

Uso de la Teledetección Para Evaluar la Firma Espectral del Agua Debido a la Contaminación del Río Matías Hernández, Producto del Crecimiento Urbano, Desde la Parte Media Hasta su Desembocadura en la Bahía de Panamá, 2024

Use of Remote Sensing to Evaluate the Spectral Signature of Water Due to Pollution of the Matias Hernández River, as a Result of Urban Growth, From the Middle Part to its Mouth in the Bay of Panama, 2024

Irving Isaac Isaza Santos

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Panamá

Irving.isaza@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-4029-0992>

Yeislín Z. Arcia

Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil, Panamá

yeislín.arcia@utp.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0009-7647-7394>

Keyla K. Vargas

Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil, Panamá

keyla.vargas@utp.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0000-0963-4868>, keyla.vargas@utp.ac.pa



DOI <https://doi.org/10.48204/reicit.v5n2.8082>

RESUMEN

Este artículo científico se centra en la utilización de imágenes satelitales, implementando el cálculo del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) para resaltar el cuerpo de agua en la zona de estudio, analizando valores de píxeles tomados a partir de imágenes satelitales de la misión. Sentinel 2, para evaluar el cambio en la firma espectral del agua en masas de carácter hídrico como ríos, bahías y lagos. Este método es particularmente valioso para territorios donde la calidad del agua es de gran importancia, ya que permite monitorear los impactos del crecimiento urbano no planificado. En este contexto, la vegetación de ribera natural a menudo se ve afectada, lo que genera problemas de contaminación. Un caso de estudio crucial es el río Matías Hernández, ubicado en medio de la ciudad

de Panamá. Este cuerpo de agua ha experimentado una degradación significativa debido a la falta de una planificación urbana, En este estudio hemos obtenido en la mayor parte de las muestras tomadas para el (NDWI), valores negativos que representan ausencia de superficies húmedas o de agua en temporada seca y lluviosa, lo cual está directamente relacionado al ancho del río y su forma, encontrando valores positivos sin dificultad, en lugares más amplios como lo es el océano. En el análisis para evaluar la contaminación del río con la gráfica de interpretación de firma espectral del agua, todos los puntos arrojaron valores en las bandas del infrarrojo cercano y de onda corta, valores que no debieron haberse presentado; tomando en cuenta que la curva espectral del agua limpia solo se muestra en las bandas 2,3 y 4 de las imágenes de Sentinel 2. A excepción del punto muestra “oceano”, el cual estaba adentrado más al mar y lejos de la desembocadura del río.

PALABRAS CLAVE: Imágenes satelitales, sistema de información geográfica, planificación urbana, contaminación.

ABSTRACT

This scientific article focuses on the use of satellite images, implementing the calculation of the normalized difference water index (NDWI) to highlight the body of water in the study area, analyzing pixel values taken from satellite images of the mission. Sentinel 2, to evaluate the change in the spectral signature of water in water masses such as rivers, bays and lakes. This method is particularly valuable for territories where water quality is of great importance, as it allows monitoring the impacts of unplanned urban growth. In this context, natural riparian vegetation is often affected, leading to pollution problems. A crucial case study is the Matías Hernández River, located in the middle of Panama City. This body of water has experienced significant degradation due to the lack of urban planning. In this study we have obtained, in most of the samples taken for the (NDWI), negative values that represent the absence of wet surfaces or water in season. dry and rainy, which is directly related to the width of the river and its shape, finding positive values without difficulty, in larger places such as the ocean. In the analysis to evaluate the contamination of the river with the water spectral signature interpretation graph, all the points returned values in the near-infrared and shortwave bands, values that should not have been presented; considering that the spectral curve of clean water is only shown in bands 2,3 and 4 of the Sentinel 2 images. Except for the point shown “ocean”, which was further into the sea and far from the mouth of the river.

KEYWORDS: Satellite images, geographic information system, urban planning, pollution

INTRODUCCIÓN

Los ríos son las venas azules que fluyen a través de nuestras ciudades, llevando consigo la vida misma. Sin embargo, a medida que nuestras urbes crecen sin control, estos canales vitales se han visto envenenados, transformándose en cicatrices tóxicas que desfiguran el paisaje urbano.

