

Bài báo khoa học

Nghiên cứu đánh giá và phân vùng nguy cơ sạt lở khu vực Bàu Trắng, huyện Bắc Bình, tỉnh Bình Thuận

Lê Ngọc Thanh¹, Trần Đăng An^{2*}, Lưu Hải Tùng³

¹ Khoa Du lịch, Trường Đại học Nguyễn Tất Thành; lnthanh@ntt.edu.vn

² Phân hiệu Trường Đại học Thủy lợi; antd@tlu.edu.vn

³ Viện Địa lý tài nguyên Thành phố Hồ Chí Minh; lhtung@hcmig.vast.vn

*Tác giả liên hệ: antd@tlu.edu.vn; Telephone: +84-965398649

Ban Biên tập nhận bài: 8/11/2024; Ngày phản biện xong: 26/12/2024; Ngày đăng bài: 25/6/2025

Tóm tắt: Phân vùng nguy cơ sạt lở là cơ sở để thiết lập vùng an toàn và đề xuất các giải pháp quản lý rủi ro đối với đời sống và hoạt động phát triển kinh tế - xã hội khu vực Bàu Trắng tỉnh Bình Thuận. Bản đồ phân vùng các cấp độ nguy cơ gây ra do sạt lở khu vực này được thiết lập bằng phương pháp phân tích thứ bậc (AHP) dựa vào số liệu khảo sát hiện trạng 53 điểm sạt lở trên địa bàn khu vực nghiên cứu từ ngày 14 đến ngày 16 tháng 3 năm 2024. Sáu yếu tố thành phần đã được lựa chọn gồm địa chất trầm tích, cao độ địa hình, độ dốc, môi trường đất, khả năng xâm nhập nước vào bờ và tính thấm của đất. Kết quả cho thấy rằng có 3 địa điểm khảo sát nằm trong các vùng nguy cơ rất cao, bao gồm điểm sạt lở đã xảy ra. Các vùng có nguy cơ sạt lở từ rất thấp, thấp, trung bình, cao đến rất cao lần lượt chiếm 45,47%; 37,31%; 5,23%; 9,52% và 2,45% toàn diện tích phân vùng. Trầm tích gió Holocen (vQ_2^{1-2}); địa hình thấp đến trung bình (cao độ 35-37 m); độ dốc thay đổi nhiều, từ 5 đến $> 25^\circ$, đất cát trắng vàng; khả năng xâm nhập nước vào bờ ở mức cao đến rất cao; và tính thấm của đất ở mức khá cao đến cao là các yếu tố tự nhiên dẫn đến sạt lở bờ Bàu Bà. Kết quả nghiên cứu là tài liệu khoa học và thực tiễn giúp đề xuất các giải pháp công trình và phi công trình bảo vệ bờ khu vực Bàu Trắng.

Từ khóa: Sạt lở; Phân loại nguy cơ; Bàu Trắng; Bình Thuận.

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây sạt lở đất đã trở thành một trong những thiên tai nguy hiểm gây thiệt hại lớn tài sản, sinh mạng và ảnh hưởng tiêu cực môi trường. Ở vùng núi sạt lở đất đá thường xảy ra khi khô trượt, đá đổ - đá lăn... dọc theo sườn dốc, triền núi; vùng ven biển sạt lở đất xuất hiện qua hiện tượng sạt lở bờ biển và dọc theo các sông/rạch diễn ra sạt lở bờ sông/rạch. Ngoài ra hiện tượng sạt lở đất còn phát sinh đối với bờ hồ chứa nước [1]. Phân vùng nguy cơ trượt lở đất đã được thực hiện bằng nhiều phương pháp khác nhau được đề xuất bởi các nhà nghiên cứu trước đây nhằm cải thiện độ chính xác trong dự đoán trượt lở đất. Các phương pháp dựa trên thống kê đánh giá mối tương quan giữa các yếu tố điều kiện trượt lở và sự xuất hiện của trượt lở đất. Những phương pháp này đã được sử dụng để tạo ra các bản đồ nhạy cảm với trượt lở đất, hỗ trợ bởi công nghệ hệ thống thông tin địa lý (GIS). Nhìn chung, các phương pháp hiện có thể được phân thành ba nhóm chính: phương pháp xác định (*deterministic*), phương pháp thống kê (*statistical*), và phương pháp đánh giá chuyên gia (*expert evaluation*) [2-11].

Các mô hình thống kê đơn biến và đa biến, chẳng hạn như tỉ lệ tần suất (*frequency ratio*) [10], trọng số bằng chứng (*weights-of-evidence*) [12, 13], và hồi quy logistic [14-18] đã được

sử dụng rộng rãi bởi các nhà nghiên cứu trước đây. Các mô hình dựa trên kiến thức chuyên gia, chẳng hạn như quy trình phân tích thứ bậc (AHP) và phương pháp mờ (FA) cũng phổ biến trong các tài liệu khác nhau [19–23].

