kilómetros.

Además, se encuentra el área protegida Reserva Ecológica Centro Oeste Cayo Coco creada en el 2004 y aprobada legalmente en el 2010, que ofrece servicios de senderismos y recorridos ecuestres a los visitantes.

1.3.1- Geología.

La naturaleza geológica de la cobertura superficial del área de estudio está compuesta por rocas y sedimentos correspondientes al Neoaútóctono Cubano, los cuales a su vez pertenecen a la Asociación Estructuro Formacional (AEF) de la Neoplataforma, datada del Eoceno Superior Tardío al Reciente. Las secuencias propias de esta AEF se originaron básicamente (a diferencia de los elementos del Substrato Plegado) en el mismo lugar que hoy ocupa el territorio de Cuba, evolucionando en un régimen de desarrollo platafórmico (Colectivo de autores, 2010).

De modo más específico la superficie se halla indistintamente formada por acumulaciones de sedimentos correspondientes a los Depósitos Marinos de Holoceno (Q4 m) o secuencias de rocas carbonatadas pertenecientes a la Formación Jaimanitas (Q3 js). En aquellas porciones del terreno que superficialmente se hallan cubiertas por los Depósitos Marinos del Holoceno (Q4 m), tales materiales poseen relativamente una amplia difusión lateral pero en profundidad, su desarrollo llega a alcanzar solamente los 0.30 m de espesor (Colectivo de autores, 2010).

Según el Léxico Estratigráfico de Cuba (Instituto de Geología y Paleontología, 1997; en Colectivo de Autores, 2010. pp. 63-76), tales sedimentos pueden estar formados por depósitos de arenas, guijarros de playa y bancos de tormenta, alcanzando un espesor que oscila entre 1.0 m y 3.0 m. Este conjunto litológico se encuentra yaciendo de modo discordante, a las rocas de la Formación Jaimanitas (Q3 js), las cuales se hallan aflorando hacia otras partes del terreno, principalmente hacia la franja Norte de éste, donde se extiende Punta Raza con su típica forma de costa acantilada. Los horizontes litológicos correspondientes a dicha formación geológica, al igual que los depósitos marinos que la cubren, se constituyeron durante el tercer ciclo sedimentario o estadio de transformación paleogeográfica del Neoaútctono cubano, datado del Plioceno al Reciente, el cual comenzó con un predominio de sedimentos clásticos y concluyó con el dominio de rocas carbonatadas, reflejando un proceso general de transgresión marina que culminó súbitamente con una regresión, ocurriendo progresivamente, la reducción de la profundidad de las aguas y extensión o emersión del territorio en el Holoceno. (Colectivo de autores, 2010.)

1.3.2- Geomorfología.

En un sentido amplio, el archipiélago Jardines del Rey expone un relieve joven propio de zonas costeras originado, en lo esencial, por la interacción de los procesos morfogenéticos. Dentro de éstos se considera de modo especial, a los movimientos neotectónicos ascendentes o descendentes, a las variaciones del nivel del mar durante el Cuaternario, a la acción de un conjunto de procesos exógenos (denudativo-acumulativos) de ciclo relativamente periódico en la franja tropical septentrional, así como por la existencia predominante en el subsuelo de complejos litológicos carbonatados.

En correspondencia con lo anterior, se pudo determinar que en el territorio del archipiélago se manifiesta la presencia de morfoestructuras correspondientes a los tres Complejos Naturales de Primer Orden que se relacionan a continuación:

1. Complejo Natural de Playas, Dunas Arenosas y Costas Acantiladas.
2. Complejo Natural de Lagunas Litorales e Interiores salobres.
3. Complejo Natural de Llanuras Interiores sobre rocas.

Cada componente del Complejo constituye un Subcomplejo o complejo de segundo orden y posee ubicación y características específicas. Precisamente el primer complejo mencionado, está representado por la existencia en sí de Punta Raza, la cual constituye una morfoestructura típica del Subcomplejo Natural de Costas Acantiladas. Dicho subcomplejo, como su nombre lo indica, se relaciona con la existencia de un escarpe en la línea de costa, que se ha originado por la acción del intenso proceso de erosión marina a que ha estado sujeto un sector costero que ha experimentado un ascenso tectónico progresivo. Esta morfoestructura de costa acantilada, se extiende en dirección Sureste-Noroeste, alcanza cotas superiores a los 3 m y se halla cubierta parcialmente por una vegetación de arbustos bajos. La misma está formada por una roca calcarenita de dureza baja a media, de compactación y coherencia medias. Dicha roca, hacia la franja norte del área de estudio, se encuentra intensamente afectada por procesos cársticos superficiales, los cuales se han visto incrementados por la acción disolutiva del mar.

De acuerdo con lo anterior, hacia ese sector se puede observar la presencia de abundantes lapiés agudos (diente de perro), oquedades de disolución (microcarso costero) y algunos bloques sueltos

pequeños. En la zona de contacto del mar con este acantilado, se identifica la existencia de otros elementos morfológicos que caracterizan a este tipo de costa como son: el banco de oleaje, pequeños entrantes y salientes de la línea costera, solapas de erosión y bloques desplomados.

El segundo complejo natural citado, posee una mayor área de extensión y ocupa las franjas costeras bajas que existen hacia la zona interior del cayo, limitando al Noroeste con las morfoestructuras descritas del primer complejo. Esta laguna interior es reconocida como Laguna Larga, la cual ocupa la mayor parte de la porción Sureste del terreno bajo análisis. Se estima que su origen se asocia a la existencia de fenómenos cársticos hundidos en los cuales predomina la ocurrencia de procesos exógenos acumulativos. Esta laguna constituye la morfoestructura más significativa de la poco desarrollada red hidrográfica del sector tratado, lo cual se debe fundamentalmente a la naturaleza soluble de los suelos y rocas que forman el terreno, que favorecen mayormente la infiltración de las aguas provenientes de las precipitaciones atmosféricas sobre su escurrimiento superficial.

El último complejo mencionado se relaciona con el desarrollo de una llanura interior sobre roca, la cual se encuentra cubierta de una vegetación abundante, muy tupida. El relieve es típico de llanuras abrasivas denudativas, donde son cuantiosas y comunes las manifestaciones cársticas. Las cotas de este sector oscilan entre los 1 m y 2.50 m sobre el nivel medio del mar (n.m.m.). Esta llanura se halla rodeando el área de extensión del segundo complejo mencionado. (Colectivo de autores, 2011. Pp 130)

1.3.3- Vegetación.

Las formas vegetales mejor representadas en el área de estudio son: los bosques de mangles en sus diferentes variantes florísticas y fisionómicas, los bosques semidecíduos, los bosques siempreverde micrófilos, las comunidades halófitas, y los complejos de vegetación de costa arenosa y costa rocosa. Por partes se presentan pequeñas áreas con elementos de bosques de ciénaga, herbazales y vegetación secundaria. (Parada Isada, A. *et al.*, 2006. P. 83)

1.3.3.1- Bosques de mangles.

Los manglares están distribuidos en toda la cayería del archipiélago y ocupan una superficie considerable de las llanuras marino-biógenas y también se localizan en las lagunas costeras detrás de las dunas. En el área se encuentran las cuatro especies vegetales que aparecen en el resto de los manglares cubanos y del Caribe insular (mangle rojo, mangle prieto, yana y patabán). Se encuentran diferentes variantes fisionómicas y florísticas según las condiciones ecológicas de los cayos del archipiélago.

Por esta razón se encuentran desde bosques altos mixtos o monodominates de mangle rojo u otras de las tres especies de manglares, en condiciones favorables de salinidad y nutrientes, con árboles de hasta 12 m de altura, hasta manglares achaparrados que no alcanzan más de 3 m, en sitios con condiciones extremas de salinidad. Los yanales y patabanales pueden localizarse en los ecotonos (zonas de transición entre diferentes tipos de vegetación), incluso sobre carso desnudo. (Parada Isada, A. *et al.*, 2006. p. 83)

1.3.3.2- Bosques semidecídúos.

En la llanura cársica que ocupa la parte central de los cayos se desarrollan los bosques semidecídúos y los siempre verdes micrófilos. Esta formación vegetal, con elevada diversidad florísticas y especies endémicas, tiene amplia distribución fundamentalmente en Cayo Coco y puede alcanzar de 12 a 15 metros de altura, con abundancia en el estrato arbóreo de almácigo (*Bursera simaruba*), uvilla (*Coccoloba diversifolia*), soplillo (*Lysiloma latisiligua*), sabicú (*Lysiloma sabicú*), carey de costa (*Krugiodendron foetidissimum*), Gua de costa (*Metopium toxiferum*), jagüeyes (*Ficus ssp.*) etc., con presencia o abundancia de epífitas y lianas. (Parada Isada, A. *et al.*, 2006. p. 84)

1.3.3.3- Bosques siempre verde micrófilos.

Los bosques siempre verde micrófilos, con alta diversidad y endemismo vegetal, presentan una menor amplitud en su distribución. Se caracteriza por la presencia de cactáceas columnares, con lianas y epífitas; entre las especies arbóreas más abundantes se encuentran la cuaba (*Amyris elemifera*), yaití (*Ateramnus lucidus*), hueso de costa (*Hypelate trifoliata*), aceitunillo (*Capparis cynophallophora*), etcétera.

En zonas bajas sometidas a inundaciones temporales y estacionales, se desarrolla un complejo de vegetación arbórea que tiene elementos de bosque de ciénaga, de manglar y de bosque siempre verde y semidecídúo. (Parada Isada, A. *et al.*, 2006. p. 84)

1.3.3.4-Comunidades halófitas.

Las comunidades halófitas, además de formar un mosaico con la vegetación de manglar, se localizan en las llanuras cársticas sometidas a inundaciones estacionales y temporales y se encuentran muy bien representadas en el área de estudio. Estas comunidades están compuestas por especies adaptadas a vivir en suelos hipersalinos y con altas presiones osmóticas. Se caracterizan por una baja cobertura vegetal constituida por suculentas, gramíneas y ciperáceas. (Parada Isada, A. *et al.*, 2006. p. 85)

1.3.3.5- Complejo de vegetación de costa arenosa y rocosa.

Es frecuente el complejo de vegetación de costa arenosa con especies rastreras, pequeños arbustos y hierbas. En costas acantiladas se desarrolla el complejo de costa rocosa, con suculentas y arbustos que pueden presentar formas muy achaparradas. Entre las especies se encuentran: *Salmea petrobioides*, *Iva imbricata*, *Uniola paniculata*, entre otras. (Parada Isada, A. *et al.*, 2006. p. 86)

1.3.3.6- Vegetación secundaria.

En los sitios que han sido intensamente degradados con pérdida de la vegetación natural, se desarrollan comunidades secundarias, asociadas a acciones tales como canteras para la extracción de áridos, apertura de trochas, caminos, construcciones e instalaciones y asentamientos humanos. Este tipo de vegetación presenta especies de amplia distribución y amplitud ecológica como *Dichrostachys cinerea* (Marabú), *Pluchea corolinensis* (Salvia de playa), entre otras. (Parada Isada, A. *et al.*, 2006. p. 86)

1.3.4 Hidrogeología.

Desde el punto de vista hidrogeológico la presencia de aguas subterráneas se ha detectado a una profundidad relativamente cerca de la superficie natural del terreno, localizándose a una profundidad que osciló entre los 2.00 m y 3.00 m.

La presencia de aguas subterráneas a estos niveles indica que bajo la zona de investigación existe y se extiende un horizonte acuífero que está compuesto mayormente por las rocas de la Formación Jaimanitas (Q3 js). El mismo constituye un acuífero libre y dado su cercanía con el mar, se encuentra directamente influenciado por las oscilaciones del nivel de éste y su composición química, constituyendo además su principal fuente de alimentación. De acuerdo con las características hidroquímicas de las aguas que ocupan el área de estudio, se establece que las mismas deben considerarse como agresivas al hormigón y al acero, pudiéndole ocasionar a los mismos, un efecto corrosivo severo. (Colectivo de autores, 2011. Pp 130)

1.3.5 Clima.

El clima de la región presenta una temperatura media anual de 26.0 °C; con mínimas en la temporada invernal (22.8 °C de diciembre a marzo) y máxima en el verano (27.8 °C de junio a septiembre). El promedio anual de precipitación es de 1 129.2 mm, con más del 70 % en el periodo lluvioso (mayo – octubre) y poco más de 200 mm en el periodo poco lluvioso o seco (noviembre – abril). El viento predominante es del E - NE, con pocos días de calma; la incidencia de los llamados “nortes” es frecuente en el invierno (ACC/ICGC, 1990; en PNUD, 2010).

Otro de los eventos que caracterizan el clima del área de estudio son los huracanes, cuya temporada de huracanes se extiende desde el 1 de junio al 30 de noviembre, coincidiendo con la época de verano. En dicho período, los huracanes que afectan el territorio se forman en las zonas cercanas a la costa Oeste del continente africano y en su desplazamiento hacia el Oeste impactan el área de estudio. Entre el 2008 y el 2015 solamente cuatro (4) fenómenos meteorológicos han afectado directamente el área de estudio.

1.3.6 Dinámica costera.

La condición de cayería del área de estudio provoca que los procesos costeros jueguen un papel fundamental en el moldeado y evolución de los ecosistemas presentes en el área de estudio.

La dinámica costera de la zona se caracteriza por la presencia de dos épocas o períodos marcados: verano e invierno. Durante el verano, la dinámica costera se caracteriza por ser tranquila y estable, con oleaje débil y mar tranquilo la mayoría del tiempo, solamente afectado por la ocurrencia de fenómenos meteorológicos, como tormentas tropicales y huracanes, y las mareas de tormentas generados por estos. El movimiento de los sedimentos costeros es escaso y con predominio de la dirección Este-Oeste. Las playas experimentan acumulación de sedimentos y describen perfiles característicos de esta época, con bermas amplias y barras sumergidas casi inexistentes. Los sedimentos tienden a ser más finos como resultado de la debilidad del oleaje.

Durante el invierno, el área es afectada por los frentes fríos, generando oleaje que va de moderado a fuerte, con dirección oeste-este. La dinámica de sedimentos responde a dicho comportamiento

y el movimiento de estos se produce en sentido contrario a la época de verano, de oeste a este. En esta época, las playas se erosionan y muestran un perfil característico de invierno, con bermas estrechas y barras sumergidas bien desarrolladas. Los sedimentos tienden a ser más gruesos por la pérdida de los granos más finos como resultado del incremento del oleaje.

Capítulo 2: Marco teórico

La presente investigación analiza el comportamiento del índice de exposición costera en los cayos del archipiélago Jardines del Rey y la influencia que han presentado los fenómenos meteorológicos sobre los ecosistemas del archipiélago. Para poder llegar a entender el comportamiento del índice así como los fenómenos meteorológicos que han afectado con el paso de los años a los ecosistemas del área se necesitan entender algunos conceptos básicos.

2.1. Conceptos básicos de la investigación

La zona costera es un espacio que posee importantes atributos y cualidades. Sus ecosistemas aportan protección, alimentación, refugio, aporte de materia orgánica, estabilidad a la línea de costa, entre otros servicios ecosistémicos; por lo que es importante mantener un equilibrio en las zonas costeras, sobre todo porque están expuestas a la constante influencia de fenómenos meteorológicos y la actividad humana.

Teniendo en cuenta lo planteado anteriormente se desarrolla esta investigación en la que se emplearon varios conceptos como surgencia de tormenta, índice de exposición costera, percepción remota, imágenes de satélite y cobertura vegetal.

2.1.1 Surgencia de tormenta.

Varias investigaciones emplean esta definición usando el término marea de tormenta, como es en Mitrani (2006. p. 8) que expone que es una onda de gravedad muy larga, con longitud comparable a las dimensiones del evento que la generó, que aparece hacia la zona central de las circulaciones

ciclónicas, por la combinación del campo convergente de los vientos de gran intensidad y las bajas presiones en el centro del evento que la genera.

- La longitud aproximada de la onda equivale 4 veces al radio de vientos máximos.
- Usualmente es una onda solitaria que se mueve con el Ciclón Tropical, aunque al desplazarse paralelo a una franja costera se pueden producir ondas secundarias o resurgencias (Mitrani, 2006. p. 8).

Es la surgencia de tormenta o marea de tormenta la sobreelevación total, por encima del nivel medio del mar, de la componente meteorológica más la marea astronómica (Mitrani, 2006. p. 8).

2.1.2 Índice de exposición costera.

La exposición es el carácter y el grado al cual un sistema está desprotegido ante variaciones climáticas significativas, (CAF, 2014. p. 15). Por lo que el índice de exposición costera evaluará cuán propensa está el área de estudio a ser afectada por fenómenos meteorológicos. Mientras que un índice es un coeficiente que expresa la relación entre la cantidad y la frecuencia de un fenómeno o un grupo de fenómenos. (Magaña. V, 2013. Pp. 4 y 5)

Teniendo en cuenta lo expuesto podemos decir que el índice de exposición costera es el que nos dará qué tan desprotegidos están los ecosistemas marino-costeros a fenómenos meteorológicos y qué tan expuesta está la costa a estímulos externos que actúan sobre ella. En este sentido, los estímulos están vinculados al cambio en cualquiera de sus componentes: subida de temperatura, elevación del nivel del mar, etc. A mayor exposición, mayor vulnerabilidad.

En el caso del índice de exposición costera de InVEST (Sharp *et al.*, 2015), este crea un índice utilizando una representación espacial de siete variables bio-geofísicas que se nombran a continuación: Geomorfología, Relieve, Hábitats naturales, Cambios del nivel del mar, Exposición al viento, Exposición a las olas y Contorno de profundidad potencial de tormenta. A todas las variables se le asigna un rango de exposición costera entre 1 (Bajo) y 5 (Muy alto) dependiendo de las características que posean, y el índice es el resultado de la raíz séptima de la multiplicación de las siete variables. (Sharp *et al.*, 2015)

2.1.3 Percepción remota.

La teledetección, junto a otras técnicas de procesamiento de información geográfica, permite la disponibilidad de un gran cúmulo de datos sobre el territorio, facilitando el trabajo del ordenamiento del mismo, conocer el impacto de los desastres sobre los recursos naturales, el aumento o no en la cobertura vegetal del territorio, entre otros aspectos.

Podemos decir que la teledetección es un instrumento para el análisis de los fenómenos naturales, cobertura forestal, uso del suelo, y nos ayuda a obtener información rápida y precisa de un territorio determinado.

Teledetección es la técnica que permite obtener información a distancia de objetos sin que exista un contacto material. Para que ello sea posible es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción. Nuestros sentidos perciben un objeto sólo cuando pueden descifrar la información que éste les envía. La teledetección, supone la observación exterior de la superficie terrestre. (Chuvienco, 2000. Pp 568)

La teledetección no es más que la traducción del vocablo inglés *Remote Sensing*, es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores aéreos o espaciales. (Chuvieco, 2008. p. 10)

2.1.4 Imagen de Satélite.

Los sensores de teledetección permiten crear un modelo de la realidad en base a la respuesta de los objetos que componen la escena. Estos sensores tienen una capacidad de obtener la visión sinóptica de la tierra en diferentes rangos de las longitudes de ondas, obteniendo la imagen de la escena observada en bandas.

Una imagen satelital no es nada más una colección bidimensional de datos, sino más bien la distribución espacial de la respuesta espectral de los elementos que componen la escena. Entendiendo como respuesta espectral la variación de intensidad de energía radiante en función de su longitud de onda. (Lira, J. 2010. Pp 618)

Las imágenes nos ayudan a la obtención rápida de mapas temáticos que permiten realizar evaluaciones multi-temporales y determinar la dinámica de los cambios de usos del suelo, así como los cambios de coberturas vegetales generados por los desastres o por la acción humana.

2.1.5 Cobertura vegetal.

Muchos autores lo definen como la capa de la vegetación natural. Mientras que Rodríguez, J. (2012. p. 4) la considera como la capa de la vegetación que cubre la superficie terrestre, comprendiendo una amplia biomasa con diferentes características fisonómicas y ambientales que van desde pastizales hasta las áreas cubiertas por bosques naturales. También incluye las coberturas vegetales inducidas como resultado de la acción humana. (Rodríguez, J. 2012. p. 4)

Lo que queda bien establecido cuando se realizan investigaciones de cobertura vegetal es que se debe considerar todo lo que se encuentre en un territorio determinado que cubra el suelo, ya sea de manera natural o introducida. Ya que permite que sea una variable de gran importancia para el desarrollo del ordenamiento ambiental o territorial.

Otro de los elementos que permiten definir y diferenciar las coberturas vegetales es la reflectancia o la cantidad de energía que éstas reflejan y que es captada por los diferentes satélites. El análisis del comportamiento espectral o la respuesta o firma espectral de los diferentes tipos de vegetación o cobertura vegetal permite la diferenciación de ésta a partir del uso de imágenes satelitales, así como la conceptualización de la misma en función de las características de la cobertura vegetal existente.

