Identificación de complejos de humedales mediante el uso de imágenes satelitales y Machine Learning, municipio de Piamonte, Cauca (Colombia)

Identification of wetland complexes using satellite images and Machine Learning, municipality of Piamonte, Cauca (Colombia)

Jaime Eduardo Mauna De Los Reyes[1]
Jhon Fander Higidio Castro[1]
Manuel Eduardo Mauna Páez[1]

Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC). Subdirección de Gestión Ambiental. Proyecto Formulación e implementación de planes de manejo de humedales.
E-mail: jmauna@crc.gov.co[1]

Resumen.

Este estudio tiene como objetivo principal identificar y delimitar los complejos de humedales en el municipio de Piamonte, Cauca, Colombia, en la región plana del piedemonte amazónico. Para ello, se emplearon herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y métodos de aprendizaje automático (Machine Learning, ML), tanto supervisados como no supervisados, junto con el uso de computación en la nube a través de Google Earth Engine (GEE) para el procesamiento masivo de imágenes satelitales SAR Sentinel-1B (GRD). La metodología incluyó el uso del algoritmo de agrupamiento K-Means para la clasificación automática de áreas de humedales y el método Random Forest (RF) para la identificación en la zona plana de Piamonte. Se definieron y delimitaron cinco complejos de humedales basados en características topográficas, como cambios en la pendiente, dirección y acumulación del flujo: Complejo río Caquetá, Complejo ríos Nabueno - Guayuyaco, Complejo río Inchiyaco, Complejo Quebradas Tontoyaco - Quebradón - Trajayaco y Complejo ríos Fragua - Congor - Tambor. La clase de humedales más extensa corresponde a ciénagas con vegetación alta (NaPaCiVeAl), con una superficie de 25.929,39 ha., representando la mayor proporción en todos los complejos. Le sigue la clase asociada a ciénagas con vegetación baja (NaPaCiVeBa), que abarca un total de 1.795,51 ha.

Palabras clave: Complejo de humedales, Humedales, K-Means, Machine Learning (ML), Piamonte, Random Forest, Sentinel-1.

Historia del artículo

Fecha de recepción: 10-02-2024
Fecha de aceptación: 03-09-2024

DOI: 10.47374/novcol.2024.v19.2418

Abstract

The main objective of this study is to identify and delimit the wetland complexes in the municipality of Piamonte, Cauca, Colombia, in the flat region of the Amazonian piedmont. For this purpose, Geographic Information Systems (GIS) tools and Machine Learning (ML) methods, both supervised and unsupervised, were employed, together with the use of cloud computing through Google Earth Engine (GEE) for massive processing of SAR Sentinel-1B (GRD) satellite images. The methodology included the use of the K-Means clustering algorithm for automatic classification of wetland areas and the Random Forest (RF) method for identification in the flat Piedmont area. Five wetland complexes were defined and delimited based on topographic characteristics, such as changes in slope, direction and flow accumulation: Caquetá River Complex, Nabueno - Guayuyaco River Complex, Inchiyaco River Complex, Tontoyaco - Quebradón - Trajayaco Creek Complex and Fragua - Congor - Tambor River Complex. The most extensive class of wetlands corresponds to marshes with high vegetation (NaPaCiVeAl), with an area of 25,929.39 ha, representing the largest proportion in all the complexes. It is followed by the class associated with low vegetation marshes (NaPaCiVeBa), which covers a total of 1,795.51 ha.

Keywords: Wetland Complex, Wetlands, K-Means, Machine Learning (ML), Piamonte, Random Forest, Sentinel-1.

introducción

La Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), en el marco de su cumplimiento misional, viene adelantando acciones encaminadas a la protección, conservación y recuperación de los humedales, como socio-ecosistemas estratégicos que prestan bienes y servicios a la sociedad del departamento del Cauca. Dichas acciones se ven reflejadas en la identificación, georreferenciación, delimitación, caracterización y zonificación ambiental; definición de objetivos de protección, conservación y recuperación; y gestión de planes de acción de los humedales en el área de su jurisdicción (CRC-WWF, 2003; CRC-WWF, 2006; CRC, 2008).

Los Planes de Manejo Ambiental de Humedales (PMAH) son instrumentos de planificación que ayudan a tomar decisiones y definir las medidas de manejo requeridas para alcanzar los objetivos de protección, conservación y recuperación identificados. Pueden tener un alcance normativo, por ello, a partir de sus resultados, las autoridades ambientales como las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), están facultadas para establecer los humedales como una Determinante Ambiental del Territorio (Ley 388,1997) de obligatorio cumplimiento por parte de los entes oficiales y la comunidad en general (CRC, 2013; CRC, 2014; CRC, 2017; CRC, 2019).

Los humedales son ecosistemas de gran importancia estratégica debido a la amplia variedad de bienes y servicios esenciales que proporcionan a la sociedad. A lo largo de la historia, el desarrollo de los grupos humanos ha dependido de su proximidad a los humedales; de hecho, la vida humana es difícilmente sostenible lejos de estos ecosistemas, y la vida en contextos rurales y depende de ellos. Estos ecosistemas tienen un valor estratégico en términos de conservación, biodiversidad, servicios ecosistémicos y su papel en el funcionamiento de sistemas naturales o socioeconómicos. Desempeñan un papel crucial en la purificación del agua, recarga de acuíferos, mitigación de inundaciones, conservación de la biodiversidad, adaptación y resiliencia a los efectos crecientes del cambio climático, así como en la gestión del riesgo, entre muchos otros beneficios (Cortes-Duque et al., 2016).

Un complejo de humedales es un conjunto de ecosistemas acuáticos continentales que coexisten en una misma área geográfica y comparten características y condiciones similares, manteniendo una relación ecológica y ambiental (Secretaría Distrital de Ambiente Bogotá, s.f.). Aunque puedan estar separados geográficamente, suelen estar interconectados de manera física o funcional, generalmente a través de conexiones hidrológicas superficiales o subterráneas. Los grupos de humedales de diversos tipos de permanencia constituyen un complejo de humedales (Johnson et al., 2010). Estos humedales pueden ser pantanos, lagos, ríos, entre otros, y son importantes para la conservación de la biodiversidad, el ciclo del agua, la mitigación de inundaciones y la provisión de hábitats para diversas especies. Además, actúan como esponjas naturales, absorbiendo y filtrando el agua, lo que mitiga las inundaciones. Los humedales son reservorios de biodiversidad, albergando una riqueza única de especies que dependen de sus hábitats interconectados.

La identificación y delimitación de estos complejos es clave para su conservación y gestión efectiva. Considerar su extensión, conectividad con otros ecosistemas, la dinámica hidrográfica y la diversidad biológica presente en cada uno

de sus componentes permite comprender su complejidad y valor. Así, preservar estos complejos de humedales no solo es crucial para la naturaleza y el ordenamiento ambiental del territorio, sino también para asegurar un futuro sostenible.

Cortes-Duque et al. (2016) proponen un enfoque basado en cuatro criterios biofísicos: geomorfología, hidrología, geología y vegetación, fundamentales para identificar los límites de pequeñas áreas de humedales, así como de grandes complejos en Colombia. Estos criterios permiten reconocer la conectividad espacial y funcional, y la relación y variación entre el humedal y el ecosistema terrestre desde un punto de vista ecológico.

