TẠP CHÍ
KHÍ TƯỢNG THỦY VĂN

Check for updates

Bài báo khoa học

Đánh giá xói lở bờ sông Hàm Luông bằng công nghệ viễn thám tích hợp công nghệ học máy và hệ thống phân tích đường bờ

Lê Văn Quyền[1], Đoàn Văn Bình[1]*

[1] Chương trình thạc sĩ Công nghệ, Tái sử dụng và Quản lý nước, Khoa Kỹ thuật, Trường Đại học Việt Đức; quyenlv0223@gmail.com; binh.dv@vgu.edu.vn

*Tác giả liên hệ: binh.dv@vgu.edu.vn; Tel.: +84–989697736

Ban Biên tập nhận bài: 15/3/2024; Ngày phản biện xong: 22/4/2024; Ngày đăng: 25/8/2024

Tóm tắt: Trước đây, viễn thám được ứng dụng để nghiên cứu xói lở bờ sông chủ yếu bằng việc kết hợp các băng ảnh và hầu hết chưa được kiểm định bằng tọa độ đường bờ thực tế. Trong nghiên cứu này, xói lở bờ sông Hàm Luông được đánh giá bằng việc tích hợp công nghệ học máy vào viễn thám và hệ thống phân tích đường bờ (DSAS). Ảnh vệ tinh Landsat được sử dụng để đánh giá diễn biến xói lở từ 1999 đến 2022, có kiểm định bằng 100 tọa độ GPS bờ sông được đo đạc năm 2022. Kết quả trích xuất đường bờ là đáng tin cậy, với sai số căn quân phương (RMSE) là 15,92 m, nhỏ hơn đáng kể so với độ phân giải 30m của Landsat. Giai đoạn 1999-2022, xói lở chiếm ưu thế (68% chiều dài), chủ yếu xảy ra ở bờ phải, với tổng diện tích mất đất là 176,7 ha (7,54 ha/năm). Xói lở bờ gia tăng theo thời gian, cả về tốc độ lẫn phạm vi. Bờ sông chuyển từ bồi tụ trong giai đoạn 1999-2005 (+1,65 m/năm) sang bị xói trong giai đoạn 2005-2022 (-3,71 m/năm). Giai đoạn chuyển tiếp từ bồi tụ sang xói lở là 2005-2009, khi các siêu đập thủy điện trên lưu vực sông Mê Công được đưa vào vận hành. Do đó, việc phục hồi lớp thực vật ven sông cần được ưu tiên để bảo vệ bờ sông đang bị xói lở.

Từ khóa: Xói lở bờ sông; Viễn thám; Học máy; GIS; DSAS; ĐBSCL.

1. Giới thiệu

Xói lở bờ sông hiện là một vấn nạn thiên tai chung của hầu hết các hệ thống sông ngòi trên thế giới [1–4]. Đây là một hiểm họa thiên tai dài hạn, có ảnh hưởng đa dạng đến kinh tế, xã hội, sinh kế và có thể đến cả chính trị [4]. Cụ thể, những hệ quả tất yếu của xói lở bờ sông bao gồm giảm chất lượng nước, mất ổn định công trình, đe dọa đến an toàn của khu dân cư và thay đổi bất lợi cho hệ sinh thái [5]. Tuy có tốc độ ảnh hưởng tương đối chậm nhưng xói lở bờ để lại hậu quả dài lâu cho các đối tượng trong vùng ảnh hưởng và khả năng hồi phục là rất thấp [6–8].

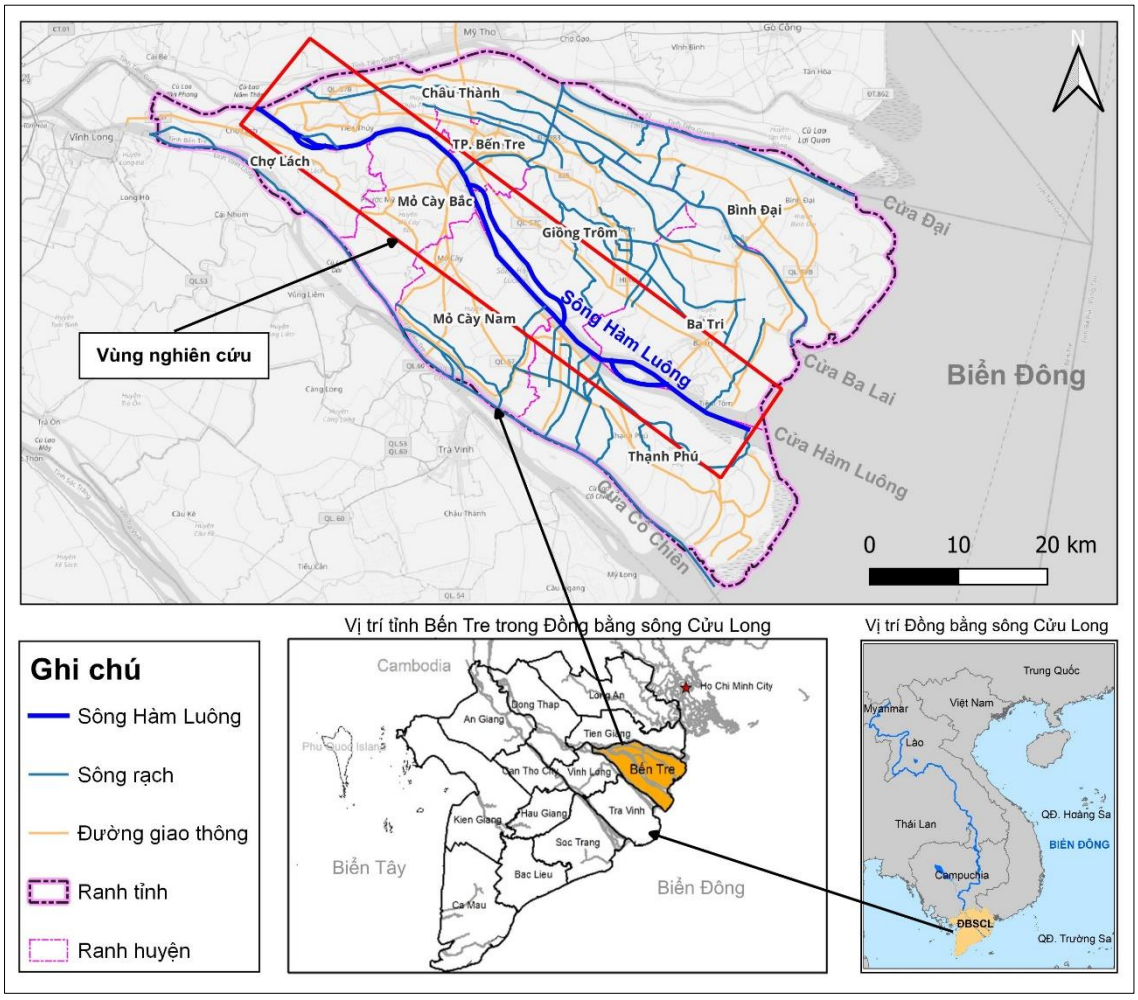
Trên thế giới, nhiều kỹ thuật hiên đại đã được ứng dụng trong nghiên cứu xói lở bờ sông ở phạm vi rộng. Điển hình như các nghiên cứu sử dụng ảnh vệ tinh, không ảnh độ phân giải cao (LIDAR), máy quét Laser, và máy bay không người lái (UAV/Drone) [9–12]. Trong đó, kỹ thuật viễn thám cho thấy ưu điểm so với các công cụ còn lại cả về mặt thời gian và nguồn kinh phí nghiên cứu, trong khi kết quả vẫn có độ tin cậy cao. Trong cuộc đua công nghệ 4.0, việc sử dụng trí tuệ nhân tạo và mô hình học máy trong các nghiên cứu về xói lở bờ cũng ngày càng phổ biến. Điểm mạnh của các mô hình này là số liệu đầu vào có thể đơn giản (kể cả dữ liệu phi tuyến tính rời rạc), độ tin cậy cao và tiết kiệm thời gian tính toán [13–15].

Thời gian gần đây, các nghiên cứu xói lở bờ sông bằng dữ liệu viễn thám ở Việt Nam đã tương đối phổ biến. Mặc dù vậy, đường bờ chủ yếu được trích xuất bằng các chỉ số đơn giản bằng cách kết hợp các băng ảnh lại với nhau. Cụ thể, các nghiên cứu đã thực hiện thường sử

dụng các chỉ số thực vật khác biệt chuẩn hóa NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) hay chỉ số nước khác biệt chuẩn hóa NDWI (*Normalized Difference Water Index*) để trích xuất đường bờ [16–18]. Các chỉ số này thường cho độ sai số lớn khi khu vực nghiên cứu có nhiều tàu thuyền neo đậu hay độ phản xạ mặt đất cho tín hiệu không rõ ràng. Một số nghiên cứu chỉ đơn thuần sử dụng giá trị NDVI làm căn cứ trích xuất đường bờ và không có kiểm định kết quả tính toán so với đường bờ thực tế. Vì vậy, phương pháp trích xuất đường bờ sông dựa vào ảnh vệ tinh cần được nghiên cứu sâu hơn để tăng độ chính xác, chẳng hạn như tích hợp thuật toán học máy ngay trong các mô hình viễn thám để tăng độ chính xác của việc trích xuất đường bờ.

