IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
Facultad de Ingeniería, UAEMEX

Caracterización de reflectancia espectral y concentración de SST en cuerpos de agua continental a nivel mundial

Characterization of spectral reflectance and TSS concentration in continental water bodies worldwide

Cruz-Retana, A.[1],[2]* Fonseca-Ortiz, C.[1], Becerril-Piña, R.[3], Gómez-Albores, M. A.[1], Hernández-Téllez, M.[1], Arévalo-Mejia, R.[1] (*acruzr665@alumno.uaemex.com)

Recibido: 19 de noviembre de 2022 Aceptado: 2 de agosto de 2023

Resumen

La medición de Parámetros de Calidad del Agua en relación con los Sólidos Suspendidos Totales (SST) en laboratorio considera la mayoría de las variables biofísicas que intervienen en los cuerpos de aguas (CA). Estas consideraciones son extrapoladas cuando la estimación se realiza a través de reflectancia (imágenes satelitales) por medio de regresiones. Las regresiones integran coeficientes calibradores para la estimación de SST incluyendo variables biofísicas, sin embargo, existen pocos estudios que consideran modelos conjuntos de CA (por umbrales de reflectancias, y cercanía entre cuerpos de agua). Por lo tanto, el presente estudio está orientado caracterizar CA bajo diferentes condiciones, en relación con la dispersión de las reflectancias y concentraciones de SST.

Este estudio se basa en 48 CA (lénticos y lóticos) distribuidos en 5 continentes en el mundo (intervalo de 0 a 60řLatitud). Este estudio se realizó con base en medidas de dispersión y tendencia central para conocer el comportamiento de los datos con el objetivo de identificar similitudes y diferencias en la estimación de SST por medio de reflectancias (extraídas de los productos Sentinel 2A y Landsat 8 OLI). La selección de los modelos se realizó con base en el coeficiente de determinación, raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE). Los resultados obtenidos indican que la Banda 4, 5 y 6 del sensor Landsat y su concomitante a Sentinel (B8A=B5 y B11=B6 caso de sentinel) son representativos para los SST. De lo anterior, se identificaron 8 CA que presentan mayor varianza en reflectancia a diferencia del

[1]Institutito Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua IITCA-UAEMex, Carretera Toluca-Atlacomulco km 14.1, Toluca, Estado de México.
[2]RED Lerma-IITCA-UAEMex. Carretera Toluca-Atlacomulco km 14.1, Toluca, Estado de México.
[3]Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, TESJO, Carretera Toluca-Atlacomulco, km 28.1, Jocotitlán, México.

resto de CA.

Palabras clave: *sensores remotos; calidad del agua; Solidos Suspendidos Totales; Landsat 8, Sentinel 2.*

Abstract

The measurement of Water Quality Parameters (WQP) in relation to Total Suspended Solids (TSS) in the laboratory considers most of the biophysical variables that intervene in water bodies (WB). These considerations are extrapolated when the estimate is made through reflectance (satellite images) by means of regressions. The regressions integrate calibrating coefficients for the estimation of SST including biophysical variables, however, there are few studies that consider joint models of WB (by reflectance thresholds, and proximity between water bodies). Therefore, the present study is aimed at characterizing WB under different conditions, in relation to the dispersion of reflectances and SST concentrations.

This study is based on 48 WB (lentic and lotic) distributed in 5 continents in the world (interval from 0 to 60řLatitude). This study was carried out based on measures of dispersion and central tendency to know the behavior of the data with the aim of identifying similarities and differences in the estimation of SST by means of reflectances (extracted from Sentinel 2A and Landsat 8 OLI products). The selection of the models was made based on the coefficient of determination, root of the Mean Square Error (RMSE). The results obtained indicate that Band 4, 5 and 6 of the Landsat sensors and its concomitant to Sentinel (B8A=B5 and B11=B6 in the case of sentinel) are representative for the SST. From the above, 8 WB were identified that present greater variance in reflectance, unlike the rest of the WB.

Keywords: *remote sensing; water quality; Total Suspended Solids; Landsat 8 OLI; Sentinel 2A.*

Introducción

La caracterización del agua comprende la estimación de parámetros de calidad del agua (PCA), uno de los PCA más estudiados a través de sensores remotos son los Sólidos Suspendidos Totales (SST) [1]. La estimación de los SST en los últimos años se ha realizado con sensores remotos con características específicas para el cuerpo de agua estudiado [2]. Por ejemplo, dentro de las características propias de su entorno se encuentran: la humedad relativa del ambiente, vientos, precipitación, temperatura, tolvaneras, etcétera [2–6].

La importancia de la estimación de los PCA con sensores remotos radica en la precisión de la información que proporciona de manera rápida con costos razonables a diferencia de los métodos tradicionales [7–9]. Por lo tanto, el presente estudio genera una caracterización de las bandas multiespectrales y concentración de los estudios con base en las estadísticas importantes reportadas en los estudios: R^2

https://doi.org/10.36677/ideaseningenieria.v1i2.20364 julio-diciembre 2023 ISSN: en trámite págs. 4- 18

(>0.65), RMSE (30.2 mg/L), BIAS (32.7 mg/L), E (eficiencia de Nash-Sutcliffe; mayor a 0.9 en modelos que aporta este estadístico) [10]. El alcance de este estudio puede generar nuevas áreas de investigación de la calidad del agua con sensores remotos.

De manera general el propósito de la presente investigación corresponde a establecer pautas para estudios de los sólidos suspendidos totales en función de secciones homogéneas o cuerpos donde la variabilidad ambiental y SST guarden un patrón de correlación. Es decir, generar la caracterización de reflectancia y SST para que futuros estudios avancen en la generación de posibles modelos regionales. Además de lo anterior el presente estudio complementa la información desarrollada por [11, 12].

