

Análisis de la vegetación a partir de índices espectrales y su relevancia en la identificación de espejos de agua en el humedal Torca Guaymaral, Bogotá, Colombia

Vegetation analysis from spectral indices and its relevance in the identification of water mirrors in the Torca Guaymaral wetland, Bogotá, Colombia.

Cindy Lorena Sabogal Vélez¹ - Leyder Mauricio Pedroza Toro² - Gina Paola González Angarita³

¹0009-0006-5128-5925. Universidad Libre, Bogotá, Colombia, cindyl-sabogalv@unilibre.edu.co

²0009-0003-5165-4928. Universidad Libre, Bogotá, Colombia, leyderm-pedrozat@unilibre.edu.co

³0000-0002-9436-5371. Universidad Libre, Bogotá, Colombia, ginap.gonzaleza@unilibre.edu.co

Fecha de recepción: 15/09/2023

Fecha de aceptación del artículo: 07/12/2023



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.10708>

Cómo citar: Sabogal Vélez, C. L., Pedroza Toro, L. M., & González Angarita, G. P. Análisis de la vegetación a partir de índices espectrales y su relevancia en la identificación de espejos de agua en el humedal Torca Guaymaral, Bogotá, Colombia. Avances investigación en ingeniería, 20(2). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.10708>

Resumen

En Colombia son varios los humedales han experimentado cambios significativos en el espejo de agua, ya sea por procesos naturales o antrópicos; la mayoría de estos presentan eutrofización, hecho que se comprueba por la proliferación descontrolada de algas, herbáceas y juncáceas, que los hacen vulnerables a fenómenos como el calentamiento global. Este estudio se centra en el humedal Torca – Guaymaral ubicado en el extremo norte de Bogotá, Colombia, el cual, actualmente se ve afectado por la rápida propagación de vegetación hidromórfica. Este ecosistema acuático es hábitat para innumerables especies, al mismo tiempo que brinda múltiples beneficios a la sociedad como humedal urbano. El análisis del área de estudio se realizó con base en la vegetación y la humedad en comparación con los datos arrojados por los índices NDVI y NDWI en los años 2014 y 2023 en los meses de enero y febrero respectivamente. Los mapas del humedal se realizan con el software ArcGIS para procesar imágenes satelitales Landsat 8-9, con un rango de nubosidad inferior al 60 % y descargadas de la plataforma USGS EarthExplorer. Los resultados indican la disminución de zonas húmedas en el Torca-Guaymaral en un 7.3 %, mientras que la escasez de vegetación aumentó un 12 %, se observó que la vegetación densa disminuyó en un 3 % y la vegetación moderada en un 9.24 %.

Palabras clave: Comparación, espejo de agua, eutrofización, humedal, índices, NDVI, NDWI, vegetación.

Abstract

In Colombia, several wetlands have experienced significant changes in the water mirror, either by natural or anthropogenic processes; most of these wetlands show eutrophication, a fact that is evidenced by the uncontrolled proliferation of algae, herbaceous and sedges, making them vulnerable to phenomena such as global warming. This study focuses on the Torca - Guaymaral wetland located in the extreme north of the city of Bogotá (Colombia), which is currently affected by the rapid spread of hydromorphic

vegetation. This aquatic ecosystem is habitat for countless species, while at the same time providing multiple benefits to society as an urban wetland. The analysis of the study area was performed based on vegetation and humidity in comparison with the data yielded by the NDVI and NDWI indices in the years 2014 and 2023 in the months of January and February, respectively. The wetland maps are made using ArcGIS software to process Landsat 8-9 satellite images, with a cloud cover range below 60 % and downloaded from the USGS EarthExplorer platform. The results indicate the decrease of wetlands in the Torca-Guaymaral by 7.3 %, while the scarcity of vegetation increased by 12 %, it was observed that dense vegetation decreased by 3 % and moderate vegetation by 9.24 %.

Keywords: Comparison, water mirror, eutrophication, wetland, indices, NDVI, NDWI.

1. Introducción

En 1971 inicia la protección de humedales a partir de la Convención Ramsar, en esta se reconoce a los humedales como hábitats estratégicos para aves acuáticas entre otras especies. Según esta convención, los humedales se definen como ecosistemas estratégicos, reconocidos en marismas, pantanos y turberas en presencia de agua y vegetación macrófita [1].

La gran importancia de los humedales radica en la provisión de servicios ecosistémicos, como la capacidad para almacenar agua e influir en la calidad de ella y del suelo, así como también en la recarga de aguas subterráneas, su función como zona de recreación pasiva, y la mitigación del cambio climático [2], [3], además de ser parte fundamental de la tierra, toda vez que juega un papel fundamental en el mantenimiento del ecosistema acuático [4], [5]. En Colombia, el 26 % del territorio corresponde a humedales, y la gran mayoría de ellos han sido transformados considerablemente [6]; uno de estos es el humedal Torca - Guaymaral [7]–[9], ubicado en el extremo norte de la ciudad capital. A pesar de ser catalogado como Parque Ecológico Distrital y Reserva Natural Forestal, presenta varias problemáticas como la construcción de predios sobre la zona de influencia del humedal [10], la fragmentación del ecosistema, altos niveles de sólidos sedimentables, turbidez y macrófitas; estas circunstancias impiden el paso de luz a través del agua, lo que da lugar a

la colmatación del fondo y a la reducción del espejo de agua, lo cual hace peligrar este hábitat para más de 45 especies que dependen de este humedal para sobrevivir [11]. Estos escenarios no son exclusivos de Colombia, pues en América Latina esta situación es frecuente [12].