La ciudad de Panamá ha experimentado un crecimiento urbano vertiginoso en las últimas décadas, impulsado por la expansión acelerada de los sectores comercial y residencial. (de Panamá, 2016) pero a su vez ha incrementado las contaminaciones en los ríos que atraviesan en ellas. El Río Matías Hernández, se sitúa geográficamente en la región central de la República de Panamá, específicamente en la provincia de Panamá, atravesando la capital del país. Su cauce fluvial transcurre íntegramente por el área metropolitana, constituyendo un eje hídrico urbano, hasta desembocar en la bahía adyacente, cuyas aguas desembocan finalmente en el Océano Pacífico. (Delvalle-Borrero, Medina, & Fuentes, 2022). Se extiende a lo largo de 28 kilómetros, serpenteando a través de una vasta cuenca hidrográfica. Esta cuenca cubre una superficie de 2,062 hectáreas, drenando las aguas de una extensa región. (Martha Arango, 2017)

El principal objetivo de este estudio es analizar la calidad del agua del río Matías Hernández, principalmente en un tramo que corresponde a la parte media y baja, hasta llegar a su desembocadura en la bahía de Panamá; mediante el cálculo del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), tomando en cuenta los valores de píxeles presentes en las imágenes de Sentinel 2; este estudio se genera debido a la gran contaminación que presenta actualmente el río Matías Hernández, el cual se enlista como uno de los ocho cuerpos de agua que están completamente contaminados, incluyendo para sí las quebradas que desembocan en él. Al tener presencia de proliferación de desechos como; sólidos suspendidos, basura, aguas residuales y una escorrentía contaminada, se ha deteriorado en gran magnitud, obstruyendo el cauce y disminuyendo su capacidad de drenaje.

El uso de sus aguas se limita a las zonas altas del río, para actividades como el riego y la industria; sin embargo, para cualquier otro tipo de uso que quiera dársele, se ve extremadamente inutilizable. (Martha Arango, 2017)

Nos proyectamos a un estudio retrospectivo de contaminación, durante períodos entre 4 a 3 años de diferencia, sobre todo teniendo en cuenta la disponibilidad de data en los sitios de descarga, vinculando el uso de imágenes satelitales para estudiar el desarrollo y cambios que presenta la firma espectral del agua y otros materiales que inciden en la variación de los resultados, tomando en cuenta los valores que la representan en su modalidad limpia y turbia, cabe destacar que para este tipo de estudio los satélites que con mayor frecuencia se ven involucrados en la monitorización de la superficie terrestre son Sentinel-2 y Landsat 8 debido a su alta resolución y disponibilidad gratuita de datos históricos. En las imágenes que proporciona Sentinel 2, la banda 2 (Azul), es útil para la detección de sedimentos y claridad del agua, así como la banda 3 (Verde) y la banda 11 (Infrarrojo de onda corta) que en combinación nos permiten realizar un sin número de cálculos ráster, en Landsat 8/9 la banda 2: es la recomendada para analizar la claridad del agua y detectar sedimentos en suspensión, ambas tienen la misma aplicabilidad. (Alonso, 2020).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo el estudio de contaminación en el río Matías Hernández, partimos de tomar una decisión del satélite a utilizar con el cual generaríamos el procesamiento de la data, para su posterior interpretación, en este caso trabajamos con las imágenes de Sentinel 2; debido a que mantiene una mayor resolución espacial (10m) en las bandas rojo, verde, azul y 20m en el infrarrojo de onda corta que también se vería involucrada en esta investigación; en comparación con Landsat 8 el cual presenta (30m de resolución espacial en las bandas del visible), adicional a esto trabajamos con la composición de bandas a color natural, con el orden de bandas (4,3,2) para fotointerpretación de la escena. (GIS&BEERS, 2019).

Para el tratamiento de la data y la generación de procesos trabajamos con el software de ArcGIS Pro, importamos las imágenes Sentinel 2 L2-A de los meses de: diciembre de 2018, marzo de 2020 y febrero de 2024. se compactaron todas las bandas descargadas en cada paquete de archivos que corresponden a 13 bandas en Sentinel 2, para generar la imagen compuesta.

- Digitalizamos un eje central del río y se hizo una generalización entre punto y punto de la digitalización del eje a cada 5m, para garantizar una correcta orientación de su trayectoria.