Metodología

La metodología se compuso de 5 etapas que comprenden desde la selección del cuerpo de agua, tratamiento de las imágenes, muestreos estratificados, medidas de tendencia central y dispersión, así como la caracterización de las reflectancias en función de las distintas longitudes de onda evaluadas por Landsat 8 OLI y Sentinel 2A (Figura 1).

Para la etapa 1 se recolectó información de distintos cuerpos de agua (CA) con información viable y accesible para su análisis. Con base en lo anterior, se recolectó información de 48 cuerpos de agua en el mundo (Figura 2) y almacenados en una base de datos. Los continentes con mayor presencia de cuerpos de agua con estudios de SST corresponden al continente asiático, y en menor cantidad el resto de los continentes. Las características consideradas esenciales para la selección del cuerpo de agua corresponden: a) variables regresoras del espectro visible b) disponibilidad de al menos una imagen al mes, c) meses en la que puede aplicarse el modelo de regresión, d) número de muestreos que utilizaron para la aplicación del modelo y e) estadísticos de evaluación y validación que reportan los autores.

Una vez creada la base de datos para el almacenamiento de las imágenes satelitales de los CA, de manera paralela se creó una tabla con las características necesarias de cada modelo generado por el estudio [13, 14].

Para la etapa 2 de integración de imágenes y estimación de reflectancia se utilizó el software TerrSet [15]. La superficie de agua factible para analizar se obtuvo por medio del Índice de Diferencia Normalizada del Agua (NDWI- Normalized Difference Water Index) contenido en el algoritmo VegIndex del software TerrSet, donde los valores de 0 hasta 1 corresponden a superficies con presencia de agua y los valores de 0 hasta -1 corresponden al resto de las coberturas del suelo (Ecuación 1) [16].

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \tag{1}$$

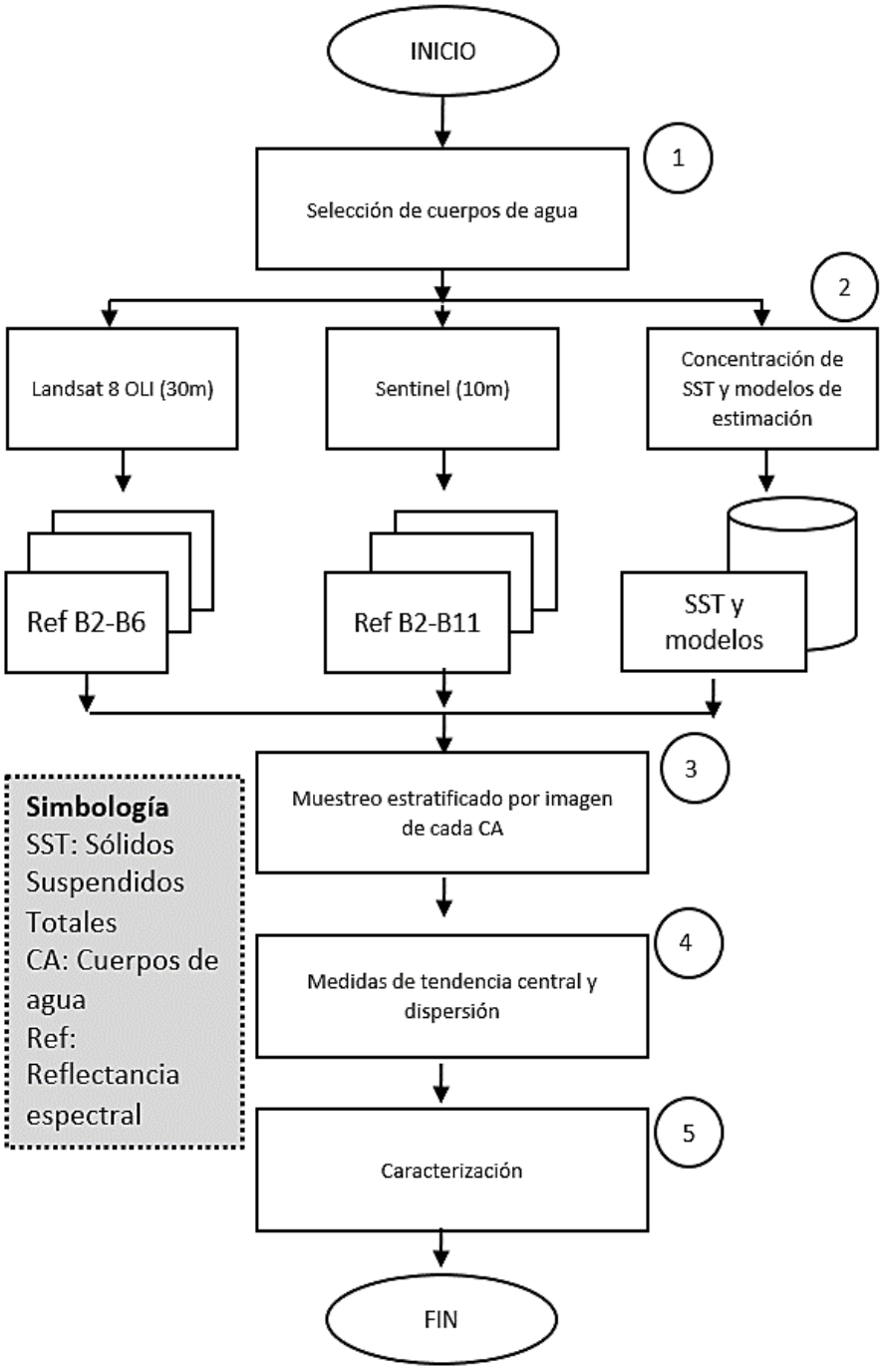


FIGURA 1. *Metodología para la estimación de parámetros de calidad del agua a partir de sensores remotos.*

https://doi.org/10.36677/ideaseningenieria.v1i2.20364 julio-diciembre 2023 ISSN: en trámite págs. 4- 18