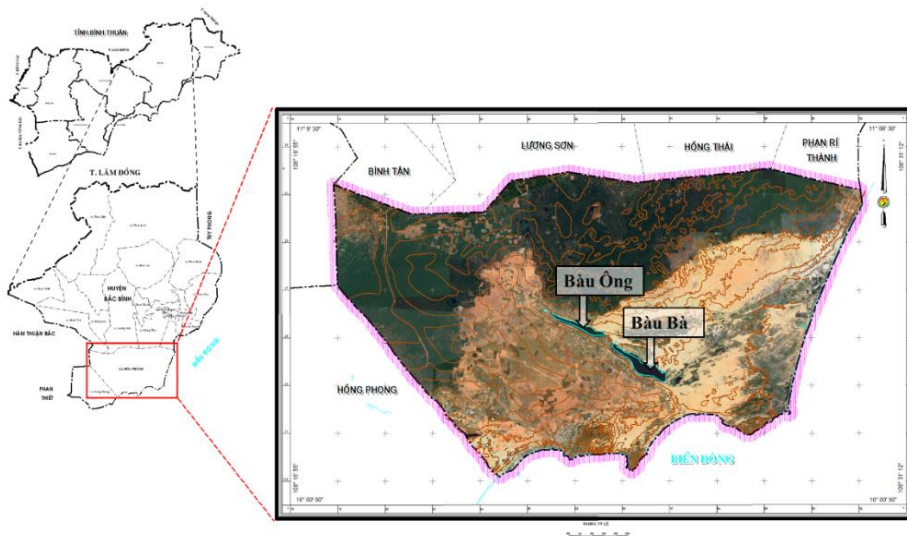
Việc lựa chọn phương pháp để phân vùng nguy cơ trượt lở đất phụ thuộc vào quy mô phân tích cần thực hiện, tổng diện tích vùng nghiên cứu, chuyên môn và kỹ năng của các nhà đánh giá, cũng như các thông số địa chất hoặc địa hình hoặc các phương pháp được sử dụng để tạo ra dữ liệu tham số [2–5, 12, 13, 18]. Việt Nam là một nước thường xuyên xảy ra sạt lở đất, cho nên vấn đề này đã được nghiên cứu từ những năm đầu của thập niên 2000 [8, 9], [24–38]. Trong khi đó khu vực Tây Nguyên và miền Trung cũng đã tiến hành nghiên cứu các tai biến địa chất: trượt lở đất, nứt sụt đất, lũ quét, lũ bùn đá [10]. Đối với miền Tây Nam bộ các nghiên cứu sạt lở bờ sông trong hệ thống sông Cửu Long cũng đã được thực hiện [11]. Khu du lịch Bàu Trắng là một trong những địa điểm du lịch nổi tiếng của tỉnh Bình Thuận nhờ vào cảnh quan tự nhiên tuyệt đẹp nằm trong vùng bán hoang mạc thuộc địa bàn xã Hoà Thắng, huyện Bắc Bình, tỉnh Bình Thuận. Khu vực này đã trở thành “Điểm du lịch sinh thái” nằm trong Top 100 của Việt Nam vào năm 2013, hàng năm đón hàng chục nghìn du khách ghé thăm quan và thưởng ngoạn. Tuy nhiên, dưới tác động của các yếu tố tự nhiên và hoạt động phát triển kinh tế - xã hội liên quan đến du lịch ngày 03/05/2023, khoảng 10h30 đã xảy ra sạt lở bờ Bàu Bà, gây hoang mang dư luận, ảnh hưởng đến môi trường, hình ảnh và nguồn thu du lịch từ thắng cảnh Bàu Trắng.

Do đó, để có cơ sở đề xuất phạm vi hành lang bảo vệ an toàn tính mạng và tài sản cũng như các giải pháp để ổn định khu vực xung quanh hồ Bàu Trắng dưới tác động của các yếu tố tự nhiên và hoạt động du lịch thì việc xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ sạt lở bờ hồ là hết sức cần thiết. Tuy nhiên, do khu vực nghiên cứu này thiếu dữ liệu chi tiết về địa hình, địa mạo, địa chất, địa chất thủy văn, số liệu khí tượng và thủy văn, thậm chí nên việc sử dụng kết hợp số liệu điều tra, khảo sát hiện trạng sạt lở kết hợp với phương pháp AHP để xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ sạt lở bờ hồ là phù hợp. Việc sử dụng kết hợp các phương pháp này cho phép phân tích có hệ thống sự tác động cộng hưởng của các yếu tố từ đó xác định được trọng số ảnh hưởng làm cơ sở xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ sạt lở phù hợp với đặc điểm khu vực nghiên cứu dựa vào nền tảng dữ liệu GIS.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Vùng nghiên cứu điển hình

Vùng nghiên cứu có diện tích gần 20.000 ha, chiếm hơn 80% tổng diện tích tự nhiên của xã Hoà Thắng (23.653 ha), đây một xã ven biển của huyện Bắc Bình, tỉnh Bình Thuận; phía đông và phía nam giáp Biển Đông, phía tây nam giáp xã Hồng Phong, phía bắc giáp xã Bình

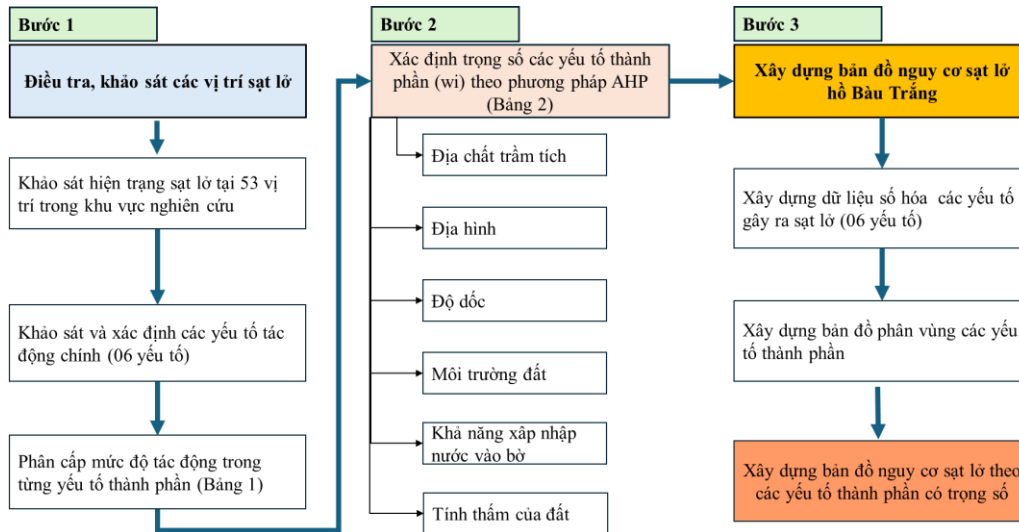


Hình 1. Bản đồ vị trí khu vực nghiên cứu hồ Bàu Trắng, tỉnh Bình Thuận.

Tân, TT. Lương Sơn, xã Hồng Thái và TT. Chợ Lầu. Hệ thống hồ Bàu Trắng bao gồm hai hồ chính là hồ Bàu Ông và hồ Bàu Bà nằm về phía đông nam vùng nghiên cứu (Hình 1).

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Để thiết lập bản đồ phân vùng nguy cơ sạt lở cho khu vực hồ Bàu Trắng, nghiên cứu được tiến hành theo 03 bước chính được thể hiện rõ trên Hình 2.



Hình 2. Phương pháp xây dựng bản đồ phân vùng sạt lở khu vực hồ Bàu Trắng.

