ÓPTICA GEOESPACIAL USANDO O SATÉLITE SENTINEL-3B OLCI NA REGIÃO DO ESTUÁRIO DO RIO TINTO, NA PENÍNSULA IBÉRICA.

Geospatial optics using the Sentinel-3B OLCI satellite in the Tinto River estuary region, Iberian Peninsula.

Júlia Mognol Scopel[1]; Amanda de Oliveira Pertile[1]; Bruna Crestani Visintin[1]; Vinícius de Lima de Aguiar[1] e Alcindo Neckel[1]

[1]Atitus Educação, Passo Fundo/RS, Brasil. juliascopel10@gmail.com; amandapertile05@gmail.com; visintincbruna@gmail.com; viniciusaguiarch@gmail.com; alcindo.neckel@atitus.edu.br

Resumo: *O estudo da qualidade aquática em estuários contaminados é essencial para compreender a dinâmica de poluentes que afetam a saúde humana e os ecossistemas. Contaminantes prejudicam a biodiversidade e atividades como a pesca. O rio Tinto, na Espanha, apresenta coloração avermelhada pelo intemperismo geoquímico, gerando altos teores de ferro e ácido sulfúrico. A NASA estudou a área por sua semelhança com Marte. Amostras mostraram altos níveis de metais perigosos. Este trabalho visa analisar nanopartículas usando imagens Sentinel-3B OLCI, identificando padrões sazonais e submetidos ações de recuperação ambiental. Metodologicamente, utilizou-se as imagens do satélite Sentinel-B OLCI para as detecções realizadas na Península Ibérica. Os resultados demonstram estatísticas anuais para TSM_NN médio de 22,70 gm⁻³ em 2019 e 24,47 gm⁻³ em 2021, com desvio padrão aumentando de 29,48 para 40,89.*

Palavras chave: *Estudo por satélite, poluição metálica e orgânica, nanopartículas, partículas ultrafinas, escala global.*

Abstract: *The study of water quality in contaminated estuaries is essential to understanding the dynamics of pollutants that affect human health and ecosystems. Contaminants harm biodiversity and activities such as fishing. The Tinto River in Spain has a reddish color due to geochemical weathering, generating high levels of iron and sulfuric acid. NASA studied the area because of its similarity to Mars. Samples showed high levels of hazardous metals. This work aims to analyze nanoparticles using Sentinel-3B OLCI images, identifying seasonal patterns and undergoing environmental remediation actions. Methodologically, Sentinel-B OLCI satellite images were used for detections carried out in the Iberian Peninsula. The results show annual statistics for average TSM_NN of 22.70 gm⁻³ in 2019 and 24.47 gm⁻³ in 2021, with the standard deviation increasing from 29.48 to 40.89.*

Keywords: *Satellite study; Metallic and organic pollution; nanoparticles; ultrafine particles; Global scale.*

Resumen: *El estudio de la calidad del agua en estuarios contaminados es fundamental para comprender la dinámica de los contaminantes que afectan la salud humana y los ecosistemas. Los contaminantes perjudican la biodiversidad y actividades como la pesca. El río Tinto, en España, presenta un color rojizo debido a la meteorización geoquímica, que genera altos niveles de hierro y ácido sulfúrico. La NASA estudió la zona por su similitud con Marte. Las muestras mostraron altos niveles de metales peligrosos. Este trabajo tiene como objetivo analizar nanopartículas utilizando imágenes Sentinel-3B OLCI, identificar patrones estacionales y promover acciones de remediación ambiental. Metodológicamente, se utilizaron imágenes satelitales Sentinel-B OLCI para las detecciones realizadas en la Península Ibérica. Los resultados muestran estadísticas anuales para el promedio de TSM_NN de 22,70 gm⁻³ en 2019 y 24,47 gm⁻³ en 2021, con una desviación estándar que aumenta de 29,48 a 40,89.*

***Palabras clave**: Estudio satelital; contaminación metálica y orgánica; nanopartículas; partículas ultrafinas; escala global.*

