

ƯỚC TÍNH ĐỘ ĐỤC TỪ ẢNH LANDSAT - 8: SO SÁNH MÔ HÌNH RIDGE VÀ PARTIAL LEAST SQUARES REGRESSION TẠI PHÁ TAM GIANG, THÀNH PHỐ HUẾ

Hà Nam Thăng*, Lê Văn Dân, Hoàng Thị Thu Thảo

Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế

*Tác giả liên hệ: hanamthang@huaf.edu.vn

Nhận bài: 21/11/2025 Hoàn thành phản biện: 09/01/2026 Chấp nhận bài: 16/01/2026

TÓM TẮT

Độ đục đóng vai trò quan trọng trong điều tiết động lực hệ sinh thái đầm phá ven biển thông qua kiểm soát khả năng xuyên sáng, chu trình dinh dưỡng và năng suất thủy sinh. Nghiên cứu này đánh giá độ đục tại phá Tam Giang (TP. Huế, Việt Nam), tích hợp số liệu thực địa với ảnh vệ tinh Landsat - 8. Hai mô hình tuyến tính Ridge và Partial Least Squares Regression (PLSR) được so sánh để ước tính độ đục, sử dụng hai bộ số liệu tích hợp các nguồn biến đổi ảnh khác nhau. Kết quả cho thấy mô hình PLSR vượt trội với $R^2 = 0,79$, RMSE = 0,41, MAE = 0,31 khi chọn biến theo hệ số tương quan Pearson, trong khi Ridge chỉ đạt $R^2 = 0,65$. Phân tích mức độ đóng góp khẳng định vai trò chi phối của kênh đò-cần hồng ngoại (R865_655) và hồng ngoại sóng ngắn (R2201, R1609). Bản đồ độ đục từ mô hình PLSR xác định ba khu vực độ đục cao, gồm cửa sông, vùng nuôi trồng thủy sản ven bờ và khu sản xuất nông nghiệp, với giá trị > 6 Formazin Nephelometric Unit (FNU); trong khi khu vực trung tâm và phía Nam duy trì độ đục thấp hơn. Nghiên cứu nhấn mạnh tính khả thi và độ tin cậy của phương pháp viễn thám trong giám sát độ đục quy mô lớn, giúp phát triển bền vững hệ sinh thái đầm phá ven biển.

Từ khóa: Chất lượng nước, Đầm phá, Độ đục, Landsat - 8, PLSR, Ridge, Tam Giang, Viễn thám

ESTIMATING WATER TURBIDITY FROM LANDSAT - 8 IMAGE: ASSESSMENT OF RIDGE AND PARTIAL LEAST SQUARES REGRESSION MODELS IN TAM GIANG LAGOON, HUE CITY

Ha Nam Thang*, Le Van Dan, Hoang Thi Thu Thao

University of Agriculture and Forestry, Hue University

*Corresponding author: hanamthang@huaf.edu.vn

Received: 21/11/2025

Revised: 09/01/2026

Accepted: 16/01/2026

ABSTRACT

Turbidity strongly regulates ecosystem dynamics in coastal lagoons by controlling light availability, nutrient cycling, and aquatic productivity. This study investigated turbidity in the northern Tam Giang Lagoon (Hue, Vietnam) by integrating field measurements with Landsat - 8 imagery. Two regression approaches - Ridge and Partial Least Squares Regression (PLSR) - validated their performance for turbidity estimation, revealing an outperformance of PLSR, achieving $R^2 = 0.79$, RMSE = 0.41, and MAE = 0.31 using a subset of Pearson based selection features, compared to Ridge with $R^2 = 0.65$. Variable importance analysis highlighted the dominant role of red-NIR bands (R865_655) and shortwave infrared bands (R2201, R1609) in explaining turbidity dynamics. Spatial maps generated by PLSR identified three hotspots close to river mouths, shallow aquaculture zones, and agricultural margins, where turbidity exceeded 6 Formazin Nephelometric Unit (FNU), while central and southern lagoon waters remained clearer. These findings demonstrate that satellite-based turbidity modeling provides reliable, cost-effective monitoring across complex lagoon environments. By capturing both natural variability and anthropogenic impacts, this approach offers crucial insights for sustainable water quality management and adaptive responses to climate and human pressures in coastal ecosystems.

Keywords: Lagoon, Landsat - 8, PLSR, Remote sensing, Ridge, Tam Giang, Turbidity, Water quality