- La extensión total que se estudió fue de 6.613 Km, la cual se segmentó en 5 tramos de 1,322.68 m cada uno, generando así 6 puntos para la toma de muestreo de píxeles.
- Se les colocó nombres a los 6 puntos de toma de muestra, desde el puente hasta llegar a la bahía en ese orden: (Puente, Santa Clara, Colegio Brader, Desembocadura, Lama y Océano).
- Se generó un buffer radial a 10 metros a partir de los 6 puntos, esto nos serviría como área de referencia al momento de la selección de los píxeles.
- Se nombraron las 3 imágenes a utilizar de la siguiente manera: imagen COMP_2018_TS, imagen COMP_2020_TS, imagen COMP_2024_TS y para la temporada lluviosa imagen COMP_2018_TL, imagen COMP_2020_TL, imagen COMP_2024_TL.
- Se generó el proceso de determinación de índice diferencial de agua normalizado (NDWI), para calcular el valor de píxeles en cada año de estudio, se inició con la imagen del 2018, 2020 y 2024, en ambas temporadas, aclaramos que estos fueron los años en los que se obtuvieron imágenes satelitales con mejor visibilidad sobre el cuerpo de agua. La herramienta de NDWI, se encuentra en la pestaña de Analysis- Tools – Spatial Analysis Tools – Map Algebra – Raster Calculator.
- En la calculadora ráster se utilizó la ecuación establecida para determinar el NDWI, involucrando la banda 3 (verde) y la banda 11 (infrarrojo de onda corta), cuya operación es: $(3-11)/(3+11)$.
- Posterior al cálculo del NDWI, se tomaron muestras de los píxeles en los 6 puntos determinados, utilizando al mismo tiempo la herramienta “swipe” de ArcGIS Pro para tener precaución de excluir todo lo que no fuera agua, debido a lo angosto que es el río. Las muestras fueron tomadas muy cercanas unas con las otras estando en el rango establecido como área de influencia, para determinar área con presencia o no de agua y humedad, haciendo identify a los píxeles para obtener el valor de este.
- Para complementar el estudio, se tomó en cuenta el ancho de los 6 puntos para así poder entender el comportamiento del caudal en dicha zona y comprender los valores resultantes. Midiendo el ancho del caudal de las diferentes temporadas.
- Se tomaron muestras de los píxeles en los 6 puntos determinados, para generar las gráficas de firmas espectrales en el software, y poder realizar los análisis en los niveles de reflectancia y

longitudes de onda. Apoyándonos con la herramienta “swipe” de ArcGIS Pro teniendo precaución de excluir todo lo que no fuera agua.

Figura 1.

Eje Central de estudio del Rio Matías Hernández



Nota: Índice de agua de Diferencia Normalizada. El Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) se utiliza para resaltar el aspecto de las masas de agua en una imagen de satélite. Para ello, se reduce considerablemente la reflectancia del suelo y la vegetación, lo que permite que dichas masas de agua “destaquen” en la imagen. Al igual que en el caso del índice de vegetación NDVI, los potenciales valores obtenidos a partir del NDWI oscilan entre -1 y 1 cuyos valores describirán superficies de agua y vegetación con contenido en agua o zonas terrestres y con ausencia de humedad.

Figura 2.

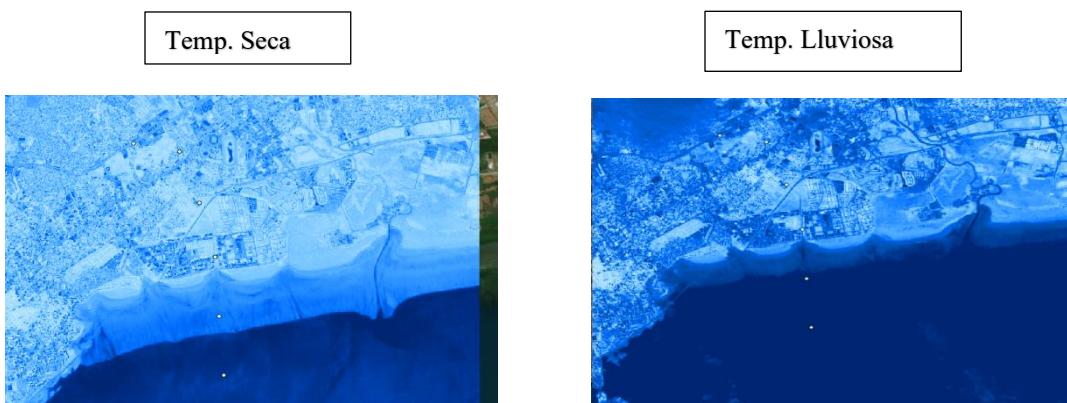
Punto de Aplicación de la Herramienta buffer a 10 m y 20 m



Nota: Al igual que en el caso del índice de vegetación NDVI, los potenciales valores obtenidos a partir del NDWI oscilan entre -1 y 1 cuyos valores describirán superficies de agua y vegetación con contenido en agua o zonas terrestres y con ausencia de humedad.

Figura 3.

