

Metodología para la detección de plásticos a través de sensores remotos, Bocas de Ceniza

Barranquilla, Colombia

Metodologia para a detecção de plásticos por sensoriamento remoto,
Bocas de Ceniza, Barranquilla, Colombia

Methodology for the detection of plastics by remote sensing,
Bocas de Ceniza, Barranquilla, Colombia

Diego Arcesio Rodríguez Martínez¹ y Sergio Andrés Laiton²

¹ Ministerio del Transporte, Unidad de Planeación de Infraestructura de Transporte
Bogotá, D.C.

² Alcaldía de Bogotá, Director de Cartografía, Secretaría Distrital de Planeación
Bogotá, Colombia

diegoarodriguezma@gmail.com; ingcatastralsergiolaiton@gmail.com

Rodríguez: <https://orcid.org/0009-0005-5996-0000>

Laiton: <https://orcid.org/0009-0009-5501-8447>

Resumen

El espacio geográfico no es ajeno a las acciones de la sociedad que, en parte, se presentan por la producción de material sintético como el plástico y su disposición que, arrastrados por las corrientes de agua, llegan a zonas costeras evidenciando su huella ecológica. El interés del presente artículo es mostrar la aplicación de sensores remotos, de manera exploratoria, buscando identificar material antropogénico flotante, su huella o rastros espectrales. Para ello, se aplicaron modelos matemáticos de clasificación supervisada y no supervisada integrando librerías espectrales y de reconocimiento de patrones, para obtener un modelo predictivo y de índices, evaluando imágenes satelitales con resolución pancromática de 10 m en la desembocadura de río Magdalena, denominada 'Bocas de Ceniza', en la ciudad de Barranquilla, Colombia.

Se aporta al conocimiento a partir del errado manejo de los residuos antropogénicos, que afectan diversos ecosistemas marinos y a los seres humanos.

PALABRAS CLAVE: plástico; sensores remotos, imágenes de satélite; material antropogénico.

Resumo

O espaço geográfico não está alheio às ações da sociedade que, em parte, são apresentadas pela produção de material sintético como o plástico e seu descarte, que, arrastado pelas correntes de água, chega às áreas costeiras evidenciando sua pegada ecológica.

O interesse deste artigo é mostrar a aplicação do sensoriamento remoto de forma exploratória para identificar material antropogênico flutuante, sua pegada ou traços espectrais. Para isso, foram aplicados modelos matemáticos de classificação supervisionada e não supervisionada, integrando bibliotecas espectrais e reconhecimento de padrões, para obter um modelo preditivo e índices, avaliando imagens de satélite com resolução pancromática de 10 m na foz do rio Magdalena, denominada "Bocas de Ceniza", na cidade de Barranquilla, Colômbia.

Contribui para o conhecimento sobre a gestão errônea de resíduos antropogênicos, que afeta vários ecossistemas marinhos e seres humanos.

PALAVRAS-CHAVE: plástico; sensoriamento remoto; imagens de satélite; material antropogênico.

Abstract

The geographic space is no stranger to the actions of society that, in part, are presented by the production of synthetic material such as plastic and its disposal, which, dragged by water currents, reach coastal areas evidence of its ecological footprint.

The interest of this article is to show the application of remote sensing to identify in an exploratory way floating anthropogenic material, its footprint or spectral traces. For this purpose, mathematical models of supervised and unsupervised classification were applied, integrating spectral and pattern recognition libraries, to obtain a predictive and index model, evaluating satellite images with panchromatic resolution of 10 m at the mouth of the Magdalena River, called "Bocas de Ceniza", in the city of Barranquilla - Colombia.

It contributes to knowledge on the erroneous management of anthropogenic waste, which affects diverse marine ecosystems and human beings.

KEYWORDS: plastic; remote sensing, satellite imagery; anthropogenic material.

1. Introducción

Las acciones de la sociedad desarrolladas en el espacio geográfico han dado como resultado alteraciones irreversibles en ecosistemas terrestres y marinos y la reducción o transformación de recursos naturales que compiten con las nuevas realidades de ocupación y densificación poblacional. De ello, se desprenden actividades asociadas a procesos industriales para satisfacer la demanda de necesidades de la población.

Evidencia de ello es el aumento significativo del consumo de productos procesados que requieren de empaque a través de materiales resistentes a las condiciones atmosféricas como el vidrio y, en especial, el plástico derivado del petróleo, lo que contribuye con la contaminación mundial, el cambio climático y la reducción de recursos naturales. En muchos territorios, la gestión de residuos como el plástico o la falta de infraestructuras de reciclaje, mano de obra cualificada y otros factores relacionados, e incluso disposición ilegal de estos y la evasión de los responsables de su eliminación implicando problemas de disposición de residuos desde la fuente, es decir desde el manejo y disposición doméstica, es reflejo de lo que sucede por ejemplo en Nigeria (Dumbili y Henderson, 2020).

No ajeno a la preocupación y aplicando herramientas tecnológicas, se han venido explorando y aplicando modelos y algoritmos matemáticos que permitan tomar decisiones, cobrando relevancia algunas técnicas como la teledetección que permite extraer información a través de sensores remotos. Así, se define como *"una forma de medición y observación a distancia que se realiza mediante objetos que permiten el escaneo o grabación a tiempo real"* (Chamorro, 2022: 1), para evidenciar cambios y proponer acciones preventivas.

El presente artículo es una síntesis de la metodología aplicada en el proyecto de investigación titulado 'Detección de plástico con procesamiento de imágenes empleando la banda del infrarrojo cercano, en la zona marítima de Bocas de Ceniza en Barranquilla Colombia', presentado en el programa de Maestría en

Energía y Sostenibilidad," de la Pontificia Universidad Javeriana.

Para este desafío, se parte de las dificultades que surgen en el monitoreo de contaminantes antropogénicos sobre los ecosistemas y la poca información para su teledetección y, de manera exploratoria, usar índices espectrales para la detección de plásticos suspendidos en la hidrósfera, en especial en la placa oceánica, a través de imágenes de satélite basados en su reflectancia espectral, que, combinando técnicas de aprendizaje de lenguaje de máquina o sistematización para la identificación de patrones, permiten clasificar los objetos y la detección de cambios en los cuerpos de agua para reconocer contaminantes antropogénicos.

El uso masivo del plástico y su mal manejo de procesos de reciclaje en las zonas urbanas, terminan suspendidos en los sistemas hídricos continentales que escurren y terminan en los océanos, no ajeno en Colombia, en la cuenca del río Magdalena, que recorre de sur a norte al país desembocando en el sector de Bocas de Ceniza de la ciudad de Barranquilla.

En este contexto, el objetivo se centró en desarrollar y evaluar un sistema de detección de macro plásticos y basura flotante en la zona de estudio, haciendo uso del procesamiento de imágenes satelitales en la banda del infrarrojo cercano y de onda corta, lo que exigió recopilar información secundaria de imágenes multiespectrales de la zona de estudio.