1. MỞ ĐẦU

Độ đục là một thông số quan trọng đánh giá chất lượng nước, biểu thị mức độ tán xạ ánh sáng gây ra bởi các hạt vô cơ và hữu cơ lơ lửng trong nước (Austin và cs., 2017). Độ đục cao có thể gây ra những tác động tiêu cực đáng kể đến hệ sinh thái thủy sinh (Zanghi & Ioannou, 2025), làm giảm độ xuyên sáng, ức chế quang hợp, từ đó suy giảm sản lượng sơ cấp và ảnh hưởng đến chuỗi thức ăn. Đồng thời, nó cản trở tầm nhìn và gây tổn thương cơ quan hô hấp của động vật thủy sinh. Sự biến động độ đục cũng phản ánh tình trạng ô nhiễm từ các nguồn nhân tạo như nước thải sinh hoạt, công nghiệp và nông nghiệp. Do đó, giám sát độ đục là một nội dung không thể thiếu trong đánh giá và quản lý chất lượng môi trường nước (Chowdhury và cs., 2023; Shi và Wang, 2010). Hiện nay, công nghệ viễn thám đa phổ mang lại những ưu điểm vượt trội trong nghiên cứu độ đục dựa trên cơ sở vật lý của tương tác giữa ánh sáng và các hạt lơ lửng trong nước. Sự hiện diện của vật chất lơ lửng làm thay đổi đặc tính phản xạ phổ của mặt nước, biểu hiện qua sự gia tăng phản xạ trong dải sóng khả kiến và cận hồng ngoại (Chowdhury và cs., 2023; Matos và cs., 2024). Sự gia tăng hạt lơ lửng làm thay đổi màu nước, đồng thời làm tăng phản xạ ở các bước sóng Red và NIR, tạo cơ sở cho việc ước lượng độ đục từ viễn thám. Công nghệ này cho phép quan sát phân bố độ đục trên một không gian rộng theo chuỗi thời gian.

Trong những năm gần đây, ảnh viễn thám kết hợp với các mô hình hồi quy đã được sử dụng rộng rãi để ước tính các thông số chất lượng nước tại hồ, sông và vùng ven biển (Liu và Wang, 2019; Magri và cs., 2023). Tuy nhiên, quá trình hiệu chuẩn và xác thực mô hình đòi hỏi dữ liệu thực địa đầy đủ và mô hình phức tạp (Chowdhury và cs., 2023; Magri và cs., 2023; Sebastia-Frasquet và cs., 2019). Các nghiên cứu chuyên sâu về ước tính độ đục bằng các mô

hình tuyến tính có điều chuẩn, đặc biệt là Ridge và hồi quy bình phương tối thiểu từng phần Partial Least Squares Regression (PLSR), hiện vẫn còn hạn chế tại các hệ đầm phá nhiệt đới nông có động lực thủy văn và quang học phức tạp. Tại Việt Nam, các nghiên cứu viễn thám nước chủ yếu tập trung vào chất rắn lơ lửng (TSS) và chlorophyll-a (Hieu và cs., 2023), trong khi đánh giá trực tiếp hiệu năng của Ridge và PLSR cho ước tính độ đục từ Landsat - chuỗi các vệ tinh vận hành hơn 50 năm (Hemati và cs., 2021) - ở các đầm phá còn hạn chế, đặc biệt tại phá Tam Giang - hệ đầm phá lớn nhất Đông Nam Á. Do vậy, nghiên cứu này sẽ đánh giá và so sánh hai mô hình trên để đề xuất mô hình tối ưu cho giám sát độ đục, góp phần bổ sung bằng chứng thực nghiệm cho việc ứng dụng mô hình tuyến tính trong hệ sinh thái đầm phá nhiệt đới.

2. NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Địa điểm và vật liệu nghiên cứu

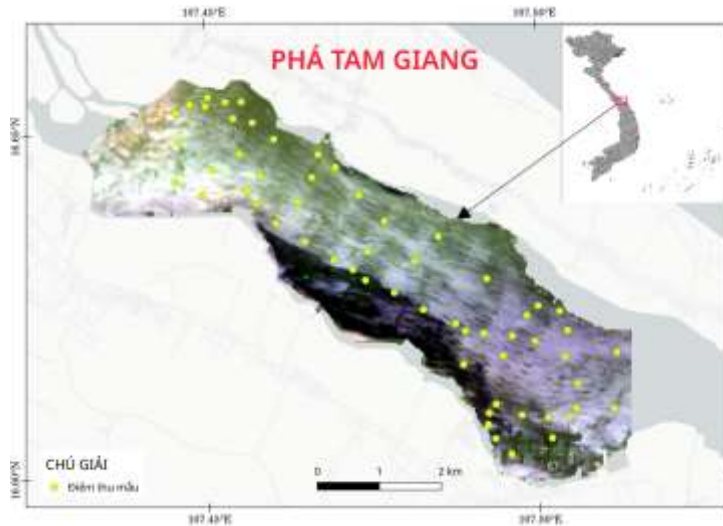
Khu vực nghiên cứu thuộc phía bắc phá Tam Giang (Huế), là khu vực chuyển tiếp giữa sông nội địa và vùng ven biển với đa dạng các hoạt động nông nghiệp và nuôi trồng thủy sản, làm gia tăng dòng thải dinh dưỡng và chất rắn vào đầm. Dưới tác động của khí hậu nhiệt đới gió mùa, các yếu tố thủy động lực như mực nước và dòng chảy biến động mạnh, khiến độ đục trở thành chỉ số nhạy, phản ánh rõ tác động tự nhiên và nhân sinh, hỗ trợ công tác quản lý chất lượng nước và phát triển bền vững.

Thu mẫu nghiên cứu

Mẫu nước (dùng để phân tích độ đục) được thu vào mùa khô (từ 14/7 đến 17/7/2025) theo sơ đồ điểm được thiết kế trước. Do sự bố trí không đồng nhất của nó sáo và địa hình đáy tại khu vực nghiên cứu, các điểm thu mẫu được điều chỉnh tương ứng trong quá trình thu mẫu (Hình 1). Tại mỗi điểm thu mẫu, thuyền được neo hoặc di chuyển thật chậm đến điểm lấy mẫu, tránh

ảnh hưởng đến việc khuấy động nền đáy, nhẹ nhàng dùng chai 0,5 l lấy mẫu nước cách tầng mặt 10 cm. Nước sau khi thu được giữ trong chai và bảo quản ngay trong thùng đá, mang về phòng thí nghiệm và được phân

tích trong ngày, sử dụng thiết bị đo chất lượng nước đa yếu tố YSI Exo tại Khoa Thủy sản, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế.



