

Uso de índices espectrales derivados de sensores remotos para la caracterización geomorfológica en zonas insulares del Caribe colombiano¹



USING SPECTRAL RATIOS DERIVED FROM REMOTE SENSING TO GEOMORPHOLOGICAL SURVEYS IN ISLAND AREAS OF THE COLOMBIAN CARIBBEAN

USO DE ÍNDICES ESPECTRAIS DERIVADOS DE SENSORES REMOTOS PARA
CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA EM ÁREAS INSULARES DO CARIBE
COLOMBIANO

ALEXANDER Ariza²

OSMAN JAVIER Roa³

PEDRO KARIN Serrato⁴

HERMANN AICARDO León Rincón⁵

Recibido:

13 de febrero de 2017

Evaluación:

16 de noviembre de 2017

Aprobación:

14 de febrero de 2018

Para citar este artículo: Ariza, A., Roa, O. J. y Serrato, P. K. y León Rincón, H. A. (2018). Uso de índices espectrales derivados de sensores remotos para la caracterización geomorfológica en zonas insulares del Caribe colombiano. *Perspectiva Geográfica*, 23(1), 105-122. doi: 10.19053/01233769.5863

- 1 Investigación presentada como parte del proyecto "Levantamiento cartográfico en zonas insulares mediante imágenes de sensores remotos", suscrito entre el Ministerio de Defensa Nacional, Dirección General Marítima, Intendencia Regional Dimar y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- 2 Ph. D(c). Cartografía SIG y Teledetección. Profesor asociado de la Universidad Católica de Manizales y la Universidad de San Buenaventura. Investigador del Grupo Interno de Trabajo de Percepción Remota (GIT PR) del IGAC, Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF). Correo electrónico: alexander.ariza@igac.gov.co.
- 3 Biólogo. Especialista en Sistemas de Información Geográfica. Investigador asociado del GIT PR IGAC-CIAF. Correo electrónico: osman.roa@igac.gov.co.
- 4 Geógrafo. Especialista en fotointerpretación. M. Sc. en Geografía. Coordinador del GIT PR IGAC-CIAF. Correo electrónico: pkserrat@igac.gov.co.
- 5 Capitán de navío, oceanógrafo físico, especialización en Política, magíster en Gobierno y Políticas Públicas. Responsable Área Oceanografía Operacional. Centro de Investigaciones Oceanográficas. Correo electrónico: hleon@dimar.mil.co.

Resumen

La caracterización geomorfológica es un proceso descriptivo del paisaje que permite la identificación de rasgos geofísicos resultantes y específicos en el tiempo a través de unidades. El presente trabajo es una propuesta alternativa para la identificación de dichas unidades en el complejo paisajístico del archipiélago de San Andrés y Providencia mediante el empleo de índices espectrales provenientes de imágenes satelitales WorldView 2 y 3, los cuales permiten mejorar la identificación y la segmentación pictoricomorfológica de los elementos contenidos en las imágenes empleadas. Los resultados obtenidos, en contrastes con los publicados por otros autores, permiten identificar, detallar, estimar y evaluar un número mayor (más de diez) de unidades geomorfológicas a escala 1:2.000, las cuales fueron verificadas a través de validaciones estadísticas integradas con datos de campo. Los resultados obtenidos mediante métodos tradicionales, como ecosondeo multihaz y observaciones directas en campo, en ocasiones tienden a arrojar información de mayor resolución y detalle del fondo marino, acompañada de una descripción ecológica de la zona más acertada; no obstante, variables como el área efectiva de captura, la precisión, el cubrimiento espacial y la discriminación de unidades geomorfológica de dichos métodos son de tipo puntual, lo que conlleva a que estos no sean tan efectivos al momento de su elección debido a la complejidad que requieren y a sus tiempos de ejecución.

Palabras clave: *imágenes de satélite, índices espectrales, gestión de costeros e insulares, unidades geomorfológicas.*

Abstract

Geomorphological characterization is a descriptive element of the landscape that allows us through the identification of units and specific geophysical features resulting in time. This work presents an alternative to the identification of such units in the landscape complex of the archipelago of San Andrés and Providencia, by using spectral indices from WorldView 2 and 3 satellite images, this can improve the pictorial-morphological identification of images typically used. The results, in contrast with those published by authors; let you identify, detail, estimate and evaluate one greater number (more than ten) of geomorphological units to scale 1:2 000, which were verified through statistical validation integrated with field data. In the case of results obtained through traditional methods as I ecosondeo multiband and direct observation sin the field, sometimes they

tend to throw information of higher resolution and detail of the seabed, accompanied by an ecological description of the area most successful; However variables such as effective area of capture, accuracy, spatial coverage and geomorphological units discrimination of these methods are punctual type, which means that these are not as effective at the time of their choice due to the complexity that they require and their execution times.

Keywords: *satellite imagery, spectral indices, coastal and island management, geomorphological units.*

Resumo

A caracterização geomorfológica é um elemento descritivo da paisagem que permite a identificação de características geofísicas específicas e específicas ao longo do tempo por meio de unidades. O presente trabalho é uma proposta alternativa para a identificação das referidas unidades no complexo paisagístico do arquipélago de San Andrés e Providencia, através do uso de índices espectrais das imagens de satélite WorldView 2 e 3, que permitem melhorar a identificação e segmentação pictórico-morfológica dos elementos contidos nas imagens utilizadas. Os resultados obtidos, em contraste com aqueles publicados pelos autores; permitir identificar, detalhar, estimar e avaliar um número maior (mais de dez) de unidades geomorfológicas em uma escala de 1:2.000, que foram verificados através de validações estatísticas integradas com dados de campo. No caso de resultados obtidos por métodos tradicionais, como eco multifeixe e observações diretas no campo, eles tendem a produzir informações de maior resolução e detalhes do fundo do mar, acompanhado de uma descrição ecológica da área mais apropriada; entretanto, variáveis como área efetiva de captura, precisão, cobertura espacial e discriminação das unidades geomorfológicas dos referidos métodos são de tipo pontual o que significa que estes não são tão eficazes no momento de sua eleição, devido à complexidade que exigem e seus tempos de execução.

Palavras-chave: *imagens de satélite, índices espectrais, manejo costeiro e insular, unidades geomorfológicas.*

1. Introducción

Los análisis geomorfológicos suministran información básica y esencial para cualquier tipo de evaluación del territorio. De esta manera, se generan estudios valiosos que se constituyen en herramientas para la planificación del medio físico, en donde se armonice el desarrollo urbano y rural mediante la adecuada selección de zonas de expansión urbana, turística e industrial y se preserven, por su presencia biofísica, zonas de reserva natural.