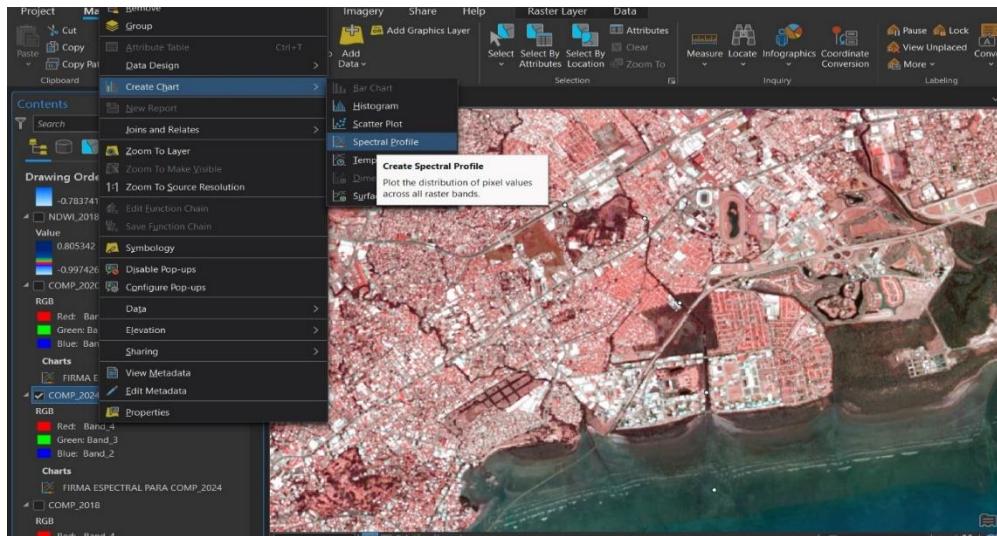
Generación del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) del 2018 en temporada seca vs lluviosa.



Nota: Al igual que en el caso del índice de vegetación NDVI, los potenciales valores obtenidos a partir del NDWI oscilan entre -1 y 1 cuyos valores describirán superficies de agua y vegetación con contenido en agua o zonas terrestres y con ausencia de humedad.

Figura 4.

Proceso para Generación de la firma Espectral



Nota: Firma Espectral a partir de la imagen compuesta-multibandas. **Nota:** Al igual que en el caso del índice de vegetación NDVI, los potenciales valores obtenidos a partir del NDWI oscilan entre -1 y 1 cuyos valores describirán superficies de agua y vegetación con contenido en agua o zonas terrestres y con ausencia de humedad.

RESULTADOS

Resultados para el IDWI en las distintas Muestra

El estudio de la calidad del agua en el Río Matías Hernández, realizado mediante el análisis de valores NDWI (Normalized Difference Water Index) en imágenes satelitales Sentinel 2 utilizando la herramienta de propiedades aritméticas en ráster, en temporada seca y lluviosa, revela variaciones significativas en distintos puntos a lo largo de los años 2018, 2020 y 2024.

Temporada Seca (meses de: diciembre_2018, marzo_2020, febrero_2024)

1. En la imagen COMP_2018_TS, los valores resultantes fueron: Puente (-0.328), Santa Clara (-0.504), Colegio Brader (-0.618), Desembocadura (-0.473), Lama (0.7) y Océano (0.7).

2. En la imagen COMP_2020_TS, los valores obtenidos fueron: Puente (-0.294), Santa Clara (-0.432), Colegio Brader (-0.504), Desembocadura (-0.260), Lama (0.360) y Océano (0.711).
3. En la imagen COMP_2024_TS, los valores resultantes fueron: Puente (-0.581), Santa Clara (-0.616), Colegio Brader (-0.635), Desembocadura (-0.485), Lama (0.022) y Océano (0.664).

Interpretación del IDWI en temporada seca:

Con los resultados se logra apreciar que el caudal en verano es más angosto debido a que el agua es más escasa para estas temporadas, se aprecia más el playón del río, por ende, el resultado negativo nos indica la ausencia de agua.

Temporada Lluviosa (meses de octubre_2018, octubre_2020 y mayo_2024)

1. En la imagen COMP_2018_TL, los valores resultantes fueron: Puente (-0.416), Santa Clara (-0.516), Colegio Brader (-0.480), Desembocadura (-0.305), Lama (0.738) y Océano (0.592).
2. En la imagen COMP_2020_TL, los valores obtenidos fueron: Puente (-0.276), Santa Clara (-0.488), Colegio Brader (-0.544), Desembocadura (-0.372), Lama (0.270) y Océano (0.887).
3. En la imagen COMP_2024_TL, los valores resultantes fueron: Puente (0.197), Santa Clara (-0.329), Colegio Brader (-0.273), Desembocadura (-0.246), Lama (0.618) y Océano (0.556).

Interpretación del IDWI en temporada lluviosa:

En invierno el calado del río aumenta debido a las lluvias contantes en la zona, y los lugares que eran playón ahora se encuentran cubierto de agua con valores igualmente negativos.