El municipio de Piamonte (Cauca-Colombia) tiene una amplia extensión geográfica, asimismo, presenta gran cantidad de humedales distribuidos en el área de estudio, que es la zona plana perteneciente al piedemonte amazónico. Este artículo aborda las primeras etapas del Plan de Manejo Ambiental de Humedales, concernientes a la identificación de los complejos de humedales. Esto ha sido posible gracias a la integración de herramientas científicas y tecnológicas proporcionadas por los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas avanzadas de aprendizaje automático (Machine Learning, ML), como los algoritmos K-Means y Random Forest (RF). El método K-Means, un algoritmo no supervisado, se basa en la identificación de características similares dentro de un conjunto de datos, agrupando los datos más parecidos en clústeres o grupos, mientras que aquellos que difieren entre sí se organizan en distintos clústeres como resultado del proceso de clasificación (Fiting y Hermawan, 2019). Por otro lado, el algoritmo supervisado Random Forest (RF) es un clasificador que consiste en múltiples árboles de decisión generados en paralelo, donde cada árbol se entrena a partir de un subconjunto aleatorio del conjunto de datos principal (Breiman, 2001).

Las técnicas de Machine Learning, tanto supervisadas como no supervisadas, han experimentado un auge significativo gracias a su alta precisión y tasa de éxito en el mapeo y monitoreo de humedales. La integración de datos espaciales multifuente y de alta dimensionalidad solo es factible mediante algoritmos capaces de manejar eficientemente grandes volúmenes de datos. Este es el caso de la técnica supervisada no paramétrica Random Forest (RF) y del algoritmo no supervisado K-Means (Landuyt et al., 2020; Gulácsi y Kovács, 2020).

El algoritmo K-Means se destaca por su velocidad, robustez y efectividad en el análisis de datos y la obtención de resultados. Se trata de un método de agrupamiento iterativo cuyo objetivo es minimizar la suma de cuadrados dentro de los clústeres. Para ello, se define un número preestablecido de clústeres. Inicialmente, los centroides de los clústeres se seleccionan de manera aleatoria y, posteriormente, cada muestra se asigna al centroide más cercano (Landuyt et al., 2020; Salinas et al., 2020; Yilmaz, 2023;).

El algoritmo Random Forest (RF) se basa en la identificación de patrones a partir de datos etiquetados y se utiliza ampliamente en el mapeo de humedales debido a su alta eficiencia en la discriminación de variables y capacidad para manejar grandes volúmenes de datos geoespaciales (L'Heureux et al., 2017; Montgomery et al., 2021). Se considera uno de los algoritmos más efectivos para clasificar imágenes de teledetección en regiones con topografía compleja (Huijuan MA, 2019), presenta ventajas significativas en el procesamiento de datos correlacionados de alta dimensión (Gounaridis et al., 2019) y eficaz para abordar problemas de no linealidad y sobreajuste en los modelos (LaRocque et al., 2020; Peng et al., 2020).

Lawrence y Moran (2015) compararon sistemáticamente el rendimiento de varios algoritmos de clasificación de aprendizaje automático (ML). Su estudio concluyó que el algoritmo de bosques aleatorios (RF) presenta una precisión de clasificación promedio significativamente mayor en comparación con otros algoritmos. Además, la literatura documenta precisiones de clasificación superiores al 90% en el mapeo y monitoreo de humedales con RF, dependiendo del número de clases utilizadas (Banks et al., 2019; Montgomery et al., 2021). RF demuestra claras ventajas en la clasificación de humedales (Amani et al., 2017) y es efectivo para el mapeo de estos ecosistemas, al integrar muestras de humedales existentes con datos ambientales como insumos del modelo (Zhang et al., 2024).

El presente estudio tiene como objetivo principal identificar y delimitar los complejos de humedales en el municipio de Piamonte, Cauca, Colombia, específicamente en la zona plana del piedemonte amazónico. Esta investigación busca contribuir a la protección, conservación y recuperación de estos ecosistemas en el contexto de la formulación del Plan de Manejo Ambiental. Este plan se presenta como un instrumento de planificación integral que considera el agua y los humedales como ejes fundamentales para el ordenamiento y desarrollo socioeconómico, cultural y ambiental del territorio.

Materiales y métodos

Área de estudio

El municipio de Piamonte se localiza en el sur del departamento del Cauca, en el suroeste de Colombia, formando parte de la Reserva Forestal de la Amazonía (SINCHI, 2012). Limita al norte con los municipios de Palestina y Acevedo (Huila), así como con el municipio de Santa Rosa (Cauca); al este, con los municipios de San José de Fragua y Curillo (Caquetá); y al sur y oeste, con los municipios de Puerto Guzmán y Mocoa (Putumayo). La zona urbana se encuentra en las coordenadas geográficas WGS84, 1° 7' 7,68'' N y 76° 19' 39,66'' W, a una altitud de 288 msnm. El municipio abarca una superficie de 116.200 hectáreas (Piamonte en el departamento de Cauca - Municipio y alcaldía de Colombia, s.f.).

Piamonte se sitúa entre dos ríos fundamentales: el río Caquetá y el río Fragua, actuando como un enlace entre los departamentos de Putumayo y Caquetá. La economía local se centra principalmente en la agricultura y la ganadería, y depende en gran medida de los recursos hídricos. La disponibilidad de agua es crucial tanto para las dinámicas poblacionales como para los esfuerzos de conservación necesarios para proteger este recurso vital. La cuenca del río Caquetá se extiende hasta Brasil. Sus tributarios principales son el río Inchiyaco, que nace entre los ríos Tambo y Nabueno; el río Tambor, que nace entre los ríos Congor e Inchiyaco; el río Nabueno, tiene su origen entre los ríos Inchiyaco y Guayuyaco; y el río Guayuyaco, que nace entre los ríos Nabueno y Caquetá. Todos estos ríos y sus afluentes se originan en la serranía de los Churumbelos (SINCHI, 2012).

El municipio de Piamonte se distingue por dos ambientes geológicos bien definidos: el ambiente cordillerano y el de llanura. El ambiente cordillerano se caracteriza por la presencia de rocas que datan del período Triásico hasta el Paleógeno, mientras que en la llanura predominan depósitos más recientes, correspondientes al Cuaternario (INGEOMINAS, 2000).

En términos de geomorfología, se identifican dos tipos principales de relieve. Al norte, el paisaje es montañoso y forma parte del piedemonte de la cordillera Oriental. Esta morfología ha sido ligeramente modificada por procesos denudacionales, caracterizados por la erosión y algunos procesos morfodinámicos. En contraste, la zona sur presenta un paisaje plano a ondulado, principalmente por la actividad fluvial de las corrientes hídricas que atraviesan la región (SGC y UNAL, 2014; SGC y UIS, 2015).

Según la cartografía oficial de Coberturas de la Tierra del IDEAM (2010) a escala 1:100.000 (Catálogo de mapas IDEAM, s.f.) y los productos cartográficos derivados de la Modificación Excepcional del Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) del municipio de Piamonte a escala 1:25.000 (Alcaldía Municipal de Piamonte Cauca, 2018), se ha determinado que las coberturas predominantes en el municipio corresponden principalmente al bosque denso (69,19 %), seguido por áreas de pastos (15,97 %) y coberturas asociadas a vegetación secundaria de tipo arbustivo (10,97 %).

Los usos predominantes del suelo son: protección y conservación en áreas como el Parque Nacional Natural Serranía de los Churumbelos; ganadería extensiva; actividades agropecuarias; actividades relacionadas con la navegación.

El área de estudio se ubica en la zona plana del piedemonte amazónico, al sur del municipio de Piamonte. Para su delimitación se definió un cuadrángulo con coordenadas geográficas WGS84, 76° 35' 13,2'' W y 0° 57' 0'' N, y 76° 3' 4,32'' W y 1° 13' 40,8'' N, sobre el cual se procesó la información espacial. Posteriormente, se realizó un recorte del área de estudio (Fig. 1).