Según Hernández (2011, p. 9), el nivel de reflectancia en la vegetación se ve modificado principalmente por factores como: los tipos de pigmentos, la estructura de las hojas y el contenido de humedad.

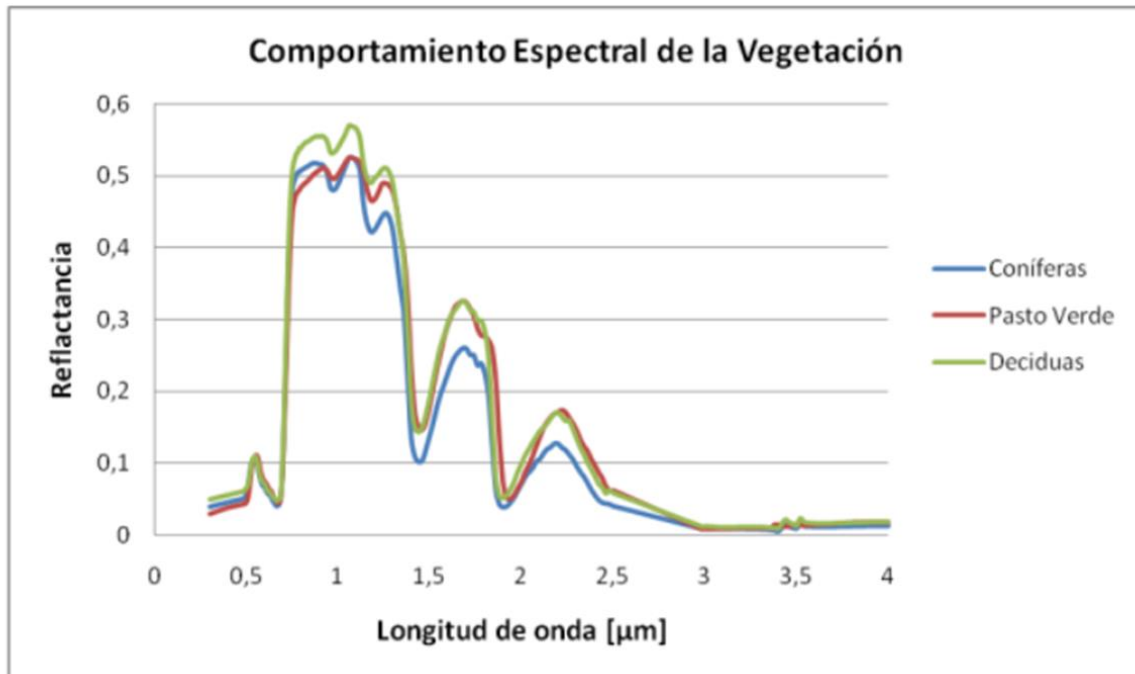


Figura 2. Niveles de reflectancia, referidos a la unidad (1), para los diferentes tipos de vegetación a distintas longitudes de onda. Fuente: Hernández (2011, p. 9).

2.2 Clasificación Supervisada.

La clasificación supervisada se basa en el conocimiento previo del área a clasificar y en la selección de áreas de entrenamiento, que son empleadas para agrupar los píxeles de las imágenes según sus características espectrales y las características de cada una de las clases seleccionadas en las áreas de entrenamiento.

El método no paramétrico (Paralelepípedo) es un método relativamente sencillo. En este método se definen una serie de rectángulos, híper paralelepípedo en el caso de más de 3 dimensiones, que definen las fronteras de cada clase. La definición de cada uno de los paralelepípedos debe hacerse teniendo en cuenta los valores máximos y mínimos de reflectividad para cada una de las bandas. Con este método pueden aparecer píxeles sin asignar o píxeles asignados a varias clases.

Otro problema es que un paralelepípedo no es una forma adecuada de modelizar la dispersión de las áreas de entrenamiento, especialmente teniendo en cuenta la elevada correlación entre bandas que supone que los píxeles de las áreas de entrenamiento se dispongan como líneas oblicuas en el espacio de variables. (Sobrino, J. 2001. Pp 467)

El clasificador de máxima verosimilitud (o máxima probabilidad) asume que los datos siguen una función de distribución normal para asignar la probabilidad de que un píxel cualquiera pertenezca a cada una de las clases. El píxel se asigna de este modo a la clase que es más probable que pertenezca.

Este método puede usarse de forma automática, o puede establecerse algún criterio que permita asignar píxeles a una clase sólo si la probabilidad correspondiente es superior a determinado umbral. Permite, por otro lado, definir algún tipo de criterio para medir la calidad de la asignación, por ejemplo la diferencia entre la máxima probabilidad de que un píxel corresponda a una clase u otra. (Sobrino, J. 2001. Pp 467)

Para determinar si las clases identificadas durante la clasificación estaban bien agrupadas, se emplearon las técnicas de separabilidad y matriz de contingencia. Estas permiten conocer el grado en que un píxel pertenece a la clase que se le asignó durante la clasificación y cuán separadas están dichas clases.

La matriz de contingencia hace una clasificación rápida de los píxeles en un conjunto de muestras de entrenamiento para ver qué porcentaje de los píxeles de las muestras son verdaderamente clasificados como se espera. Si las estadísticas de las firmas de cada región de interés son distintas de las demás, entonces un alto porcentaje de los píxeles de las zonas de muestreo son clasificados como se espera. Se emplea solamente en clasificación supervisada. (ERDAS Field Guide, 2002. Pp 686)

La separabilidad, por su parte, es la medida estadística de la distancia espectral entre dos firmas y ayuda a decidir cuán distantes son las firmas o las clases seleccionadas. Para la evaluación de la distancia, la distancia espectral entre los vectores medios de cada par de firmas es calculada. Si la distancia entre las dos muestras no es significativa para cualquier par de bandas, entonces no habrá distinción suficiente para producir una clasificación exitosa. Existen opciones para el cálculo de la separabilidad, las que tienen en cuenta la covarianza de las firmas en las bandas comparadas y los vectores medios de las firmas. (ERDAS Field Guide, 2002. Pp 686)

Para el caso de la separabilidad, se tomaron en cuenta las firmas espectrales o las características de la reflectancia de cada cobertura identificada. Ello es posible gracias a que las diferentes clases pueden ser diferenciadas de acuerdo con lo que reflejan para cada una de las longitudes de onda que las imágenes satelitales detectan.

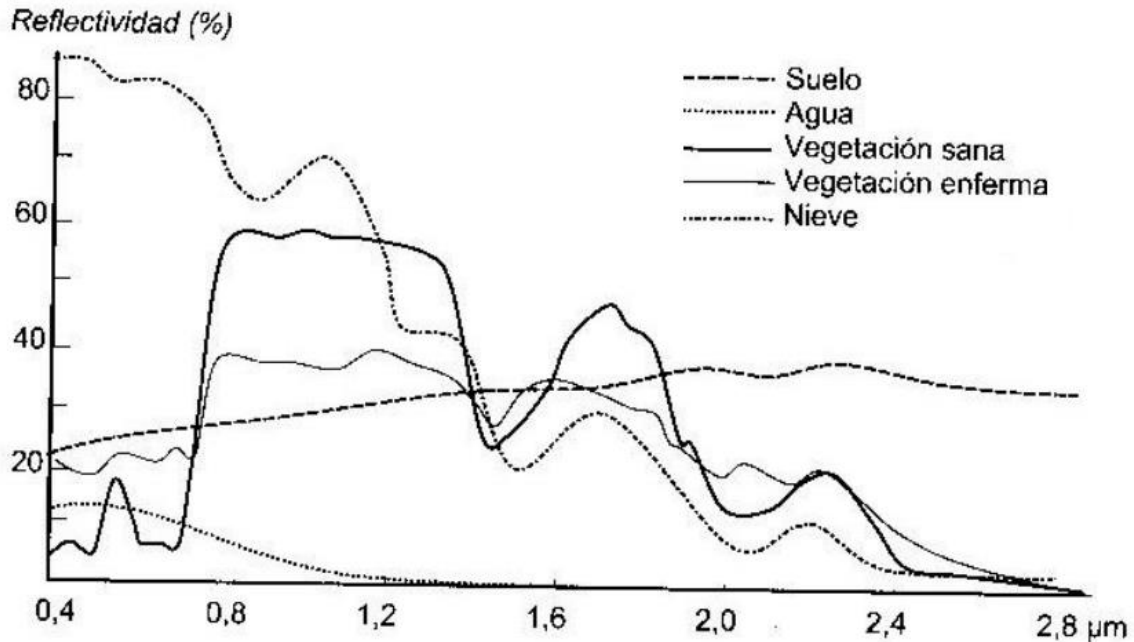


Figura 3. Firmas espectrales de diferentes coberturas. Fuente: Castro (1999, p. 22)

2.3 Modelo InVEST. Índice de Exposición Costera (IEC).

Si los ecosistemas se gestionan de manera adecuada se puede lograr un flujo de servicios ecosistémicos para mantener el desarrollo de la vida. En este sentido, *The Natural Capital Project* trabaja para poder contribuir a la comprensión de los valores naturales y ambientales así como la cuantificación de los costos económicos del uso de los recursos naturales y los servicios que los seres humanos tomamos de ellos. Para eso se están desarrollando modelos que cuantifican y asignan valores a los servicios de los ecosistemas.

Estas herramientas permiten una modelación que facilita el análisis de múltiples servicios y objetivos. Los modelos actuales, requieren de menos entradas de datos, permiten además que se puedan identificar las áreas donde la inversión puede mejorar el bienestar humano y el de la naturaleza. Este proyecto sigue refinando los modelos existentes y desarrollando nuevos modelos.

Los tomadores de decisiones, desde los gobiernos hasta las organizaciones no lucrativas, a menudo gestionan las tierras y aguas para usos múltiples y estos usos múltiples deben ser evaluados para poder obtener compensaciones del uso del recurso. Sin embargo, muchas de las veces esos usos no son estudiados a profundidad.

Es por esto que el modelo InVEST es una herramienta que permite modelar y explotar los posibles escenarios de gestión alternativos y así evaluar las compensaciones entre los sectores y servicios. Por ejemplo, las agencias gubernamentales podrían utilizar esta herramienta y así ayudar a determinar la mejor forma de gestión de nuestras tierras, costas y áreas marinas para proporcionar una gama deseable de beneficios a las personas o para ayudar a diseñar la autorización y la mitigación de los programas que sustentan beneficios de la naturaleza a la sociedad.

Las organizaciones de conservación podrían utilizarla para alinear mejor sus misiones, para proteger la biodiversidad con las actividades que mejoran los medios de vida humanos. Las empresas, como las compañías de bienes de consumo, empresas de energías renovables, y las empresas de agua, también podrían utilizar para decidir cómo y dónde invertir para asegurar que sus cadenas de suministro sean sostenibles y seguras.

InVEST puede ayudar a responder preguntas como:

- ¿Dónde se originan los servicios del ecosistema y donde se consumieron?
- ¿Qué tipos de políticas de gestión y de la pesca costera obtendrán los mejores rendimientos para la pesca, la protección del litoral sostenible y la recreación?

- ¿Qué partes de una cuenca proporcionan los mayores valores de la captura de carbono, la biodiversidad y el turismo?
- ¿Cómo impactan los fenómenos meteorológicos a los ecosistemas?

Se lanzan varias versiones actualizadas de la caja de herramientas de InVEST, aproximadamente cada tres meses, que contienen mejor rendimiento y características mejoradas, correcciones de errores y / o modelos actualizados. Los modelos originales de otras versiones anteriores de InVEST se construyeron dentro de la plataforma del programa ArcGIS, perteneciente a la ESRI (Environmental System Research Institute); pero ahora casi todos los modelos existen independientemente y pueden ser lanzados directamente desde el sistema operativo Windows sin otras dependencias de software. La excepción es el módulo "Atenuación del oleaje y reducción de la erosión: Protección de la Costa" que existe como una caja de herramientas de ArcGIS.

El modelo InVEST cuenta con varios módulos para la obtención de diferentes objetivos. Uno de estos módulos es el empleado en esta investigación, el modelo InVEST, que produce una estimación cualitativa de la exposición costera y que diferencia las zonas con una exposición relativamente alta o baja a la erosión y las inundaciones durante las tormentas. Mediante el acoplamiento de estos resultados con la información de la población, el modelo puede mostrar áreas a lo largo de una costa dado que las personas son más vulnerables a las olas de tormenta y el oleaje.

El modelo no tiene en cuenta los procesos costeros que son exclusivos de una región, ni predice los cambios a largo o corto plazo en la posición de la costa o configuración. Las entradas del modelo, sirven como sustitutos de varios procesos litorales complejos que influyen en la

exposición a la erosión e inundación, incluyen: una polilínea con atributos sobre la geomorfología costera local, los polígonos que representan la ubicación de los hábitats naturales (por ejemplo, pastos marinos, playas, humedales, etc.), las tasas (observado) netas de cambio del nivel del mar, un contorno de profundidad que se puede utilizar como un indicador de nivel de picos (el contorno predeterminado es el borde de la plataforma continental), un modelo de elevación digital (DEM) que representa la topografía y (opcionalmente) la batimetría de la zona costera, un shapefile de puntos que contiene los valores de la velocidad observada de tormenta de viento y la energía de las olas, y una distribución de la población en el área de interés.

El Índice de Exposición Costera (IEC) del modelo InVEST utiliza la fórmula que se describen a continuación para determinar la exposición de la zona costera a la afectación por fenómenos meteorológicos, produciendo un mapa ráster con rangos de exposición relativa de los diferentes segmentos de línea de costa a la inundación causada por las tormentas. Las variables utilizadas por este índice son: Geomorfología, Relieve, Hábitats naturales, Cambios del nivel del mar, Exposición al viento, Exposición a las olas y Contorno de profundidad potencial de tormenta. La ecuación utilizada por el modelo se describe como:

$$EI = (R_{Geomorphology}R_{Relief}R_{Habitats}R_{SLR}R_{WindExposure}R_{WaveExposure}R_{Surge})^{1/7}$$

En esta ecuación se multiplican las variables mencionadas anteriormente y se le obtiene su raíz séptima, donde R se relaciona con los rangos de cada categoría, como aparecen en la tabla 4. Esta ecuación es la que aplica el modelo INVEST y el resultado es clasificado en rangos que más se ajustan al área de estudio.

Capítulo 3: Metodología

3.1- Metodología empleada para la clasificación de las imágenes

Para el desarrollo de esta investigación se partió de la obtención de la distribución espacial de los ecosistemas presentes en el área de estudio para los años 2008, 2010, 2012 y 2015; así como de la comparación de dichas coberturas en el período de tiempo entre estos años. Este análisis se puede realizar a través de la clasificación de imágenes satelitales con clasificación Supervisada, empleando los métodos no paramétrico (Paralelepípedo) y paramétrico (Maximun Likelihood).

Se seleccionaron estos años porque a partir del 2008 se comenzó a estructurar mejor las bases de datos de coberturas marino-costeras, lo que permitió contar con datos confiables para verificar las clasificaciones de las imágenes satelitales realizadas. Además, estos últimos 10 años coincidieron con la presencia de fenómenos meteorológicos, tales como tormentas tropicales y huracanes que afectaron el área de estudio.

Tabla 1. Fenómenos meteorológicos que han afectado el área de estudio y que fueron tenidos en cuenta para obtener las imágenes satelitales empleadas.

Nombre	Fecha	Categoría	Rapidez máxima del viento (Km/h)
Paloma	10/11/2008	Tormenta Tropical	25
Paula	01/01/2010	Tormenta Tropical	20
Isaac	02/08/2012	Tormenta Tropical	55
Joaquín	08/10/2015	Huracán	100

Fuente: Elaborada por la autora.

Para la clasificación de las coberturas se utilizaron las imágenes Landsat 7 del sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), compuestas por 8 bandas espectrales que pueden ser combinadas

para obtener varias opciones de procesamiento. Puede adquirir imágenes en un área que se extiende desde los 81° de latitud norte hasta los 81° de latitud sur y en todas las longitudes del planeta. Su órbita es realizada en aproximadamente 99 minutos, dando 14 vueltas por día a la Tierra, y cubriendo la totalidad del planeta en 16 días. El Landsat7 está heliosincronizado, o sea que siempre pasa a la misma hora por un determinado lugar.

Tabla 2. Resoluciones de las bandas de los sensores del satélite Landsat 7 ETM+.

Bandas	Espectral (μm)	Espacial (metros)	Radiométrica (BITS)	Temporal (días)
1	0.45-0.52 (azul)	30	8	16
2	0.52-0.60 (verde)			
3	0.63-0.90 (rojo)			
4	0.76-0.90 (infrarrojo cercano)			
5	1.55-1.75 (infrarrojo medio)			
6	10.40-12.50 (infrarrojo termal)			
7	2.08-2.35 (infrarrojo medio)			
8	0.52-0.90 μm (Pancromático)	15		

Fuente: GeoService Perú

Se obtuvieron 4 imágenes del Satélite Landsat 7 del sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), descargadas desde: <https://earthexplorer.usgs.gov/> . Con fechas del 27 de noviembre de 2008, 17 de enero de 2010, 3 de septiembre de 2012 y 30 de octubre de 2015.

Se clasificaron por separado la zona de mar y la zona de tierra firme debido a que al clasificarlas unidas se producen solapamientos de las coberturas identificadas en tierra firme y mar, pues presentan similar reflectancia. Las combinaciones de bandas (RGB) empleadas fueron para zona de mar 4-1-3 y para zona de tierra firme 5-3-2, pues son las que mejor reflejan las diferencias en los ecosistemas para cada tipo de ambiente, según varios autores y según el resultado de la aplicación de la separabilidad de las clases por bandas. (Tabla 3)

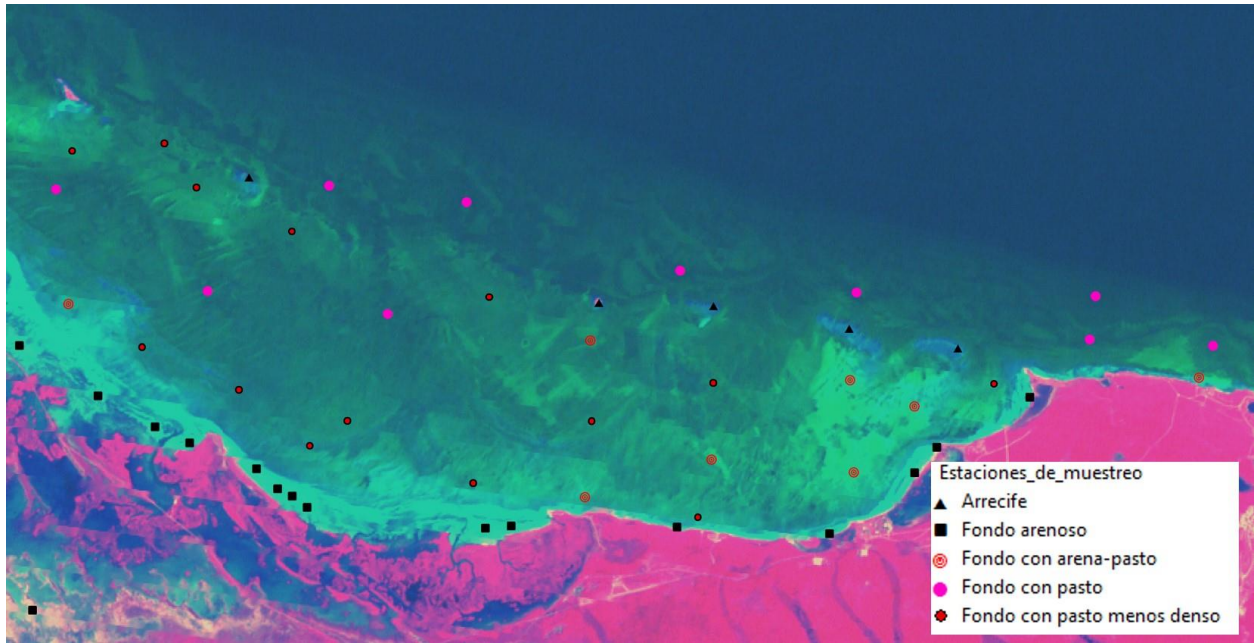


Figura 4. Combinaciones de bandas empleadas para zona de mar 4-1-3

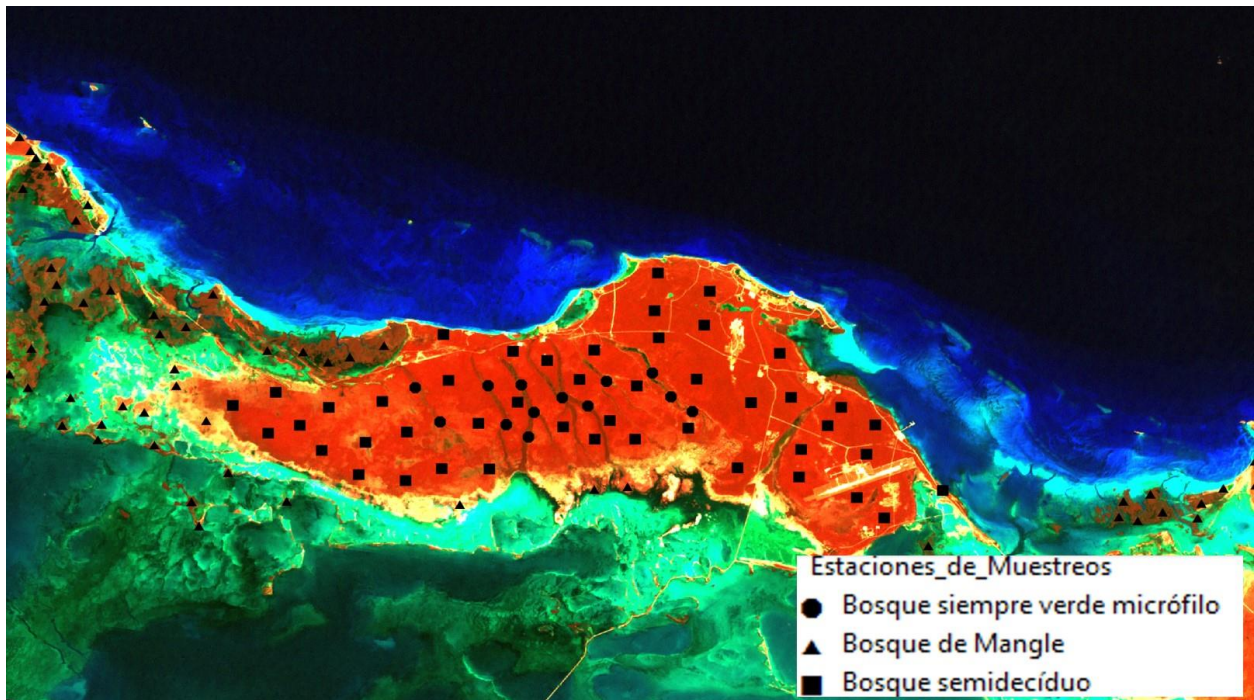


Figura 5. Combinaciones de bandas empleadas para zona de tierra firme 5-3-1

Tabla 3. Aplicaciones de las bandas de los sensores del satélite Landsat 7 ETM+.