Hình 1. Khu vực nghiên cứu phá Tam Giang, Thành phố Huế

Vật liệu nghiên cứu

Ảnh đa phổ Landsat - 8 là nguồn vật liệu chính trong nghiên cứu này, được tải từ kho dữ liệu của cục khảo sát địa chất Mỹ (<https://glovis.usgs.gov/>). Cảnh có mã LC08_L1TP_125048_20250714_20250726_02_T1, được thu nhận vào ngày 14 tháng 7 năm 2025, không bị ảnh hưởng bởi mây tại vùng nghiên cứu. Ảnh gốc ban đầu có 11 băng ảnh, chứa giá trị bức xạ vật lý và được tham chiếu tại hệ tọa độ WGS 84, UTM 48N.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Hiệu chỉnh khí quyển

Thuật toán Dark Spectrum Fitting (DSF) tích hợp trong ACOLITE (Quinten, 2024) được sử dụng để hiệu chỉnh khí quyển ảnh vệ tinh. ACOLITE giúp giảm đáng kể nhiễu do đường đi khí quyển, đưa giá trị ảnh gốc về phản xạ bề mặt nước, phản ánh chính xác giá trị của điểm ảnh tại thời điểm thu nhận ảnh (Bảng 1).

Bảng 1. Thông số hiệu chỉnh khí quyển dùng trong chương trình ACOLITE

Thông số	Giá trị
aerosol_correction	dark_spectrum
min_tgas_aot	0,85
min_tgas_rho	0,70
dsf_aot_estimate	fixed
Đầu ra	Băng ảnh chứa giá trị phản xạ bề mặt

2.2.2. Hoán chuyển băng ảnh

Các phép biến đổi phổ biến trong dải phổ từ xanh green, cam đến đỏ được sử

dụng nhằm tăng cường số lượng biến đầu vào (phương trình (1) đến (6)).

$$NDTI = \frac{R_{655} - R_{561}}{R_{655} + R_{561}} \quad (1)$$

$$R_{865_655} = \frac{R_{865}}{R_{655}} \quad (2)$$

$$R_{655_561} = \frac{R_{655}}{R_{561}} \quad (3)$$

$$R_{613_592} = \frac{R_{613}}{R_{592}} \quad (4)$$

$$R_N = R_{655} \times R_{865} \quad (5)$$

$$R_{655_2} = R_{655} \times R_{655} \quad (6)$$

trong đó, NDTI là Normalized Different Turbidity Index (Lacaux et al., 2007), R_{561} , R_{592} , R_{613} , R_{655} và R_{865} lần lượt là giá trị phản xạ tại các băng xanh green 1, xanh green 2, cam, đỏ và cận hồng ngoại.

Sau giai đoạn này, một bộ số liệu hoàn chỉnh được xây dựng, bao gồm 9 băng phổ gốc (vùng bờ (443 nm), xanh blue (483 nm), xanh green 1 (561 nm), xanh green 2 (592 nm), cam, đỏ, cận hồng ngoại (NIR), hồng ngoại sóng ngắn 1 (SWIR1), hồng ngoại sóng ngắn 2 (SWIR2)) và 6 biến hoán chuyển băng mới được tạo ra, tổng cộng tạo thành bộ số liệu gồm 60 điểm thực đo và 15 biến đầu vào.

2.2.3. Mô hình hóa ước tính độ đục

Trong nghiên cứu này, hai mô hình tuyến tính là Ridge và PLSR được so sánh trong ước tính độ đục từ ảnh đa phổ Landsat - 8.

Giới thiệu mô hình tuyến tính Ridge

Hồi quy Ridge là một phương pháp hồi quy tuyến tính có điều chuẩn, sử dụng thành phần phạt L_2 để kiểm soát độ lớn của hệ số, nhằm giảm đa cộng tuyến và cải thiện tính ổn định của mô hình. Trong viễn thám chất lượng nước, Ridge đặc biệt phù hợp với các bài toán sử dụng nhiều biến dự báo có tương quan cao, như ước tính độ đục từ dữ liệu đa phổ. Siêu tham số chính (α) quyết định mức độ phạt lên các hệ số và được xác định thông qua phương pháp thử sai dựa trên hiệu năng mô hình trực tiếp.

Giới thiệu mô hình tuyến tính PLSR

Phương pháp hồi quy bình phương tối thiểu từng phần (PLSR) được thiết kế cho các bài toán đa biến với số lượng biến dự báo lớn và có đa cộng tuyến cao. Khác với Ridge chỉ điều chuẩn hệ số hồi quy, PLSR tạo ra các thành phần tiềm ẩn tối ưu hóa cả phương sai đầu vào và tương quan với biến mục tiêu giúp giảm chiều dữ liệu và nâng cao độ ổn định mô hình. Trong các ứng dụng viễn thám, PLSR đặc biệt hiệu quả khi khai thác thông tin đa kênh phổ để dự báo các tham số chất lượng nước như độ đục. Siêu tham số chính - số thành phần tiềm ẩn - được tối ưu thông qua thử nghiệm dựa trên hiệu năng mô hình.