En el ámbito nacional, la conservación de los humedales toma relevancia a partir de la creación del Programa de Humedales de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza en 1992 [11], junto con la posterior creación del Sistema Nacional Ambiental SINA en 1993 y el Ministerio de Medio Ambiente [13], a los que se sumaron varias instituciones con el pasar de los años, las cuales buscan frenar de manera sistemática las afectaciones ambientales por el cambio climático y la sociedad. En la actualidad la academia realiza estudios de humedales como es el caso de la investigación “Técnicas de análisis geomático en la pérdida de humedales urbanos de Bogotá. ¿Qué rol juegan los asentamientos ilegales?”, la investigación aborda las problemáticas de las inundaciones de los humedales urbanos de Bogotá e identifica el humedal Torca - Guaymaral como la segunda zona con mayores inundaciones en la ciudad de Bogotá. Además, su afectación inicia desde la fragmentación vial de la autopista norte y las múltiples descargas de aguas residuales de la zona norte [14].

Estos entornos estratégicos han sido afectados considerablemente por las acciones

antropogénicas como las descargas de aguas residuales, escorrentía y el desarrollo de actividades productivas; todo esto ocasiona en el agua del humedal un exceso de nutrientes (fósforo y nitrógeno) [15], [16]. Por otra parte, el cambio climático causa el ascenso de la temperatura ambiente, hecho que incrementa la actividad biológica y por lo tanto acelera los procesos de eutrofización y, por lo tanto, cambios en las propiedades organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas del agua, de manera que se altera el ecosistema natural para la fauna, la flora y las poblaciones humanas del territorio, lo que causa la disminución de su área y, en el peor de los casos, su desaparición [17]–[20].

Esta reducción y degradación de los humedales es una amenaza para la preservación de la biodiversidad [21], [22]; razón por la cual el uso de la cartografía y los sistemas de información geográfica toman relevancia en estas situaciones pues a partir de estas herramientas se puede mejorar la planeación, gestión y conservación de los humedales [23], [24]. El monitoreo y evaluación de las zonas húmedas del humedal, además del estado de la vegetación, puede ser de gran provecho en la toma de decisiones o la elaboración de políticas ambientales para la conservación de humedales [25].

En India, en el distrito Dhemaji, de Assam, se analiza el cambio de paisaje del humedal Bordoibam Beelmukh; los índices utilizados en este estudio son implementados en el monitoreo de superficies acuáticas, como lo son el Índice de agua de diferencia normalizada NDWI y la determinación de cobertura vegetal mediante el Índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI. También con el uso de imágenes satelitales, en especial las Sentinel o Landsat, las cuales dieron inicio a una nueva era de monitoreo terrestre [26], [27].

El NDVI se fundamenta en la buena absorción de la vegetación saludable del espectro electromagnético visible. Una superficie

vegetal de color verde refleja con mayor intensidad el infrarrojo cercano NIR, mientras que la clorofila absorbe altamente el espectro azul y rojo; estas características de la planta hacen que el ojo humano perciba de color verde la vegetación saludable [28], [29]. Por su parte, el NDWI utiliza la banda NIR y el infrarrojo de onda corta SWIR, a partir de la reflectancia alta del espectro visible azul que tienen las masas de agua, lo que hace que se perciba del mismo color [14], [28].

Por tanto, la presente investigación tiene como objetivo el análisis del espejo de agua del humedal Torca - Guaymaral, a través de los índices espectrales NDVI y NDWI con el fin de identificar la tendencia multitemporal de la zona húmeda del humedal en los años 2014 y 2023. Dichos índices son esenciales en la elaboración de mapeos, que entregan información para la elaboración de políticas públicas determinantes en la gestión de humedales urbanos.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El humedal Torca - Guaymaral, se encuentra ubicado al norte de la ciudad de Bogotá entre las localidades de Suba y Usaquén. Este humedal presenta un área total de 79.93 Ha, y se encuentra fragmentado en dos secciones por causa de la construcción de la autopista norte en 1952. Incluido en la lista Ramsar desde 2018, identificado como Parque Ecológico Distrital de Humedal PEDH y, parte del Plan de Ordenamiento Territorial como estructura Ecológica Principal de la ciudad EEP desde el año 2000 [30], es uno de los sistemas ecológicos con mayor importancia en el plano nacional, porque es el hogar permanente de 12 especies de mamíferos, tres especies endémicas como lo son la tingua bogotana, el cucarachero de pantano y el chamicero. Además, este humedal representa el hábitat para 196 especies de aves, entre ellas 65 migratorias.

