

Aplicación de la teledetección al estudio de la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua en el sector sur oriental de la República de Cuba

Application of remote sensing to the study of the spatio-temporal variation of ecosystems related to water in the south-eastern sector of the Republic of Cuba

Alejandro Cazaurang Rojas¹, Héctor Manuel Fernández Núñez²

¹ Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), Facultad de Ingeniería Civil. Calle 114 entre Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana

² Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), Facultad de Ingeniería Civil. Calle 114 entre Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana

*alejandcazroj@civil.cujae.edu.cu

Resumen

El agua dulce, en cantidad suficiente y de calidad adecuada, es indispensable para todos los aspectos de la vida y fundamental para el desarrollo sostenible. Es precisamente ese valor incalculable, desde el punto de vista social, económico, ambiental y biológico, lo que hace necesario seguir el comportamiento de los ecosistemas relacionados con el agua, y, con ello, salvaguardar la provisión de servicios de agua dulce a la sociedad y a nuestro planeta previniendo sequías e inundaciones. Para ello, como acápite de la meta 6.6, del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS 6), el indicador 6.6.1 permite de forma específica controlar los cambios en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua a lo largo de los años. El presente trabajo se encaminó a evaluar la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua en el sector sur oriental de la República de Cuba durante las etapas secas y lluviosas en los años 2010, 2016 y 2020 aplicando técnicas de teledetección. Como resultado de la aplicación de las técnicas de teledetección se evidenció que, con respecto a la línea base de comparación, los ecosistemas cartografiados relacionados con el agua sufren cambios significativos en cuanto a su extensión en los períodos posteriores analizados.

Palabras clave: ecosistemas, ODS, espacio-temporal, teledetección.

Abstract

Fresh water, in sufficient quantity and of adequate quality, is indispensable for all aspects of life and fundamental for sustainable development. It is precisely this incalculable value, from the social, economic, environmental and biological point of view, that makes it necessary to follow the behavior of water-related ecosystems, and, with it, safeguard the provision of freshwater services to society and our planet by anticipating droughts and floods. To this end, as a section of goal 6.6, of Sustainable Development Goal 6 (SDG 6), indicator 6.6.1 specifically allows monitoring changes in the extent of water-related ecosystems over the years. The present work was aimed at evaluating the spatio-temporal variation of water-related ecosystems in the southeastern sector of the Republic of Cuba during the dry and rainy stages in the years 2010, 2016 and 2020 applying remote sensing techniques. As a result of the application of remote sensing techniques, it was evidenced that, with respect to the baseline of comparison, the mapped ecosystems related to water undergo significant changes in terms of their extension in the subsequent periods analyzed.

Keywords: ecosystems, SDG, spatio-temporal, remote sensing.

1. Introducción

La creciente demanda de recursos de agua dulce, impulsada por diversos factores ambientales y socioeconómicos (por ejemplo, cambio climático, desarrollo agrícola, urbanización, industrialización, crecimiento demográfico alimentos y políticas de seguridad) es una de las serias amenazas para los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)[1]. Los ecosistemas relacionados con el agua, como los lagos, los ríos y los humedales cubiertos de vegetación, son algunos de los entornos con mayor diversidad biológica del mundo; brindan numerosos productos y servicios de los cuales depende el bienestar humano. Aunque estos ecosistemas representan solamente el 0,01% del agua del mundo y abarcan aproximadamente el 0,8% de la superficie terrestre, conforman un hábitat para casi el 10% de las especies conocidas.

El tema global del ODS 6 consiste en velar por que todos dispongan de agua limpia y saneamiento. La meta 6.6 se centra principalmente en proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, de manera que puedan seguir prestando servicios hídricos sostenibles a la sociedad[2]. De los indicadores para la meta 6.6, el 6.6.1 permite de forma específica que los países controlen los progresos realizados hacia el logro de la meta mediante el seguimiento de los cambios en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua a lo largo del tiempo.

Las características del terreno de un área juegan un papel vital en el comportamiento espacial y temporal[3]. La extensión espacial de las masas de aguas abiertas (lagos, ríos y estuarios), humedales cubiertos de vegetación y masas de agua artificiales (embalses) se puede controlar utilizando datos obtenidos por satélite, los cuales son precisos y tienen un gran alcance. Los satélites generan observaciones de la Tierra mediante la captación de imágenes y longitudes de onda luminosas de distintas cubiertas terrestres de todo el planeta mientras orbitan en torno a la Tierra. Es posible combinar miles de imágenes de cualquier ubicación concreta de la Tierra con el fin de clasificar un área y mostrar los cambios producidos en su cubierta terrestre a lo largo del tiempo. Las aguas abiertas, que se definen como cualquier extensión de agua de superficie que no se encuentre obstruida por vegetación acuática, constituyen un ejemplo de tipo de píxel de cubierta terrestre. Esto permite determinar los cambios en la extensión espacial de las aguas abiertas de una zona a lo largo de un largo período de tiempo, y también los lugares donde se han formado masas de agua nuevas (como embalses) o aquellos en los que han desaparecido.

La teledetección se define como la medición de las propiedades de un objeto en la superficie terrestre a partir de datos adquiridos de aeronaves y satélites. Por lo tanto, permite obtener información de un objeto a distancia sin mantener contacto físico con él[4]. Esta herramienta es muy utilizada a nivel mundial en estudios medioambientales, pues se basa en un sistema de adquisición de datos a distancia sobre la biosfera, que relaciona las propiedades de la radiación electromagnética y su interacción con los materiales de la superficie terrestre[5]. Las técnicas de teledetección se han utilizado con éxito para cartografiar en el tiempo las variaciones en la distribución del agua superficial[6].