2.2.1. Điều tra, khảo sát và đánh giá hiện trạng sạt lở

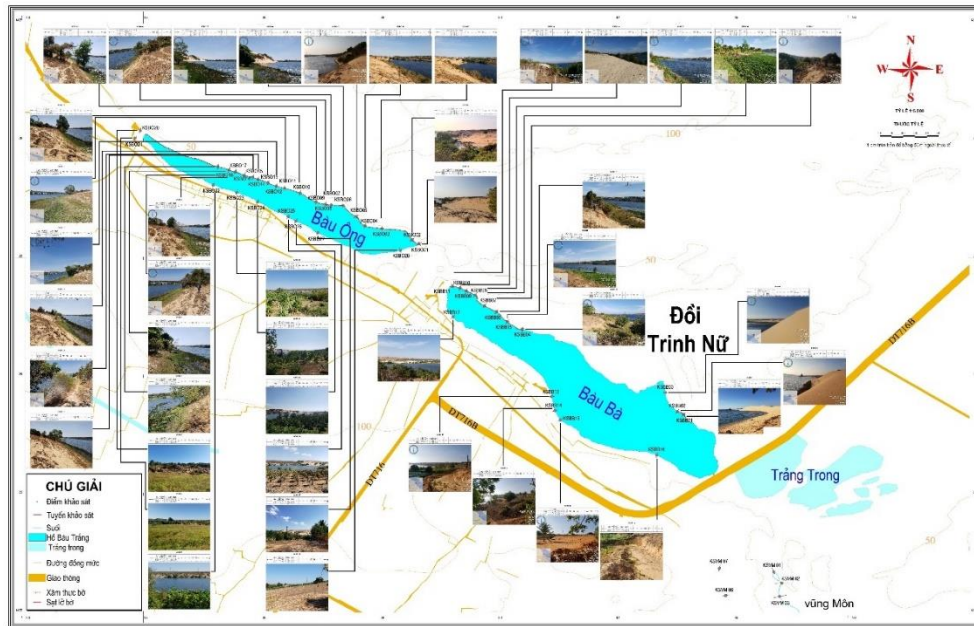
Để xác định được các yếu tố nguy cơ gây ra sạt lở, đã tiến hành điều tra, khảo sát và đánh giá hiện trạng sạt lở vùng nghiên cứu với tổng số 53 điểm khảo sát, trong đó 28 vị trí ở khu vực ven Bàu Ông (20 vị trí ở bờ trái, 5 ở bờ phải), 16 vị trí ven Bàu Bà (11 vị trí bờ trái, 5 bờ phải), 07 vị trí khu vực Vũng Môn, 01 vị trí ở suối Hồng và 01 tại Mũi Yển. Bản đồ hiện trạng sạt lở bờ Bàu Trắng được thể hiện trên Hình 3.

Bờ phải Bàu Ông có sự phân dị, chênh lệch cao độ địa hình và độ dốc cao hơn phía bờ trái, vì thế có thể nguy cơ xảy ra sạt lở dạng khối; và bờ trái của hồ còn lưu lại các dấu tích của hiện tượng xâm thực đường bờ (rễ cây thân gỗ nằm ven bờ hồ bị lộ lên khỏi mặt nước hoặc thân cây nghiêng về phía mặt nước của hồ). Điều này có thể giải thích là do khi gió mùa tây nam thịnh hành, thổi trên mặt nước hồ tạo sóng tác động đến đường bờ. Đường bờ nơi đây hầu hết là đất cát, dính kết kém dễ bị phá vỡ dẫn đến xâm thực, bào mòn theo kiểu “gặm nhấm”.

Phần cuối bờ trái Bàu Bà có sự phân dị, chênh lệch cao độ địa hình và độ dốc cao hơn phía bờ phải, vì thế có thể dẫn đến nguy cơ xảy ra hiện tượng sạt lở dạng khối (ví dụ điểm KSBB 01). Phần đầu bờ phải ít thấy dấu tích của hiện tượng xâm thực đường bờ, nơi đây người dân địa phương khai thác sử dụng đất bằng cách hạ cấp độ dốc, tạo thành bề mặt khá bằng phẳng cho việc trồng trọt các loại cây ngắn ngày như đậu phộng (KSBB05) hay dài ngày như dừa (KSBB07). Đặc biệt tại vị trí khảo sát KSBB01 là nơi đã bị sạt lở nghiêm trọng xảy ra vào ngày 03/05/2023. Thực tế khảo sát vào tháng 01/2024 cho thấy tổng chiều dài đoạn sạt lở khoảng 103 m, chiều ngang cung sạt lớn nhất khoảng 38 m, diện tích bề mặt sạt lở 0,269 ha.

Khu vực rạch Vũng Môn tuy có địa hình thấp nhưng phân dị cao, độ dốc khá lớn vì thế có nguy cơ sạt lở, đặc biệt là bề mặt sườn đồi cát tiếp giáp với dòng chảy. Khu vực ven biển Mũi Yển là vùng địa hình thấp nhưng có sự chênh lệch cao độ và độ dốc khá cao vì thế hoàn toàn có nguy cơ sạt lở, đặc biệt là bề mặt sườn đồi cát hoặc bề mặt vách đá tiếp giáp với bờ biển. Khu vực suối Hồng có địa hình trung bình, khá bằng phẳng, nhưng do hình thành trên nền đất cát đỏ nên bề mặt khe suối bị phân cắt rất mạnh tạo thành rãnh xói có độ dốc rất cao.

Biên độ độ dốc rất cao, trên cùng một mặt cắt có nơi độ dốc lên đến 40 độ, vì thế hoàn toàn có nguy cơ sạt lở, đặc biệt là bề mặt sườn suối tiếp giáp với lòng suối.



Hình 3. Bản đồ hiện trạng sạt lở bờ Bàu Trắng tỉ lệ 1:5.000.

