Estimación de la cobertura forestal en la cuenca hidrográfica del río "San Juan", Cuba

Alain Paneque Martínez E-MAIL: alain5@uo.edu.cu
Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba.

Ofelia Pérez Montero E-MAIL: ofelia@uo.edu.cu
Centro de Estudios Multidisciplinarios de Zonas Costeras. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba.

Celene Milanés Batista E-MAIL: unimagdalena@cmb.edu.co
Universidad del Magdalena. Santa Marta. Colombia. Departamento civil y ambiental.

José Fernando Álvarez Vega E-MAIL: alvarez@uo.edu.cu
Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba.

RESUMEN

Una problemática a nivel mundial es la pérdida de cobertura boscosa, por lo que su protección es prioridad en Cuba, además de formar parte del plan del estado para enfrentamiento al cambio climático. El objetivo de esta investigación consistió en evaluar la dinámica espacio-temporal del cambio de cobertura boscosa acontecida entre los años 2015 y 2023 en la cuenca hidrográfica "San Juan", provincia de Santiago de Cuba. Se realizó el análisis multitemporal y clasificación supervisada de imágenes satelitales Landsat 8, bandas 6-5-4 del sensor OLI-TRS, procesadas en el software profesional QGIS v-3.24. Se catalogó la cobertura en cuatro categorías y se determinó el área de cobertura boscosa. Como resultado se obtuvo que índice de boscocidad disminuyó en 1.32%, con una afectación de 182 ha de cobertura boscosa de la cuenca.

PALABRAS CLAVES: cobertura forestal, cuencas hidrográficas, imágenes satelitales, índice de boscocidad, SIG

Estimation of forest cover in the "San Juan" river basin, Cuba.

ABSTRACT

A worldwide problem is the loss of forest cover, so its protection is a priority in Cuba, in addition to being part of the state plan to confront climate change. The objective of this research was to evaluate the spatio-temporal dynamics of forest cover change between 2015 and 2023 in the "San Juan" watershed, province of Santiago de Cuba. A multitemporal analysis and supervised classification of Landsat 8 satellite images, bands 6-5-4 of the OLI-TRS sensor, processed in the professional software QGIS v-3.24 was carried out. The cover was catalogued into four categories and the area of forest cover was determined. As a result, the forest cover index decreased by 1.32%, affecting 182 ha of forest cover in the watershed.

KEYWORDS: forest cover, watersheds, satellite images, forest cover index, GIS.

CITMA CERTIFICADO

Septiembre 2024-RECIBIDO *APROBADO Septiembre 2024*

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

SciELO

01 INTRODUCCIÓN

Entre los principales problemas que afronta en la actualidad muchos países en vía de desarrollo, se encuentra, el manejo incorrecto de sus recursos naturales (Alarcón et al. 2019). El importante crecimiento demográfico y concentración de la población en asentamientos humanos, la pobreza estructural, la debilidad de sectores alternativos, el mal uso de los suelos y la inexistencia de vigilancia y control en áreas naturales, son algunas de las diversas causas que propician una serie de transformaciones ambientales y efectos negativos que deterioran los bienes y servicios ecosistémicos dentro de las cuencas hidrográficas, que unidas a las altas tasas de consumo, tienen como resultado patrones asociados a procesos de degradación de hábitat y altos índices de deforestación (FAO 2006).

Los factores directos e indirectos son dos de los principales impulsores de la deforestación, entre los que se incluyen factores ecológicos, sociales, comerciales y biofísicos que interactúan de forma compleja y que, en última instancia, provocan la pérdida de vegetación. Los factores directos de la deforestación pueden ser tanto naturales como antropogénicos (FAO 2006). Entre los impulsores directos naturales se encuentran los daños causados por las fuertes inundaciones, las zonas quemadas por los incendios forestales, la infestación o el ataque de parásitos o depredadores y los huracanes.

En Cuba la protección de la cobertura vegetal tiene como eje principal de su tutela jurídica la Ley No. 85 de 21 de julio de 1998, y como parte de la complementariedad a esta legislación, existen un conjunto de resoluciones que desde la institucionalidad gubernamental garantizan esta protección (Alarcón et al. 2019). Conforme a la dinámica forestal, se encuentran cubiertos el 31,15% de la superficie terrestre nacional, lo que conforma el patrimonio forestal. Éste se encuentra administrado por diferentes poseedores de tierras, siendo los más representativos, las empresas Agroforestales, la Empresa Nacional de Flora y Fauna y las empresas Agropecuarias y Ganaderas (Alarcón et al. 2019).

A lo anterior se suma que, como parte de la política ambientalista del país, en el Plan de Estado para el enfrentamiento al cambio climático (Tarea Vida), se intenciona el cuidado y conservación de la cobertura forestal, como parte de la Tarea No. 5, y se diseñan medidas estratégicas, institucionales, legales, o de carácter organizativo, así como inversiones y otros gastos, para dirigir la reforestación hacia la máxima protección de los suelos y las aguas en cantidad y calidad. Todo ello en congruencia con la Estrategia ambiental nacional (2021-2025), donde se declara expresamente que la deforestación es un problema ambiental del país (CITMA 2022).

Los análisis de cambios en la vegetación, características de los paisajes o propiedades de los hábitats por medio de información satelital son relativamente frecuentes, pero en Cuba han sido poco abordados (CITMA 2022).

La cobertura terrestre se reconoce mediante dos términos: cobertura y uso de la tierra. El primero hace referencia a los aspectos presentes de la superficie de la tierra, independiente de su origen (natural o antrópico) e involucra la fisonomía y composición de la cobertura vegetal. El segundo término se aplica a los tipos de ocupación o utilización que de una cobertura hace el hombre, de forma temporal o permanente (Chuvieco et al. 2010).