En Cuba, las técnicas de teledetección aún no ocupan el lugar que podrían tener y particularmente sus aplicaciones en estudios relacionados con los recursos hídricos son muy escasas. El empleo de estas herramientas en investigaciones asociadas puede aportar resultados económicos, técnicos y sociales de alto impacto a nivel nacional.

Se define como objetivo general de la investigación: Evaluar la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua en el sector sur oriental de la República de Cuba.

2. Materiales y Métodos

Área de estudio

La región sur oriental de Cuba en la investigación ocupa todo el territorio de la provincia de Granma y el límite más occidental de la provincia de Santiago de Cuba (**Fig. 1**). Limita al norte con las provincias de Las Tunas y Holguín, al sur con el Mar Caribe, al este con las provincias de Santiago de Cuba y Holguín y al oeste con el golfo de Guacanayabo.

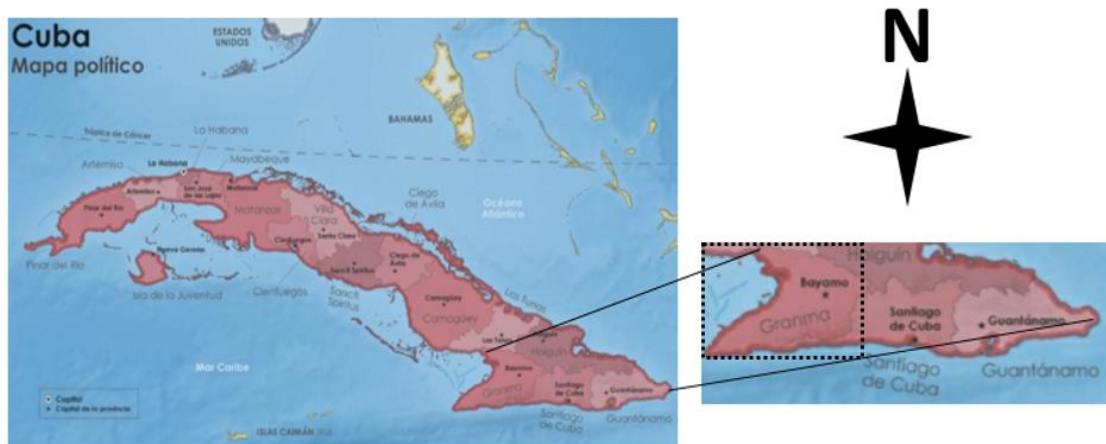


Fig. 1 Mapa político de Cuba. Área de estudio

Materiales

Para determinar los límites de los geosistemas y estudiar su dinámica, se utilizan escenas de revestimientos de imágenes Landsat[7]. Las imágenes de los satélites de observación terrestre estadounidenses Landsat 5, 7 y 8 fueron obtenidas del sitio Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) correspondiente al Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) en los años 2010 (línea base de estudio), 2016 y 2020, discriminando la descarga de imágenes satelitales en etapas secas (meses de noviembre a abril) y etapas lluviosas (meses de mayo a octubre). Específicamente, las imágenes correspondientes a las etapas secas y lluviosas fueron descargadas en los meses de enero de 2010, enero de 2016, diciembre de 2020 y septiembre de 2010, junio de 2016, julio de 2020, respectivamente. Durante la recepción de las imágenes satelitales se tuvo en cuenta el nivel de nubosidad como criterio de selección con la finalidad de obtener la mayor nitidez posible, discriminando las imágenes en que la nubosidad permitiera la visualización de la gran mayoría de los cuerpos presentes en el área. Las imágenes presentan una resolución espacial de 30x30 metros y se encuentran en formato .TIF.

Bajo el sistema de referencia de coordenadas NAD27/Cuba Sur EPSG:3796, en el Sistema de Información Geográfica (SIG) QGIS versión 3.16 Hannover, se realizaron todos los preprocesamientos y procesamientos de imágenes satelitales necesarios para determinar la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua. Dicho SIG es un software libre y de código abierto que permite manejar formatos raster y vectoriales. La excepción estuvo dada por la utilización del software libre MultiSpec como aplicación informática analítica de imágenes multispectrales para realizar específicamente las clasificaciones de las imágenes satelitales.

Modelo Digital de Elevación (MDE)

Del MDE, con una resolución espacial de 30x30 metros, obtenido de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), se obtuvieron los mapas de red de drenaje y de pendiente, este último mediante el cálculo del ángulo de la pendiente en cada celda en grados.

Preprocesamiento de imágenes satelitales

La corrección de imágenes satelitales se ejecutó para anular interferencias que hacían que la información obtenida apareciera perturbada por una serie de errores. Los procesos de corrección se dirigen a mejorar visualmente la imagen para su posterior interpretación, donde los vacíos de información son asociados a los valores de los píxeles más cercanos. La corrección de bandeamiento solamente fue aplicada en la imagen correspondiente a la etapa lluviosa del año 2010, siendo ésta la única imagen con requerimiento de este tipo. Para dicha corrección fue necesario combinar todas las bandas de la imagen en cuestión y posteriormente rellenar sin datos los vacíos de información. Se corrigieron todas las bandas de la imagen de forma independiente.

Confección de imágenes de color verdadero y falso color

Para poder visualizar las imágenes de teledetección en color fue necesario realizar una combinación de tres bandas a través del renderizador multibanda para las propiedades de las imágenes raster. Inicialmente como base se inició con la representación de la combinación que tributa al color natural, pues involucra a las tres bandas visibles y se le asigna a cada una de ellas su verdadero color, resultando una combinación que se aproxima a los colores naturales de la escena. Para las imágenes Landsat 8 la combinación de bandas fue 4-3-2 y para Landsat 5 y 7, 3-2-1.