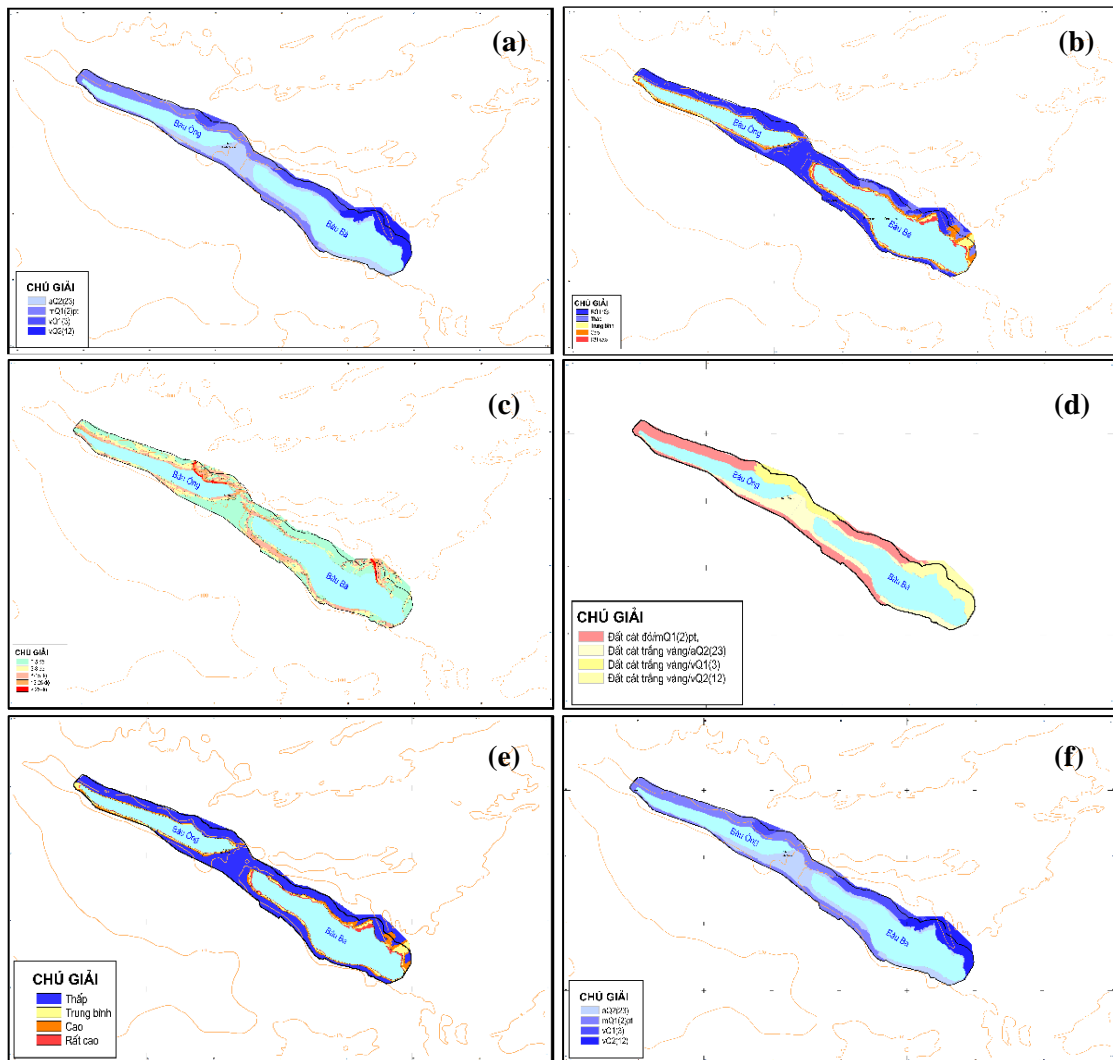
2.2.2. Xác định trọng số các yếu tố gây ra nguy cơ sạt lở tại hồ Bàu Trắng

Kết quả điều tra, khảo sát và đánh giá hiện trạng các điểm sạt lở khu vực hồ Bàu Trắng cho thấy rằng, nguy cơ sạt lở bờ hồ khu vực Bàu Trắng chủ yếu do các yếu tố sau đây tác động chính bao gồm: (1) Địa chất trầm tích; (2) Cao độ địa hình; (3) Độ dốc; (4) Môi trường đất; (5) Khả năng xâm nhập nước vào bờ; và (6) Tính thấm của đất. Sáu yếu tố này được coi như có sự tác động tích lũy và cộng hưởng theo thời gian. Tuy nhiên, nếu xét các yếu tố riêng lẻ thì mỗi yếu tố lại có sự tác động khác nhau do đó việc xác định mức độ ảnh hưởng của chúng lên nguy cơ sạt lở được xác định theo phương pháp AHP. Để áp dụng phương pháp AHP thì bước đầu tiên cần phân loại cấp độ tác động thông qua trọng số của mỗi lớp bản đồ trong từng yếu tố (Bảng 1).

Bảng 1. Các yếu tố/bản đồ thành phần sử dụng trong khoanh vùng nguy cơ sạt lở.

Yếu tố	Đặc điểm tự nhiên	Lớp bản đồ	Trọng số
Địa chất trầm tích	Khả năng sạt lở bờ phụ thuộc vào các loại trầm tích; trầm tích sông (aQ ₂ ²⁻³) có nguy cơ thấp cho đến đất cát của trầm tích gió Holocen (vQ ₂ ¹⁻² đất cát) tiềm năng sạt lở cao nhất (Hình 4a).	aQ ₂ ⁽²³⁾	4
		mQ ₁ ⁽²⁾ pt	6
		vQ ₁ ⁽³⁾	8
		vQ ₂ ⁽¹²⁾	10
Cao độ địa hình (m)	Cao độ của vùng bờ khu vực Bàu Trắng là yếu tố quan trọng đối với hiện tượng sạt lở bờ. Cao độ bờ càng lớn thì khả năng sạt lở bờ càng cao (Hình 4b).	> 40	2
		38 - 40	4
		36 - 38	6
		35 - 36	8
		34 - 35	10
Độ dốc vùng bờ (độ)	Độ dốc của vùng bờ khu vực Bàu Trắng, tương tự cao độ địa hình, độ dốc càng lớn thì khả năng sạt lở bờ càng cao (Hình 4c).	0 - 5	2
		5 - 8	4
		8 - 15	6
		15 - 25	8
		> 25	10
Môi trường đất	Môi trường đất có ảnh hưởng đến khả năng sạt lở bờ hồ. Các loại đất tương ứng với các trầm tích khác nhau gồm đất cát đỏ trầm tích biển Pleistocen	Đất cát đỏ (ARr,dy)/mQ ₁ ⁽²⁾ pt	2
		Đất cát trắng vàng (ARl,dy)/aQ ₂ ⁽²³⁾	5
		Đất cát trắng vàng (ARl,dy)/vQ ₁ ⁽³⁾	8
		Đất cát trắng vàng (ARl,dy)/vQ ₂ ⁽¹²⁾	10