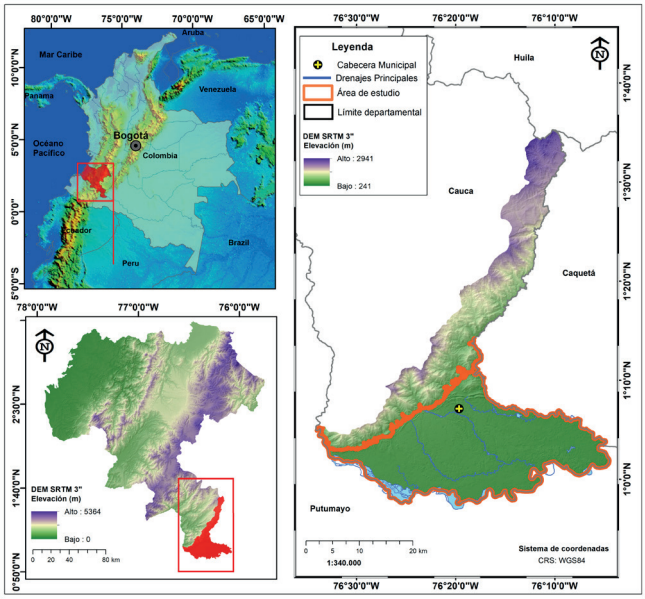


Figura 1. *Localización del área de estudio. zona plana del municipio de Piamonte*

Materiales

Para este estudio se utilizó el modelo digital de elevación DEM ALOS PALSAR en banda L (https://asf.alaska.edu/datasets/daac/alos-palsar/) con resolución espacial de 12,5 m, que permitió derivar las variables topográficas del terreno, importantes para la predicción de humedales (Tabla 1). Las imágenes SAR (Synthetic Aperture Radar) Sentinel-1B GRD, disponibles en Data Space Copernicus (Ecosystem, C. D. S., 2024), ofrecen una resolución espacial de 10 m en banda C, con doble polarización (VV y VH) en órbitas ascendentes y descendentes. Estas imágenes proporcionan información a través del coeficiente de retrodispersión (backscatter). Por su parte, las imágenes ópticas Sentinel-2A, también accesibles en Data Space Copernicus (Ecosystem, C. D. S., 2024), cuentan con una resolución de 10 m y permiten derivar índices espectrales clave para la detección y caracterización de humedales.

Tabla 1: *Información espacial utilizada para la identificación de humedales.*

Datos de entrada	Denominación	Resolución (m)	Programa
Modelo Digital de Elevación (DEM)	ALOS PALSAR	12,5	JAXA
Imagen SAR	Sentinel-1B	10,0	Copernicus (ESA)
Imagen Óptica	Sentinel-2A	10 ,0	Copernicus (ESA)

Método general

La detección de humedales se realizó consultando diversas fuentes bibliográficas nacionales e internacionales especializadas en la identificación de estos ecosistemas, utilizando datos de observación de la tierra y algoritmos de clasificación de ML. Esto se realizó utilizando herramientas de procesamiento espacial como Google Earth Engine (GEE, https://earthengine.google.com/), en conjunto con los softwares GIS de código abierto SAGA (Conrad et al. 2015) y R-Project (R: The R Project for Statistical Computing. s. f.).

La identificación de humedales en la zona de estudio se realizó de la siguiente manera: recopilación información primaria y secundaria; clasificación de las clases de humedales y coberturas de la tierra; preprocesamiento de información espacial; derivación de datos de entrada, sinergismo y fusión de las imágenes SAR, ópticas y DEM; validación de los humedales identificados (Fig. 2).

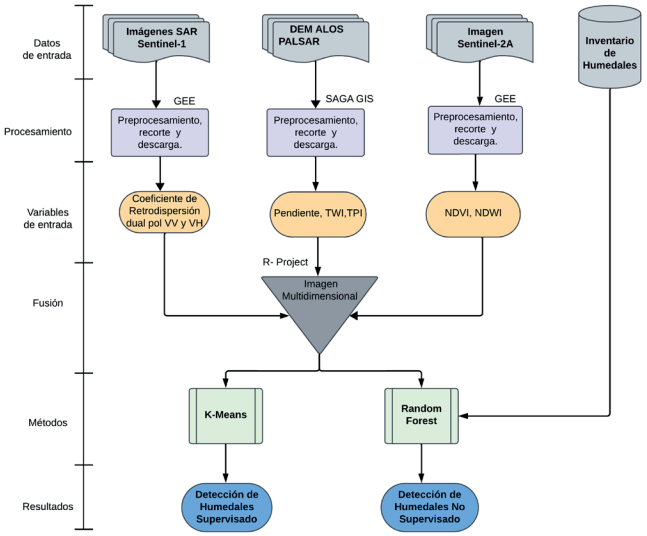


Figura 2. *Flujograma metodológico para la identificación de humedales*

Recopilación de información primaria y secundaria

La revisión bibliográfica sistemática permitió identificar fuentes sobre los métodos y técnicas para la detección e identificación de humedales. Las plataformas satelitales brindaron la descarga de acceso libre de imágenes SAR (Sentinel-1B) y ópticas (Sentinel-2A), así como el modelo digital de elevación (DEM ALOS PALSAR) para utilizar las herramientas de percepción remota.

Por su parte, las salidas de campo permitieron estructurar la base de datos geográfica del inventario de humedales, para georreferenciar su ubicación, describir sus atributos y determinar los tipos de humedales, así como las demás coberturas observadas in- situ. Se utilizó como referencia el mapa de coberturas oficial a escala 1:100.000 del IDEAM (2010) del área de estudio para obtener las muestras de entrenamiento.

Clasificación de las clases de humedales y coberturas de la tierra

Se identificaron seis clases de humedales presentes en el área de estudio y se etiquetaron de acuerdo a: la Convención Ramsar (Tabla 3), a estudios realizados por la CRC, a fotografías de campo y al conocimiento de investigadores en el campo de la biología con amplia experiencia en humedales. La clasificación se fundamentó en la identificación de humedales palustres, asociados a ciénegas, y

humedales lacustres, asociados a cuerpos de agua. Adicionalmente, se identificaron áreas de cobertura de pastos, bosques y zonas urbanas, tanto in situ como a través de imágenes satelitales detalladas y cartografía temática de coberturas (IDEAM, 2010). De esta manera, se definieron las muestras de entrenamiento del modelo para identificar humedales y no humedales.

Tabla 3: *Descripción de las clases de humedales en el área de estudio*

Clase de humedal	Etiqueta	Descripción
Natural Lacustre	NaLa	Cuerpos de agua que se forman por los desbordamientos de los ríos y que se mantienen en el tiempo.
Natural Lacustre Lagos o Lagunas	NaLaLg	Cuerpos de agua abiertos como lagos o lagunas y tramos de ríos.
Natural Palustre Ciénagas Vegetación Alta	NaPaCiVeAl	Humedales con alto grado de saturación de humedad con presencia de vegetación boscosa.
Natural Palustre Ciénagas Vegetación Baja	NaPaCiVeBa	Humedales con alto grado de saturación de humedad con presencia de vegetación baja como pastos.
Natural Palustre Ciénagas Vegetación Media	NaPaCiVeMe	Humedales con alto grado de saturación de humedad con presencia de vegetación arbustiva.
Natural Palustre Escorrentía Vegetación Baja	NaPaEsVeBa	Humedales con alto grado de saturación de humedad sobre drenajes temporales o intermitentes.