Huấn luyện mô hình

Nghiên cứu sử dụng hai bộ dữ liệu để đánh giá khả năng ước tính độ đục từ ảnh Landsat-8 bằng các mô hình Ridge và PLSR, gồm (1) bộ số liệu đầy đủ gồm 15 biến đầu vào (9 băng phổ gốc và 6 biến hoán chuyển) và (2) bộ biến đã lọc gồm các biến có $|r| > 0,14$. Ngưỡng tương quan thấp được áp dụng nhằm phù hợp với đặc trưng phản xạ yếu của hệ đầm phá nông nhiệt đới (Jay và cs., 2017) và tránh loại bỏ sớm các biến hữu ích thông qua đánh giá hiệu năng mô hình. Hai biến R_{865_655} và R_{613} được bổ sung dựa trên cơ sở quang học nước (phản xạ đối với vật chất lơ lửng) và kiểm định mô hình, tạo thành tập 9 biến (' R_{613_592} ', ' b_{2201} ', ' b_{1609} ', ' b_{561} ', ' $NDTI$ ', ' R_{655_561} ', ' b_{443} ', ' R_{865_655} ', ' b_{613} '), cân bằng giữa khả năng học và hạn chế quá khớp. Dữ liệu được chia ngẫu nhiên theo tỷ lệ 80% cho huấn luyện (48 mẫu) và 20% cho kiểm định (12 mẫu). Thư viện python scikit-learn (Pedregosa và cs., 2011) được sử dụng để thực thi, huấn luyện và dự báo kết quả.

2.2.4. Đánh giá mô hình

Để đánh giá độ chính xác của mô hình ước tính, các tham số đánh giá chuẩn,

phổ biến trong nghiên cứu mô hình hóa được sử dụng, bao gồm hệ số R^2 , sai số bình phương nhỏ nhất (RMSE), sai số trung bình tuyệt đối (MAE) và mức quan trọng của biến (điểm Variable Importance in Projection - VIP) (phương trình (7), (8), (9), và (10)). Biến đầu vào được đánh giá là quan trọng nếu có điểm VIP > 1 và ít quan trọng hơn nếu điểm VIP < 1.

$$R^2(y, \hat{y}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{7}$$

với $\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2$

$$RMSE(y, \hat{y}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{8}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|\hat{y}_i - y_i|) \tag{9}$$

$$VIP_j = \sqrt{\frac{p \times \sum_{a=1}^A (w_{ja}^2 \times SSY_a)}{\sum_{a=1}^A SSY_a}} \tag{10}$$

VIP score

trong đó:

ϵ : sai số; n : tổng số mẫu kiểm định

\hat{y}_i giá trị dự báo; y_i : giá trị thực đo

p : Số biến dự báo (biến độc lập X) trong mô hình

A: Số thành phần PLS (biến tiềm ẩn) được sử dụng trong mô hình

w_{ja} : Trọng số của biến j trong thành phần PLS thứ a . Bình phương trọng số (w_{ja}^2) phản ánh mức đóng góp của biến j vào thành phần a

SSY_a : Tổng bình phương của biến phản hồi Y được giải thích bởi thành phần a . Giá trị này thể hiện lượng phương sai của Y được thành phần PLS thứ a nắm bắt

$\sum_{a=1}^A SSY_a$: Tổng phương sai của Y được giải thích bởi tất cả các thành phần

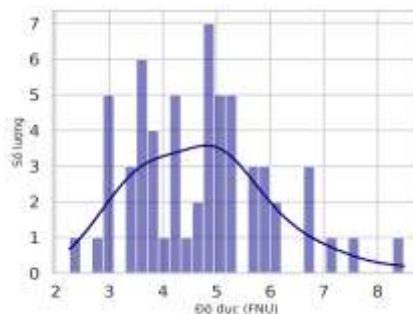
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Biến động độ đục tại vùng nghiên cứu

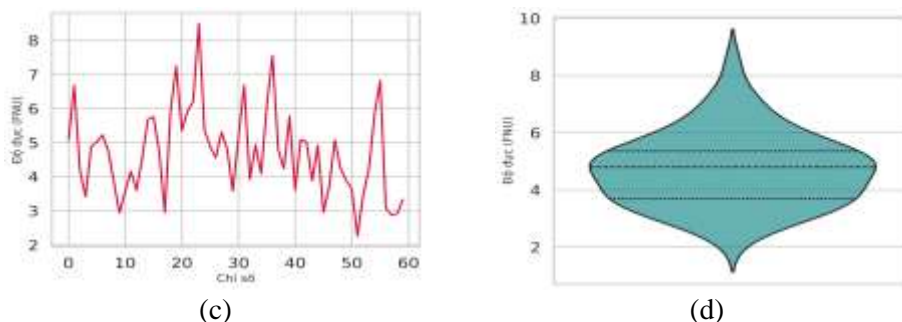
Đồ thị phân tích cho thấy các đặc trưng thống kê rõ rệt (Hình 2). Biểu đồ violin và mật độ chỉ ra giá trị độ đục tập trung chủ yếu trong khoảng 3,5 - 6,0 FNU, với phân bố lệch phải nhẹ (Hình 2b, 2d). Biểu đồ hộp cho thấy trung vị khoảng 4,8 FNU và IQR từ ~3,8 đến 5,3 FNU, cùng một điểm ngoại lai khoảng 9,0 FNU, phản ánh mức đục khá cao nhưng ít gặp (Hình 2a). Đường mật độ xác nhận phân bố gần chuẩn, với mật độ lớn nhất trong khoảng 3,5 - 5,5 FNU, chiếm khoảng 40% số quan sát; các đỉnh phụ gần 3,0 và 6,0 FNU cho thấy sự biến thiên điều kiện môi trường trong quá trình lấy mẫu (Hình 2c). Các biểu đồ phân tích cho thấy độ nhất quán tương đối của các mức độ đục, đồng thời thừa nhận sự dao động tự nhiên vốn có trong các thông số chất lượng nước.