Yếu tố	Đặc điểm tự nhiên	Lớp bản đồ	Trọng số
Khả năng xâm nhập nước vào bờ	(mQ_1^2) đến đất cát trắng vàng trầm tích gió Holocen (vQ_2^{1-2}) (Hình 4d).	Thấp	4
	Cao độ của bờ Bầu Trắng có quan hệ với khả năng xâm nhập nước vào bờ.	Trung bình	6
	Cao độ ven bờ càng thấp thì khả năng xâm nhập nước vào bờ càng cao, dẫn đến khả năng sạt lở bờ càng cao: thấp (cao độ > 38 m); trung bình (36-38 m); cao (35-36 m) và rất cao (< 35 m) (Hình 4e).	Cao	8
Tính thấm của đất	Tính thấm của đất ven bờ phụ thuộc vào các loại trầm tích. Trầm tích sông (aQ_2^{2-3}) có tính thấm kém cho đến trầm tích Holocen (vQ_2^{1-2}) có tính thấm cao, tiềm ẩn nguy cơ sạt lở bờ từ thấp đến cao: thấp (trầm tích aQ_2^{2-3}), trung bình (mQ_2^{2pt}), cao (vQ_1^3) (Hình 4f).	Rất cao	10
		Thấp	4
		Trung bình	6
		Cao	8
		Rất cao	10



Hình 4. Các bản đồ thành phần (a) Địa chất trầm tích; (b) Cao độ địa hình; (c) Độ dốc vùng bờ; (d) Môi trường đất; (e) Khả năng xâm nhập nước vào bờ; (f) Tính thấm của đất.

Sau khi xác định được các yếu tố chính gây ra sạt lở dựa vào kết quả điều tra, khảo sát (Bảng 1 và Hình 4) tiến hành xác định trọng số tác động của các yếu tố này dựa vào phương pháp AHP [39]. Để đánh giá độ tin cậy của kết quả xác định trọng số tác động của 06 yếu tố thành phần (w_i) gây ra nguy cơ sạt lở bằng phương pháp AHP thông thường các nghiên cứu

dựa vào chỉ số nhất quán CI và tỷ lệ nhất quán CR. Các chỉ số này được xác định theo các công thức (1) và (2):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{1}$$

$$CR = \frac{CI}{MRE} \tag{2}$$

Trong đó λ_{\max} là giá trị riêng lớn nhất của ma trận so sánh cặp, n là số yếu tố được so sánh (kích thước của ma trận), MRE là chỉ số trung bình ngẫu nhiên. Giá trị $CR < 10\%$ ma trận so sánh cặp đảm bảo mức độ nhất quán, còn nếu $CR > 10\%$ thì ma trận so sánh cặp không đảm bảo tính nhất quán trong đánh giá của các chuyên gia cần xem xét lại.

2.2.3. Xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ sạt lở

Chỉ số nguy cơ sạt lở LHI được xác định bằng công thức (3) dưới đây [19, 39, 40].

$$LHI = \sum_{i=1}^6 LHI_i \times w_i \tag{3}$$

Trong đó i là các yếu tố thành phần; w_i là trọng số của từng yếu tố thành phần tác động tới nguy cơ sạt lở (Bảng 2). Để phân vùng nguy cơ sạt lở nghiên cứu này sử dụng 05 mức độ nguy cơ bao gồm $LHI < 35$: rất thấp, $LHI = 35-45$: thấp, $LHI = 45-50$: trung bình, $LHI = 50-55$: cao và $LHI > 55$: rất cao) [40].

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Mức độ tác động của các yếu tố gây nguy cơ

Kết quả xác định trọng số w_i các yếu tố ảnh hưởng bằng phương pháp so sánh cặp cho thấy rằng chỉ số $CR = 3,6\% < 10\%$ cho thấy đảm bảo độ tin cậy trong việc sử dụng trọng số các yếu tố thành phần để xây dựng bản đồ nguy cơ sạt lở cho khu vực nghiên cứu. Kết quả tính toán cho thấy rằng tính thấm của đất ($w_6 = 21,4\%$), độ dốc vùng bờ hồ ($w_3 = 21,4\%$) và khả năng xâm nhập nước vào bờ ($w_5 = 19,1\%$) là các yếu tố có mức độ tác động lớn đến nguy cơ gây ra sạt lở khu vực nghiên cứu. Kết quả xác định trọng số thể hiện ở Bảng 2.

Bảng 2. Trọng số tác động của các yếu tố tới nguy cơ sạt lở hồ Bàu Trắng.

Số thứ tự	Các yếu tố	Trọng số (w_i)	Mức độ sai lệch +/-
w1	Địa chất trầm tích	9,4%	3,5%
w2	Cao độ địa hình	14,3%	4,5%
w3	Độ dốc vùng bờ	21,4%	5,3%
w4	Môi trường đất	14,3%	4,5%
w5	Khả năng xâm nhập nước vào bờ	19,1%	5,1%
w6	Tính thấm của đất	21,4%	5,3%

3.2. Phân vùng nguy cơ sạt lở

Kết quả chồng ghép 6 bản đồ thành phần đã thành lập bản đồ phân vùng nguy cơ sạt lở bờ hồ khu vực Bàu Trắng tỉ lệ 1:5.000 (Hình 5). Diện tích khoanh vùng nguy cơ sạt lở bờ hồ khu vực Bàu Trắng khoảng 310 ha, bao gồm cả diện tích mặt nước; diện tích từ mép nước hồ ra về phía bờ khoảng 164,27 ha. Khu vực khoanh vùng kéo dài theo hướng Tây bắc - Đông nam, từ đầu Bàu Ông chạy dọc theo đường tỉnh ĐT715 và kết thúc ở cuối Bàu Bà giáp với đường tỉnh ĐT716B. Chiều rộng khu vực khoanh vùng cách mép nước khoảng 150 m ở phía tây bắc, giới hạn phía nam là 2 đường tỉnh ĐT715 và ĐT716B. Các chỉ số nguy cơ thay đổi từ < 35 đến > 55 , được phân loại thành 5 vùng nguy cơ rất thấp ($I < 35$), thấp ($I = 35-45$), trung bình ($I = 45-50$), cao ($I = 50-55$) và rất cao ($I > 55$).