La combinación de bandas 5-4-3 para Landsat 8 y 4-3-2 para Landsat 5 y 7, se creó debido a que tiene buena sensibilidad a la vegetación verde (aparece representada en una tonalidad roja), debido a la alta reflectividad en el infrarrojo y la baja en el visible, y representa de forma clara caminos y masas de agua. Este último en tonalidades azul oscuro o negro. La combinación 5-6-4 para Landsat 8 y 4-5-3 para Landsat 5 y 7 se utilizó para interpretar usos del suelo/masas de agua, representadas éstas últimas por tonalidades de azul oscuro. Dicha imagen muestra con nitidez los límites entre el agua y la tierra. Mediante la combinación de bandas 5-6-2 para Landsat 8 y 4-5-1 para Landsat 5 y 7, la adición de la banda NIR generó un aumento de la sensibilidad de la detección de varias etapas del crecimiento de plantas; las aguas son caracterizadas según la profundidad que presentan y por ende representadas por tonalidades azul oscuro y azul claro para aguas profundas y someras, respectivamente.

Índice normalizado de vegetación (NDVI)

Para el análisis espacio-temporal, el NDVI es un índice ampliamente empleado en el monitoreo de la vegetación para asociarse a numerosos aspectos ecológicos y funcionales de la misma[8]; calculados a partir de distintos algoritmos matemáticos entre las porciones del espectro electromagnético del infrarrojo próximo (en el que la vegetación tiene una alta reflectancia) y del color rojo (en el que la vegetación tiene baja reflectancia), utilizando en esencia la Ecuación 1.

$$NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red) \quad (1)$$

Para Landsat 5 y 7 se utilizó la Ecuación 2 y para Landsat 8 se utilizó la Ecuación 3.

$$NDVI = (B4 - B3)/(B4 + B3) \quad (2)$$

$$NDVI = (B5 - B4)/(B5 + B4) \quad (3)$$

Índice normalizado de agua (NDWI)

El NDWI se utiliza como una medida de la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo. Este índice refleja otros aspectos del follaje de las plantas, como el estado hídrico o la composición de pigmentos fotosintéticos y pueden complementar al NDVI[8]. Para el cálculo del índice se utilizó la Ecuación 4.

$$NDWI = (Green - NIR)/(Green + NIR) \quad (4)$$

Para Landsat 5 y 7 se utilizó la Ecuación 5 y para Landsat 8 se utilizó la Ecuación 6.

$$NDWI = (B2 - B4)/(B2 + B4) \quad (5)$$

$$NDWI = (B3 - B5)/(B3 + B5) \quad (6)$$

Clasificación supervisada

En el software MultiSpec, inicialmente es necesario cargar cada imagen a clasificar en una combinación de bandas cualesquiera. La cantidad de clases identificadas fueron enumeradas y nombradas seleccionando los píxeles correspondientes a cada campo de manera uniforme y considerando siempre enmarcar en cada sitio de entrenamiento un total de píxeles no menor de seis. Fue seleccionado para la clasificación el método Gaussian Maximum Likelihood (Máxima Verosimilitud Gaussiana).

Clasificación no supervisada

En el MultiSpec se cargó primeramente una imagen en cualquier combinación de bandas y fue seleccionado el algoritmo ISODATA. Se definió la cantidad de clases agrupadas (5 cluters) para luego obtener la clasificación no supervisada en cuestión. Fueron seleccionados 5 clusters con la finalidad de comparar específicamente las mismas clases obtenidas durante la clasificación supervisada.

Procedimiento para la cartografía y evaluación de la variación espacio-temporal

Tomando el mapa de pendiente y la red de drenaje del área de estudio como punto de partida de la investigación para identificar la manifestación de los cuerpos de agua, y la integración de los mapas de combinación de bandas, índice y clasificación, fue posible obtener los mapas finales de la cartografía de los cuerpos de agua y su consecuente variación espacio-temporal. Se discriminaron, de manera íntegra, los cuerpos presentes en la región de estudio como “cuerpos de agua” y “cuerpos de no agua”, siendo solamente cartografiadas las masas de agua a partir de la vectorización de los mapas obtenidos previamente en el procesamiento de las imágenes satelitales. Los términos numéricos fueron calculados particularmente a través de la calculadora de campos perteneciente a la tabla de atributos de las capas vectoriales.

3. Resultados y Discusión

Resultados del Modelo Digital de Elevación (MDE)

La topografía es un factor crucial que gobierna la escorrentía superficial y, por tanto, la pendiente del terreno tiene un efecto significativo[9]. Las áreas de pendiente baja o suave permiten que el agua se acumule durante mucho tiempo[10]. Los resultados de pendiente representan la inclinación en grados del área de estudio desde cada celda de la superficie raster, aportando complementos interpretativos en los estudios hidrológicos, lo cual ayuda a identificar en este caso, los ecosistemas relacionados

con el agua, pues los resultados reflejan que cuanto menor sea el valor de la pendiente, más plano es el terreno y, lógicamente, cuanto más alto sea el valor de la pendiente mayor inclinación tiene. Complementariamente, los resultados de la red de drenaje están relacionados con factores naturales vinculados a la geomorfología, en relación con el nivel de inclinación de las pendientes.

Análisis de las imágenes de color verdadero y falso color

Una imagen de composición de color verdadero muestra una combinación de bandas visibles con los correspondientes canales rojos, verdes y azules. Dicha composición ofrece una imagen lo más similar a la realidad. En términos más específicos, la vegetación aparece en tonos verdes, la tierra desnuda y las superficies impermeables en gris claro y marrón, y el agua de azul a negro, que según su profundidad manifiestan tonalidades correspondientes más o menos oscuras (las tonalidades más oscuras representan mayor profundidad). El resultado de las imágenes de color verdadero en las etapas secas y lluviosas expone detalladamente las características del área en los años 2010, 2016 y 2020 (combinación 4-3-2 para Landsat 8 y 3-2-1 para Landsat 5 y 7).

