

Bài báo khoa học

Nâng cao hiệu quả đánh giá phú dưỡng nước hồ Thác Bà sử dụng ảnh vệ tinh Sentinel-3B và Co-kriging

Nguyễn Thiên Phương Thảo¹, Phạm Quang Vinh^{2*}, Nguyễn Trung Hậu¹, Trần Thị Hiền³, Nguyễn Thị Thu Hà^{1*}

¹ Khoa Địa chất, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội; nguyenthienphuongthao_t57@hus.edu.vn; nguyentrungchau_t64@hus.edu.vn; hantt_kdc@vnu.edu.vn

² Viện Địa lý, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam; pqvinh@ig.vast.vn

³ Khoa Địa tin học, Đại học Thành Công, Đài Loan; p66127059@gs.ncku.edu.tw

*Tác giả liên hệ: pqvinh@ig.vast.vn; hantt_kdc@vnu.edu.vn; Tel.: +84–2435587062

Ban Biên tập nhận bài: 9/10/2023; Ngày phản biện xong: 10/11/2023; Ngày đăng bài: 25/2/2024

Tóm tắt: Mô hình hóa chính xác sự phân bố trong không gian của chỉ số dinh dưỡng TSI (*trophic state index*) là một bước quan trọng trong đánh giá hiện trạng phú dưỡng nước hồ, giúp kiểm soát ô nhiễm hiệu quả. Nghiên cứu này nhằm xác định phương pháp phân tích không gian và dữ liệu hỗ trợ để tăng cường độ chính xác trong mô hình hóa sự phân bố trong không gian của TSI, từ đó tối ưu hóa việc đánh giá hiện trạng phú dưỡng hồ Thác Bà. Dựa vào số liệu đo hàm lượng chlorophyll-a (Chla), độ trong của nước (SD) tại 50 điểm trên hồ và ảnh vệ tinh Sentinel-3B (S3B) chụp đồng thời vào ngày 16/12/2022, chúng tôi đã xác định được hai thông số α và β từ ảnh có tương quan cao với TSI thực tế ($r = 0,79$ và $0,70$) dùng để cải thiện độ chính xác của mô hình co-kriging trong ước tính TSI trên không gian mặt hồ (R^2 từ 0,43 thành 0,83; RMSE từ 1,69 thành 1,23). Kết quả cho thấy nước hồ Thác Bà đang ở mức dinh dưỡng trung bình chuyển sang phú dưỡng và có sự thay đổi theo không gian phụ thuộc vào các hoạt động nhân sinh trên và ven hồ. Thông qua nghiên cứu, ảnh S3B được minh chứng có tiềm năng cao trong việc đánh giá chất lượng nước ở các hồ chứa có diện tích lớn như hồ Thác Bà.

Từ khóa: Mô hình hóa; Phú dưỡng; Hồ Thác Bà; Sentinel-3B; TSI.

1. Giới thiệu

Hiện tượng phú dưỡng được coi là một vấn đề ô nhiễm phổ biến với các hồ và hồ chứa từ giữa thế kỷ 20. Các cuộc điều tra cho thấy 54% các hồ nước ở châu Á xuất hiện hiện tượng phú dưỡng, ở châu Âu là 53%, Bắc Mỹ là 48%, Nam Mỹ là 41% và ở châu Phi là 28% [1]. Hiện tượng này bắt nguồn từ sự dư thừa các chất dinh dưỡng do các nguồn chất thải từ xung quanh hồ dẫn đến sự phát triển quá mức của các loại tảo, rong rêu, vi tảo... làm mất cân bằng sinh học nước, thậm chí làm cho hệ sinh thái trong hồ bị nhiễm độc gây ra hiện tượng cá chết hàng loạt. Thêm vào đó, hiện tượng phú dưỡng kéo theo quá trình lắng đọng trầm tích và các chất ô nhiễm trong hồ làm cho hồ nông dần theo thời gian, thay đổi màu của nước, làm cho nước có mùi hôi thối, khiến hệ thống hồ không thể thực hiện được các chức năng của mình, đồng thời cũng gây ô nhiễm nguồn nước ngầm. Do vậy, để có thể kịp thời bảo vệ hệ sinh thái các hồ, việc đánh giá, giám sát và dự báo nhanh biến động chất lượng nước, đặc biệt là sự phú dưỡng của nước hồ là vô cùng cần thiết, có ý nghĩa đặc biệt trong việc quản lý môi trường hồ và hồ chứa.

Trên thế giới, trạng thái dinh dưỡng của hồ đã được xác định bằng cách sử dụng các chỉ số khác nhau [2–3], phổ biến nhất trong số đó là chỉ số trạng thái dinh dưỡng TSI (*trophic state index*), được phát triển bởi Carlson [4] do các thông số để tính toán TSI tương đối dễ xác định và phản ánh đầy đủ các khía cạnh đa dạng về mức độ phú dưỡng của hồ [5]. TSI do Carlson đề xuất được tính toán từ một hoặc ba thông số chính, gồm hàm lượng Chlorophyll-a (Chla), tổng photpho (TP) và độ sâu Secchi (SD). Thông thường, giá trị TSI nằm trong khoảng từ 0 đến 100 và có thể được phân loại thành bốn cấp độ dinh dưỡng là: nghèo dinh dưỡng, dinh dưỡng trung bình, phú dưỡng và siêu phú dưỡng [6].

Hồ Thác Bà - một trong ba hồ nước nhân tạo lớn nhất Việt Nam, được hình thành trong quá trình xây dựng Nhà máy thủy điện Thác Bà, tỉnh Yên Bái. Hồ Thác Bà đóng một vai trò quan trọng trong đời sống kinh tế, xã hội của tỉnh Yên Bái nói riêng và đồng bằng Bắc Bộ nói chung. Bên cạnh việc đóng góp một tỷ lệ rất lớn vào tổng lượng điện quốc gia thì hồ Thác Bà còn là nguồn cấp nước chính cho các hoạt động nuôi trồng thủy sản, sản xuất nông nghiệp, công nghiệp và tưới tiêu của vùng. Đặc biệt, đối với tỉnh Yên Bái, hồ Thác Bà còn là nguồn cung cấp nước sinh hoạt quan trọng cho người dân địa phương. Tuy nhiên, trong những năm gần đây, việc khai thác đất rừng đầu nguồn, nuôi trồng thủy sản trong lòng hồ, khai thác khoáng sản trong lưu vực đã có những tác động trực tiếp và gián tiếp đến chất lượng môi trường nước hồ [7]. Một vài nghiên cứu gần đây cho thấy, tần suất xuất hiện nở hoa của vi khuẩn lam tại các hồ chứa nước của Việt Nam rất cao [8]. Chính vì vậy, việc kiểm soát và giám sát suy thoái chất lượng nước hồ đang là một vấn đề cấp thiết được đặt ra nhằm bảo vệ môi trường, đảm bảo an ninh nguồn nước cấp cho sinh hoạt và nuôi trồng thủy sản.