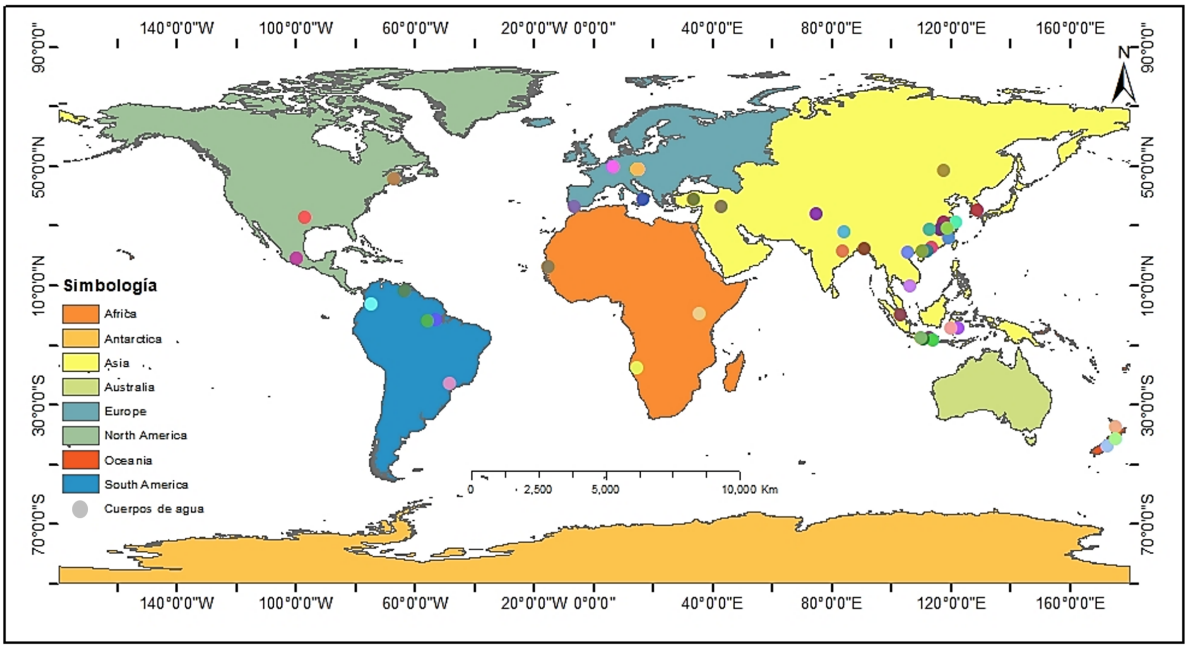


FIGURA 2. *Mapa de localización de agua continentales consideradas en el estudio.*

Donde:

- NDWI: Normalized Difference Water Index
- Green: Banda 3 (Verde) del sensor Landsat 8 OLI
- NIR: Banda 6 (infrarrojo medio) del sensor Landsat 8 OLI, o banda 11 del Sensor Sentinel

Para la selección de una muestra representativa (Ecuación 2) de pixeles de cada cuerpo de agua se utilizó el algoritmo multiclass data organizer creado en el IITCA para extraer estratos de población significativa (muestreo estratificado) [17]. Su funcionamiento trabaja a manera de complemento en el Software TerrSet. Dicha extracción fue diseñada en función del tamaño de píxel e imagen satelital. Debido a la complejidad del manejo de datos de mayor número de muestreo; se debe de optimizar la cantidad de ellas para facilitar el análisis de datos [18].

$$n = \frac{NZ^2\sigma^2}{(N-1)E^2 + Z^2\sigma^2} \tag{2}$$

La etapa 3 corresponde a las medidas de dispersión y tendencia central de los datos. En este apartado se apoyó del software Excel y IBM SPSS Statistics debido a la cantidad de datos que se procesaron [19].

En la selección de características comunes (etapa 4). Se analizaron los valores obtenidos de valor mínimo y máximo de las bandas multiespectrales estudiadas y la concentración de SST. Lo anterior genera las bases para la caracterización de las reflectancias en los distintos cuerpos de agua (etapa 5) [20].

Resultados y discusión

Los tipos de ambiente encontrados en los estudios considerados en el presente proyecto corresponden en mayor número a lagos (1.6 % de la superficie), seguido de ríos y presas (98 % de superficie en conjunto; Figura 3).

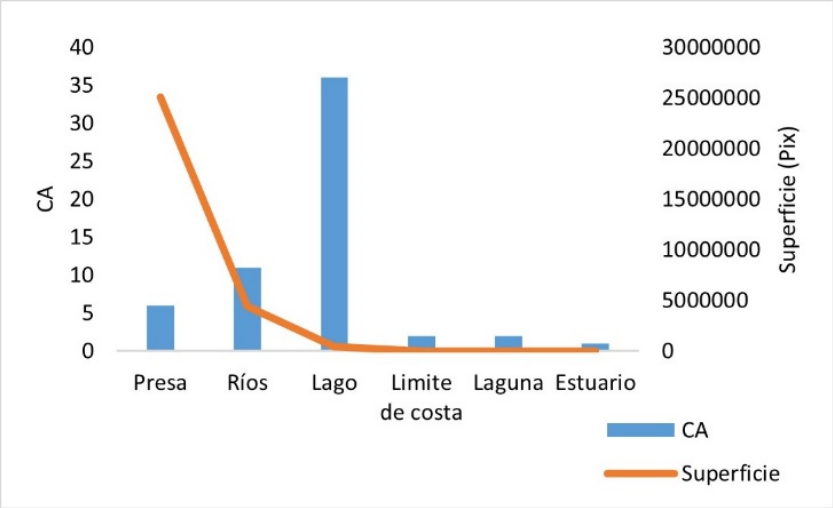


FIGURA 3. *Ecosistemas asociados a los cuerpos de agua considerados en el proyecto y areas de los cuerpos de agua.*