Bandas	Longitud de onda (µm)	Aplicaciones
1	0.45-0.52 (azul)	Mapeo de aguas costeras; diferenciación entre suelo y vegetación; diferenciación entre vegetación conífera y decídua
2	0.52-0.60 (verde)	Mapeo de vegetación; calidad de agua
3	0.63-0.90 (rojo)	Absorción de la clorofila; diferenciación de especies vegetales; áreas urbanas, uso del suelo; agricultura; calidad de agua
4	0.76-0.90 (infrarrojo cercano)	Delineamiento de cuerpos de agua; mapeo geomorfológico; mapeo geológico; áreas de incendios; áreas húmedas; agricultura; vegetación
5	1.55-1.75 (infrarrojo medio)	Uso del suelo; medidas de humedad de la vegetación; diferenciación entre nubes y nieve; agricultura; vegetación
6	10.40-12.50 (infrarrojo termal)	Mapeo de stress térmico en plantas; corrientes marinas; propiedades termales del suelo; otros mapeos térmicos u otros.
7	2.08-2.35 (infrarrojo medio)	Identificación de minerales; mapeo hidrotermal
8	0.52-0.90 µm (Pancromático)	Catastro rural, infraestructuras; ubicación de centros poblados, hidrología, vías.

Fuente: INEGI

Se emplearon las técnicas; separabilidad para poder establecer las regiones de interés que mejor se separaban entre ellas y determinar la combinación de bandas que mejor permitía esta separación. Y la matriz de contingencia para poder obtener la confiabilidad de la clasificación realizada.

Para la verificación de las clasificaciones se emplean 34 estaciones de muestreo de las 73 usadas para el monitoreo a los ecosistemas por el Centro de Investigaciones de Ecosistemas Costeros (CIEC), un mapa de vegetación que contiene el área de estudio a escala 1: 1:100 000 elaborado por Estrada, R. *et al.*, (2013) y conocimiento de expertos.

Para la definición de las Regiones de Interés o AOI, se tuvo en cuenta el mapa de vegetación y las 34 estaciones de muestreo del CIEC, mencionadas anteriormente. Para saber si el levantamiento de las AOI estaba bien se realizó un análisis de separabilidad de las AOI. En las que todas las que estuvieron por debajo de 900, se eliminaron y se volvieron a levantar. Así se

pudo trabajar con las AOI que mejor separabilidad tuvieron entre sí, según la combinación de bandas empleadas.

Además, para la comprobación del resultado de la clasificación en los fondos marinos se comparó el comportamiento del histograma de las regiones de interés (AOI) con los intervalos de los valores espectrales empleados por Guimaraes, M. *et all*, (2013) para la definición de fondos marinos.

La evaluación de la clasificación se hizo con una matriz de contingencia y con el uso de la herramienta Evaluación de la precisión (Accuracy assessment) con Erdas 2011. Se establecieron 310 puntos mediante muestreo aleatorio estratificado con un mínimo de 45 por clase aproximadamente aunque hubo clases para las que contaron con un aproximado de 10 puntos, y a cada píxel se le asignó una clase de pertenencia, esto fue apoyado por el empleo de las estaciones de muestreo y el conocimiento de los investigadores del CIEC, además del uso de mapa de vegetación ya existente.

El análisis de precisión de las clasificaciones dio un resultado de 90 %. De los 310 puntos para la comprobación, 289 fueron aciertos donde las coberturas de Bosque de mangle y Bosque siempre verde micrófilo fueron las que presentaron los mayores porcentajes en la precisión del usuario y del producto encontrándose entre 93 %. Para las coberturas marinas el fondo con pasto fue la que presentó un 90% de porcentajes en la precisión del usuario y del producto.

La matriz de confusión para las clasificaciones supervisadas realizadas en el periodo de 2008 al 2015 dio que la información obtenida de la cobertura de suelo es considerada como confiable ya

que la confiabilidad de ellas estuvo superior a 90%, muchos autores como Chuvieco (2002) señalan que una buena precisión global es mayor al 80%. Por lo que podemos aceptar esta confiabilidad arrojada

Para obtener los cambios de cobertura entre las imágenes de diferentes fechas, se empleó la herramienta de Detección de Cambios (*Change Detection*) de ERDAS, la cual da como resultado un ráster que contiene aquellas zonas donde los cambios entre una imagen y otra son mayores a un umbral que establece el usuario. Esta herramienta agrupa en una clase los píxeles cuyos cambios están por arriba, abajo o dentro de los rangos que el usuario establece y que la herramienta toma como umbrales de cambio. Aquellos píxeles cuyo cambio sea mayor al máximo de umbral establecido caerán en una categoría y aquellos cuyo cambio sea menor al mínimo umbral establecido caerán en otra categoría. Los píxeles cuyos cambios estén dentro de los límites del umbral caerán en la categoría de no cambio. El umbral establecido para la investigación fue el 10 %

Al unísono, se empleó otra herramienta nombrada Diferencia de Imagen (*Image Difference*), igualmente de ERDAS, que mostró cuáles fueron los píxeles que sufrieron cambios de cobertura entre una imagen de una fecha y otra imagen de una fecha posterior.

El resultado de las clasificaciones se convirtió en capas vectoriales y se procesaron con el software ArcGIS 10.2. Se le aplicó la herramienta *Eliminate*, para eliminar todas las áreas menores de 2.5 ha., según el criterio de área mínima cartografiada. Se realizó otra revisión de los resultados finales con las estaciones de muestreo del Centro de Investigaciones de Ecosistemas

Costeros. Posteriormente, se calcularon las áreas de cada cobertura y se elaboraron los mapas pertinentes.

Con la obtención de los cambios de cobertura de los ecosistemas marino-costeros y conjuntamente con las demás variables empleadas (Tipo de Costa, Relieve, Cambios del nivel del mar, Exposición al viento, Exposición a las olas, Potencial de surgencia, como variables constantes) se crean capas vectoriales con la información obtenida que reflejan los cambios de coberturas existentes en el periodo analizado y la obtención del índice de exposición costeras de estos cambios.

3.2 – Índice de Exposición Costera (IEC) del Modelo InVEST

Como se mencionó anteriormente, en esta investigación se emplea el Índice de Exposición Costera del modelo InVEST (Sharp *et al.*, 2015), que se desarrolla sobre la plataforma del Sistema de Información Geográfica ArcGIS 10.2. Dicho índice relaciona una serie de variables a tener en cuenta en la evaluación de la exposición costera y los rangos propuestos para cada variable relacionada. (Tabla 4)

Tabla 4. Listado de variables bio-geofísicas y sistema de rangos para la exposición costera.

Rangos	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Variables	1	2	3	4	5
Geomorfología	Rocas, Acantilados altos, fiordos, Malecones	Acantilados medios, Costas dentadas, Salientes rocosos, Malecones	Acantilados bajos, Llanuras aluviales, Rip-rap, Muros, Derivas glaciales	Playas de guijarros, Estuarios, Lagunas costeras, Escarpes	Playas de barrera, playas arenosas, llanuras pantanosas y delta
Relieve	0 a 20 percentil	21 a 40 percentil	41 a 60 percentil	61 a 80 percentil	81 a 100 percentil
Hábitats naturales	Arrecifes de coral, mangle y bosques costeros	Dunas altas, Marismas	Dunas bajas	Pastos marinos, Bosque de algas marinas	Sin hábitats
Cambios del nivel del mar	0 a 20 percentil	21 a 40 percentil	41 a 60 percentil	61 a 80 percentil	81 a 100 percentil
Exposición a las olas	0 a 20 percentil	21 a 40 percentil	41 a 60 percentil	61 a 80 percentil	81 a 100 percentil
Exposición al viento	0 a 20 percentil	21 a 40 percentil	41 a 60 percentil	61 a 80 percentil	81 a 100 percentil
Potencial de surgencia	0 a 20 percentil	21 a 40 percentil	41 a 60 percentil	61 a 80 percentil	81 a 100 percentil

Fuente: Sharp et al., 2015

Para esta investigación las variables relacionadas con Relieve, Cambios del nivel del mar, Exposición a los vientos, Exposición a las olas, Tipos de costa (Playa, Costa rocosa y Costa de mangle) y Potencial de surgencia permanecerán invariables en el tiempo por lo que solamente cambiarán en el modelo las variables relacionadas con Hábitats (Cobertura vegetal terrestre y marina-costera). Los rangos correspondientes a las variables antes mencionadas se seleccionaron de acuerdo al criterio de varios autores (Mitrani, 2006; Colectivo de autores, 2010), así como al conocimiento personal del área de estudio. (Tabla 5)

El rango de 5, correspondiente a Muy alta exposición, se le asignó a las variables Geomorfología, ya que en el área lo que predominan son las playas arenosas, llanuras pantanosas y delta. Para el rango que se le otorgó a la variable Exposición al viento se tuvo en cuenta que la predominancia de los vientos para el área de estudio en el periodo analizado está marcada por los frentes fríos (en invierno) y por los huracanes (en verano), alcanzando el rango de 5 (Muy alta exposición) como predominio. Además se tuvo en cuenta el Fetch, que según los autores del Índice, cuando es mayor a 15 kilómetros, la exposición al viento es muy alta, y este comportamiento se observa también en el área. Estos mismos aspectos fueron analizados cuando se le otorgó el rango a la variable de Exposición al Oleaje que también recibió un rango de 5 (Muy alta exposición), ambas variables están relacionadas.

El rango de 4, correspondiendo con Alta exposición, se le asignó a la variable Potencial de surgencia de tormenta y el rango de 3, coincidiendo con Moderada exposición, se le asignó a la variable Cambios del nivel del mar; según los estudios realizados por Mitrani (2006). Y finalmente al relieve se le asignó un rango de 5, Muy alta exposición costera. El comportamiento de esta última variable en la cayería norte de Ciego de Ávila es casi en su totalidad bajo, estando entre los 0 y 5 metros sobre el nivel medio del mar, aunque existen pequeñas área donde se encuentran alturas de 15 metros que corresponden a áreas de dunas que se localizan el Playa Pilar, Cayo Guillermo pero no es el relieve predominante.

En la tabla 5 se exponen las variables y las coberturas terrestres y marino-costeras identificadas en el periodo 2008 al 2015, con su rango correspondiente al índice de exposición costera. Dichos rangos (Muy bajo, Bajo, Moderado, Alto y Muy alto), se obtuvieron de los valores que los autores

del índice dan a cada tipo de cobertura expuestos en la tabla anterior (Tabla 4), ajustándose a las coberturas identificadas en el área de estudio.

Tabla 5. Rango del índice de exposición identificado para el área de estudio. (Modificado de Sharp et al., 2015)

Rangos	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Variables	1	2	3	4	5
Geomorfología	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	Playas de barrera, playas arenosas, llanuras pantanosas y delta
Relieve	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	81% a 100% del territorio afectado
Hábitats naturales	Bosque de mangle, Bosque semidecídúo, Bosque siempre verde micrófilo, Comunidades halófitas, Vegetación secundaria	No aplica	No aplica	Fondo arenoso con escasa vegetación, Fondo con pasto, Fondo con pasto menos denso	Fondo arenoso, Infraestructura
Cambios del nivel del mar	No aplica	No aplica	41% a 60% del territorio afectado	No aplica	No aplica
Exposición a las olas	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	Fetch > 15 km
Exposición al viento	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	Fetch > 15 km
Potencial de surgencia	No aplica	No aplica	No aplica	61% a 80% de territorios afectados	No aplica

Fuente. Elaborado por la autora.

En este caso, y como se expone en el apartado 2.3. Índice de exposición costera de InVEST, la ecuación del modelo relaciona las variables antes mencionadas de la siguiente manera:

$$EI = (R_{Geomorphology} * R_{Relief} * R_{Habitats} * R_{SLR} * R_{WindExposure} * R_{WaveExposure} * R_{Surge})^{1/7}$$

Si separamos y agrupamos aquellas variables, que no modificaremos en esta investigación, con el paso de los años y solamente dejamos la variable que se relaciona con los hábitats para que ésta sufra modificaciones, la ecuación pudiera escribirse de la siguiente manera:

$$EI_{\text{año}} = (R_{\text{Geomorfología}} R_{\text{Relieve}} R_{\text{Nivel del mar}} R_{\text{Viento}} R_{\text{Olas}} R_{\text{Surgencia}} R_{\text{Hábitats}})_{\text{año}}^{1/7}$$

Donde $R_{\text{Hábitats}}$ hace referencia al rango de cada uno de los hábitats o coberturas identificadas durante la clasificación de las imágenes satelitales de cada año analizado: 2008, 2010, 2012 y 2015. Las variaciones del índice de exposición costera de un año a otro entonces serán el resultado de las variaciones de los rangos de los hábitats existentes en un año y el siguiente a este, elevado a la 1/7.

De esta forma, se obtienen las variaciones en el índice de exposición costera como resultado únicamente de las variaciones de las coberturas o los hábitats naturales del área de estudio, expresados mediante los rangos que se le asignan según la tabla 5. O sea, cada cobertura es sustituida por su valor de rango en las clasificaciones de los años analizados y esos valores introducidos en la ecuación del índice de cada año; comparando los resultados del índice para cada cobertura para años consecutivos.

Una vez obtenido el índice de exposición para cada fecha, se analiza el comportamiento de los mismos para determinar las variaciones espacio-temporales y comparar estas con las variaciones de los ecosistemas analizados. Luego se realiza la cartografía de la información obtenida.

Capítulo 4: Resultados

4.1. Cambios de la cobertura vegetal del área de estudio para el periodo 2008 al 2015

El área analizada abarca 143,283.44 ha., aproximadamente, e incluye 10 tipos de cobertura del suelo y de los fondos marinos, que se identificaron como: Bosque de mangle, Bosque semidecídúo, Bosque siempre verde micrófilo, Comunidades halófitas, Fondo arenoso, Fondo arenoso con escasa vegetación, Fondo con pasto, Fondo con pasto menos denso, Infraestructura y Vegetación secundaria. La zona marina del área de estudio en la que no se pudo identificar ninguna de las coberturas marinas existentes y que se ubica dentro de los límites de la imagen se clasificó como Sin datos.

Las siguientes tablas muestran la distribución de las coberturas identificadas para cada uno de los años estudiados, así como los cambios sufridos por éstas en el período de tiempo analizado.

Del análisis de la tabla 6 se puede obtener que la cobertura que mayor representación tiene en el área es el Fondo con pasto, siendo la más extensa en los cuatro años analizados, 2008, 2010, 2012 y 2015, con 30.76%, 26.85%, 25.98% y 25.75%; respectivamente; seguida de Bosque semidecídúo. Sin datos, aunque ocupa más del 20% de la extensión del área de estudio, no se tuvo en cuenta en los análisis por desconocerse a qué cobertura corresponde dicha clase.

De igual forma, las coberturas con menor representación en área resultaron ser Comunidades halófitas, con 0.44%; Bosque siempre verde micrófilo, con 0.55% y Vegetación secundaria, con 0.79%; en los cuatro años analizados.

La tabla 6 y las figuras 6, 7, 8, 9 y 10, muestran las diferencias en la extensión de las coberturas identificadas, con valores cercanos a cero o bastante inferiores, como el caso de la Comunidades halófitas y la Vegetación secundaria, y valores superiores como Fondo con pasto y Bosque semidecídulo. Igualmente, la cobertura Infraestructura presenta áreas muy inferiores a las coberturas predominantes. Mientras, en los mapas se puede observar la distribución en área de estas coberturas.

Tabla 6. Listado de las coberturas y sus áreas para los años 2008, 2010, 2012 y 2015.

No	Coberturas	2008		2010		2012		2015	
		Área (ha.)	%	Área (ha.)	%	Área (ha.)	%	Área (ha.)	%
1	Bosque de mangle	8,077.84	5.64	7,996.46	5.58	8,335.33	5.82	8,367.90	5.84
2	Bosque semidecídulo	28,081.86	19.60	28,081.86	19.60	28,081.86	19.60	28,081.86	19.60
3	B. s. v. micrófilo*	784.96	0.55	784.96	0.55	784.96	0.55	784.96	0.55
4	Comunidades halófitas	630.27	0.44	630.27	0.44	630.27	0.44	630.27	0.44
5	Fondo arenoso	14,088.75	9.83	18,085.57	12.62	21,478.77	14.99	21,164.26	14.77
6	Fondo arenoso con escasa vegetación	3,613.70	2.52	2,858.87	2.00	9,360.50	6.53	9,360.50	6.53
7	Fondo con pasto	44,071.89	30.76	38,476.26	26.85	37,224.56	25.98	36,895.09	25.75
8	Fondo con pasto menos denso	8,536.24	5.96	10,430.25	7.28	5,524.07	3.86	5,524.07	3.86
9	Infraestructura	1,704.71	1.19	1,593.64	1.11	1,593.64	1.11	1,932.11	1.35
10	Sin datos	32,644.82	22.78	33,296.91	23.24	29,221.09	20.40	29,494.04	20.59
11	Vegetación secundaria	1,048.39	0.73	1,048.39	0.73	1,048.39	0.73	1,048.39	0.73
	Totales	143,283.44	100	143,283.44	100	143,283.44	100	143,283.44	100

*: Bosque siempre verde micrófilo

Fuente: Elaborado por la autora.