Las imágenes de combinación de bandas 5-4-3 para Landsat 8 (**Fig. 2**) y 4-3-2 para Landsat 5 y 7, infrarrojo cercano, en las etapas secas y lluviosas en los años 2010, 2016 y 2020, permiten identificar los límites entre el suelo y el agua. En general en esta composición los mapas reflejan distintas clasificaciones de la vegetación, debido a que es una combinación fue factible para este campo, sin embargo, su gran capacidad para distinguir masas de agua en tonalidades de azul oscuro a negro facilita la identificación de los cuerpos de agua superficial. En esta composición la vegetación aparece en tonos rojos o rosados y cuanto más sana esté más brillante es su color. Los suelos desnudos, ya sea de vegetación muy escasa o nula, y las áreas urbanas, varían de marrón oscuro a marrón claro y/o color azul claro o blanco.

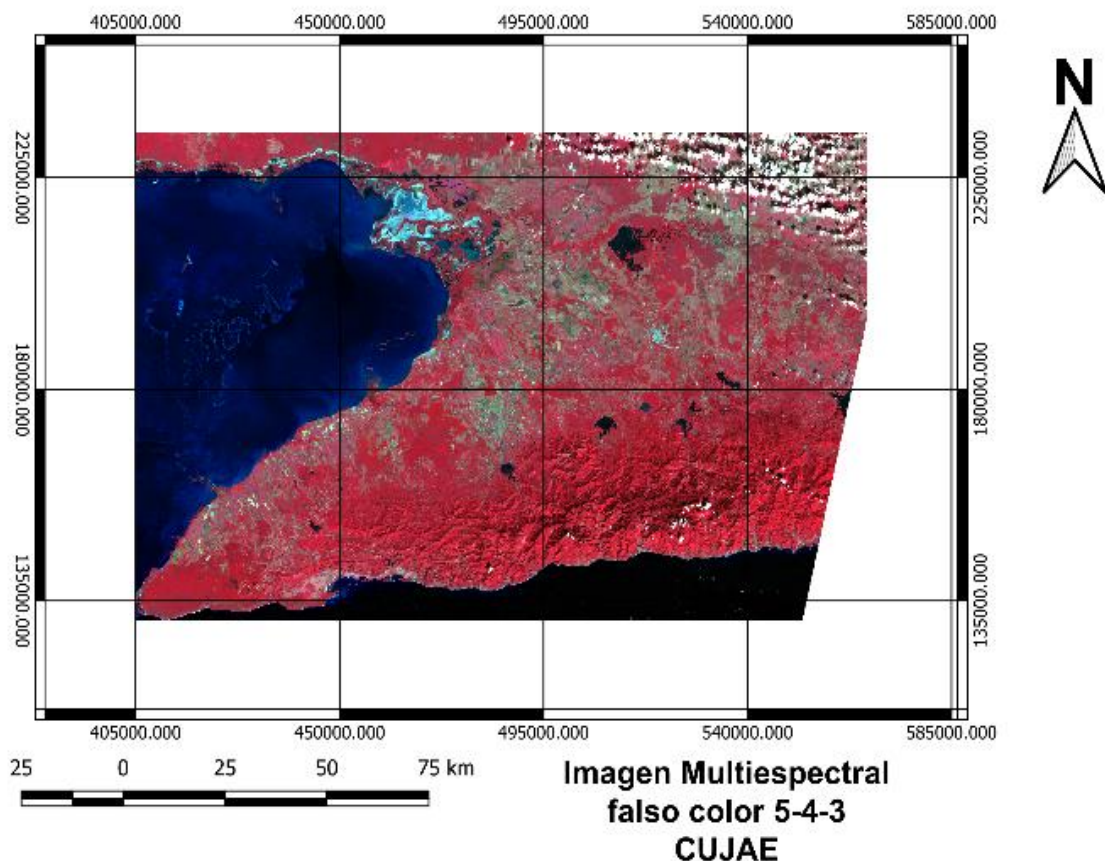


Fig. 2 Mapa de falso color 5-4-3 correspondiente a la etapa lluviosa en el año 2020

Las imágenes de combinación de bandas 5-6-4 para Landsat 8 y 4-5-3 para Landsat 5 y 7, en las etapas secas y lluviosas en los años 2010, 2016 y 2020, se utilizan para interpretar usos del suelo/masas de agua. Esta combinación, con una banda en la región visible (Red) y dos en la del infrarrojo (NIR, SWIR 1) permite una diferenciación de la vegetación en tonos marrones, verdes y amarillos. Las áreas urbanas y los suelos expuestos aparecen en tonos azul claro, mientras que las áreas inundadas y el agua aparecen en tonos de azul oscuro a negro.

Las imágenes de combinación de bandas 5-6-2 para Landsat 8 y 4-5-1 para Landsat 5 y 7, en las etapas secas y lluviosas en los años 2010, 2016 y 2020, facilitan, en general, los estudios de vegetación, sin embargo, los cuerpos de agua se representan en tonos muy oscuros, de azul o negro. Debido a ello esta combinación es factible para identificar masas de agua, vegetación e incluso una supuesta relación entre ambos parámetros debido a la presencia de contenido de agua en las plantas más vigorosas. La vegetación sana aparece en tonos de rojos, marrones, naranjas y amarillos; los suelos con escasa vegetación son representados en tonos de verde; las zonas urbanas son azules claras, blancas o incluso verdes muy claras; y las zonas rojizas representan vegetación nueva.