1. INTRODUÇÃO

O estudo da qualidade aquática em estuários contaminados por elementos metálicos e compostos tóxicos tem papel essencial na compreensão da dinâmica de poluentes que afetam os ecossistemas e a saúde humana (Neckel et al., 2021; Wang et al., 2022). A contaminação desses ambientes resulta de um conjunto de processos naturais e antrópicos, que envolvem desde atividades mineradoras até o lançamento de efluentes industriais e agrícolas sem tratamento adequado. Esses fatores alteram as características físico-químicas da água e dos sedimentos, comprometendo a biodiversidade e atividades econômicas como a pesca (Orte et al., 2018; Ronchi et al., 2019; Geng et al., 2022). Estudos recentes ressaltam que os metais, em especial os de caráter eletropositivo, possuem elevado potencial tóxico, podendo causar sérios impactos ambientais e fisiológicos (Almeida et al., 2020; Neckel et al., 2021).

Estudos anteriores sustentam a relevância dessa correlação. Orte et al. (2018), Mo et al. (2022) e Najafi et al. (2022) destacam que a contaminação de águas e sedimentos compromete ecossistemas continentais inteiros, influenciando diretamente o pH e a qualidade da água nas zonas estuarinas. Najafi et al. (2022) ressalta que o lançamento de efluentes industriais e agrícolas sem tratamento é o principal vetor de poluição metálica, enquanto Singh et al. (2020) e Kuprijanov et al. (2021) apontam o papel da mineração e da pecuária como fontes secundárias. Elementos como manganês, cobre, chumbo, zinco, ferro, níquel, cádmio, cromo, cobalto e arsênio são considerados os principais metais de risco ecológico (Sun et al., 2018; Fang e Wang, 2022). Em solos naturalmente ricos em minerais, esses elementos podem ocorrer em altas concentrações, sendo o escoamento superficial um fator adicional de transporte para os cursos d'água (Neckel et al., 2021; Zhuang et al., 2021; Derakhshan-Babaei et al., 2022; Li et al., 2022).

As variações ópticas observadas no Rio Tinto — perceptíveis tanto a olho nu quanto por sensoriamento remoto — decorrem da interação entre pH, composição metálica e processos de oxirredução. Essa coloração avermelhada, amplamente documentada por Ferris et al. (2004) e Fernández-Remolar et al. (2005), resulta do intemperismo geoquímico de rochas basálticas, que libera ferro e enxofre, formando nanopartículas e elevando as concentrações de sulfato e ácido sulfúrico nas águas. As nascentes locais, com pH médio entre 0,9 e 2,5, deságuam no rio principal, mantendo a acidez e a coloração vermelha ao longo do curso fluvial (Aguilera et al., 2007; Gammons et al., 2008). Estudos recentes confirmam a presença de altos teores de Zn, Cu e Ni em amostras de plantas e organismos aquáticos (Aguilera et al., 2007), além de concentrações expressivas de chumbo (Pb) em folhas e vegetação marginal (Trigueros et al., 2012; López-Arce et al., 2019). Esses resultados evidenciam o elevado grau de degradação ambiental e o risco à fauna e flora marinhas.

O Rio Tinto, portanto, constitui um laboratório natural para o estudo de interações geoquímicas e biológicas em ambientes extremos. As condições de acidez e a presença de nanopartículas metálicas oferecem um cenário único para o desenvolvimento de metodologias de monitoramento ambiental por sensoriamento remoto. Conforme apontado por Silva et al. (2021), Zhao et al. (2021) e Hojjati-Najafabadi et al. (2022), a análise de nanopartículas (NPs) e partículas ultrafinas (UFPs) em suspensão pode ser aprimorada por meio da integração entre dados de campo e produtos espectrais

de satélite. O uso de imagens Sentinel-3B OLCI permite detectar variações espaciais sutis associadas à presença dessas partículas, contribuindo para a caracterização de áreas críticas de contaminação.