Las unidades geomorfológicas son básicas en la cartografía del medio físico y constituyen el elemento estructurador del paisaje. Según información de la Comisión Colombiana del Océano (Fuentes Crispín, 2015), alrededor del 28,46% del territorio colombiano está conformado por paisajes en zonas costeras e insulares en el mar Caribe. El archipiélago de San Andrés y Providencia ocupa cerca de 52.500 hectáreas, y debido a la importancia económica, cultural y natural del área existen varios trabajos relacionados con su geomorfología (Bernal, 1996; Gómez, Carvajal y Otero, 2014).

El archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina está formado por un conjunto de islas oceánicas, atolones y bancos coralinos alineados en dirección NE, paralelos a la elevación de Nicaragua, que se originaron aparentemente a partir de volcanes dispuestos a lo largo de fracturas tectónicas de la corteza oceánica, orientadas predominantemente hacia el NE y el SW. El archipiélago es uno de los sistemas arrecifales más extensos del Atlántico y constituye la mayor extensión de arrecifes coralinos de Colombia. De hecho, las plataformas insulares de siete de sus diez atolones verdaderos se extienden por más de 2.188 km² (Díaz y Acero, 2003). Los bancos más profundos, la sección colombiana sobre

la plataforma nicaragüense y la que se comparte con Jamaica son áreas sobre las cuales se ha adquirido hasta el momento muy poca información científica o cartográfica (Aguilera Díaz, 2010).

Los sensores remotos son una herramienta de gran utilidad en los estudios ambientales relacionados con suelos, vegetación, litología, geomorfología, etcétera. La extracción de información de las imágenes a través del análisis digital puede mejorarse si se incluyen medidas de espectrorradiometría de campo (Carpintero, Chica, Rigol, Iguzquiza y Galiano, 2007), dado que proporcionan información de los materiales tal y como se encuentran *in situ*. En este trabajo se propone una metodología de uso conjunto de técnicas de sensores remotos, espectrorradiometría de campo e integración visual de imágenes para la determinación de las unidades geomorfológicas de la región de estudio.

Por lo tanto, el objetivo de este artículo es brindar una metodología alternativa para la caracterización geomorfológica de ambientes marinos costeros, que se apoye no solo en las características visuales de las imágenes, sino en técnicas espectrales para cada una de las unidades pictoricomorfológicas contenidas en estas zonas insulares.

2. Metodología

El diseño metodológico desarrollado, cuyo esquema se muestra en la Figura 1, corresponde inicialmente a la selección de imágenes de alta resolución sobre la zona de estudio obtenidas de los satélites WorldView-2 y WorldView-3 (DigitalGlobe, 2016). Estas se caracterizan por poseer resolución espacial de 2,0 metros para las bandas multiespectrales y 0,5 metros para la banda pancromática, lo que permitió enriquecer la resolución espacial de las bandas

multiespectrales de las imágenes con el fin de lograr mejores resultados en la obtención de la cartografía de cada una de las unidades geomorfológicas.

Las imágenes obtenidas mediante sensores remotos requieren de una corrección atmosférica que permita transformar los valores digitales (ND) en el sensor en datos físicos de reflectancia (λ) sobre el terreno,

con el fin de que puedan ser extraídas y analizadas las medidas físicas de las coberturas (índices espectrales) (Ceccato, Gobron, Flasse, Pinty, y Tarantola, 2002). Metodológicamente se emplearon dos tipos de modelos de corrección: ATCOR (Richter y Schläpfer, 2005) y un modelo de corrección empírico lineal ELM (por la sigla en inglés de Empirical Line Model) (Smith y Milton, 1999).

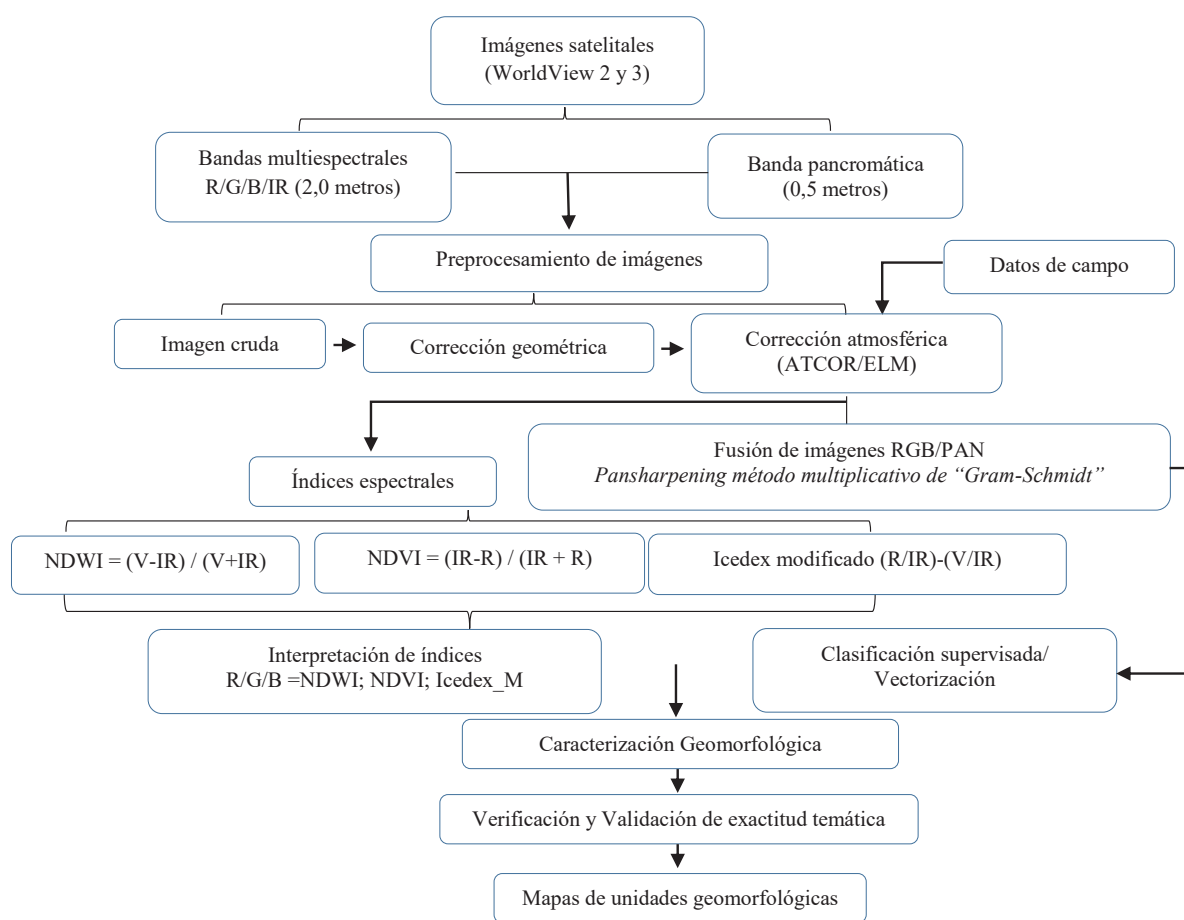


FIGURA 1. Esquema de la metodología desarrollada.