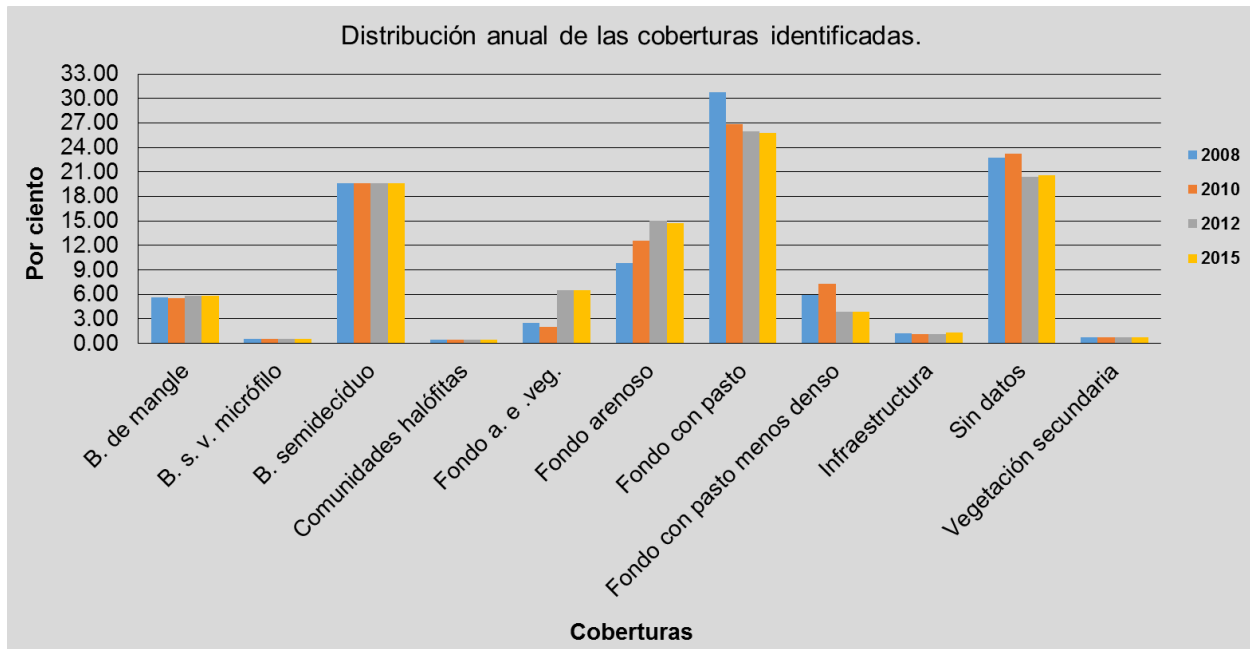


Figura 6. Distribución anual de las coberturas identificadas en el área de estudio, en valores porcentuales respecto al área total. (B. de mangle: Bosque de mangle; B. s. v. micrófilo: Bosque siempre verde micrófilo; B. semidecídulo: Bosque semidecídulo; Fondo a. e. veg.: Fondo arenoso con escasa vegetación)

Las coberturas que mayores extensiones muestran son Fondo con pasto, presentando un pequeño decrecimiento en su área entre los años 2008 y 2015, encontrándose distribuido al sur y al norte del área de estudio. La otra cobertura predominante es Bosque semidecídulo, que no experimentó variaciones en su extensión superficial entre los años analizados y se encuentra cubriendo casi todo el área del Cayo Coco. La otra cobertura identificada con los pastos (Fondo con pasto menos denso, encontrándose en el norte y el sur del área de estudio) también experimentó un decrecimiento en el período de tiempo analizado; contrariamente a las coberturas relacionadas con la arena (Fondo arenoso y Fondo arenoso con escasa vegetación, ubicadas más cerca de los cayos) que experimentaron un incremento de su extensión superficial entre los años 2008 y 2015.

Las coberturas que pudieran estar relacionadas con la actividad humana, como Vegetación secundaria; no mostraron cambios, o estos fueron sumamente pequeños; en el período de

analizado; lo que pudiera ser indicador que el desarrollo de actividades humanas en el área de estudio no está afectando la conservación natural de la misma.

Coberturas identificadas en el año 2008

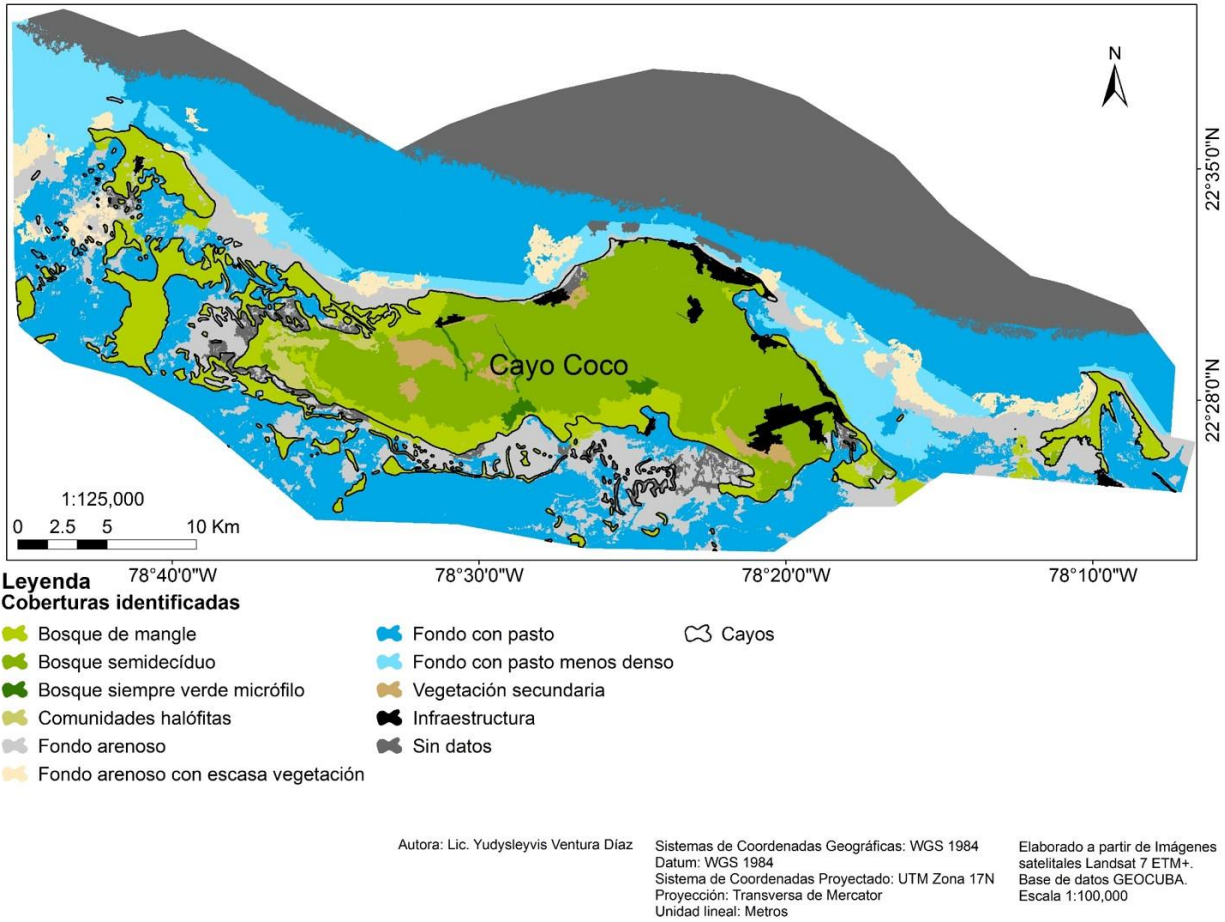
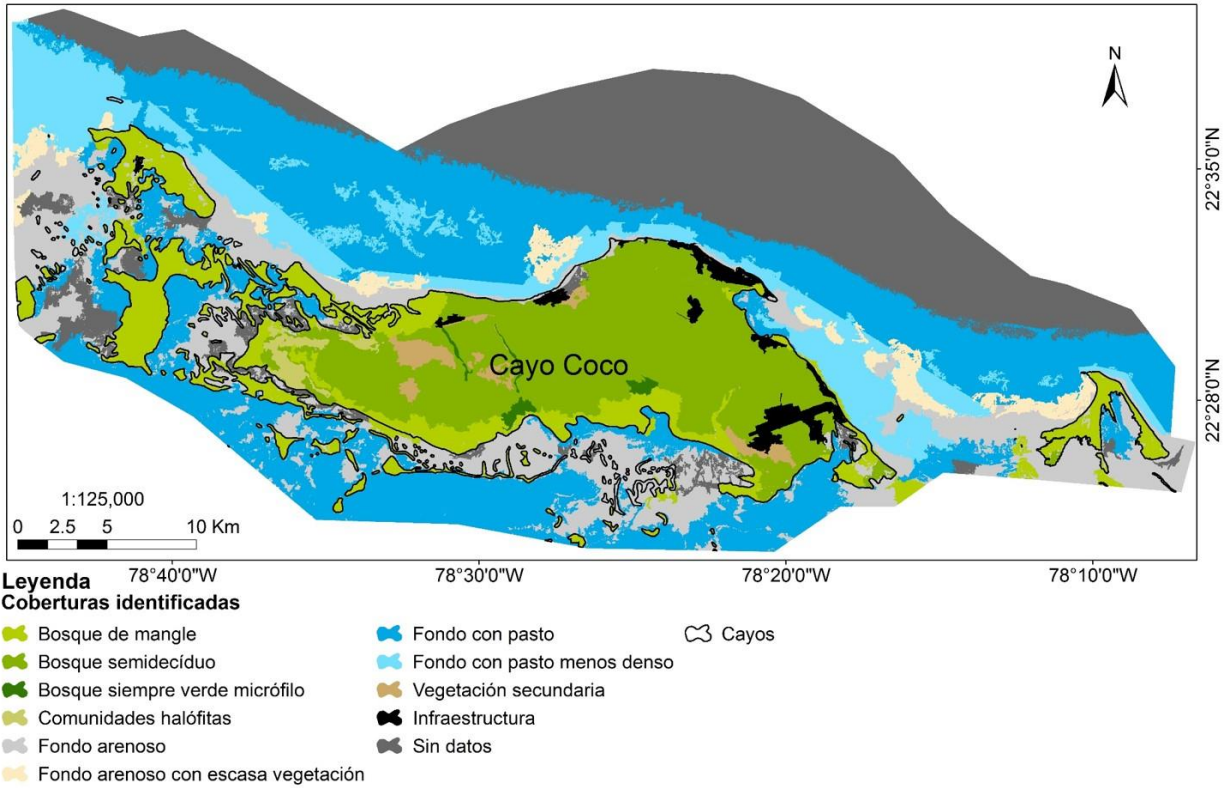


Figura 7. Coberturas identificadas en el año 2008.

Coberturas identificadas en el año 2010



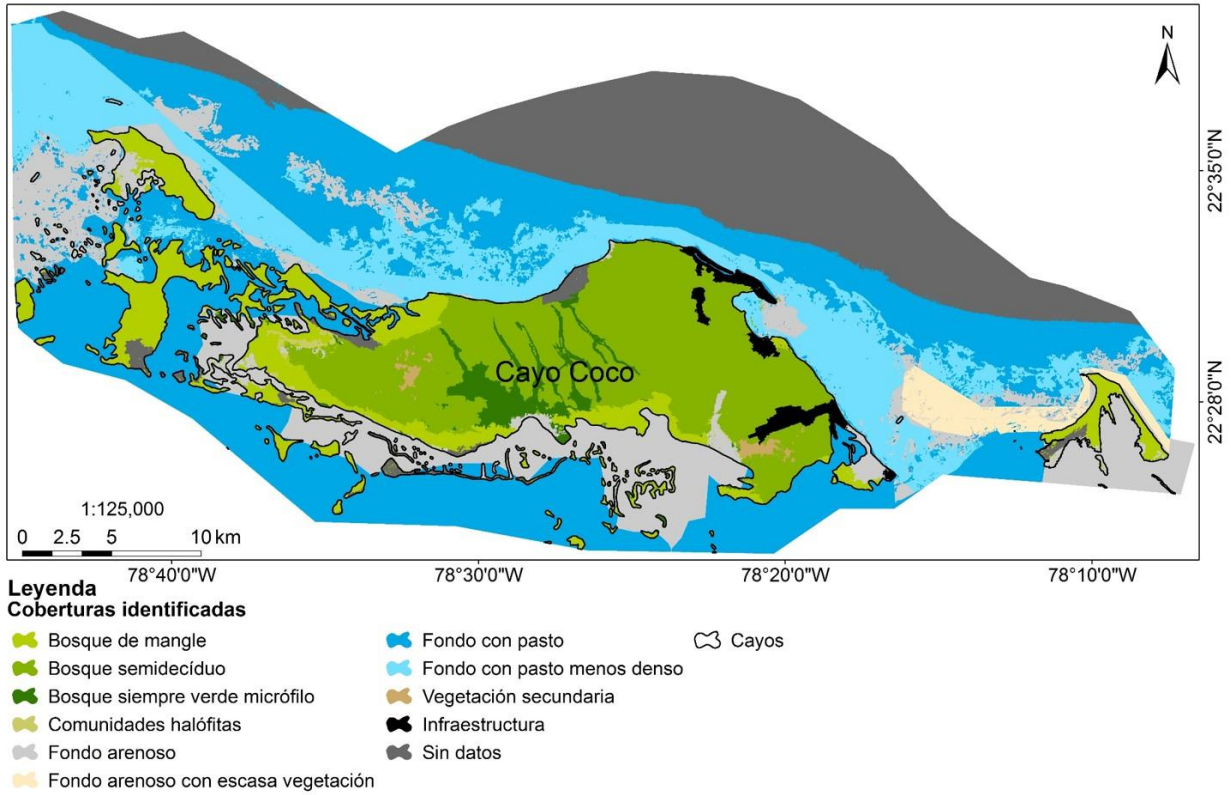
Autora: Lic. Yudysleyvis Ventura Díaz

Sistemas de Coordenadas Geográficas: WGS 1984
 Datum: WGS 1984
 Sistema de Coordenadas Proyectado: UTM Zona 17N
 Proyección: Transversa de Mercator
 Unidad lineal: Metros

Elaborado a partir de Imágenes satelitales Landsat 7 ETM+.
 Base de datos GEOCUBA.
 Escala 1:100,000

Figura 8. Coberturas identificadas en el año 2010.

Coberturas identificadas en el año 2012



Autora: Lic. Yudysleyvis Ventura Díaz

Sistemas de Coordenadas Geográficas: WGS 1984
 Datum: WGS 1984
 Sistema de Coordenadas Proyectado: UTM Zona 17N
 Proyección: Transversa de Mercator
 Unidad lineal: Metros

Elaborado a partir de Imágenes satelitales Landsat 7 ETM+.
 Base de datos GEOCUBA.
 Escala 1:100,000

Figura 9. Coberturas identificadas en el año 2012.

Coberturas identificadas en el año 2015

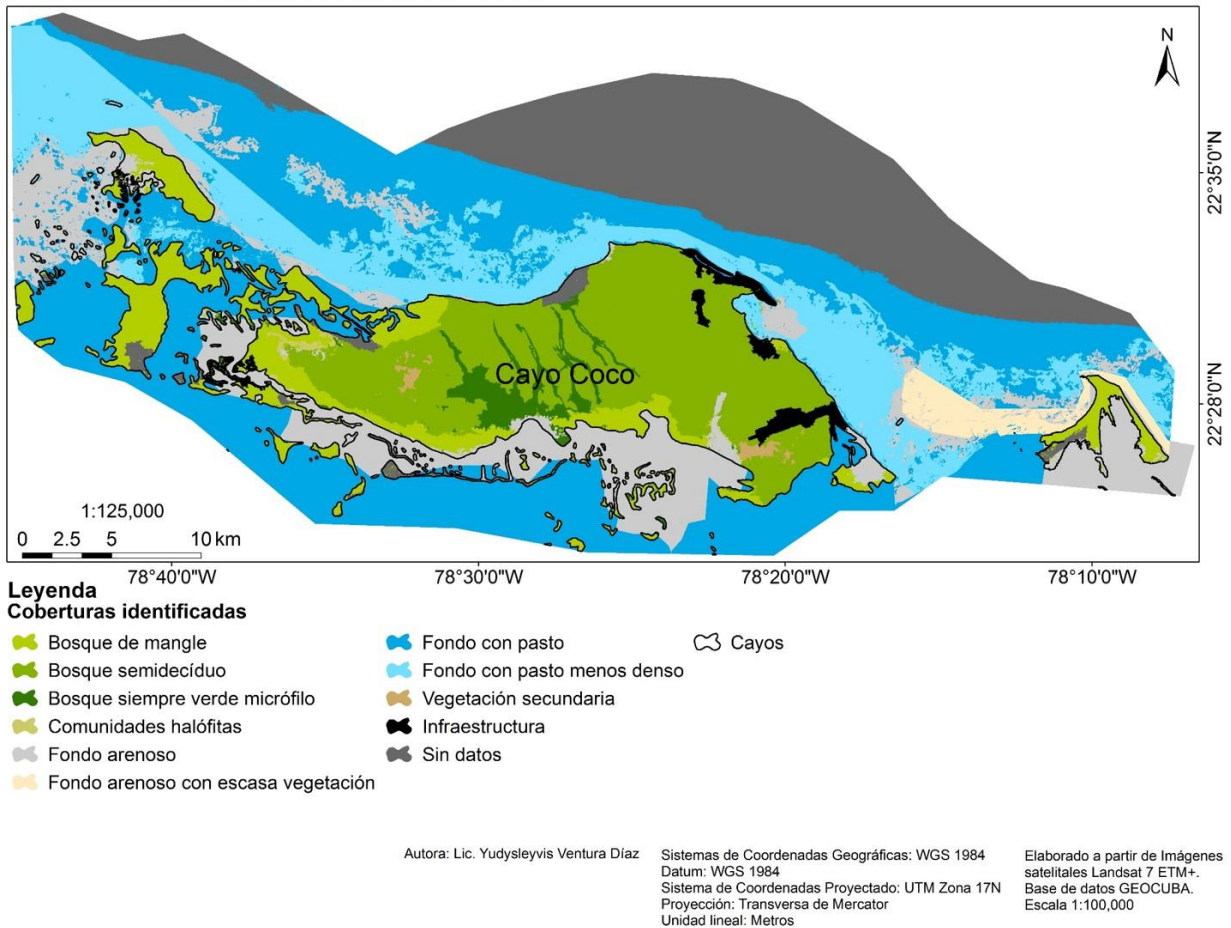


Figura 10. Coberturas identificadas en el año 2015.

Analizando los pares de años seleccionados, tenemos que entre los años 2008 y 2010 la cobertura que más extensión ganó es Fondo arenoso, con 3,996.82 ha.; mientras que la que más perdió es Fondo con pasto con 5,595.63 ha. Entre los años 2010 y 2012 la cobertura que más área ganó es Fondo arenoso con escasa vegetación, con 6,501.63 ha.; mientras que la que más perdió es Fondo con pasto menos denso, con 4,906.18 ha. Para los tres últimos años, 2012 a 2015, la cobertura que más área ganó es Infraestructura, con 338.47 ha.; mientras que la que más perdió es Fondo con pasto, con 329.47 ha.

Tabla 7. Cambio de áreas para cada cobertura identificada entre los años analizados.

No	Coberturas	Cambio de área (ha.)*			Cambio total (ha.) ^a	Cambio total (%) ^b
		2008-2010	2010-2012	2012-2015		
1	B. de mangle	-81.38	338.87	32.56	290.05	3.59
2	B. semidecíduo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	B. s. v. micrófilo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	Comunidades halófitas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	Fondo arenoso	3996.82	3393.20	-314.51	7075.50	50.22
6	Fondo arenoso con escasa vegetación	-754.82	6501.63	0.00	5746.80	159.03
7	Fondo con pasto	-5595.63	-1251.70	-329.47	-7176.80	-16.28
8	Fondo con pasto menos denso	1894.01	-4906.18	0.00	-3012.17	-35.29
9	Infraestructura	-111.08	0.00	338.47	227.39	13.34
10	Vegetación secundaria	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

*: Es la resta del área, en hectáreas, que ocupa cada cobertura en el año posterior menos el área que ocupa en el año anterior.

^a: Se refiere a la suma algebraica de los cambios de área para cada uno de los pares de años analizados.

^b: Se refiere al por ciento que representa la diferencia de área entre los años 2008 y 2015 respecto al área inicial en el año 2008, obtenido por la ecuación $((2015-2008)/2008)*100$.

Fuente: Elaborado por la autora.

La cobertura que más área ganó entre el año 2008 y el 2015, es Fondo arenoso con escasa vegetación con un 159.03 % seguido de Fondo arenoso que gana el 50.22%. Contrariamente, las zonas identificadas como de Fondo con pasto menos denso perdieron el 35.29%. Llama la atención que Bosque de mangle presentó un muy pequeño incremento entre el 2008 y el 2015, solamente del 3.59%; mientras que el área de Infraestructura se incrementó en un 13.34%.

Si tenemos en cuenta los valores totales, en hectáreas, la cobertura que más área ganó en el periodo analizado es Fondo arenoso, con 7,075.50 ha.; (Tabla 7) mientras que la cobertura que más afectada vio su extensión superficial, en hectáreas totales, fue Fondo con pasto, que se redujo en 7,176.80 ha.