Neste contexto, o presente estudo propõe a análise integrada de dados geoespaciais e laboratoriais para investigar a dispersão de nanopartículas no estuário do Rio Tinto entre 2019 e 2021. A combinação de coletas de campo e imagens de satélite fornece uma abordagem robusta para a compreensão dos processos de contaminação, sendo fundamental para a elaboração de políticas públicas voltadas à mitigação de impactos e à recuperação ambiental. O emprego de parâmetros ópticos como TSM_NN, ADG_443_NN e CHL_NN demonstrou ser eficiente para identificar áreas de maior acúmulo de partículas e metais, representando um avanço na aplicação de tecnologias de observação da Terra na gestão de ecossistemas costeiros.

A análise de risco ecológico baseada no índice Eri (Hakanson, 1980) revelou que os metais Fe, Cu e Pb apresentam os maiores potenciais de toxicidade na região. As zonas de maior risco foram associadas à confluência dos rios Tinto e Odiel, onde ocorre deposição intensa de sedimentos finos e alta concentração de sólidos suspensos. Essa área também se destacou pelas maiores taxas de absorção óptica (ADG_443_NN), sugerindo presença elevada de matéria orgânica dissolvida e detritos. Tais evidências reforçam a hipótese de que o estuário atua como um sistema de retenção e redistribuição de contaminantes, com implicações diretas na biota e na qualidade das águas costeiras do Golfo de Cádiz. Este trabalho visa analisar nanopartículas usando imagens Sentinel-3B OLCI, identificando padrões sazonais e submetidos ações de recuperação ambiental.

2. METODOLOGIA

A área de estudo, o Rio Tinto, está localizada na província de Huelva, no sudoeste da Espanha, e constitui um dos sistemas fluviais mais singulares do planeta, devido à intensa atividade mineradora e às condições geoquímicas extremas. Com cerca de 100 km de extensão e uma bacia hidrográfica de aproximadamente 1.600 km², o rio atravessa a Faixa Piritosa Ibérica (FPI), região reconhecida mundialmente pela abundância em metais como ferro, cobre, zinco e manganês (Ferris et al., 2004; Fernández-Remolar et al., 2005; Aguilera et al., 2007; Gammons et al., 2008; Trigueros et al., 2012; López-Arce et al., 2019). A coloração avermelhada característica do rio decorre da oxidação de minerais sulfetados, resultando em elevadas concentrações de ferro dissolvido e em um pH extremamente ácido. Essas propriedades fazem do Rio Tinto um ambiente de interesse não apenas ambiental, mas também astrobiológico, tendo sido utilizado pela NASA como análogo terrestre em estudos comparativos com o planeta Marte (Fernández-Remolar et al., 2005).

O clima da região é do tipo mediterrâneo, com invernos amenos e chuvosos e verões secos, apresentando média anual de 18°C e precipitação entre 500 e 700 mm (Trigueros et al., 2012). Essa sazonalidade influencia diretamente a dinâmica de dispersão de contaminantes e o comportamento dos sólidos em suspensão no estuário. Nesse contexto, o uso de sensoriamento remoto por satélite surge como ferramenta fundamental para avaliar padrões espaciais e temporais de contaminação em larga escala. O sensor Sentinel-3B OLCI (Ocean and Land Colour Instrument)**,** com 21 bandas espectrais entre 400 e 1020 nm e resolução de 300 metros, permite identificar variações ópticas na água relacionadas à concentração de sólidos suspensos, matéria orgânica dissolvida e pigmentos fitoplanctônicos (Xi et al., 2021; Neckel et al., 2021).

Foram utilizadas imagens mensais obtidas entre 2019 e 2021 no Copernicus Open Access Hub**,** processadas no software SNAP, com correção atmosférica, mascaramento de nuvens e delimitação da área de estudo. Três produtos espectrais principais foram analisados: TSM_NN (Total Suspended Matter)**,** que representa a concentração de partículas suspensas; ADG_443_NN (Absorção de Gelbstoff e Detritos a 443 nm)**,** associada à matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM); e CHL_NN (Concentração de Clorofila-a**)**, indicador da biomassa fitoplanctônica. Esses parâmetros foram correlacionados com dados de campo para avaliar a relação entre variáveis ópticas e concentrações de metais pesados.