El humedal pertenece a la subcuenca del Río Bogotá (microcuenca Torca), de la cual recibe agua desde la Quebrada Salitrosa y de aguas lluvias. En la Figura 1 se muestra la ubicación del humedal.

Uno de los principales problemas que afectan a este cuerpo de agua lento, es la abundante presencia de vegetación macrofitas que cubre la superficie acuática; en otras palabras, la disminución del espejo de agua en algunas zonas, problemática intensificada por la disminución de los aportes de agua al humedal, que a su vez afectan la calidad de esta debido a los lixiviados provenientes de los predios aledaños.

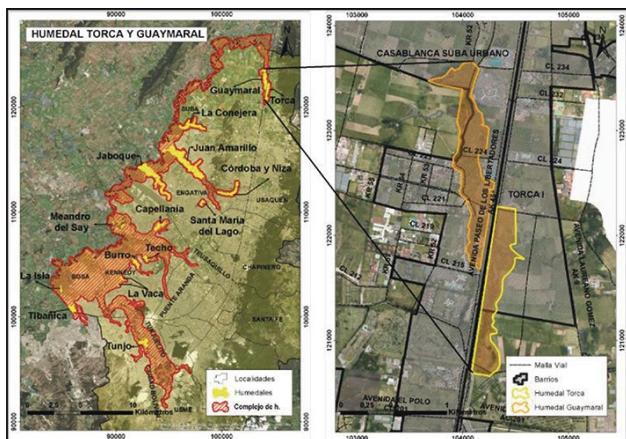


Figura 1. Ubicación del Humedal Torca Guaymaral. [31]

2.2. Identificación condiciones ambientales

Como parte del trabajo de campo, a finales del año 2022 fue realizada una visita al humedal, a fin de realizar el reconocimiento ambiental de la zona de estudio. En el proceso se utilizó la herramienta de posicionamiento espacial GPS y una cámara fotográfica; en la visita fueron identificados algunos puntos de referencia para el análisis de datos, cuyos resultados se observan en la Figura 5.

Finalmente, se procesan en ArcGIS con ayuda de la herramienta data management tools- photos- Geotagged photos to points de la ventana arctoolbox.

2.3. Análisis del espejo de agua

La identificación del espejo de agua del humedal se realizó por medio del procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8-9, equipadas con 11 bandas espectrales descargadas de la página United States Geological Survey (USGS), descritas en la Tabla 1. Se dispuso como criterio de búsqueda una cobertura de nubosidad inferior al 60 %, con el fin de descartar errores de interpretación por la nubosidad en la zona.

Tabla 1. Características de imágenes Landsat utilizadas

| Satélite | Sensor | Path-Row | Fecha |
|--------------|----------|----------|------------|
| Período 2014 | | | |
| Landsat 8 | OLI/TIRS | 008-057 | 01-01-2014 |
| Período 2023 | | | |
| Landsat 9 | OLI/TIRS | 008-057 | 03-02-2023 |

El cálculo de los índices espectrales NDVI y NDWI para los años 2014 y 2023, a partir del procesamiento de las bandas 3, 4 y 5 en ArcGIS, con la ayuda de la herramienta calculadora ráster de la ventana Arctoolbox bajo los parámetros de las ecuaciones (1) y (2).

$$NDVI = (Banda 5 - banda 4) / (banda 5 + banda 4) \quad (1)$$

$$NDWI = (banda 3 - banda 5) / (banda 3 + banda 5) \quad (2)$$

Una vez calculados los índices se hace una extracción por máscara, usando el shapefile de la delimitación del humedal descargada de la página del Sistema de Información Ambiental de Colombia SIAC; el proceso descrito da como resultado los índices espectrales para el humedal en los años escogidos, información que posteriormente es digitalizada para su análisis.

La Figura 2 presenta de forma gráfica la metodología empleada para la identificación de espejos de agua en el humedal.



Figura 2. Metodología obtención de índices NDVI y NDWI

2.4. Análisis de datos

A partir del índice NDVI se puede generar una imagen que permite observar la biomasa y sus condiciones [32]; este utiliza la diferencia entre las bandas visibles (VIS) e infrarroja cercana (NIR) del espectro electromagnético, para analizar imágenes de detección remota y evaluar si el objetivo contiene vegetación [33].

Este índice genera valores entre -1 y 1 que representan la intensidad del color verde, cualquier valor menor a 0,1 o negativo corresponde principalmente a rocas, terreno desnudo, nubes, agua y nieve. La vegetación como arbustos, pastizales y algunos cultivos suelen generar valores de 0,2 a 0,5, mientras que los valores altos de NDVI (0,6-0,9) indican la presencia de una vegetación densa como suelen ser los bosques o cultivos en su etapa máxima de crecimiento [34]. En la tabla 2 se presenta el rango de valores para el índice NDVI y su interpretación.