Todas las combinaciones identificaron que los cuerpos de agua superficial se localizan en la región norte y noroeste de la Sierra Maestra.

Análisis de los cálculos de índices

El NDVI mantiene su esencia en conocer el estado de vigor vegetal sobre grandes espacios a partir de la medición de la diferencia normalizada entre la reflectancia del rojo y del infrarrojo cercano, sin embargo, los resultados del cálculo del NDVI, que varían de -1 a 1, reflejan, además, la existencia de superficies de agua adoptando valores negativos. La clorofila absorbe una gran cantidad de luz visible y la estructura celular de las hojas de las plantas refleja intensamente la luz infrarroja cercana, lo cual cuantifica, según el estado vigoroso de la planta, la reflexión de luz infrarroja cercana. En general, los otros parámetros identificados en las imágenes de NDVI son: suelo desnudo generalmente en el rango de 0.1 a 0.2; vegetación sana y densa por encima de 0.5; vegetación dispersa entre 0.2 y 0.5 y vegetación escasa entre 0.2 y 0.4.

El NDWI es un indicador numérico que utiliza las ondas de infrarrojo cercano y corta las bandas espectrales del infrarrojo. Esta última banda espectral está muy asociada con cambios en el contenido de agua de vegetación y la respuesta del infrarrojo cercano se correlaciona con la estructura interna de la hoja excluyendo el contenido de agua. Los resultados del cálculo del índice, que varían de -1 a 1, permiten la cartografía de la tierra / agua de embarque y fundamentalmente la discriminación de agua hacia el interior de los cuerpos de agua. Por lo general, los valores cercanos a -1 representan superficies sin vegetación o sin agua y a medida que los valores se aproximan a cero (valores negativos) se manifiesta un aumento de ambos parámetros; los valores positivos indican zonas con cobertura e hidratación creciente.

Técnicas de clasificación

La clasificación supervisada parte de un conocimiento previo de la zona de estudio adquirido por el procesamiento precedente de la información. Dicha información permite delimitar sobre la imagen varias áreas que representan las categorías de la leyenda que caracteriza el mapa. Las áreas fueron agrupadas en cinco clases fundamentales, partiendo de una combinación de falso color (infrarrojo cercano) tomada como base de clasificación. Los resultados arrojan de forma distintiva todas las áreas identificadas en las imágenes correspondientes a las etapas secas y lluviosas en los años 2010, 2016 y 2020, sin embargo, algunas zonas previamente reconocidas como parte de los cuerpos de agua (teniendo en cuenta la información previa utilizada para realizar esta clasificación) son identificadas como pertenecientes a la clase de vegetación sana y desarrollada, lo cual puede ser justificado por el

comportamiento aparentemente similar de las firmas espectrales de la vegetación sana y desarrollada y de la zona de duda. Ambas firmas espectrales se mantienen en la misma longitud de onda y los altos valores de desviación estándar en cada una de ellas pueden ser los responsables del agrupamiento de píxeles en una misma clase. Es válido recalcar que, además, ello puede estar asociado a la existencia de vegetación marina en dichos ecosistemas.

La clasificación no supervisada realiza una definición automática de agrupamiento de los campos de una imagen sin la intervención por parte del usuario. Ello implica, posteriormente, la identificación de cada uno de los clusters definidos durante el procesamiento. Los clusters 1, 2, 3, 4 y 5 se identifican como los campos de nube, agua, vegetación menos desarrollada, vegetación sana y desarrollada y vegetación escasa o nula, respectivamente. Los resultados enmarcados reflejan una imagen reclasificada que corroboró, fundamentalmente, la distribución de las distintas clases de vegetación identificadas en la clasificación supervisada, sin embargo, también los resultados arrojaron rectificaciones en cuanto a los cuerpos de agua se refiere.

Integración de resultados y evaluación de la cartografía

En términos de análisis espacio-temporal se interpreta que, con respecto a la línea base de comparación (año 2010), los años posteriores analizados sufren cambios significativos en cuanto a la extensión de los cuerpos de agua.

Los cuerpos de agua cartografiados y evaluados son reconocidos como masas de agua artificiales (embalses) y humedales. Para el caso particular de los ríos y estuarios es determinante la resolución de trabajo del sensor de Landsat (resolución espacial de 30m). El nivel de detalle depende de la resolución espacial del satélite. Algo similar ocasiona la no cartografía de lagos y/o lagunas, siendo éstas muy poco características de la región de estudio y el país en general, y las existentes presentan dimensiones muy pequeñas.

En la **Tabla 1** y la **Tabla 2** se representan numéricamente la variación espacio-temporal de 12 ecosistemas relacionados con el agua seleccionados durante las etapas secas y lluviosas en los años 2010, 2016 y 2020. La **Fig. 3** y la **Fig. 4** realzan dicha manifestación.