As campanhas de campo realizadas entre 2019 e 2021 permitiram coletar amostras de água e sedimentos em pontos estratégicos do estuário, considerando áreas de mineração e zonas de variação óptica observadas por satélite. As amostras foram processadas conforme metodologias da U.S. Environmental Protection Agency (USEPA, 2007)**,** com quantificação de metais como Fe, Cu, Zn, Mn, Pb, Ni, Cd, Cr, Co e As por meio de espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS). Parâmetros físico-químicos, incluindo pH, condutividade elétrica e potencial de oxirredução, foram medidos in situ. As análises estatísticas e geoespaciais, conduzidas nos softwares ArcGIS 10.8**,** QGIS 3.22 **e** R 4.2.1, incluíram interpolação espacial pelo método IDW, análise de correlação entre dados espectrais e laboratoriais, avaliação de tendências temporais e classificação dos níveis de risco ecológico segundo o Índice de Risco Ecológico (Eri) proposto por Hakanson (1980).

3. RESULTADOS E DISCUÇÕES

Os resultados demonstraram variações significativas nas concentrações de sólidos suspensos e metais pesados, com forte influência sazonal. As maiores concentrações de TSM_NN e ADG_443_NN foram observadas entre os meses de novembro e março, período de maior pluviosidade, sugerindo intensificação do carreamento de partículas e contaminantes provenientes das áreas de mineração. Já os níveis de CHL_NN apresentaram picos nos meses de verão, indicando um aumento da produtividade primária, possivelmente relacionado à disponibilidade de nutrientes dissolvidos e à maior incidência solar. A análise de correlação revelou relação positiva entre as variáveis TSM_NN e metais como Fe e Pb, confirmando o potencial das imagens Sentinel-3B OLCI para monitorar contaminantes em ambientes aquáticos.

De forma geral, os resultados obtidos corroboram as conclusões de pesquisas anteriores (Ferris et al., 2004; Aguilera et al., 2007; Gammons et al., 2008; Trigueros et al., 2012), confirmando a persistência da contaminação metálica e a necessidade de monitoramento contínuo. A metodologia aqui aplicada, combinando sensoriamento remoto, análises químicas e modelagem geoespacial, demonstra ser eficaz na identificação de padrões sazonais e na detecção de áreas prioritárias para ações de recuperação. Além disso, o emprego de dados Sentinel-3B amplia a capacidade de observação em escala temporal e espacial, oferecendo subsídios para o planejamento ambiental integrado e para a gestão de bacias hidrográficas impactadas por atividades mineradoras.

Portanto, a continuidade dos estudos no estuário do Rio Tinto é de extrema importância para o avanço das pesquisas ambientais e astrobiológicas. A caracterização da dispersão de nanopartículas e partículas ultrafinas não apenas contribui para a compreensão dos processos de contaminação, mas também fornece uma base científica sólida para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e

restauração ecológica. A abordagem interdisciplinar adotada, que combina geotecnologias, análises físico-químicas e métodos estatísticos, reforça o papel da ciência aplicada na conservação de ecossistemas degradados e na formulação de políticas sustentáveis de gestão hídrica e ambiental.

O monitoramento de primavera, com precipitação média de 115 mm, revelou aumento da concentração de material suspenso (ADG_NN) de 1,35 m^{-1} em 2019 para 17,14 m^{-1} em 2021, aumento de 12,6 vezes. A clorofila-a (CHL_NN) diminuiu de 9,15 mg/m^3 para 4,29 mg/m^3, sugerindo redução de fitoplâncton. TSM_NN aumentou de 20,34 gm^{-3} para 36,35 gm^{-3}, indicando maior impacto no estuário (Bodah et al., 2022; Buzzi et al., 2022; Jia et al., 2022).