Preprocesamiento de Información espacial

La información obtenida se unificó bajo el sistema de referencia WGS84, así se acotó al área de estudio. Las imágenes satelitales SAR (Sentinel-1B) y ópticas (Sentinel-2A) se procesaron en la plataforma Google Earth Engine y el DEM en software Open source SAGA y R.

Derivación de datos de entrada

Los parámetros del terreno se derivaron de ALOS PALSAR DEM, con algoritmos del software SAGA, como la pendiente (Zevenbergen et al., 1987), el índice topográfico de humedad (TWI) y el Indice de posición topográfica (TPI). De las imágenes SAR Sentinel-1B, se derivó el coeficiente de retrodispersión (backscatter) en decibelios (dB) en las bandas polarimétricas VV y VH. De la imagen óptica Sentinel-2A, se derivaron los índices espectrales NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada).

Sinergismo y fusión de las imágenes SAR, Ópticas y DEM

Se integraron las variables obtenidas de las imágenes SAR Sentinel-1B (retrodispersión), Sentinel-2A (índices espectrales) y el modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) relacionadas con las características del terreno en un stack de imágenes. Este conjunto contiene información que interactúa y contribuye significativamente a la detección y caracterización de los ecosistemas de humedales.

Modelación con técnicas de Machine Learning

La implementación de los algoritmos de Machine Learning K-Means y Random Forest (RF) se llevó a cabo utilizando el software R. En este proceso, las variables de entrada consistieron en predictores continuos fusionados en el stack de datos mencionado, mientras que las variables de respuesta fueron categorizadas clases de humedales y no humedales.

Validación de los humedales identificados

El modelo de Machine Learning no supervisado (K-Means) fue útil para validar el modelo supervisado (Random Forest), pues permitió realizar una identificación preliminar de las clases de humedales. Este agrupamiento inicial proporcionó una base sobre la cual se pudieron contrastar las muestras de entrenamiento georreferenciadas recolectadas en campo. Posteriormente, el modelo supervisado refinó y delimitó con mayor precisión las áreas de humedales que fueron identificadas en la fase inicial del análisis no supervisado, asegurando una clasificación más detallada y precisa. Esto fortaleció el proceso de mapeo y la validez de los resultados.

Resultados y discusión

Delimitación de los complejos de humedales en el municipio de Piamonte

Con base en los diferentes criterios biofísicos establecidos para esta investigación, basados en las geoformas del terreno (gradientes de la pendiente), la dirección y la acumulación del flujo, así como los hallazgos realizados durante las visitas de campo, se identificaron y delimitaron cinco complejos de humedales en la zona de estudio: Complejo Río Caquetá, Complejo Ríos Nabueno - Guayuyaco, Complejo Río Inchiyaco, Complejo Quebradas Tontoyaco - Quebradón - Trajayaco y Complejo Ríos Fragua-Congor - Tambor (Fig. 3).

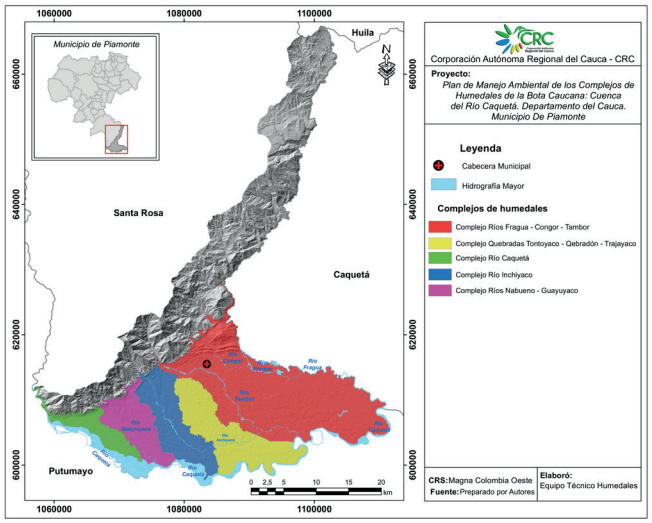


Figura 3. *Delimitación de los complejos de humedales zona plana de Piamonte.*

La distribución de humedales en los complejos, se concentra en la zona plana del municipio de Piamonte, lugar estratégico para la acumulación de agua y de humedad, debido a las condiciones geomorfológicas del terreno. Las áreas de inundación del río Caquetá juegan un papel importante en la existencia de humedales palustres temporales con vegetación baja, densa y lacustres, como cuerpos de agua superficiales (SGC y UNAL, 2014; SGC y UIS, 2015).

En la Tabla 4 se detallan las características de las distintas clases de humedales georreferenciadas en campo. A cada clase se le asignaron etiquetas específicas para su uso en el entrenamiento del modelo supervisado. Del mismo modo, se georreferenciaron puntos en el terreno que correspondían a coberturas no clasificadas como humedales, como áreas de pastizales, zonas urbanas, bosques, cultivos y suelos desnudos, entre otras. La cartografía y las imágenes satelitales disponibles del IGAC (IGAC. s. f.) fueron de gran apoyo para la determinación de las muestras de entrenamiento.

Las clases definidas de humedales están asociadas a palustres (ciénagas) y lacustres (lagos o lagunas) y el tamaño de la vegetación existente. Se identificaron vegetación baja en humedales correspondiente a pastos de diferentes especies, vegetación media arbustiva y vegetación con gran altura en los bosques densos.

De acuerdo a la geología a escala 1:100.000 (INGEOMINAS, 2000), de las planchas 412-Río La Fragua, 430-Mocoa y 431-Puerto Nuevo, las áreas de influencia de los cinco complejos descritos en la Tabla 4.1, se encuentran sobre depósitos fluviales de abanicos, de terraza, de cauce y llanura aluvial del Cuaternario y en menor medida, están compuestas por rocas finas sedimentarias del Grupo Orito, de edad Neógena. Este escenario litológico está estrechamente ligado a los ríos y cursos de agua, siendo propicio para la formación de áreas de acumulación de flujo, tanto estacionales como permanentes.

Desde una perspectiva geomorfológica a escala 1:100.000 de las planchas 412-Río La Fragua (SGC y UNAL, 2014), 430-Mocoa (SGC y UNAL, 2014), y 431-Puerto Nuevo (SGC y UIS, 2015), los complejos en su conjunto consisten principalmente en geoformas de ambiente fluvial, con algunas pertenecientes al ambiente denudacional. La geoforma fluvial más representativa y significativa es la llanura de inundación (Fpi), la cual está asociada a todos los complejos y corresponde a la zona de divagación de los cursos de agua que forman parte de estos complejos, en particular, el complejo de humedales del río Caquetá. La abundancia de cuerpos de agua superficiales, junto con la presencia de drenajes permanentes e intermitentes, contribuye a la alta biodiversidad de este territorio, la cual debe ser protegida y conservada. Los humedales fluviales, como ríos y quebradas, juegan un papel fundamental en la regulación del flujo de agua, alimentándose de humedales lacustres y palustres.

En la Tabla 4 se reportan las áreas de cada complejo y su altura promedios sobre el nivel del mar. El complejo con mayor extensión es el de Ríos Fragua - Congor - Tambor con 32126 ha y el de menor extensión es el Complejo río Caquetá con 5691 ha. La altitud varía entre 302 y 342 msnm.