Là một vùng kinh tế trọng điểm phía Nam, Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) không chỉ cung cấp nguồn nông sản cho Việt Nam mà còn phục vụ xuất khẩu ra toàn thế giới. Tuy nhiên, ĐBSCL hiện nay đang chịu tác động nghiêm trọng từ thiên tai, điển hình như xói lở lòng sông, bờ sông và bờ biển, hạn mặn, ngập lụt, và sụt lún đất. Trong đó, xói lở bờ sông đang ngày một diễn biến nhanh hơn, với mức độ ngày càng trầm trọng. Theo thống kê của bộ NN&PTNT, số vị trí ghi nhận hiện tượng sạt lở bờ sông đang gia tăng đáng kể, từ 100 điểm trong năm 2010 lên 680 điểm được báo cáo trong năm 2019. Việc phát triển các đập thủy điện thượng lưu được đánh giá là nguyên nhân số một của hiện tượng xói lở trên diện rộng ở ĐBSCL, trong khi khai thác cát là tác nhân gây trầm trọng hóa vấn đề này [19–21]. Mặc dù vậy, xói lở bờ sông thường ít được quan tâm hơn các vấn đề khác (ngập lụt, xâm nhập mặn) do phạm vi và mức độ thiệt hại tương đối nhỏ hơn trong khi diễn biến tương đối chậm.

Một đặc điểm quan trọng của bờ sông ở ĐBSCL đó là; trước đây dọc bờ sông luôn có một thảm thực vật tự nhiên bảo vệ bờ như bần, dừa nước. Theo thời gian, lớp thực vật này bị



Hình 1. Vị trí vùng nghiên cứu.

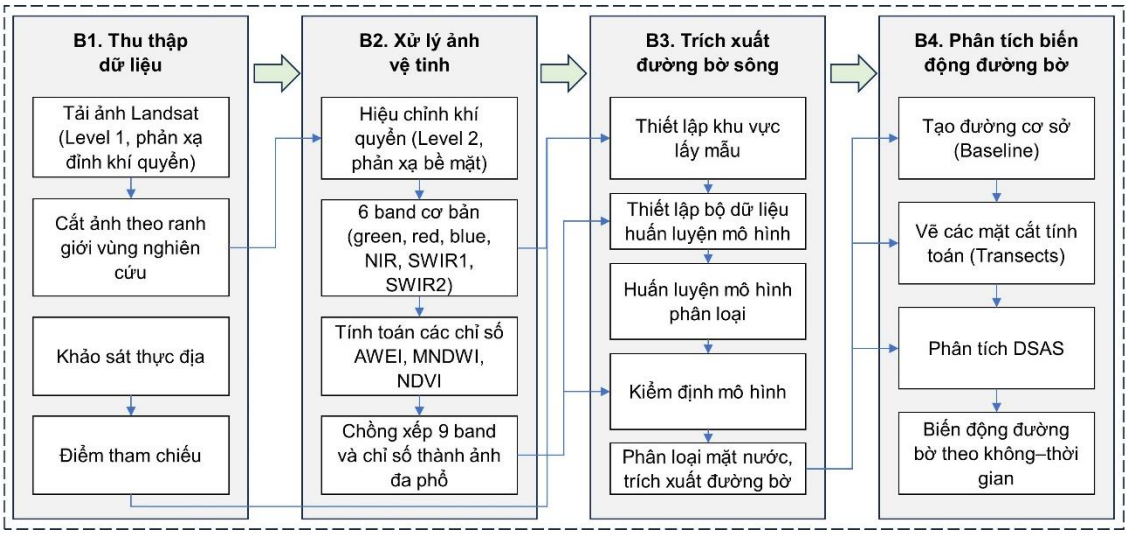
xói lở, và khi dọc bờ sông không còn lớp thực vật bảo vệ nữa thì tốc độ xói lở sẽ diễn ra rất nhanh. Điển hình là dọc sông Cổ Chiên, đặc biệt là trên các cù lao (tỉnh Trà Vinh và Vĩnh Long). Dọc sông Hàm Luông hiện nay lớp thực vật (bần, dừa nước) còn tương đối dày (vài mét tới vài chục mét), nhưng đã có hiện tượng xói lở lớp thực vật này. Nếu không có giải pháp bảo vệ lớp thực vật tự nhiên trên sông Hàm Luông thì trong vòng 10 năm tới lớp thực vật này có thể có nguy cơ biến mất (như đã từng diễn ra với sông Cổ Chiên). Khi đó, xói lở bờ sông Hàm Luông sẽ rất trầm trọng, ảnh hưởng đáng kể đến đời sống của cư dân ven sông.

Các nghiên cứu xói lở ở ĐBSCL hiện nay thường dùng các chỉ số như NDVI, NDWI [16–17] để trích xuất bờ sông, vì vậy độ chính xác còn khá hạn chế, nhất là những vùng chịu ảnh hưởng triều như ĐBSCL. Trong khi đó, xói lở bờ sông ở ĐBSCL đang diễn biến nhanh trên diện rộng nên cần được nghiên cứu cấp bách nhằm hiểu được hiện trạng và nguyên nhân, làm cơ sở đề ra các biện pháp tối ưu. Do đó, nghiên cứu này đề ra mục tiêu: (1) tích hợp thuật toán học máy vào công nghệ viễn thám nhằm tăng độ tin cậy của quá trình nhận diện đường bờ; (2) sử dụng công nghệ DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) để phân tích diễn biến xói lở bờ sông và (3) phân vùng nguy cơ xói lở bờ sông.

Khu vực nghiên cứu là Sông Hàm Luông (Hình 1), và diễn biến xói, bồi được phân tích, đánh giá cho thời gian từ 1999 đến 2022. Đây là một trong các công trình nghiên cứu mang tính tiên phong ở ĐBSCLvà Việt Nam trong việc sử dụng hai kỹ thuật tiên tiến (viễn thám và học máy) để đánh giá biến động bờ sông. Bên cạnh đó, nghiên cứu kỳ vọng sẽ đem lại kết quả quan trọng cho các bên liên quan để xem xét đề xuất biện pháp hữu hiệu nhằm bảo vệ bờ sông một cách kịp thời. Ngoài ra, phương pháp luận trong nghiên cứu này có thể được áp dụng cho các vùng nghiên cứu khác trong tương lai.

2. Dữ liệu và phương pháp

Nghiên cứu này tích hợp công nghệ học máy vào kỹ thuật viễn thám để trích xuất đường bờ sông qua các năm, sau đó đánh giá diễn biến đường bờ theo không-thời gian bằng hệ thống phân tích biến động đường bờ DSAS. Tổng quan các nội dung và thứ tự thực hiện nghiên cứu được tóm lược trong Hình 2 và chi tiết hóa trong các nội dung tiếp theo.



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc quá trình nghiên cứu xói lở bờ sông.

2.1. Dữ liệu sử dụng

Để trích xuất đường bờ dài hạn (1999-2022) cho khu vực sông Hàm Luông, ảnh Landsat đã được sử dụng do vệ tinh này có chuỗi dữ liệu dài (từ những năm 1970s), là loại ảnh vệ tinh duy nhất phù hợp với thời đoạn phân tích trong nghiên cứu này. Dữ liệu này được cung cấp miễn phí từ trang web chính thức của cơ quan Khảo sát Địa chất Hoa Kỳ tại địa chỉ

https://earthexplorer.usgs.gov/. Do cảm biến của vệ tinh Landsat là loại quang học nên chất lượng ảnh thường sẽ chịu ảnh hưởng bởi sự che phủ của mây. Cân nhắc vấn đề này, 06 ảnh Landsat (đều là Landsat 5 và 8) đã được lựa chọn cho các năm 1999, 2005, 2009, 2014, 2018, và 2022 (Bảng 1). Ảnh Landsat 7 không được sử dụng là do 1) các ảnh trước năm 2003 có mức độ mây che phủ cao, gây thiếu hụt thông tin để nghiên cứu và 2) các ảnh sau năm 2003 bị lỗi ở nhiều dãy quét trong vùng nghiên cứu (scanline error). Ảnh được tải xuống là dữ liệu mức 1 (Level 1), đã được nắn chỉnh tọa độ địa lý, nhưng trước khi sử dung cần hiệu chỉnh khí quyển. Bên cạnh đó, để hỗ trợ quá trình trích xuất và đánh giá độ tin cậy của đường bờ sông, 100 vị trí bờ sông (năm 2022) đã được thu thập tọa độ GPS, sau đây gọi là các điểm tham chiếu.