3.1.1. Vùng nguy cơ sạt lở rất thấp

Vùng nguy cơ sạt lở rất thấp có diện tích lớn nhất, khoảng 75 ha, chiếm 45,47% toàn diện tích phân vùng (164,27 ha), chia thành 2 tiểu vùng khác biệt: Tiểu vùng 1a: phân bố ở phía bờ trái phần đầu Bàu Ông, nằm trên nền trầm tích biển cát đỏ (mQ_1^{2pt}), địa hình cao (cao độ > 40 m), độ dốc nhỏ từ 5-15°; khả năng xâm nhập nước vào đất ở mức thấp; tính thấm trung bình. Tiểu vùng 2a: phân bố phía bờ phải cuối Bàu Ông, dọc theo đường tỉnh ĐT715 đến cuối Bàu Bà, nằm trên nền trầm tích sông (aQ_2^{2-3}); địa hình cao (cao độ > 40 m); độ dốc nhỏ, từ 5-15°; đất cát đỏ và đất cát trắng vàng; khả năng xâm nhập nước vào bờ ở mức thấp; tính thấm từ thấp đến trung bình. Không có điểm khảo sát nào nằm trong vùng nguy cơ sạt lở rất thấp.

3.1.2. Vùng nguy cơ sạt lở thấp

Vùng nguy cơ sạt lở thấp có diện tích lớn thứ hai, khoảng 61 ha, chiếm 37,31% toàn diện tích phân vùng nguy cơ sạt lở và cũng phân bố thành 2 tiểu vùng: Tiểu vùng 1b: phân bố ven bờ trái Bàu Trắng, trên hai nền trầm tích biển và trầm tích sông (mQ_1^{2pt} và aQ_2^{2-3}); địa hình trung bình (cao độ khoảng 36 m); độ dốc nhỏ, từ 8-15°; đất cát đỏ và đất cát trắng vàng; khả năng xâm nhập nước vào bờ ở mức trung bình đến cao; tính thấm ở mức trung bình. Tiểu vùng 2b: phân bố ở phía cuối bờ trái Bàu Ông kéo dài đến giữa bờ trái Bàu Bà, trên nền trầm tích aQ_2^{2-3} và vQ_1^3 , địa hình trung bình đến cao (cao độ 38-40 m); độ dốc từ 8-15°; đất cát đỏ và đất cát trắng vàng; khả năng xâm nhập nước vào bờ ở mức thấp đến trung bình; tính thấm của đất ở mức trung bình đến cao. Hai mươi ba (23) điểm khảo sát hiện trạng nằm trong vùng nguy cơ thấp.

3.1.3. Vùng nguy cơ sạt lở trung bình

Vùng nguy cơ sạt lở trung bình có diện tích lớn thứ tư, khoảng 8,6 ha, chiếm 5,23% toàn diện tích phân vùng, phân bố thành 2 tiểu vùng khá rõ rệt: Tiểu vùng 1c: phân bố ven bờ trái của Bàu Ông trên nền trầm tích gió Pleistocen (vQ_1^3); địa hình trung bình đến cao (cao độ khoảng 40-45 m); độ dốc từ 8-25°; đất cát trắng vàng; khả năng xâm nhập nước vào bờ ở mức trung bình đến cao, tính thấm của đất ở mức trung bình. Tiểu vùng 2c: phân bố ở giữa bờ trái của Bàu Bà, nằm trên nền trầm tích địa chất vQ_2^{1-2} ; địa hình trung bình đến cao (cao độ 38-40 m); độ dốc khá thấp từ 5-8°; đất cát trắng vàng; khả năng xâm nhập nước vào đất ở mức trung bình đến cao; tính thấm của đất ở mức trung bình. Có 15 điểm khảo sát hiện trạng nằm trong vùng nguy cơ này.

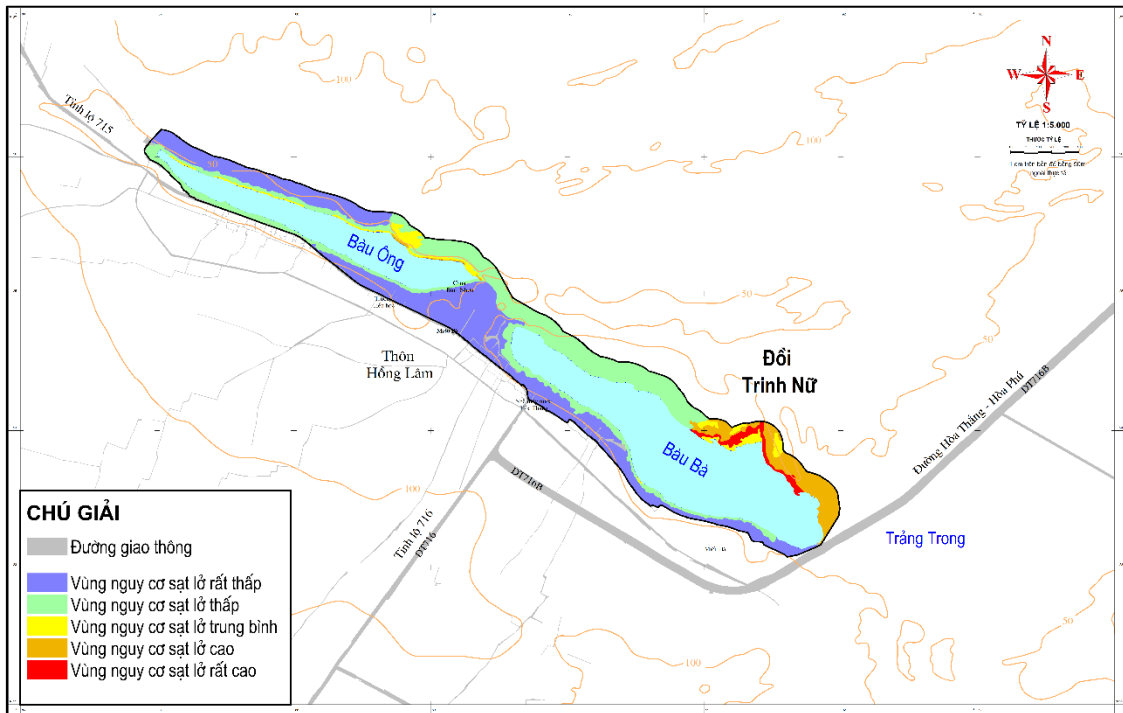
3.1.4. Vùng nguy cơ sạt lở cao

Vùng nguy cơ sạt lở cao có diện tích lớn thứ ba, khoảng 16 ha, chiếm 9,52% toàn diện tích phân vùng, cũng phân bố thành 2 tiểu vùng khá rõ rệt: Tiểu vùng 1d: phân bố ven bờ trái của Bàu Ông trên hai nền trầm tích mQ_1^{2pt} và vQ_1^3 ; địa hình thấp đến trung bình (cao độ khoảng 40-43 m), độ dốc khá lớn, từ 15-25°; đất cát đỏ và đất cát trắng vàng (cát bay); khả năng xâm nhập nước vào bờ ở mức cao đến rất cao; tính thấm của đất ở mức trung bình đến khá cao. Tiểu vùng 2d: phân bố ở từ giữa đến cuối bờ trái Bàu Bà, trên nền trầm tích địa chất vQ_2^{1-2} , địa hình khá cao (cao độ 38-41 m); độ dốc khá thấp từ 8-15°; đất cát trắng vàng; khả năng xâm nhập nước vào bờ ở mức trung bình đến cao; tính thấm của đất khá cao. Có 3 điểm khảo sát hiện trạng nằm trong vùng nguy cơ sạt lở cao.