Fuente: elaboración propia.

Se realizó una mejora de la resolución espacial mediante el proceso de fusión de imágenes usando la transformación Gram-Schmidt (García y Martínez, 2010). En esta técnica la imagen pancromática se combina con el resto de bandas de menor resolución espacial mediante una transformación matemática, con el fin de obtener la riqueza espacial de la imagen pancromática en las imágenes multispectrales sin deteriorar su capacidad radiométrica.

Finalmente se realizó el cálculo de tres índices principales sobre las imágenes para efectuar la interpretación y cartografiar las diferentes unidades geomorfológicas. Para ello se hizo uso del índice de agua normalizado NDWI (McFeeters, 1996), el índice normalizado de vegetación NDVI (Tucker, 1979) y una modificación propia del índice de agua Icedex (Ángel Martínez, 1994).

a. Área de estudio

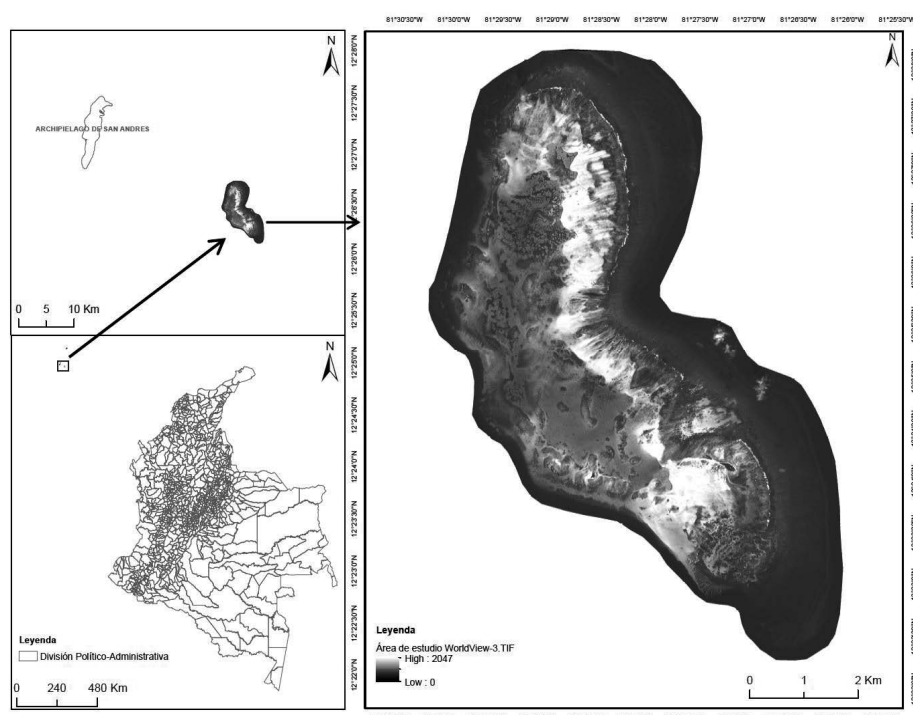
El archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina está localizado entre los paralelos 10° y 18° de latitud norte y los meridianos 78° y 82° de longitud oeste, más exactamente al suroccidente del mar Caribe, a una distancia de 700 kilómetros de las costas continentales de Colombia y a 180 kilómetros de la costa centroamericana. Es el territorio más septentrional del país que representa la soberanía nacional en el mar Caribe sin interrupción desde Cartagena de Indias (Taylor, Howard y Baine, 2011).

El archipiélago cuenta con una ubicación estratégica en el Caribe, ya que toda la zona delimita con siete fronteras de diferentes países (Panamá, Nicaragua, Costa Rica, Jamaica, Honduras, Haití y República Dominicana) (Figura 2). Esto representa un enorme potencial para la zona como punto estratégico político, vitrina comercial y ecoturística y como bisagra de Colombia con el Gran Caribe, lo cual se debe saber aprovechar.

FIGURA 2.

Área de estudio.

Fuente: elaboración propia.



b. Datos e imágenes

Las imágenes satelitales (WorldView 2 y 3) y la información espectral del área de estudio fueron empleadas en los modelos de corrección atmosférica implementados en las imágenes (ver Tabla 1). Este tipo de imágenes permite gran número de usos potenciales, entre estos, la generación de cartografía específica, que es objeto del presente estudio.

La etapa de preparación de los datos incluye la corrección geométrica a un nivel 1G; adicionalmente, se convirtió a valores de radiancia y, seguidamente, de reflectancia, ya que es necesario convertir los ND de cada imagen a valores físicos con el fin de obtener el modelo de reflectancia de superficie y generar los índices espectrales (Chuvieco, 2010). La obtención de estos valores se realiza mediante métodos de corrección atmosférica o corrección radiométrica.