Bảng 1. Các ảnh vệ tinh Landsat được sử dụng trong nghiên cứu.

STT	Vệ tinh	Cảm biến	Ngày chụp	Độ che phủ của mây (%)
1	Landsat 5	TM	06/21/1999	10,00
2	Landsat 5	TM	08/24/2005	1,00
3	Landsat 5	TM	12/09/2009	1,00
4	Landsat 8	OLI	02/22/2014	1,80
5	Landsat 8	OLI	10/31/2018	6,42
6	Landsat 8	OLI	12/13/2022	14,26

2.2. Hiệu chỉnh khí quyển

Quá trình hiệu chỉnh khí quyển (atmospheric correction, AC) nhằm giảm thiểu ảnh hưởng từ môi trường đến giá trị các điểm ảnh, đồng thời chuyển giá trị số (digital number, DN) thành giá trị phản xạ bề mặt (surface reflection, SR). Để thực hiện hiệu chỉnh khí quyển, chúng tôi sử dụng công cụ ACOLITE, với thuật toán "*Dark Spectrum Fitting*" [22–23]. Công cụ mã nguồn mở này phù hợp cho việc hiệu chỉnh khí quyển đối với ảnh vệ tinh Landsat và Sentinel nhằm mục đích phân loại mặt nước với các đối tượng khác. Các thông số đầu vào để hiệu chỉnh (như nồng độ ozone, hơi nước, hiệu chỉnh khí dung…) có thể tùy biến nhằm làm nổi bật khu vực mặt nước. Giá trị các pixel của ảnh Landsat sau khi hiệu chỉnh là giá trị phản xạ bề mặt, phù hợp với đặc tính quang phổ phản xạ khác nhau của các vật thể trên mặt đất.

2.3. Tính toán các chỉ số bổ sung

Các băng (band) ảnh được sử dụng để chiết xuất đường bờ sông bao gồm xanh dương (blue), xanh lá (green), đỏ (red), cận hồng ngoại (near-infrared, NIR), hồng ngoại sóng ngắn 1 (short-wave infrared-1, SWIR1) và hồng ngoại sóng ngắn 2 (short-wave infrared-2, SWIR2). Bên cạnh đó, 03 chỉ số được thiết lập dựa vào 06 băng cơ bản, bao gồm chỉ số trích xuất mặt nước tự động (Automated Water Extraction Index, AWEI) [24], chỉ số nước khác biệt chuẩn hóa cải thiện (Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI) [25] và chỉ số NDVI. Công thức tính như sau:

$$AWEI = 4\times \rho_{Green} - \rho_{SWIR1} - 0{,}25\times\rho_{NIR} + 2{,}75\times\rho_{SWIR2} \quad (1)$$

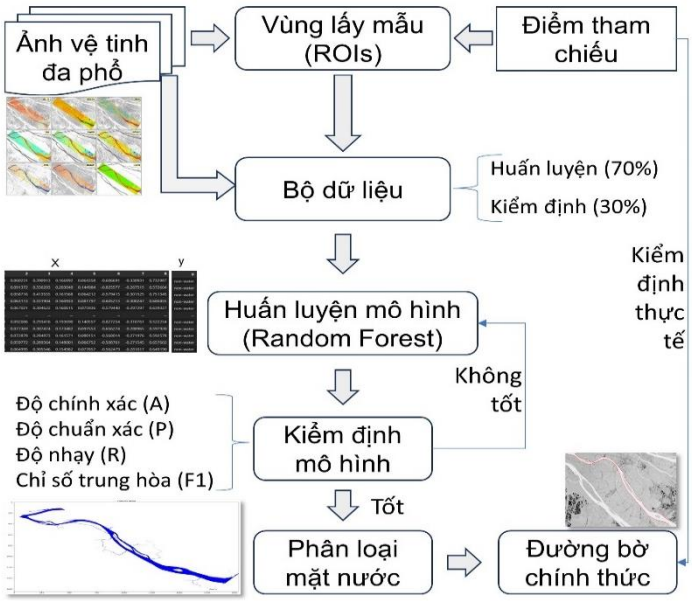
$$MNDWI = \frac{(\rho_{Green} - \rho_{SWIR1})}{(\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})} \quad (2)$$

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{Red})}{(\rho_{NIR} + \rho_{Red})} \quad (3)$$

Trong đó ρ_{Green}, ρ_{Red}, ρ_{NIR}, ρ_{SWIR1}, và ρ_{SWIR2}, lần lượt là các trị số phản xạ bề mặt của các băng ảnh xanh lá, đỏ, cận hồng ngoại, và hồng ngoại sóng ngắn 1 và 2. Cuối cùng, 06 băng ảnh cơ bản và 03 chỉ số được chồng xếp thành một ảnh đa phổ, được dùng cho quá trình trích xuất đường bờ sông.

2.4. Trích xuất đường bờ sông bằng kỹ thuật viễn thám kết hợp học máy

Về cơ bản, đường bờ sông Hàm Luông qua các năm được trích xuất bằng cách tách lớp mặt nước từ ảnh Landsat thông qua các bước thực hiện như được chi tiết trong Hình 3. Để nâng cao độ tin cậy của đường bờ được trích xuất, quá trình phân loại có giám sát (*supervised classification*) sử dụng mô hình học máy rừng ngẫu nhiên (*Random Forest, RF*) đã được tiến hành. Đầu tiên, 90 vùng "lấy mẫu huấn luyện" (*Regions of Interest, ROIs*) được thiết lập dọc theo sông bờ sông Hàm Luông, tương ứng với 15.103 pixel. Chúng bao gồm hai loại, được gán nhãn 0 và 1 (*target*), tương ứng đại diện cho các khu vực mặt nước và không phải mặt nước căn cứ vào thông tin từ tổ hợp các băng ảnh khả kiến (*Red - Green - Blue*) và vị trí các điểm tham chiếu.



Hình 3. Sơ đồ quy trình trích xuất đường bờ sông bằng viễn thám tích hợp học máy.

Tiếp theo, bộ dữ liệu dùng để "huấn luyện" mô hình được thiết lập bằng cách chồng xếp các ROIs lên các băng ảnh vệ tinh đã được hiệu chỉnh khí quyển ở cuối Mục 2.3, để trích xuất giá trị phản xạ mặt đất của các pixel ảnh tương ứng. Kết quả, bộ dữ liệu là một ma trận có 10 cột dữ liệu, bao gồm 09 biến độc lập (*feaure variables*) tương ứng với 09 băng ảnh và 01 biến phụ thuộc (*target*) chứa giá trị cần phân loại (mặt nước (0)/không phải mặt nước (1)). Sau đó, bộ dữ liệu này tiếp tục được phân chia thành hai nhóm: huấn luyện (*training set*) và kiểm định (*testing set*) mô hình, lần lượt với tỷ lệ là 70% và 30%, một cách ngẫu nhiên.

Sử dụng 2 nhóm dữ liệu này, mô hình học máy RF được huấn luyện và kiểm định thông qua 04 chỉ số đánh giá tiêu chuẩn, bao gồm: độ chính xác - Accuracy (A), độ chuẩn xác - Precision (P), độ nhạy - Recall (R), và chỉ số trung hòa - F1-score (F1). Các chỉ số này đều có giá trị trong khoảng 0 đến 1, được tính toán từ dữ liệu thống kê về số lượng giá trị thực tế và dự đoán của mô hình trong ma trận kết quả (*confusion matrix*) theo các công thức từ (4) đến (7) như sau:

$$A=\frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN} \quad (4)$$

$$P=\frac{TP}{TP+FP} \quad (5)$$

$$R=\frac{TP}{TP+FN} \quad (6)$$

$$F1=\frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN} \quad (7)$$

Trong đó TP là tổng số pixel mặt nước được dự đoán đúng; FP là tổng số pixel mặt nước được dự đoán sai; TN là tổng số pixel không phải mặt nước được dự đoán đúng; và FN là tổng số pixel không phải mặt nước được dự đoán sai. Quá trình thực hiện việc huấn luyện và kiểm định được tiến hành cho đến khi nào các chỉ số kiểm tra đạt giá trị tốt (lớn hơn 0,9), lúc đó mô hình là đáng tin cậy để phân loại đường bờ cho toàn bộ vùng nghiên cứu [26]. Kết quả phân loại là một raster với 02 giá trị 0 (mặt nước) và 1 (không phải mặt nước). Cuối cùng, lớp mặt nước được chuyển thành định dạng vector và trích xuất thành đường bờ sông.