Tabla 4: *Área de los complejos de humedales en la parte plana del municipio de Piamonte*

Complejo humedal	Área complejo (ha) (AT = 64580 ha)	Coordenadas Centroide		Altura promedio (m)
		Longitud	Latitud	
Ríos Fragua - Congor - Tambor	32126	76°14'4,86"	1°4'1,71"	311
Quebradas Tontoyaco - Qebradón - Trajayaco	11485	76°16'51,28"	1°0'16,45"	302
Río Caquetá	5691	76°28'15,73"	1°0'59,12"	331
Río Inchiyaco	8716	76°22'20,07"	1°2'16,88"	339
Ríos Nabueno - Guayuyaco	6562	76°25'29,83"	1°1'59,18"	342

Detección de humedales por métodos no supervisados y supervisados

La identificación de humedales se realizó utilizando métodos de Machine Learning, no supervisados (K-Means) y supervisados (Random Forest), aplicados a datos de percepción remota. Se emplearon imágenes SAR Sentinel-1B, imágenes satelitales ópticas de Sentinel-2A y el modelo de elevación digital (DEM) ALOS PALSAR, complementado con herramientas de ML. Estas herramientas, junto con los algoritmos de ML, permitieron un análisis detallado y preciso de las áreas de humedales.

La escala de trabajo utilizada en este estudio es regional y semidetallada, (1:25.000). Aunque hace es posible delimitar humedales, es necesario ajustar y validar los límites establecidos, debido a que la precisión depende del nivel de detalle, que a su vez está influenciado por el tamaño del píxel.

En la Figura 4 se presenta la distribución espacial de las zonas con mayor humedad y cuerpos de agua. Estos resultados son el producto de la clasificación automática no supervisada K-Means, donde se han identificado grupos específicos (en color azul) que representan áreas con mayor acumulación de flujo en la zona plana del municipio de Piamonte.

Con la información georreferenciada en campo, la recopilación de bases de datos y la inspección visual directa del terreno, se llevó a cabo la validación y selección de las clases (clústeres) obtenidas tras la clasificación no supervisada. Esta información derivada del análisis de datos, permite la detección de ´áreas asociadas a humedales en el terreno por su alta concentración de humedad, ofreciendo datos fundamentales para la validación del método supervisado.

El uso del algoritmo supervisado RF aseguró la identificación rigurosa y precisa de humedales. Gracias a las muestras de entrenamiento recolectadas en campo, este método aprende patrones a partir de datos etiquetados (clases de humedales definidas), lo que permitió distinguir y clasificar diferentes clases de humedales con alta precisión.

La principal ventaja del enfoque supervisado es su capacidad para detectar clases específicas de humedales, discriminando su ubicación en el terreno. Esto proporciona información detallada sobre la diversidad de los humedales existentes en el área de estudio y la distribución espacial de las clases de humedales detectadas en cada complejo (Fig. 5).

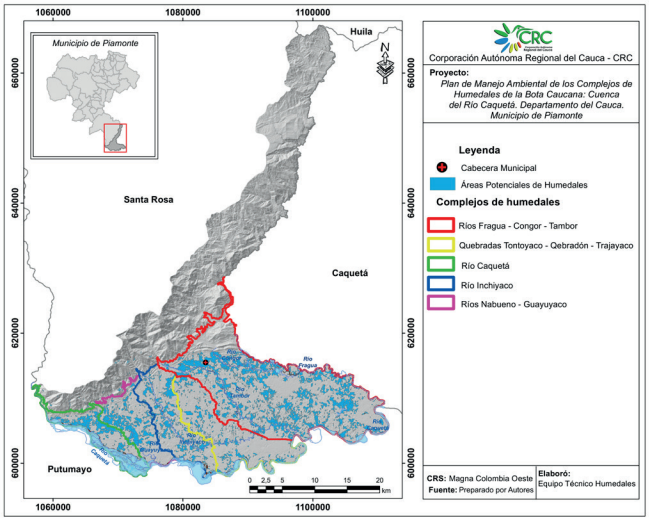


Figura 4. *Humedales potenciales identificados mediante métodos no supervisados K-Means.*

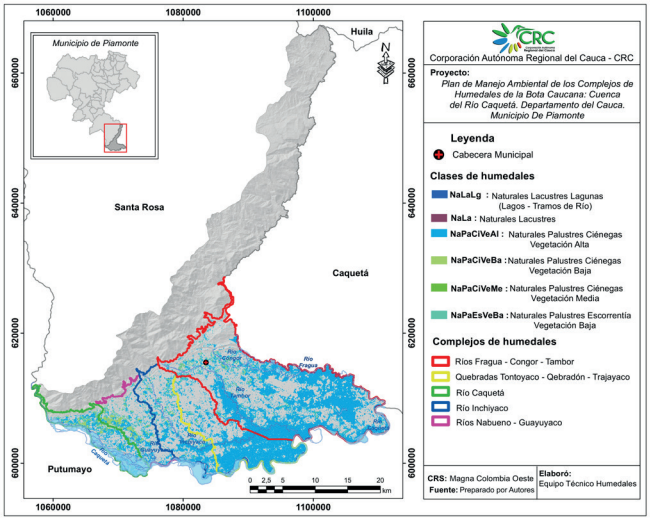


Figura 5. *Humedales identificados mediante métodos supervisados Random Forest.*

Con base en la información registrada, se determinó la frecuencia (cantidad) y extensión (área) porcentual de humedales en los cinco complejos evaluados. En las Figuras 6 y 7 se reporta el porcentaje de frecuencia y área de los humedales detectados en cada complejo del municipio de Piamonte. Se observa que el mayor porcentaje de área y frecuencia de humedales (53,03% y 41,22%) se concentra en el complejo R´ıos Fragua - Congor y Tambor. Por su parte, el complejo quebradas Tontoyaco - Qebradón - Trajayaco presenta el menor número de humedales (10,8 %), sin embargo, sobresale por ser el segundo complejo con mayor extensión (21,47 %).

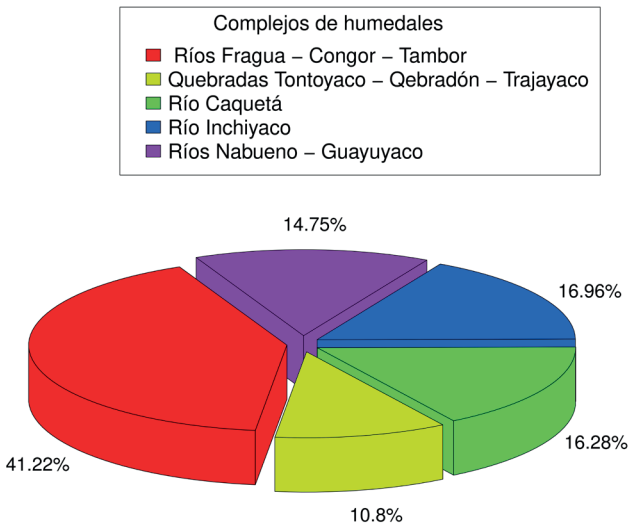


Figura 6. *Porcentaje del número de humedales identificados. Frecuencia y áreas porcentuales de humedales zona plana municipio de Piamonte.*