4.2 Variaciones de las coberturas vegetales en el área de estudio y su efecto sobre el índice de exposición costera.

Uno de los aspectos más importantes de los cambios de cobertura es determinar cuáles son los más significativos y cuáles son las variaciones más importantes, entendiendo por variación el paso de un ecosistema a otro. Además, la influencia de dichos cambios o variaciones sobre la exposición costera es otro elemento de suma importancia.

Para este análisis comenzaremos por exponer el comportamiento del índice de exposición costera para los años analizados (2008, 2010, 2012 y 2015).

Las tablas 8 y 9 muestran los valores del área que ocupa cada rango asociado a cada cobertura para los años analizados (2008, 2010, 2012 y 2015). En ella se puede observar como las coberturas con rangos Altos (4) ocupan la mayor extensión en los cuatro años analizados, seguido por las coberturas que ocupan rangos de bajo (1) y finalmente las que ocupan rangos de Muy alto (5).

Los rangos de las variables que no corresponden con coberturas o hábitats ocupan la totalidad del área, pues se consideraron constantes para toda el área y el período analizado.

Tabla 8. Extensión superficial de los rangos correspondientes a cada variable para los años analizados.

Variables		2008		2010		2012		2015	
		Rango*	Área (ha.)	Rango*	Área (ha.)	Rango*	Área (ha.)	Rango*	Área (ha.)
Hábitats	Bosque de mangle	1	8078	1	7996	1	8335	1	8368
	Bosque semidecídúo	1	28082	1	28082	1	28082	1	28082
	Bosque siempre verde micrófilo	1	785	1	785	1	785	1	785
	Comunidades halófitas	1	630	1	630	1	630	1	630
	Fondo arenoso	5	14089	5	18086	5	21479	5	21164
	Fondo arenoso con escasa vegetación	4	3614	4	2859	4	9361	4	9361
	Fondo con pasto	4	44072	4	38476	4	37225	4	36895
	Fondo con pasto menos denso	4	8536	4	10430	4	5524	4	5524
	Infraestructura	5	1705	5	1594	5	1594	5	1932
	Vegetación secundaria	1	1048	1	1048	1	1048	1	1048
Geomorfología		5	143283	5	143283	5	143283	5	143283
Exposición al viento		5	143283	5	143283	5	143283	5	143283
Exposición al Oleaje		5	143283	5	143283	5	143283	5	143283
Potencial de surgencia		4	143283	4	143283	4	143283	4	143283
Cambios del nivel del mar		3	143283	3	143283	3	143283	3	143283
Relieve		5	143283	5	143283	5	143283	5	143283

*(1 - Muy Bajo, 2 - Bajo, 3 - Moderado, 4 - Alto y 5 - Muy Alto)

Fuente. Elaborado por la autora.

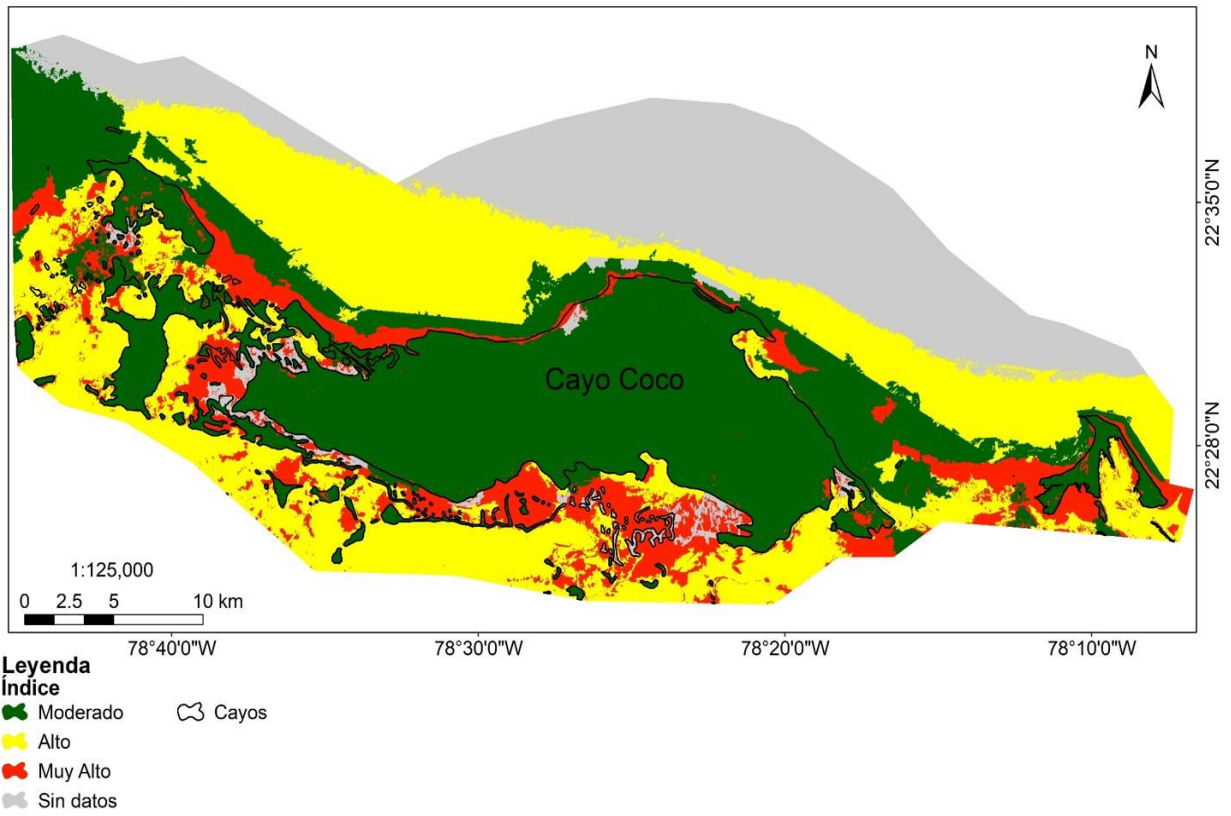
Tabla 9. Área y por ciento de los rangos del índice de exposición costera (IEC) para cada año analizado.

(IEC)	2008		2010		2012		2015	
	Área (ha.)	%	Área (ha.)	%	Área (ha.)	%	Área (ha.)	%
Moderado (3)	38,623	26.96	38,542	26.90	38,881	27.14	38,913	27.16
Alto (4)	56,222	39.24	51,765	36.13	52,109	36.37	51,780	36.14
Muy alto (5)	15,793	11.02	19,679	13.73	23,072	16.10	23,096	16.12
Sin datos	32,645	22.78	33,297	23.24	29,221	20.39	29,494	20.58
Total	143,283	100	143,283	100	143,283	100	143,283	100

Fuente. Elaborado por la autora.

Como se puede apreciar en la tabla anterior, el rango de Alto ocupa el mayor por ciento del área de estudio, seguido del rango Moderado. De igual forma, el área con rango Alto de exposición costera no muestra cambios significativos en su extensión, entre los años 2010 y 2015, ocupando alrededor del 36%, mientras que en el primero (2008) ocupa alrededor del 39%; por lo que disminuyó su extensión entre los años 2008 y 2015. El área con rango Moderado sufrió un muy pequeño incremento de 0.2% entre el 2008 y el 2015, mientras que el área que corresponde al rango Muy alto disminuyó entre 2008 y 2015, alrededor de un 2%.

Índice de exposición costera en el año 2008



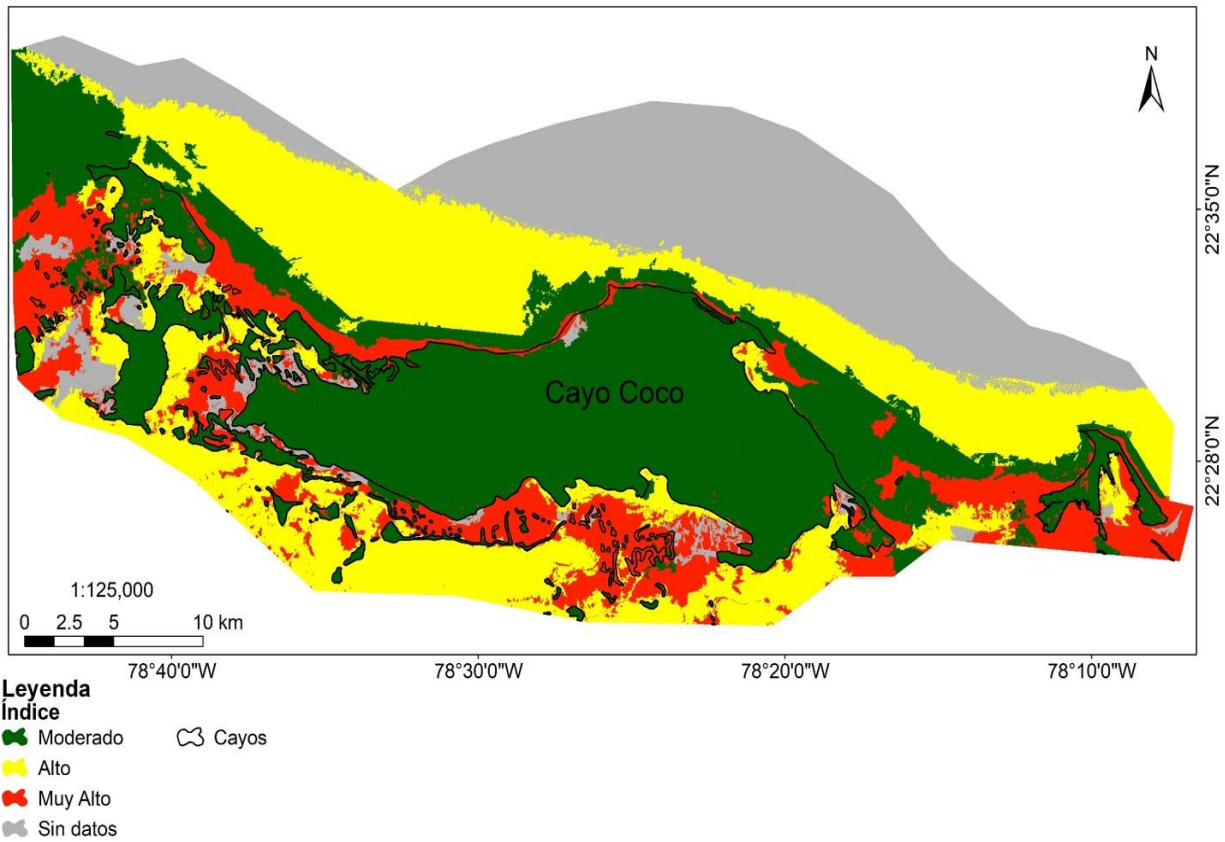
Autora: Lic. Yudysleyvis Ventura Díaz

Sistemas de Coordenadas Geográficas: WGS 1984
Datum: WGS 1984
Sistema de Coordenadas Proyectado: UTM Zona 17N
Proyección: Transversa de Mercator
Unidad lineal: Metros

Elaborado a partir de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+. Base de datos GEOCUBA. Escala 1:100,000

Figura 11. Distribución espacial del índice de exposición costera para el año 2008.

Índice de exposición costera en el año 2010



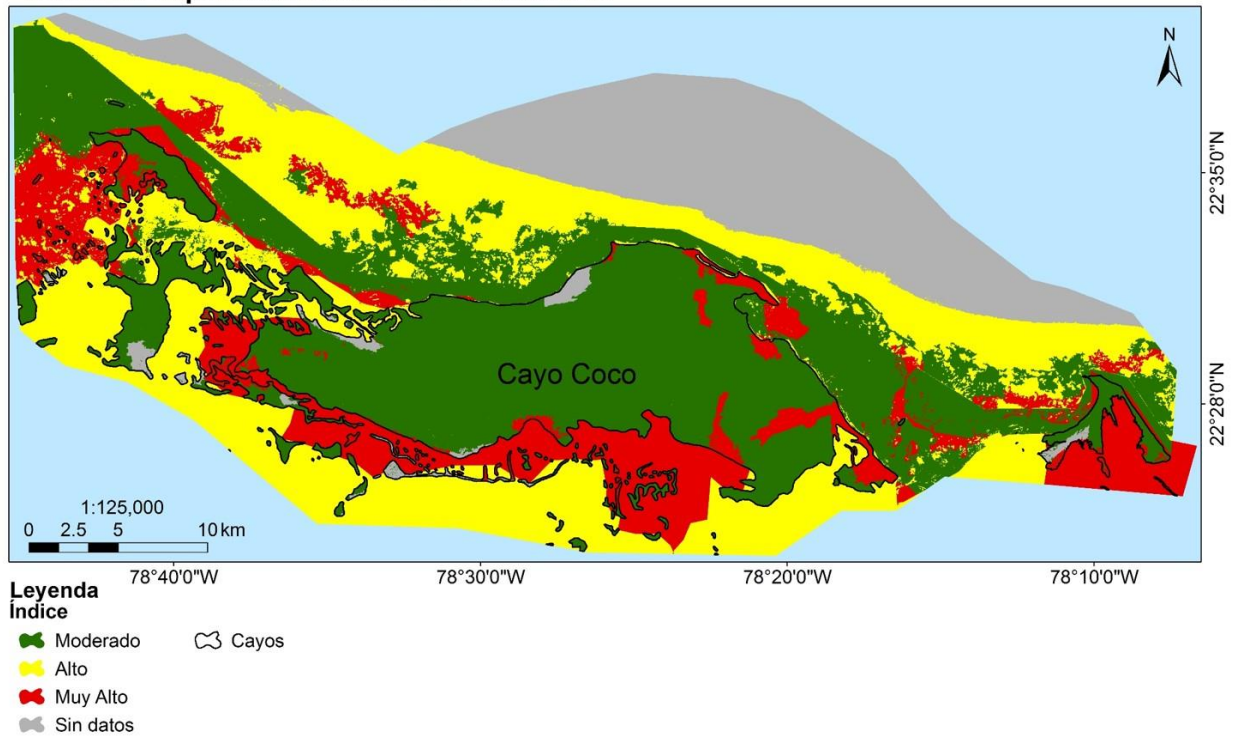
Autora: Lic. Yudysleyvis Ventura Díaz

Sistemas de Coordenadas Geográficas: WGS 1984
Datum: WGS 1984
Sistema de Coordenadas Proyectado: UTM Zona 17N
Proyección: Transversa de Mercator
Unidad lineal: Metros

Elaborado a partir de Imágenes satelitales Landsat 7 ETM+. Base de datos GEOCUBA. Escala 1:100,000

Figura 12. Distribución espacial del índice de exposición costera para el año 2010.

Índice de exposición costera en el año 2012



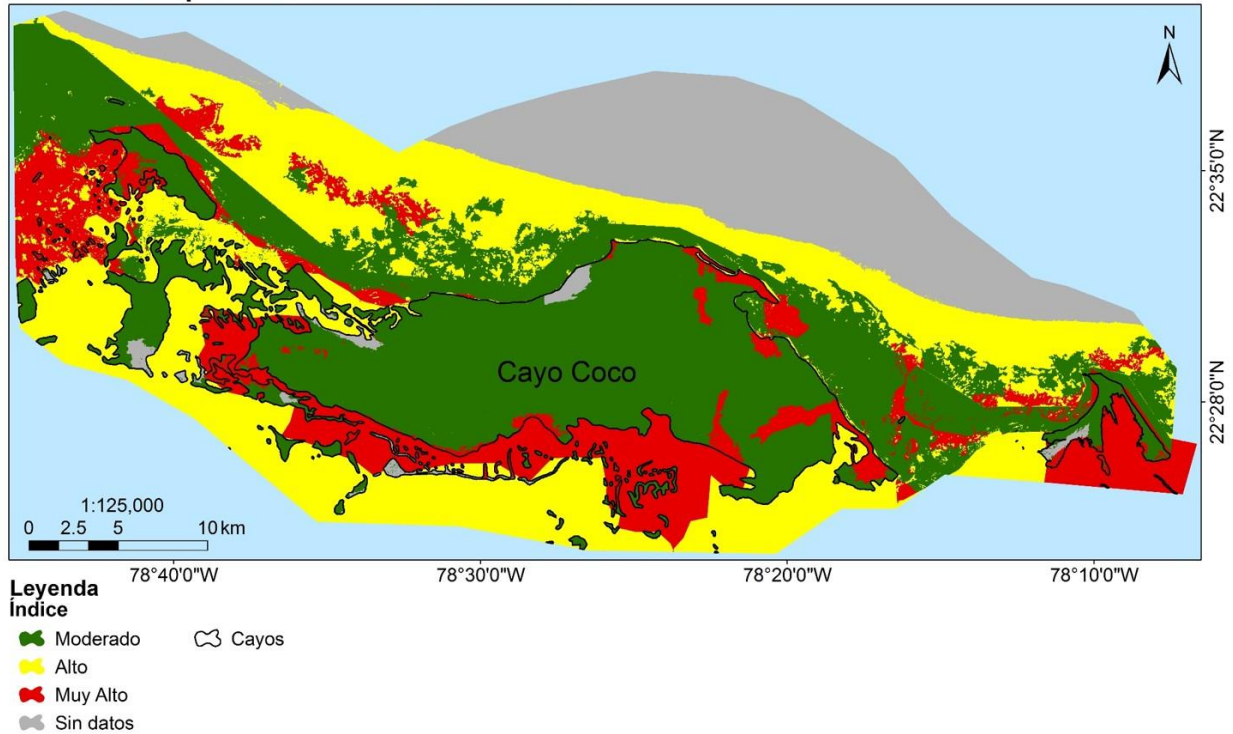
Autora: Lic. Yudysleyvis Ventura Díaz

Sistemas de Coordenadas Geográficas: WGS 1984
Datum: WGS 1984
Sistema de Coordenadas Proyectado: UTM Zona 17N
Proyección: Transversa de Mercator
Unidad lineal: Metros

Elaborado a partir de Imágenes satelitales Landsat 7 ETM+.
Base de datos GEOCUBA.
Escala 1:100,000

Figura 13. Distribución espacial del índice de exposición costera para el año 2012.

Índice de exposición costera en el año 2015



Autora: Lic. Yudysleyvis Ventura Díaz Sistemas de Coordenadas Geográficas: WGS 1984 Elaborado a partir de Imágenes satelitales Landsat 7 ETM+.
Datum: WGS 1984 Sistema de Coordenadas Proyectado: UTM Zona 17N Base de datos GEOCUBA.
Proyección: Transversa de Mercator Escala 1:100,000
Unidad lineal: Metros

Figura 14. Distribución espacial del índice de exposición costera para el año 2015.

En el comportamiento espacial del índice de exposición costera se observó que, si bien en todos los años el comportamiento fue de alta exposición, a partir del 2010 el rango de muy alta exposición costera ganó en área y hasta este año tuvo una distribución similar cerca de la costa tanto al norte como al sur del área de estudio. Ya a partir del 2012 sigue ganando en área el rango de muy alta pero su distribución es mayor en la costa sur que en la norte. El rango de alta exposición costera a partir de 2012 se comienza a observar ya en las coberturas vegetales de las

zonas terrestres sobre todo en Cayo Coco, lo que puede estar relacionado a la pérdida de vegetación en tierra firme producto a las actividades que se desarrollan en el área.

Las tablas y las figuras que se muestran a continuación dejan ver cuáles fueron los cambios de coberturas que se produjeron entre los años analizados, así como el por ciento que representan del área total. Igualmente, refleja el cambio del índice de exposición costera como resultado de los cambios en las coberturas identificadas en el área.

Entre los años 2008 y 2010 se produjeron 8 cambios de cobertura en el área de estudio para un total de 6,071.94 ha.; lo que representa el 4.24% del área total de la zona de estudio (143,283 ha.). En la tabla 10 se puede observar que el cambio de cobertura más significativo tuvo lugar entre el Fondo con pasto y el Fondo arenoso, con 3,651.67 ha.; mientras que el menos significativo tuvo lugar entre Fondo con pasto menos denso y Fondo arenoso, con 28.10 ha.

La cobertura que más dinamismo mostró, según la cantidad de variaciones en las que estuvo involucrada, fue Fondo arenoso, que estuvo involucrada en cuatro (4) variaciones, tres en las que ganó área (3,786.27 ha.) y una en la que perdió área (87.18 ha.). De igual forma, la cobertura Fondo arenoso con escasa vegetación solamente perdió área entre 2008 y 2010, con un total de 754.82 ha.

Tabla 10. Cambios de cobertura ocurridos entre los años 2008 y 2010.