De acuerdo con criterios de (Chávez 1996), el conocimiento de la cobertura constituye uno de los aspectos más importantes dentro de los análisis biofísicos de los territorios, ya que permite espacializar los cambios de las coberturas y hacer una lectura ante diferentes escenarios de tiempo (análisis multitemporales).

La aplicación de tecnologías basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG) es cada vez más relevante para estimar y monitorear parámetros forestales en períodos cortos (Chávez 1996). De

acuerdo con Borges et al. (2019), existe un particular interés en el manejo forestal del uso de imágenes satelitales para la estimación de atributos forestales, ya que favorecen la obtención de datos consistente, actualizada y espacialmente explícita en áreas de difícil acceso y con amplia cobertura. Al respecto, la estimación de parámetros forestales a partir de la combinación del uso de satélites, sistemas de información geográfica y de sitios de campo georreferenciados (sitios permanentes) se han convertido en técnicas útiles y confiables para estimar variables como el volumen forestal y la biomasa forestal aérea (Chávez 1996).

Las técnicas relacionadas con la percepción remota han significado una herramienta fundamental para el estudio del ambiente (Chuvieco et al. 2010). Estas técnicas constituyen un conjunto de instrumentos que permiten la obtención, medición y registro de información a distancia, fundamentalmente se basan en las propiedades que poseen los diferentes cuerpos de reflejar la energía electromagnética proveniente de la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre. Las imágenes obtenidas por los satélites ofrecen una perspectiva única de la tierra y sus recursos. El valor de las imágenes de satélite y la información extraída de ellas ofrecen una cobertura global y periódica de la superficie terrestre con una visión panorámica y homogeneidad en la toma de datos (Chuvieco et al. 2010).

Por su parte, según Sobrino (2011), el análisis multitemporal permite detectar cambios entre diferentes fechas de referencia, deduciendo la evolución del medio natural o las repercusiones de la acción humana sobre ese medio. Estos estudios evalúan la velocidad de la deforestación o reforestación, determinan su extensión geográfica y contribuyen al entendimiento de las causas naturales, sociales o económicas de los cambios en las escalas global, regional y local.

El paulatino y acentuado deterioro de ecosistemas frágiles, la consecuente pérdida sensible de suelos productivos y de la diversidad biológica, cambios en los ciclos hidrológicos e inundaciones, deterioro de las condiciones higiénico-ambientales, así como la pérdida de la capacidad de fijar el carbono son atributos de la inevitable y progresiva deforestación, (CITMA 2022) la cuenca hidrográfica San Juan, que tributa a la zona costera de la ciudad de Santiago de Cuba, constituye uno de los escenarios más representativos de esta situación en el municipio y de la cual los estudios con imágenes satelitales son escasos. El presente estudio se realizó con el objetivo de evaluar la dinámica espacio-temporal del cambio de cobertura boscosa que esta área ha experimentado durante el período comprendido entre 2015 al 2023, que permitió analizar los parámetros socioeconómicos que afectan la degradación de la cobertura boscosa de la zona objeto de estudio.

Esta investigación tiene un carácter interdisciplinar e interinstitucional. Es una investigación exploratoria y se basa en los principios del manejo integrado de cuencas y zonas costeras (Alarcón et al. 2021). Se hizo uso del método cualitativo de la investigación social para el análisis de contenido de documentos históricos sobre el crecimiento de la ciudad de Santiago de Cuba según fuentes de la Oficina Nacional de Información y Estadísticas de Cuba (ONEI 2022) y el auxilio de los sistemas de información geográfica.

02 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

UBICACIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA

De acuerdo con la clasificación de Regiones Naturales y Antrópicas de Cuba de A. Núñez Jiménez y N. Viña Bayés (1989) la zona de estudio se encuentra ubicada en la Región Oriental, subregión de la Sierra Maestra, provincia de Santiago de Cuba, Cuba. La cuenca del río “San Juan” se ubica en la ciudad de Santiago de Cuba (19º58,0´N; 75º49,4´W), al este del archipiélago cubano, como se muestra en la figura 1 (García et al. 2021).

El área de estudio tiene 138,1 km^2 de superficie. Está identificado como un ecosistema bajo protección de interés provincial. Es una cuenca fluvial permanente, con un caudal hiperanual superficial medio aproximado de 30,1 hm^3, el principal río desemboca en el paso Aguadores en el Mar Caribe y sus principales afluentes son los ríos: Seco, Zacateca, Maisí, Cocal y Soledad. Está formado por la cuenca principal superficial y la subterránea (Duran 2021).

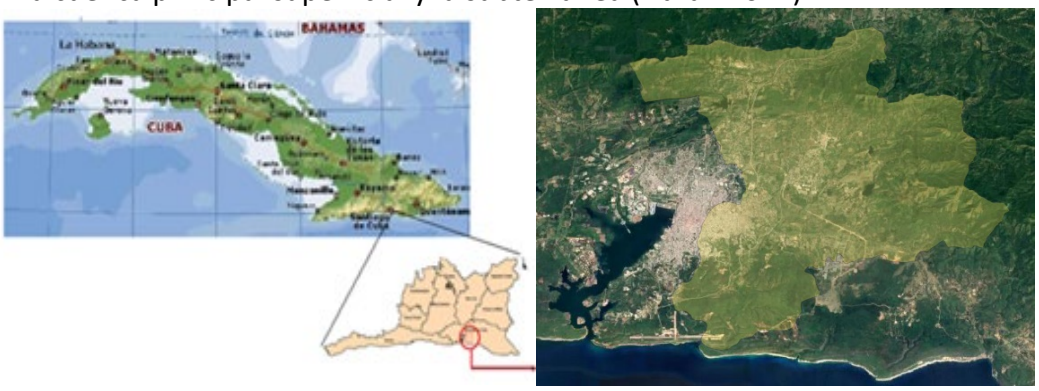

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio mediante software QGIS (Paneque 2023)