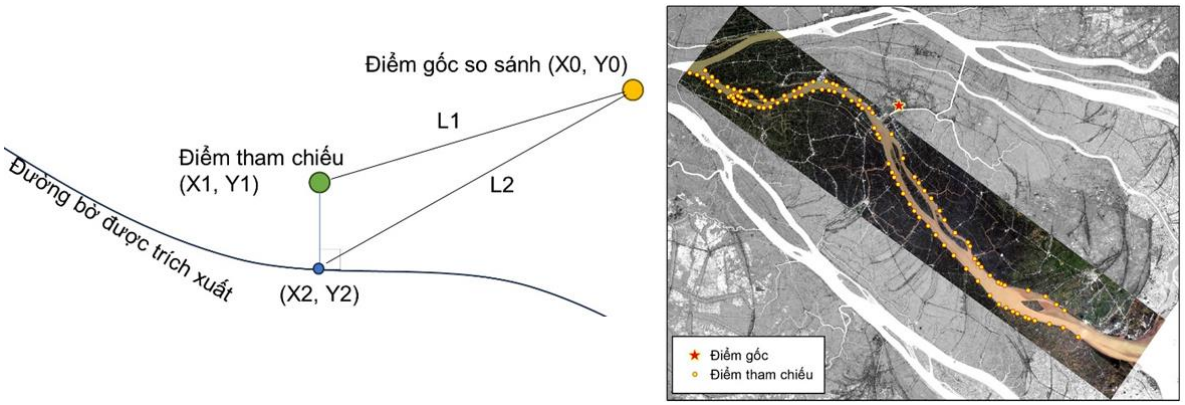
Ngoài ra, độ tin cậy của đường bờ đã trích xuất còn được đánh giá bằng cách so sánh đường bờ trích xuất năm 2022 với các vị trí tham chiếu thu thập được trong đợt khảo sát thực địa. Ứng với mỗi điểm tham chiếu, lựa chọn một điểm gần nhất (khoảng cách ngắn nhất) trên đường bờ (sau đây gọi là điểm trích xuất) để so sánh độ chính xác. Tại mỗi cặp điểm, chúng tôi tiến hành tính toán khoảng cách từ các điểm này tới một điểm gốc cố định, sau đó tính sai số căn quân phương (RMSE) của các giá trị này. Ở đây sử dụng vị trí của Đài khí tượng - thủy văn tỉnh Bến Tre (tọa độ X = 649515,188 m, Y = 1132466,445 m) làm điểm gốc so sánh. Cách thức xác định các điểm đánh giá được minh họa trong Hình 4, các khoảng cách và thông số để so sánh được tính theo các công thức (8), (9), (10) như sau:

$$L1=\sqrt{X_1-X_0\ ^2+\ Y_1-Y_0\ ^2} \quad (8)$$

$$L2=\sqrt{X_2-X_0\ ^2+\ Y_2-Y_0\ ^2} \quad (9)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{100}\sum_{i=1}^{100}\ L2_i-L1_i\ ^2} \quad (10)$$

Trong đó (X_0, Y_0), (X_1, Y_1), và (X_2, Y_2), theo đúng thứ tự là tọa độ của điểm gốc, điểm tham chiếu, và điểm trích xuất; L1, L2 lần lượt là khoảng cách từ điểm tham chiếu và điểm trích xuất đến điểm gốc; và RMSE là sai số quân phương.



Hình 4. Minh họa cách thức so sánh đường bờ được trích xuất với các điểm tham chiếu.

2.5. Đánh giá xói lở bờ sông bằng DSAS

Sau khi trích xuất được đường bờ sông qua các năm, biến động đường bờ sông Hàm Luông được phân tích bằng công cụ DSAS. Đây là một phần mở rộng trong phần mềm ArcGIS cho phép lượng hóa diễn biến của đường bờ theo không - thời gian [27]. Quy trình phân tích bao gồm 3 bước: (i) xác định đường cơ sở; (ii) vẽ các mặt cắt để tính toán (trực giao với đường cơ sở và các đường bờ); và (iii) tính toán tốc độ thay đổi của đường bờ tại các mặt cắt này. Trong nghiên cứu này, các giá trị tốc độ hồi quy tuyến tính (linear regression rate, LRR), tốc độ thay đổi điểm cuối (endpoint rate, EPR) và chuyển động ròng của đường bờ (net shoreline movement, NSM) được sử dụng để phân tích sự diễn biến của bờ sông từ năm 1999 đến 2022. Các giá trị này có thể dương (bồi tụ) hoặc âm (xói lở) tùy vào xu hướng thay đổi của đường bờ tại các vị trí khác nhau. Mức độ biến động đường bờ được phân loại thành 7 nhóm dựa trên tốc độ biến động, bao gồm: xói lở mạnh (< -5,0 m/năm), xói lở trung

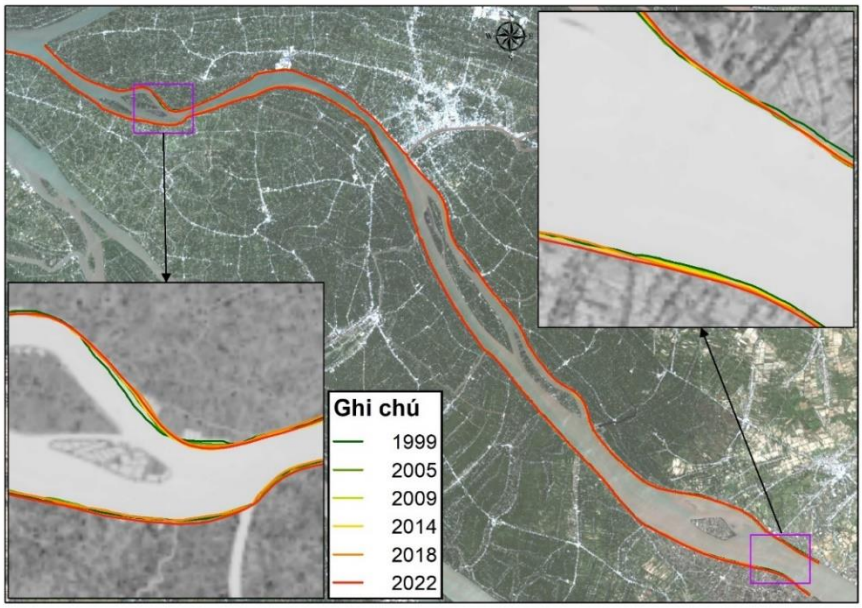
bình (-5,0 ÷ -1,0 m/năm), xói lở nhẹ (-1,0 ÷ -0,5 m/năm), ổn định (-0,5 ÷ 0,5 m/năm), bồi tụ nhẹ (0,5 ÷ 1,0 m/năm), bồi tụ trung bình (1,0 ÷ 5,0 m/năm), và bồi tụ cao (> 5,0 m/năm) [17, 28].

Quá trình hiệu chỉnh khí quyển và trích xuất đường bờ được thực hiện bằng ngôn ngữ Python trong môi trường Anaconda thông qua phần mềm Visual Studio Code. Thư viện Scikit-learn trong Python được sử dụng trong việc phân chia tập dữ liệu và đánh giá hiệu năng mô hình phân loại RF. Ngoài ra, công cụ ArcGIS 10.8 được sử dụng để thiết lập ROIs, so sánh đường bờ được trích xuất với điểm tham chiếu, làm việc với DSAS, và biểu diễn các thông tin đầu ra từ nghiên cứu.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả trích xuất đường bờ sông

Kết quả kiểm định đường bờ năm 2022 khẳng định phương pháp trích xuất đạt độ tin cậy. Mặc dù giá trị sai số căn quân phương RMSE khá lớn (15,92 m ± 3,15 m), nhưng so sánh với độ phân giải của ảnh Landsat (30 m) thì sai số này nằm trong khoảng có thể chấp nhận được. Hơn nữa, nghiên cứu quan tâm đến biến động đường bờ dài hạn nên tính nhất quán trong phương pháp trích xuất đường bờ là cần thiết, giúp đảm bảo độ tin cậy của đánh giá. Ngoài ra, để giảm thiểu sự ảnh hưởng của sai số đối với kết quả đánh giá, chúng tôi không tính toán biến động đường bờ hàng năm mà tiến hành so sánh đường bờ trong các giai đoạn từ 4-6 năm (phụ thuộc vào các ảnh tốt không bị mây che phủ). Kết quả, bằng cách tích hợp công nghệ học máy vào kỹ thuật viễn thám, đường bờ sông Hàm Luông cho các năm 1999, 2005, 2009, 2014, 2018, và 2022 đã được trích xuất (Hình 5).