Finalmente, se implementaron procesos de inteligencia computacional mediante dos métodos para estimar la contaminación por plásticos en la zona de Bocas de Ceniza, complementado con la aplicación de métricas del error medio cuadrático, como contribución al desarrollo de herramientas efectivas que aporten en el monitoreo y prevención de la contaminación plástica y antropogénica en los ecosistemas marinos.

2. ¿Cómo se hizo?

El desarrollo de la metodología para la detección de plásticos mediante el procesamiento de

imágenes necesitó establecer el área de estudio que, por efectos del mal manejo del plástico, evidencia registro del mismo en los cuerpos de agua en especial en ecosistemas marinos, para dar lugar al levantamiento de información secundaria de sensores remotos que, combinando la aplicación de los modelos matemáticos matriciales, permiten la detección de contaminación plástica y antropogénica.

2.1. Definición del área de estudio

Se dice que la ciudad de Barranquilla, por su localización geográfica, cuenta con dos océanos. ¿Dos océanos?: Si. Por su ubicación geográfica estratégica es la ciudad costera más grande e importante de Colombia y la cuarta del país. Es puerto marítimo en el mar Caribe y también es puerto fluvial, en el sector denominado Bocas de Ceniza donde desemboca el río Magdalena, que por su recorrido es la arteria fluvial más

importante del país desde el Nudo de los Pastos o llamada Estrella Fluvial hasta su desembocadura.

Este sistema fluvial es vital para la pesca, la agricultura, la ganadería y actividades económicas adicionales; pero el manejo deficiente de los desechos, propio de las grandes ciudades andinas entre ellas Bogotá, Medellín y Cali, afectan ecosistemas frágiles que incluso por gravedad llegan hasta el mar Caribe.

Así, Bocas de Ceniza (FIGURA 1) fue escogida para la aplicación metodológica, porque no solo en la desembocadura del río Magdalena se evidencia la mancha de sedimentos que llegan al mar Caribe, sino también el material particulado orgánico e inorgánico afectando ecosistemas marinos, además de su importancia histórica para transporte de mercancías y pasajeros, y por la navegabilidad en algunos de sus tramos (Márquez, 2016).

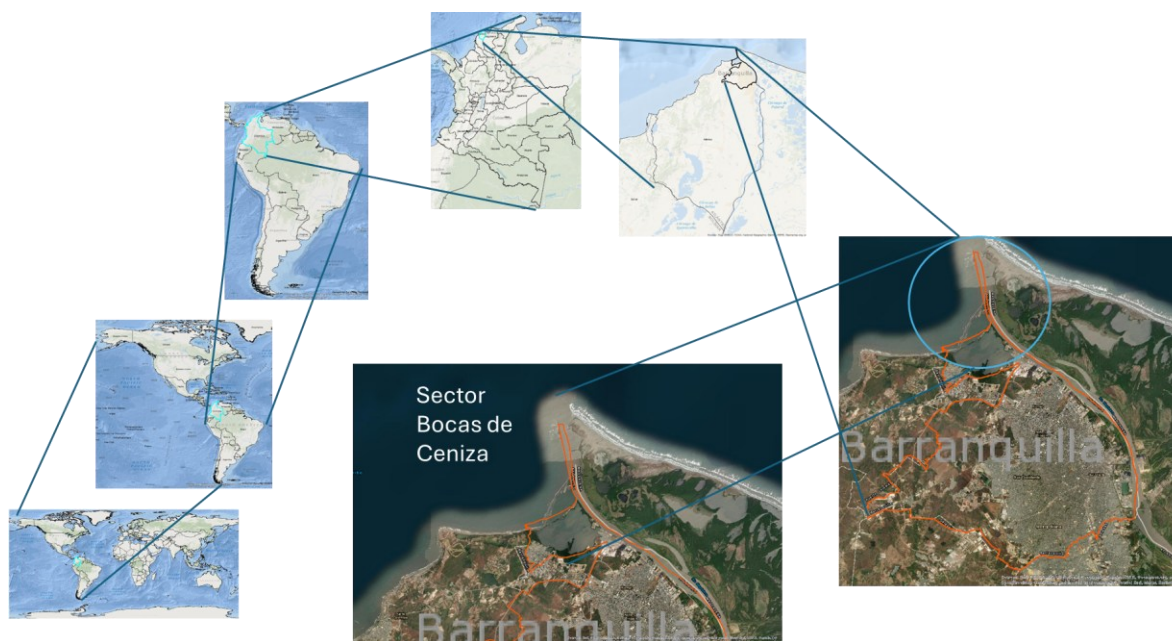


FIGURA 1. Localización del área de estudio. Fuente: elaboración propia

2.2. Materiales y métodos aplicados

La investigación abre paso no solo a la discusión respecto al manejo de los residuos desde las grandes aglomeraciones urbanas, sino al resultado de ello en la contaminación de

ecosistemas fluviales y marinos porque las dinámicas del sistema hídrico conllevan a que los residuos de plástico se muevan y, *“por las corrientes oceánicas, los vientos y la mezcla*

vertical, las pequeñas piezas de plástico se unen a otras para formar grandes áreas de plástico.” (Copérnico servicio marino. s. f.), que, dependiendo de la escala y resolución de análisis, se podrían identificar, general o detalladamente, a partir de modelos matemáticos, como el plástico particular, en ocasiones no visible, pero que denotan efectos negativos en la flora y en la fauna.

Para lograr el objetivo, se llevaron a cabo procesos de análisis de imágenes de satélite en

especial del sensor Sentinel-2, manteniendo la misma periodicidad, denotando la presencia de contaminantes antropogénicos mediante la aplicación de técnicas y el uso de software *QGIS* con diversos complementos, específicamente *Dzetsaka* para clasificación supervisada, y los métodos SVM (Máquina de Vectores de Soporte), *K-Nearest Neighbors* (vecino más cercano) y *Random Forest* (predictores de valores de elementos). En la TABLA 1 se listan las imágenes procesadas en la zona de estudio.

TABLA 1. Ubicación de los sitios de análisis con archivos Sentinel-2. Fuente: elaboración propia

Sitio de pruebas	Sentinel-2 L2A	Sentinel-2 L2B
Bocas de Cenizas (11° 08' 34.1" N-74° 51' 21.6" E)	S2A 20190616T153621 T18PWT	S2B 20190522T153629 T18PWT
Visegrad Dam (43° 45' 5.62" N 19° 17' 15.6" E)	S2A 20210302T09303 T34TCP	
Solo River Mouth (6° 50' 57.89" S 112° 34' 33.44" E)	S2A 20210227T023641 T49MFN	
Almeria Greenhouses (36° 43' 6.72" N 2° 45' 12.82" W)	S2A 20210505T105031 T30SWF	

Para el procesado del Nivel 2A al Nivel 2B, se utilizaron imágenes y para los archivos Sentinel-2A y 2B se tomaron imágenes de satélite del año 2019, ajustando la corrección atmosférica y corrección de los modelos de entrenamiento para Sentinel-2B.