SÍNTESIS DE LA EVOLUCIÓN DEMOGRÁFICA DE LA CIUDAD DE SANTIAGO DE CUBA

Santiago de Cuba surge como villa en el año 1515. Por el desarrollo alcanzado, se convirtió en una de las ciudades más importantes de Cuba, siendo capital del país desde 1515 hasta 1556, año en que pasa a ser el segundo Gobierno de la Isla. Al dividirse la Isla en tres departamentos (Occidental, Central y Oriental) se mantuvo como capital del Departamento Oriental a lo largo de las diferentes divisiones político-administrativas. En 1878 se crea la antigua provincia Santiago de Cuba (figura 2), quedando dividida a su vez en términos municipales. Para 1960 se decidió incrementar el número de municipios y fortalecer la autoridad de las instancias provinciales de Gobierno. Se creó además un eslabón intermedio llamado región, con el objetivo de mejorar el sistema organizativo y de dirección territorial de las actividades económicas y sociales (ONEI 2021).

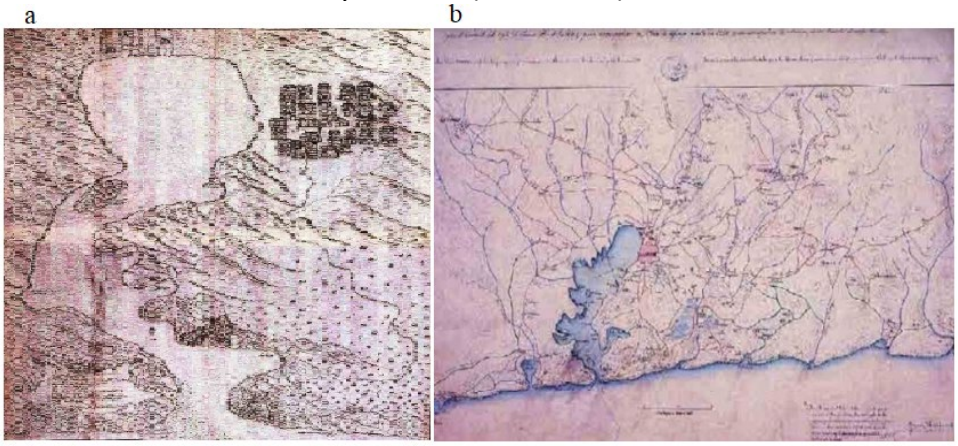

Figura 2. Mapas de 1669, ciudad de Santiago de Cuba (López 2005)

Según el consejo provincial de cuencas hidrográficas del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), la zona de estudio presenta los siguientes problemas ambientales: 1) sequía; 2) contaminación del agua por falta de alcantarillado; 3) contaminación de aguas superficiales por la presencia de actividades industriales, de servicios y residenciales; derrame de petróleo, generación de residuos peligrosos (neumáticos, bacterianos, entre otros); 4) degradación de la tierra; 5) usos inadecuados de áreas para cultivo; 6) deforestación; 7) contaminación de la base del río por un gran

desarrollo antrópico; 8) salinización del agua por la intrusión salina en la estación seca. Los ocho problemas mencionados derivan de la necesidad de realizar investigaciones pertinentes en las cuencas de los ríos cubanos (García et al 2021).

Presenta un relieve heterogéneo debido a las diferentes superficies por las que atraviesa. El 73,5 % de la misma presenta valores de hipsometría inferior a 200 msnm, hacia su parte media e inferior. La parte norte tiene alturas entre 201 y 400 msnm dado fundamentalmente hacia la Sierra de Boniato y los sistemas de alturas de la Gran Piedra por el Este (García et al. 2021). Sobre esta última también existen valores superiores a 401 msnm ocupando una pequeña porción del área.

Actualmente, la población total de la provincia de Santiago de Cuba es de 1 049 256 habitantes, que representa el 9,36% de la de Cuba (11 209 628 habitantes) (ONEI 2021). Posee un grado de urbanización del 75,9% y es la segunda más poblada del país después de la capital. Su densidad poblacional es de 168 hab/km^2. Su municipio cabecero, Santiago de Cuba, es el más poblado del país, con una población de 510 037 habitantes (ONEI 2021).

ASENTAMIENTOS POBLACIONALES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA SAN JUAN

Varios estudios demuestran este crecimiento de la población de forma no planificada. En el año 2004 se realizó el diagnóstico ambiental en la cuenca San Juan con una descripción más detallada, reportando un total de 11 Consejos Populares, con una población de 179 287 habitantes en 29 874 viviendas (CITMA 2004).

La población urbana era de 160 723, habitantes representando un 89.64 % de la población total y la población rural es de 11 362 para un 6.33%. Por otra parte, el Instituto de Recursos Hidráulicos (INRH) y la Delegación del CITMA en Santiago de Cuba, estimó una población de 195 582, distribuidos en 14 consejos populares y 115 circunscripciones, lo que representaba el 39.6 % del total de la población del municipio de Santiago de Cuba (CITMA 2015).

Estudios recientes realizados por la Oficina de Estadísticas e Información (ONEI) de Santiago de Cuba, resaltan que la población de la cuenca del río San Juan alberga el 41 % de la población del municipio, lo cual resulta significativo dado el crecimiento acelerado de la población urbana concentrada en este espacio. Como resultado la población ha mantenido su incremento animado por la migración del campo a la ciudad y hoy asciende a habitantes, en un total de 21 asentamientos poblacionales, distribuidos en 10 consejos populares, (figura 4), arrojando una densidad de 1446 habitantes por km^2 (ONEI 2022).