TABLA 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LAS IMÁGENES WORLDVIEW

Satélite	WorldView-2	WorldView-3
Bandas de sensores	Pancromático (450-800 nm)	Pancromático (450-800 nm)
	Costero (400-450 nm)	Costero (400-450 nm)
	Azul (450-510 nm)	Azul (450-510 nm)
	Verde (510-580 nm)	Verde (510-580 nm)
	Amarillo (585-625 nm)	Amarillo (585-625 nm)
	Rojo (630-690)	Rojo (630-690)
	Banda espectral en el borde del rojo (705-745 nm)	Banda espectral en el borde del rojo (705-745 nm)
	IR cercano 1 (770-895 nm)	IR cercano 1 (770-895 nm)
Resolución del sensor	IR cercano 2 (860-1040 nm)	IR cercano 2 (860-1040 nm)
	Pancromático: GSD de 0,46 m en el nadir; GSD de 0,52 m 20° fuera del nadir. Multiespectral: GSD de 1,85 m en el nadir, GDS de 2,07 m 20° fuera del nadir.	Pancromático: GSD de 0,31 m en el nadir; GSD de 0,34 m 20° fuera del nadir. Multiespectral: GSD de 1,24 m en el nadir, GDS de 1,38 m 20° fuera del nadir.
Rango dinámico	11 bits por píxel	11 bits por píxel pancromático y multiespectral (MS)
Ancho del barrido	16,4 km en el nadir	13,1 km en el nadir

Fuente: DigitalGlobe (2016).

c. Modelos de corrección (radiométrica-atmosférica) en imágenes satelitales

Los procesos de corrección atmosférica y radiométrica sobre sensores remotos en bandas multiespectrales, tradicionalmente, implican alguno de estos dos métodos: en el primer grupo están las técnicas

basadas en modelos físicos que utilizan algoritmos de transferencia radiativa (RTM), como los modelos privativos de ATCOR y FLAASH; en el segundo grupo están aquellos que funcionan a partir de métodos empíricos (ELM) basados en la utilización de mediciones de espectrorradiometría *in situ*, que permiten obtener una estimación aproximada de la

corrección radiométrica y atmosférica a través de mediciones en campo y sus correlaciones sobre la imagen (Smith y Milton, 1999).

Paralelo a la corrección atmosférica de imágenes con ATCOR, en este proyecto se usó el modelo empírico lineal ELM, por medio de la comparación de firmas espectrales de la imagen con los valores tomados en terreno usando el espectrorradiómetro en cada una de las islas (Rejas, 2008), con el fin de eliminar el efecto atmosférico sobre las imágenes.

d. Fusión de imágenes Gram-Schmidt

El método Gram-Schmidt se utiliza para remuestrear las bandas multiespectrales a partir de su banda pancromática de alta resolución espacial (García y Martínez, 2010). Este método es uno de los más precisos de su clase porque el algoritmo que lo define se compone en vectores no ortogonales, que se rotan de modo que se conviertan en vectores ortogonales. En la Figura 3 se puede observar la mejora en la resolución espacial usando el método Gram-Schmidt.

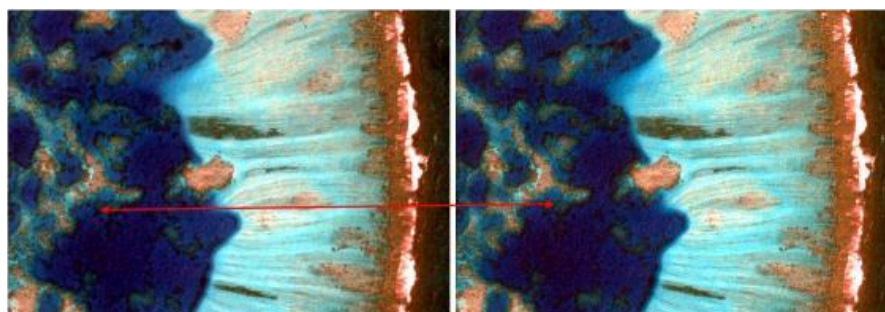


FIGURA 3.

Ejemplo sobre una imagen WorldView-3, 3/2/1 en la barrera arrecifal de la isla de Roncador (izq.) y remuestreada (der.).

Fuente: elaboración propia.

e. Índices espectrales

Con el propósito de obtener información acerca del comportamiento espectral de las distintas unidades geomorfológicas, así como de las coberturas asociadas, se aplicaron una serie de coeficientes de bandas o índices espectrales para cada una de las imágenes utilizadas; entre estos, tenemos:

El índice normalizado de vegetación (NDVI, por su sigla en inglés), diseñado por Tucker (1979) para el monitoreo de coberturas vegetales a través de la siguiente ecuación (Ec. 1) (Ji y Peters, 2003).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (Ec. 1)$$

Donde ρ_{NIR} y ρ_{red} representan la reflectancia en el infrarrojo cercano y la banda roja. El valor del índice varía de -1 a +1. El índice NDVI permite identificar

la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial, así como su evolución a lo largo del tiempo. Los valores del índice NDVI cercanos a 0,1 indican zonas desérticas con vegetación escasa y los valores cercanos a 0,9 caracterizan zonas con alta densidad de vegetación.

El índice diferencial de agua normalizado (NDWI) fue diseñado para maximizar la reflectancia del agua usando la banda del verde y minimizar la alta reflectancia del IRC en coberturas vegetales y de suelo adyacente. El NDWI es calculado a partir de la división entre la banda verde V y la banda del infrarrojo cercano IRC. Como resultado, el agua posee valores positivos que aumentan la respuesta espectral, mientras que la vegetación y el suelo o las rocas de coral tienen valores cero o negativos que reducen la respuesta (McFeeters, 1996). El rango

de este índice oscila entre -1 y 1, donde los valores mayores a cero corresponden a la presencia de agua. Para evaluar el índice se hace uso de la siguiente ecuación (Ec. 2).

$$NDWI = \frac{\text{Verde} - \text{IRC}}{\text{Verde} + \text{IRC}} \quad (\text{Ec. 2})$$

Por último, hemos empleado el índice Icedex, que detecta la influencia de vegetación o la presencia de material en suspensión (sedimentos y algas). Este se obtiene a partir de las relaciones entre las bandas del rojo (R), infrarrojo cercano (IRC) e infrarrojo medio (IRM). Fue diseñado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de España (Cedex) para cartografiar aguas continentales, es uno de los índices que presenta valores más estables y uno de los más útiles en la detección de playas y bancos de arena. El valor de referencia establecido para discriminar la superficie inundada es cero y los