A manera comparativa los modelos que se diseñaron para estimar los SST corresponden en su mayoría a modelos lineales (37.5 %), seguidos por los modelos exponenciales (25 %) y polinómicos (14.6 %). En una proporción menor se encontraron los logarítmicos (2.1 %). Dichos comportamientos sugeridos en los modelos pueden deberse a la naturaleza física de los CA, como lo indican diversos autores que ha estudiado la calidad del agua con sensores remotos [21, 22](Figura 4). De acuerdo con los resultados mayores en los modelos lineales y exponenciales, es necesario que, en las integraciones regionales para la generación de modelos, se identifiquen las estimaciones mínimas y máximas ya que el tipo de modelo juega un papel importante en los extremos y genera dificultad si el modelo estudiado no está calibrado para todos los meses.

En relación con la cantidad de imágenes trabajadas, 146 imágenes corresponden al sensor Landsat 8 OLI (L8) y 48 al sensor Sentinel 2A (S2). Para la homologación de las longitudes de onda se utilizaron los correspondientes para cada sensor B1_L8= B1_S2, B2_L8= B2_S2, B3_L8= B3_L8, B4_L8= B4_S2,

https://doi.org/10.36677/ideaseningenieria.v1i2.20364 julio-diciembre 2023 ISSN: en trámite págs. 4- 18

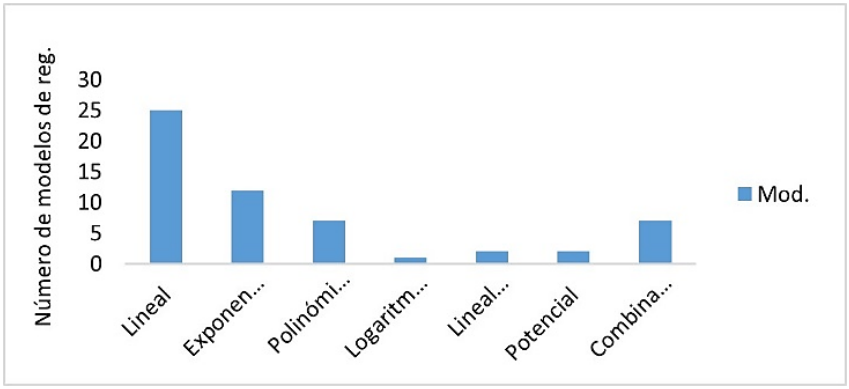


FIGURA 4. *Número de modelos de regresion simple y multiple encontrado en los cuerpos de agua estudiados. Simbologia: Modelos de regresión (Mod.).*

B5_L8= B8A_S2, B6_L8= B11_S2 (donde: L8= Landsat 8 OLI y S2=Sentinel 2 A).

Los resultados obtenidos del tratamiento de las imágenes corresponden a la corrección atmosférica de 48 CA, de las cuales el 91.1 % se trabajó con el modelo DOS de corrección atmosférica y 8.9 % con el modelo FLAASH. Para el caso de Sentinel la resolución se trabajó en función de la más fina (10m), para lograr lo anterior las bandas con resolución a 20 y 60 metros se aplicó un expandió con el escalar correspondiente para llegar a 10 metros (algoritmo expand de TerrSet) y para la selección de los pixeles se trabajó con el grid a 60 metros, para no repetir información que en un mismo cuadrante. Del total de población (aprox. 40,000,000 pixeles) se obtuvo un muestreo estratificado de 176,789 pixeles de reflectancia compuesto por las imágenes Sentinel y Landsat 8 OLI.

Los resultados obtenidos en la etapa 3 y 4 se enfocaron principalmente en las medidas de dispersión y tendencia central. De acuerdo con la Figura 5, el 83.3 % de los cuerpos de agua presentan similitudes en valores de 430-450 nm (banda 1) y de 530-590 nm (banda 3). En la longitud de 430-450 nm el intervalo se encuentra entre 0.934 y 0.06 $\left(\frac{w}{m^2*sr*\mu m}\right)$, en la 450-510 nm (B2) entre 0.96 y 0.00 $\left(\frac{w}{m^2*sr*\mu m}\right)$, para la longitud 530-590 nm (B3) entre 1.00 y 0.001$\left(\frac{w}{m^2*sr*\mu m}\right)$, la 640-670 (B4) 1.00 y 0.002 $\left(\frac{w}{m^2*sr*\mu m}\right)$, en la 850-880 nm (B5-L8, B8A-S2) 1.00 y 0.00 $\left(\frac{w}{m^2*sr*\mu m}\right)$; por último, en la (B6-L8, B11-S2) 0.994 y 0.00 $\left(\frac{w}{m^2*sr*\mu m}\right)$. En 8 CA se observó la mayor dispersión en los valores de estas bandas. Si bien, a mayor superficie del CA se presenta una mayor dispersión, en 16.6 % CA se observó una superficie relativamente grande con una dispersión más uniforme, mientras que, en 83.3 % CA cuya superficie fue pequeña en relación con el resto, se observó una dispersión hasta de 0.982 $\left(\frac{w}{m^2*sr*\mu m}\right)$ de rango en la reflectancia de la banda B4.

Para el caso de las bandas 4 y 5 se observó una dispersión más heterogénea en los valores de su reflectancia. En la banda 4 el rango se encuentra entre 0.98 $\left(\frac{w}{m^2*sr*\mu m}\right)$ para el 12.5 % de los CA, mientras

que en la banda 5 rango se encuentra entre 0.982 $\left(\frac{w}{m^2 * sr * \mu m}\right)$ para el 14.6 % de los CA (Figura 5).