Tabla 2. Rango de valores para análisis del índice NDVI

| Rango | NDVI |
|-----------|-----------------------------|
| 0,6 – 1 | Vegetación densa |
| 0,3 – 0,6 | Vegetación moderada |
| 0,1 – 0,3 | Vegetación escasa |
| -1 – 0,1 | Terreno desnudo, roca, agua |

Igualmente, el NDWI varía de -1 a +1 y se utiliza para identificar las masas de agua en una imagen satelital [35]. Los valores de

NDWI corresponden a los rangos mostrados en la tabla 3.

Tabla 3. Rango de valores para análisis del índice NDWI

| Rango | NDWI |
|------------|---|
| 0,2 – 1 | Superficie de agua |
| 0,0 – 0,2 | Humedad |
| -0,3 – 0,0 | Sequía moderada, superficies sin agua, vegetación terrestre |
| -1 – -0,3 | Sequía, superficies sin agua |

Igualmente, el NDWI varía de -1 a +1 y se utiliza para identificar las masas de agua en una imagen satelital [35]. Los valores de NDWI corresponden a los rangos mostrados en la tabla 3.

3. Resultados y Discusión

3.1. Identificación de condiciones ambientales

La verificación de condiciones ambientales del humedal Torca - Guaymaral, hecha por medio de visita de campo, permitió identificar las zonas con un espejo de agua abierto y aquellas que permanecen cubiertas de vegetación macrófita; además, se identificaron zonas con impactos ambientales negativos que provocan el deterioro del ecosistema. En el trabajo de campo se identifica la remoción de macrófitas en áreas afectadas, actividad realizada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB, que dejó al descubierto zonas húmedas con aguas turbias, como se muestra en la Figura 3. Los encargados de la limpieza manifestaron llevar 4 meses de labores que concluían ese día.



Figura 3. Proceso de limpieza en el humedal

En general, la zona de estudio se caracteriza por alta presencia de macrófitas o herbazales densos (identificados en la Tabla 4) que obstruyen la visibilidad del espejo de agua, a excepción de los lugares en que se hace mantenimiento. Los cuerpos de agua lóticos como el río Guaymaral no presentan procesos de eutrofización (Figura 5) pero sí existen puntos con conexiones erradas provenientes de los predios aledaños. La eutrofización se encuentra en algunos cuerpos de agua tipo lóticos, especialmente al oeste del humedal donde existen predios dedicados a la agricultura y la ganadería como se muestra en la figura 4.



Figura 4. Eutrofización en el humedal

En el humedal no predominan los olores fuertes producto de procesos de descomposición de materia orgánica.

Tabla 4. Vegetación identificada en la zona húmeda del humedal

| Tipo | Nombre común |
|------------------------------------|---------------------|
| Herbazales inundables y macrófitas | Sombrilla de agua |
| | Chilco de pantano |
| | Corocito |
| | Cortadera |
| | Junco |
| | Clavito de agua |
| | Barbasco |
| | Lengua de vaca |
| | Buchón |
| | Helecho de agua |
| | Enea |
| | Flor de pantano |
| | Cortadera |
| | Alpiste |

La mayor parte del espejo de agua del humedal se encuentra colonizada por el buchón de agua o *Eichhornia crassipes*; esta especie prolifera bastante rápido e impide el crecimiento de otras plantas, además al cubrir el espejo de agua afecta la concentración de oxígeno disuelto en el agua y las especies animales que viven en este ecosistema [36], razón por la cual se realiza limpieza continuamente a humedal.



Figura 5. Resultados fotográficos de la visita de campo al humedal Torca Guaymaral

3.2. Identificación del espejo de agua mediante NDVI y NDWI

Los resultados de aplicar los índices NDVI y NDWI por medio de imágenes Landsat 8 y 9 para los años 2014 y 2023 se muestran en la Tabla 5 y Tabla 6.

El NDVI para los períodos de 2014 y 2023 no arroja valores negativos, los valores mínimos son de 0.1, lo cual indica que no hay presencia de agua visible en el humedal en la serie temporal, esto debido a la presencia de herbazales inundables y macrófitas identificadas en la visita de campo; esta lectura en época de abundancia vegetal dificulta la interpretación de las zonas acuáticas por el índice utilizado [37].

Tampoco se identifican las zonas de limpieza realizadas en el 2022 en las imágenes resultantes del 2023.

Tabla 5. Resultados del índice NDVI

| NDVI | | | | |
|---------|-----------------|---------|-----------|------------|
| Período | Área total (Ha) | Rango | Área (Ha) | Porcentaje |
| 2014 | 79.895 | 0.6-1.0 | 60.689 | 75.961 |
| | | 0.3-0.6 | 2.250 | 3.155 |
| | | 0.1-0.3 | 16.688 | 20.888 |
| 2023 | 79.887 | 0.6-1.0 | 53.296 | 66.715 |
| | | 0.3-0.6 | 0.090 | 0.113 |
| | | 0.1-0.3 | 26.497 | 33.169 |

Los resultados se caracterizan por la predominancia de una vegetación densa y saludable con 60.689 (Ha) en 2014, resultado justificado por la presencia de arbustos en el humedal además de las condiciones normales de las herbáceas, las cuales suelen ser densas.