La cuenca hidrográfica del río “San Juan” alberga una población de 199 447 habitantes en 38 327 viviendas. La población urbana es de 180 723 habitantes representando un 90,61% de la población total y la población rural es de 18 724 para un 9,38%, (ONEI 2022) evidenciando un crecimiento más acelerado en la población urbana.

Conformada además por 21 asentamientos, de ellos, 1 urbano y 20 rurales. Ello se corresponde con la parte Oeste de la ciudad Santiago de Cuba y los poblados El Caney, Boniato y otros de significativo tamaño. La población total de la cuenca (exceptuando la ciudad Santiago de Cuba), es de aproximadamente 10113 habitantes (ONEI 2022). Solo la ciudad Santiago de Cuba está clasificada de 1er orden, el resto son poblados y caseríos de 3er orden, existiendo diez asentamientos, con poblaciones mayores de 200 habitantes. El 49,26 % de la población pertenece al sexo masculino y el 50.74% al femenino, distribuidos en estos momentos en 14 consejos populares y 115 circunscripciones, (figura 3) lo que representa el 39,6 % del total de la población del municipio de Santiago de Cuba (ONEI 2022).

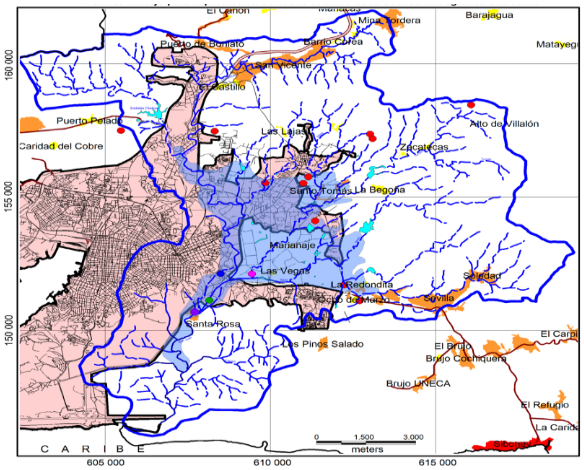

Figura 3. Consejos populares dentro de la cuenca hidrográfica San Juan (INRH 2019)

03 IMÁGENES SATELITALES Y LA EVALUACIÓN DEL CAMBIO DE COBERTURA VEGETAL

La formación de nubes en toda la zona sur-oriental de Cuba es muy frecuente, esto sucede ya que el país se encuentra en la Zona de Convergencia Tropical (ZCT), (Duran 2021). Asimismo, se menciona una fuerte presencia de nubes por debajo de los 500 msnm, mientras que en la zona central y occidental la nubosidad es parcial. Por tanto, el área de estudio se delimitó sobre los 500 msnm, con este rango de elevación, se minimizó la incidencia de nubes, considerada una fuerte limitante en el uso de imágenes de satélite para diversas investigaciones (Duran 2021).

La zona de estudio se delimitó conforme a la superficie correspondiente al área de manejo "San Juan". Las variaciones ocurridas en la vegetación fueron estimadas con la ayuda de imágenes satelitales, una imagen Landsat 8 para el año 2015 y otra para el 2023 con una resolución espacial 30 x 30 m, bandas 6-5-4 del sensor OLI-TIRS y proyección cartográfica Universal Transversal de Mercator (WGS 84 Zona 18 N, coordenadas 75.76951,20.03908), Map CRS- EPSG:3796 (611273,154420) obtenidas del portal de internet del Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey USGS) y correspondientes al mes de febrero de ambos años (path/row: 11/62). Además, se utilizaron imágenes de la base de datos internacional Copernicus Open Access Hub (ver tabla 1).

Tabla 1. Detalles de las imágenes descargadas (Paneque 2023)

No	Fecha de la Imagen	Satélite/Sensor	Sistema de Referencia
1	Febrero 15, 2015	Landsat 8 Level 1 (OLI-TIRS)	WGS 84/UTM zone 18N
2	Febrero 27, 2020	Landsat 8 Level 1 (OLI-TIRS)	WGS 84/UTM zone 18N
3	Abril 12, 2023	Landsat 8 Level 1 (OLI-TIRS)	WGS 84/UTM zone 18N

SOFTWARE

Se emplearon técnicas de percepción remota y el Sistema de Información Geográfica QGIS versión 3.24 Tisler, en el procesamiento de las imágenes. El manejo y procesamiento de la información geográfica se realizó por medio de las herramientas libres del software QGIS versión 3.24 Tisler, se aplicó un filtro de <5% de nubes en toda la escena y así obtener productos satelitales dentro del periodo seco en las fechas de estudio. Se utilizó además el plugin de la Clasificación Semi-Automática (SCP, por sus siglas en inglés), ubicado en el entorno de QGIS. Se contrastó la cartografía temática propuesta por el MAE del 2016, con fines de exploración visual, tanto para la imagen del 2015 como para el 2023, se manejó la combinación de bandas espectrales 6,5 y 4, esta combinación se denomina,

Análisis de la Vegetación (AV), que permitió la comparación visual previa a la clasificación supervisada (Ver tabla 2).