Tabla 1. Variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua durante las etapas secas en los años 2010,2016 y 2020

Ecosistema	Área(m ²)		
	2010	2016	2020
1	2841945.292	774311.569	2744467.542
2(embalse Paso Malo)	6040294.633	6195658.893	6293123.671
3	8666767.786	8666446.9	9830261.741
4	5915511.444	4284698.819	3225826.685
5	5231896.852	4532883.796	5264507.948
6	3684044.492	1750214.82	2468607.602
7	5203244.879	1334718.042	7024612.707
8(embalse Carlos M. de Céspedes)	13271039.22	7834600.8	10508471.31
9(embalse Cauto del Paso)	42627210.28	13037470.58	38239202.51
10	13603824.2	13135602.74	7337973.468
11	11248051.41	28726678.79	13459085.16
12	22733428.7	22709201.84	22278166.42

Tabla 2. Variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua durante las etapas lluviosas en los años 2010,2016 y 2020

Ecosistema	Área(m ²)		
	2010	2016	2020
1	760789.258	891150.491	2751121.292
2(embalse Paso Malo)	3774434.34	5461341.652	6314222.131
3	5666769.059	9463426.203	9997453.892
4	5906044.442	5026284.309	2825668.569
5	3188175.032	3529785.294	1705997.746
6	1667400.042	2322039.229	2385001.484
7	2550603.772	1553146.682	6490494.854
8(embalse Carlos M. de Céspedes)	9590210.341	7787218.686	9670430.744
9(embalse Cauto del Paso)	20895928.9	11913097.12	21033720.21
10	11091573.9	11562417.64	2922091.7
11	67998267.76	84026518.77	51243732.93
12	22745436.6	22717212.87	22279235.47



Fig. 3 Representación gráfica de la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua durante las etapas secas en los años 2010, 2016 y 2020

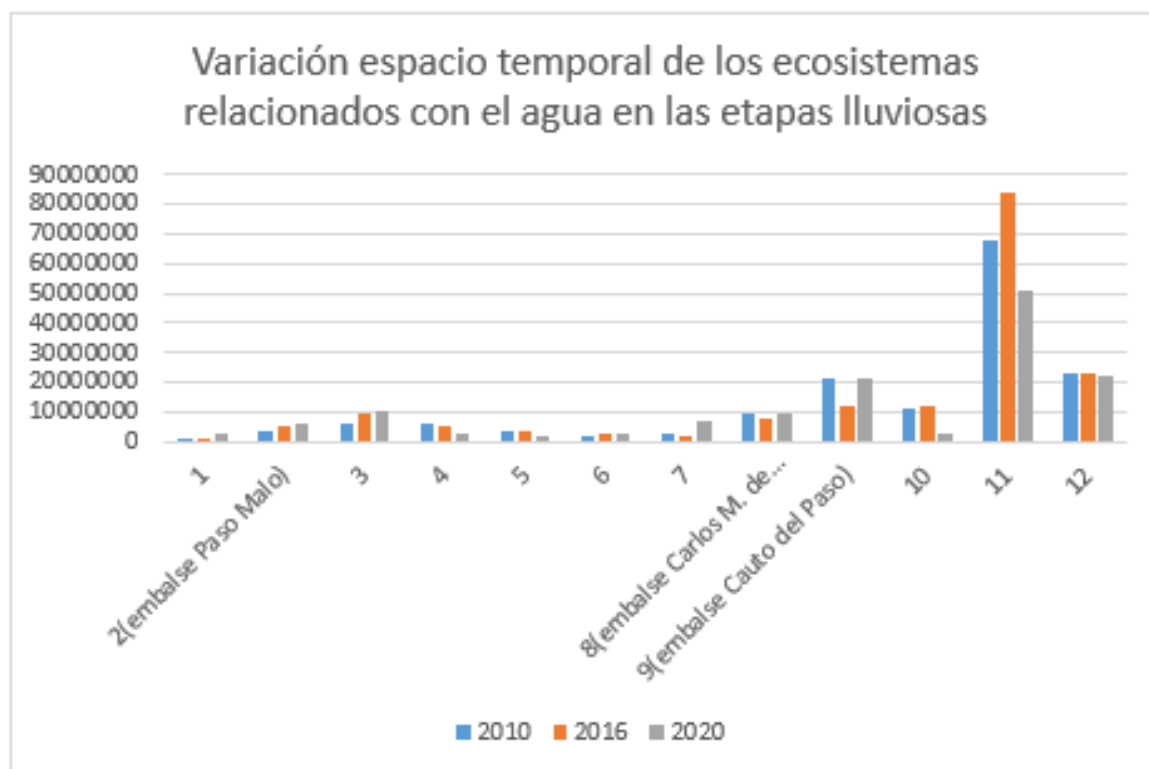


Fig. 4 Representación gráfica de la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua durante las etapas lluviosas en los años 2010, 2016 y 2020

Los resultados mostrados de la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua en las etapas secas evidencian en la mayoría de los cuerpos de agua una disminución en su extensión en el año 2016 con respecto a la línea base de estudio (año 2010). La provincia Granma ese mes fue la única provincia que registró una precipitación absoluta superior a su media histórica, con 41.5 mm (111%) (media histórica del mes de 37.3 mm). En el mes de enero del año 2016, solamente en Granma no se sobrepasó la media histórica mensual (25.7 mm registrados durante el mes de enero de 2016). En general, en el mes de enero del año 2010, la región más favorecida fue la región oriental, fundamentalmente por ser la que presentó la menor porción de municipios con registros inferiores al 50%; mientras que, en el mes de enero del año 2016, Oriente fue la región menos favorecida al presentar la menor proporción de municipios que superaron la media histórica y la única con municipios donde no se sobrepasó el 50 % de lo esperado. Ya para el año 2020 (mes de diciembre) se aprecia un aumento relativo de extensión para la mayoría de los ecosistemas relacionados con el agua, sin embargo, no se recuperan valores iguales o mayores en comparación con el año de línea base, salvo excepciones. Diciembre comenzó con el transito del primer frente frío de la temporada 2020-2021 sobre la región central de Cuba el día 1ro, el cual generó a su paso algunos chubascos y lluvias. La banda frontal continuó desplazándose lentamente sobre la región oriental el día 2, quedando casi-estacionaria.