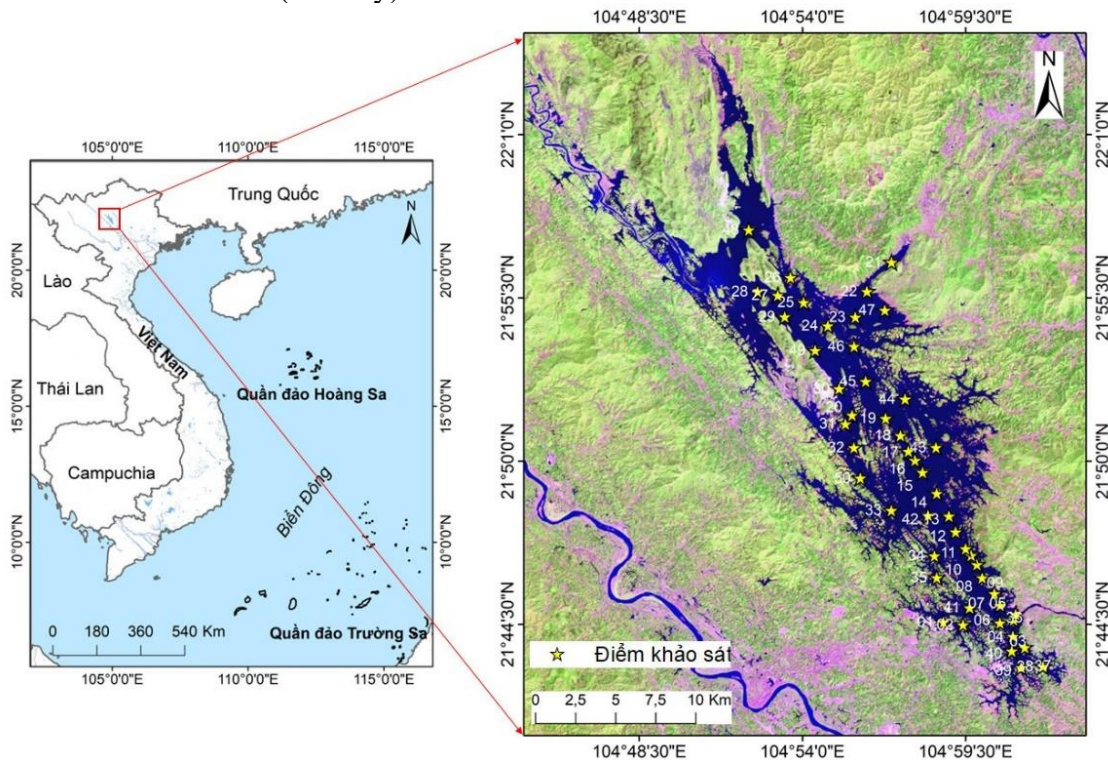
Với diện tích mặt nước rộng (khoảng 234 km²) [9], độ sâu tối đa tương đối lớn (trung bình là 42 m) [10], việc quan trắc và giám sát mức độ phú dưỡng của hồ thường xuyên bằng phương pháp truyền thống gây tốn kém rất lớn về thời gian và kinh phí cho việc đo đạc, thu thập và phân tích mẫu. Thực tế rất nhiều vùng nước của hồ rất khó tiếp cận để tiến hành các đo đạc cần thiết. Trong khi đó, trên thế giới, việc sử dụng dữ liệu ảnh vệ tinh để đánh giá và theo dõi mức độ phú dưỡng của hồ là một trong những ứng dụng khả thi và đầy hứa hẹn [11–12] giúp vượt qua những thách thức của phương pháp khảo sát truyền thống. Cùng với sự phát triển của công nghệ vũ trụ, công nghệ vệ tinh, chu kỳ của vệ tinh miễn phí như Sentinel 3 (bao gồm cả Sentinel 3A và Sentinel 3B) có thể giám sát hàng ngày đã tạo ra cơ hội tuyệt vời để giám sát các quá trình thủy sinh, giúp cho việc giám sát phú dưỡng trở nên thuận lợi hơn. Tận dụng kinh nghiệm của thế giới và hiệu quả của công nghệ địa không gian trong giám sát tài nguyên môi trường, nghiên cứu này nhằm tìm kiếm giải pháp giúp đánh giá một cách đầy đủ nhất hiện trạng phú dưỡng nước hồ Thác Bà tại thời điểm khảo sát ngày 16/12/2022 trong bối cảnh có số lượng điểm quan trắc trên hồ giới hạn (50 điểm). Để thực hiện điều đó, nghiên cứu hướng đến xác định được các thông số hỗ trợ từ ảnh vệ tinh S3B chụp mặt hồ cùng ngày khảo sát để nâng cao độ chính xác của việc ước tính chỉ số TSI trong không gian của mô hình co-kriging. Kết quả nghiên cứu sẽ cung cấp các thông tin và bằng chứng khoa học cần thiết cho việc giám sát nhanh hiện trạng phú dưỡng, quản lý môi trường nước và hệ sinh thái hồ Thác Bà hiệu quả.

2. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Phương pháp đo đạc và xác định các thông số

Quá trình thu thập mẫu nước và đo SD ở các điểm khảo sát được tiến hành vào ngày 16/12/2022 bằng ca-nô. Tổng số 50 số liệu đo từ các điểm khảo sát trên hồ (thời gian đo từ 7:30 đến 16:30, phân bố như trong Hình 1) được thu thập cùng ngày với vệ tinh S3B chụp ảnh vùng nghiên cứu. Trong đó, SD được đo bằng đĩa Secchi (Model 58-B10) có đường kính 20 cm của hãng Wlisco (Hoa Kỳ) theo phương pháp Lind [13]. Tại mỗi điểm đo, mẫu nước được thu thập trên mặt nước (0-30 cm) và được phân tích để xác định Chla bằng

phương pháp đo phổ theo TCVN 6662:2000 [14] sử dụng máy quang phổ tử ngoại khả kiến UV-VIS Hach DR6000 (Hoa Kỳ).



Hình 1. Vị trí hồ Thác Bà và vị trí các điểm lấy mẫu.

2.2. Phương pháp đánh giá mức độ phú dưỡng

Mức độ phú dưỡng của hồ được đánh giá dựa vào chỉ số TSI. Giá trị TSI được xác định là giá trị trung bình cộng của các chỉ số đơn tính toán từ Chla (TSI_{Chla}) và SD (TSI_{SD}) theo công thức được đơn giản hóa bởi [6] như sau:

$$TSI_{Chla} = 9,81 \times \ln(Chla) + 30,6 \tag{1}$$

$$TSI_{SD} = 60 - 14,4 \times \ln(SD) \tag{2}$$

$$TSI = (TSI_{Chla} + TSI_{SD})/2 \tag{3}$$

Trong đó đơn vị của Chla là $\mu\text{g/L}$, SD là m, và TSI_{Chla} , TSI_{SD} , TSI là các đại lượng không thứ nguyên. Dựa vào giá trị TSI, trạng thái phú dưỡng của hồ được chia thành 4 mức: 1) nghèo dinh dưỡng (oligotrophy, $TSI < 30$); 2) dinh dưỡng trung bình (mesotrophy, $TSI = 30$ đến 50); 3) phú dưỡng (eutrophy, $TSI = 50$ đến 70); 4) siêu phú dưỡng (hypereutrophy, $TSI > 70$).