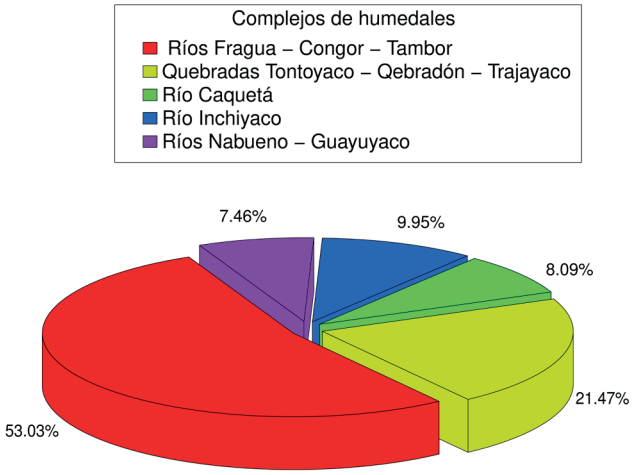


Figura 7. *Porcentaje del área de humedales identificados. Frecuencia y áreas porcentuales de humedales zona plana municipio de Piamonte.*

En la Tabla 5 y la Figura 8, se reportan el número de humedales discriminados por clases en cada complejo, junto con sus respectivos porcentajes. Esto da como resultado un total de 3974 humedales detectados en la región de estudio. Las clases de humedales con mayor concentración (número de humedales) y distribución espacial en los cinco complejos, son aquellos asociados a ciénagas con presencia de vegetación alta (NaPaCiVeAl), sumando un total de 2715, seguida por los humedales asociados a ciénagas con presencia de vegetación baja (NaPaCiVeBa), con un total de 877.

Complejo / Clases de humedales	NaLa	NaLaLg	NaPaCiVeAl	NaPaCiVeBa	NaPaCiVeMe	NaPaEsVeBa	Total
Ríos Fragua - Congor - Tambor	80 (4,88%)	23 (1,40%)	1150 (70,21%)	349 (21,31%)	0 (0%)	36 (2,20%)	1638 (100%)
Quebradas Tontoyaco - Qebradón - Trajayaco	34 (7,93%)	9 (2,10%)	331 (77,16%)	52 (12,12%)	0 (0%)	3 (0,70%)	429 (100%)
Río Caquetá	73 (11,28%)	55 (8,50%)	363 (56,11%)	135 (20,87%)	0 (0%)	21 (3,25%)	647 (100%)
Río Inchiyaco	9 (1,34%)	8 (1,19%)	477 (70,77%)	169 (25,07%)	0 (0%)	11 (1,63%)	674 (100%)
Ríos Nabueno - Guayuyaco	10 (1,71%)	4 (0,68%)	394 (67,24%)	172 (29,35%)	1 (0,17%)	5 (0,85%)	586 (100%)
Total	**206**	**99**	**2715**	**877**	**1**	**76**	**3974**

Tabla 5: *Número y porcentaje de las clases de humedales*

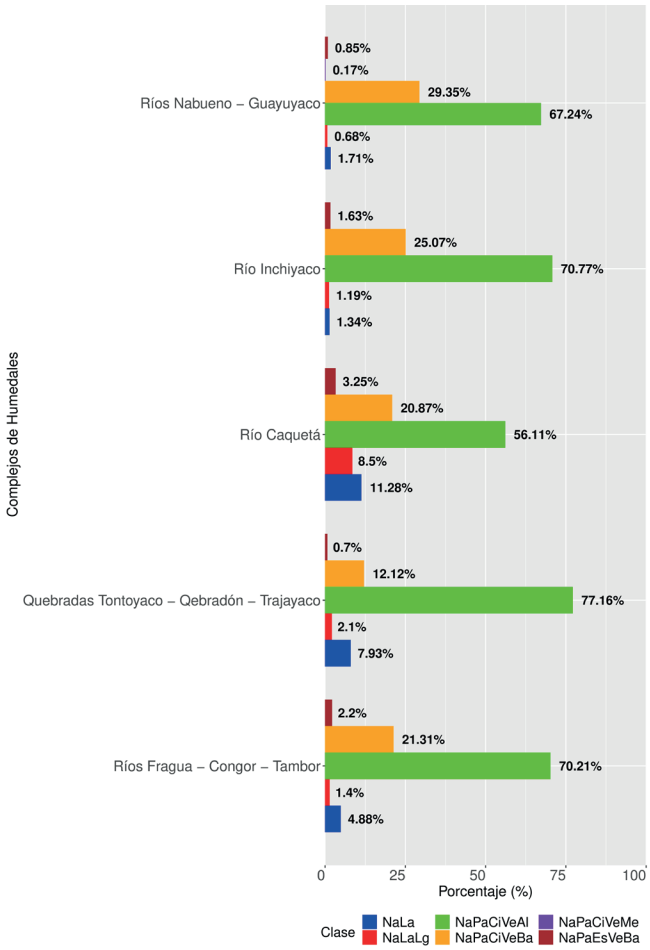


Figura 8. *Frecuencia porcentual de las clases de humedales detectadas por complejo.*

Los humedales de la clase lacustre (NaLa) están relacionados con cuerpos de agua situados en las áreas circundantes a las zonas de inundación de los ríos y presentan características físicas y biológicas distintivas. Se presentan con mayor distribución en los complejos Ríos Fragua - Congor y Tambor, con un total de 80 (4,88%), en el complejo Río Caquetá, se identificaron 73 humedales (11,28%) pertenecientes a esta clase.

Los complejos que se destacan por albergar una presencia notable de humedales de la clase NaPaCiVeAl son el complejo Ríos Fragua - Congor y Tambor, con un total de 1150 (70,21%), seguido por el complejo Río Inchiyaco, con 477 humedales de esta clase (70,77%).

Los humedales asociados a ciénagas de vegetación baja (NaPaCiVeBa) predominan principalmente en el complejo R´ıos Fragua - Congor y Tambor, con un total de 349 (21,31%), seguido del complejo Ríos Nabueno - Guayuyaco, con 172 (29,35%) y el complejo Río Inchiyaco con 169 (25,07%).

Las clases de humedales asociadas a ciénagas con vegetación media (NaPaCiVeMe) se presentan con menor distribución y representatividad en los complejos.

Por último, las ciénagas asociadas con escorrentías (superficiales y subsuperficiales con suelos saturados durante períodos específicos) y con presencia de palustre de escorrentía con presencia de vegetación baja (NaPaEsVeBa) se concentran mayormente en el Ríos Fragua - Congor y Tambor, con un total de 36 humedales (2,20%) y el complejo Río Caquetá, con 21 humedales (3,25%) asociados a esta clase.

En las Tabla 6 y 7 se presentan las áreas con su respectivo porcentaje y distribución de rangos por área en cada complejo. La extensión total de humedales abarca 28720,71 ha, predominando los complejos la distribución en los rangos de área de 0 a 1 ha y de 1 a 3 ha.

Tabla 6: *Área (ha) y porcentaje de clases de humedales en el área de estudio.*

Complejo / Clases de humedales	NaLa	NaLaLg	NaPaCiVeAl	NaPaCiVeBa	NaPaCiVeMe	NaPaEsVeBa	Área Clases de humedales (ha)
Ríos Fragua - Congor - Tambor	56,26 (0,37%)	281,69 (1,85%)	14420,06 (94,68%)	440,99 (2,90%)	0 (0%)	31,50 (0,21%)	15230,51 (100%)
Quebradas Tontoyaco - Qebradón - Trajayaco	28,31 (0,46%)	184,71 (2,99%)	5899,03 (95,65%)	53 (0,87%)	0 (0%)	1,79 (0,03%)	6167,41 (100%)
Río Caquetá	70,24 (3,02%)	173 (7,45%)	1643,30 (70,73%)	406,73 (17,51%)	0 (0%)	30,16 (1,30%)	2323,43 (100%)
Río Inchiyaco	8,93 (0,31%)	65,67 (2,30%)	2554,26 (89,37%)	223,29 (7,81%)	0 (0%)	5,83 (0,20%)	2857,98 (100%)
Ríos Nabueno - Guayuyaco	11,60 (0,54%)	32,68 (1,52%)	1412,74 (65,97%)	671,50 (31,36%)	6,95 (0,32%)	6 (0,28%)	2141,38 (100%)
Total Área (ha)	**175,34**	**737,75**	**25929,39**	**1795,51**	**6,95**	**75,28**	**28720,71**

La extensión más significativa de humedales pertenece a la clase de ciénagas con presencia de vegetación alta (NaPaCiVeAl), abarcando 25929,39 ha, siendo la más representativa en todos los complejos (Figura 8). Le sigue en extensión la clase de ciénagas con presencia de vegetación baja (NaPaCiVeBa), que comprende un total de 1795,51 ha.