Por otro lado, los resultados mostrados de la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua en las etapas lluviosas evidencian un comportamiento variable, aunque en la mayoría de los cuerpos de agua hay un aumento relativo en la extensión de los mismos en el año 2016 con respecto al año 2010. Nacionalmente, la precipitación de junio de 2016 ascendió al 100 % de la media histórica mensual; en Oriente se registraron acumulados algo semejantes desde el punto de vista relativo con un 91%. Para el año 2020 igualmente se nota un aumento relativo en la extensión de la mayoría de los cuerpos de agua donde incluso se registran los valores de las etapas lluviosas en los tres años de análisis. Durante los primeros doce días del mes de julio de 2020 ocurrieron

considerables precipitaciones en gran parte del archipiélago cubano y estuvieron relacionadas con la presencia de bajas en la troposfera alta. Ya a fines de mes, se incrementaron las precipitaciones en la región oriental de país debido a la influencia de la circulación externa de Isaías, aunque solo en ese momento era tormenta tropical.

Teniendo en cuenta el comportamiento de la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua en la región de estudio, en la **Fig. 5** se realiza una comparación integrada en cuanto a la manifestación de estos en ambas etapas.

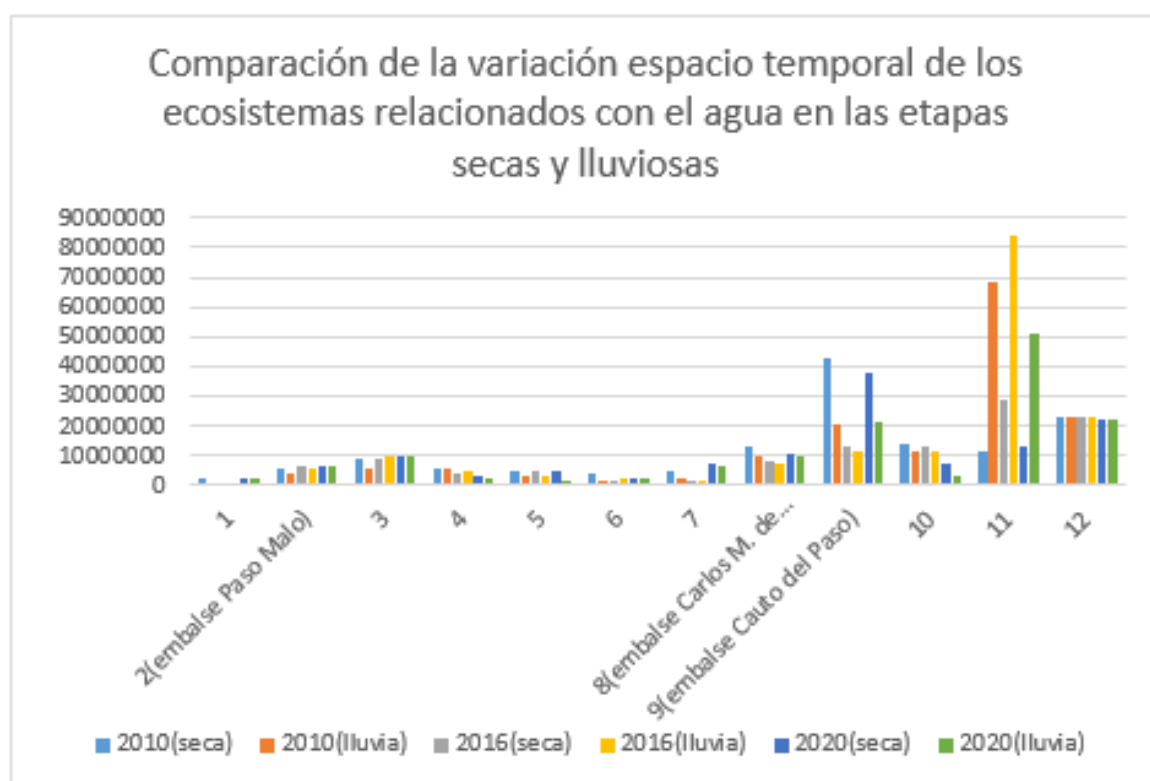


Fig. 5 Comparación gráfica de la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua en las etapas secas y lluviosas

Particularmente, analizando el año 2010, se evidencia que en la mayoría de los ecosistemas relacionados con el agua la extensión de los mismos es mayor en etapa seca que en etapa lluviosa. Es concluyente resaltar que específicamente se están analizando imágenes satelitales correspondiente a los meses de enero (etapa seca) y septiembre (etapa lluviosa), donde el primer mes del año estuvo caracterizado por el paso de 5 frentes fríos correspondientes a la etapa invernal 2009-2010 (frentes fríos números: 9, 10, 11, 12 y 13). Esa situación representó una anomalía positiva en el valor climático de los frentes fríos que afectan Cuba, cuando se consideraba de tres frentes fríos para el mes. Ya para el mes de septiembre es importante resaltar que es este mes el penúltimo de la temporada lluviosa, lo cual está concatenado con el inicio de la temporada de sequía. Ya para el caso del año 2016, la mayoría de los ecosistemas relacionados con el agua presentan, en general, una extensión relativamente sostenible en ambos períodos. Es lógico por supuesto, que algunas masas acuáticas reflejen una mayor extensión durante la etapa lluviosa, sin embargo, se evidencian también, cuerpos de agua que muestran un comportamiento inverso. Es válido resaltar que en el mes de enero de ese año (etapa seca) las situaciones meteorológicas significativas a escala sinóptica que se presentaron fueron la presencia de sistemas invernales, como las bajas extratropicales, los frentes fríos precedidos de fuertes hondonadas activas y rápida intensificación, irrupción de aire frío en bajas latitudes, las