Se aplicó el uso del complemento *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP) de *QGIS* (o clasificación semiautomática), que ofrece herramientas avanzadas para el procesamiento de imágenes. Se optó por el método de clasificación *Random Forest*, porque ha demostrado proporcionar los mejores resultados. La FIGURA 2 muestra el esquema de la clasificación supervisada y no supervisada y la exploración complementaria semiautomática.

Finalmente, se empleó la herramienta *Google Earth Engine* (GEE) para construir un flujo de análisis multitemporal y clasificación no

supervisada para detectar anomalías y se construyeron y analizaron índices espectrales combinados para identificar indicios de contaminación plástica y, su validación, implementar diferentes métodos para identificar áreas con probable contaminación por plásticos y otros residuos antropogénicos permitiendo precisar las zonas afectadas, y se combinaron técnicas de teledetección y análisis geoespacial avanzado para examinar la variabilidad temporal y espacial de los contaminantes, incluyendo el uso de algoritmos de lenguaje de máquina y la integración de datos multiespectrales para mejorar la precisión de la clasificación, permitiendo mapear las áreas afectadas y obtener información sobre las posibles fuentes de contaminación y su dinámica de dispersión en el tiempo.

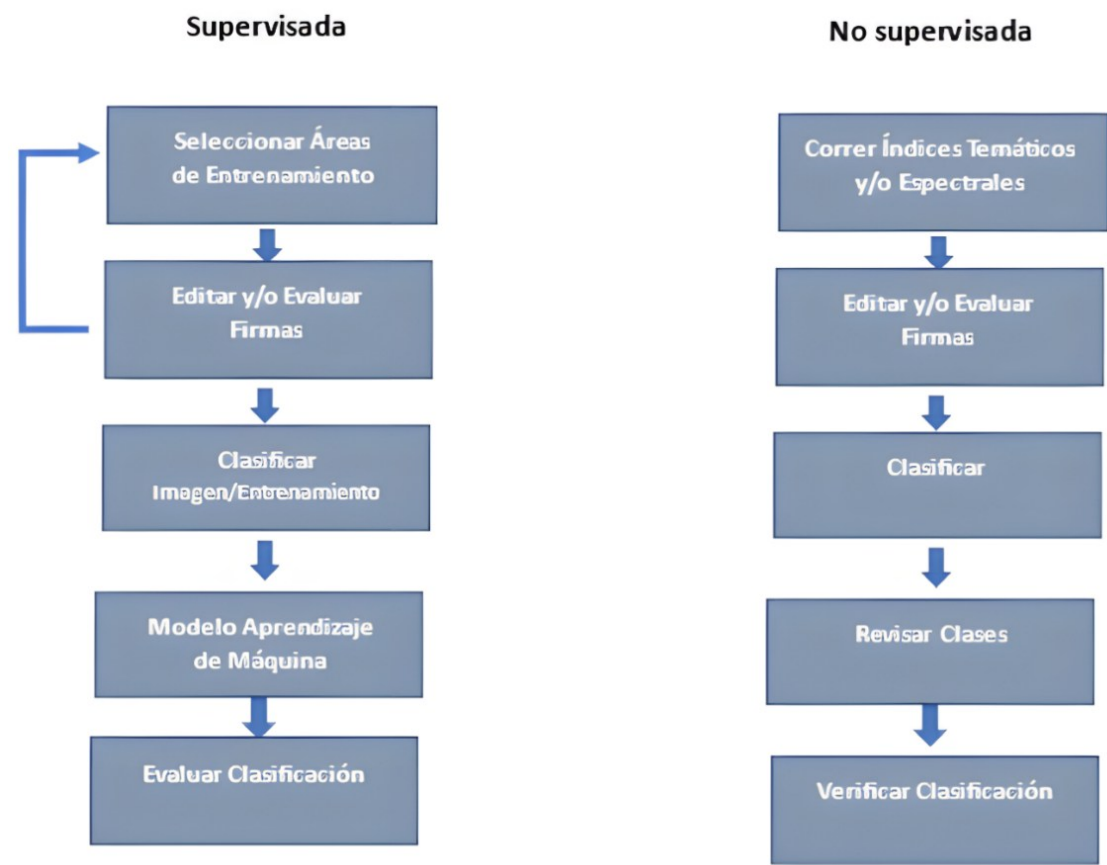


FIGURA 2. Modelos de Clasificación. Fuente: elaboración propia

3. Procesamiento y resultados

El viernes 31 de mayo de 2019, se formó una isla de basura de aproximadamente 18 kilómetros de diámetro cerca de las playas de Puerto Colombia, en las cercanías de Bocas de Ceniza, en el Atlántico colombiano (De las Salas, 2019). Al parecer, la contaminación se origina en el interior del país y es arrastrada a través del río Magdalena, catalogado en el puesto 15 de los ríos más contaminados del mundo, con gran cantidad de desechos de aproximadamente 16.700 toneladas de residuos contaminantes, incluyendo plásticos, hacia el mar (Lebreton *et al.*, 2017). Para el procesamiento digital de imágenes se realizó:

3.1 Detección de islas flotantes de residuos contaminantes (isla basura)

A partir de los datos de la plataforma *Copernicus HUB* y *GEE*, se desarrolló una visualización que permitió integrar la información de mayo de 2019 a mayo del 2021 para los modelos de entrenamiento en *QGIS* y, de julio del 2020 a agosto del 2021, para *GEE*. Se identificó la presencia de contaminantes antropogénicos en constante alteración del ecosistema, para determinar el comportamiento y movimientos de las islas de basura.

En la FIGURA 3 se expone el paso a paso para el análisis de la información y la aplicación de la clasificación no supervisada y en la FIGURA 4, el paso a paso para el análisis de la información con aprendizaje de máquina de una primera aproximación mediante la clasificación supervisada.

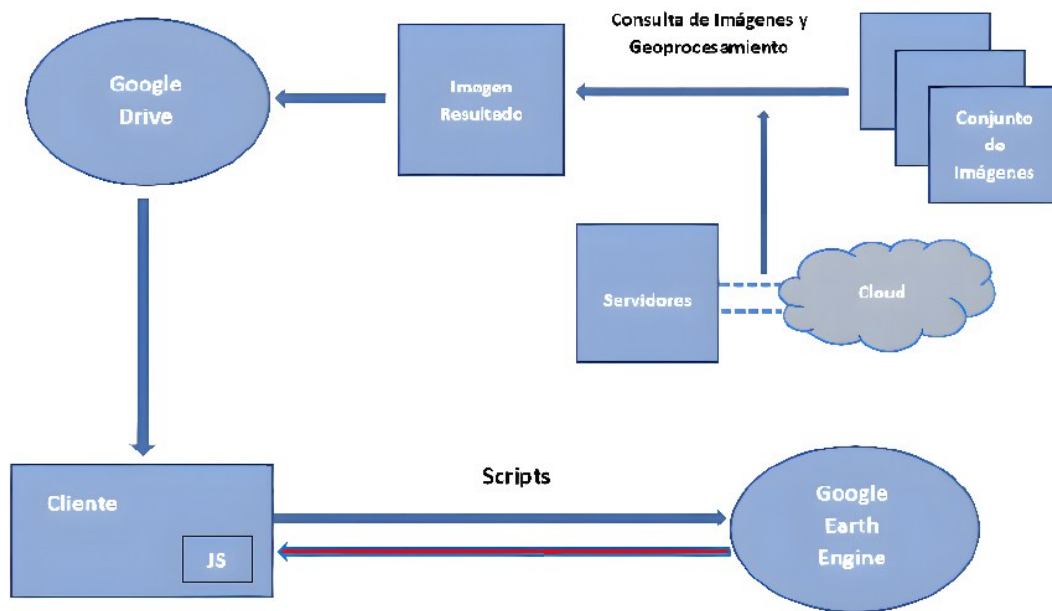


FIGURA 3. Modelo de clasificación no supervisada tomando como base. Fuente: elaboración propia