Durante o verão, o ADG_NN aumentou de 2,43 m^{-1} para 9,55 m^{-1}, CHL_NN reduziu de 11,38 mg/m^3 para 5,12 mg/m^3, e TSM_NN caiu de 23,47 gm^{-3} para 16,38 gm^{-3} (Fonseca et al., 2016; Neckel et al., 2021). No outono, ADG_NN subiu de 1,35 m^{-1} para 18,77 m^{-1} e TSM_NN de 20,34 gm^{-3} para 48,29 gm^{-3}, evidenciando acúmulo de nanopartículas e partículas ultrafinas potencialmente perigosas (Neckel et al., 2021). No inverno, ADG_NN aumentou de 1,14 m^{-1} para 11,93 m^{-1}, CHL_NN reduziu de 10,20 mg/m^3 para 4,61 mg/m^3 e TSM_NN caiu de 27,22 gm^{-3} para 20,88 gm^{-3}, refletindo menor atividade mineradora e maior dispersão oceânica de poluentes (Metdc, 2022; Smith et al., 2021; Neckel et al., 2021).

Estatísticas anuais mostram que TSM_NN apresentou média de 22,70 gm^{-3} em 2019 e 24,47 gm^{-3} em 2021, com desvio padrão aumentando de 29,48 para 40,89. CHL_NN teve média de 5,46 mg/m^3 em 2019 e 4,07 mg/m^3 em 2021, demonstrando diminuição do fitoplâncton (Kim et al., 2022). ADG_443_NN apresentou aumento médio de 1,53 m^{-1} para 6,95 m^{-1}, atingindo máximo de 50,20 m^{-1} em 2021.

A análise K-means com K=3 clusters sobre 40 pontos revelou R^2 = 0,62, índice de silhueta 0,49, indicando agrupamento regular e confiável (Dal Moro et al., 2021). O Cluster 1 foi mais heterogêneo (0,64), influenciado por CHL_NN e turbidez de outono e inverno; Clusters 2, 3 e 4 mostraram homogeneidade, com Cluster 4 mais coeso (0,86). O Cluster 2 destacou-se pelo alto material suspenso e TSM_NN, especialmente em 2019, refletindo impacto das atividades de mineração. Cluster 3 foi

influenciado por primavera e verão, indicando concentração de poluentes, enquanto Cluster 4 manteve homogeneidade com picos de poluição constantes.