3.1.5. Vùng nguy cơ sạt lở rất cao

Vùng nguy cơ sạt lở rất cao có diện tích nhỏ nhất, chỉ khoảng 4,03 ha, chiếm 2,45% toàn diện tích phân vùng; chỉ phân bố ở cuối bờ trái Bàu Bà, nằm hoàn toàn trên nền trầm tích gió Holocen (vQ_2^{1-2} ; $w = 10$); địa hình thấp đến trung bình (cao độ 35-37 m; $w = 6$); độ dốc thay đổi nhiều, từ 5 đến > 25° ($w = 10$) nằm hoàn toàn trong vùng đất cát trắng vàng ($w = 10$); khả năng xâm nhập nước vào bờ ở mức cao đến rất cao ($w = 8-10$); và tính thấm của đất ở mức

khá cao đến cao ($w = 8-10$). Có 3 điểm khảo sát nằm trong vùng này, bao gồm điểm sạt lở ngày 03/5/2023.



Hình 5. Bản đồ phân vùng nguy cơ sạt lở đất khu vực Bàu Trắng tỉ lệ 1:5.000.

4. Kết luận

Kết quả điều tra, khảo sát hiện trạng và xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ sạt lở tại hồ Bàu Trắng cho thấy rằng tại khu vực này có 3 địa điểm khảo sát nằm trong các vùng nguy cơ cao đã xảy ra sạt lở, bao gồm KSBB01, KSBB02 và KSBB03. Các vùng có nguy cơ trượt lở đất từ rất thấp, thấp, trung bình, cao đến rất cao lần lượt chiếm 45,47%; 37,31%; 5,23%; 9,52% và 2,45% toàn diện tích phân vùng. Trầm tích gió Holocen (vQ_2^{1-2}); địa hình thấp đến trung bình (cao độ 35-37 m); độ dốc thay đổi nhiều, từ 5 đến $> 25^\circ$, đất cát trắng vàng; khả năng xâm nhập nước vào bờ ở mức cao đến rất cao; và tính thấm của đất ở mức khá cao đến cao là các yếu tố tự nhiên dẫn đến sạt lở bờ Bàu Bà. Kết quả nghiên cứu là tài liệu khoa học và thực tiễn giúp đề xuất các giải pháp công trình và phi công trình bảo vệ bờ khu vực Bàu Trắng. Do đó, việc quản lý, bảo vệ khu vực hồ Bàu Trắng cần có các giải pháp toàn diện, bao gồm giám sát biến đổi khí hậu, cải thiện hệ thống thoát nước và bảo vệ thảm thực vật để ngăn ngừa sự di chuyển của cát. Đồng thời, cần xem xét cẩn trọng các hoạt động du lịch để đảm bảo không làm gia tăng nguy cơ sạt lở, bảo vệ môi trường bền vững cho khu vực này.

Tuy nhiên, cần lưu ý rằng kết quả phân vùng nguy cơ sạt lở chưa có số liệu đầy đủ để xác định được mức độ tác động của các hoạt động du lịch trong đó có hoạt động gia tải bề mặt do các phương tiện chở du khách di chuyển ven hồ có thể gia tăng mức độ sạt lở khu vực này. Ngoài ra, các nghiên cứu tiếp theo về sạt lở ở khu vực hồ Bàu Trắng tỉnh Bình Thuận cần bổ sung chi tiết thêm số liệu đo địa hình độ phân giải cao ($1m \times 1m$), khoan khảo sát địa chất và địa chất thủy văn cũng như quan trắc thông số khí tượng thủy văn theo chuỗi thời gian ứng với các sự kiện mưa để nâng độ chính xác của bản đồ phân vùng nguy cơ sạt lở khu vực này.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: L.N.T., L.H.T., T.Đ.A.; Xử lý số liệu: T.Đ.A., L.H.T.; Viết bản thảo bài báo: L.N.T., L.H.T.; Chỉnh sửa bài báo: T.Đ.A., L.H.T.

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.

Lời cảm ơn: Bài báo là một phần kết quả của đề tài “Nghiên cứu nguyên nhân gây sạt lở và đề xuất các giải pháp bảo vệ bờ khu vực hồ Bàu Trắng”, mã số: ĐT-02-06-2023 của Sở Khoa học và Công nghệ tỉnh Bình Thuận. Các tác giả xin chân thành cảm ơn sự hợp tác của tất cả các thành viên đề tài để thực hiện bài báo này.