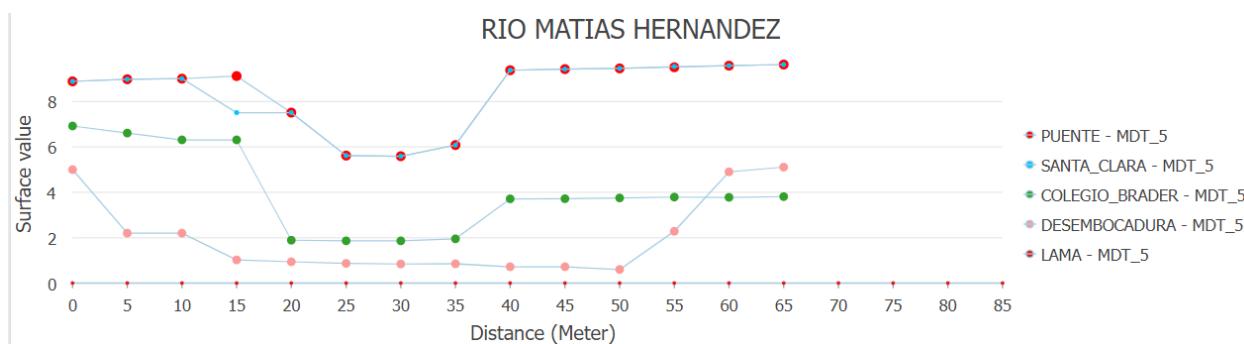
Interpretación General del IDWI en ambas temporadas:

Sin embargo; en este análisis se esperaba obtener valores positivos qué indicaran presencia de agua o humedad en el terreno en invierno. Y obtuvimos valores negativos, estoy podría estar relacionado directamente con el ancho del río, (es muy angosto) y no es fácilmente perceptible con las imágenes satelitales.

Otras causas relacionadas con la variación del ancho del río son por las urbanizaciones alrededor, que provocan erosión y sedimentación y que han afectado la ribera del río en la parte media y baja de la cuenca, provocando un proceso de canalización en su forma y obstruyendo el curso natural del río con la ausencia de los meandros como se observa en la parte alta de la cuenca, o sea, desde su nacimiento.

Figura 5.

Sección transversal del Ríos Matías Hernández



Nota Punto de estudio del Rio Matías Hernández con Modelo Digital de Terreno 2017.

Interpretación de sección transversal (Ancho del caudal)

La gráfica muestra una clara variación en el ancho del Río Matías Hernández a lo largo de su curso. Esta variabilidad puede ser resultado de factores naturales como la geomorfología del terreno, pero también puede reflejar el impacto del desarrollo urbano.

Las diferencias en el ancho del río podrían indicar áreas de mayor o menor presión urbanística. Los segmentos más estrechos podrían corresponder a zonas donde el desarrollo urbano ha encajonado el río, mientras que las secciones más anchas podrían representar áreas donde se ha preservado más el entorno natural del río.

Los perfiles con mayor ancho, como Puente y Santa Clara, parecen ser más susceptibles a inundaciones. Estos puntos muestran una mayor extensión lateral, lo que sugiere que el río tiene más espacio para expandirse durante eventos de alta precipitación. El perfil Colegio Brader, parecen ser menos propenso a inundaciones debido a su cauce es más estrecho. Sin embargo, esto también podría significar que en este punto el agua fluye con mayor velocidad durante las crecidas.

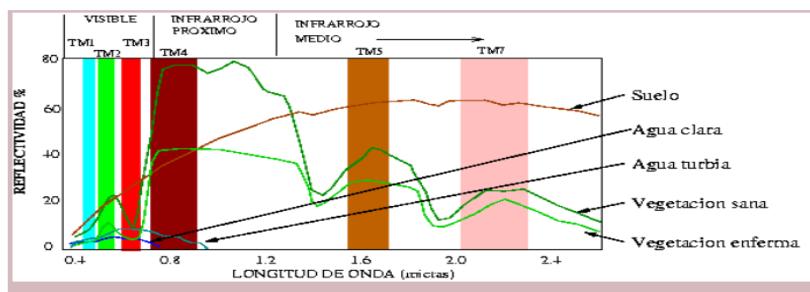
Aunque la gráfica representa un momento específico, es importante considerar cómo estos perfiles podrían cambiar con el tiempo, especialmente en el contexto del crecimiento urbano continuo y los posibles efectos del cambio climático

En temporada seca, las secciones más estrechas con NDWI bajo podrían indicar una mayor concentración de contaminantes debido al menor volumen de agua; en cambio en temporada lluviosa, las secciones más anchas con NDWI alto podrían sugerir una mejor dilución de contaminantes, pero también un mayor riesgo de inundación y arrastre de contaminantes de las áreas urbanas circundantes.