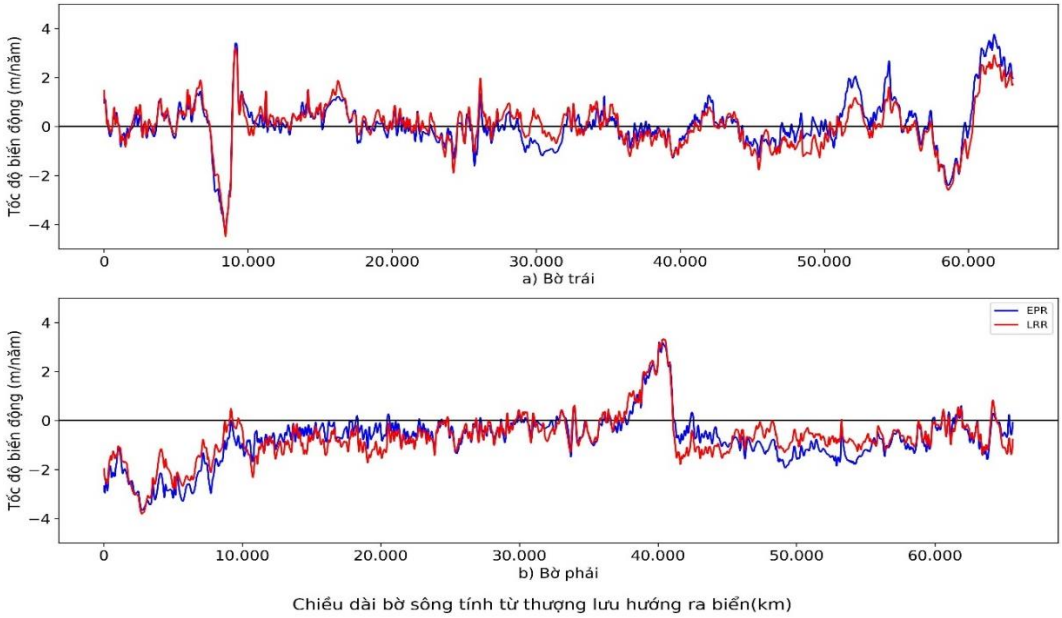


Hình 5. Kết quả trích xuất đường bờ sông Hàm Luông.

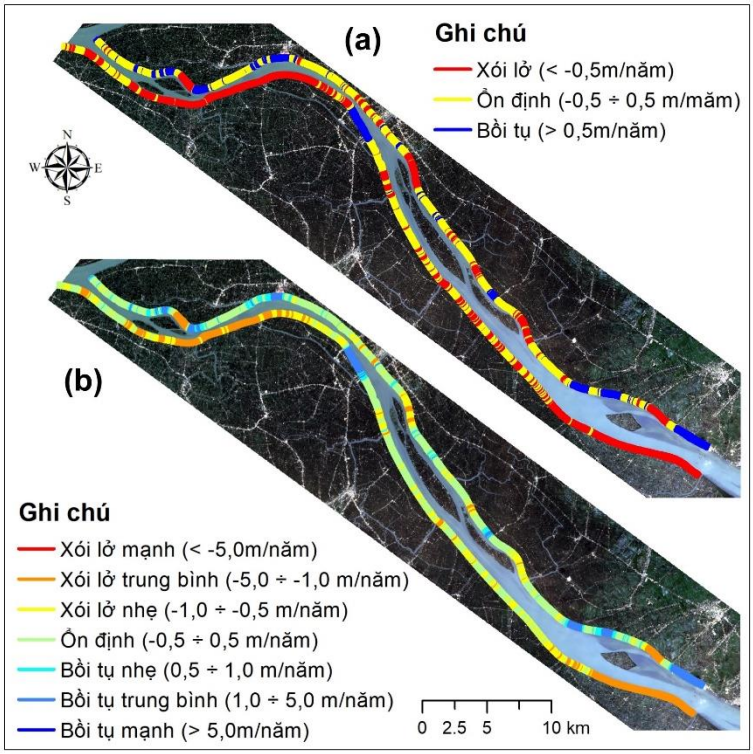
3.2. Biến động dài hạn của đường bờ

Nghiên cứu này nhằm định lượng biến động đường bờ sông Hàm Luông, một nhánh chính của sông Cửu Long. Từ các đường bờ của 6 năm trong quá khứ được tính toán, 4.293 mặt cắt được thiết lập và phân tích bằng DSAS, bao gồm 2.104 mặt cắt thuộc bờ trái và 2.189 mặt cắt thuộc bờ phải (khoảng cách trung bình giữa các mặt cắt là 30m). Kết quả đánh giá trong giai đoạn 1999-2022 cho thấy, tốc độ biến động đường bờ sông Hàm Luông dao động trong khoảng -4,29 ÷ 3,75 m/năm, giá trị trung bình là -0,35 m/năm. Cụ thể, tốc độ biến động đường bờ bình quân của bờ phải và bờ trái lần lượt là -0,77 và 0,09 m/năm. Đồng thời, giá trị trung bình chuyển động ròng của đường bờ phải là -7,97 m, so và 2,12 m phía bờ trái. Như

vậy, về mặt tổng thể thì bờ phải có xu thế bị xói và bờ trái bị bồi. Ngoài ra, tốc độ xói lở/bồi tụ cao cũng được ghi nhận ở các đoạn sông uốn khúc và vị trí kết nối với sông, kênh rạch thứ cấp. Những đặc điểm hình thái này một phần có nguyên nhân từ các điều kiện thủy động lực học phức tạp ở các vị trí đó [29].



Hình 6. Tốc độ biến động đường bờ tại các mặt cắt dọc sông Hàm Luông giai đoạn 1999-2022.



Hình 7. Phân bố các khu vực xói lở/bồi tụ (a) và biến động đường bờ (b) sông Hàm Luông giai đoạn 1999-2022.

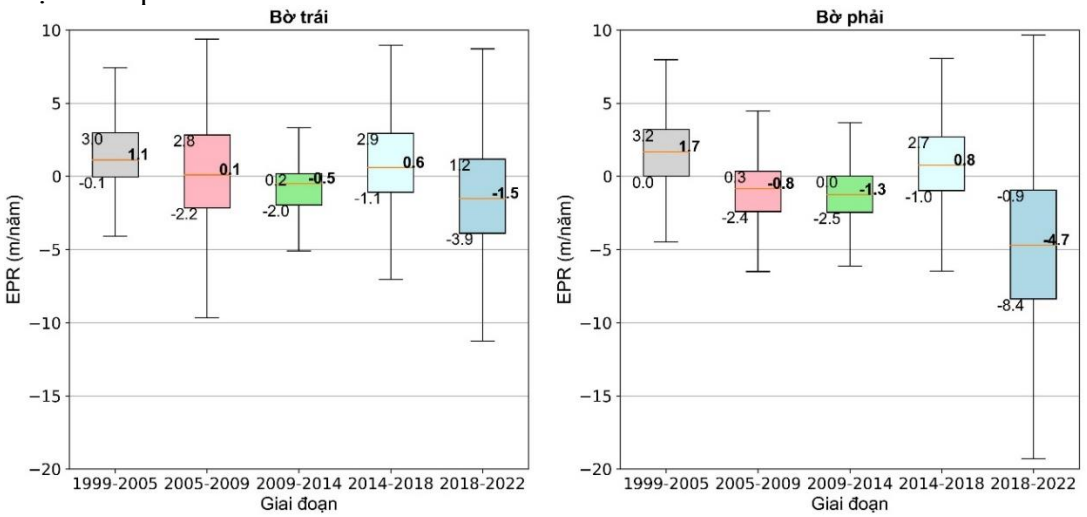
Hình 6 biểu diễn tốc độ bồi, xói của đường bờ dọc sông Hàm Luông. Các giá trị LRR và EPR phân bố ở cả phía trên và dưới của trục hoành, tương ứng với tình trạng xói lở và bồi tụ tại các vị trí khác nhau dọc bờ sông. Đáng chú ý, giá trị âm nhiều hơn ở khu vực bờ phải so với bờ trái, thể hiện rằng xói lở xảy ra chủ yếu ở bờ phải. Cụ thể, tổng số 1.007 (24%) và 1.922 (45%) mặt cắt lần lượt được ghi nhận là xói lở ở bờ trái và bờ phải. Trong khi đó, số

lượng mặt cắt bồi tụ tương ứng lần lượt là 1.087 (25%) và 256 (6%) mặt cắt. Ngoài ra, mặc dù giá trị EPR lớn hơn (không nhiều) so với LRR, nhưng xu thế thay đổi lại rất tương đồng. Mức chênh lệch trung bình giữa LRR và EPR chỉ từ 0,157 ÷ 0,178 m/năm. Do đó, chỉ số EPR có thể phù hợp cho việc đánh giá diễn biến bồi, xói của bờ sông trong các thời đoạn ngắn hơn (số lượng ảnh vệ tinh có thể sử dụng cho mỗi giai đoạn ngắn rất hạn chế do mây che phủ, không đủ số lượng ảnh để tính LRR).