En relación con la concentración de SST, 66.6 % de los cuerpos presentaron concentraciones similares (entre 0 y 200 mg/L). Los CA con la mayor dispersión en sus valores de concentraciones presentaron un rango entre 88 y 902 mg/L, i.e. 5 veces más amplio que en la mayoría de los CA.

La selección de estos modelos presenta la característica de tener un R^2 >0.65, RMSE <30.2 mg/L, (Nota: no todos los modelos aportan este estadístico, debido a la investigación de los autores), BIAS (32.7 mg/L, de acuerdo con los modelos que reportan este resultado), E (eficiencia de Nash-Sutcliffe; mayor a 0.9 en modelos que aporta este estadístico). Los datos anteriores validan la confiabilidad en las estimaciones que cada modelo. Con base en lo anterior, se extrajeron las estimaciones de cada CA considerando la fecha en la que los autores realizaron los estudios, tipo de sensor, etcétera (Figura 6). A partir de la cual se pudo observar que el 20.83 % de los CA presentan una dispersión elevada, mientras que el 54.16 % de CA, su dispersión es mínima por lo tanto la sensibilidad de estos es baja en función de las reflectancias utilizadas en los modelos. El resto de los CA su dispersión es intermedia (aproximadamente de +-120 mg/L de SST), lo cual significa que para el entendimiento de los datos se necesita estudiar a fondo cada variable regresora en función de sus coeficientes para su entendimiento regional.

De manera conjunta (Figura 7), es posible intuir que, al menos, los CA que se encuentran en intervalo de 0-200 mg/L de estimación pueden ser representados por algún modelo conjunto de estimación. Lo anterior dado que, la media global de estas variables es abarcada por el grado de dispersión presentada en los CA.

En el presente estudio la mayoría de los modelos están diseñados con base en las primeras 6 bandas multiespectrales en relación con el sensor L8 (para S2 los correlacionables a ella) para el estudio de los cuerpos de agua. Sin embargo, de acuerdo con la literatura y al análisis encontrado en el presente estudio las bandas que mejor determinan a los SST y con mayor diferencia de reflectancia entre ellas son B4 (640-670 nm), B5 (850-880 nm) y B6 (1570-1650 nm; Figura 8a) y con correlación aceptable para su análisis (Figura 8b). Las longitudes de onda mencionadas anteriormente, como se observa en la Figura 8a, presentan mayor correlación con las concentraciones de SST, y en relación con el sentido físico, la longitud de onda de 850-880nm (B5 o B8A) es la que mejor discrimina a los SST como lo muestran los datos obtenidos y las distintas bibliografías (Figura 8b).

A partir de lo anterior se crearon 3 categorías de concentraciones de SST. El primero corresponde al primer cuartil del conjunto de datos, la segunda categoría corresponde al intervalo del cuartil 1 al cuartil 3 y por último los que corresponden al cuartil 3 (Figuras 9a, 9b y 9c). De acuerdo con la Figura 8, la categoría 2 representa el 38 % de los cuerpos de agua, en las bandas 4, 5, 6 que discriminan mejor a los SST por lo tanto, se puede concluir que la mayoría de los modelos fueron calibrados para esas

https://doi.org/10.36677/ideaseningenieria.v1i2.20364 julio-diciembre 2023 ISSN: en trámite págs. 4- 18