Tabla 7: *Número de humedales de la zona plana del municipio de Piamonte por intervalo de área (ha) y complejo.*

Complejo de humedales / Intervalo área en hectáreas	0 - 1 (ha)	1 - 3 (ha)	3 - 5 (ha)	5 - 7 (ha)	7 - 10 (ha)	10 - 100 (ha)	10 - 200 (ha)	100 - 10500 (ha)
Ríos Fragua - Congor - Tambor	1035	411	68	34	23	64	-	3
Quebradas Tontoyaco - Qebradón - Trajayaco	261	95	20	11	12	29	-	1
Río Caquetá	356	179	38	21	18	-	35	-
Río Inchiyaco	393	168	42	20	22	27	-	2
Ríos Nabueno - Guayuyaco	329	145	41	23	11	35	-	2

Las clases de humedales Lacustre (NaLa y NaLaLg), relacionadas con cuerpos de agua de tipo lacustre, tienen un área total en los cinco complejos de 175,34 ha y 737,75 ha respectivamente. En particular, la clase NaLa destaca por su extensión en el complejo del Río Caquetá, con 70,24 ha (3,02%), mientras que la clase NaLaLg sobresale en el complejo de los Ríos Fragua - Congor y Tambor, abarcando 281,69 ha (1,85%).

Se destaca el alto porcentaje de humedales asociados a ciénagas con presencia de vegetación alta (NaPaCiVeAl) en todos los complejos (Figura 8). El complejo de los Ríos Nabueno - Guayuyaco se destaca por la mayor extensión de humedales asociados a la clase ciénagas con vegetación baja (NaPaCiVeBa), alcanzando 671,50 (31,36%), seguido por el complejo Ríos Fragua - Congor y Tambor destaca con 440,99 ha (2,90%) y el complejo Río Caquetá con 406,73 ha (17,51%). Asimismo, los humedales asociados a ciénagas con vegetación baja (NaPaCiVeBa) presentan una notable representatividad, especialmente en los complejos de los ríos Nabueno-Guayuyaco y Caquetá.

Con el modelo no supervisado, se validaron algunos humedales utilizando muestras de entrenamiento georreferenciadas en campo, ubicadas en las veredas Baja Primavera y Miraflor (Figuras 9 y 10). Estos humedales están asociados a la clase de Ciénagas con Vegetación Baja (NaPaCiVeBa) y fueron identificados y delimitados, tanto en el modelo no supervisado (sin etiquetas) como en el supervisado (con etiquetas).



Figura 9. *FClase de humedal palustre con presencia de vegetación baja (NaPaCiVeBa), identificado mediante modelo no supervisado K-Means, vereda Baja Primavera.*



Figura 10. *Clase de humedal palustre con presencia de vegetación baja (NaPaCiVeBa), identificado mediante método no supervisado K-Means, vereda Miraflor*

Conclusiones

La distribución de humedales se concentra en la zona plana del municipio de Piamonte, perteneciente al piedemonte amazónico, lugar estratégico para la acumulación de agua y de humedad, debido a las condiciones geomorfológicas del terreno. Las áreas de inundación del río Caquetá juegan un papel importante en la existencia de humedales palustres temporales con vegetación baja, densa y lacustres, como cuerpos de agua superficiales.

Con los datos obtenidos y procesados, se logró la delimitación de cinco complejos de humedales: Complejo Río Caquetá, Complejo Ríos Nabueno - Guayuyaco, Complejo Río Inchiyaco, Complejo Quebradas Tontoyaco - Quebradón - Trajayaco y Complejo Ríos Fragua - Congor – Tambor.

La extensión más significativa de humedales pertenece a la clase asociada a ciénagas con vegetación alta (NaPaCiVeAl), abarcando 25929,39 ha, siendo la más representativa en todos los complejos. Le sigue en extensión la clase asociada a ciénagas con vegetación baja (NaPaCiVeBa), que comprende un total de 1795,51 ha.

La georreferenciación y zonificación ambiental de los humedales se potencia cuando se trata de áreas geográficas extensas, a partir del uso de herramientas tecnológicas que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los métodos de Machine Learning (ML) tanto supervisados como no supervisados y computación en la nube para el procesamiento masivo de imágenes de satélite.

La detección de humedales mediante métodos supervisados y no supervisados con percepción remota basada en la identificación de patrones a partir de datos etiquetados, con muestras de entrenamiento (clases de humedales),

requiere de una amplia cantidad de muestras recolectadas en campo, con el fin de asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos.

La combinación de tecnologías como Machine Learning (K-Means y Random Forest), el uso de imágenes satelitales (Sentinel-1B y Sentinel-2A) y su interacción con variables del terreno DEM, permitió una identificación precisa y detallada de los humedales en el municipio de Piamonte. Esta información es clave para la toma de decisiones por parte de actores estratégicos como la autoridad ambiental CRC, pues orienta de manera adecuada la gestión y conservación de estos ecosistemas vulnerables. Además, permite identificar áreas de interés ambiental y definir zonas prioritarias para la conservación, promoviendo la protección de los humedales, el uso sostenible de los recursos naturales, y el cumplimiento de los objetivos ambientales a corto, mediano y largo plazo.

Los humedales identificados en el piedemonte amazónico son fundamentales para la regulación del flujo hídrico, conservación de biodiversidad y mitigación de inundaciones. Estos ecosistemas desempeñan un rol esencial en la adaptación al cambio climático y en la provisión de servicios ecosistémicos claves para las comunidades locales.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC) y al municipio de Piamonte por su valioso apoyo en la provisión de datos ambientales y territoriales clave para el desarrollo de esta investigación.

Referencias

Alcaldía Municipal de Piamonte Cauca. 2018. *EOT* Piamonte. http://www.piamonte-cauca.gov.co/planes/eot-piamonte

Amani, M., Salehi, B., Mahdavi, S., Granger, J. E., Brisco, B., & Hanson, A. 2017. Wetland Classification Using Multi-Source and Multi-Temporal Optical Remote Sensing Data in Newfoundland and Labrador, Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 43(4), 360–373. https://doi.org/10.1080/07038992.2017.1346468

Banks, S., White, L., Behnamian, A., Chen, Z., Montpetit, B., Brisco, B., Pasher, J., y Duffe, J. 2019. Wetland Classification with Multi-Angle/Temporal SAR Using Random Forests. *Remote Sensing*, 11(6), 670. https://doi.org/10.3390/rs11060670

Breiman, L. 2001. Random forests. Machine learning, 45:5–32.

- IDEAM. (s. f.). Sistema de Información Ambiental de Colombia SIAC. http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas

Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., and Böhner, J. 2015. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, Geosci. Model Dev., 8, 1991-2007. https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015

CRC-WWF. 2003. Informe técnico final: Caracterización ambiental preliminar de los humedales de la cuenca río cauca en el departamento del cauca. Informe Técnico, page 113.