(a)



(b)



Hình 2. Biểu đồ biến động độ đục tại vùng nghiên cứu: (a) biểu đồ hộp; (b) biểu đồ tần suất và mật độ; (c) biểu đồ đường và (d) biểu đồ violin

3.2. Mô hình hóa ước tính độ đục dùng tất cả các biến

Phân tích so sánh cho thấy PLSR vượt trội rõ rệt so với Ridge trong dự báo độ đục. Trên tập kiểm định, PLSR đạt $R^2 = 0,75$, RMSE = 0,42 và MAE = 0,34, trong khi Ridge chỉ đạt $R^2 = 0,53$, RMSE = 0,59

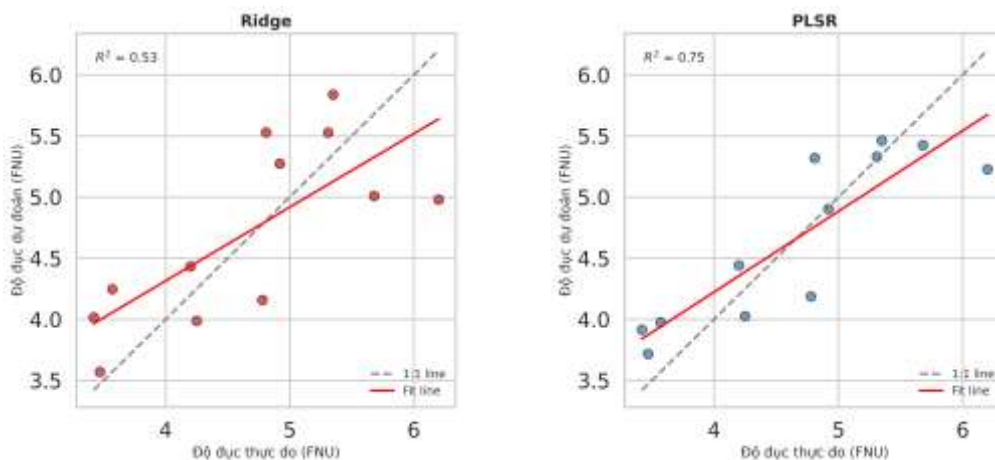
và MAE = 0,51 (Bảng 2). Mức chênh 22 điểm phần trăm R^2 cùng mức giảm 29% RMSE và 33% MAE khẳng định độ chính xác và ổn định vượt trội của PLSR. Dù cả hai đều lệch so với đường 1:1, mô hình PLSR cho đường hồi quy bám sát hơn và dự báo tốt nhất trong khoảng độ đục trung bình (4,5 - 5,5 FNU).

Bảng 2. Độ chính xác của mô hình khi sử dụng tất cả biến đầu vào

Mô hình	R^2	RMSE	MAE
PLSR	0,75	0,42	0,34
Ridge	0,53	0,59	0,51

Độ tin cậy mô hình biến đổi rõ rệt theo từng khoảng giá trị độ đục. Ở mức độ đục thấp (3,5 - 4,5 FNU), cả hai mô hình đều cho sai số lớn với nhiều điểm dự báo lệch xa quan trắc. Trong khoảng trung bình, độ chính xác được cải thiện, và PLSR duy

trì phân bố điểm sát đường hồi quy hơn nhờ RMSE và MAE thấp hơn. Ở mức độ đục cao (5,5 - 6,0 FNU), cả hai mô hình đều có xu hướng đánh giá thấp, nhưng PLSR vẫn thể hiện sai lệch hệ thống nhỏ hơn và độ chính xác tốt hơn so với Ridge (Hình 3).



Hình 3. Đồ thị phân tán các mô hình khi sử dụng tất cả biến đầu vào

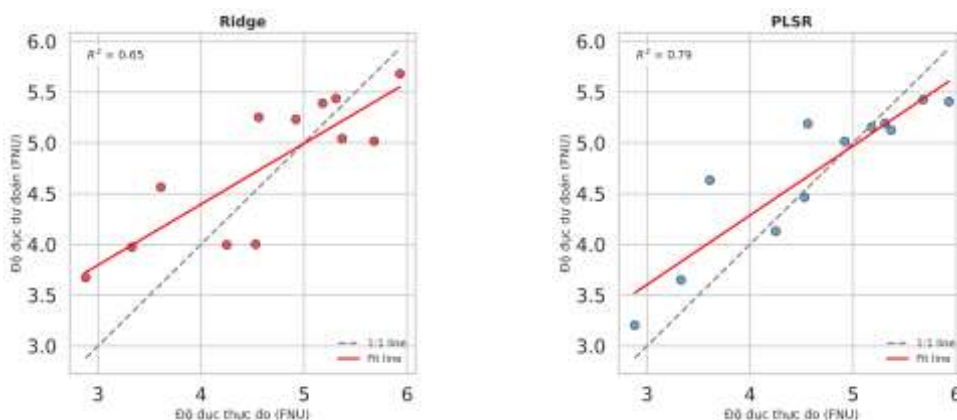
3.3. Mô hình hóa ước tính độ đục dùng các biến có chọn lọc