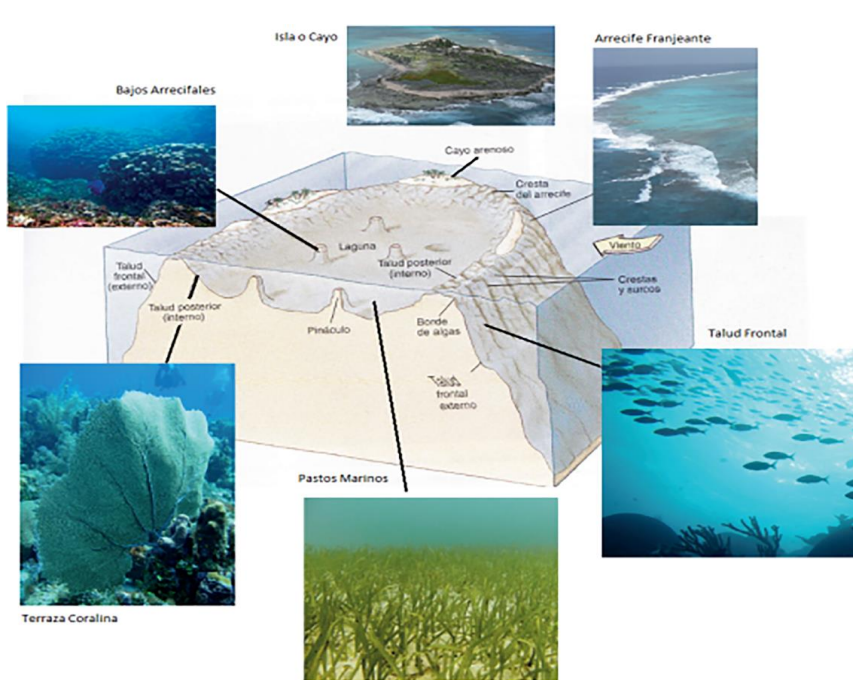
valores por encima de cero son considerados agua (Ángel Martínez, 1994). Se representa mediante la siguiente ecuación (Ec. 3).

$$I_CEDEX = \frac{\rho_{IRC}}{\rho_R} - \frac{\rho_{IRC}}{\rho_{MIR}} \quad (\text{Ec. 3})$$

f. Unidades geomorfológicas de origen marino

Teniendo en cuenta criterios geomorfológicos, hidrológicos y de procesos actuales, la geomorfología del archipiélago puede subdividirse en varias unidades geomorfológicas (Figura 4). La génesis de estas geoformas está definida por el efecto de procesos asociados a las condiciones marinas, como el oleaje, la deriva litoral y las mareas. Junto con las unidades de origen eólico, su evolución hacia otras unidades geomorfológicas puede ocurrir en lapsos de tiempo cortos, de diez a cien años (Gómez et al., 2014).

FIGURA 4. Unidades geomorfológicas de origen marino definidas para la zona de estudio.
Fuente: elaboración propia.



Una descripción de las unidades geomorfológicas de origen marino definidas para la zona de estudio puede verse en la Tabla 2. Estas unidades son la

base para el desarrollo de la leyenda presentada en la Figura 6 (mapa geomorfológico a escala 1:2.000 de la isla-cayo Este Sureste).

TABLA 2. LISTADO DE UNIDADES DEFINIDAS PARA LAS ZONAS DE ESTUDIO

Unidad evidenciada		
Unidad	Descripción	Código
Arrecife franjeante	Complejo arrecifal parcialmente emergido con el arrecife periférico de rompiente. Este arrecife se desarrolla en la orla litoral, de manera que se forma un lago entre el arrecife y la línea de costa. La extensión del arrecife hacia el mar queda limitada por un máximo de profundidad en donde florecen los organismos constructores. La erosión de la parte dirigida hacia el mar del arrecife produce una masa de derrubios sobre la que pueden desarrollarse, a profundidad adecuada, otros arrecifes.	Maf
Bajos arrecifales	Zonas de los arrecifes coralinos en las que ciertas algas pétreas, pastos marinos y esponjas no tóxicas son abundantes, como áreas de forrajeo. La proliferación de ese tipo de áreas se presenta en ciertas zonas coralinas del Caribe colombiano, como por ejemplo en los atolones y bancos coralinos. Las formaciones coralinas dispersas se conocen como parches, montículos (<i>knolls</i>) o pináculos coralinos. Dependiendo de su tamaño y forma, pueden crecer hasta alcanzar casi la superficie.	Mba
Terraza coralina	También conocida como <i>llanura de arrecife interna</i> , es la parte más ancha del arrecife. Su profundidad es escasa y forma una plataforma casi totalmente plana. Su fondo está formado principalmente por arena, fango o escombros coralinos. Las olas y las corrientes pueden formar acumulaciones de arena, llamadas <i>cayos arenosos</i> .	Mtc
Talud frontal	El talud de arrecife externo o talud frontal desciende fuertemente hacia el mar abierto. Presenta pendientes relativamente medias o prácticamente verticales y su inclinación depende de la acción del viento y las olas. Su lejanía de la orilla hace que allí habite la mayor cantidad de especies de coral; con el aumento de la profundidad en el talud se reduce la luz, y en la parte más profunda generalmente hay menos corales vivos y pocas especies.	Tf
Talud posterior	El talud posterior del arrecife puede ser suave o escarpado. Está protegido contra el oleaje por el resto del arrecife, pero las olas arrastran gran cantidad de sedimentos desde la pendiente. Generalmente presenta poco crecimiento de coral.	Tp
Playa	Corresponde a zonas del perfil de playa comprendidas entre el tramo del frente y el límite en tierra marcado por un cambio fisiográfico como el que demarca un acantilado o el inicio de vegetación.	Mpl
Beach rocks	Consisten en sedimentos consolidados de composición calcárea asociados a las playas. El material litificado puede ser areniscas, brechas o conglomerados, con proporciones variables de material calcáreo y siliciclástico.	Mbr
Línea de costa	La línea de costa representa el plano de intersección de la superficie del agua con la superficie terrestre. Por ser función de las condiciones climáticas, la línea de costa presenta oscilaciones de acuerdo con las condiciones presentes en el momento en que se mida.	Mlc

Fuente: Adaptado de Gómez et al. (2014).

g. Validación temática

Para la validación temática de la clasificación de las unidades geomorfológicas se empleó el índice kappa, el cual ha sido tradicionalmente elegido sobre otras alternativas porque se ajusta a la casualidad aleatoria (Hardin y Shumway, 1997). El coeficiente kappa se puede describir matemáticamente como:

$$k = \frac{\text{Pr}(a) - \text{Pr}(e)}{1 - \text{Pr}(e)} \quad (\text{Ec. 4})$$

Siendo Pr(a) el acuerdo observado relativo o la proporción total de celdas que coinciden en ambas capas, es decir,

$$\text{Pr}(a) = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ii}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (\text{Ec. 5})$$

y es Pr(e) la probabilidad hipotética aleatoria y se calcula según la expresión:

$$Pr(e) = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij} \sum_{k=1}^n x_{ki}}{(\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n x_{jk})^2} \quad (Ec. 6)$$

Por su expresión, el índice kappa no presenta sesgo por una posible coincidencia casual de clases, ya que tiene en cuenta la posibilidad de que exista concordancia por azar. El índice kappa puede tomar valores desde -1 a 1. El valor 1 indica una concordancia completa, mientras que el -1 define una correlación de signo negativa (según lo definido por Pr(e)), $k = 0$ (Cerdea y Villarroel, 2008).