Tabla 2. Principales combinaciones de bandas satelitales (Chuvieco 2010)

Combinación RGB					Aplicación Principal/Descripción
Sentinel-2	Modis9	Aster	LandSat 4,5 y 7	LandSat8	
4,3,2	1,4,3	-	3,2,1	4,3,2	Color Natural/ Es una composición que se aproxima al color real de las coberturas.
8A,4,3	2,1,4	3,2,1	4,3,2	5,4,3	Infrarrojo Color/. Es útil para estudios de vegetación, patrones de suelos, crecimiento de cultivos y monitoreo de drenajes
8A,11,4	2,6,1	3,4,2	4,5,3	5,6,4	Combinación útil para diferenciar tierra/agua y para destacar áreas de bosque.
11,8A,4	6,2,1	4,3,2	5,4,3	6,5,4	Análisis de vegetación.
12,8A,3	7,2,4	7,3,1	7,4,2	7,5,3	Natural con remoción atmosférica.
12,8A,4	7,2,1	7,3,2	7,4,3	7,5,4	Combinación de infrarrojos.
12,11,4	7,6,1	7,4,2	7,5,3	7,6,4	Permite destacar formaciones rocosas y áreas urbanas.
12,11,8A	7,6,2	7,4,3	7,5,4	7,6,5	Penetración Atmosférica/ no incorpora bandas del espectro visible, reduce las influencias atmosféricas
12,4,2	7,1,3	-	7,3,1	7,4,2	Geología/ Permite destacar elementos geológicos.
11,8A	6,2,3	-	5,4,1	6,5,2	Agricultura.
8A,11,2	2,6,3	-	4,5,1	5,6,2	Combinación útil para distinguir vegetación saludable.

PREPROCESAMIENTO DE IMÁGENES

El primer paso del análisis multitemporal fue realizar la calibración radiométrica entre las imágenes que intervienen en el proceso. Este procedimiento resultó necesario, para asegurar que los valores de todas las imágenes a comparar sean equiparables, ya que los originales son dependientes del sensor y la fecha de adquisición (Chuvieco 2010). Se realizaron además correcciones radiométricas mediante el uso de los coeficientes de corrección (Verbesselt et al. 2010). Luego de la conversión a radiancia, cada imagen fue convertida a reflectancia superficial y luego se realizó la corrección atmosférica. Para reducir los efectos de la influencia atmosférica en el proceso de calibración (figura 4) se utilizó la información de la propia imagen (archivo MTL).

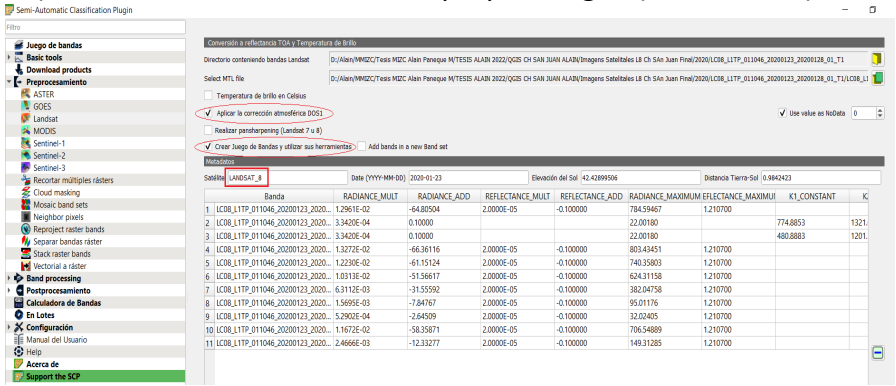

Figura 4. Selección del archivo MTL de imágenes satelitales por bandas (Paneque 2023)

CÁLCULO DE LA CORRECCIÓN POR EL MÉTODO DOS1

Se aplicó el Dark Object Substrction o substracción de objeto oscuro es una familia de correcciones atmosféricas basadas en imagen (figura 5). Chávez (1996), explica que "la suposición básica es que en la imagen algunos píxeles están completamente en sombra, y sus radiancias recibidas en el satélite

se deben a la dispersión atmosférica (efecto bruma). Esta suposición es combinada con el hecho de que muy pocos elementos en la superficie de la Tierra tienen un color negro absoluto, por lo tanto, una reflectancia asumida de uno por ciento es mejor que un cero por ciento". Es importante mencionar que la exactitud de las técnicas basadas en imagen es generalmente menor que las correcciones basadas en medidas físicas, pero son muy útiles cuando no están disponibles mediciones atmosféricas que puedan mejorar la estimación de la reflectancia de la superficie terrestre. El efecto bruma es dado por (Sobrino 2019).

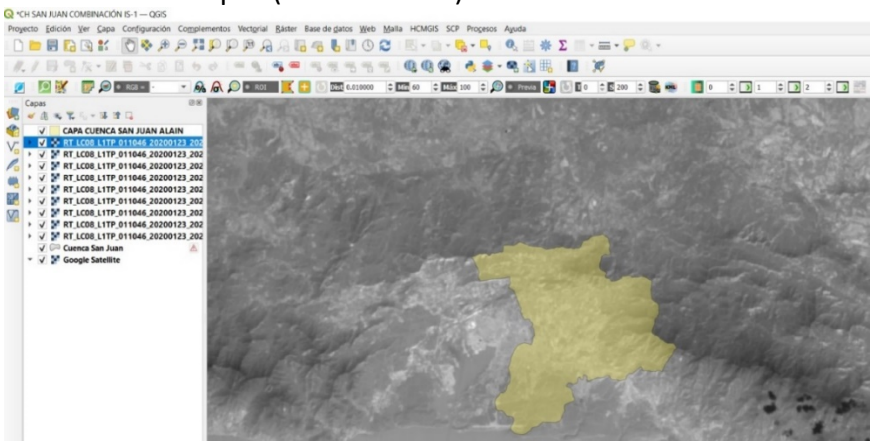

Figura 5. Resultado de la corrección atmosférica para imágenes del 2015 y 2023, DOS, QGIS (Paneque 2023)

04 CLASIFICACIÓN DE LAS COBERTURAS FORESTALES DENTRO DE LA CUENCA SAN JUAN

El procedimiento se realizó mediante el método de clasificación supervisada, utilizando el clasificador de máxima verosimilitud, el cual es uno de los algoritmos más comúnmente utilizados en percepción remota y considerado uno de los procedimientos de discriminación más eficientes (Hernández 2020).