Firma espectral del agua. La firma espectral es el patrón de radiación electromagnética que indica cómo un objeto en la Tierra refleja o emite radiación a lo largo de distintas partes del espectro electromagnético.

Figura 6.

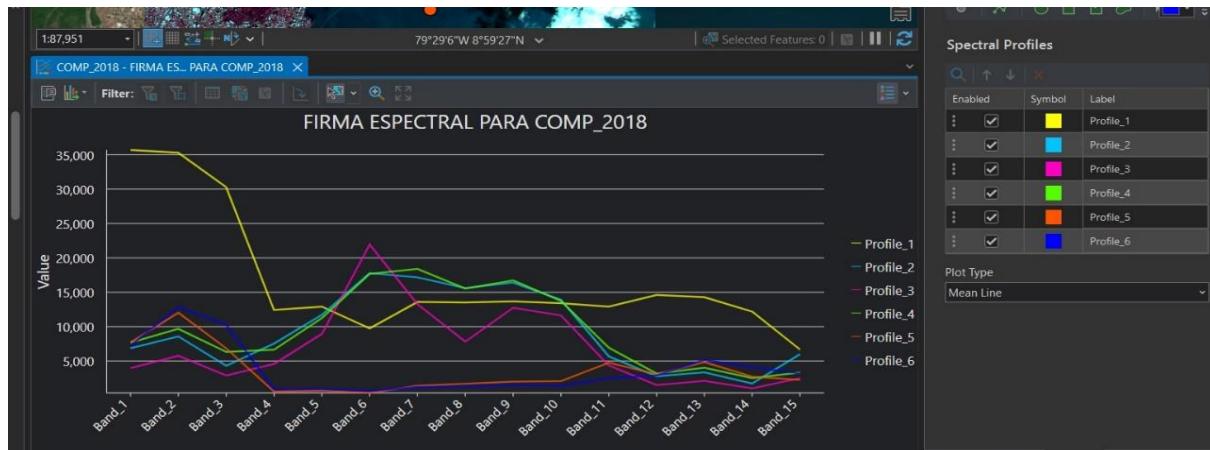
Grafica de Firma Espectral del Agua



Nota: Resultados para la firma espectral del agua en las distintas Muestra. (gidahatari, 2006)

Figura 7.

Grafica de la firma espectral COMP_2018_TEMP_SECA



Nota: Al igual que en el caso del índice de vegetación NDVI, los potenciales valores obtenidos a partir del NDWI oscilan entre -1 y 1 cuyos valores describirán superficies de agua y vegetación con contenido en agua o zonas terrestres y con ausencia de humedad.

Figura 8.

Grafica de firma espectral COMP_2020_TEMP_SECA.

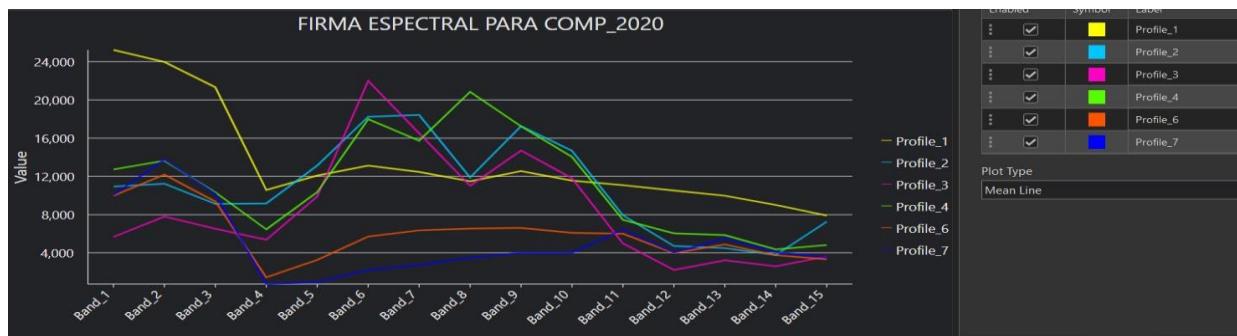
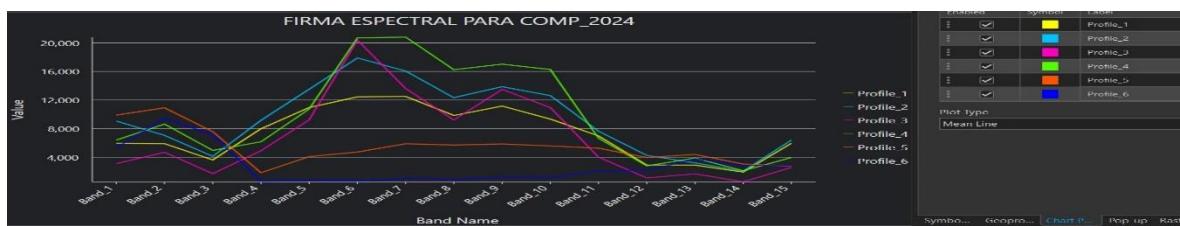


Figura 9.