3. Resultados

La metodología utilizada para generar las caracterizaciones geomorfológicas mediante índices

espectrales en la identificación de cada unidad se formula de la siguiente manera.

a. Patrones de interpretación geomorfológica mediante el uso de índices espectrales

A continuación se describen brevemente los patrones de interpretación espectral según las unidades geomorfológicas encontradas en el área de estudio, de acuerdo con la adaptación de la propuesta metodológica de estandarización de los levantamientos geomorfológicos en la zona costera del Caribe colombiano de Invemar (Gómez et al., 2014). El siguiente diagrama ilustra la interpretación geomorfológica mediante el uso de los índices espectrales R/G/B = NDWI /NDVI / Icedex (Figura 5).



FIGURA 5. Guía cromática de interpretación geomorfológica mediante el uso de combinaciones R/G/B de índices espectrales.

Fuente: elaboración propia.

En este modelo se utilizaron, como variables determinantes, la presencia de rasgos pictomorfológicos de las coberturas como arrecifes, bancos de arena y áreas con cobertura vegetativa, entre otros; en segunda instancia, se tuvieron en cuenta las respuestas

radiactivas de cada una de estas coberturas en los tres índices evaluados. Con relativa poca influencia, se introdujo el modelo digital batimétrico (MDB) como apoyo para la determinación de taludes y líneas de costa erosivas y acresivas.


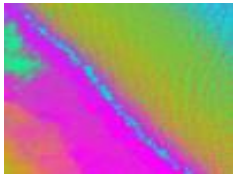

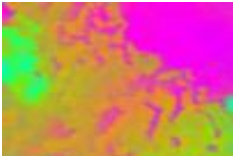

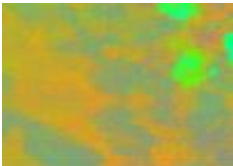
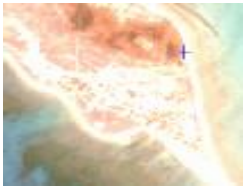
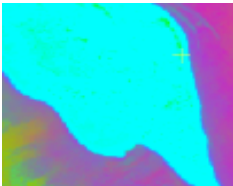
La localización y distribución de las zonas de arrecifes franjeantes (Maf) en una combinación R/G/B = 3/2/1 se resalta en color natural, y se identifica como un área sumergida definida en tonalidades verde oscuro, con una textura fina homogénea, a lo largo del semiatolón. Sin embargo, su delimitación y extensión real es más precisa en una combinación R/G/B = NDWI/NDVI/Icedex, en donde se destaca con mayor claridad la zona de arrecife franjeante, en color magenta claro y con una textura fina homogénea. Esta combinación de bandas permite observar con mayor claridad el límite de la zona de arrecife, ya que los altos valores de los índices espectrales NDWI y del NDVI en los cañones del rojo y el verde destacan la actividad fotosintética presente en el arrecife, debido a que cada pólipo de coral realza dicha acción a través de las algas zooxantelas (Carpintero et al., 2007). Esto no sería fácilmente detectable en una composición natural R/G/B = 3/2/1. Además, esta combinación acentúa fácilmente la estructura de la rompiente en tonos cian debido a los altos valores del índice Icedex, que es sensible a los componentes estructurales de los pólipos conformados principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3) (Tabla 3).

Por otro lado, las unidades de bajos arrecifales (Mba), en una combinación normal R/G/B = 3/2/1, se identifican como grupos de manchas en matices verde oscuro, con texturas que varían de media a

fina y con formaciones espaciales irregulares a lo largo del interior del arrecife, mientras que en la combinación R/G/B = NDWI/NDVI/Icedex dicha unidad se destaca en color magenta de mayor contraste, con una textura fina heterogénea. Esta combinación de bandas permite observar con claridad el límite de las zonas de bajos arrecifales debido a los altos valores del NDWI en los pináculos y del NDVI presente en los pastos y algas marinas, ya que los cañones del rojo y el verde destacan los niveles de clorofila presentes en las zooxantelas (ver Tabla 3).

La terraza coralina (Mtc), compuesta principalmente por grandes extensiones de depósitos arenosos (sílice), se identifica como manchas claras en tonalidades que van desde el azul más claro hasta un azul más oscuro (en función de su profundidad), con texturas finas y homogéneas dentro del semiatolón. A través de una combinación R/G/B = NDWI/NDVI/Icedex, la terraza resalta por tener una tonalidad naranja poco variable según la profundidad, una característica que facilita su delimitación y permite observar con claridad el límite de la unidad geomorfológica, principalmente por los altos valores que presentan los compuestos de sílice en el índice de NDWI. Algunos de estos patrones pueden verse en la siguiente tabla de comparación espectral.

TABLA 3. RESPUESTA Y PATRONES ESPECTRALES DE UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS.

Unidad geomorfológica	Composición R/G/B = 3/2/1	Composición R/G/B = NDWI/NDVI /Icedex
Arrecife franjeante (Maf)		
Bajos arrecifales (Mba)		
Terraza coralina (Mtc)		
Playa (Mpl)		

Fuente: elaboración propia.

Como resultado final, la metodología propuesta permitió cartografiar más de 272.576 ha en el archipiélago, agrupadas en nueve mapas geomorfológicos para cada una de las islas-cayos, comprendidas en diez clases principales de unidades geomorfológicas, dominadas principalmente por terrazas coralinas (Mtc) con aproximadamente 115.996 ha, las cuales corresponden al 42,56 % del área cartografiada. Se

trata de un valor relevante debido a la gran cantidad de ecosistemas relacionados con dicha unidad.

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos por unidad geomorfológica y área de estudio. Adicionalmente, la Figura 6 muestra una de las salidas gráficas obtenidas para la isla-cayo Este Sureste.

TABLA 4. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA PARA CADA UNA DE LAS ISLAS-CAYOS DEL ARCHIPIÉLAGO DE SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA.