Sau giai đoạn lọc biến dựa trên hệ số tương quan Pearson, PLSR đạt được hệ số xác định $R^2=0,79$, cao hơn đáng kể so với

Ridge ($R^2 = 0,65$). Đồng thời, các chỉ số sai số của PLSR cũng thấp hơn (RMSE = 0,41; MAE = 0,31) so với Ridge (RMSE = 0,54; MAE = 0,47), chứng tỏ khả năng dự đoán chính xác và ổn định hơn trong kịch bản này (Bảng 3).

Bảng 3. Độ chính xác của mô hình sau khi lọc biến

Mô hình	R^2	RMSE	MAE
PLSR	0,79	0,41	0,31
Ridge	0,65	0,54	0,47



Hình 4. Đồ thị phân tán các mô hình khi tiến hành lọc biến

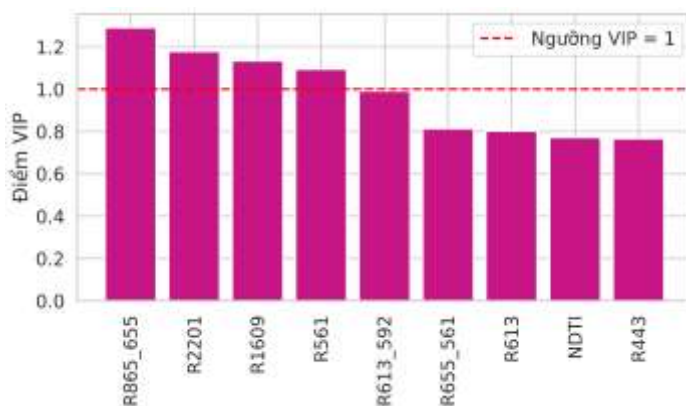
Đồ thị phân tán (Hình 4) cho thấy PLSR đã hoạt động ổn định hơn với nhiều điểm kiểm định bám sát đường chuẩn (1:1) theo biên độ dữ liệu thực đo, thể hiện độ tin cậy cao của kết quả ước tính từ ảnh Landsat - 8 (Bảng 3). Như vậy, bước lọc biến dựa trên hệ số tương quan Pearson đã giúp mô hình PLSR tổ hợp các thành phần liên quan có ý nghĩa vật lý - thống kê rõ ràng hơn, phản ánh trực tiếp mối quan hệ giữa tín hiệu phổ Landsat - 8 và độ đục, từ đó cải thiện đáng kể tính ổn định và khả năng tổng quát hóa của mô hình ($R^2 = 0,79$, RMSE = 0,41 FNU). Giá trị RMSE = 0,41 FNU cho thấy mô hình có khả năng ước tính độ đục với sai số ở mức thấp so với biên độ biến thiên quan sát được trong khu vực nghiên cứu. Trong bối cảnh mô hình hóa độ đục từ ảnh vệ tinh thường chịu ảnh hưởng của nhiễu khí quyển, độ phân giải không gian và tính không đồng nhất quang học của nước, mức

sai số này được xem là chấp nhận được và có ý nghĩa thực tiễn. Xem xét các nghiên cứu tương tự ở khu vực đầm phá, ven bờ và dùng mô hình tuyến tính thì hướng tiếp cận trong nghiên cứu này đạt kết quả rất tiềm năng (PLSR, $R^2 = 0,79$) so với mô hình hàm bậc hai ($R^2 = 0,72$) (Pereyra-Laguna và cs., 2025), tuyến tính đa biến bậc nhất ($R^2 = 0,727$) (Liu & Wang, 2019) và hàm tuyến tính bậc nhất ($R^2 \sim 0,70$) (Ouma et al., 2020) từ ảnh Landsat - 8. Một số nghiên cứu khác sử dụng ảnh Sentinel - 2 có độ phân giải không gian cao hơn (10 m) nhưng kết quả có độ chính xác thấp hơn như nghiên cứu dùng mô hình stepwise linear regression (SLR) ($R^2 = 0,73$) (Magrì và cs., 2023) hoặc kết quả gần tương tự ($R^2 \sim 0,56 - 0,84$) (Chowdhury và cs., 2023) dùng các hàm tuyến tính, hàm mũ.