2.3. Phương pháp xử lý ảnh vệ tinh

Vệ tinh S3B là một vệ tinh quan sát Trái Đất thuộc Chương trình Copernicus của Cơ quan không gian Châu Âu (ESA), được phóng lên quỹ đạo ngày 16/02/2018. Vệ tinh S3B được trang bị bốn cảm biến, bao gồm *Ocean and Land Color Instrument (OLCI)*, *Sea and Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR)*, *Synthetic Aperture Radar Altimeter (SRAL)* và *Microwave Radiometer (MWR)*. Cảm biến OLCI của S3B có nhiệm vụ giám sát môi trường biển, đại dương và đất liền với khả năng thu nhận ảnh đa phổ lên tới 21 kênh phổ trong dải từ 400 nm đến 1020 nm và độ phân giải không gian là 300 m. Đặc trưng kênh phổ của ảnh vệ tinh S3B OLCI được thể hiện chi tiết trong Bảng 1 cho thấy các kênh phổ của ảnh rất thuận lợi cho việc giám sát chất lượng nước các hồ nội địa so với các ảnh vệ tinh quang học màu đại dương khác như MERIS [15–16].

Nghiên cứu này sử dụng ảnh vệ tinh S3B OLCI Level-2 chụp tại hồ Thác Bà vào ngày 16/12/2022 (có mã số: S3B_OL_2_WFR_20221216T025220_

20221216T025520_20221216T044921_0179_074_032_2520_MAR_O_NR_003) tải miễn phí từ trang web của ESA (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/>). Dữ liệu ảnh tải về đã được hiệu chỉnh bức xạ và hiệu chỉnh khí quyển để đưa dữ liệu về giá trị phản xạ tại mặt đất nên chỉ cần hiệu chỉnh tọa độ về hệ quy chiếu WGS84 để chiết tách thông số phổ phản xạ tại 50 điểm khảo sát bằng các công cụ trong phần mềm SNAP (*Sentinel Application Platform*). Dữ liệu này sau đó được phân tích để xác định thông số tương quan cao với giá trị TSI thực tế để làm biến số cho phép phân tích không gian co-kriging.

Bảng 1. Các thông số dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel-3B OLCI.

Kênh phổ	Bước sóng trung tâm (nm)	Độ rộng kênh phổ (nm)	Độ phân giải không gian (m)	Kênh phổ	Bước sóng trung tâm (nm)	Độ rộng kênh phổ (nm)	Độ phân giải không gian (m)
Oa01	400	15	300	Oa12	753.75	7.5	300
Oa02	412.5	10	300	Oa13	761.25	2.5	300
Oa03	442.5	10	300	Oa14	764.375	3.75	300
Oa04	490	10	300	Oa15	767.5	2.5	300
Oa05	510	10	300	Oa16	778.75	15	300
Oa06	560	10	300	Oa17	865	20	300
Oa07	620	10	300	Oa18	885	10	300
Oa08	665	10	300	Oa19	900	10	300
Oa09	673.75	7.5	300	Oa20	940	20	300
Oa10	681.25	7.5	300	Oa21	1020	40	300
Oa11	708.75	10	300				

2.4. Thông số hỗ trợ từ dữ liệu ảnh Sentinel-3B

Để tìm kiếm thông số có thể giúp nâng cao hiệu quả mô hình hóa không gian của chỉ số TSI, thuật toán thực nghiệm dùng để tính toán Chla và SD được phát triển bởi [17] được sử dụng trong nghiên cứu này bởi hai lý do: 1) Hồ Alqueva (Tây Ban Nha) có giá trị Chla và SD đo đạc thực tế giống như giá trị đo đạc của hai thông số này trong nước hồ Thác Bà. 2) Cả hai hồ chứa đều có diện tích mặt nước lớn nên phù hợp để sử dụng ảnh vệ tinh có độ phân giải trung bình như S3B vào theo dõi, đánh giá chất lượng nước hồ. Điều này chứng tỏ sự tương đồng về trạng thái phú dưỡng, đặc tính quang học và cả điều kiện tự nhiên của hai hồ. Vì thế, các thuật toán tính toán Chla và SD của nước hồ Alqueva (Tây Ban Nha) từ ảnh S3B có thể có tương quan cao với giá trị TSI thực tế đo được ở hồ Thác Bà khi áp dụng vào ảnh S3B chụp mặt nước hồ này. Các thuật toán tính toán Chla và SD trong nước Alqueva (Tây Ban Nha) theo [17] được thể hiện như sau:

$$\alpha = Chla = 5276,8 * \left(\frac{B6 * B11}{B8}\right)^2 - 275,56 * \left(\frac{B6 * B11}{B8}\right) + 7,2325 \tag{4}$$

$$\beta = SD = 3,619 * \frac{B10}{B4} - 2,223 * \frac{B16}{B4} + 0,246 \tag{5}$$

Trong đó Chla có đơn vị là µg/L và SD có đơn vị là m; B4, B6, B8, B10, B11, B16 ứng với giá trị phổ phản xạ thu được từ ảnh S3B OLCI Level 2 tại điểm khảo sát ở các kênh phổ số 4, 6, 8, 10, 11 và 16.

2.5. Phương pháp phân tích thống kê và lập sơ đồ

Phương pháp địa thống kê đa biến co-kriging được lựa chọn để thành lập sơ đồ phân bố TSI phục vụ cho đánh giá hiện trạng phú dưỡng nước hồ Thác Bà trong nghiên cứu này. Co-kriging là kỹ thuật địa thống kê nhằm mục đích nội suy để lập bản đồ phân bố một thông số dựa trên sự ước tính giá trị của thông số đó ở các điểm không được đo đạc sử dụng mô hình hồi quy tuyến tính đa biến. Đây là phương pháp lấy trung bình theo trọng số tuyến