En este año se presentó el mejor comportamiento, puesto que para el 2023 la vegetación saludable tuvo una disminución del 9.25 %, al igual que la vegetación moderada en un 3.042 %, mientras el tipo de vegetación escasa aumentó en un 12.28 %. La representación se muestra en la Figura 6.

Por su parte, el cuerpo de agua detectado en la zona de estudio a través del índice NDWI para el mismo período de tiempo, varía en un rango de -0.3 a 1.0; muchos de los valores altos en el resultado corresponden al contenido de agua en la vegetación predominante, y este índice es sensible a dichas características de la vegetación [38]–[41]. Los valores negativos representan zonas terrestres con poca humedad.

Tabla 6. Resultados del índice NDWI

| NDWI | | | | |
|---------|-----------------|----------|-----------|------------|
| Período | Área total (Ha) | Rango | Área (Ha) | Porcentaje |
| 2014 | 80.053 | 0.2-1.0 | 57.449 | 71.764 |
| | | -0.3-0.0 | 22.600 | 28.232 |
| 2023 | 82.859 | 0.2-1.0 | 51.595 | 64.452 |
| | | -0.3-0.0 | 28.459 | 35.551 |

Se puede observar que los rangos altos del NDWI 0.2-1.0, tienen mayor porcentaje de área en el 2014 que en 2023, lo que representa una disminución del área húmeda en un 7.312 %, tendencia contraria para las superficies terrestres que presentan un aumento del 7.319 %. La Figura 7 presenta los resultados del NDWI.

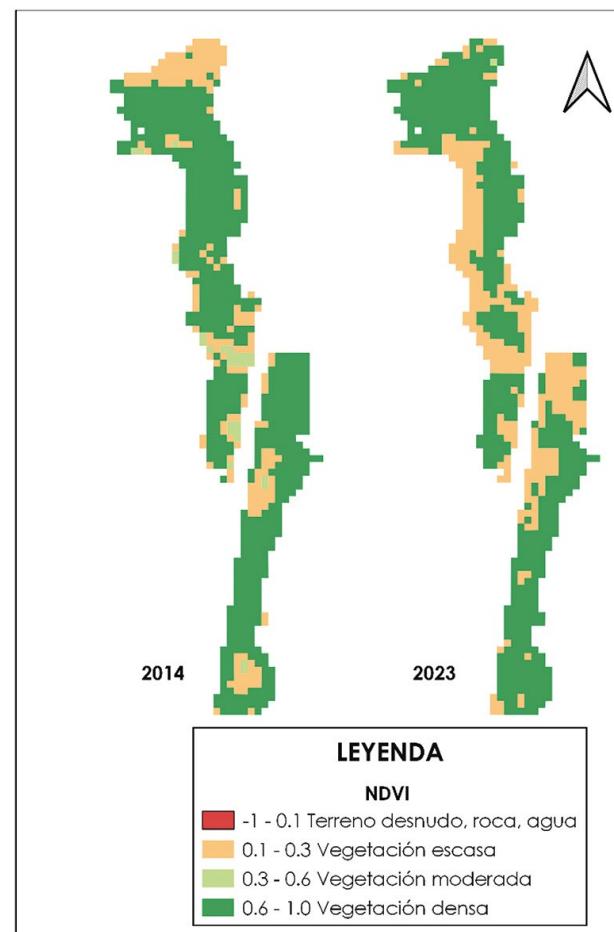
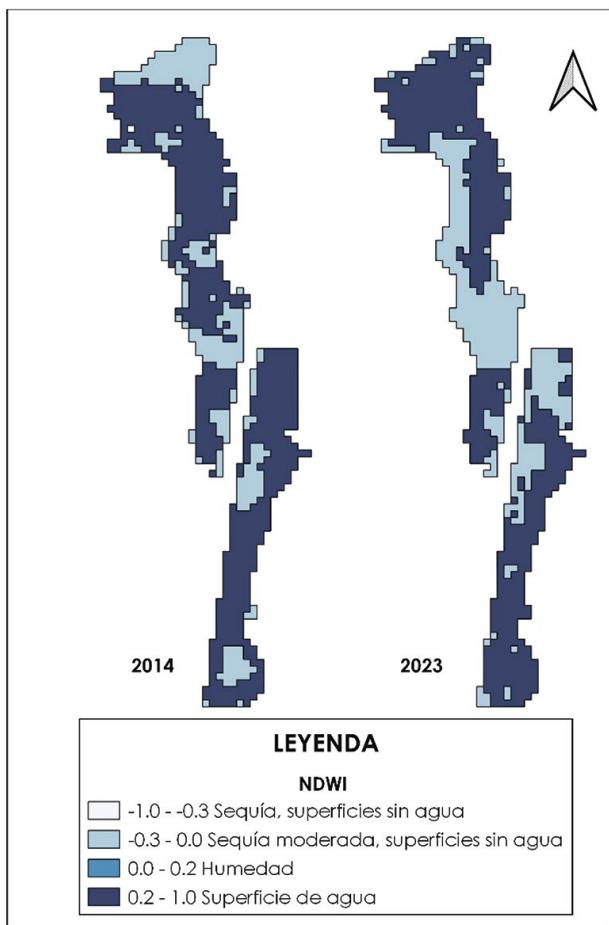
Figura 6. Índice NDVI para los años 2014 y 2023 en el humedal Torca - Guaymaral