Điểm số VIP cho thấy sự đóng góp phân cấp rõ rệt của các biến phổ vào mô

hình PLSR ước tính độ đục từ ảnh Landsat - 8 cho đầm phá. Dải đỏ R865_655 thể hiện tầm quan trọng cao nhất với điểm VIP ~ 1,30, tiếp theo là R2201 với VIP ~ 1,18, R1609 với VIP ~ 1,14, R561 với VIP ~ 1,08, và R613_592 với VIP ~ 0,98 gần ngưỡng quan trọng. Trong khi đó, các biến còn lại gồm R655_561, R613, NDTI, và R443 cho thấy mức

độ quan trọng từ trung bình đến thấp, với điểm VIP dao động từ 0,80 đến 0,77, cho thấy vai trò hỗ trợ trong mô hình. Sự phân biệt rõ ràng giữa các nhóm biến cho thấy gợi ý rằng việc ước tính độ đục dựa chủ yếu vào các đặc điểm phổ cụ thể thay vì phụ thuộc vào toàn bộ thông tin phổ một cách đồng đều (Hình 5).

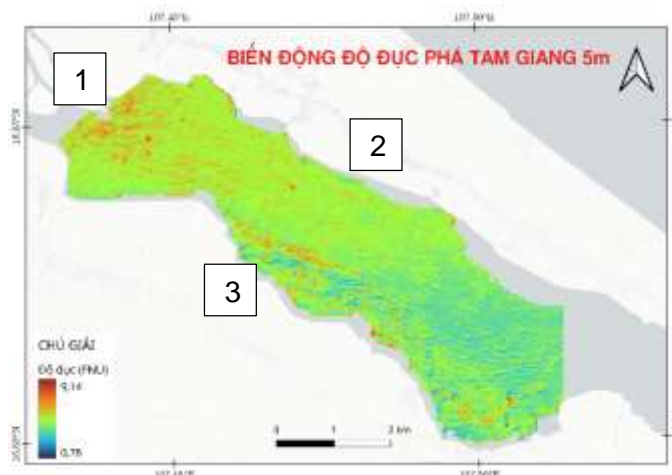


Hình 5. Tầm quan trọng của các biến trong mô hình PLSR giai đoạn tối ưu

Độ chính xác mô hình cải thiện rõ nhờ vai trò chi phối của dải đỏ - cận hồng ngoại, phù hợp với cơ chế tán xạ ngược mạnh trong khoảng 600 - 700 nm khi nồng độ chất lơ lửng tăng. Tầm quan trọng của R2201 và R1609 (SWIR) tiếp tục khẳng định độ nhạy của vùng phổ này đối với biến động bức xạ do hạt lơ lửng, đồng thời giảm nhiều từ CDOM và chlorophyll. Nhờ đó, PLSR với lựa chọn biến phù hợp từ ảnh Landsat - 8 vẫn đạt độ chính xác cao, cho thấy tính hiệu quả và chi phí thấp so với các mô hình phức tạp hoặc dữ liệu độ phân giải cao.

3.4. Biến động độ đục theo không gian từ kết quả mô hình hóa

Bản đồ độ đục cho thấy vùng có giá trị độ đục cao hơn tập trung gần những vùng chịu tác động mạnh từ đất liền và giảm dần về phía biển cũng như trung tâm đầm. Ba điểm nóng nổi bật gồm: (1) khu vực cửa sông (~8,8 - 10 FNU), phản ánh tải lượng trầm tích lớn; (2) vùng nước nông cạnh các ao nuôi thủy sản (7,7 - 8,8 FNU) với các mảng đục do nuôi thâm canh và tái huyền phù; (3) khu vực giáp đất nông nghiệp (6,6 - 8,8 FNU) với các vệt đục lan từ bờ vào đầm và đều vượt ngưỡng >6 FNU. Phía Nam đầm có độ đục biến thiên trong khoảng thấp hơn (4,4 - 5,5 FNU), tạo các dải chuyển tiếp lan vào trung tâm, phản ánh sự khuếch tán trầm tích theo dòng chảy (Hình 6).



Hình 6. Phân bố độ đục được tính chuyển từ mô hình PLSR ở độ phân giải không gian 5 m (tính chuyển từ bản đồ gốc 30 m của ảnh Landsat - 8 nhằm làm nổi bật các vùng phân bố) tại vùng nghiên cứu. Các số 1, 2, 3 đánh dấu Khu vực 1, 2, 3 tương ứng

Sự phân bố độ đục từ bản đồ mô hình ảnh vệ tinh (~ 2,5 - 10 FNU) phản ánh rõ tác động đồng thời của điều kiện tự nhiên và hoạt động nhân sinh với độ đục cao hơn quanh cửa sông và khu vực nuôi thủy sản đến chất thải hữu cơ và tái huyền phù mạnh tại vùng nước nông, cung cấp cơ sở quan trọng cho quản lý môi trường và nuôi thủy sản.

Dù đạt kết quả tích cực, nghiên cứu mới thực hiện trong mùa khô với số mẫu hạn chế, nên giảm khả năng khái quát. Các nghiên cứu sau sẽ mở rộng dữ liệu theo mùa, thử nghiệm trên ảnh độ phân giải cao (Sentinel-2) và kết hợp thêm thuật toán phi tuyến hoặc dữ liệu vệ tinh khác (MODIS, VIIRS) để kiểm chứng và theo dõi độ đục ổn định hơn.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu ứng dụng ảnh vệ tinh trong quan trắc độ đục nước tại phá Tam Giang cho thấy mô hình PLSR ($R^2 = 0,79$; $RMSE = 0,41$), kết hợp với lọc biến, cho độ tin cậy cao hơn Ridge. Các kênh phổ vùng đỏ - cận hồng ngoại và hồng ngoại sóng ngắn giữ vai trò quyết định, phản ánh mối liên hệ vật lý giữa chất lơ lửng và phản xạ quang học mặt nước. Bản đồ độ đục xác