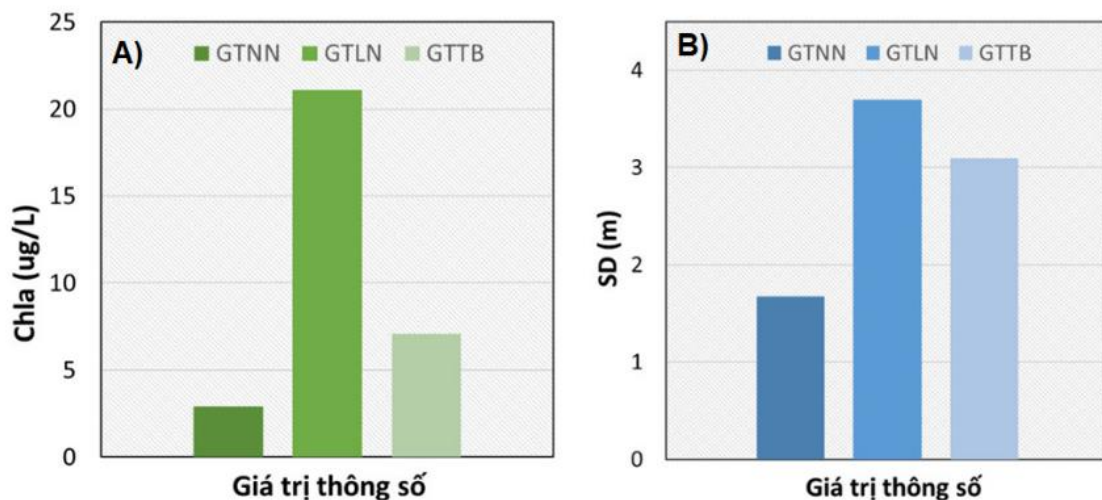
tính, tương tự như các phương pháp nội suy khác; tuy nhiên, trọng số của chúng không chỉ phụ thuộc vào khoảng cách mà còn phụ thuộc vào hướng của dữ liệu lân cận đến vị trí không được lấy mẫu [18]. Khác với kriging chỉ sử dụng một biến duy nhất, co-kriging sử dụng các biến phụ trợ và xem xét thông tin tương quan giữa các biến để nâng cao hiệu quả của phép ước tính trong không gian.

Trong nghiên cứu này, việc lựa chọn các biến trong mô hình co-kriging phải đảm bảo hệ số tương quan với giá trị TSI thực tế có ý nghĩa (hệ số tương quan lớn hơn 0,70), kết quả ước tính phải có độ chính xác cao (hệ số xác định - $R^2 > 0,70$; sai số toàn phương trung bình - $RMSE \leq 5\%$). Khi đạt được yêu cầu này, sơ đồ phân bố giá trị TSI được thành lập sử dụng công cụ phân tích địa thống kê trong phần mềm ArcGIS 10.5. Ngoài ra, các phân tích thống kê cơ bản như xác định giá trị lớn nhất (GTLN), giá trị nhỏ nhất (GTNN) giá trị trung bình (GTTB) và biểu đồ hộp của dữ liệu thu được từ đợt khảo sát cũng được thực hiện sử dụng phần mềm IBM SPSS 26.

3. Kết quả và thảo luận

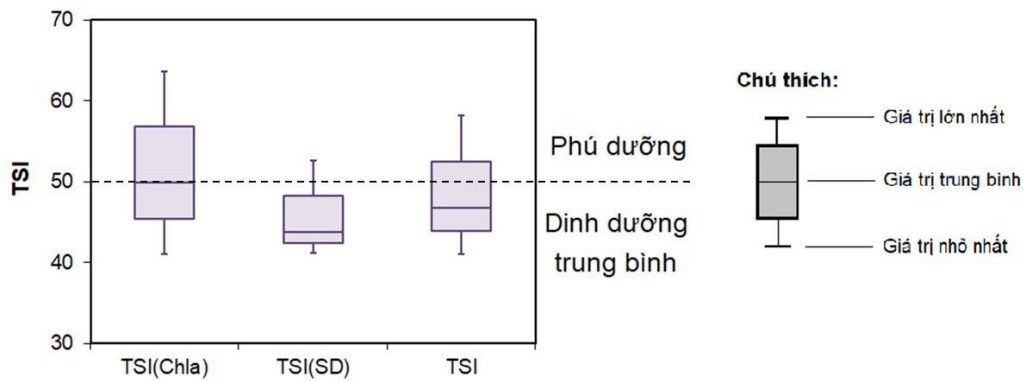
3.1. Hiện trạng phú dưỡng của nước hồ ở các điểm đo thực tế

Hình 2 biểu diễn thông số thống kê giá trị hàm lượng Chla và SD trong nước hồ Thác Bà tại 50 điểm đo trong ngày 16/12/2022. Theo đó, hàm lượng Chla trong nước hồ dao động từ 2,9 $\mu\text{g/L}$ đến 29,1 $\mu\text{g/L}$, với giá trị trung bình là 7,11 $\mu\text{g/L}$. Kết quả đo đạc SD cũng tương đối phù hợp với kết quả xác định Chla, nước hồ có độ trong dao động từ 1,67 m đến 3,7 m, giá trị trung bình đạt 3,09 m. So với các hồ và hồ chứa khác của nước ta như hồ Suối Hai (Hà Nội, SD = 0,46-1,20 m [19]), hồ Đan Kia (Lâm Đồng, SD = 0,2-0,3 m [20]) hay hồ Trị An (Đồng Nai, SD = 20,28-164,9 cm [21]), nước hồ Thác Bà có độ trong cao hơn rất nhiều. So với các kết quả đo năm 2018 trong nghiên cứu [7] (Chla dao động từ 14 đến 19,5 $\mu\text{g/L}$ vào tháng 4/2018 và từ 15 đến 40 $\mu\text{g/L}$ vào tháng 8/2018; SD dao động từ 1,5-2,8 m và 1,4-2,3 m vào tháng 4/2018 và tháng 8/2018) thì giá trị Chla nhỏ hơn và SD có giá trị cao hơn trong đợt khảo sát lần này. Kết quả đo trong nghiên cứu này và trong [7] cho thấy rõ xu hướng theo mùa của các thông số dinh dưỡng trong môi trường nước. Cụ thể, vào tháng 12, khi nhiệt độ và ánh sáng mặt trời thấp hơn các tháng khác trong năm, quá trình quang hợp của tảo giảm xuống, dẫn đến sự suy giảm của Chla trong nước. Tương tự, tại thời điểm tháng 12 cũng là mùa khô ở Yên Bái, việc vận chuyển của các sông suối trong hồ thấp hơn tháng 4 và tháng 8, các chất dinh dưỡng và phù sa lơ lửng mang vào hồ ít, làm gia tăng độ trong của nước hồ.

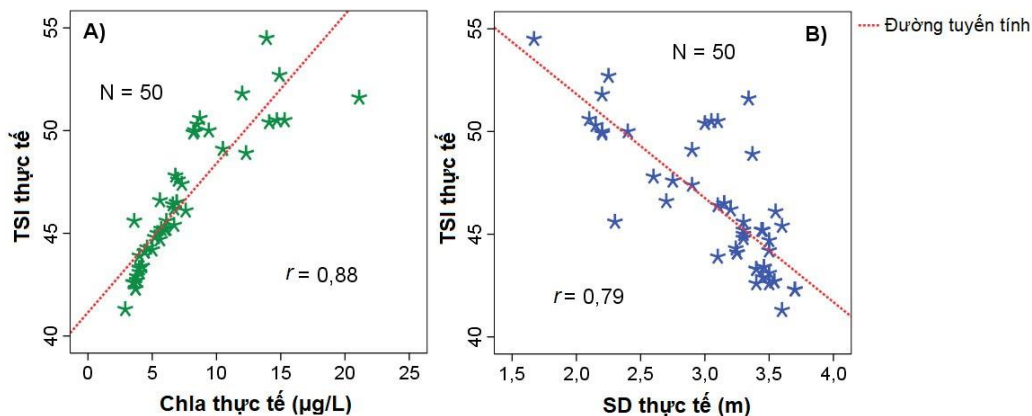


Hình 2. Biến thiên hàm lượng Chlorophyll-a (Chla) (A) và độ trong (SD) (B) của nước hồ Thác Bà trong ngày 16/12/2022.