CRC-WWF. 2006. Caracterización ambiental preliminar de los humedales de la meseta de Popayán y Puracé en el departamento del cauca. Informe Técnico, page 187.

CRC. 2008. Caracterización del complejo de humedales de la meseta de Popayán, como insumo para la formulación del plan de manejo. Informe Técnico.

CRC. 2013. Plan de gestión ambiental regional. PGAR. Corporación Autónoma Regional del Cauca – CRC. Informe Técnico.

CRC. 2014. Plan de manejo de humedales del municipio de San Sebastián. Informe Técnico.

CRC. 2017. Plan de manejo reserva forestal protectora regional verdeyaco “el oxígeno”.
municipio de Santa Rosa. Informe Técnico.

CRC. 2019. Plan de manejo reserva forestal protectora regional Serranía la Vieja. municipio de Santa Rosa. Informe Técnico.

Cortés-Duque, J. y Estupiñán-Suarez, L. M. 2016. Las huellas del agua. Propuesta metodológica para identificar y comprender el límite de los humedales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Fondo Adaptación, Bogotá D. C., Colombia.

Ecosystem, C. D. S. 2024. *Copernicus Data Space Ecosystem - Europe's eyes on Earth*. Copernicus Data Space Ecosystem. https://dataspace.copernicus.eu/

Fifing, H. S. N. and Hermawan, A. 2019. Monitoring water surface changes of wetlands using fuzzy k-means algorithm with sentinel-1 sar data. PROCEEDING BOOK VOL. 2, page 331.

Gounaridis, D., Chorianopoulos, I., Symeonakis, E. y Koukoulas, S. 2019. A random forest-cellular automata modelling approach to explore future land use/cover change in attica (greece), under different socio-economic realities and scales. *Science of The Total Environment*, 646:320–335. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.302

Gulácsi, A. y Kovács, F. 2020. Sentinel-1-imagery-based high-resolution water cover detection on wetlands, aided by google earth engine. *Remote Sensing*, 12(10):1614. https://doi.org/10.3390/rs12101614

Huijuan M.A., Xiaohong G.A.O. y Xiaotian, G.U. G. 2019. Random forest classification of landsat 8 imagery for the complex terrain area based on the combination of spectral, topographic and texture information. *Journal of Geo-information Science*, 21(3):359–371. https://doi.org/10.12082/dpxxkx.2019.180346

IGAC. s. f. Colombia en Mapas. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. https://www.colombiaenmapas.gov.co/
INGEOMINAS. 2000. Geología de la Plancha 412– Río La Fragua, escala 1:100.000.

INGEOMINAS. 2000. Geología de la Plancha 430– Mocoa, escala 1:100.000.

INGEOMINAS. 2000. Geología de la Plancha 431– Puerto Nuevo, escala 1:100.000.

IDEAM, 2010. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p. https://www.purace-cauca.gov.co/MiMunicipio/DocumentosGestinRiesgoYDesastres/Estudios%20gesti%C3%B3n%20del%20riesgo%20Purac%C3%A9/Leyenda%20nacional%20coberturas%20tierra.pdf

Johnson, W. C., Werner, B., Guntenspergen, G. R., Voldseth, R. A., Millett, B., Naugle, D. E., Tulbure, M., Carroll, R. W. H., Tracy, J., and Olawsky, C. (2010). Prairie Wetland Complexes as Landscape Functional Units in a Changing Climate. BioScience, 60(2):128–140.

LaRocque, A., Phiri, C., Leblon, B., Pirotti, F., Connor, K., & Hanson, A. (2020). Wetland Mapping with Landsat 8 OLI, Sentinel-1, ALOS-1 PALSAR, and LiDAR Data in Southern New Brunswick, Canada. *Remote Sensing*, 12(13), 2095. https://doi.org/10.3390/rs12132095

Landuyt, L., Verhoest, N. E., y Van Coillie, F. M. 2020. Flood mapping in vegetated
areas using an unsupervised clustering approach on sentinel-1 and-2 imagery. *Remote Sensing*, 12(21):3611. https://doi.org/10.3390/rs12213611

Lawrence, R. L., & Moran, C. J. (2015). The AmericaView classification methods accuracy comparison project: A rigorous approach for model selection. *Remote Sensing Of Environment*, 170, 115-120. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.008

Ley 388 de 1997. Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989, y la Ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones. 18 de julio de 1997. D.O. No. 43.091.

L'Heureux, A., Grolinger, K., Elyamany, H. F. y Capretz, M. A. M. 2017. Machine learning with big data: Challenges and approaches. *IEEE Access*, 5:7776–7797. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2696365

Martinis, S., Kuenzer, C., Wendleder, A., Huth, J., Twele, A., Roth, A., and Dech, S. (2015). Comparing four operational sar-based water and flood detection approaches. International Journal of Remote Sensing, 36(13):3519–3543.

Montgomery, J., Mahoney, C., Brisco, B., Boychuk, L., Cobbaert, D. y Hopkinson, C.2021. Remote sensing of wetlands in the prairie pothole region of North America. *Remote Sensing*, 13(19):3878. https://doi.org/10.3390/rs13193878

Peng, K., Jiang, W., Deng, Y., Liu, Y., Wu, Z. y Chen, Z. 2020. Simulating wetland changes under different scenarios based on integrating the random forest and clue-s models: A case study of wuhan urban agglomeration. *Ecological Indicators*, 117:106671. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106671

Piamonte en el departamento de Cauca - Municipio y alcaldía de Colombia. (s. f.). https://www.municipio.com.co/municipio-piamonte.html#

R: *The R Project for Statistical Computing*. s. f. http://www.r-project.org/

Salinas, J. B. G., Eggerth, M. K. P., Miller, M. E., Meza, R. R. B., Chacaltana, J. T. A.,Acuña, J. R. y Barroso, G. F. 2020, 1 marzo. Wetland mapping with multitemporal sentinel radar remote sensing in the southeast region of Brazil. En *2020 IEEE Latin American GRSS ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)*. https://doi.org/10.1109/lagirs48042.2020.9165593

Secretaría Distrital de Ambiente Bogotá. s. f.. *Humedales de Bogotá*. Secretaría Distrital de Ambiente. https://www.ambientebogota.gov.co/humedales

SGC y UNAL. 2014. Mapa Geomorfológico plancha 412 – Río La Fragua, aplicado a la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa, escala 1:100.000

SGC y UNAL. 2014. Mapa Geomorfológico plancha 430 - Mocoa, aplicado a la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa, escala 1:100.000

SGC y UIS. 2015. Mapa Geomorfológico plancha 431 – Puerto Nuevo, aplicado a la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa, escala 1:100.000

SINCHI. 2012. Zonificación ambiental y ordenamiento de la reserva forestal de la amazonia. 38–127.

Yilmaz, O. S. 2023. Automatic detection of water surfaces using k-means++ clustering

algorithm with landsat-9 and sentinel-2 images on the google earth engine platform. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 7(2):105111. https://doi.org/10.30516/bilgesci.1262550

Zevenbergen, L. W., Thorne C. R. 1987. Quantitative analysis of land surface topography. Earth Surface Processes and Landforms. 12: 12-56.

Zhang, J., Liu, X., Qin, Y., Fan, Y. y Cheng, S. 2024. Wetlands Mapping and Monitoring with Long-Term Time Series Satellite Data Based on Google Earth Engine, Random Forest, and Feature Optimization: A Case Study in Gansu Province, China. Land, 13(9), 1527. https://doi.org/10.3390/land13091527