Figura 7. Índice NDWI para los años 2014 y 2023 en el humedal Torca - Guaymaral



4. Conclusiones

El humedal Torca - Guaymaral con el paso del tiempo se ve afectado por la invasión de áreas aledañas, por lo cual recibe la descarga de aguas residuales y por lo tanto afectaciones en la calidad del agua que afecta los procesos naturales de las especies presentes en este humedal y, por lo tanto, intensifica la eutrofización del cuerpo de agua superficial.

Los índices NDVI y NDWI son herramientas necesarias para el estudio de humedales;

estos se calcularon mediante la utilización de imágenes satelitales Landsat 8 y 9 para los años 2014 y 2023. Para el procesamiento se utilizó el software ArcGIS, y se observó como resultado la disminución del espejo de agua del humedal en 7.3 %.

En el análisis multitemporal se observa que para el año 2014 hay un mejor comportamiento ecosistémico en el humedal, pues los índices demuestran que tanto la vegetación como las zonas húmedas presentan mejores resultados, vegetación más densa, saludable, diversa y zonas húmedas con mayor área, resultado adjudicado a mayores zonas con eutrofización para el período 2023, en el cual la escasez de vegetación aumentó un 12 %, mientras que la vegetación densa disminuyó un 3%. Igualmente, es notoria la presencia abundante de vegetación macrófita en el humedal, razón por la cual el índice NDVI no arroja valores negativos, indicadores de presencia de áreas húmedas, mientras que el índice NDWI al ser sensible al porcentaje de humedad en la planta puede leer estas zonas.

Se observa con claridad el aumento de las zonas sin humedad en el sitio de estudio, resultado que se puede correlacionar con el aumento de predios aledaños que pueden ocasionar impactos directos en el espejo de agua, con actividades como, por ejemplo, la agricultura y la ganadería.

Todos los resultados obtenidos mediante la utilización de herramientas SIG ratifican que este tipo de elementos son metodologías con gran desempeño, idóneas para la estructuración de políticas socioambientales que promuevan la conservación del ambiente.