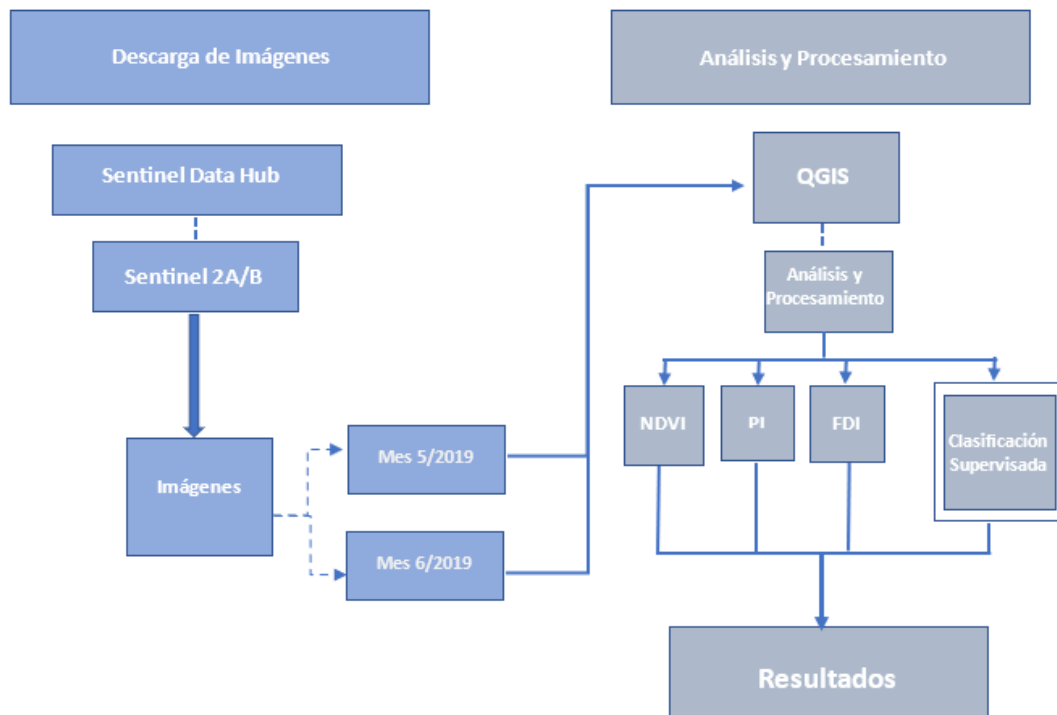


FIGURA 4. Modelo de clasificación supervisada, como lenguaje de máquina. Fuente: elaboración propia

Con la validación y geoposicionamiento de la proyección cartográfica y sistema de coordenadas, se realiza la corrección atmosférica

y la aplicación de la clasificación supervisada, identificando unos puntos de muestra para entrenar el algoritmo de clasificación (plástico,

agua, tierra y otros) de la imagen satelital, y seguido, la clasificación no supervisada, como parte de la aplicación del algoritmo de agrupación que identifica las celdas o píxel en clases o grupos, identificando patrones sin necesidad de muestras etiquetadas.

Por último, se genera el post procesamiento mejorando la calidad y precisión de la clasificación, incluso eliminando ruido (elementos o anomalías) y la fusión de algunas clasificaciones. Las clases de plásticos y

contaminantes oceánicos se determinan durante el proceso de clasificación creando firmas espectrales por clase, que difieren si es al agua o la tierra y siendo polietileno, polipropileno, policarbonato, PVC y PET, entre otros.

La FIGURA 5, del sensor Sentinel-2 de junio 2019, evidencia la gran cantidad de sedimentos, mancha que se extiende algunas millas náuticas del mar Caribe, por la desembocadura del río Magdalena.



FIGURA 5. Imagen Sentinel-2, junio 2019. Inclusión propia de la toponimia

3.2 Determinación y aplicación en la zona de interés

Para la identificación y aplicación del geoprocesamiento, se tienen en cuenta los satélites que, a través de la teledetección, capturan las bandas necesarias en escala de grises o monocromática con rango entre 0 y 256, para generar composiciones de color alternando las bandas de los canales RGB (Red, Green y Blue). Así, permite la generación de combinaciones de bandas para identificar la cobertura vegetal, zonas duras, zonas blandas y zonas con potencial hídrico, e incluso, identificar acciones negativas

de alto impacto, como la deforestación, incendios y problemáticas de contaminación del agua.

El satélite Sentinel-2 cuenta con un instrumento óptico multiespectral compuesto por trece bandas espectrales: cuatro bandas con una resolución espectral de 10 m, seis bandas con una resolución de 20 m y tres bandas con una resolución de 60 m, permitiendo identificar información en diferentes escenarios de precisión. Lo anterior se muestra en la TABLA 2.

De los productos del satélite Sentinel-2 se emplean 5 de estas combinaciones, incluyendo el color natural, falso color, infrarrojo y análisis de vegetación. Algunas de estas combinaciones se evidencian en la FIGURA 6, resaltando que cada

combinación e índice tiene sus limitaciones, pero utilizando varios tipos de combinaciones se puede detectar plásticos y contaminantes oceánicos con mayor precisión.

TABLA 2. Combinación de Bandas – Satélite Sentinel 2. Fuente: elaboración propia

Banda Sentinel-2	Long. de onda central (um)	Res. Espacial (m)
Banda 1 - Aerosol	0,43-0,45	60
Banda 2 - Blue	0,45-0,53	10
Banda 3 - Green	0,54-0,57	10
Banda 4 - Red	0,65-0,68	10
Banda 5 - Red edge 1	0,69-0,71	20
Banda 6 - Red edge 2	0,73-0,74	20
Banda 7 - Red edge 3	0,77-0,79	20
Banda 8 - Near Infrared (NIR) 1	0,78-0,90	10
Banda 8A - Near Infrared (NIR) 2	0,85-0,87	20
Banda 9 - Water vapour	0,93-0,95	60
Banda 10 - Cirrus	1,36-1,39	60
Banda 11 – SWIR 1	1,56-1,65	20
Banda 12 – SWIR 2	2,10-2,28	20



Figura 6. Falso Color bandas (8,11,2) detección de estados de la vegetación, zonas urbanas y resaltar características en el agua. Fuente: Sensor Sentinel 2, e inclusión propia de la combinación y la toponimia

3.3 Construcción de índices temáticos

Se procede a analizar varios índices temáticos dependiendo del enfoque de aplicación. Si es

para vegetación se puede aplicar el Índice Normalizado para Clasificación de Vegetación

(NDVI); o para contaminación plástica aplicar el Índice de Plástico (PI); o, finalmente el Índice de Desechos Flotantes (FDI), permitiendo detectar y evaluar la contaminación marina y fluvial de desechos flotantes, identificar áreas críticas y estudiar patrones de su dispersión.