Cambios de cobertura	2008	2010	Área (ha)	%	I₂₀₀₈	I₂₀₁₀	ΔI
	Fondo con pasto	Fondo arenoso	3,651.67	60.14	Alto	Muy Alto	Alto – Muy Alto
	Fondo con pasto	Fondo con pasto menos denso	1,273.79	20.98	Alto	Alto	Sin cambio
	Fondo arenoso con escasa vegetación	Fondo con pasto menos denso	648.32	10.68	Alto	Alto	Sin cambio
	Bosque de mangle	Fondo con pasto	165.30	2.72	Moderado	Alto	Moderado- Alto
	Infraestructura	Bosque de mangle	111.08	1.83	Muy Alto	Moderado	Muy alto – Moderado
	Fondo arenoso con escasa vegetación	Fondo arenoso	106.50	1.75	Alto	Muy Alto	Alto – Muy Alto
	Fondo arenoso	Bosque de mangle	87.18	1.44	Muy Alto	Moderado	Muy Alto – Moderado
	Fondo con pasto menos denso	Fondo arenoso	28.10	0.46	Alto	Muy Alto	Alto – Muy Alto
	Total			6071.94	4.24 ^c		

Área (ha.): Área que cambió de la cobertura en el 2008 a la cobertura en el 2010.

%: Por ciento que representa el valor de cada cambio de área del 2008 al 2010 respecto al total del Área (ha.)

I: Índice correspondiente a cada cobertura para cada año analizado.

ΔI: Cambio del índice de exposición costera del año anterior al año posterior.

^c: por ciento del área total que sufrió cambios respecto al área total de estudio (143,283.44 ha.)

Fuente: Elaborado por la autora.

En la figura 15, se muestra la distribución espacial de los cambios de coberturas ocurridos entre los años 2008-2010 en el área de estudio. Lo que complementa las explicaciones expuestas anteriormente.

Cambios de coberturas ocurridos entre los años 2008 y 2010

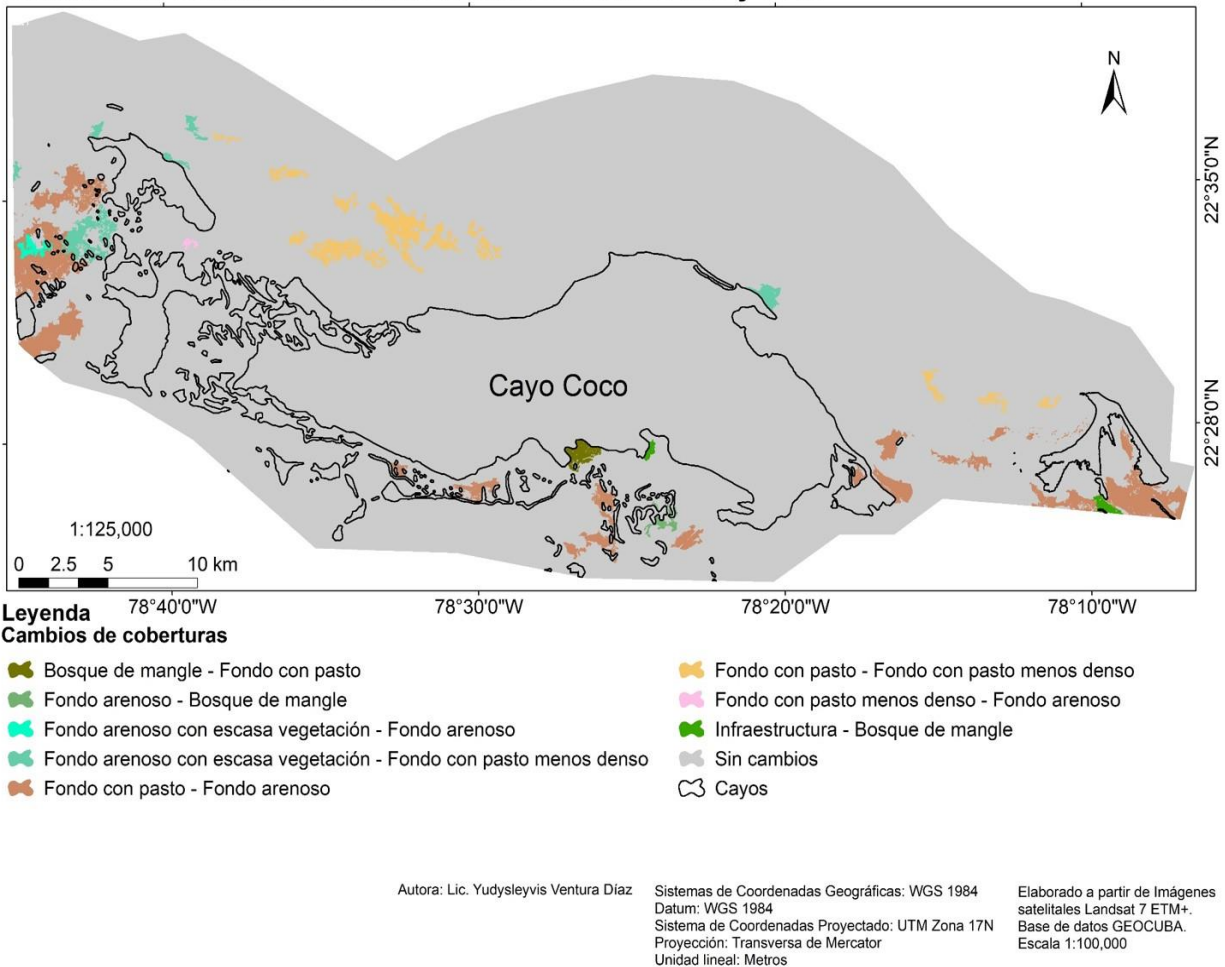


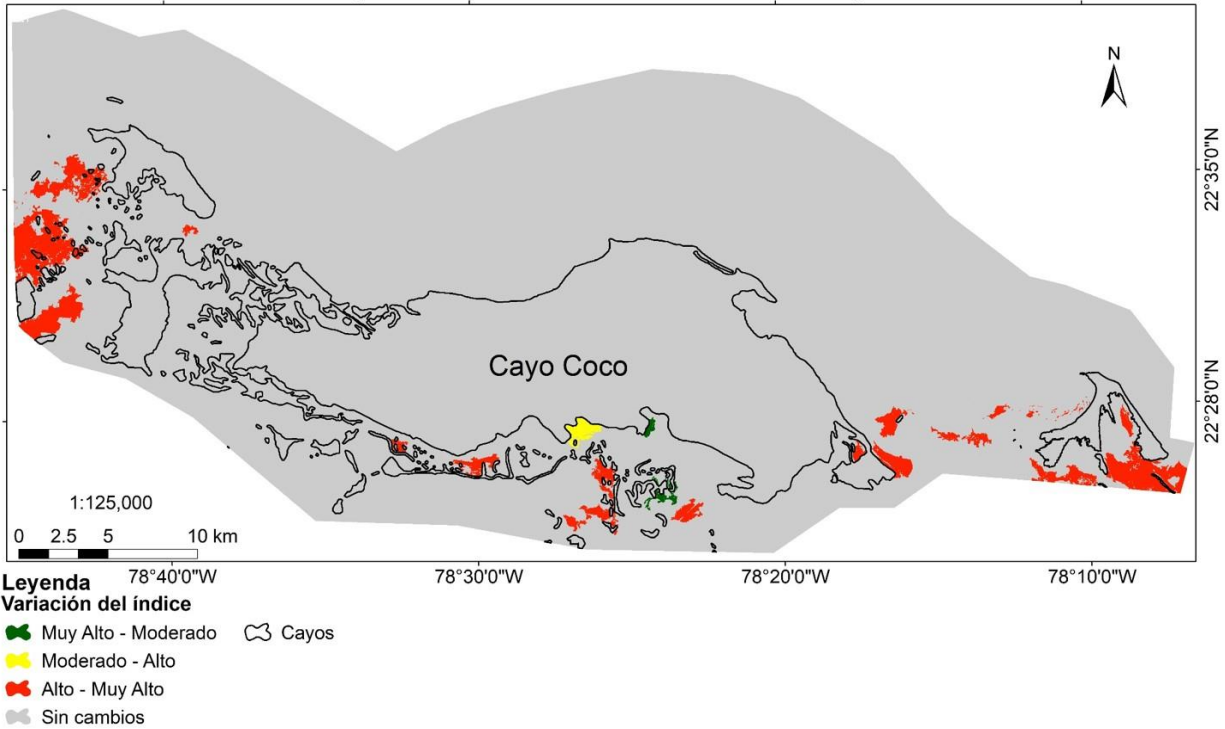
Figura 15. Cambios de cobertura ocurridos entre los años 2008 y 2010

El análisis del índice de exposición costera y los cambios sufridos por éste en función de las variaciones de las coberturas (Tabla 10) muestra que el 65% del área que sufrió modificaciones entre 2008 y 2010 provoca un cambio de Alto a Muy Alto en el índice de exposición costera; mientras que el 3% de las variaciones de cobertura que tuvieron lugar entre el 2008 y el 2010 genera un cambio de Muy Alto a Moderado del índice de exposición costera, como resultado de la suma de los porcentajes correspondiente a los valores negativos en la última columna de la tabla. De igual forma, el 32% de las variaciones no afecta el índice de exposición costera del área de estudio, por ser coberturas agrupadas en la misma categoría de los valores del índice.

De forma general, el índice de exposición costera entre los años 2008 y 2010 se incrementó (ver tabla 10) como resultado de los cambios de coberturas ocurridos entre estos dos años, pues la mayor área así como la mayor cantidad de variaciones provocó un aumento de la exposición; lo que hacen que la zona esté más expuesta a ser afectada por el oleaje y surgencia de tormenta generadas por fenómenos hidro-meteorológicos.

Si observamos la figura 16, a continuación, se puede ver que la zona ubicada al sur de los cayos es la que generó un incremento del índice de exposición costera, sobre todo asociado a la aparición de Fondo arenoso en sustitución de los Fondos con pasto y pasto menos denso, como se aprecia en la figura 15. En la zona norte no se producen cambios en el índice de exposición costera.

Variación del índice de exposición costera entre los años 2008 y 2010



Autora: Lic. Yudysleyvis Ventura Díaz Sistemas de Coordenadas Geográficas: WGS 1984 Elaborado a partir de Imágenes satelitales Landsat 7 ETM+.
 Datum: WGS 1984 Sistema de Coordenadas Proyectado: UTM Zona 17N Base de datos GEOCUBA.
 Proyección: Transversa de Mercator Escala 1:100,000
 Unidad lineal: Metros

Figura 16. Variaciones del índice de exposición costera entre los años 2008 y 2010 como resultado de los cambios en los tipos de coberturas identificadas en estos años.

En la figura 17 se puede observar un predominio de los ecosistemas o coberturas marinas (Fondo con pasto, Fondo arenoso, Fondo con pasto menos denso y Fondo arenoso con escasa vegetación), con la total ausencia de coberturas terrestres como Bosque semidecídúo y Bosque siempre verde micrófilo. Esto muestra que los principales cambios entre los años 2008 y 2010 tienen lugar en la zona marina, mientras que las coberturas terrestres permanecen invariables, a excepción de Bosque de mangle, que aumenta su presencia e influye considerablemente en el índice de exposición costera.

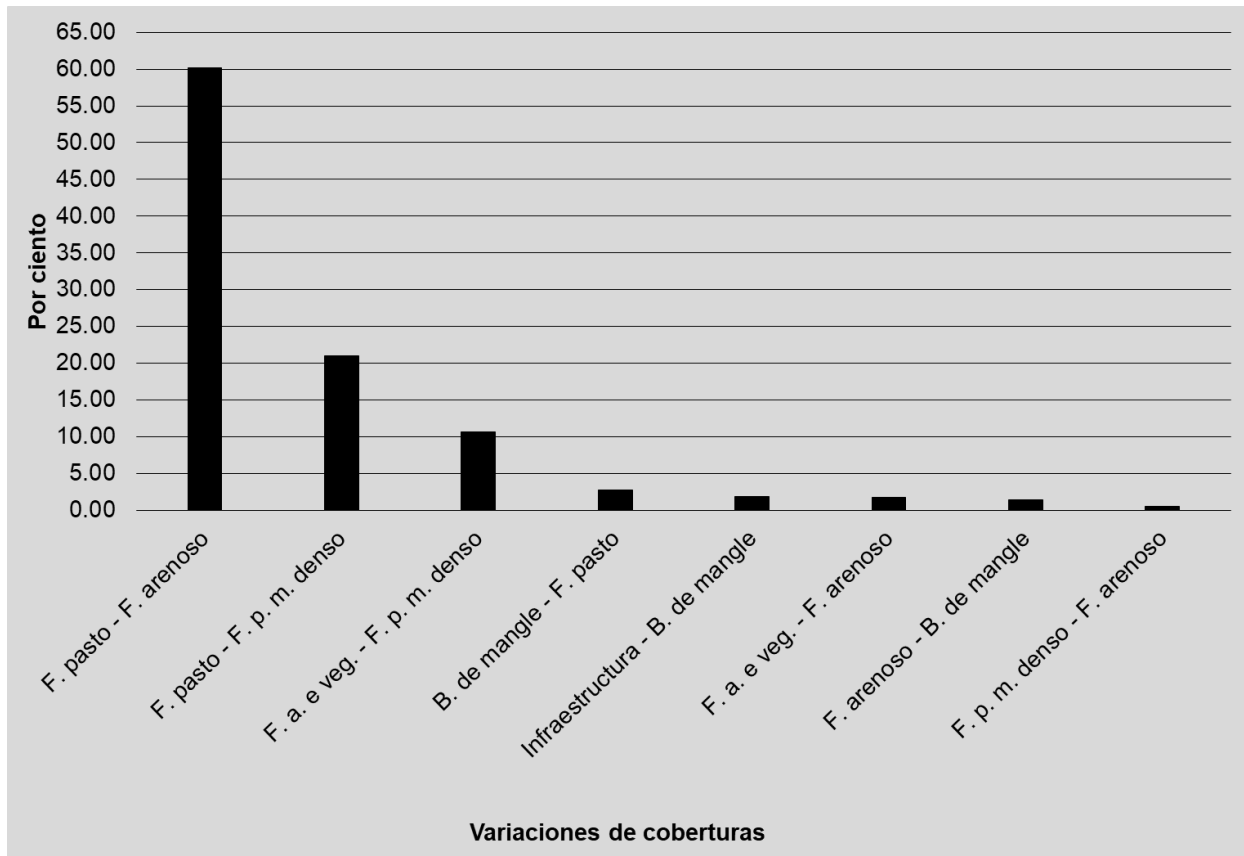


Figura 17. Distribución porcentual de las áreas de las coberturas que cambiaron entre los años 2008 y 2010. (B. de mangle: Bosque de mangle; F. pasto: Fondo con pasto; F. arenoso: Fondo arenoso; F. p. m. denso: Fondo con pasto menos denso; F. a. e. veg.: Fondo arenoso con escasa vegetación)

El análisis combinado de las figuras 15, 16 y 17 nos muestra cómo el área está más expuesta por concepto de los cambios en las coberturas identificadas; principalmente en la porción sur del territorio, como resultado del cambio del rango Alto a muy Alto en el índice. Adicionalmente, existen variaciones en coberturas que no generaron cambios en el índice de exposición costera pues presentaron el mismo rango asociado.

Respecto a los años 2010 y 2012, la cantidad de variaciones que tuvieron lugar en el área de estudio fue de 6, con un total de 8,346.75 ha., lo que representa el 6% del área de estudio. Como se puede observar en la siguiente figura.

Cambios de coberturas ocurridos entre los años 2010 y 2012

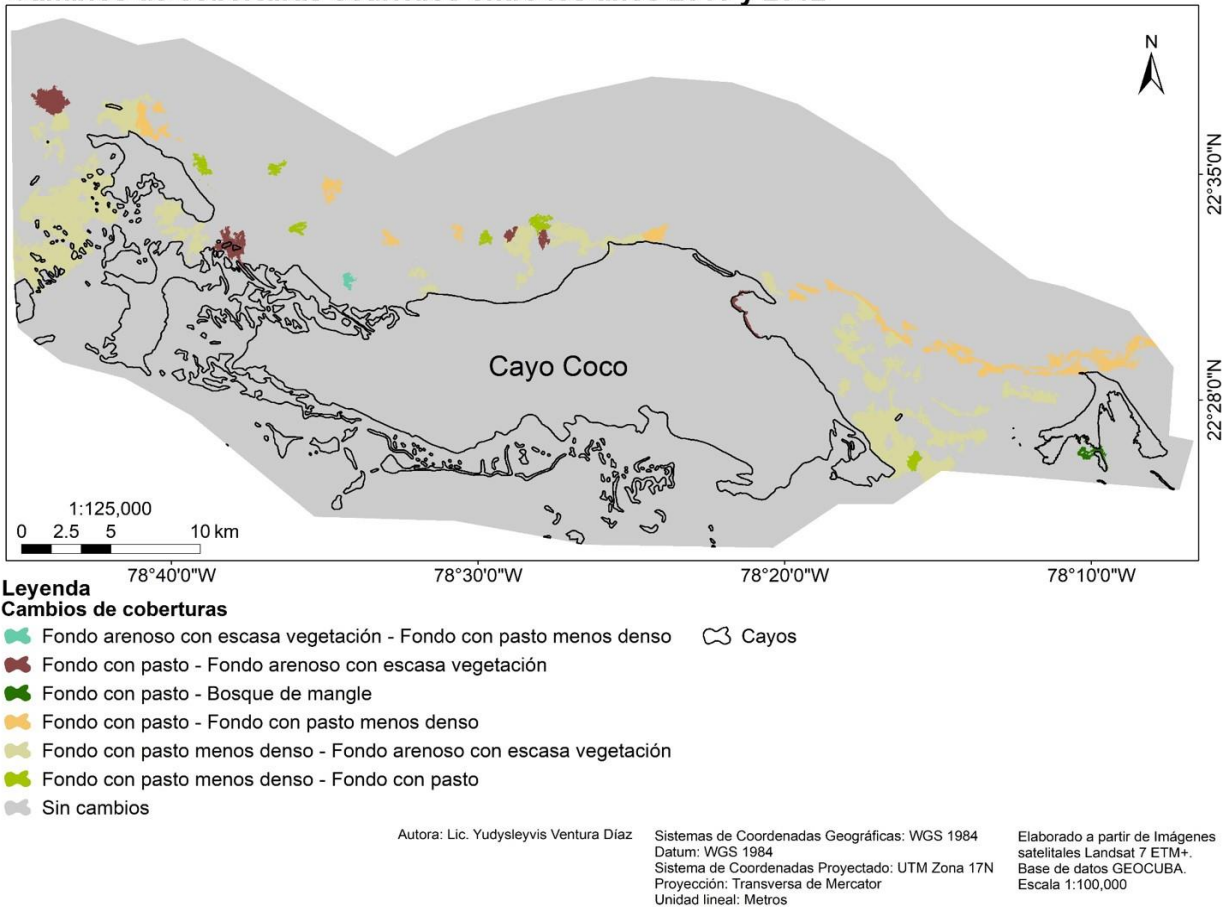


Figura 18. Cambios de cobertura ocurridos entre los años 2010-2012.

La tabla (11) muestra que el cambio más significativo tuvo lugar entre el Fondo con pasto menos denso y Fondo arenoso con escasa vegetación, con 6,001.40 ha., lo que representa el 71% del total del área que sufrió modificaciones entre estos dos años. De igual forma, el cambio menos significativo fue de Fondo arenoso con escasa vegetación a Fondo con pasto menos denso, con 40.91 ha., representando el 0.49% del área modificada entre 2010 y 2012.

La cobertura más dinámica entre estos dos años fue Fondo con pasto menos denso, pues estuvo involucrada en cuatro variaciones, dos ganando área (1,430.96 ha.) y dos perdiendo área

(6,337.14). La menos dinámica, involucrada en una sola variación, resultó ser Bosque de mangle (77.51 ha.), viendo aumentada su extensión superficial entre el 2010 y el 2012.

Tabla 11. Cambios de cobertura ocurridos entre los años 2010 y 2012.

	2010	2012	Área (ha.)	%	I ₂₀₁₀	I ₂₀₁₂	ΔI
Cambio de cobertura	Fondo con pasto menos denso	Fondo arenoso con escasa vegetación	6,001.40	71.56	Alto	Alto	Sin cambio
	Fondo con pasto	Fondo con pasto menos denso	1,390.05	16.57	Alto	Alto	Sin cambio
	Fondo con pasto	Fondo arenoso con escasa vegetación	541.13	6.45	Alto	Alto	Sin cambio
	Fondo con pasto menos denso	Fondo con pasto	335.74	4.00	Alto	Alto	Sin cambio
	Fondo con pasto	Bosque de mangle	77.51	0.92	Alto	Moderado	Alto - Moderado
	Fondo arenoso con escasa vegetación	Fondo con pasto menos denso	40.91	0.49	Alto	Alto	Sin cambio
	Total		8,386.75	5.85 ^c			

Área (ha.): Área que cambió de la cobertura en el 2010 a la cobertura en el 2012.