Kết quả tính toán TSI dựa trên hàm lượng Chla và SD từ 50 điểm đo trong ngày 16/12/2022 được thể hiện trong Hình 3. Theo đó, độ lệch giữa các giá trị trung bình của TSI_{Chla} và TSI_{SD} dao động khoảng 6 trong khi độ lệch giữa giá trị lớn nhất của TSI_{Chla} và TSI_{SD} trong đợt khảo sát có thể lên tới 11. Cụ thể, TSI_{Chla} trong ngày 16/12/2022 dao động từ 41,0 đến 63,7 với giá trị trung bình là 50. TSI_{SD} dao động trong khoảng từ 41,2 đến 52,6 với giá trị trung bình là 43,7. Điều này cho thấy, tầm ảnh hưởng quan trọng của sinh khối tảo trong việc làm gia tăng mức độ dinh dưỡng của nước hồ Thác Bà. Kết quả tính toán TSI từ 2 thông số TSI_{Chla} và TSI_{SD} thể hiện rõ mức độ dinh dưỡng của hồ, cụ thể là hồ đang ở mức dinh dưỡng trung bình (*mesotrophy*) với giá trị TSI trung bình là 46,8 dựa theo thang phân loại [6]. Tuy nhiên, tại một số lớn điểm lấy mẫu đã có giá trị TSI > 50 cho thấy mức độ phú dưỡng đã xuất hiện trên hồ Thác Bà. Với nhận định đợt khảo sát trùng với thời điểm nước hồ có mức dinh dưỡng thấp nhất trong năm và dựa theo kết quả nghiên cứu trước đó [7] thì có thể dự báo rằng nước hồ đang ở mức phú dưỡng quanh năm. Điều này thể hiện chất lượng nước hồ đang có nguy cơ bị ô nhiễm, gây ảnh hưởng đến hệ sinh thái thủy sinh và đặc biệt là khả năng cấp nước sinh hoạt của hồ. Thông tin về sự thay đổi trong không gian của chỉ số TSI trong thời điểm này có giá trị quan trọng vì giúp chúng ta hiểu rõ mức giá trị thấp nhất của TSI trong nước hồ và nơi phân bố của các giá trị này, từ đó có những chính sách kiểm soát ô nhiễm có hiệu quả.



Hình 3. Biến thiên các chỉ số dinh dưỡng của hồ Thác Bà trong đợt khảo sát ngày 16/12/2022.

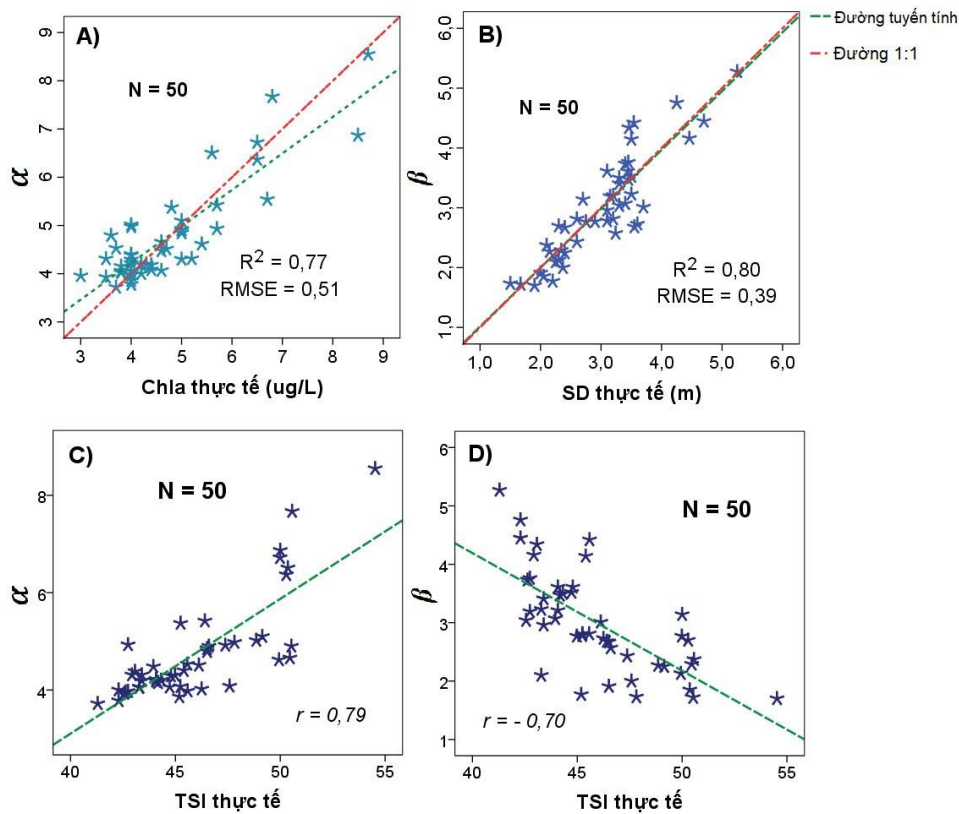


Hình 4. Mối quan hệ giữa TSI với hàm lượng Chla (A) và giá trị SD (B) trong nước hồ Thác Bà.

Mối tương quan giữa ba thông số Chla, SD và TSI thu thập được trong ngày 16/12/2022 tại hồ Thác Bà được thể hiện trong Hình 4. Theo đó, TSI tương quan cao với SD ($r = 0,79$) và rất cao với Chla ($r = 0,88$), điều này một lần nữa khẳng định mật độ tảo là yếu tố chính chi phối sự thay đổi của mức độ dinh dưỡng nước hồ. Đồng thời, sự tương quan này cho thấy việc sử dụng SD và Chla như là các biến phụ trợ trong mô hình co-kriging trong lập sơ đồ phân bố chỉ số TSI thực tế trong nước hồ Thác Bà theo không gian là hoàn toàn phù hợp.