Isla-cayo	Unidad geomorfológica / Código / Superficie (ha)							Área total cartografiada* (ha)
	Maf	Mba	Mtc	Tf	Tp	Mpl	Mbr	
San Andrés	264,49	1.296,73	762,09	1.416,56	520,07	8,36	10,98	6.967,77
Providencia	81,77	1.020,00	3.860,17	111,04	490,17	33,06	NA	9.466,30
Albuquerque	587,10	1.068,39	818,62	984,91	1.730,91	0,23	NA	8.047,56
Este Sureste	527,13	723,67	824,41	466,26	813,19	3,39	NA	3.358,07
Roncador	125,63	1.591,22	1.086,77	109,10	2,02	3,75	1,5	3.641,72
Serrana	1.452,29	3.810,39	20.663,85	2.858,36	2.029,10	8,60	NA	30.843,54
Serranilla	1.501,00	11.063,05	52.393,37	3.231,69	8.363,49	6,28	NA	124.782,60
Bajo Nuevo	1.322,28	8.661,93	14.973,95	2.570,82	884,33	0,65	NA	43.162,33
Quitassueño	639,21	11.228,05	20.613,58	3.807,44	1.825,46	NA	NA	42.306,85
Total	6.500	40.463,43	115.996,81	15.556,18	16.658,74	64,32	12,48	272.576,74

*Incluye otras unidades cartografiadas.

Fuente: elaboración propia.

Referente a la validación de la exactitud temática para las unidades geomorfológicas identificadas en el área de estudio mediante el método de matriz de confusión, se obtuvo una fiabilidad global de 0,69

y un índice kappa igual a 0,68, el cual refleja una concordancia del 68 % entre las unidades estimadas a través del procesamiento digital de imágenes y la verdad de campo.

TABLA 5. VALORES DEL COEFICIENTE KAPPA EN LAS UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS IDENTIFICADAS

Cifred data	Verdad terreno							Total	Comisiones	Exactitud %
	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7			
Talud posterior	38	0	0	0	0	0	0	38	0	-
Arrecifes franjeantes	3	10	1	0	1	0	0	15	5	66,67
Bajos arrecifales	0	0	89	0	1	0	0	90	1	98,88
Talud frontal	0	0	0	22	0	0	0	22	0	-
Terraza coralina	1	0	0	0	44	0	0	45	1	97,77
Isla-cayo	0	0	0	0	0	10	0	10	0	100
Playa	0	0	0	0	0	0	10	10	0	-
Total	5	19	4	0	13	3	0	Porcentaje de acuerdo		69 %
								Índice kappa		0,68

Fuente: elaboración propia.

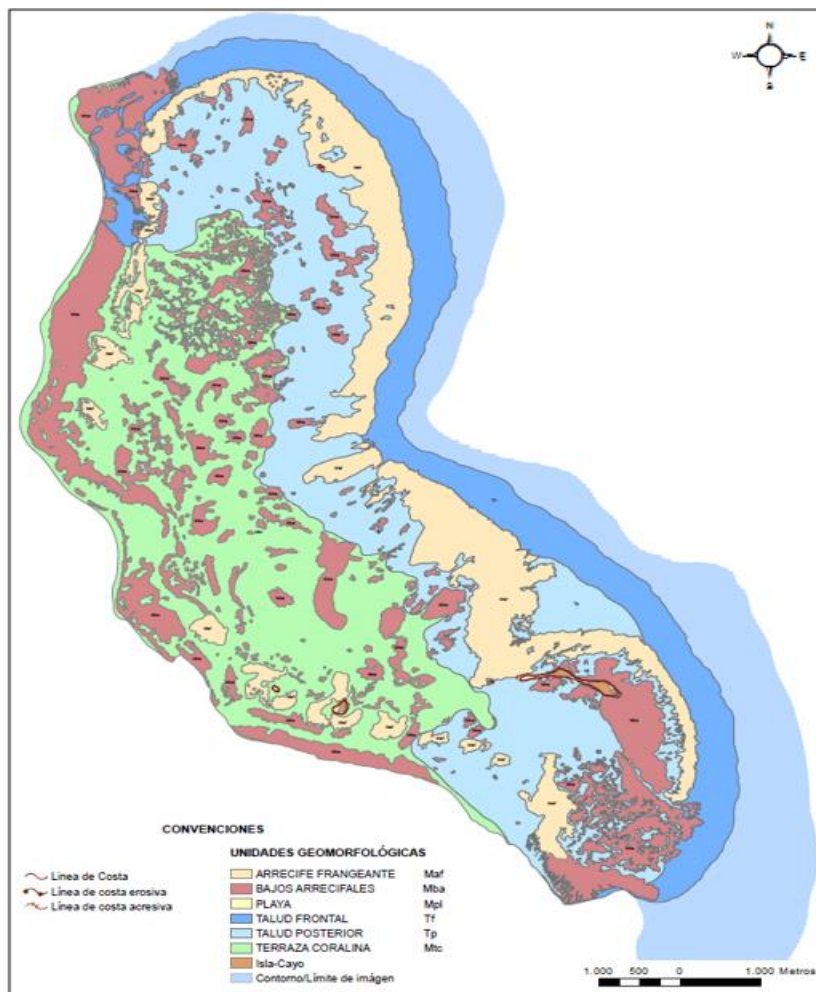


FIGURA 6. Mapa geomorfológico de la isla-cayo Este Sureste derivado de imágenes de satélite WorldView-3. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, al comparar los resultados obtenidos con los publicados por autores como Erhardt y Meinel (1975), Werding y Sánchez (1979), Ramírez, Borrero y Correal (1986) y Navas, Solano y Torres (1992), encontramos que el empleo de métodos para la generación de modelos geomorfológicos a escala submétrica mediante imágenes de sensores remotos ofrece una serie de ventajas en comparación con los métodos tradicionales, dado que los métodos de levantamiento cartográfico por medio de técnicas de sondeo multihaz a bordo de embarcaciones en zonas de rompiente y aguas someras de difícil acceso generan un incremento tanto en los costos como en los tiempos de ejecución, y, por ende, la carencia de información cartográfica temática y náutica detallada

de ciertas zonas del territorio nacional. Sin embargo, cabe destacar que los métodos basados en el uso de equipos multihaz arrojan información de mayor resolución y detalle del fondo marino, aunque el área efectiva de captura de dichos métodos es de tipo puntual y, por lo tanto, el cubrimiento de grandes extensiones conlleva un incremento de los costos.