Phân bố khu vực xói/bồi dọc bờ sông Hàm Luông (Hình 7a) một lần nữa khẳng định rằng bờ phải bị xói lở nhiều hơn so với bờ trái. Kết quả phân loại mức độ biến động cho thấy bờ sông ở đây bị xói lở từ thấp đến trung bình, và không có mặt cắt nào được phân loại là xói lở mạnh (Hình 7b). Xét tổng thể từ năm 1999 đến 2022, 87,87 km bờ sông (chiếm 68,23% tổng chiều dài đường bờ) đã bị xói lở, làm mất khoảng 176,7ha đất. Trong khi đó, chỉ có 40km bờ sông (chiếm 31,28%) được bồi tụ, với diện tích khoảng 72,19ha. Điều này nghĩa là trong 23 năm qua, bờ sông Hàm Luông bị xói nhiều hơn là được bồi tụ. Tuy nhiên, xét trong dài hạn, mức độ thay đổi của đường bờ có thể sẽ khác nhau trong các thời đoạn cụ thể. Do đó, cần phân tích thêm cho các thời đoạn ngắn hơn để hiểu rõ quá trình xói lở theo không-thời gian.

3.3. Diễn biến bồi, xói của đường bờ qua các giai đoạn

Để chi tiết hóa những thay đổi của bờ sông Hàm Luông theo thời gian, nghiên cứu này đã đánh giá cho 5 giai đoạn: 1999-2005, 2005-2009, 2009-2014, 2014-2018, và 2018-2022. Tốc độ biến đổi của đường bờ sông trong các thời đoạn được tổng hợp như trong biểu đồ ở Hình 8. Kết quả phân tích chỉ ra rằng giai đoạn 2018-2022 có giá trị EPR bình quân nhỏ nhất (-4,7 m/năm) đồng thời biên độ dao động là lớn nhất. Trong khi đó, 1999-2005 là giai đoạn có giá trị EPR bình quân lớn nhất (1,7 m/năm) và biên độ dao động nhỏ nhất rơi vào giai đoạn 2009-2014. Xu thế biến đổi khá thống nhất ở cả bờ trái lẫn bờ phải. Theo đó, xói lở bờ có diễn biến gia tăng ở ba giai đoạn đầu, EPR trung bình chuyển dần từ giá trị dương sang âm. Trong giai đoạn tiếp theo (2014-2018), bờ sông ở đây dường như được bồi tụ trở lại với tốc độ trung bình 0,6 và 0,8 m/năm lần lượt đối với bờ trái và bờ phải. Tuy nhiên, trong giai đoạn cuối (2018-2022), đường bờ sông bị xói lở mạnh và phức tạp hơn, với tốc độ biến động trung bình từ -1,5 đến -4,7 m/năm. Đặc biệt, tốc độ biến động lớn nhất đạt -19,3 m/năm được ghi nhận ở bờ phải.

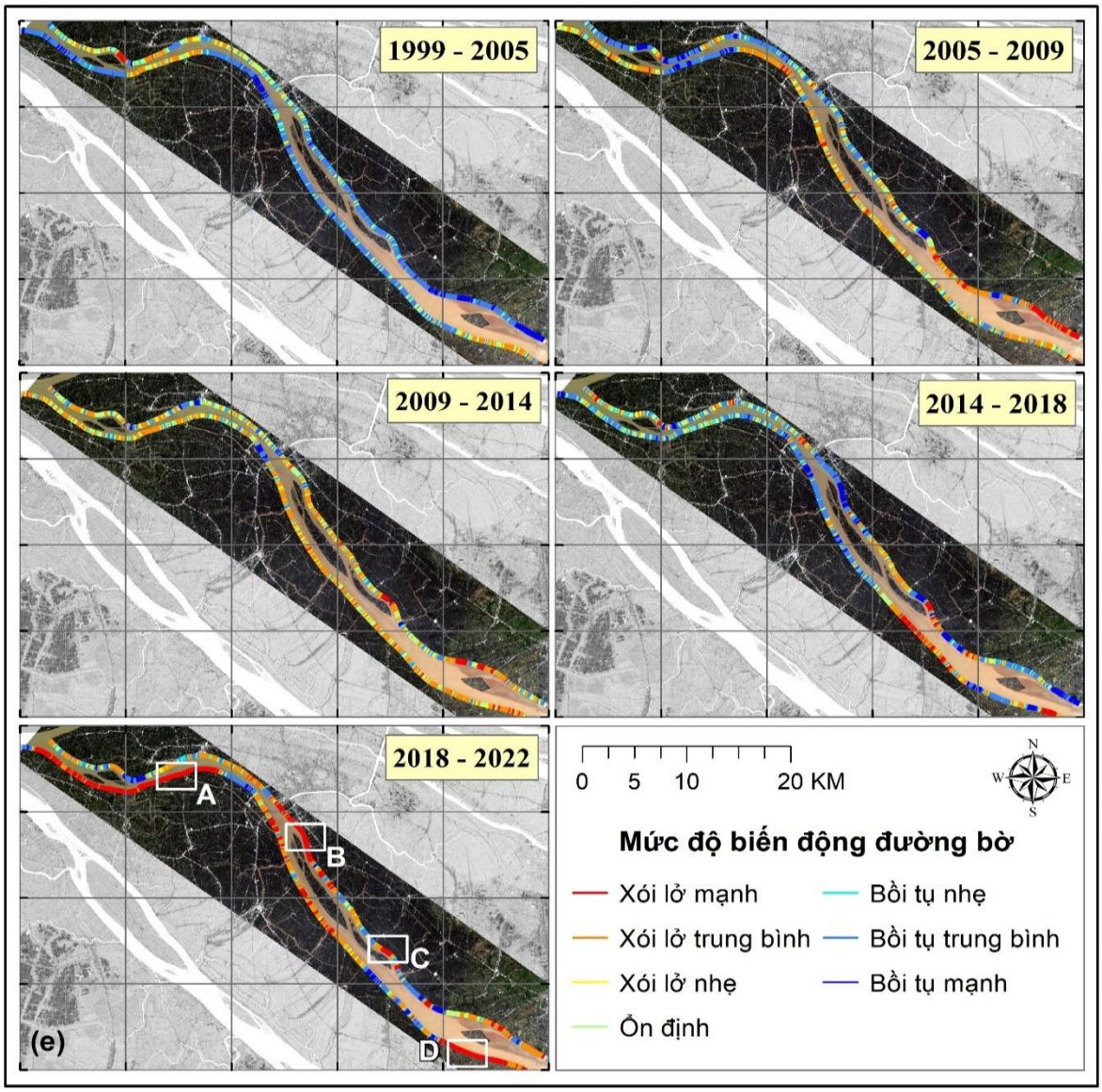


Hình 8. Tốc độ biến động đường bờ sông Hàm Luông trong 05 giai đoạn.

Kết quả đánh giá từ năm 1999-2022 cho thấy, xói lở bờ sông Hàm Luông gia tăng cả về tốc độ lẫn phạm vi và được bồi tụ nhẹ trong giai đoạn 2014-2018. Nếu như trong giai đoạn đầu tiên (1999-2005), bờ sông ở đây vẫn được bồi tụ từ 10,48 đến 10,74 ha/năm thì trong 02 giai đoạn tiếp theo (2005-2009 và 2009-2014), bờ sông đã bị xói lở với tốc độ mất đất lần

lượt là -4,92 ÷ 1,8 ha/năm và -7,92 ÷ -5,77 ha/năm. Sau đó, từ 2014 đến 2018, bờ sông lại được bồi tụ nhẹ với tốc độ trung bình 3,05 ÷ 5,66 ha/năm, trước khi bị xói lở mạnh vào giai đoạn 2018-2022 (-9,89 ÷ -29,76 ha/năm). Như vậy, có thể thấy giai đoạn 2005-2009 là giai đoạn chuyển tiếp từ pha bồi tụ sang pha xói lở của bờ sông Hàm Luông. Xu hướng này là nhất quán với kết quả của các nghiên cứu trước đây đã được thực hiện ở ĐBSCL. Ví dụ, bằng cách phân tích ảnh Landsat trong vòng 43 năm (1973-2015), nghiên cứu [30] đã kết luận rằng 2005 là năm chuyển tiếp từ bồi sang xói tại ĐBSCL. Tương tự, thông qua phân tích ảnh vệ tinh từ năm 1988 đến 2020, nghiên cứu [16] cũng xác nhận rằng ĐBSCL chuyển từ bồi sang xói vào năm 2008.