định ba khu vực có độ đục đáng lưu ý gồm cửa sông Ô Lâu, vùng nuôi trồng thủy sản ven bờ và khu vực nông nghiệp, nơi giá trị vượt 6 FNU. Nghiên cứu này lần đầu tiên chứng minh rằng việc tích hợp ảnh Landsat - 8 với mô hình PLSR đã lọc biến có thể áp dụng rộng rãi cho giám sát độ đục vùng phá Tam Giang và mở rộng đến các đầm phá tương tự. Đề nghị triển khai hệ thống theo dõi dựa trên mô hình này và bổ sung dữ liệu theo mùa mưa để mô hình hoàn thiện hơn.

LỜI CẢM ƠN

Chúng tôi gửi lời cảm ơn đến nhóm sinh viên Huỳnh Long Hải, Lê Minh Thuận, Ngô Thị Minh Thư (lớp Quản lý Thủy sản K56) và đề tài cấp trường (DHL-2025-TS-SV-01) đã hỗ trợ một phần kinh phí và nhân lực thu mẫu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Austin, A. N., Hansen, J. P., Donadi, S., & Eklöf, J. S. (2017). Relationships between aquatic vegetation and water turbidity: A field survey across seasons and spatial scales. *Plos One*, 12(8), e0181419. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181419>
- Chowdhury, M., Vilas, C., Van Bergeijk, S., Navarro, G., Laiz, I., & Caballero, I. (2023). Monitoring turbidity in a highly variable estuary using Sentinel 2-A/B for ecosystem

- management applications. *Frontiers in Marine Science*, 10(1186441). <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1186441>
- Hemati, M., Hasanlou, M., Mahdianpari, M., & Mohammadimanesh, F. (2021). A Systematic Review of Landsat - 8 Data for Change Detection Applications: 50 Years of Monitoring the Earth. *Remote Sensing*, 13(15), 2869. <https://doi.org/10.3390/rs13152869>
- Jay, S., Guillaume, M., Minghelli, A., Deville, Y., Chami, M., Lafrance, B., & Serfaty, V. (2017). Hyperspectral remote sensing of shallow waters: Considering environmental noise and bottom intra-class variability for modeling and inversion of water reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 200, 352–367. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.020>
- Lacaux, J. P., Tourre, Y. M., Vignolles, C., Ndione, J. A., & Lafaye, M. (2007). Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 106(1), 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.012>
- Liu, L.-W., & Wang, Y.-M. (2019). Modelling Reservoir Turbidity Using Landsat - 8 Satellite Imagery by Gene Expression Programming. *Water*, 11(7), 1479. <https://doi.org/10.3390/w11071479>
- Magri, S., Ottaviani, E., Prampolini, E., Besio, G., Fabiano, B., & Federici, B. (2023). Application of machine learning techniques to derive sea water turbidity from Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 30, 100951. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100951>
- Matos, T., Martins, M. S., Henriques, R., & Goncalves, L. M. (2024). A review of methods and instruments to monitor turbidity and suspended sediment concentration. *Journal of Water Process Engineering*, 64(105624). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105624>
- Nguyen Trinh Duc Hieu, Nguyen-Quang, Tri, Nguyen Huu Huan, Tran Duc Dien, Nguyen Dang Huyen Tran, Nguyen Phuong Lien, & Tran Thi Van. (2023). Estimating the chlorophyll-a in the Nha Trang Bay using Landsat-8 OLI data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1226(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1226/1/012010>
- Ouma, Y. O., Noor, K., & Herbert, K. (2020). Modelling Reservoir Chlorophyll-a, TSS, and Turbidity Using Sentinel-2A MSI and Landsat - 8 OLI Satellite Sensors with Empirical Multivariate Regression. *Journal of Sensors*, 2020(1), 1–21. <https://doi.org/10.1155/2020/8858408>
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12(85), 2825–2830.
- Pereyra-Laguna, E., Ojeda-Castillo, V., Herrera-López, E. J., Del Real-Olvera, J., Hernández-Mena, L., Vallejo-Rodríguez, R., & Díaz, J. (2025). Satellite-Based Prediction of Water Turbidity Using Surface Reflectance and Field Spectral Data in a Dynamic Tropical Lake. *Remote Sensing*, 17(15), 2595. <https://doi.org/10.3390/rs17152595>
- Quinten, V. (2024, November 16). ACOLITE. Retrieved November 16, 2024, from <https://github.com/acolite/acolite>.
- Sebastiá-Frasquet, M.-T., Aguilar-Maldonado, J. A., Santamaría-Del-Ángel, E., & Estornell, J. (2019). Sentinel 2 Analysis of Turbidity Patterns in a Coastal Lagoon. *Remote Sensing*, 11(24), 2926. <https://doi.org/10.3390/rs11242926>
- Shi, W., & Wang, M. (2010). Characterization of global ocean turbidity from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer ocean color observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C11), 2010JC006160. <https://doi.org/10.1029/2010JC006160>
- Zanghi, C., & Ioannou, C. C. (2025). The impact of increasing turbidity on the predator–prey interactions of freshwater fishes. *Freshwater Biology*, 70(1), e14354. <https://doi.org/10.1111/fwb.14354>