Basando el proceso realizado por (Enfrin *et al.*, 2019), se tomaron las ecuaciones que definen estos índices aplicando el Índice de Desechos Flotantes (FDI) que utiliza los espectros del infrarrojo cercano (NIR), del borde rojo (RED

EDGE2) y del infrarrojo de onda corta (SWIR1), correspondientes a las bandas con coeficientes de longitud de onda (en nm) de 665, 833 y 1610, respectivamente (Sannigrahi *et al.*, 2022). Este índice se basa en la combinación de estas bandas espectrales para identificar y caracterizar los desechos flotantes en cuerpos de agua. Además, se ha mostrado eficaz para la detección y seguimiento de desechos plásticos y otros materiales flotantes en entornos acuáticos:

$$FDI = RED - REDEDEG2 + (SWIR1 - REDEDE2) \frac{(833 - 665)}{(1610 - 665)} * 10$$

$$FDI = RED - REDEDEG2 + (SWIR1 - REDEDE2) \frac{(833 - 665)}{(1610 - 665)} * 10$$

A continuación, se combinaron los 3 índices calculados así:

$$IF = (PI) + (NDVI) + (FDI)$$

$$IF = (PI) + (NDVI) + (FDI)$$

Donde (IF) equivale a la imagen final resultado de los tres índices espectrales

Utilizando estos índices, se desarrollaron modelos no supervisados con los parámetros mencionados para la detección de plásticos e islas de basura marina flotante en Bocas de Ceniza (Colombia). Con la herramienta GEE y las imágenes del satélite Sentinel-2A se realizaron pruebas de estos índices para generar clasificaciones supervisadas. Cabe destacar que estos índices estandarizados forman parte de los

estándares generados por expertos en el área (TABLA 3).

La construcción de índices temáticos o espectrales en Sentinel-2 para detectar contaminación ofrece diversas ventajas y aplicaciones, permitiendo resaltar características específicas y facilitando la detección y monitoreo de la contaminación y realizar un seguimiento espaciotemporal de manera efectiva.

Para clasificar los índices espectrales NDVI, FDI y PI con QGIS y GEE, se extrajeron los píxeles a cada uno de los polígonos, generando una base de datos con la nube de puntos y sus valores para cada banda. Este proceso se repite iterativamente para cada una de las clases en las fechas seleccionadas y unir así los conjuntos de datos clasificados. En la FIGURA 7 se muestra la respuesta PI o el índice de Plástico de acuerdo a la respuesta espectral.

TABLA 3. Ecuaciones para crear índices ND-VI, PI y FDI. Fuente: basado en la investigación ... e inclusión propia de la descripción

Construcción de Índices			
Nombre	Índices	Descripción	Imagen
Normalized Difference Vegetation Index (ND-VI) Ec. (3-1)	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	Se fundamenta en la detección de cambios en el uso del suelo, la evaluación de la salud de la vegetación y la identificación de áreas afectadas por sequías o enfermedades vegetales. Proporciona información importante sobre la actividad fotosintética y el vigor de la vegetación en las áreas del suelo	Figura 5-7
Plastic Index (PI) Ec. (3-2)	$PI = \frac{NIR}{NIR + RED}$	Se basa en su capacidad para proporcionar información cuantitativa y espacialmente explícita sobre la presencia de contaminación plástica en las áreas determinadas	Figura 5-8
Floating Debris Index (FDI) Ec. (3-3)	$FDI = RNIR - R'NIR$ $R'NIR = REDGE2 + (SWIR1-REDGE2) * \frac{833 - 655}{1610 - 665} * 10$	Esta combinación permite detectar y evaluar la contaminación marina y fluvial causada por los desechos flotantes. Permite identificar áreas críticas, estudiar patrones de dispersión y evaluar el impacto de los desechos de los ecosistemas acuáticos y la vida marina	Figura 5-9

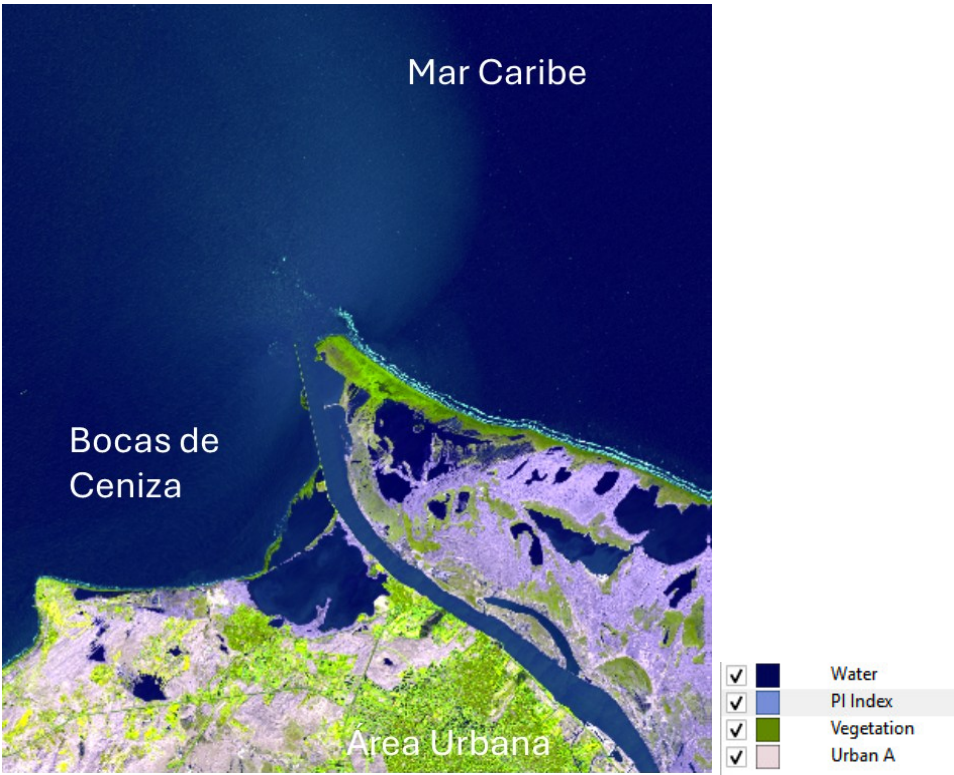


FIGURA 7. Índice Final IF. Sensor Sentinel 2A e inclusión propia de la combinación y la toponimia