vaguadas de ondas cortas en la troposfera baja y media y la posición de la corriente en chorro subtropical e intensidad, las que incidieron en la inestabilidad atmosférica sobre Cuba. Esas situaciones meteorológicas fueron responsables de las lluvias registradas en el territorio cubano, las que contribuyeron a anomalías positivas. Los sistemas invernales que influyeron son representativos de la anomalía atmosférica manifestada y asociadas a la presencia del evento El Niño/Oscilación del Sur (ENOS). Por último, en el año 2020, al igual que en el año 2016 se identifican algunos ecosistemas que se comportan de forma similar tanto en la etapa seca como en la etapa lluviosa, en cuanto a términos de extensión se refiere. Solamente el ecosistema relacionado con el agua número 11 se manifiesta con una gran diferencia favorable a la etapa lluviosa, y similarmente el embalse Cauto del Paso, pero de forma inversa. Tanto para el caso de las masas de agua que se manifiestan con una mayor extensión en la etapa seca como para aquellas que mantienen su extensión sostenible es válido acatarse a lo antes expuesto con respecto al mes de diciembre de 2020 durante el análisis independiente de las masas de agua en el período de sequía.

Específicamente en el ecosistema relacionado con el agua número 11 es necesario resaltar su inestabilidad espacio-temporal. Dicho cuerpo de agua fue anteriormente identificado como un humedal relacionado con el cultivo de arroz y el acuacultivo del camarón, al noroeste de la región de estudio, y por ende su comportamiento, conjuntamente con las características climáticas del territorio, puede estar asociado a su utilidad, tal vez en ocasiones excesiva, para fomentar los cultivos antes mencionados.

4. Conclusiones

Con este trabajo se le da cumplimiento al indicador 6.6.1 de la meta 6.6 correspondiente al ODS 6, donde se logró dar seguimiento a la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua en la región de estudio durante las etapas secas y lluviosas para los años 2010, 2016 y 2020. La confección de los mapas de variación espacio-temporal evidenciaron que, con respecto a la línea base de comparación, los ecosistemas cartografiados relacionados con el agua sufren cambios significativos en cuanto a su extensión en los períodos posteriores analizados. Los resultados mostrados de la variación espacio-temporal en las etapas secas evidencian en la mayoría de los cuerpos de agua una disminución en su extensión en el año 2016 con respecto a la línea base de estudio (año 2010). Ya para el año 2020 se aprecia un aumento relativo de extensión para la mayoría de los ecosistemas relacionados con el agua, sin embargo, no se recuperan valores iguales o mayores en comparación con el año de línea base, salvo excepciones. Por otro lado, los resultados mostrados de la variación espacio-temporal de los ecosistemas relacionados con el agua en las etapas lluviosas evidencian un comportamiento variable, aunque en la mayoría de los cuerpos de agua hay un aumento relativo en la extensión de los mismos en el año 2016 con respecto a la línea base (año 2010). Para el año 2020 igualmente se nota un aumento relativo en la extensión de la mayoría de los cuerpos de agua.

Referencias

1. Achu, A., J. Thomas, and R. Reghunath, *Mapping of groundwater recharge potential zones and identification of suitable site-specific recharge mechanisms in a tropical river basin*. Earth Systems and Environment, 2019: p. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00138-5>
2. Dickens, C., L.-M. Rebelo, and L. Nhamo, *Guideline and indicators for Target 6.6 of the SDGs: Change in the extent of water-related ecosystems over time*, in *Programa de Investigación sobre el Agua, la Tierra y los Ecosistemas (WLE)*. 2017.

3. Aju, C.D., et al., *Terrain characteristics and their influence on the temporal behaviour of hydraulic heads in kallada river basin, Kerala*. Geological Society of India, 2019: p. 61–67. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12594-019-1123-y>
4. Schowengerdt, R., *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. 2007. ISBN: 978-0123694072.
5. Pérez-Gutiérrez, Y., et al., *Efecto del Dique sur sobre las coberturas del humedal de Güira de Melena, Artemisa, Cuba*, in *Acta Botánica Cubana*. 2020. p. 148-157. ISSN: 2519-7754.
6. Alshehri, F., et al., *Mapping the Distribution of Shallow Groundwater Occurrences Using Remote Sensing-Based Statistical Modeling over Southwest Saudi Arabia*. Remote Sensing, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12091361>
7. Sagatbaev, E., E. Krupochkin, and A. Dunets, *A spatio-temporal analysis of the Teniz-Korgalzhyn trench geosystems based on the Landsat and Sentinel satellite image decoding materials*. Earth and Environmental Science 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/395/1/012047>
8. Denis, D., et al., *Variación espacio-temporal de la respuesta espectral en manglares de La Habana, Cuba, evaluada con sensores remotos*, in *Revista Biología Tropical*. 2020. p. 321-335. ISSN: 0034-7744.
9. Achu, A., J. Thomas, and R. Reghunath, *Multi-criteria decision analysis for delineation of groundwater potential zones in a tropical river basin using remote sensing, GIS and analytical hierarchy process (AHP)*. Groundwater for Sustainable Development, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100365>
10. Ahirwar, S., et al., *Application of Remote Sensing and GIS for Groundwater Recharge Potential Zone Mapping in Upper Betwa Watershed*. JOURNAL GEOLOGICAL SOCIETY OF INDIA 2020. **95**: p. 308-314. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12594-020-1430-3>

Este artículo no presenta conflicto de intereses.

Contribución autoral

Alejandro Cazaurang Rojas. Autor principal. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3172-128X>

Participó en la conceptualización, investigación, metodología y redacción, revisión y edición.

Héctor Manuel Fernández Núñez. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0096-2894>

Participó en la supervisión, validación y redacción, revisión y edición.