Hình 9 thể hiện sự thay đổi mức độ biến động của bờ sông theo không gian trong 5 giai đoạn. Từ năm 1999 đến 2005, bồi tụ diễn ra ở cả hai bờ sông Hàm Luông, với tốc độ từ trung bình đến mạnh ở hầu hết các mặt cắt được phân tích. Giai đoạn 2005-2009 và 2009-2014, xói lở từ mức độ nhẹ đến mạnh xuất hiện chủ yếu ở khu vực hạ lưu, một số vị trí vẫn được bồi tụ dọc bờ sông. Từ năm 2014 đến 2018, diễn biến bờ sông ở đây khá phức tạp, đặc trưng bởi sự xen kẽ của bồi tụ và xói lở, từ mức độ nhẹ đến mạnh. Đặc biệt, giai đoạn 2018-2022, xói lở chiếm ưu thế hầu hết toàn bộ chiều dài bờ sông (Hình 9e). Về mặt nguyên nhân, bên



Hình 9. Biến động đường bờ sông Hàm Luông theo thời gian. Các vùng A, B, C và D trong hình (e) thể hiện vị trí ảnh chụp thực địa trong Hình 10.

cạnh các đặc điểm tự nhiên và tác động từ phát triển nội tại thì ảnh hưởng của phát triển đập

thủy điện ở thượng lưu và hạ thấp lòng sông cũng là những nguyên nhân then chốt cần nghiên cứu thêm [21, 31].

Công tác điều tra thực địa cho thấy, hiện nay lớp thực vật dọc bờ sông Hàm Luông còn tương đối dày (vài mét cho tới vài chục mét). Thực vật ở đây chủ yếu là dừa nước, đước, bần, và cây tạp. Mặc dù gần như không còn là rừng tự nhiên nhưng chúng vẫn mang lại một số dịch vụ sinh thái (ecosystem services) tích cực [32]. Cụ thể, biến động đường bờ ở đây có sự liên hệ chặt chẽ với tác dụng bảo vệ của lớp thực vật này. Bờ sông vẫn còn bồi tụ khi được vành đai thực vật dày bảo vệ (1999-2005), nhưng khi vành đai này trở nên mỏng hơn hoặc thậm chí biến mất thì bờ sông đã bị xói lở nhanh chóng (2018-2022). Do không có lớp thực vật dọc bờ sông bảo vệ, hàng loạt đất nông nghiệp và nuôi trồng thủy sản đã bị xói lở, mặc dù các nông hộ đã sử dụng nhiều công trình bảo vệ đơn giản (hàng rào bằng dừa và cừ tràm) (Hình 10). Kết quả thực địa của nhóm nghiên cứu cũng đã xác nhận rằng hầu hết các vị trí được đánh giá là xói lở đều không có lớp thực vật bảo vệ, hoặc có nhưng rất thưa thớt. Những khu vực hiện đang bị xói lở mạnh (khu vực màu đỏ trong Hình 9e) cần được nghiên cứu bài bản để lựa chọn các biện pháp bảo vệ bờ sông hiệu quả. Các giải pháp khả dĩ như khôi phục thảm thực vật ven sông, thay đổi mục đích sử dụng đất ven sông, hay là can thiệp bằng công trình kiên cố, tùy vào điều kiện cụ thể tại mỗi khu vực. Tuy nhiên, việc bảo vệ và khôi phục vành đai thực vật nên được ưu tiên hàng đầu vì tốn ít chi phí nhưng hiệu quả lâu dài trong bảo vệ bờ sông, cũng như góp phần bổ sung các dịch vụ sinh thái tích cực ven sông.



Hình 10. Sạt lở bờ sông Hàm Luông uy hiếp vườn cây ăn trái và ao nuôi thủy sản (A, B); và một số giải pháp khắc phục tạm thời của người dân địa phương (C, D). Vị trí hình ảnh được chụp trong chuyến khảo sát thực địa, tương ứng với các vùng A, B, C và D trong Hình 9e.

4. Kết luận

Xói lở bờ sông Hàm Luông giai đoạn 1999-2022 đã được nghiên cứu đánh giá bằng cách tích hợp mô hình học máy vào công nghệ viễn thám và hệ thống phân tích đường bờ DSAS. Dựa vào ảnh vệ tinh Landsat, đường bờ sông 06 năm đã được trích xuất với độ tin cậy cao.

Kết quả cho thấy, xét trong thời đoạn dài hạn (1999-2022), mặc dù xói lở chiếm ưu thế nhưng diễn biến và mức độ xói lở bờ không quá nghiêm trọng (trung bình -0,35 m/năm). Tuy nhiên, khi phân tích chi tiết cho các giai đoạn ngắn hơn (1999-2005, 2005-2009, 2009-2014, 2014-2018, và 2018-2022) thì đây lại là vấn đề đáng quan tâm. Bởi vì, xói lở có xu hướng mở rộng (từ bồi tụ 21,22 ha/năm trong 1999-2005 đến xói lở -39,65 ha/năm trong 2018-2022), với mức độ ngày một nghiêm trọng hơn (từ bồi tụ +1,65 m/năm trong giai đoạn 1999-2005 đến xói lở -3,08 m/năm trong giai đoạn 2018-2022). Giai đoạn 2005-2009 được nhận định là giai đoạn chuyển tiếp từ bồi tụ sang xói lở tại khu vực nghiên cứu, thống nhất với xu hướng chung của toàn ĐBSCL. Đặc biệt, sau khi được bồi tụ nhẹ trong giai đoạn 2014-2018 thì bờ sông ở đây tiếp tục bị xói lở mạnh hơn trong giai đoạn 2018-2022, với tốc độ có nơi lên tới -19,3 m/năm. Trong bối cảnh đó, các giải pháp bảo vệ bờ sông Hàm Luông hiệu quả là rất cần thiết, đặc biệt là ưu tiên bảo vệ và khôi phục thảm thực vật ven sông. Đây là những thông tin quan trọng nên được tích hợp vào kế hoạch phòng chống thiên tai của tỉnh và cấp vùng.

Mặc dù ảnh Landsat có độ phân giải thấp (30m) khiến cho sai số của đường bờ được trích xuất còn khá lớn, kết quả của nghiên cứu này cho thấy tính hiệu quả của việc tích hợp học máy vào viễn thám và hệ thống phân tích đường bờ DSAS để nghiên cứu xói lở bờ sông. Phương pháp này có tiềm năng và nên được ứng dụng rộng rãi cho toàn ĐBSCL, cũng như các hệ thống sông khác của Việt Nam. Trước mắt, chúng tôi đang mở rộng phương pháp luận trong nghiên cứu này cho toàn ĐBSCL. Trong đó, các mô hình học máy sẽ được ứng dụng để dự báo vùng nguy cơ xói lở bờ sông trong khu vực.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: D.V.B., L.V.Q.; Xử lý ảnh vệ tinh và trích xuất đường bờ: L.V.Q.; Khảo sát thực địa: D.V.B., L.V.Q.; Phân tích biến động đường bờ: L.V.Q.; Viết bản thảo bài báo: L.V.Q.; Chỉnh sửa bài báo: D.V.B.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2023-VGU-01. Đây cũng là một phần nội dung trong luận văn thạc sĩ của tác giả đầu. Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Trung tâm Hợp tác Nghiên cứu JASTIP-Net và DPRI (2023IG-01) thuộc Đại học Kyoto đồng tài trợ một phần cho nghiên cứu; KS. Lục Anh Tuấn đã tham gia hỗ trợ công tác khảo sát thực địa; TS. Hà Nam Thắng đã hỗ trợ kỹ thuật trích xuất đường bờ.

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. Dekaraja, D.; Mahanta, R. Riverbank erosion and migration inter-linkage: with special focus on Assam, India. *Environ. Syst. Res.* **2021,** *10*, 6. https://doi.org/10.1186/s40068-020-00214-0.
2. Sekac, T.; Jana, S. Change detection of Busu River course in Papua New Guinea - impact on local settlements using remote sensing and GIS technology. *Int. J. Sci. Eng. Res.* **2014**, *5*, 891–899.
3. GOA. Information on riverbank erosion and population displacement. Revenue and Disaster Management Department, Government of Assam, 2014.
4. Das, T.K.; Haldar, S.K.; Gupta, I.D.; Sen, S. River Bank Erosion Induced Human Displacement and Its Consequences. *Living Rev. Landscape Res.* **2014**, *8*, 3. http://dx.doi.org/10.12942/lrlr-2014-3.
5. Daly, E.R.; Miller, R.B.; Fox, G.A. Modeling streambank erosion and failure along protected and unprotected composite streambanks. *Adv. Water Resour.* **2015**, 81, 114–127. http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.01.004.
6. Islam, M.; Parvin, S.; Farukh, M. Impacts of riverbank erosion hazards in the Brahmaputra floodplain areas of Mymensingh in Bangladesh. *Prog. Agric.* **2017**, 28(2), 73–83.