3.4 Implementación de algoritmo de aprendizaje automático

Una vez analizada la literatura y métodos implementados se considera que el algoritmo a aplicar en la zona de estudio es el de clasificación de Bosque Aleatorio (*Random Forest*), dado que presenta mejores resultados al clasificar la contaminación antropogénica y plástico en el océano. Para ello, se realizaron los siguientes pasos: primero, cargar las bibliotecas necesarias, incluyendo el ensamblador de clasificadores SCP, en *QGIS*; a continuación, abrir el archivo de datos; luego determinar los atributos o clases del conjunto de datos; dependiendo del conjunto de datos se pueden excluir variables categóricas del entrenamiento y hacer un recuento de los valores de las clases; luego, descartar los valores NAN y los valores infinitos, que se relacionan con los extremos, positivos y negativos para extraer la clase del conjunto de datos; se prosigue con alinear las clases y dividir el conjunto de datos en un conjunto de entrenamiento y un conjunto de pruebas; configurar y entrenar el modelo con los

parámetros necesarios utilizando el conjunto de entrenamiento, para predecir con el conjunto de pruebas; y, generar la matriz de confusión, imprimir el informe de la clasificación generada definiendo la configuración óptima de los hiper parámetros del modelo basándose en la exactitud a través de la validación cruzada para, finalmente guardar el modelo entrenado.

La FIGURA 8 muestra a partir de la densidad de puntos la contaminación antropogénica y la suspensión o elementos contaminantes de plástico que se concentra a la altura de Bocas de Ceniza y, por acción del viento y el oleaje se van dispersando en mar abierto, asociado al perfil o comportamiento de la clasificación de la FIGURA 9, con la huella espectral notoria de la respuesta de detección de plástico flotante. El perfil espectral es muy diciente en especial la línea asociada al comportamiento de los componentes antropogénicos y de la detección de plástico que difiere de las otras clasificaciones.

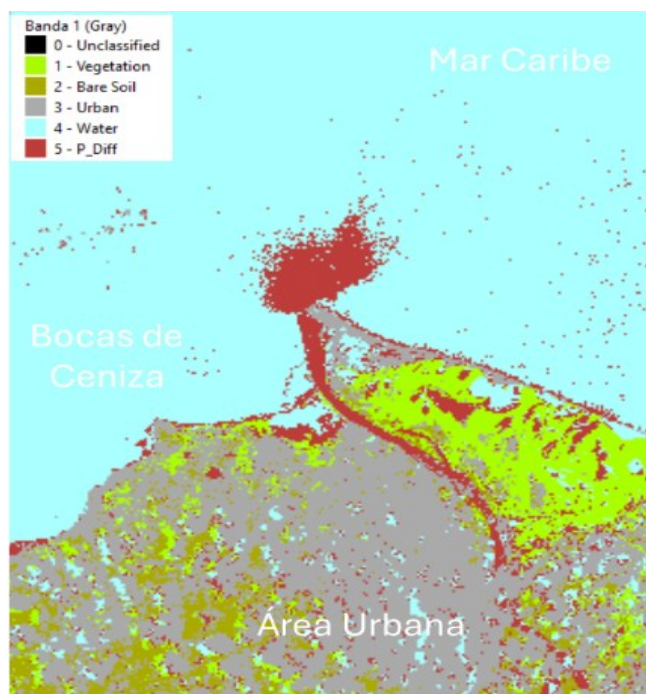


FIGURA 8. Resultados clasificación de clases Sentinel-2 mayo 22 del 2019 e inclusión propia de la combinación y la toponimia

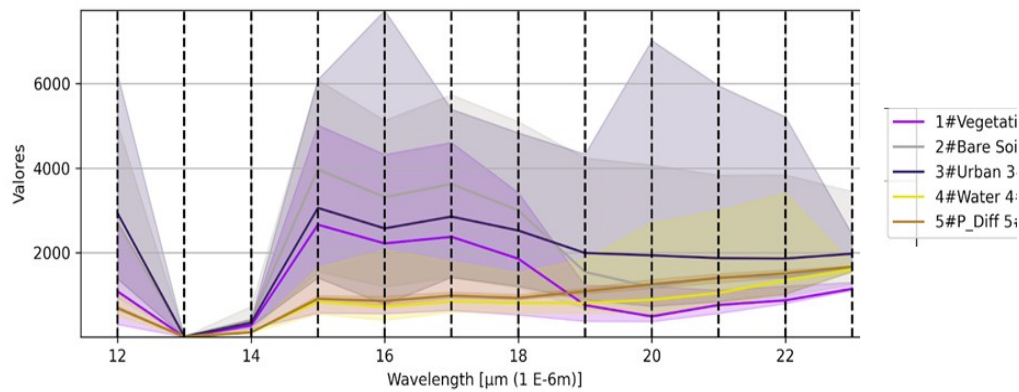


FIGURA 9. Perfil espectral clasificación Sentinel-2 mayo 22 del 2019

Durante los procesos de clasificación, el algoritmo alcanza resultados superiores al 90 % muy similar a los resultados de algunos estudios (Gómez-Jakobsen, 2016); sin embargo, se observó una exactitud del 95% en la clasificación de las clases PDiff, debido a la clara discriminación de estas clases respecto a las demás y el algoritmo logró una separación eficiente de las clases, siendo un aspecto interesante.

Comparando en otra ventana de tiempo se corrió de nuevo el algoritmo a la imagen del

sensor Sentinel-2 de junio 16 del 2019, arrojando concentración de partículas y permitiendo inferir que de un mes a otro, la concentración de contaminación antropogénica y la suspensión o elementos contaminantes de plástico se da, seguramente debido el arrastre aguas arriba y la intensificación de lluvias previstas en el centro del país en el segundo trimestre del año como se muestra en la FIGURA 10 la huella espectral de las islas basura flotante.

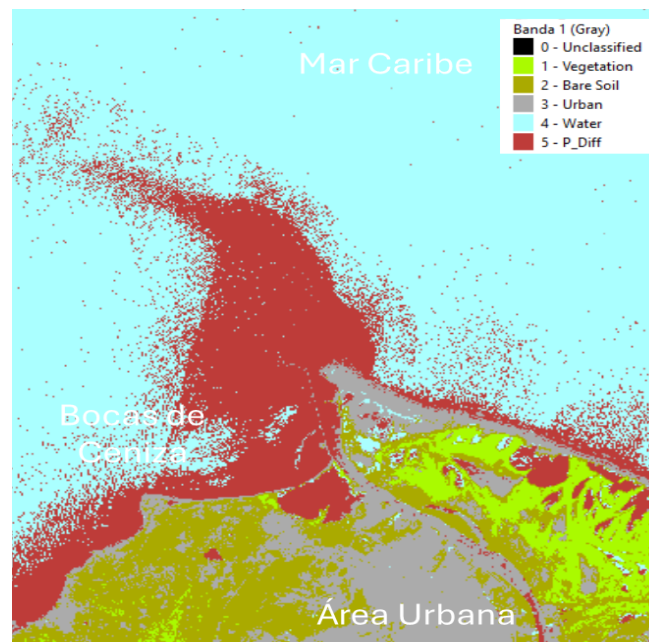


FIGURA 10. Resultados clasificación de clases Sentinel-2 junio 16 del 2019 e inclusión propia de la combinación y la toponimia

Después de analizar las iteraciones generadas, se determinó que el algoritmo *Random Forest* ofrece excelentes resultados en términos de tiempo de ejecución, precisión y exactitud. Por ello, se implementó ampliamente para la clasificación detallada de la zona de interés durante dos periodos de tiempo: mayo y de junio del 2019, comparativo para datos de entrenamiento.