Referencias bibliográficas

- [1] Ramsar, «Historia de la Convención sobre los Humedales | Ramsar», 2021. <https://www.ramsar.org/es/acerca-de/historia-de-la-convencion-sobre-los-humedales> (accedido 24 de julio de 2021).
- [2] D. Castro y N. del Pilar, «Identificación de servicios ecosistémicos para la toma de decisiones en la planeación del territorio Humedal Guaymaral - Torca», mayo 2016, Accedido: 19 de julio de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://repository.unimil-itar.edu.co/handle/10654/15304>
- [3] C. Rojas, J. Munizaga, O. Rojas, C. Martínez, y J. Pino, «Urban development versus wetland loss in a coastal Latin American city: Lessons for sustainable land use planning», *Land Use Policy*, vol. 80, pp. 47-56, ene. 2019, doi: 10.1016/j.landusepol.2018.09.036.
- [4] M. M. Palta, N. B. Grimm, y P. M. Groffman, «"Accidental" urban wetlands: ecosystem functions in unexpected places», *Front. Ecol. Environ.*, vol. 15, n.o 5, pp. 248-256, 2017, doi: 10.1002/fee.1494.
- [5] A. Das y T. Basu, «Assessment of peri-urban wetland ecological degradation through importance-performance analysis (IPA): A study on Chatra Wetland, India», *Ecol. Indic.*, vol. 114, p. 106274, jul. 2020, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106274.
- [6] O. Velandia, «Humedales: un tesoro anfibio que sobrevive en el 26 por ciento de Colombia», 2 de febrero de 2021. <http://www.humboldt.org.co/es/boletines-y-comunicados/item/1593-humedales-un-tesoro-anfibio-que-sobrevive-en-el-26-por-ciento-de-colombia> (accedido 28 de agosto de 2023).
- [7] C. Ortiz - López, «Impacto sobre el control de inundaciones, de la adecuación hidrogeomorfológica en humedales de Bogotá, integrando escenarios de cambio climático.», 2016.
- [8] M. P. V. Rojas y A. F. Casas, «Vulnerabilidad de humedales altoandinos ante procesos de cambio: tendencias del análisis», *Rev. Ing.*, vol. 14, n.o 26, Art. n.o 26, 2015, doi: 10.22395/rium.v14n26a2.
- [9] L. F. Vidal, J. Delgado, y G. I. Andrade, «Factores de la vulnerabilidad de los humedales altoandinos de Colombia al cambio climático global», *Cuad. Geogr. Rev. Colomb. Geogr.*, vol. 22, n.o 2, Art. n.o 2, jul. 2013, doi: 10.15446/rcdg.v22n2.37018.
- [10] J. L. Rivera Aguirre y J. A. Granados Rodríguez, «Estrategias de prevención y mitigación de impacto ambiental sobre recursos hídricos líticos por infraestructura vial tipo puente en el medio abiótico para la etapa de construcción. Caso de estudio: Avenida Longitudinal de Occidente (ALO) - Humedal La Conejera», jul. 2019, Accedido: 22 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/6203>
- [11] E. López, A. Plata, y M. Fuentes, *Humedal Torca - Guaymaral: Iniciativas para su Conservación*, Fondo de Publicaciones., vol. 1, 1 vols. Bogotá D.C.: Universidad Sergio Arboleda, 2017.
- [12] C. Rojas, E. Sepúlveda, F. Jorquera, J. Munizaga, y J. Pino, «Accessibility disturbances to the biodiversity of urban wetlands due to built environment», *City Environ. Interact.*, vol. 13, p. 100076, ene. 2022, doi: 10.1016/j.cacint.2021.100076.
- [13] L. Germán, G. I. Andrade, y E. Ponce, «Humedales Interiores de Colombia: Bases Técnicas para su Conservación y Uso Sostenible», Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, Ministerio de Medio Ambiente, 1999. Accedido: 24 de julio de 2021. [En línea]. Disponible en: http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/35560/HUMEDALES_INTERIORES_DE_COLOMBIA.pdf?sequence=1
- [14] G. González Angarita, C. Henríquez, D. Peña Angulo, D. Castro Álvarez, y G. Forero Buitrago, «Técnicas de análisis geomático en la pérdida de humedales urbanos de Bogotá. ¿Qué rol juegan los asentamientos ilegales?», *Rev. Geogr. Norte Gd.*, n.o 81, pp. 207-233, 2022, doi: 10.4067/S0718-34022022000100207.
- [15] A. M. Caicedo Montaño, «Simulación dinámica del uso del suelo y los cambios en la biodiversidad de los humedales de Bogotá caso Jaboque, Juan Amarillo y Córdoba», marzo 2016, Accedido: 29 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3736>
- [16] Y. J. Acosta León y R. J. Gorozabel Palma, «Determinación del Índice de Contaminación por Nutrientes (NPI) en el humedal de la microcuenca del río Atílico, del Parque Nacional Sangay», jun. 2021, Accedido: 29 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.esepoch.edu.ec/handle/123456789/1464>
- [17] D. Ríos y S. Caruso, «Humedales, riesgo de desastres y cambio climático en la Región Metropolitana de Buenos Aires. Entre imaginarios