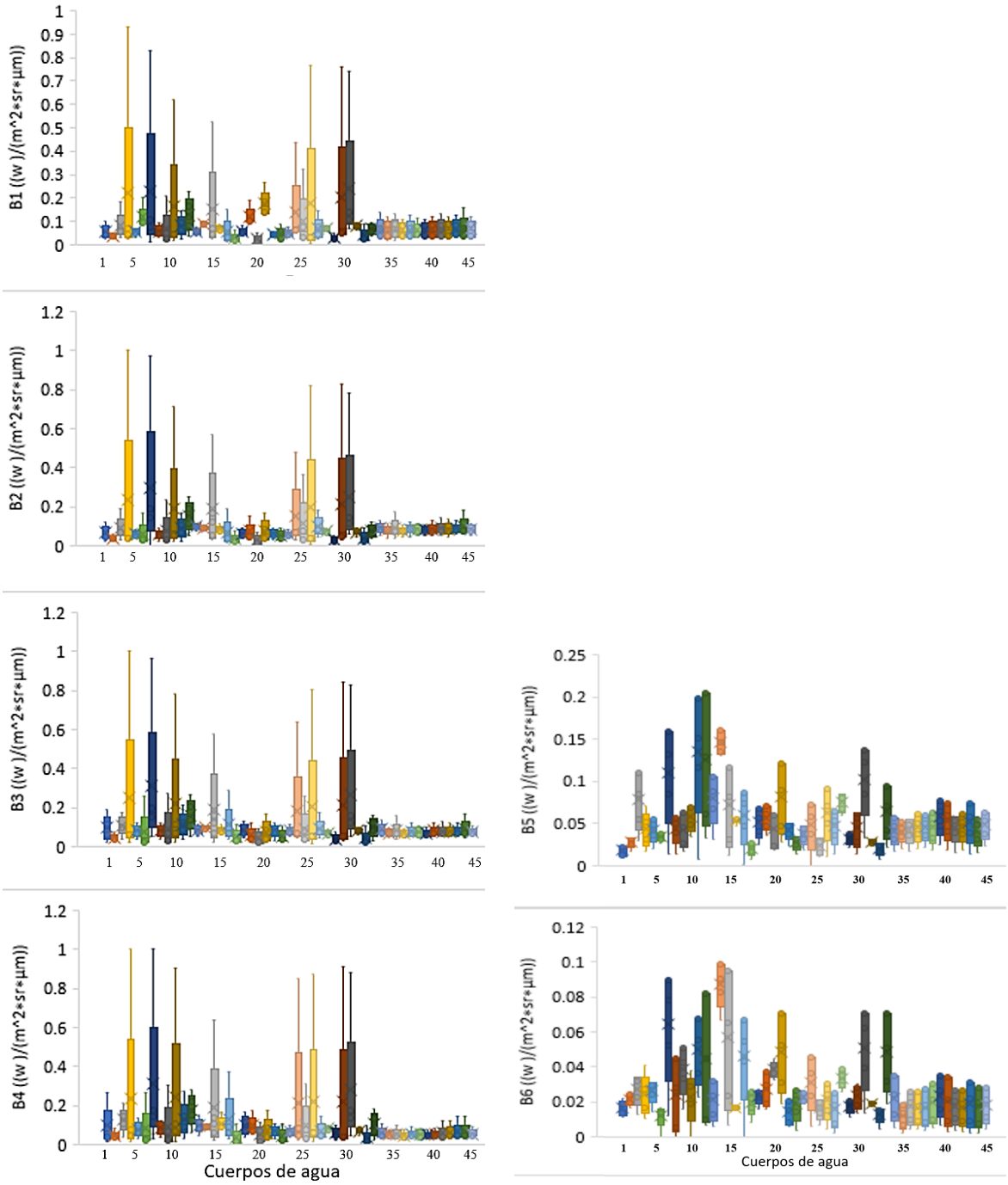


FIGURA 5. *Mapa de localización de agua continentales consideradas en el estudio.*

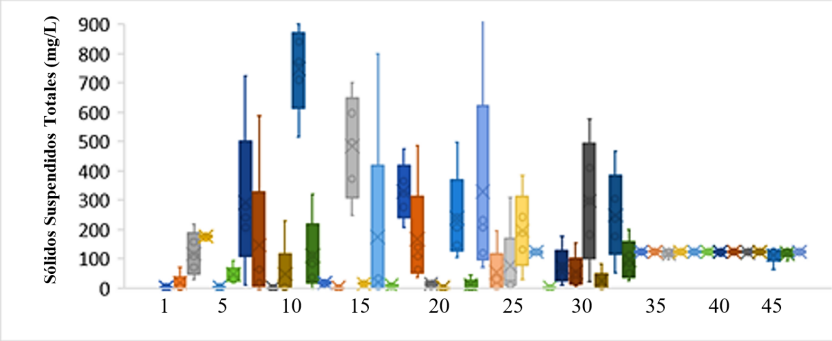


FIGURA 6. *Dispersión de las concentraciones de SST. En función de cada CA considerados en la investigación..*

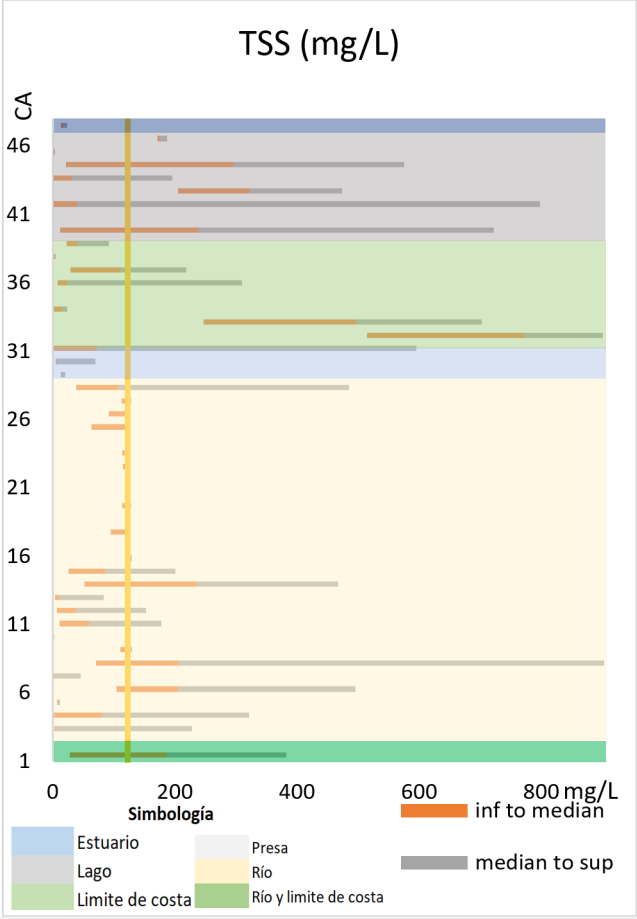


FIGURA 7. *Variación de media global en relación con la media de cada CA y secciones de acuerdo con el ambiente que presenta el CA.*

https://doi.org/10.36677/ideaseningenieria.v1i2.20364 julio-diciembre 2023 ISSN: en trámite págs. 4- 18

	SST	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
SST	1	0.135	0.249	0.266	0.253	0.307	0.216	0.128
B1		1.000	0.856	0.844	0.844	0.860	0.798	0.793
B2		1	1.000	0.936	0.831	0.853	0.790	0.677
B3				1.000	0.941	0.885	0.875	0.762
B4					1.000	0.908	0.893	0.830
B5						1.000	0.920	0.812
B6	A						1.000	0.894
B7								1.000