Grafica de firma espectral COMP_2024_TEMP_SECA



Nota: Interpretación de los perfiles espectrales del Agua (en los 6 puntos) en temporada seca:

Perfil_1 (Amarillo - Puente):

- Muestra la reflectancia más alta en todas las bandas, especialmente en las primeras.
- Interpretación: Probablemente representa aguas muy turbias o con alta concentración de sedimentos.

Figura 10.

Grafica de firma espectral COMP_2018_TEMP_LLUVIOSA.



Perfil_2 (Azul claro - Santa Clara) y Perfil_4 (Verde – Desembocadura):

- Muestran reflectancia moderada en las primeras bandas y picos en las bandas intermedias.
- Interpretación: Podrían representar aguas con turbidez moderada o con presencia de clorofila.

Perfil_3 (Rosa- Colegio Brader) y Perfil_6 (Azul oscuro - Océano):

- Generalmente muestran reflectancia más baja en las primeras bandas.
- Interpretación: Podrían representar aguas más claras o con menos sedimentos en suspensión.

Perfil_5 (Naranja - Lama):

- Muestra valores bajos y consistentes en todas las bandas.
- Interpretación: Podría representar aguas claras y profundas.

Interpretación por tipo de agua en temporada seca:

Aguas turbias:

- Perfil_1 (Puente) es el candidato más probable para aguas muy turbias en todos los años.
- Perfil_2 (Santa Clara) y Perfil_4 (Desembocadura) podrían representar aguas moderadamente turbias o con presencia significativa de fitoplancton, carga de basura y otros sedimentos.

Aguas claras:

- Perfil_5 (Lama) y Profile_6 (Océano) son los más probables candidatos para aguas claras.
- Perfil_3 (Colegio Brader) podría representar aguas intermedias o aguas que se están volviendo más claras con el tiempo.
- Interpretación por tipo de agua en temporada lluviosa:

Aguas turbias:

- En todos los perfiles se muestran aguas turbias, pero en el perfil_1 (Puente) se muestra más este comportamiento.
- Aguas claras: en invierno el perfil_4 (Desembocadura), presenta aguas más claras en comparación a otros perfiles, pero no más clara que el perfil_5 (Lama) que mantiene su agua clara.
- El comportamiento de las gráficas en temporada de lluvia en los tres años muestra comportamientos similares.

DISCUSIÓN

Interpretación final de ambos procesos de teledetección:

La variabilidad entre perfiles sugiere diferentes condiciones de agua dentro del área de estudio.

En las gráficas (figuras 5,6,7) se muestran las curvas para cada muestra de agua en cada una de las bandas del satélite Sentinel, desde la parte visible, el rojo corrido, el infrarrojo cercano, las bandas termales y el infrarrojo de onda corta; debemos aclarar que la resolución en todas las bandas varía de 10m a 60m, y que en las bandas visibles (verde, azul y rojo), la resolución es de 10m; sin embargo, en la banda 11 utilizada para el cálculo del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), la resolución es de 60m; esto incide significativamente en el análisis de resultados; lo que representaría que un solo píxel tomara cobertura total sobre el ancho del río.

El perfil espectral, muestra que la curva del agua como es natural, se aprecia en las bandas del azul, verde y rojo cuando no hay turbidez y las tres gráficas en los años 2018, 2020 y 2024, mantienen el mismo comportamiento en estas bandas; por ende, la única razón por la cual estas curvas muestren picos crecientes y generen valores en las demás bandas como el rojo corrido hacia el infrarrojo de onda corta, se debe a la alta concentración de turbidez que tiene el río y por eso vemos como se reflejan valores altos en el eje de reflectancia.

Otras de las causas por las cuales existan interferencia y valores no esperados en las bandas del infrarrojo, es debido, a un fenómeno conocido como efecto de fondo, este sucede en áreas costeras, el cual resulta en una variación en la señal espectral del fondo marino provocado por el cambio en la profundidad y las propiedades del fondo, este modifica claramente el resultado, al combinarse valores del fondo marino con valores del agua.