3.2. Các thông số ảnh phù hợp cho mô hình hóa phân bố TSI

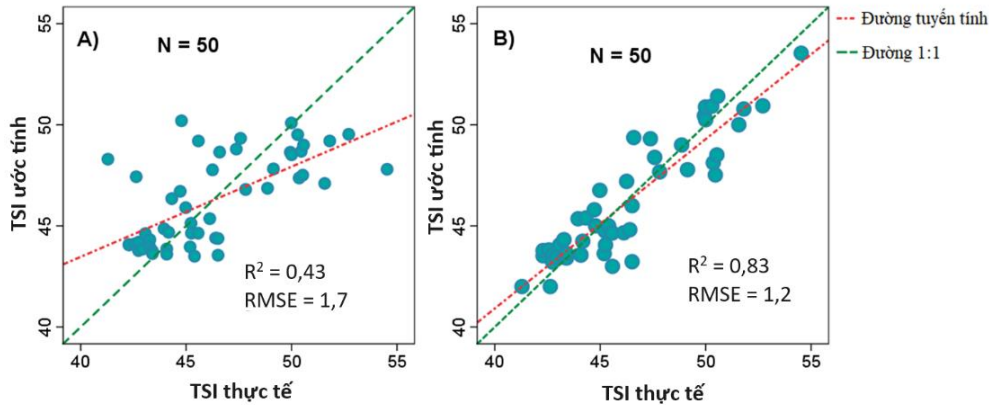
Việc sử dụng các thông tin từ ảnh vệ tinh như các thông số hỗ trợ cho việc mô hình hóa không gian đã được sử dụng trong một số nghiên cứu trước đó [22–23]. Ưu điểm của phương pháp này là tận dụng mối tương quan giữa các thông số ảnh và thông số cần khảo sát để ước tính các giá trị thông số cần khảo sát tại những điểm không khảo sát. Vì đặc trưng của ảnh vệ tinh là cung cấp thông tin liên tục trong không gian dưới dạng điểm ảnh (*pixel*) nên cung cấp thông tin phủ kín bề mặt cho vùng nghiên cứu. Trong khi đó, nếu chỉ sử dụng các thông tin khảo sát thì số lượng các thông tin đầu vào để mô hình hóa rất giới hạn do số lượng điểm khảo sát không lớn (bởi phụ thuộc vào kinh phí, thời gian, nhân lực và quy mô khảo sát) dẫn đến kết quả ước tính ở những điểm không khảo sát có sai số lớn hoặc bị bỏ lỡ mất những thay đổi ở quy mô nhỏ, đặc biệt là những biến động có tính chất nhỏ nhưng quan trọng (ví dụ như các điểm ô nhiễm). Trong nghiên cứu này, nếu sử dụng kết quả đo thực tế ở 50 điểm trên toàn mặt hồ Thác Bà (diện tích 234 km²), thì ước tính khoảng 4,7 km² mới có một thông tin đầu vào cho mô hình. Trong khi đó, nếu sử dụng thông tin từ ảnh S3B đo cùng ngày thì số lượng thông tin đầu vào cho mô hình có thể lên đến 988 điểm bởi thực tế có 988 pixel ảnh phủ trên mặt hồ đạt chất lượng cho tính toán các thông số α và β . Giá trị TSI ước tính ở những điểm không khảo sát trên toàn bộ mặt hồ Thác Bà vì thế sẽ được dựa trên thông tin của 50 điểm khảo sát và 938 điểm ảnh còn lại.



Hình 5. Mối tương quan giữa giá trị Chla thực tế và α (A); SD thực tế và β (50) thu được từ 50 điểm ảnh tương ứng với các điểm khảo sát thực tế. Tương quan cao giữa TSI thực tế và hai thông số này (C-D) cho thấy sự phù hợp của thông số này để làm thông tin hỗ trợ cho mô hình hóa không gian của giá trị TSI.

Vì giá trị TSI thực tế được tính toán từ Chla và SD thực tế theo hàm logarit tuyến tính [4] như thể hiện trong các phương trình (1), (2), (3) nên theo lý thuyết giá trị này thường có tương quan cao với Chla và SD (minh chứng bởi Hình 4). Hai thông số α và β từ ảnh S3B thực tế là giá trị Chla và SD trong nước hồ Thác Bà vào ngày khảo sát (16/12/2022) được tính toán từ ảnh và hai thông số này có tương quan cao với giá trị Chla ($r = 0,88$) và SD ($r = 0,89$) thực tế như trong hình 5A và 5B. Chính vì thế, hai thông số này cũng tương quan

cao với giá trị TSI thực tế (Hình 5C và 5D). Kết quả này cho thấy α và β hoàn toàn phù hợp dùng làm thông tin bổ trợ để mô hình hóa sự phân bố theo không gian của TSI trong nước hồ, sự thay đổi của chúng trong 938 pixel còn lại giúp cho việc ước tính giá trị TSI ở những điểm không khảo sát này chính xác hơn.



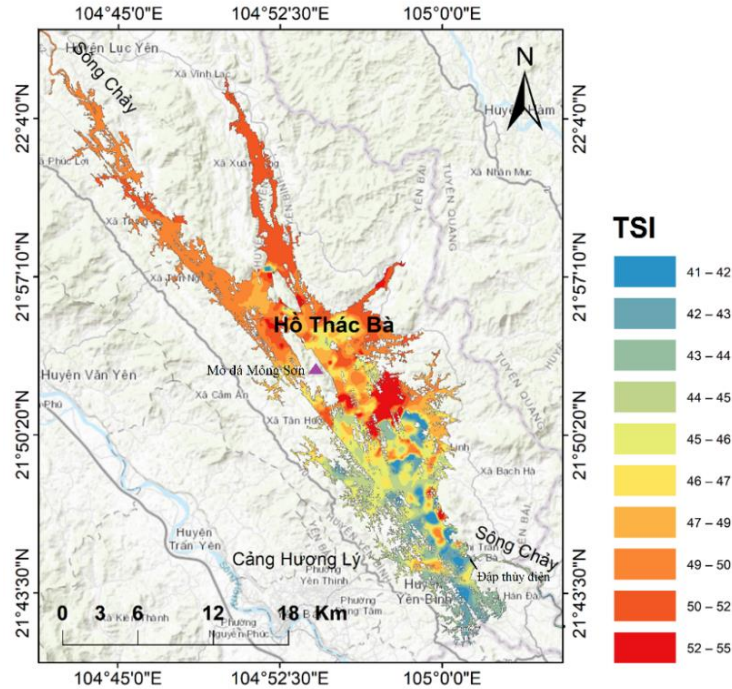
Hình 6. So sánh kết quả ước tính của mô hình Co-kriging khi sử dụng các số liệu đo thực tế (TSI, Chla, SD thực tế) (A) và khi sử dụng các biến số α , β từ ảnh S3B và TSI thực tế (B).