Chuvieco, (2010) refiere que, en los estudios donde se utiliza este método cuando se conoce a profundidad el área objeto de estudio, se puede reducir el número de categorías para una mejor comprensión. Las coberturas forestales o boscosas fueron catalogadas conforme a cuatro categorías principales: área boscosa nativa, otra vegetación, cuerpos de agua y zona antrópica (figura 6). Para el análisis se elaboró, primeramente, una tabla de evolución y tasa de cambio anual de la superficie para cada categoría de cobertura y luego una tabla con la matriz de transición ocurrida, la cual es el resultado de cruzar dos mapas de diferentes fechas a través de la sobreposición de líneas vectoriales (Congedo 2021).

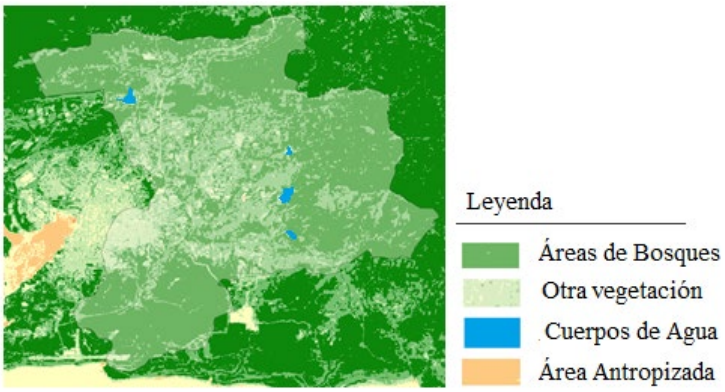

Figura 6. Clasificación de la cobertura boscosa en el área de estudio (Paneque 2023)

SELECCIÓN DE LOS DATOS

Se utilizó el plugin de la Clasificación Semi-Automática (SCP, por sus siglas en inglés), ubicado en el entorno de QGIS. Se contrastó la cartografía temática propuesta por el MAE del 2016, con fines de exploración visual, tanto para la imagen del 2015 como para el 2023, se manejó la combinación de bandas espectrales (6,5 y 4), esta combinación se denomina como análisis de la vegetación (AV) dentro de la cuenca hidrográfica San Juan.

De acuerdo con Herold (2011), una composición de bandas es una imagen compuesta por la combinación de (3) bandas diferentes de un sensor, dispuestas cada una en los 3 canales de proyección en pantalla: Rojo (*R*), Verde (*G*) y Azul (*B*). La escena en resulta una imagen a color, las bandas de las imágenes satelitales Landsat, Sentinel, Aster y Modis pueden ser combinadas en composiciones de color. En QGIS mediante el complemento SCP podemos generar composiciones de color virtuales a partir de juegos de bandas o band sets. La composición falso color o infrarrojo color utiliza las bandas del espectro infrarrojo para realzar la vegetación y otras coberturas con una apariencia roja brillante (Herold 2011).

CAMBIOS OBSERVADOS EN LA COBERTURA FORESTAL DE LA CUENCA DEL RIO SAN JUAN EN EL PERIODO 2015 AL 2023

En la figura 7 se representa la combinación de bandas espectrales (6,5 y 4) obtenidas en el QGIS. Al aplicar el módulo de clasificación presentado anteriormente, se obtuvieron los mapas correspondientes con la cobertura boscosa del área de manejo en los años 2015 y 2023. Se determinaron además las áreas para la clase cobertura boscosa nativa y la diferencia entre ellas de cada año, para poder evaluar el cambio del índice de boscocidad en el periodo (ver figura 8).

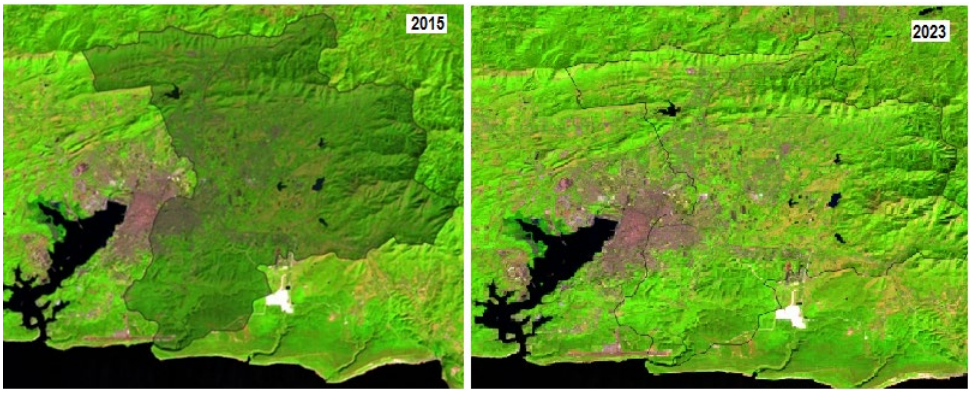

Figura 7. Combinación de bandas espectrales 6, 5 y 4 QGIS, (Paneque 2023)