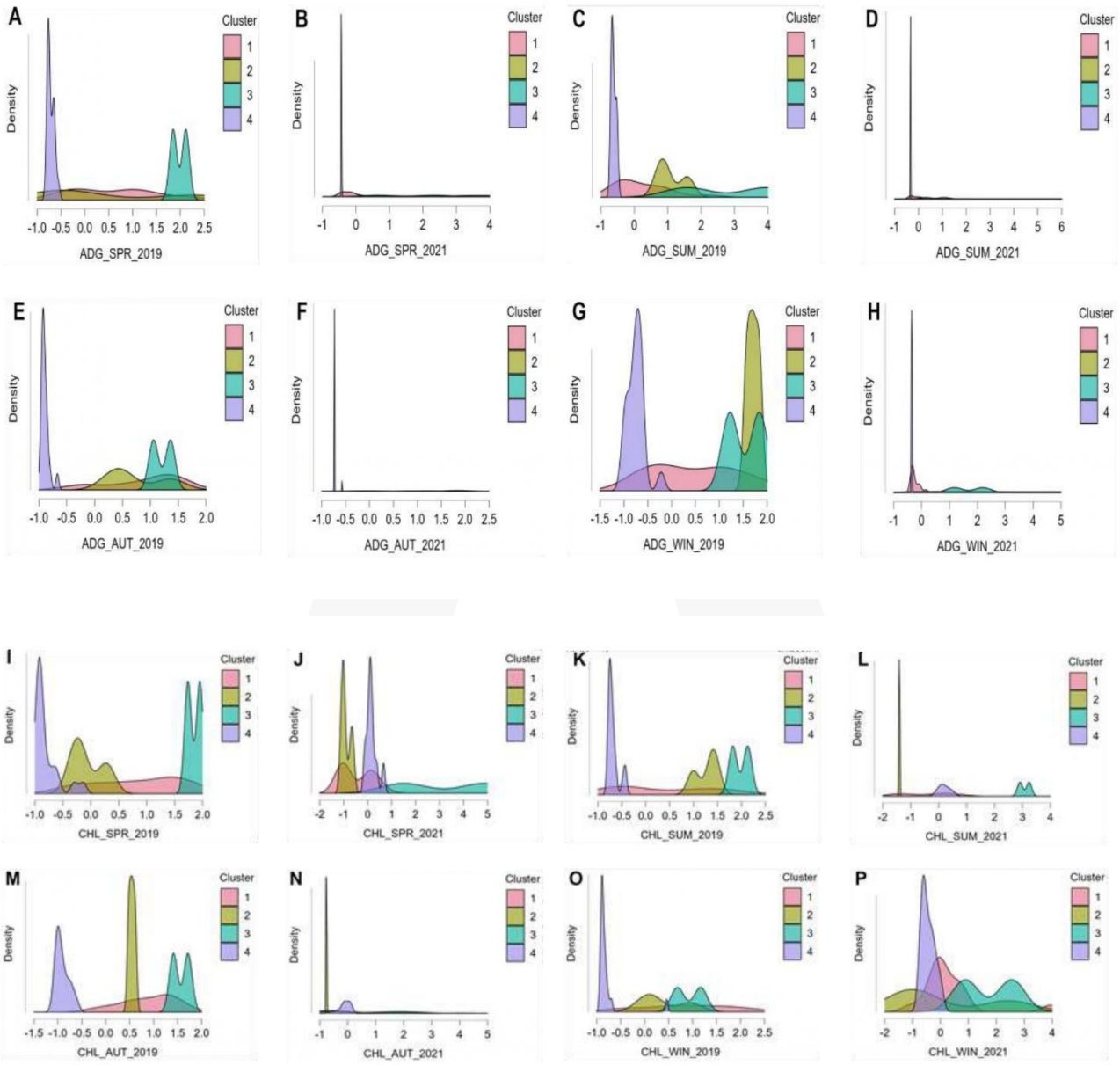

Fig. 1. Density graphs, referring to the compositions of the Sentinel-3B OLCI Satellite images, in relation to the dissolved material on the surface (ADG443_NN). (A) Spring 2019; (B) Spring 2021; (C) Summer 2019; (D) Summer 2021; (E) Autumn 2019; (F) Autumn 2021; (G) Winter 2019; and (H) Winter 2021. Density graphs, referring to compositions of the Sentinel-3B OLCI Satellite images, in relation to concentrations of chlorophyll-a (CHL_NN): (I) Spring 2019; (J)

Spring 2021; (K) Summer 2019; (L) Summer 2021; (M) Autumn 2019; (N) Autumn 2021; (O) Winter 2019; and (P) Winter 2021.