Hình 6A diễn tả kết quả mô hình hóa không gian sự phân bố của TSI trong nước hồ Thác Bà khi không có thông tin bổ trợ, nghĩa là chỉ sử dụng sự tương quan của chỉ số TSI thực tế với Chla và SD thực tế tại điểm đo. Kết quả cho thấy ước tính của mô hình phân bố TSI có sai số lớn ($R^2 = 0,43$; $RMSE = 1,7$), dự đoán giá trị TSI ở các điểm không khảo sát có thể không biến thiên đồng đều với thực tế. Do đó, kết quả mô hình hóa sự phân bố không gian TSI từ mô hình này là không thể chấp nhận. Nói cách khác, nếu chỉ sử dụng các thông số đo thực tế tại 50 điểm đo, chúng ta chỉ có thể đánh giá hiện trạng phú dưỡng nước hồ ở 50 điểm khảo sát này mà không thể đưa ra nhận định chính xác về sự thay đổi của hiện trạng phú dưỡng nước hồ theo không gian.

Hình 6B biểu diễn sự thay đổi của kết quả mô hình khi sử dụng kết hợp thông tin từ ảnh S3B, cụ thể là sử dụng giá trị α và β từ ảnh như hai biến đầu vào cho mô hình co-kriging ước tính phân bố của TSI. Kết quả cho thấy hệ số xác định R^2 (độ chính xác) của mô hình đã tăng lên đáng kể: từ $R^2 = 0,43$ lên đến $R^2 = 0,84$. Sai số của giá trị TSI ước tính trung bình trong không gian cũng giảm xuống còn 1,3. Điều này khẳng định rõ sự hiệu quả của việc sử dụng thông tin bổ trợ từ ảnh S3B trong đánh giá hiện trạng phú dưỡng nước hồ.

3.3. Phân bố không gian của TSI trong nước hồ Thác Bà

Kết quả TSI được mô hình hóa sử dụng sự tương quan giữa các giá trị chỉ số α và β từ ảnh S3B và các điểm đo thực tế được thể hiện trong Hình 7. Theo đó, giá trị TSI trong khoảng 45-55 gần như bao phủ toàn bộ mặt hồ. Theo thang phân loại [6], nước hồ Thác Bà đang ở mức dinh dưỡng trung bình đến phú dưỡng. Các khu vực có giá trị TSI thấp (41-45) thường phân bố ở gần đập thủy điện - đây là khu vực nước lạnh, độ sâu lớn và là nơi ít chịu ảnh hưởng nhất từ các hoạt động nhân sinh và hoạt động khai thác du lịch tàu bè. Các khu vực có TSI cao hơn phân bố trải dài từ thượng nguồn nơi có nước dòng sông Chảy và các nhánh sông đổ vào đến giữa lòng hồ. Đặc biệt khu vực trung tâm hồ có giá trị TSI cao nhất (52-55) - đây là nơi có hoạt động khai thác đá của mỏ khai thác đá Mông Sơn và gần khu vực cảng, nhà hàng tàu bè. Với mức dinh dưỡng như hiện nay, tình trạng phú dưỡng của hồ Thác Bà là hoàn toàn có thể kiểm soát được nếu như có những giải pháp quản lý môi trường hồ hiệu quả. Ngược lại, nếu không có những biện pháp khắc phục, hiện tượng phú dưỡng sẽ tiếp tục tăng mạnh, đặc biệt là khi các hoạt động du lịch và nuôi trồng thủy sản đang có chiều hướng tăng lên.



Hình 7. Phân bố TSI của nước hồ Thác Bà trong đợt khảo sát ngày 16/12/2022.

4. Kết luận

Mô hình hóa chính xác và chi tiết sự phân bố trong không gian của giá trị TSI là một bước quan trọng trong đánh giá hiện trạng phú dưỡng nước hồ, giúp dự đoán nguyên nhân và kiểm soát ô nhiễm hiệu quả. Nghiên cứu này sử dụng các thông tin bổ trợ từ ảnh S3B để nâng cao độ chính xác và chi tiết sự phân bố trong không gian của giá trị TSI trong nước hồ Thác Bà. Kết quả nghiên cứu cho thấy hai thông số α và β tương ứng với giá trị Chla và SD tính toán từ ảnh S3B theo thuật toán đề xuất bởi [17] phù hợp để sử dụng là thông tin bổ trợ cho mục đích nghiên cứu, giúp nâng cao độ chính xác của mô hình co-kriging ước tính phân bố của TSI. Hiệu quả của thông tin bổ trợ từ ảnh S3B thể hiện rõ qua sự thay đổi của giá trị R^2 trong mô hình co-kriging, thay đổi từ 0,43 lên 0,84 khi dùng thông tin bổ trợ. Kết quả mô hình hóa TSI cho thấy nước hồ Thác Bà trong thời điểm khảo sát ngày 16/12/2022 đang ở mức dinh dưỡng trung bình đến phú dưỡng ($TSI = 41-55$). Vùng nước hồ xung quanh các nhánh sông, mỏ khai thác đá Mông Sơn và gần khu vực cảng nhà hàng tàu bè có giá trị TSI cao hơn các vùng nước hồ khác. Nghiên cứu cũng minh chứng cho việc sử dụng kết hợp dữ liệu ảnh vệ tinh và mô hình địa thống kê co-kriging là một phương pháp hiệu quả để đánh giá nhanh sự phân bố trong không gian của các thông số chất lượng nước một thủy vực khi số lượng các điểm khảo sát có giới hạn. Kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học về tình trạng phú dưỡng, từ đó đề xuất các giải pháp kỹ thuật cho việc theo dõi, giám sát và quản lý hiệu quả nguồn nước hồ Thác Bà.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: N.T.P.T., N.T.T.H., P.Q.V.; Xử lý số liệu: N.T.P.T., N.T.H., T.T.H.; Lấy mẫu: N.T.P.T., N.T.H., N.T.T.H., P.Q.V., T.T.H.; Viết bản thảo bài báo: N.T.P.T., P.Q.V., N.T.T.H.; Chỉnh sửa bài báo: N.T.P.T., N.T.T.H., P.Q.V.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được thực hiện dưới sự tài trợ của Viện Hàn lâm Khoa học Công nghệ Việt Nam thông qua đề tài hỗ trợ NCVCC có mã số: NVCC10.02/23-23. Tập thể tác giả bài báo xin trân trọng cảm ơn sự tài trợ của ESA đã cung cấp ảnh Sentinel cho nghiên cứu này.