7. Bhuiyan, M.A.H.; Islam, S.M.D.U.; Azam, G. Exploring impacts and livelihood vulnerability of riverbank erosion hazard among rural household along the river Padma of Bangladesh. *Environ. Syst. Res.* **2017**, 6, 25. https://doi.org/10.1186/s40068-017-0102-9.
8. Rahman, M.A.T.M.T.; Islam, S.; Rahman, S.H. Coping with flood and riverbank erosion caused by climate change using livelihood resources: A case study of Bangladesh. *Clim. Dev.* **2014**, *7*, 185–191. https://doi.org/10.1080/17565529.2014.910163.
9. Tamminga, A.D.; Eaton, B.C.; Hugenholtz, C.H. UAS-based remote sensing of fluvial change following an extreme flood event. *Earth Surf. Process. Landforms* **2015**, 40, 1464–1476. https://doi.org/10.1002/esp.3728.
10. Hossain, M.A.; Gan, T.Y.; Baki, A.B.M. Assessing morphological changes of the Ganges River using satellite images. *Quat. Int.* **2013**, *304*, 142–155. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.03.028.
11. Sarkar, A.; Garg, R.D.; Sharma, N. RS-GIS based assessment of river dynamics of Brahmaputra River in India. *J. Water Resour. Prot.* **2012**, *4*, 63–72. https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.42008.
12. Williams, R.; Brasington, J.; Vericat, D.; Hicks, M.; Labrosse, F.; Neal, M. Monitoring Braided River change using terrestrial laser scanning and optical bathymetric mapping. *Dev. Earth Surf. Process.* **2011**, *15*, 507–532.
13. Basso, M.; Giarre, L.; Groppi, S.; Zappa, G. NARX models of an industrial power plant gas turbine. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* **2005**, 13, 599–604. https://doi.org/10.1109/tcst.2004.843129.
14. Napoli, R.; Piroddi, L. Nonlinear active noise control with NARX models. *IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process.* **2010**, *18*, 286–295. https://doi.org/10.1109/tasl.2009.2025798.
15. Solares, J.R.A.; Wei, H.L.; Billings, S.A. A novel logistic-NARX model as a classifier for dynamic binary classification. *Neural Comput. Appl.* **2017**, *31*, 11–25. https://doi.org/10.1007/s00521-017-2976-x.
16. Vu, T.H.; Binh, D.V.; Tran, H.N.; Khan, M.A.; Bui, D.D.; Stamm, J. Quantifying spatio-temporal river morphological change and its consequences in the Vietnamese Mekong River Delta using remote sensing and geographical information system techniques. *Remote Sens.* **2024**, *16*, 707. https://doi.org/10.3390/rs16040707.
17. Khoi, D.N.; Dang, T.D.; Pham, L.T.H.; Loi, P.T.; Thuy, N.T.D.; Phung, N.K.; Bay, N.T. Morphological change assessment from intertidal to river-dominated zones using multiple-satellite imagery: A case study of the Vietnamese Mekong Delta. *Reg. Stud. Mar. Sci.* **2020**, *34*, 101087. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101087.
18. Binh, D.V.; Wietlisbach, B.; Kantoush, S.; Loc, H.H.; Park, E.; de Cesare, G.; Cuong, D.H.; Tung, N.X.; Sumi, T. A novel method for river bank detection from landsat satellite data: A case study in the Vietnamese Mekong Delta. *Remote Sens.* **2020**, 12, 3298. https://doi.org/10.3390/rs12203298.
19. Binh, D.V.; Kantoush, S.; Sumi, T. Changes to long-term discharge and sediment loads in the Vietnamese Mekong Delta caused by upstream dams. *Geomorphology* **2020**, *353*, 107011. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.107011.
20. Binh, D.V.; Kantoush, S.A.; Saber, M.; Mai, N.P.; Maskey, S.; Phong, D.T.; Sumi, T. Long-term alterations of flow regimes of the Mekong River and adaptation strategies for the Vietnamese Mekong Delta. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **2020**, *32*, 100742. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100742.
21. Binh, D.V.; Kantoush, S.A.; Sumi, T.; Mai, N.P.; Ngoc, T.A.; Trung, L.V.; An, T.D. Effects of riverbed incision on the hydrology of the Vietnamese Mekong Delta. *Hydrol. Process.* **2021**, *35*, e14030. https://doi.org/10.1002/hyp.14030.

22. Vanhellemont, Q.; Ruddick, K. ACOLITE for Sentinel-2: Aquatic applications of MSI imagery. Proceedings of the 2016 ESA Living Planet Symposium. ESA Special Publication, 2016.
23. Vanhellemont, Q. Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives. *Remote Sens. Environ.* **2019**, *225*, 175–192. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.010.
24. Feyisa, G.L.; Meilby, H.; Fensholt, R.; Proud, S.R. Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sens. Environ.* **2014**, *140*, 23–35. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029.
25. Xu, H. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int. J. Remote Sens.* **2006**, *27*, 3025–3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179.
26. Hosmer, D.W.; Lemeshow, S.; Sturdivant, R.X. Applied logistic regression. John Wiley and Sons, 2013.
27. Himmelstoss, E.; Henderson, R.E.; Kratzmann, M.G.; Farris, A.S. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.1 user guide. Open-File Report, Reston, VA, Report 2021-1091, 2021. Available online: https://pubs.usgs.gov/publication/ofr20211091.
28. Roy, S.; Mahapatra, M.; Chakraborty, A. Shoreline change detection along the coast of Odisha, India using digital shoreline analysis system. *Spat. Inf. Res.* **2018**, *26*, 563–571. https://doi.org/10.1007/s41324-018-0199-6.
29. Constantine, C.R.; Dunne, T.; Hanson, G.J. Examining the physical meaning of the bank erosion coefficient used in meander migration modeling. *Geomorphology* **2009**, *106*, 242-252. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.11.002.
30. Li, X.; Liu, J.P.; Saito, Y.; Nguyen, V.L. Recent evolution of the Mekong Delta and the impacts of dams. *Earth-Sci. Rev.* **2017**, *175*, 1–17. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.10.008.
31. Binh, D.V.; Kantoush, S.A.; Ata, R.; Tassi, P.; Nguyen, T.V.; Lepesqueur, J.; Abderrezzak, K.E.K.; Bourban, S.E.; Nguyen, Q.H.; Phuong, D.N.L.; Trung, L.V.; Tran, D.A.; Letrung, T.; Sumi, T. Hydrodynamics, sediment transport, and morphodynamics in the Vietnamese Mekong Delta: Field study and numerical modeling. *Geomorphology* **2022**, *413*, 108368. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108368.
32. Basit, A.; Amin, N.U.; Shah, S.T.; Ahmad, I. Greenbelt conservation as a component of the ecosystem, ecological benefits, and management services: evidence from Peshawar City, Pakistan. *Environ. Dev. Sustain.* **2022**, *24*, 11424–11448. https://doi.org/10.1007/s10668-021-01890-3.

Assessing riverbank erosion in the Ham Luong river by integrating remote sensing with machine learning and digital shoreline analysis system

Le Van Quyen[1], Doan Van Binh[1]*

[1] Master program in Water Technology, Reuse and Management, Faculty of Engineering, Vietnamese-German University; quyenlv0223@gmail.com; binh.dv@vgu.edu.vn

Abstract: Remote sensing has been widely applied in riverbank erosion research, mostly by using some simple indicators to extract the riverbank lines. However, most of previous research did not validate the extracted bank lines against the field measured bank coordinates. This article examines riverbank erosion of the Ham Luong River, a branch of the Vietnamese Mekong Delta (VMD), by integrating remote sensing with machine learning and the digital shoreline analysis system (DSAS). Historical riverbanks from 1999 to 2022 were extracted using Landsat images, and the model accuracy was evaluated based on the GPS coordination of 100 bank locations recorded during a field trip in 2022. Results show that the extracted bank lines were reliable, with a root mean square error (RMSE) of 15.92 m, which is significantly smaller compared to the Landsat images' resolution (30m). From 1999 to 2022, riverbank erosion dominated the accretion (68% of the bank's length eroded) and dominantly occurred at the right bank, resulting in 176.7 ha of land loss (averaging 7.54 ha/year). Besides, riverbank erosion has increased in both rate and extent over time. Specifically, riverbanks changed from accretion in 1999-2005 (+1.65 m/year) to notably eroded in 2005-2022 (-3.71 m/year). The transition phase was 2005-2009, corresponding to the substantial development period of hydropower dams in the upstream Mekong basin. Therefore, effective adaptive and/or counter measures to maintain the Ham Luong's riverbanks are necessary, especially in protecting, maintaining, and restoring vegetation layers along the riverbanks.

Keywords: Riverbank erosion; Remote sensing; Machine learning; GIS; DSAS; Vietnamese Mekong Delta.