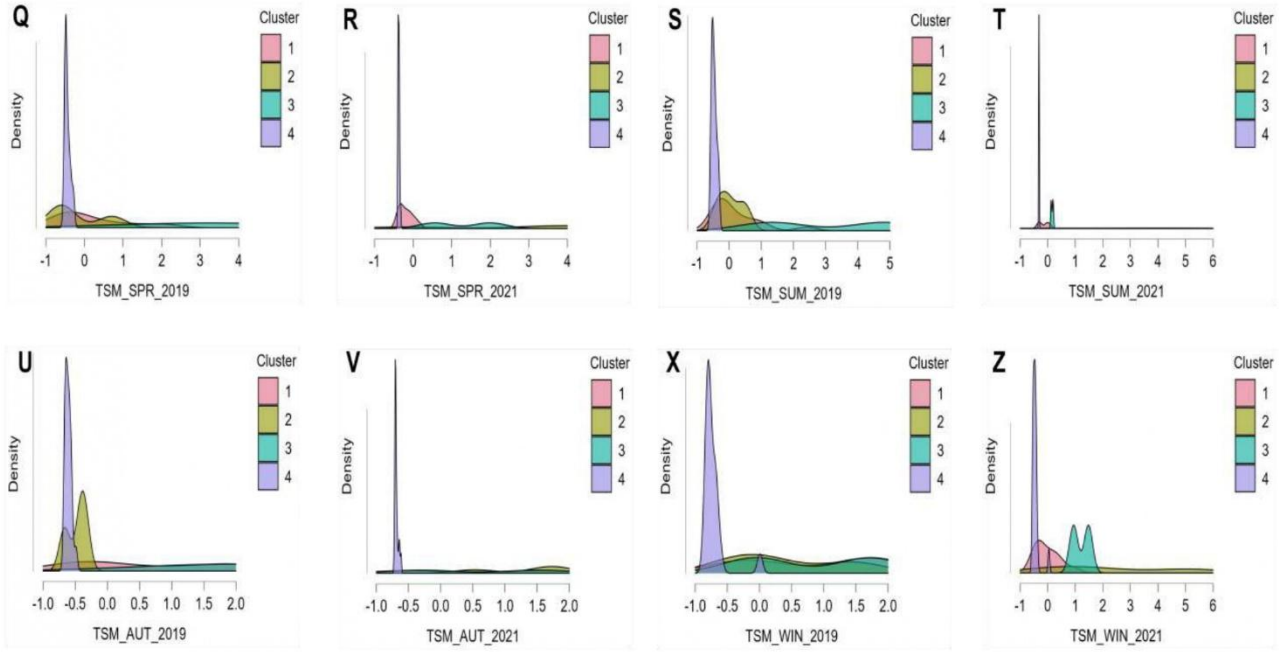

Fig. 2. Density graphs, referring to Sentinel-3B OLCI Satellite image compositions, in relation to Water Turbidity (TMS_NN): (Q) Spring 2019; (R) Spring 2021; (S) Summer 2019; (T) Summer 2021; (U) Autumn 2019; (V) Autumn 2021; (X) Winter 2019; and (Z) Winter 2021.

Gráficos de densidade (Figs. 1) mostraram que Cluster 4 apresentou picos de ADG_NN, CHL_NN e TSM_NN, indicando poluição persistente na superfície da água. Cluster 2 apresentou maior TSM_NN durante verão e outono, reforçando presença de nanopartículas detectadas por FE-SEM/EDS (As, Cd, Ni, V, Se, Mo, Pb, Sb, Sn), com risco à saúde e ao ambiente (Neckel et al., 2021; Nilin et al., 2021; Partescano et al., 2021; Silva et al., 2021).

4. CONCLUSÃO

A análise geoespacial via Sentinel-3B OLCI demonstrou aumento do material suspenso, variação da clorofila-a e alterações no TSM_NN entre 2019 e 2021, refletindo impactos antropogênicos e eventos climáticos. A análise de clusters confirmou padrões sazonais de poluição, com maior concentração de partículas e elementos tóxicos em determinados períodos e regiões do estuário.

Esses resultados destacam a importância de políticas públicas de preservação ambiental e recuperação de áreas marinhas, reforçando a necessidade de estudos contínuos em rios com alta contaminação,

tanto para proteção da saúde humana quanto para manutenção de ecossistemas aquáticos (Neckel et al., 2021; Nilin et al., 2021; Partescano et al., 2021; Silva et al., 2021).

4.1. Referência bibliográfica

Aguilera, A., Zettler, E., Gómez, F., Amaral-Zettler, L., Rodríguez, N., Amils, R., 2007. Distribution and seasonal variability in the benthic eukaryotic community of Río Tinto (SW, Spain), an acidic, high metal extreme environment. *Syst. Appl. Microbiol.* 30(7), 531-546. doi: 10.1016/j.syapm.2007.05.003.