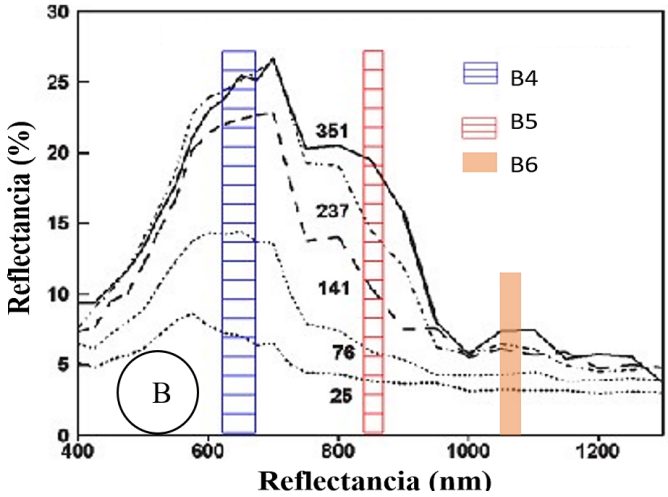


FIGURA 8. *Correlaciones entre bandas multiespectrales y SST. (Nota: para el caso de la B5, B6 y B7 incluye las equivalentes de Sentinel 2A de acuerdo con el CA y tipo de sensor utilizado en cada estudio). La sección de líneas son firmas espectrales a distintas concentraciones de SST.*

concentraciones, en esta categoría, al igual que el primero, la disparidad en las altas concentraciones de SST permanece de manera homogénea y paralela a la banda 4, 5, 6, con base en lo anterior, se genera una de las bases para que estudios próximos analicen la posibilidad en la creación de modelos integradores.

En la categoría 3, se presenta el menor porcentaje de los CA, lo anterior porque estos CA presentan dinámicas altas en las concentraciones de SST a diferencia del resto de CA. Por lo tanto, los coeficientes de las variables regresoras de los modelos tienen la función de predecir concentraciones con mayor variabilidad en el cuerpo de agua.

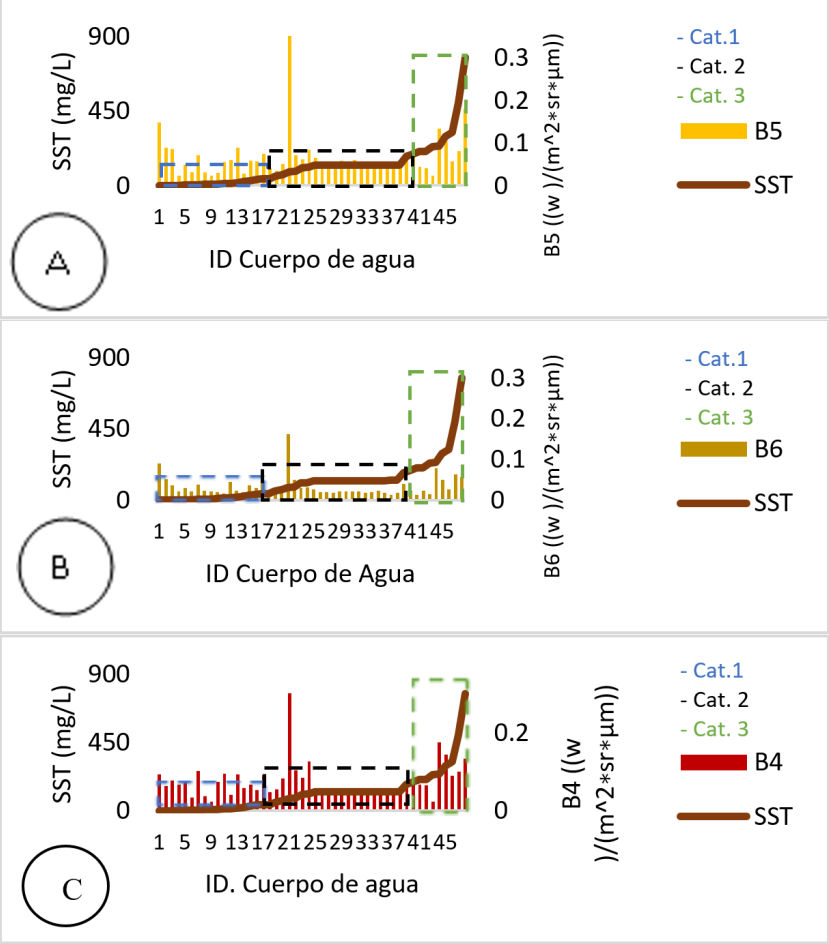


FIGURA 9. *Categoría de concentraciones de SST en función de una distribución normal.*

En relación con los modelos de regresión de los estudios encontrados requiere de profundización en el tema, ya que cada una de ellas presentan diferentes valores de calibración en cada variable regresora, además de ello, el origen de la pendiente presenta valores diversos en los modelos lineales, es decir, las estimaciones de SST en cada cuerpo de agua pueden tener comportamiento diferente por variabilidad

https://doi.org/10.36677/ideaseningenieria.v1i2.20364 julio-diciembre 2023 ISSN: en trámite págs. 4- 18

de concentraciones de SST a lo largo del cuerpo de agua o viceversa. En consecuencia, este punto es esencial para las siguientes investigaciones en calidad del agua con sensores remotos.

Conclusiones

El estudio de los sólidos suspendidos totales (SST) y las bandas multiespectrales del sensor Landsat 8 y Sentinel 2A, presentan características diferentes en distintos cuerpos de agua. Sin embargo, es posible inferir que algunos de ellos pueden ser representados por modelos conjuntos dadas las tendencias similares en las reflectancias recolectadas por las bandas, así como en las concentraciones de SST.

En otras palabras, en la mayoría de los modelos de regresión para estimar SST son consideradas las bandas 3, 4, 5 y 6, por lo que la dispersión homogénea observada en las bandas 4, 5 y 6 (Nota: la B3 no se integró en las estadísticas debido a que está altamente correlacionada con la B6 (R^2=0.875), permite abrir las puertas a las investigaciones en geoestadística para el desarrollo de un modelo útil para cuerpos de agua que comparten características similares. Lo anterior se fundamenta en los coeficientes de correlación obtenidos de estas longitudes de onda con la concentración de SST y a las bibliografías desarrolladas en los últimos años. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, las bandas 4, 5 y 6 que presentan dispersión heterogénea, pueden alterar la precisión del modelo conjunto, los rangos de estimaciones aceptables deben considerar los valores máximos (outliers) y atípicos encontrados en los valores de reflectancias de lo contrario puede ocasionar disparidad en las estimaciones de SST.