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

1. Galvez-Cloutier, R.; Sanchez, M. Trophic Status Evaluation for 154 Lakes in Quebec, Canada: Monitoring and Recommendations. *Water Qual. Res. J.* **2007**, *42(4)*, 252–268.
2. Vollenweider, R.A.; Giovanardi, F.; Montanari, G.; Rinaldi, A. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environ: Official J. Int. Soc. Environ. Sports* **1998**, *9(3)*, 329–357.
3. Vollenweider, R.A.; Kerekes, J. Eutrophication of waters-monitoring, assessment and control OECD. Paris, 1982, pp. 154.
4. Carlson, R.E. A trophic state index for lakes 1. *Limnol. Oceanogr.* **1977**, *22(2)*, 361–369.
5. Cheng, K.S.; Lei, T.C. Reservoir trophic state evaluation using Landsat TM images 1. *J. Am. Water Resour. Assoc.* **2001**, *37(5)*, 1321–1334.
6. Carlson, R.E.; Simpson, J. A coordinator's guide to volunteer lake monitoring methods. North American Lake Management Society, 1996, pp. 96.
7. Vinh, P.Q.; Ha, N.T.T.; Binh, N.T.; Thang, N.N.; Oanh, L.T.; Thao, N.T.P. Developing algorithm for estimating chlorophyll-a concentration in the Thac Ba Reservoir surface water using Landsat 8 Imagery. *VN J. Earth Sci.* **2019**, *41*, 10–20.
8. Kim, Đ.Đ.; Thủy, D.T.; Liên, N.T.T.; Sơn, Đ.T.; Quỳnh, L.T.P.; Chi, Đ.H.L. Vi khuẩn lam độc nước ngọt. Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và Công nghệ, Hà Nội, 2014, tr. 326.
9. Hieu, V.H.; Quỳnh, L.T.P.; Josette, G.; Etcheber, H.; Thuy, D.T.; Cuong, H.T. Preliminary observation of particulate organic carbon (POC) contents in water environment of the downstream of Red River system. *VN J. Earth Sci.* **2012**, *34(1)*, 65–69.
10. Dũng, T.N.K.; Nhã, C.C.P. Đánh giá hiện trạng, dự báo diễn biến bùn cát hồ chứa Thác Bà. Kỷ yếu Hội thảo khoa học lần thứ 9 - Viện khí tượng Thủy văn 2013, 380–385.
11. Membrillo-Abad, A.S.; Torres-Vera, M.A.; Alcocer, J.; Prol-Ledesma, R.M.; Oseguera, L.A.; Ruiz-Armenta, J.R. Trophic State Index estimation from remote sensing of lake Chapala, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas* **2016**, *33(2)*, 183–191.
12. Fuller, L.M.; Jodoin, R.S. Estimation of a Trophic State Index for selected inland lakes in Michigan, 1999–2013 (No. 2016-5023). US Geological Survey, 2016.
13. Lind, O.T. Handbook of common methods in limnology. The CV Mosley Company, 1979.
14. TCVN 6662:2000 (ISO 10260:1992) về Chất lượng nước - Đo thông số sinh hóa - Phương pháp đo phổ xác định nồng độ Chlorophyll-a.
15. Lyu, H.; Yang, Z.; Shi, L.; Li, Y.; Guo, H.; Zhong, S.; ... Li, Y. A novel algorithm to estimate phytoplankton carbon concentration in inland lakes using Sentinel-3 OLCI images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2020**, *58(9)*, 6512–6523.
16. Xu, J.; Bian, Y.; Lyu, H.; Miao, S.; Li, Y.; Liu, H.; Xu, J. Estimation of particulate backscattering coefficient in turbid inland water using Sentinel 3A-OLCI image. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* **2021**, *14*, 8577–8593.
17. Rodrigues, G.; Potes, M.; Penha, A.M.; Costa, M.J.; Morais, M.M. The use of Sentinel-3/OLCI for monitoring the water quality and optical water types in the largest Portuguese reservoir. *Remote Sens.* **2022**, *14(9)*, 2172.
18. Journel, A.G.; Journel, A.G. Fundamentals of geostatistics in five lessons (Vol. 8). Washington, DC: American Geophysical Union. 1989.

19. Linh, N.T.; Ha, N.T.T.; Thao, N.T.P.; Pham, Q.V. Assessing trophic status of suoi hai reservoir using carlson's trophic state index. *VN J. Earth Sci.* **2021**, *43(4)*, 509–523.
20. Tĩnh, T.T.; Đoàn, N.H.; Bùi, N.L.H.; Nguyễn, T.T.T. Đánh giá mức độ ảnh hưởng của các nguồn nước chảy vào hồ Đan Kia và áp dụng mô hình AQUATOX quản lý chất lượng nước hồ. *Tap chí sinh học* **2016**, *38(1)*, 61–69.
21. Yên, T.T.H.; Lượm, T.L. Đánh giá hiện trạng phú dưỡng và yếu tố môi trường chi phối quần xã tảo lục ở hồ Trì An. *Tap chí Khoa học Nông nghiệp Việt Nam* **2019**, *17(8)*, 645–664.
22. Ha, N.T.T.; Koike, K.; Nhuan, M.T. Improved accuracy of chlorophyll-a concentration estimates from MODIS imagery using a two-band ratio algorithm and geostatistics: As applied to the monitoring of eutrophication processes over Tien Yen Bay (Northern Vietnam). *Remote Sens.* **2013**, *6(1)*, 421–442.
23. Usowicz, B.; Lipiec, J.; Łukowski, M.; Słomiński, J. Improvement of spatial interpolation of precipitation distribution using cokriging incorporating rain-gauge and satellite (SMOS) soil moisture data. *Remote Sens.* **2021**, *13(5)*, 1039.

Improved assessment of eutrophication in Thac Ba Reservoir using Sentinel-3B image and Co-kriging

Nguyen Thien Phuong Thao¹, Pham Quang Vinh^{2*}, Nguyen Trung Hau¹, Tran Thi Hien³, Nguyen Thi Thu Ha^{1*}

¹ Faculty of Geology, VNU University of Science, Vietnam National University, Hanoi; nguyenthienphuongthao_t57@hus.edu.vn; nguyentrungchau_t64@hus.edu.vn; hantt_kdc@vnu.edu.vn

² Institute of Geography, Vietnam Academy of Science and Technology; pqvinh@ig.vast.vn

³ Department of Geomatics, Cheng Kung University, Taiwan; p66127059@gs.ncku.edu.tw

Abstract: Accurately modeling the spatial distribution of the trophic state index (TSI) is a critical task for assessing the current state of eutrophication in reservoir water, enabling the proficient management of pollution. This study aims to determine the geospatial analysis method and auxiliary data to improve accuracy in modelling spatial distribution of TSI, thereby helping to optimize assessment of eutrophication in Thac Ba Reservoir. Basing on in situ dataset of Chlorophyll-a (Chla) concentration, water transparency (SD) obtained from 50 point in the reservoir and Sentinel-3B (S3B) images taken simultaneously on December 16, 2022, we have determined two parameters α and β from S3B image that are highly correlated with in situ TSI ($r = 0.79$ and 0.70) and contribute to enhancing the accuracy of the co-kriging model in estimating TSI in reservoir surface water (R^2 is from 0.43 to 0.83; RMSE is from 1.69 to 1.23). The result shows that the estimated TSI values confirm the transition of the reservoir's trophic state from mesotrophic to eutrophic and exhibit spatial heterogeneity, depending on human activities in and around the reservoir regions. These research outcomes underscore the effectiveness of S3B satellite imagery as a valuable tool for assessing water quality in large reservoir, such as Thac Ba Reservoir.

Keywords: Mapping; Eutrophication; Thac Ba Reservoir; Sentinel-3B; TSI.