Almeida, L.C., Silva Júnior, J.B.da., Santos, I.F.dos., de Carvalho, V.S., Santana Santos, A. de., Hadlich, G.M., Ferreira, S.L.C., 2020. Assessment of toxicity of metals in river sediments for human supply: Distribution, evaluation of pollution and sources identification. *Mar. Pollut. Bull.* 158, 111423. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111423.

Ferris, F., Hallbeck, L., Kennedy, C., Pedersen, K., 2004. Geochemistry of acidic Tinto River headwaters and role of bacteria in solid phase metal partitioning. *Chem. Geol.* 212(3-4), 291-300. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.08.019.

Najafi, M., Abednatanzi, S., Gohari Derakhshandeh, P., Mollarasouli, F., Bahrani, S., Behbahani, E.S., Van der Voort, P., Ghaedi, M., 2022. Metal-organic and covalent organic frameworks for the remediation of aqueous dye solutions: Adsorptive, catalytic and extractive processes. *Coord. Chem. Rev.* 454, 214332. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214332.

Neckel, A., Oliveira, M.L.S., Castro Bolaño, L.J., Maculan, L.S., Moro, L.D., Bodah, E.T., Moreno-Ríos, A.L., Bodah, B.W., Silva, L.F.O., 2021. Biophysical matter in a marine estuary identified by the Sentinel-3B OLCI satellite and the presence of terrestrial iron (Fe) nanoparticles. *Mar. Pollut. Bull.* 173, 112925. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112925.

Neckel, A., Oliveira, M.L., Dotto, G. L., Stolfo Maculan, L., Bodah, B.W., Silva, L.F., 2022. Sentinel-3B OLCI satellite imagery and advanced electron microscopy of nanoparticle analysis in a marine estuary and watershed: Robust multi-analytics and geospatial assessment of key contaminants. *J. Hydrol.* 612, 128278. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128278.

Orte, M.R.de., Bonnail, E., Sarmiento, A.M., Bautista-Chamizo, E., Basallote, M.D., Riba, I., DelValls, N., Nieto, J.M., 2018. Metal fractionation in marine sediments acidified by enrichment of CO2: A risk assessment. *Mar. Pollut. Bull.* 131, 611-619. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.04.072.

Singh, P., Purakayastha, T.J., Mitra, S., Bhowmik, A., Tsang, D.C., 2020. River water irrigation with heavy metal load influences soil biological activities and risk factors. *J. Environ. Manage.* 270, 110517. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110517.

Silva, L.F.O., Lozano, L.P., Oliveira, M.L.S., Da Boit, K., Gonçalves, J.O., Neckel, A., 2021. Identification of hazardous nanoparticles present in the Caribbean Sea for the allocation of future preservation projects. *Mar. Pollut. Bull.* 168, 112425. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112425.

Sun, X., Fan, D., Liu, M., Tian, Y., Pang, Y., Liao, H., 2018. Source identification, geochemical normalization and influence factors of heavy metals in Yangtze River Estuary sediment. *Environ. Pollut.* 241, 938–949. doi: 10.1016/j.envpol.2018.05.050.

Trigueros, D., Mingorance, M., Rossini Oliva, S., 2012. Evaluation of the ability of Nerium oleander L. to remediate Pb-contaminated soils. *J. Geochem. Explor.* 114, 126-133. doi: 10.1016/j.gexplo.2012.01.005.

Xi, H., Losa, S.N., Mangin, A., Soppa, M.A., Garnesson, P., Demaria, J., Liu, Y., D'Andon, O.H.F., Bracher, A., 2020. Global retrieval of phytoplankton functional types based on empirical orthogonal functions using CMEMS GlobColour merged products and further extension to OLCI data. *Remote Sens. Environ.* 240, 111704. doi: 10.1016/j.rse.2020.111704.

Xu, J., Liu, Z., 2021. Radiance-based retrieval of total water vapor content from sentinel-3A OLCI NIR channels using ground-based GPS measurements. *Int. J. Appl. Earth Obs*. 104, 102586. doi: 10.1016/j.jag.2021.102586