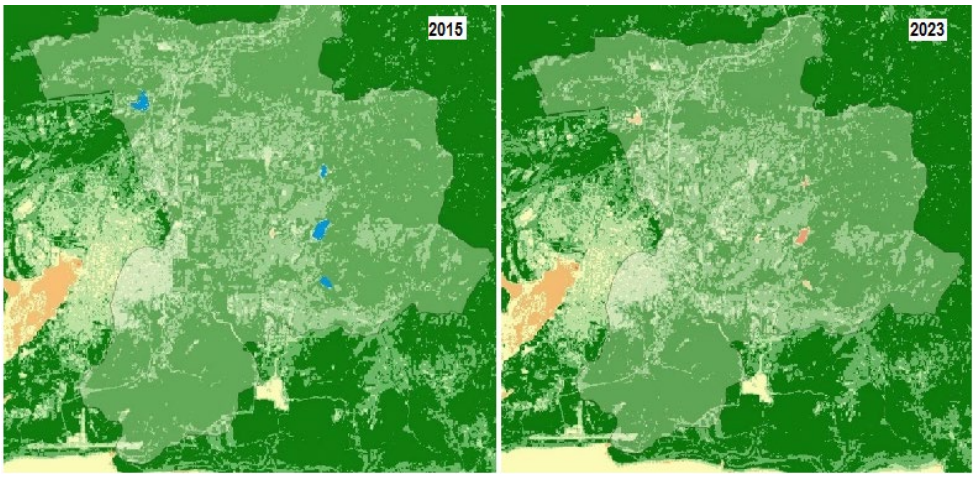

Figura 8. Cobertura boscosa año 2015 y 2023.

Además, se determinó la calidad de la cobertura boscosa para el año 2023 con el análisis de las imágenes satelitales Landsat 8, obtenidas, en la combinación de bandas (5, 4,3)- Infrarrojo color: (Chuvieco 2017). La vegetación saludable tiende a dar un rojo brillante, la mayor parte de la cuenca San Juan presenta vegetación boscosa nativa saludable (figura 9).

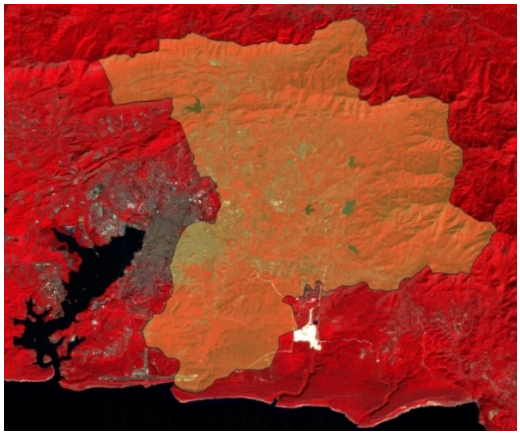

Figura 9. Resultado de combinación Bandas 5, 4,3)- Infrarrojo color (Paneque 2023)

ANÁLISIS DE LA COBERTURA BOSCOSA Y CÁLCULO DEL ÍNDICE DE BOSCOCIDAD EN LA CUENCA SAN JUAN.

Para el cálculo actualizado del índice de boscocidad (ver tabla 3), se procedió a determinar el área o superficie geográfica real de la cuenca objeto de estudio y el área cubierta de superficie boscosa medidas en hectáreas. Este procedimiento matemático se realizó con las herramientas de ajuste y programación del QGIS versión 3.24 Tisler.

Según la visita técnica realizada y el diagnóstico en la cuenca hidrográfica San Juan, se estima que la disminución del índice de boscocidad y del área de cobertura boscosa nativa en la zona objeto de estudio está basada en una fuerte presión antrópica motivada por el crecimiento de asentamientos espontáneos en la parte media y baja de la cuenca además de otras actividades forestales que inciden directamente.

Tabla 3. Cálculo del Índice de boscocidad de la cuenca San Juan periodo (2015-2023)

Superficie Cuenca San Juan	Año 2015	Año 2023	Diferencia
Superficie Cubierta (ha)	2499	2317,4	-182
Superficie Geográfica (ha)	13800,0	13800,0	-
Índice de Boscocidad (%)	**18,10**	**16,78**	**-1,32**

Los resultados derivados del procesamiento de las imágenes satelitales para los años 2015 y 2023 en los cambios de la cobertura boscosa de la cuenca hidrográfica San Juan, demuestran que la parte baja de la cuenca presenta una mayor pérdida de la superficie boscosa. Sin embargo, la parte media orientada al este y es alta al noreste están mayormente forestada y con gran superficie arbórea. Lo anterior es beneficioso en una cuenca, ya que es en esta zona donde se genera la mayor parte del agua por ser el nacimiento de ríos y arroyos que alimentan el lecho acuífero. Este resultado coincide con el plan de acción preliminar para la protección del área de estudio formulado por (Durant 2021).

Se demuestra además que hay un cambio en la cobertura forestal significativo entre los años 2015 y 2023, (ver figura 8) donde la cubierta boscosa en el primer año fue de 2499 ha y para el inicio del año 2023 disminuyó a 2317.4 ha, con una pérdida en la categoría de 182 ha de bosques nativos que desaparecieron en el periodo, esta pérdida de cobertura se corrobora con el aumento de la población y su consiguiente grado de urbanización, actualmente el área urbanizada asciende a 4 145,35 ha, lo

que representa el 30% de la cuenca, ello se corresponde con la parte oeste de cuenca, este valor coincide con los informes anuales del ministerio de la agricultura en la provincia (Durant 2021).

El índice de boscocidad calculado para el año 2015 fue 18.10%, ya para el año 2023 el estudio arrojó un índice calculado de 16.78%, con una disminución de 1.32%. La calidad de la vegetación boscosa en la cuenca es favorable (ver figura 9). Coincidiendo con Borges et al. (2021) quien reportó resultados similares para esta zona en un estudio de riesgo jurídico en la tutela del potencial forestal.

Las alternativas de cambios visibles muestran que, en términos de persistencia de la categoría bosques, las formaciones concentradas en la parte media y alta de la cuenca orientadas al este son las más distintivas; lo cual resulta lógico al ser las más extensas dentro de esta área de manejo. De conjunto representan alrededor del 81 % de la masa boscosa que se mantuvo invariable; la formación de cobertura forestal presente en la parte baja de la cuenca disminuyó con respecto al año 2015, por lo que la incidencia del factor antrópico y/o fenómenos climáticos parecen haber tenido repercusión en esta zona.