- geográficos, conflictos ambientales y políticas públicas », Punto Sur, n.o 5, dic. 2021, doi: 10.34096/ps.n5.10999.
- [18] L. Corrales, Wlfrá, y N. Murillo, «Diseño e implementación de acciones de adaptación al cambio climático en un humedal Ramsar del bosque seco», Ambientico, n.o 266, pp. 41-50, abr. 2018.
- [19] Kiara Nikol Chihuan Castro, «Impacto del cambio climático en el humedal de Pucush Uclo-Chupaca durante el período 1989- 2019», Universidad Continental, Huancayo, 2020. Accedido: 29 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8774/4/IV_FIN_107_TI_Chihuan_Castro_2020.pdf
- [20] B. C. Torres Velásquez y M. Paredes, «Aplicación del método de agrupamiento de grises para evaluar la eutrofización en seis humedales de Colombia», 2018, Accedido: 29 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ri.ugf.edu.sv/jspui/handle/11592/9109>
- [21] M. Miguel Ruano, «Declive y restauración de la masiega (Cladium mariscus) en el humedal de Las Tablas de Daimiel», oct. 2019, Accedido: 29 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/41728>
- [22] X. Li, R. Bellerby, C. Craft, y S. E. Widney, «Coastal wetland loss, consequences, and challenges for restoration», Anthr. Coasts, vol. 1, n.o 1, pp. 1-15, ene. 2018, doi: 10.1139/anc-2017-0001.
- [23] C. A. Riascos Pérez y L. K. Rodríguez Cepeda, «Apoyo a la Dirección de Gestión del Ordenamiento Ambiental y Territorial (DGOAT) en la delimitación de los humedales de la cuenca del Río Sumapaz, en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), como insumo para análisis multitemporales, estructuración de bases de datos, actualización cartográfica y demás productos SIG.», jul. 2020, Accedido: 29 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/25258>
- [24] T. Hu, J. Liu, G. Zheng, Y. Li, y B. Xie, «Quantitative assessment of urban wetland dynamics using high spatial resolution satellite imagery between 2000 and 2013», Sci. Rep., vol. 8, n.o 1, Art. n.o 1, may. 2018, doi: 10.1038/s41598-018-25823-9.
- [25] E. R. Gamarra Rodríguez, «Elaboración del inventario nacional y clasificación de los humedales costeros con base en la estrategia nacional de humedales para la toma de decisiones para su conservación y protección, 2012-2018», Univ. Nac. Santiago Antúnez Mayolo, dic. 2020, Accedido: 30 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/4444>
- [26] K. Das, «NDVI and NDWI based Change Detection Analysis of Bordoibam Beelmukh Wetlands, Assam using IRS LISS III data», ADBU J. Eng. Technol., vol. 6, n.o 2, jul. 2017, Accedido: 30 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://journals.dbuniversity.ac.in/ojs/index.php/AJET/article/view/337>
- [27] K. R. Ahmed y S. Akter, «Analysis of landcover change in southwest Bengal delta due to floods by NDVI, NDWI and K-means cluster with landsat multi-spectral surface reflectance satellite data», Remote Sens. Appl. Soc. Environ., vol. 8, pp. 168-181, nov. 2017, doi: 10.1016/j.rjsase.2017.08.010.
- [28] T. Kshetri, «NDVI, NDBI & NDWI Calculation Using Landsat 7, 8», sep. 2018, [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/327971920_NDVI_NDBI_NDWI_Calculation_Using_Landsat_7_8
- [29] S. Huang, L. Tang, J. P. Hupy, Y. Wang, y G. Shao, «A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing», J. For. Res., vol. 32, n.o 1, pp. 1-6, feb. 2021, doi: 10.1007/s11676-020-01155-1.
- [30] Presidente de la República, DECRETO 1468 DE 2018. Accedido: 4 de noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30035820>
- [31] Secretaría Distrital de Ambiente, «SDA – Humedales de Bogotá», <http://humedalesde-bogota.ambientebogota.gov.co/inicio/> (accedido 19 de julio de 2021).
- [32] Earthdata, «Vegetation | Earthdata», 2020. <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/find-data/near-real-time/hazards-and-disasters/vegetation> (accedido 2 de septiembre de 2023).
- [33] J. Digavinti, S. Reddy, y B. Manikiam, Land cover classification based on NDVI using LANDSAT8 time series: A case study Tirupati region. 2016, p. 1335. doi: 10.1109/ICCS.2016.7754369.
- [34] USGS, «NDVI, the Foundation for Remote Sensing Phenology | U.S. Geological Survey», 2018. <https://www.usgs.gov/special-topics/remote-sensing-phenology/science/>

- ndvi-foundation-remote-sensing-phenology#overview (accedido 2 de septiembre de 2023).
- [35] A. Ashok, H. P. Rani, y K. V. Jayakumar, «Monitoring of dynamic wetland changes using NDVI and NDWI based landsat imagery», *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.*, vol. 23, p. 100547, ago. 2021, doi: 10.1016/j.rsafe.2021.100547.
- [36] C. N. Porras, «ESTUDIO DEL BUCHÓN DE AGUA (*Eichornia crassipes*) PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES», 2017. [En línea]. Disponible en: <https://stadium.unad.edu.co/preview/UNAD.php?url=/bitstream/10596/17528/1/>
- [37] G. Peño Gómez, A. Ollero Ojeda, y F. Pérez Cabello, *Aplicación de Tecnologías de la Información Geográfica y Teledetección para la identificación, caracterización y puesta en valor de humedales de la Depresión del Ebro*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza, 2019.
- [38] B. Villatoro, «USO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN NDWI Y MSI OBTENIDOS DE IMÁGENES SATELITALES SENTINEL-2 Y LANDSAT 8 PARA MONITOREO DE HUMEDAD, COMO INDICADOR DE MOMENTO ÓPTIMO DE COSECHA EN CAÑA DE AZÚCAR», 2019.
- [39] L. Jami, M. B. Mora, O. Padilla, y E. Kirby, «ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE ISLAS DE CALOR EN EL CANTÓN RUMIÑAHUI MEDIANTE EL TRATAMIENTO DE IMÁGENES LANDSAT 7 ETM+», *Rev. Geoespacial*, vol. 15, n.o 2, Art. n.o 2, 2018, doi: 10.24133/geoespacial.v15i2.1241.
- [40] S. Morell-Monzó, J. Estornell, y M. T. Sebastiá, Clasificación del estado de parcelas de cítricos utilizando datos multitemporales Sentinel-2. 2022.
- [41] F. Zhang y G. Zhou, «Estimation of vegetation water content using hyperspectral vegetation indices: a comparison of crop water indicators in response to water stress treatments for summer maize», *BMC Ecol.*, vol. 19, n.o 1, p. 18, abr. 2019, doi: 10.1186/s12898-019-0233-0.