Con el análisis multitemporal, se identificó un aumento en la contaminación y plástico flotante de la zona generando que la clase 'PDiff' o de contaminación oceánica destacando en contraste con la clase 'agua'. Este hallazgo indica variación entre las áreas afectadas por la presencia de plásticos y el entorno acuático por el aumento del cauce y el incremento temporal de los residuos en el río. Tras analizar las diferentes iteraciones, se concluye que la metodología permite obtener mejores resultados en los procesos de teledetección, porque integra los procesos de percepción remota aportando a futuras investigaciones.

La precisión del método *Random Forest* para detectar plástico y contaminación oceánica puede variar dependiendo del tipo y calidad de las imágenes Sentinel 2, la cantidad y calidad de los datos de entrenamiento, la experiencia y habilidad del usuario en la configuración y ajuste del algoritmo, y la complejidad de la clasificación requerida que tiene una alta precisión y exactitud en la detección de plástico y contaminación oceánica; sin embargo, su precisión puede variar según las condiciones específicas y de los

parámetros de configuración del algoritmo con análisis de resultados y evaluación de la precisión del método en cada caso.

3.5 Implementación de script de Google Earth Engine (GEE) para detección de plástico

Uno de los beneficios destacados en el desarrollo de esta metodología es la integración de información satelital con GEE. Así, a partir de los índices espectrales se procedió a construir un modelo para la detección no supervisada de plástico en el océano, aprovechando las utilidades de GEE, permitiendo el análisis de datos geoespaciales a gran escala y el acceso a datos geoespaciales como imágenes satelitales, datos climáticos, datos de la superficie terrestre y el uso de sus scripts.

Se emplearon datos del satélite Sentinel-2, que proporcionan información sobre la concentración de plástico en la superficie del océano, permitiendo identificar la presencia de objetos flotantes en el agua, mediante el cruce de los índices temáticos.

Se aplicó el código abierto disponible dispuesto en (*Google Colab*, s/f), ajustado y adaptado a la zona de estudio; se implementaron líneas de código adicionales para la importación de datos provenientes de COPERNICUS/S2SR de nivel de superficie (*Surface Reflectante*) favoreciendo la teledetección de contaminantes; y, se implementó la descarga de los resultados en línea en *Google Drive*, para el análisis y procesamiento posterior de las imágenes (FIGURA 11).

```
var region = ee.Geometry.Rectangle([
  [-74.9597279381032, 11.024932772208793, -74.70049688720702, 11.208262018712146]
]);

function maskS2clouds(image) {
  var qa = image.select('QA60');

  // Bits 10 and 11 are clouds and cirrus, respectively.
  var cloudBitMask = 1 << 10;
  var cirrusBitMask = 1 << 11;

  // Both flags should be set to zero, indicating clear conditions.
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudBitMask).eq(0)
    .and(qa.bitwiseAnd(cirrusBitMask).eq(0));
```

FIGURA 11. Adaptación, construcción y mejora de Script. Adaptación propia

La FIGURA 12 evidencia el cono de sedimentación aguas abiertas que el río Magdalena arrastra aguas arriba y almacenadas en el sector de Bocas de Ceniza a partir de la reflectancia de Sentinel-2

y, las FIGURAS 13 y 14 detallan la respuesta a partir de la combinación de índices espectrales de Sentinel-2 GEE y la detección de anomalías.



FIGURA 12. Sentinel-2 GEE. Adaptación de localización propia a partir de coordenadas geográficas

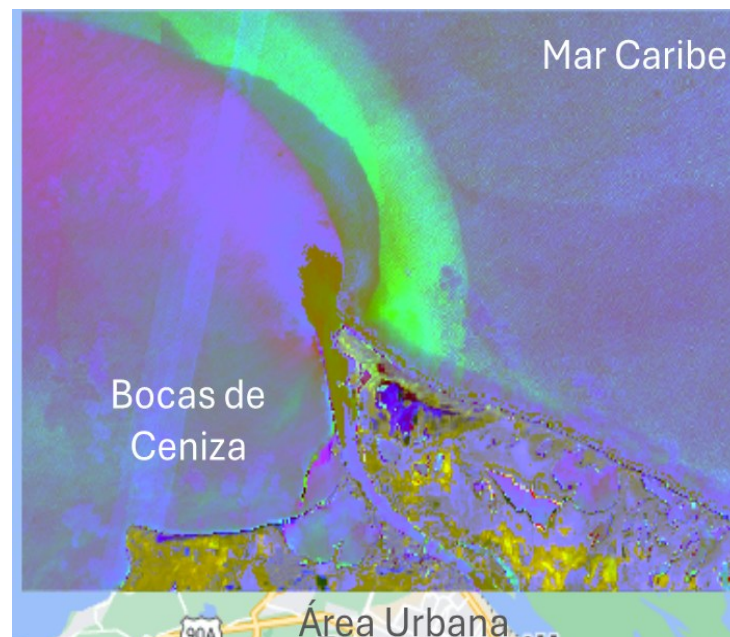


FIGURA 13. Combinación Índices Sentinel-2 GEE. Adaptación de localización propia a partir de coordenadas geográficas

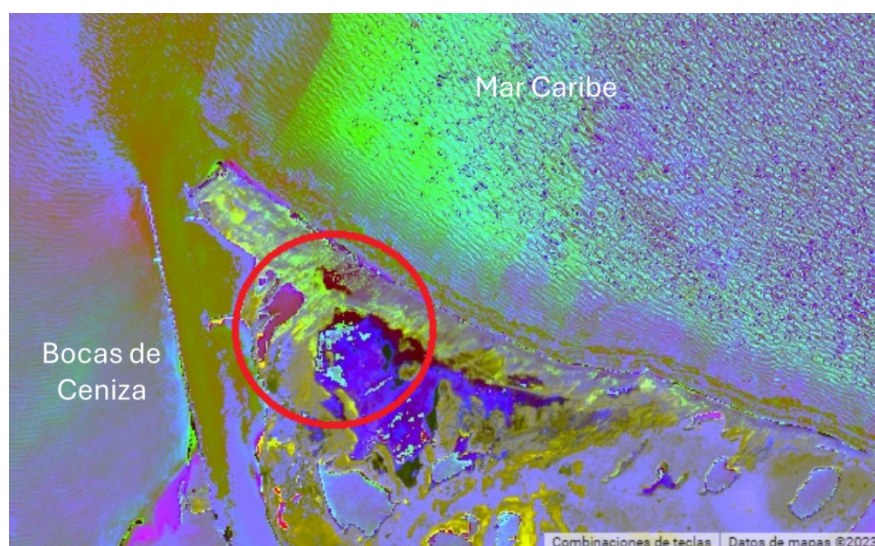


FIGURA 14. Detección de anomalías en detalle a partir combinación Índices Sentinel-2 GEE. Adaptación de localización propia a partir de coordenadas geográficas

El proceso se puede mejorar mediante el uso de GEE. Por ello, se buscó obtener datos precisos sobre la contaminación utilizando el motor de GEE y QGIS y de un localizador de contaminantes que emplea el Índice de Escombros Flotantes (FDI), el Índice de Plástico (PI) y el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NVDI). Esto se combina con el uso de un *script* en *Javascript* para GEE y *Python* para *Google Collaboratory*, ofreciendo una solución fácilmente modificable y utilizable para programadores con habilidades medias.