En cuanto a los métodos fundamentados en las tecnologías geoespaciales, ofrecen menor precisión y detalle en cuanto al estado y la dinámica del ecosistema marino; por ende, este tipo de método nos proporciona una visión general a mediana y gran escala de la estructura y distribución espaciotemporal de las formaciones coralinas, sin evaluar el

estado fisiológico de estas. Por lo anterior, se puede considerar que es imposible remplazar totalmente las técnicas tradicionales en la caracterización de ecosistemas marinos, aunque el uso de sensores remotos es una alternativa para la determinación de las relaciones geométricas de las unidades geomorfológicas en la superficie terrestre en zonas insulares del Caribe colombiano.

4. Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante el análisis estadístico se puede afirmar que, de manera general, los datos provenientes de las imágenes satelitales son de gran utilidad en la generación de mapas geomorfológicos para ecosistemas coralinos, lo cual convierte este tipo de insumo en el punto de partida para la planificación, la caracterización y el monitoreo a escala regional y local de los ecosistemas marinos y costeros.

El método utilizado permitió incorporar información de diferentes tipos de datos biofísicos (cuantita-

tivos) y pictomorfológicos (cualitativos), lo que facilitó la realización de un análisis más integral de prescripción de las unidades geomorfológicas, en comparación con métodos tradicionales de identificación. Adicionalmente, los modelos digitales batimétricos (MDB) permitieron visualizar de mejor manera las estructuras, la dinámica y los relieves geomorfológicos.

De acuerdo al análisis comparativo de los resultados de este estudio frente a los obtenidos por otros autores mediante métodos tradicionales, encontramos que estos difieren en cierto modo en cuanto al nivel de segmentación y discriminación de las unidades geomorfológicas, lo que permite caracterizar y mapear de manera rápida y precisa la diversidad morfológica de las formaciones coralinas. Por lo anterior, se considera que esta investigación realiza un aporte importante a las entidades de carácter nacional y regional, encargadas de velar por este tipo de ecosistemas, en cuanto a alternativas metodológicas para la caracterización geomorfológica de ambientes marinos costeros.

Referencias

- Aguilera Díaz, M. (2010). *Geografía económica del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina*. Documentos de Trabajo sobre Economía Regional, n.º 133. Cartagena: Banco de la Republica, Centro de Estudios Económicos Regionales.
- Ángel Martínez, M. C. (1994). *Aplicación de la teledetección en la localización de superficies de agua*. Madrid: Cedex.
- Bernal, G. (1996). Caracterización geomorfológica de la llanura deltaica del río Magdalena con énfasis en el sistema lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 25, 19-48.
- Carpintero, S., Chica, M., Rigol, J. P., Iguzquiza, E. y Galiano, V. (2007). Aplicación de imágenes ASTER y ETM+ para el estudio de la susceptibilidad a la erosión en una zona semiárida (SE España). *Revista de Teledetección*, 28, 13-23. Recuperado de http://www.aet.org.es/revistas/revista28/7-103-Carpintero_revisado.pdf
- Ceccato, P., Gobron, N., Flasse, S., Pinty, B. y Tarantola, S. (2002). Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1. Theoretical approach. *Remote Sensing of Environment*, 82(2-3), 188-197. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425702000378>
- Cerda, J. y Villarroel, L. (2008). Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista Chilena de Pediatría*, 79(1), 54-58. Recuperado de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-41062008000100008
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona: Ariel.
- Díaz, J. M. y Acero, A. (2003). Marine biodiversity in Colombia: achievements, status of knowledge and challenges. *Gayana*, 67(2), 261-274. Recuperado de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0717-65382003000200011&lng=es&nrm=iso&tlng=en
- DigitalGlobe (2016). *DigitalGlobe's satellite constellation*. Recuperado de <https://www.digitalglobe.com>.
- Erhardt, H. y W. Meinel. (1975). Die scleractinen Korallen der Insel Ceycen, Islas San Bernardo, vor der kolumbianischen Atlantikküste. *Phillipia*, 2, 236-247.
- Fuentes Crispín, N. (2015). *Atlas histórico marítimo de Colombia siglos XVI-XVIII*. Bogotá: Comisión Colombiana del Océano.
- Hardin, P. y Shumway E. (1997). Statistical significance and Normalized confusion matrices. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63(6), 735-740.
- García, S. y Martínez, L. (2010). Método para identificación de cultivos de arroz (*Oryza sativa* L.) con base en imágenes de satélite. *Agronomía Colombiana*, 28(2), 1-12. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/18073>

- Gómez, J., Carvajal, H. y Otero, J. (2014). *Propuesta de estandarización de los levantamientos geomorfológicos en la zona costera del Caribe colombiano*. [Convenio Especial de Cooperación Colciencias - Gobernación del Magdalena - Invemar]. Santa Marta: Invemar. Recuperado de <https://www.oceandocs.org/handle/1834/6698>
- Ji, L. y Peters, A. J. (2003). Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 87(1), 85-98. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425703001743>
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. Recuperado de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169608948714>
- Navas, G. R., Solano, O. D. y Torres, D. F. (1992). Las comunidades del bajo arrecifal Inelda, Isla Barú, Caribe colombiano: II Caracterización estructural de la comunidad coralina (Scleractinia). En Comisión Colombiana del Océano (ed.), *Memorias del VIII Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar, Congreso Centroamericano y del Caribe de Ciencias del Mar* (tomo I, pp. 291-303). Santa Marta, Colombia.
- Ramírez, A. I. Borrero y Correal, J. E. (1986). *Ecología descriptiva de las llanuras madreporarias del Parque Nacional Submarino los Corales del Rosario (mar Caribe), Colombia*. Bogotá: Fondo FEN Colombia.
- Rejas, J. G. (2008). *Tratamiento digital previo de las imágenes*. [Máster en Ingeniería Medioambiental y Gestión del Agua 2007/2008. Módulo VII: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección]. España: Escuela de Organización Industrial. Recuperado de http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45518/componente45516.pdf.
- Richter, R. y Schlöpfer, D. (2005). Atmospheric/topographic correction for satellite imagery. *DLR report DLR-IB*, 565-601. Recuperado de http://www.rese.ch/pdf/atcor3_manual.pdf
- Smith, G. M. y Milton, E. J. (1999). The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 20(13), 2653-2662. Recuperado de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/014311699211994>
- Taylor, E., Howard, M. y Baine, M. (2011). *Colombia's Nomination of the Seaflower Marine Protected Area for Inscription on the World Heritage List*. París: Unesco.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127-150.
- Werding, B. y Sánchez, H. (1979). Informe faunístico y florístico de las Islas del Rosario en la costa norte de Colombia. 1, Situación general y estructuras arrecifales. *Anales del Instituto de Investigaciones Marinas de Punta Betín*, 11, 7-20.