En cuanto a los grupos, se encontraron tres categorías en comparación de las reflectancias y las concentraciones de SST, el primer grupo está asociado con CA con contracciones menor a 125 mg/L; mientras tanto la segunda categoría representa la mayoría de los CA con un 54 %, por último la tercera categoría está integrada por cuerpos de agua cuya disparidad de concentraciones de SST son estimados de esta forma debido a la calibración de los coeficientes de los modelos y a las condiciones ambientales de los cuerpos de agua.

Referencias

[1] L. H. S. Rotta et al. Atmospheric correction assessment of SPOT-6 image and its influence on models to estimate column transparency in tropical reservoir. *Remote Sensing. Appl.: Soc. Environ*, vol. 4, pp. 158–166, 2016. DOI: 10.1016/j.rsase.2016.09.001

[2] Z. Zheng et al. Landsat-based long-term monitoring of total suspended matter concentration pattern change in the wet season for Dongting Lake, China. *Remote Sensing. Appl.: Soc. Environ*, vol. 7, pp. 13975–13999, 2015. DOI: 10.3390/rs71013975

[3] T. S. Bianchi and M. A. Allison. Large-river delta-front estuaries as natural "recorders" of global environmental change. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 106, pp. 8085–8092, 2009. DOI: 10.1073/pnas.0812878106

[4] E. P. L. Elias et al. Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Neth. J. Geosci.-Geol. En Mijnb.*, vol. 91, pp. 293–310, 2012. DOI: 10.1017/S0016774600000457

[5] N. M. R. Bernardo et al. Evaluation of the suitability of MODIS, OLCI, and OLI for mapping the distribution of total suspended matter in the Barra Bonita Reservoir (Tiete River, Brazil). *Rem. Sens. Appl.: Soc. Environ*, vol. 4, pp. 68–82, 2016. DOI: 10.1016/j.rsase.2016.06.002

[6] Z. Wang et al. Assessments of surface water quality through the use of multivariate statistical techniques: A case study for the watershed of the Yuqiao Reservoir, China. *Frontiers in Environmental Science*, vol. 1, pp. 1–15, 2023. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1107591

[7] R. E. Walpole and R. H. Myers. *Probabilidad y estadísticas para ingenieros*. 1989.

[8] A. Cruz. Caracterización fisicoquímica de cuerpos de aguas superficiales a través de sensores remotos. Caso Presa J. A. A. México. 2019.

[9] Y. Zhang et al. A Landsat 8 OLI-Based, Semianalytical Model for Estimating the Total Suspended Matter Concentration in the Slightly Turbid Xin'anjiang Reservoir (China). *IEEE Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing*, vol. 9, no. 1, pp. 4347–4365, 2016. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2509469

[10] W. Navidi. *Estadísticas para ingenieros y científicos*. 2006.

[11] C. Pérez. Herramientas estadísticas para la investigación y diagnóstico en enfermedades tropicales-Análisis clústers. 2017.

https://doi.org/10.36677/ideaseningenieria.v1i2.20364 julio-diciembre 2023 ISSN: en trámite págs. 4- 18

[12] V. Sundarabalan et al. Robust algorithm for estimating total suspended solids (TSS) in inland and nearshore coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, vol. 246, no. 11768, pp. 1–18, 2020. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111768

[13] H. Wibisana, B. Muljo, and U. Lasminto. Mathematical Models Selection on the Total Suspended Solid Mapping using Reflective Satellite Image Data. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 185–190, 2020.

[14] N. B. Chang, S. Imen, and B. Vannah. Remote Sensing for Monitoring Surface Water Quality Status and Ecosystem State in Relation to the Nutrient Cycle: A 40-Year Perspective. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 107295, pp. 101–166, 2015. DOI: 10.1080/10643389.2013.829981

[15] L. Clarck. Manual IDRISI. 1993.

[16] J. Serrano, S. Shahidian, and J. M. Masquez Da Silva. Evaluation of Normalizad Difference Water Index as a Tool for Monitoring pasture seasonal and inter-annual variability in a mediterranean agro-silvo-pastoral system. *water*, vol. 11, no. 1, pp. 1–16, 2019. DOI: 10.3390/w11010062

[17] C. R. Fonseca et al. Multiclass Data Organizer-TerrSet por IITCA-UAEM. 2021.

[18] V. Vargas. *Estádistica descriptiva para ingeniería ambiental con SPSS*. 2007.

[19] IBM SPSS Statistical. Manual de usuario de estadísticas con IBM SPSS Statistical. 2022.

[20] C. A. T. Sutari, M. V. Perk, and H. Middelkoop. Estimation of suspended sediment concentrations in the Rhine River using Landsat Satellite Images. *The 3rd Environmental Resources Management in Global Region*, vol. 451, no. 2020, pp. 1–9, 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/451/1/012079

[21] H. Wang et al. Consistency of Suspended Particulate Matter Concentration in Turbid Water Retrieved from Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI Sensors. *Sensor*, vol. 21, no. 1662, pp. 1–15, 2021. DOI: 10.3390/s21051662

[22] E. Ciancia et al. Modeling and Multi-Temporal Characterization of Total Suspended Matter by the Combined Use of Sentinel 2-MSI and Landsat 8-OLI Data: The Pertusillo Lake Case Study (Italy). *Remote Sensing*, vol. 12, no. 2147, 2022.