La disminución general de la reflectancia en el año 2018 al 2020 en incluso en los valores del NDWI podrían indicar una mejora en la claridad del agua o una reducción en la carga de sedimentos, podemos aducir que fue producto de los efectos de la pandemia y la paralización de muchas operaciones en la industria y otros sectores.

Las curvas en azul y naranja de los puntos Lama y Océano, se encuentran más alejados hacia la desembocadura del río en el mar, estas son claramente visibles en las bandas (azul, verde y rojo); pero en las bandas del infrarrojo empiezan a descender y mostrarse muy bajas y constantes, se entiende que, en esta instancia, las aguas se combinan y empiezan a tornarse más claras cuando se adentran al mar, en donde se absorbe con la profundidad, la reflectancia de la luz.

CONCLUSIONES

El análisis del cambio en la firma espectral del agua del río Matías Hernández demuestra una clara relación entre el crecimiento urbano desordenado y el aumento de la contaminación. A través del uso de imágenes satelitales Sentinel-2 y el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), se observó una disminución en la calidad del agua desde la parte media del río hasta su desembocadura en la bahía de Panamá.

Los valores negativos del NDWI indican una reducción en el caudal y un aumento en la sedimentación, especialmente cerca de áreas urbanizadas. La firma espectral del agua mostró que los puntos más afectados por la turbidez estaban ubicados en zonas urbanas, mientras que las áreas alejadas de la desembocadura presentaban aguas más claras.

Este estudio subraya la necesidad de implementar medidas de planificación urbana y restauración ecológica para mitigar los impactos negativos sobre el río. La teledetección y el análisis espectral se demuestran como herramientas efectivas para el monitoreo continuo de la calidad del agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alonso, D. (2020). Combinación de bandas en imágenes de satélite Landsat y Sentinel. *MappingGIS*.

ANALYTICS, E. D. (2024). Índice De Agua De Diferencia Normalizada (NDWI). *EOS DATA ANALYTICS*.

Becerril, J. O., & Heydt, M. G. (2009). Influencia antrópica en la avenida de 1997 en el río Rivillas (Badajoz). Cambios de usos e impacto geomórfico. *Congreso Internacional sobre Desertificación*.

Camaño, L. A., & Quintero, D. I. (2023). Estudio de la subcuenca hidrográfica del río Matías Hernández y sus intervenciones antropogénicas. *Societas*, 25, 142–170.

De Panamá, M. (2016). Parque Matías Hernández. *Dirección de Planificación urbana*.

Delvalle-Borrero, D. M., Medina, J. R., & Fuentes, K. (2022). Humedales artificiales flotantes y su valor paisajista en ríos urbanos-Ciudad de Panamá. *Prisma Tecnológico*, 13, 3-9.

De Sanctis Mateo (8 de noviembre de 2023) Prevenir el Estrés Hídrico con el Índice NDWI
<https://tethys.farm/es/indice-ndwi-para-salvaguardar-la-salud-de-tus-cultivos/>

EOS DATA ANALYTICS (11 de julio de 2023) Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndwi/>

Gidahatari. (2006). 2 Interacción de los elementos de la superficie terrestre con la radiación. *um.es*.

GIS&BEERS. (5 de noviembre 2017). Cálculo del índice NDWI.
<https://www.gisandbeers.com/calculo-del-indice-ndwi-diferencial-de-agua-normalizado/>.

GIS&BEERS. (2019). Todo lo que deberías saber sobre imágenes Sentinel 2. *GIS&BEERS*.

Hernández, J., & Montaner, D. (2009). Patrones de respuesta espectral. *Tecnologías Geoespaciales: Experiencias Aplicadas al Estudio y Gestión del Territorio*. Carlos Mena (Ed.) ISBN, 978-956.

Martha Arango, A. A. (2017). Subcuenca del río Matías Hernández. vulnerabilidad y aplicación de medidas de adaptación y mitigación. *Piragua – Fuego y agua*.

Martínez Raúl (01 de febrero de 2020) "El uso de la Teledetección en la Caracterización de cultivos mediante la aplicación de índices de vegetación. <https://georem.blogspot.com/2020/02/el-uso-la-teledeteccion-en-la.html>

Nieves Cuervo, S. F. (2016). Utilización de imágenes multiespectrales para el análisis del comportamiento de la firma espectral del lago de tota y la influencia de los cultivos de cebolla.

Vásquez Juan, Acevedo Rosa, Miranda Castro, Guerrero Milton y Meneses Luisa (22 de diciembre de 2023) "Determinación de cambios en la cobertura de manglares mediante teledetección con imágenes Landsat: una revisión. Revista Springer Nature Link Volumen 235 <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-023-06788-6>