%: Por ciento que representa el valor de cada cambio de área del 2010 al 2012 respecto al total del Área (ha.)

I: Rango del índice correspondiente a cada cobertura para cada año analizado.

ΔI: Cambio del índice de exposición costera del año anterior al año posterior.

^c: por ciento del área total que sufrió cambios respecto al área total de estudio (143,283.44 ha.)

Fuente: Elaborado por la autora.

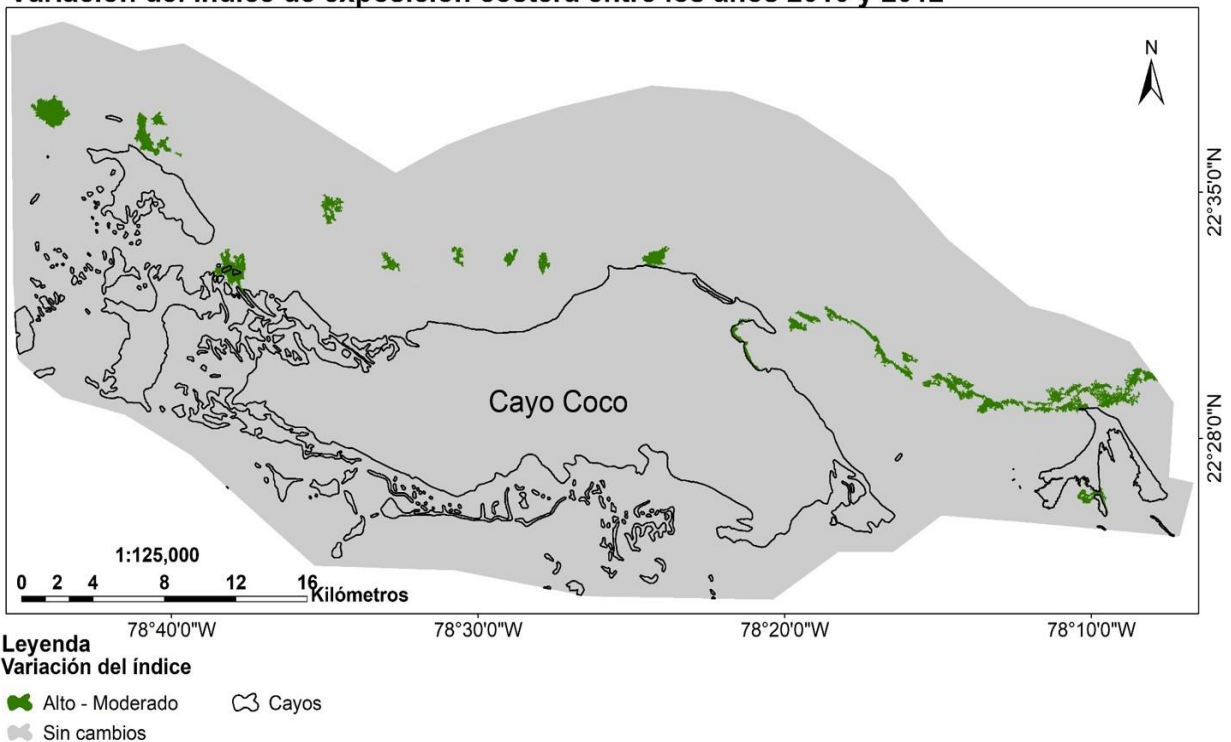
El análisis del índice de exposición costera (tabla 11) muestra que solamente una (1) de las 6 variaciones provocó una disminución en el índice de exposición costera, pues reduce los rangos del índice entre un año y otro; representando el 0.92% del área que sufrió modificaciones. El resto de las 6 variaciones (5) no provocaron modificaciones en el índice de exposición costera, representando el 99.08% del área que se modificó, aunque el rango que presentan es Alto.

En general, el índice disminuyó de Alto a Moderado, entre los años 2010 y 2012, si solamente tenemos en cuenta las variaciones de coberturas que provocaron cambios en el índice; lo que representó un decremento en la exposición del área a fenómenos hidro-meteorológicos y sus consecuencias y una mayor protección brindada por los ecosistemas o coberturas identificadas en

la zona. Esto se debe al cambio de coberturas como Fondo con pasto, que genera menos oposición al movimiento del agua; a coberturas como Bosque de mangle, que genera mayor resistencia al movimiento del agua como resultado de la acción de fenómenos hidro-meteorológicos. Aunque esto no significa que el área no esté expuesta, pues predomina el rango Alto del índice de exposición costera.

Si nos fijamos en la figura 19 podemos percibir que, contrario al período 2008-2010, las mayores variaciones del índice de exposición costera se produjeron en la zona norte de los cayos y hacia rangos menores, por lo que el índice de exposición costera se redujo entre los años 2010 y 2012. Adicionalmente, el área que ocuparon las variaciones del índice de exposición costera fue pequeña.

Variación del índice de exposición costera entre los años 2010 y 2012



Autora: Lic. Yudysleyvis Ventura Díaz Sistemas de Coordenadas Geográficas: WGS 1984 Elaborado a partir de Imágenes satelitales Landsat 7 ETM+.
 Datum: WGS 1984 Base de datos GEOCUBA.
 Sistema de Coordenadas Proyectado: UTM Zona 17N Escala 1:100,000
 Proyección: Transversa de Mercator
 Unidad lineal: Metros

Figura 19. Variaciones del índice de exposición costera entre los años 2010 y 2012 como resultado de los cambios en los tipos de coberturas identificadas en estos años.

En la siguiente figura (20) se observa la distribución porcentual de las variaciones respecto al total del área que sufrió modificaciones entre el 2010 y el 2012. Se ve cómo se da un predominio de las coberturas marinas en los cambios de coberturas, sobre todo aquellas coberturas identificadas como Fondo con pasto menos denso, Fondo arenoso con escasa vegetación y Fondo con pasto; las cuales están presentes tanto en las variaciones más significativas como en las menos significativas, según el por ciento de cambio respecto al área total que se modificó entre estos dos

años. Solamente la cobertura de Bosque de mangle mostró cambios entre el 2010 y 2012 de las coberturas identificadas en la parte terrestre.

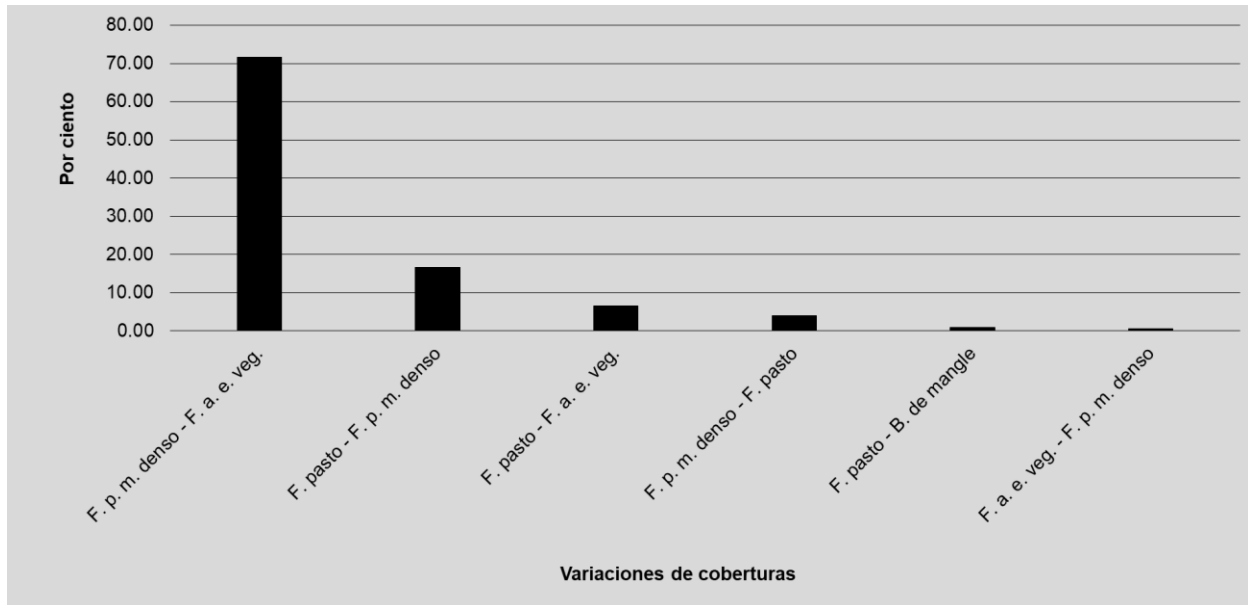


Figura 20. Distribución porcentual de las áreas de las variaciones de coberturas identificadas entre los años 2010 y 2012. (B. de mangle: Bosque de mangle; F. pasto: Fondo con pasto; F. arenoso: Fondo arenoso; F. p. m. denso: Fondo con pasto menos denso; F. a. e. veg.: Fondo arenoso con escasa vegetación)

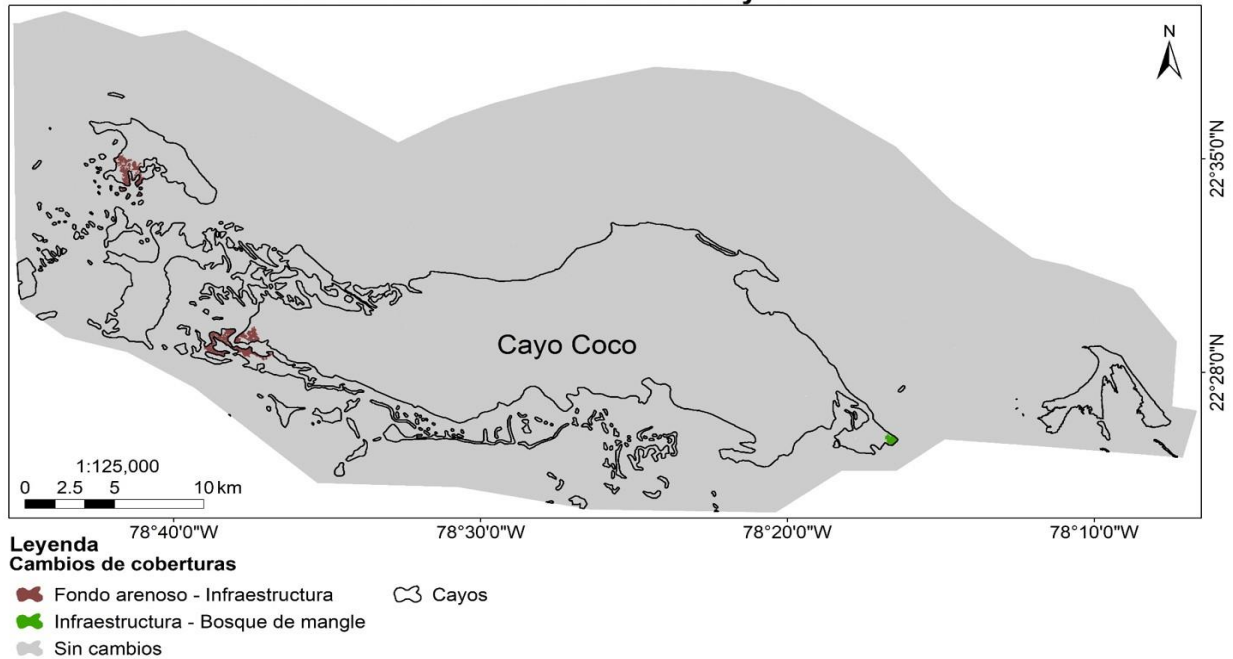
Esto muestra una vez más que el dinamismo de las coberturas marinas es superior al dinamismo de las coberturas terrestres, o que existen ciertos elementos que generan más presión o mayor cambio en las coberturas marinas que en las terrestres.

El análisis de las figuras 18, 19 y 20 muestra que, si bien se producen 6 variaciones de coberturas distribuidas bastante uniformemente en los alrededores de la cayería, muchas de las variaciones se producen entre coberturas con igual rango de exposición, por lo que no generan variaciones en el índice de exposición costera. Adicionalmente, las variaciones de cobertura con mayor extensión superficial son aquellas que poseen rangos similares, por lo que no se reflejan en el

mapa de variaciones del índice de exposición costera. La disminución del índice de exposición costera está asociado a la recuperación de coberturas como Bosque de mangle y Fondo con pasto.

Entre los años 2012 y 2015 se identificaron solamente dos (2) variaciones o cambios de cobertura, con un área total de cambio de 403.59 ha.; lo que representa el 0.28% del área de estudio. Dichos cambios están ubicados en la zona sur de los cayos Coco y Guillermo.

Cambios de coberturas ocurridos entre los años 2012 y 2015



Autora: Lic. Yudysleyvis Ventura Díaz Sistemas de Coordenadas Geográficas: WGS 1984
Datum: WGS 1984 Elaborado a partir de Imágenes satelitales Landsat 7 ETM+.
Sistema de Coordenadas Proyectado: UTM Zona 17N Base de datos GEOCUBA.
Proyección: Transversa de Mercator Escala 1:100,000
Unidad lineal: Metros

Figura 21. Cambios de cobertura ocurridos entre los años 2012-2015

La tabla 12 muestra que el cambio más importante ocurrió entre las coberturas Fondo arenoso e Infraestructura, con un total de 371.03 ha.; lo que representa el 92% del área que sufrió

modificaciones entre los años 2012 y 2015. De igual forma, la variación que menos modificaciones experimentó fue Infraestructura – Bosque de mangle, con 32.56 ha.; lo que significa el 8% del área modificada entre ambos años.

Tabla 12. *Cambios de cobertura ocurridos entre los años 2012 y 2015.*

	2012	2015	Área (ha.)	%	I ₂₀₁₂	I ₂₀₁₅	ΔI
Cambio de cobertura	Fondo arenoso	Infraestructura	371.03	91.93	Muy Alto	Muy Alto	Sin cambios
	Infraestructura	Bosque de mangle	32.56	8.07	Muy Alto	Moderado	Muy Alto - Moderado
	Total		403.59	0.28 ^c			

Área (ha.): Área que cambió de la cobertura en el 2012 a la cobertura en el 2015.

%: Por ciento que representa el valor de cada cambio de área del 2012 al 2015 respecto al total del Área (ha.)

I: Rango del índice correspondiente a cada cobertura para cada año analizado.

ΔI: Cambio del índice de exposición costera del año anterior al año posterior.

^c: por ciento del área total que sufrió cambios respecto al área total de estudio (143,283 ha.)

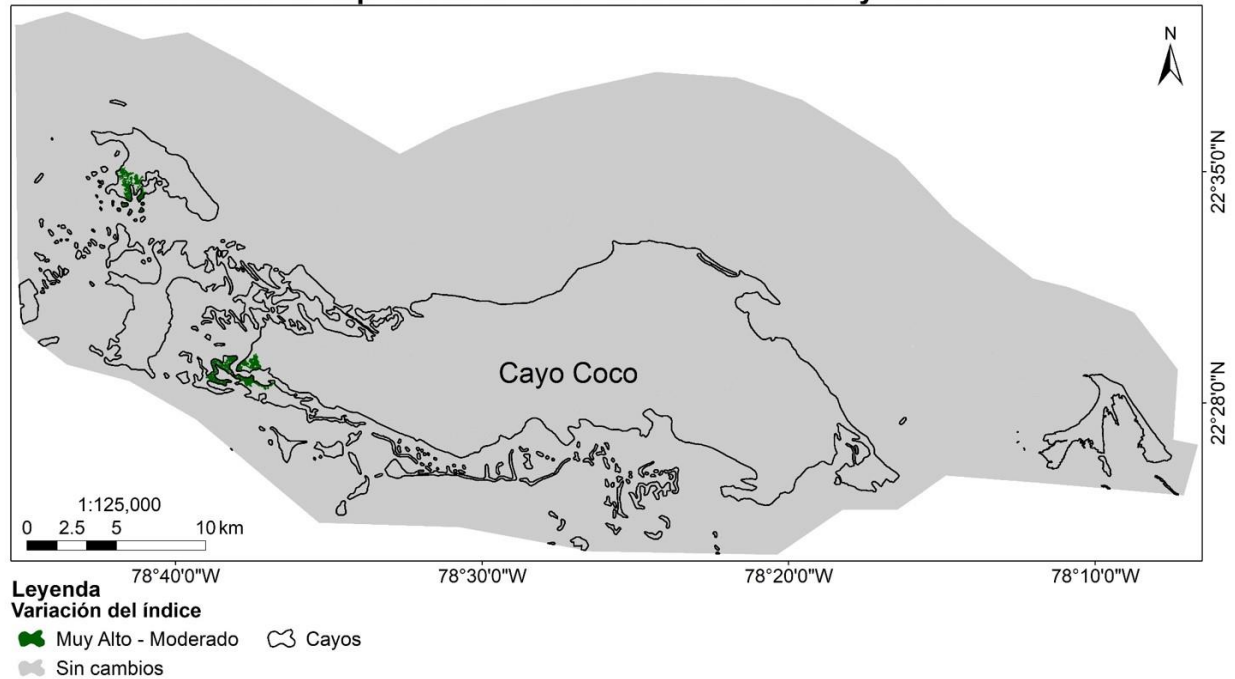
Fuente: Elaborado por la autora.

En relación con el índice de exposición costera (Tabla 12) podemos decir que en sentido general éste disminuye de Muy Alto a Moderado en el año 2015 respecto al año 2012, lo que significa que el cambio de cobertura experimentado entre los años 2012 y 2015 generó una menor exposición del área ante eventos que generen surgencia de tormenta y erosión. De igual forma, el área sigue presentando un índice de exposición Alto, si tenemos en cuenta que predomina este rango y que el mayor porcentaje de área que se modificó entre 2012 y 2015 no genera cambios en el rango del índice de exposición costera.

Si analizamos la figura 22 podemos percatarnos de dos aspectos: primero los cambios en el índice de exposición costera están concentrados en la zona sur de los cayos, principalmente hacia el oeste de estos; y segundo que son bastante reducidos en cuanto al área que ocupan en el mapa. Si bien el comportamiento general del índice disminuyó, el área que ocupa la zona con decremento

del rango del índice es muy pequeña comparada con la extensión del territorio y con el área que sufrió modificaciones en la cobertura pero no influyó en el comportamiento del índice.

Variación del índice de exposición costera entre los años 2012 y 2015



Autora: Lic. Yudysleyvis Ventura Díaz Sistemas de Coordenadas Geográficas: WGS 1984 Elaborado a partir de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+.
 Datum: WGS 1984 Sistema de Coordenadas Proyectado: UTM Zona 17N Base de datos GEOCUBA.
 Proyección: Transversa de Mercator Unidad lineal: Metros Escala 1:100,000

Figura 22. Variaciones del índice de exposición costera entre los años 2012 y 2015 como resultado de los cambios en los tipos de coberturas identificadas en estos años.

El análisis de la figura 23 muestra cómo las variaciones que tienen lugar entre 2012 y 2015 están asociadas a la actividad humana, al estar presente la cobertura infraestructura en ambas variaciones ocurridas.

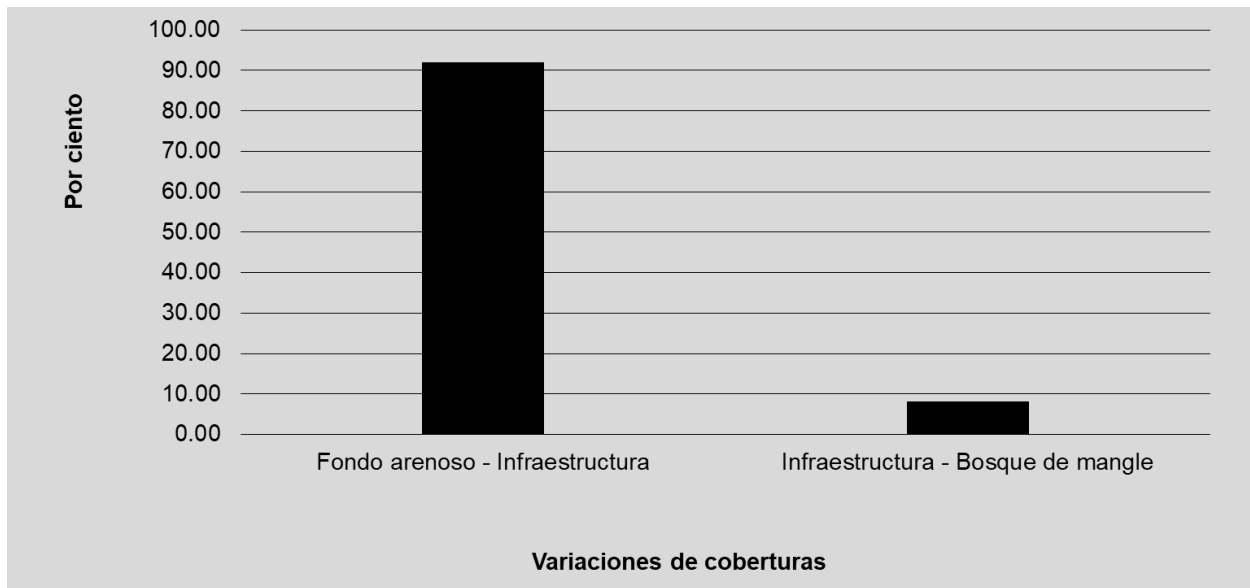


Figura 23. Distribución porcentual de las áreas de las variaciones de coberturas identificadas entre los años 2012 y 2015.