Según informes de Durant (2021), existen seis tipos de suelos en la zona de estudio, con predominio de los pardos sin carbonatos (38,1 km^2) y los esqueléticos, ambos distribuidos sobre la superficie de la cuenca media y alta, para estos valores la erosión es poca lo que concuerda con la investigación siendo la misma zona donde se detectaron pequeños cambios en la cobertura forestal.

Los cambios asociados a la dinámica de la cobertura vegetal en los años comprendidos entre 2015 y 2023 evidencian un incremento de la categoría bosques en la zona alta de la cuenca y una disminución considerable en la parte baja y el sector sur de la cuenca media. Lo que plantea nuevos desafíos para la gestión integrada de la misma.

05 CONCLUSIONES

Se realizó el análisis multitemporal y clasificación supervisada de imágenes satelitales Landsat 8, bandas 6-5-4 del sensor OLI-TRS, procesadas en el software profesional QGIS v-3.24.

Se evidencia que la calidad de la vegetación presente en la cobertura forestal en la parte media y alta de la cuenca objeto de estudio es buena para el periodo evaluado.

Los resultados obtenidos en el estudio determinan pérdidas en la cobertura boscosa de la cuenca San Juan en el orden de 182 ha entre los años 2015 y 2023.

El índice de boscocidad calculado para el año 2015 fue 18.10%, ya para el año 2023 el estudio arrojó un índice calculado de 16.78%, con una disminución de 1.32% por lo que la incidencia del factor antrópico y/o fenómenos climáticos parecen haber tenido repercusión en estos resultados.

RECONOCIMIENTO

A los autores les complace reconocer el apoyo logístico ofrecido por el Proyecto de Investigación PN211LH012-018, “Monitoreo y Manejo Integrado de Ecosistemas Costeros ante el Cambio Climático en la Región Oriental de Cuba”, coordinado por Universidad de Oriente en Santiago de Cuba y a la Dirección Provincial de Recursos Hidráulicos de la provincia de Santiago de Cuba.

06 REFERENCIAS

Alarcón R. (2019). Paradigmas jurídicos sobre gestión integrada de cuencas hidrográficas: desafíos a partir del caso del río san juan, Santiago de Cuba; Revista Voluntad Hidráulica. 2019, 129, 14-23. ISSN: 0505-9461.

Chávez P. (1996). Image-Based Atmospheric Corrections-Revisited and Improved. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing [en línea], vol. 62, no. 9, pp. 1025-1036. Disponible en: https://www.semanticscholar.org/paper/ImageBased-Atmospheric-Corrections-Revisited-and Chavez/45f12625ce130261c7d360d50e09c635355ca919.

Chuvieco J. (2010). Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio [en línea]. S.l.: Editorial Ariel. ISBN: 978- 4-344-3498-1. Available online: https://www.casadellibro.com/librofundamentos-de-teledeteccion-espacial-3aa-edi.

CITMA (2020). Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Ministerio de Ciencia, Enfrentamiento al Cambio Climático en la República de Cuba Tarea Vida. La Habana

Congedo L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin Documentation Release 4.8.0.1. Available online: https://bit.ly/3oUvIBh. Doi: 10.3390/f10050457.

Durán M. T. (2021). La gestión de las cuencas hidrográficas en la región Sur Oriental de Cuba. INRH, Aprovechamiento Hidráulico. Revista Ingeniería y Sociedad, 13 (3), pp 211-221. ISSN: 2218-3620.

FAO (2006). FAOSTAT Database Results. Food Agricultural Organization, Disponible en: hp://faostat.fao.org. [Consulta: agosto 2021].

Hall R. J., Skakun R. S., Arsenault E. J. and Case B. S. (2006). Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. Forest Ecology Management 225: 378-390. Doi: 10.1016/j.foreco.2006.01.014.

López P. M., Cárdenas D., Corral-Rivas J. J., Jiménez E., López Sánchez C. A. and Vega-Nieva D. J. (2020). Modeling of aboveground biomass with Landsat 8 OLI and machine learning in temperate forests. Forests 11(1): 11. Doi:10.3390/f11010011.

Milanés C. (2011). Contribución al desarrollo sostenible de los municipios costeros en la provincia de Santiago de Cuba: de la caracterización al diagnóstico territorial. Monografía de excelencia. Universidad de Oriente, ISBN: 978-959-207-441-5, 110p.

ONEI (2022). Anuario Estadístico de Cuba. La Habana. Available online: https://bit.ly/3B3tapb (accessed on 14 noviembre 2022)

Sobrino J., Llorens R., Fernández C., Fernández A. and Vega J. (2019). Relationship between soil burn severity in forest fires measured in situ and through spectral indices of remote detection. Forests 10(5): 457. Doi:10.21829/myb.2020.2611884

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Alain Paneque Martínez https://orcid.org/0000-0002-5320-8265

Realizó contribuciones al diseño de la investigación, procesamiento de datos, la redacción y revisión del informe final.

Ofelia Pérez Montero http://orcid.org/0000-0002-3423-9744

Realizó contribuciones a la conceptualización, diseño de la investigación, procesamiento de datos, la redacción y revisión del informe final.

Celene Milanés Batista http://orcid.org/0000-0003-2560-8859

Realizó contribuciones en la investigación, procesamiento de datos y revisión del informe final.

José Fernando Álvarez Vega https://orcid.org/0000-0002-5762-8777

Realizó contribuciones en la investigación, asesoría técnica, revisión de resultados computacionales y del informe final.