Como aporte, en *Sign In - Google Accounts* (s/f) a través del registro, se disponen algunos códigos o configuraciones que puedan ser adaptados a otras investigaciones y ejercicios de percepción remota y teledetección de residuos y contaminantes antropogénicos como una buena oportunidad para que desde la ciencia y procesos colaborativos se recopile información y se precise el modelo geolocalizador de contaminación por islas de basura y de también de los tomadores de decisiones para abordar los desafíos restantes en este campo.

4. Conclusiones

El uso de técnicas y tecnologías aportan metodológicamente a la automatización de procesos de validación y planificación, reduciendo los costos operacionales y aumentando la eficiencia en los procesos de teledetección. Al construir un conjunto de datos etiquetados y entrenados, se aumenta la precisión del modelo al diferenciar cada una de las categorías, incluyendo la detección de contaminación y plástico en el océano y determinar los índices espectrales y la clasificación de la contaminación en cuerpos de agua, ejecutando los algoritmos adecuados para crear un modelo de aprendizaje personalizado. De ello, la implementación del algoritmo *Random Forest* generó una clasificación eficiente de las categorías creadas, con una precisión promedio superior al 90% en las cinco clases definidas.

La integración de herramientas de geoprocésamiento de imágenes y teledetección automatiza y maximiza los beneficios en la clasificación y detección de coberturas terrestres y contaminantes y su análisis multitemporal, así como la contribución al desarrollar un clasificador en periodos de tiempo. Esta automatización mejora procesos y beneficia la

planificación contra la contaminación ambiental en océanos, lagos, ríos, entre otros.

Los resultados expuestos se llevaron a cabo en el marco de la Maestría en Energía y Sostenibilidad, programa que ha brindado conocimiento en temas relacionados con la eficiencia energética, el uso de fuentes renovables y la preservación del medio ambiente. El enfoque en energía y sostenibilidad ha proporcionado una base sólida para comprender el impacto de la contaminación en los cuerpos de agua como fundamento para el desarrollo de esta metodología innovadora que aporta a las dinámicas de desarrollo territorial.

Al construir un mosaico o imagen a partir de varias escenas, permite obtener una imagen completa, utilizando los valores de los píxeles correspondientes en otras escenas disponibles, aportando incluso que el clasificador automático elimina las nubes. Esta práctica permite obtener una imagen más limpia para el procesamiento del

modelo y la ejecución de algoritmo sin la necesidad de construir un mosaico, porque se puede clasificar una sola escena sin procesamiento previo, salvo los ajustes atmosféricos que son siempre necesarios.

Este enfoque multidisciplinario y el uso de herramientas avanzadas permitieron una comprensión amplia de la contaminación antropogénica en cuerpos de agua. La combinación de análisis satelital, algoritmos de *machine learning* y validación con zonas identificadas, ofrece un modelo que puede ser aplicado en futuras investigaciones para monitorear y gestionar la contaminación ambiental de manera efectiva y, de manera exploratoria visibles a los tomadores de decisiones para que orienten sus acciones correctivas y preventivas en el marco de un espacio geográfico y un territorio habitable y sostenible para todos.

5. Referencias citadas

- CHAMORRO, P. R. 2022. "Aplicación de los sensores remotos aerotransportados en las operaciones de inteligencia, vigilancia y reconocimiento aéreo (ISR) y su importancia en la lucha contra el tráfico ilícito de drogas (TID) en el Perú". *Pensamiento Conjunto*, 10(2): 12-12.
- COPÉRNICO SERVICIO MARINO/CMEM. s/f. *Detección de la contaminación por plásticos*. Copernicus Europe's eyes on Earth. Disponible en <https://marine.copernicus.eu/es/servicios/contaminacion-por-plasticos/deteccion-de-la-contaminacion-por-plasticos>.
- DE LAS SALAS, D. A. Á. 2019. Así se formó la isla de basura que bordea las playas del Caribe. *El Tiempo* (7 junio). Disponible en: <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/como-se-formo-la-isla-de-basura-en-puerto-colombia-372138>
- DUMBILI, E. & L. HENDERSON. 2020. "The challenge of plastic pollution in Nigeria". M. TREVOR LETCHER [Editor(s)], *Plastic Waste and Recycling*. Chapter 22.
- ENFRIN, M.; DUMÉE, L. F. & J. LEE. 2019. "Nano/microplastics in water and wastewater treatment processes—origin, impact and potential solutions". *Water Research*, 161: 621-638.
- GÓMEZ-JAKOBSEN, F. J. 2016. *Evaluación del estado de eutrofización del mar Alborán mediante el empleo combinado de imágenes de satélite y de muestreos in situ*. Universidad de Málaga. Departamento de Física Aplicada II. Málaga, España. Tesis de Doctorado. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10630/11689>.

GOOGLE COLAB. s/f. Disponible en:

<https://colab.research.google.com/drive/1M33BPuBlIM3rqL2r03wCHNKM-XJYOTkr?usp=sharing>.

LEBRETON, L. C. M.; ZWET, J. VAN DER; DAMSTEEG, J-W.; DE BOYAN, L.; ANDRADY, A. y J. REISSER. 2017. *Los veinte ríos que más plástico emiten al mar*. EpData. Disponible en:

<https://www.epdata.es > veinte-ríos-mas-plastico-emiten-...>

MÁRQUEZ CALLE, G. 2016. "Un río difícil. El Magdalena: historia ambiental, navegabilidad y desarrollo". *Memorias: Revista Digital de Historia y Arqueología desde el Caribe*, (28): 29-60.

SIGN IN - GOOGLE ACCOUNTS. s/f. Disponible en:

<https://code.earthengine.google.com/1c0ad8af56cfa1e0639c41ca85dd1a38>.

SANNIGRAHI, S.; BASU, B.; BASU, A. S. & F. PILLA. 2022. "Development of automated marine floating plastic detection system using Sentinel-2 imagery and machine learning models". *Marine Pollution Bulletin*, 178: 113527.

Lugar y fecha de finalización del artículo:
Bogotá, D.C., Colombia; noviembre, 2024
Revisión marzo, 2025