El análisis conjunto de las figuras 21, 22 y 23 nos muestra que las variaciones de coberturas entre los años 2012 y 2015 fueron pocas y que, además, solamente una de estas variaciones generó cambios en el índice de exposición costera en la zona. Dicha variación se centraron en la parte sudeste del área y básicamente en las cercanías de los límites de los cayos, vinculadas a la pérdida de coberturas como Fondo arenoso y al incremento de coberturas como infraestructura y Bosque de mangle.

En sentido general, el 15.77% del área de estudio sufrió modificaciones entre los años 2008 y 2015, lo que representa un total de 22,586.48 hectáreas. Las coberturas marinas mostraron mayores cambios que las coberturas terrestres, de las cuales solamente el Bosque de mangle mostró cambios en todos los períodos de tiempo analizados. Las coberturas Fondo con pasto y Fondo arenoso fueron las que más modificaciones sufrieron en sentido general, la primera perdiendo extensión y la segunda ganando extensión.

En relación al índice de exposición costera, en el área predominó una exposición Alta, con la zona sur más expuesta y los rangos Muy Alto a Alto se encontraron en la zona marina, mientras que la zona norte tuvo un predominio de los rangos de Moderado a Alto. La zona terrestre se comportó de manera similar en toda su extensión, con predominio del rango Moderado en todos los años analizados.

La recuperación del Bosque de mangle es el elemento principal en la disminución del índice de exposición costera entre los años 2008 y 2015. Adicionalmente, aunque el Fondo con pasto pierde extensión entre el 2008 y el 2015, la aparición de este en zonas donde anteriormente existía Fondo arenoso es otro aspecto que provoca una disminución del índice y por ende una menor exposición de la zona. Tanto el Bosque de mangle como el Fondo con pasto son de las coberturas que mayor protección brindan pues reducen considerablemente la energía de las olas y de las surgencias de tormentas que son el resultado del paso de fenómenos hidro-meteorológicos.

En dos períodos de tiempo analizados (2010 – 2012 y 2012 – 2015) el índice de exposición costera disminuye, aunque dicha disminución no logra contrarrestar el aumento del índice, provocado por el hecho que el Fondo con pasto sea la cobertura que mayor extensión superficial pierde y el Fondo arenoso la que mayor extensión superficial gana. En este sentido, la mayor ganancia de áreas con coberturas como Fondo arenoso y Fondo arenoso con escasa vegetación, asociadas a rangos del índice de exposición costera más elevados; en comparación con coberturas como Bosque de Mangle y Fondo con pasto, asociadas a rangos de índice de exposición costera más

bajos, reafirman el hecho que el rango general de índice aumente en el período de tiempo analizado.

Otro aspecto interesante es que, si bien entre el 2008 y el 2010 las variaciones de coberturas con mayor extensión superficial generan un aumento del índice de exposición costera, en los períodos 2010-2012 y 2012-2015 las variaciones de coberturas con mayor extensión superficial no generan cambios en el índice de exposición costera.

Conclusiones:

1. Las clasificaciones realizadas permitió identificar 10 tipos de coberturas como: Bosque de mangle, Bosque semidecídúo, Bosque siempre verde micrófilo, Comunidades halófitas, Fondo arenoso, Fondo arenoso con escasa vegetación, Fondo con pasto, Fondo con pasto menos denso, Infraestructura y Vegetación secundaria; abarcando todas las coberturas esperadas a partir de trabajos de campo de otros autores; con predominio Fondo con pasto y Bosque semidecídúo, en las coberturas marinas y terrestres, respectivamente.
2. La cobertura que más área ganó entre los años 2008 y 2015 fue Fondo arenoso, con 7,075 ha.; mientras que la que más perdió fue Fondo con pasto, con 7,176 ha, cuestión esperada dado el conocido proceso de erosión de playas que está teniendo lugar en el área de estudio, provocando el movimiento de arenas hacia la parte sumergida, con el consecuente enterramiento de los pastos marinos.
3. La variación de cobertura Fondo con pasto – Fondo arenoso entre el 2008 y el 2010 provocó un aumento en el índice de exposición costera (IEC); mientras que los cambios de Fondo arenoso, Infraestructura y Fondo con pasto a Bosque de mangle entre 2008 y 2015 fueron las que generaron mayor disminución en el IEC. Esto se debe a la recuperación del Bosque de mangle en algunos sectores de la línea de costa, con el consecuente aumento de la protección que esta cobertura brinda a la zona costera.
4. Los cambios de cobertura entre el año 2008 y el 2015 de forma general, provocaron un incremento en el rango del índice de exposición costera de la zona, agravando el carácter de Alta exposición del área de estudio y evidenciando que los ecosistemas han disminuido su función de protección de la misma; cuestión esperada debido al evidente deterioro de las playas como resultado de la erosión costera que se experimenta en el área de estudio.

5. Las variaciones en el tipo de cobertura se corresponden con los cambios en el rango del IEC, pues el Fondo arenoso es la cobertura que mayor área gana y el Fondo con pasto la que mayor área pierde; provocando que el índice de exposición costera aumente entre los años 2008 y 2015.

Recomendaciones:

1. Analizar la influencia de los fenómenos meteorológicos y el desarrollo turístico sobre los cambios de coberturas, para poder determinar cuál de ambos fenómenos es el que más influye en el cambio de cobertura y poder elaborar planes de manejo en función de enfrentar ambos fenómenos.
2. Calcular los valores del índice exposición costera del modelo InVEST mediante la inclusión de los demás indicadores que se tienen en cuenta en el cálculo del mismo, para obtener un valor más cercano a la realidad y que incluya los cambios en los demás elementos incluidos en el cálculo del índice de exposición costera de InVEST y poder comparar este estudio con los desarrollados en otros países como Bahamas y Belice.
3. Informar a los tomadores de decisiones de los cambios de coberturas identificados para que se tengan en cuenta en los planes de desarrollo turístico de los cayos y se tomen medidas para la protección y mejoramiento de aquellas coberturas que experimentaron reducción de su área y que juegan un papel importante en el mantenimiento de las condiciones ecológicas y ambientales.

Referencias

- Arkema, Katie K., Verutes, Gregory M., Wood, Spencer A., Clarke-Samuels, Chantalle., Rosado, Samir, Canto, Maritza, Rosenthal, Amy, Ruckelshaus, Mary, Guannel, Gregory, Toft, Jodie, Faries, Joe, Silver, Jessica M., Griffin, Robert, Guerry, Anne D. (2015). Embedding ecosystem services in coastal planning leads to better outcomes for people and nature. Proceedings of the National Academy of Sciences. Volume 112, Issue 24. DOI: [10.1073/pnas.1406483112](https://doi.org/10.1073/pnas.1406483112)
- Bezautry, J (2007): “El Papel de los servicios ambientales para evitar la deforestación en México”.
- Batista Tamayo, L.M., R. González de Zayas, A. Zúñiga Ríos, F. Matos Pupo, L. Hernández Roque y D. González Alfonzo. (2006). Atributos físicos del norte de la provincia de Ciego de Ávila. En: Ecosistemas costeros: biodiversidad y gestión de recursos naturales. Compilación por el XV Aniversarios del CIEC. Sección I. Ecosistemas del norte de la provincia Ciego de Ávila. CIEC. Editorial CUJAE. ISBN: 959-261-254-4. Pp 494.
- CAF (2014). Índice de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la región de América Latina y el Caribe. Corporación Andina de Fomento. ISBN: 978-980-7644-61-7. <http://www20.iadb.org/intal/catalogo/PE/2014/15019es.pdf>
- Castro, R. (1999). Sistema para el Seguimiento y Análisis de Tierras mediante Teledetección (TeleSAT). Bases teóricas. Información sobre tierras agrícolas y

aguas para el desarrollo agrícola sostenible. Proyecto: GCP/RLA/126/JPN. Programa de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Pp. 88.
http://www2.inia.cl/medios/platina/descarga/TallerSatelital/bsesteoricasp.remota_rcastro.pdf

- Chuvieco, E. (2008). Libro: Teledetección Ambiental. Barcelona. Book Print Dgital.457 Pp.
- Chuvieco, E. (2000) Fundamentos de Teledetección espacial, RIALP, 568 Pp.
- Cobos, M.E. *et al.*, (2015). Análisis multitemporal del Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI) en Cuba. Revista del Jardín Botánico Nacional de Cuba. Flora y Vegetación. Vol. 37, Pp 15-18. Enero 2016.
- Colectivo de autores (1994). Características hidrometeorológicas y climáticas de las playas de Cayo Coco. Centro de Investigaciones de Ecosistemas Costeros. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, Cuba. Pp. 18.
- Colectivo de autores (2007): Ciudad de la Habana: Evaluación de Riesgos por Penetración del Mar en los Municipios Costeros. Mejores prácticas en gestión de riesgos. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Iniciativa para el Manejo de Riesgos en el Caribe. 2007. Pp. 24.

- Colectivo de autores (2010). Estudio ingeniero geológico de Punta Raza en Playa Larga. Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA). Unidad de Investigaciones para la Construcción Camagüey. pp. 14.
- Colectivo de autores (2011). Estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgos asociados a intensas lluvias, penetraciones del mar y afectaciones por fuertes vientos. Informe del proyecto “Estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgo en la República de Cuba”. Agencia de Medio Ambiente de la República de Cuba. Noviembre de 2011. Pp. 130.
- D.N. Barton, D.P. Faith, G.M. Rusch, H. Acevedo, L. Paniagua, M. Castro, Environmental service payments: Evaluating biodiversity conservation trade-offs and cost-efficiency in the Osa Conservation Area, Costa Rica, *Journal of Environmental Management*, Volume 90, Issue 2, 2009, Pages 901-911, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.02.010>.
- Denis Ávila, D. (2015). Análisis multitemporal de imágenes *Landsat* para evaluar las variaciones de la cobertura vegetal emergente en la laguna Leonero, Granma, Cuba. *Revista del Jardín Botánico Nacional de Cuba. Flora y vegetación*. Vol. 36, Pp 47-53. Agosto 2015.
- Departamento de Protección, EMNDC (2005): Guía para la realización de estudios de riesgo para situaciones de desastres. Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil. República de Cuba. Agosto de 2005.

- ERDAS field guide. Sixth edition. (2002). Leica Geosystem, GIS & Mapping Division. 2801 Buford Highway, NE, Atlanta, Georgia, 30329-2137, USA. Pp 686. <http://web.pdx.edu/~emch/ip1/FieldGuide86.pdf>
- Estrada, R. *et al.*, (2013). Mapa (BD-SIG) de vegetación natural y seminatural de Cuba V.1 sobre Landsat ETM 7 SLC-OFF GAP FILLED, Circa 2011. IV Congreso sobre Medio Ambiente y Desarrollo. La Habana. Cuba. Julio. 2013. Pp. 15: http://repositorio.geotech.cu/jspui/bitstream/1234/597/1/Mapa%20de%20Vegetacion%20de%20Cuba_Repositorio.pdf
- ETC/ACC. (2011). Methods for assessing coastal vulnerability to climate change. ETC/ACC Technical Paper 1/2011, 2011. European Topic Centre on Climate Change Impacts, Vulnerability and Adaptation. European Environmental Agency.
- García-Lahera, Julio Pavel & Orozco Morgado, Alberto. (2015). Estado de conservación de la flora y la vegetación en los ecosistemas arenoso cuarcíticos de Casilda, Sancti Spíritus, Cuba. Revista del Jardín Botánico Nacional (Universidad de La Habana, Cuba). 36. 93-102.H. Liu et al. (2013): Numerical study of sensitivity of mangrove in reducing storm surge and flooding to hurricane characteristics in southern Florida. Continental Shelf Research 64 (2013). Pp. 51-65.

- García-Lahera, Julio Pavel & Orozco Morgado, Alberto. (2014). Flora y Vegetación del área de arenas cuarcíticas de Casilda, Sancti Spíritus, Cuba. Revista Brenesia del Museo Nacional de Costa Rica. Número 81-82. Marzo-Septiembre. 2014. ISSN-0340-3711. Pp 8-28.
- Geo Service Perú. Información técnica resumida – LANDSAT 7 ETM. Pp. 4
http://gspperu.com/pdf/res_landsat7etm.pdf
- González, D. y De la Paz, O. (1994). Estructura y dinámica de las playas para su manejo y conservación. Centro de Investigaciones de Ecosistemas Costeros. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Cuba. Pp. 26.
- González de Zayas, R., Guerra, L. y Cobo, M. (2000). Calidad ambiental actual de las tres playas con mayor desarrollo turístico de la cayería norte de Ciego de Ávila. Centro de Investigaciones de Ecosistemas Costeros. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, Cuba. Pp. 12.
- Guimaraes, M. *et all*, (2013). Efecto del huracán Paloma sobre los pastos marinos del archipiélago Jardines de la Reyna, Cuba. Revista Biología Tropical. Vol. 61 (3): 1425-1432, Septiembre 2013. ISSN-0034-7744. Pp 1425-1432
- Gregory M. Verutes, Katie K. Arkema, Chantalle Clarke-Samuels, Spencer A. Wood, Amy Rosenthal, Samir Rosado, Maritza Canto, Nadia Bood & Mary Ruckelshaus (2017)

Integrated planning that safeguards ecosystems and balances multiple objectives in coastal Belize, *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 13:3, 1-17, DOI: 10.1080/21513732.2017.1345979

- Hernández, H.J. (2011). *Procesamiento digital de imágenes. Apuntes de clase*. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza. Universidad de Chile. ISBN: 978-956-353-324-8.
<http://www.gep.uchile.cl/Publicaciones/Tratamiento%20Digital%20de%20Im%20C3%A1g%20enes%20-%20Jaime%20Hern%20C3%A1ndez%202011.pdf>
- ICGC, 1990: Estudio de los grupos insulares y zonas litorales del archipiélago cubano con fines turísticos. Cayo Coco, Guillermo y Paredón Grande. Editorial Científico-Técnico. pp. 117-124.
- INEGI. (1984). Aspectos técnicos de las imágenes Landsat. Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática, Dirección General de Geografía y Medio Ambiente. México. Pp. 22.
- Inter-American Institute. (2010): Huracanes y vulnerabilidad en zonas coseras en América Latina y el Caribe. IAI Communiqué 3. Inter-America Institute for Global Change Research (IAI). Noviembre 2010.

- Katie K. Arkema, Greg Guannel, Gregory Verutes, Spencer A. Wood, Anne Guerry, Mary Ruckelshaus, Peter Kareiva, Martin Lacayo and Jessica M. Silver. (2013): Coastal habitats shield people and property from sea-level rise and storms. *Nature Climate Change*, Vol. 3. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1944>.
- Lira Chávez, J. (2010). *Tratamiento digital de imágenes multiespectrales*, 2da edición. Editorial lulu. ISBN 978-1-105-04502-8. Pp 618.
- Mitrani Arenal, I. (2006): *Las inundaciones costeras en Cuba y su repercusión social*. BIOÉTICA/SEPTIEMBRE-DICIEMBRE 2006. Pp. 8.
- New Jersey Department of Environmental Protection. Office of Coastal Management. (2011). *New Jersey's Coastal Community Vulnerability Assessment and Mapping Protocol*.
- Magaña, V. (2013). "Guía metodológica para la evolución de la vulnerabilidad ante cambio climático". Instituto Nacional de Ecología y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. México. Abril.2013. recuperado el 7 de abril de 2016 en: http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2012_estudio_cc_vyagef3.pdf
- Muñoz. J y Díaz. A. (2005). "Percepción Remota. Fundamentos de Teledetección Espacial". Comisión Nacional del Agua. Subdirección General de programación. Subdirección de Informática y Sistema Geográfico del Agua. Jefatura de Control

Cartográfico”. Recuperado el 25 de noviembre de 2016 en:
<http://siga.cna.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledetecci%C3%B3n%20espacial.PDF>

- Osuna, A *et al.*, (2015). “Evaluación de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca del río Tecolutla, Veracruz, México; periodo 1994-2010”. *Ambiente & Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. ISSN: 1980-993X. Junio 2015. Pp 14
- Parada Isada, A., E. Socarrás Torres, M. López Rojas, R. Gómez Fernández, A Aguilar Velis, L. Méndez Carrera y J. M. Guzmán Méndez. (2006). *Biota del norte de la provincia de Ciego de Ávila*. En: *Ecosistemas Costeros: biodiversidad y gestión de los recursos naturales*. Compilación por el XV Aniversario del CIEC. Sección I. ecosistemas del norte de Ciego de Ávila. CIEC. Editorial CUJAE. ISBN: 959-261-254-4. Pp 494
- Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), (2010). Proyecto “Sabana-Camagüey”. Ministerios de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. República de Cuba. (1993-2014)
- Rodríguez, J. (2012). Tesis: *Dinámica de cambios en la cobertura vegetal (1975-2005)*. Universidad Nacional Autónoma de Honduras. Facultad de Ciencias Económicas. Maestría en Metodología de Investigación Económica y Social. Pp 127. Recuperado Julio 2016 en: <http://es.slideshare.net/jrcjea/dinamicadecambiosdecoberturavegetal-1975-2005jrrr>

- Rodríguez, Y. (2008) “Estudio de las afectaciones provocadas por la limpieza de las playas del Archipiélago Jardines del Rey. Caso de estudio: playa Larga, Cayo Coco”. Tesis de Licenciatura. Facultad de geografía. Universidad de la Habana. Pp 47
- Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, C.K., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik, M., Bernhardt, J., Griffin, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M. Mandle, L., Hamel, P., and Vogl, A.L. (2015). InVEST User’s Guide. The Natural Capital Project, Stanford.
- Silva, R.; Martínez, M. L.; Hesp, P.; Catalan, P.; Osorio, A. F.; Martell, R.; Fossati, M.; Miot da Silva, G.; Mariño-Tapia, I.; Pereira, P.; Cienfuegos, R.; Klein, A., and Govaere, G., 2014. Present and future challenges of coastal erosion in Latin America. In: Silva, R., and Strusińska-Correia, A. (eds.), Coastal Erosion and Management along Developing Coasts: Selected Cases. Journal of Coastal Research, Special Issue, No. 71, pp. 1–16. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.
- Sobrino, J.A (2000). Teledetección. Universidad de Valencia, Valencia, Pp 467.

- Ventura, Y. (2008). “Estudio de la carga real de las playas del Archipiélago Jardines del Rey. Caso de estudio playa Larga, Cayo Coco”. Tesis de Licenciatura. Facultad de geografía. Universidad de la Habana. Pp 50.
- Ventura Díaz, Y.; Molina Blancas, E. J.; Rodríguez Cueto, Y.; Romero Barrueta, S.A. (2013). “Diseño de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para el análisis espacial de fenómenos naturales en el área protegida Parque Nacional Jardines de la Reina, Cuba”. Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GESIG-UNLU, Luján). Año 5, N° 5, Sección I: 129-141.
- Vilamajó D. *et al.* (2003). Cartografía de la cobertura vegetal de un sector del municipio San José de las Lajas, de la provincia Mayabeque. Revista del Jardín Botánico Nacional de Cuba. Vol. 24(1-2). Pp 165-171. 2003.
- Vogl A. (2013). Valuing ecosystem services: InVEST Tools. The Natural Capital Project. Stanford University. pp. 62.
<http://unstats.un.org/unsd/envaccounting/seeaRev/meeting2013/EG13-2-InVEST.pdf>
- Woods. (2013). Using social media to quantify nature-based tourism and recreation. Scientific Report 3, Article Number 2976 (2013). doi: 10.1038/srep02976.
<http://www.nature.com/articles/srep02976>

- Wyatt, K. (2017). Sustainable development planning in The Bahamas, one map at a time.
<https://www.naturalcapitalproject.org/sustainable-development-planning-in-the-bahamas-one-map-at-a-time/>