Tài liệu tham khảo

1. de Carvalho, R.F.; do Carmo, J.S.A. Landslides into reservoirs and their impacts on banks. *Environ. Fluid Mech.* **2007**, *7*(6), 481–493. doi: 10.1007/s10652-007-9039-2.
2. Wu, Y.; Yang, Z. A depth-averaged SPH-FV landslide dynamic model for evaluating hazard zones. *Comput. Geotech.* **2024**, *169*, 106210.
3. Yin, D.B.; Zheng, Q.; Zhou, A.; Shen, S.L. Enhancing landslide hazard prevention: Mapping vulnerability via considering the effects of human factors. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* **2024**, *108*, 104509. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104509>.
4. Grelle, G. et al. VERE Py-framework: Dual environment for physically-informed machine learning in seismic landslide hazard mapping driven by InSAR. *Environ. Modell. Software.* **2025**, *185*, 106287.
5. Tesfa, C.; Sewnet, D. GIS-based MCDM approach for landslide hazard zonation mapping in east Gojjam zone, central Ethiopia. *Quat. Sci. Adv.* **2024**, *15*, 100210.
6. Heo, S.; Sohn, W.; Park, S.; Lee, D.K. Multi-hazard assessment for flood and Landslide risk in Kalimantan and Sumatra: Implications for Nusantara, Indonesia's new capital. *Heliyon* **2024**, *10*(18), e37789.
7. Li, N.; Hu, X.; Zheng, H.; Wang, J.; Jing, X.; Li, W. A novel back analysis framework for the probabilistic risk assessment of subaerial landslide-induced tsunami hazard. *Eng. Geol.* **2024**, *343*, 107801.
8. Zeng, P.; Sun, X.; Xu, Q.; Li, T.; Zhang, T. 3D probabilistic landslide run-out hazard evaluation for quantitative risk assessment purposes. *Eng. Geol.* **2021**, *293*, 106303.
9. Di Napoli, M.; Eroglu, C.; van den Bout, B.; Di Martire, D.; Tanyas, H.; Lombardo, L. Space-time modeling of cascading hazards: Chaining wildfires, rainfall and landslide events through machine learning. *CATENA* **2024**, *246*, 108452.
10. Asmare, D. Landslide hazard zonation and evaluation around Debre Markos town, NW Ethiopia A GIS-based bivariate statistical approach. *Sci. Afr.* **2022**, *15*, e01129.
11. Sundriyal, Y. et al. An integrated approach of machine learning and remote sensing for evaluating landslide hazards and risk hotspots, NW Himalaya. *Remote Sens. Appl.: Soc. Environ.* **2024**, *33*, 101140.
12. Yang, H.; Wu, Q.; Dong, J.; Xie, F.; Zhang, Q. Landslide risk mapping using the weight-of-evidence method in the Datong mining area, Qinghai province. *Sustainability* **2023**, *15*(14), 11330.
13. Yang, Y. et al. Multi-scale analysis of the susceptibility of different landslide types and identification of the main controlling factors. *Ecol. Indic.* **2024**, *168*, 112797.
14. Goyes-Peñafiel, P.; Hernandez-Rojas, A. Landslide susceptibility index based on the integration of logistic regression and weights of evidence: A case study in Popayan, Colombia. *Eng. Geol.* **2021**, *280*, 105958.
15. Jin, J. et al. Prediction of river damming susceptibility by landslides based on a logistic regression model and InSAR techniques: A case study of the Bailong River Basin, China. *Eng. Geol.* **2022**, *299*, 106562.
16. Chowdhury, M.S.; Rahman, M.N.; Sheikh, M.S.; Sayeid, M.A.; Mahmud, K.H.; Hafsa, B. GIS-based landslide susceptibility mapping using logistic regression, random forest and decision and regression tree models in Chattogram District, Bangladesh. *Heliyon*, **2024**, *10*(1), e23424.
17. Sun, D.; Xu, J.; Wen, H.; Wang, D. Assessment of landslide susceptibility mapping based on Bayesian hyperparameter optimization: A comparison between logistic regression and random forest. *Eng. Geol.* **2021**, *281*, 105972.

18. Prathom, K.; Sujitapan, C. Performance of logistic regression and support vector machine conjunction with the GIS and RS in the landslide susceptibility assessment: Case study in Nakhon Si Thammarat, southern Thailand. *J. King Saud Univ. Sci.* **2024**, *36*(8), 103306.
19. Zangmene, F.L. et al. Landslide susceptibility zonation using the analytical hierarchy process (AHP) in the Bafoussam-Dschang region (West Cameroon). *Adv. Space Res.* **2023**, *71*(12), 5282–5301.
20. Saygin, F.; Şişman, Y.; Dengiz, O.; Şişman, A. Spatial assessment of landslide susceptibility mapping generated by fuzzy-AHP and decision tree approaches. *Adv. Space Res.* **2023**, *71*(12), 5218–5235.
21. Panchal, S.; Shrivastava, A.K. Landslide hazard assessment using analytic hierarchy process (AHP): A case study of National Highway 5 in India. *Ain Shams Eng. J.* **2022**, *13*(3), 101626.
22. Mandal, B.; Mandal, S. Analytical hierarchy process (AHP) based landslide susceptibility mapping of Lish river basin of eastern Darjeeling Himalaya, India. *Adv. Space Res.* **2018**, *62*(11), 3114–3132.
23. Ahmad, M.S.; MonaLisa.; Khan, S. Comparative analysis of analytical hierarchy process (AHP) and frequency ratio (FR) models for landslide susceptibility mapping in Reshun, NW Pakistan. *Kuwait J. Sci.* **2023**, *50*(3), 387–398.
24. Tuan, T.; Dan, N. Nghiên cứu nhạy cảm và phân vùng nguy cơ trượt -lở đất khu vực hồ thủy điện Sơn La theo phương pháp phân tích cấp bậc SAATY. 2012, tr. 223-232.
25. Hiệp, H.V.; Trí, H.H.; Công, N.T.; Truyền, N.G. Nghiên cứu nguyên nhân sạt lở bờ sông: trường hợp nghiên cứu tỉnh Trà Vinh. *J. Hydro-Meteorol.* **2022**.
26. Dung, B.T.; Pradhan, B.; Lofman, O.; Revhaug, I.; Dick, O.B. Landslide susceptibility mapping at Hoa Binh province (Vietnam) using an adaptive neuro-fuzzy inference system and GIS. *Comput. Geosci.* **2012**, *45*, 199–211.
27. Dang, K.B et al. Comparison between U-shaped structural deep learning models to detect landslide traces. *Sci. Total Environ.* **2024**, *912*, 169113.
28. Pham, N.T.T.; Nong D.; Garschagen, M. Natural hazard's effect and farmers' perception: Perspectives from flash floods and landslides in remotely mountainous regions of Vietnam. *Sci. Total Environ.* **2021**, *759*, 142656.
29. Dung, B.T.; Pradhan, B.; Lofman, O.; Revhaug, I.; Dick, O.B. Landslide susceptibility assessment in the Hoa Binh province of Vietnam: A comparison of the Levenberg-Marquardt and Bayesian regularized neural networks. *Geomorphology*, **2012**, *171-172*, 12–29.
30. Tran, V.A.; Khuc, T.D.; Truong, X.Q.; Nguyen, A.B.; Phi, T.T. Application of potential machine learning models in landslide susceptibility assessment: A case study of Van Yen district, Yen Bai province, Vietnam. *Quat. Sci. Adv.* **2024**, *14*, 100181.
31. Luu, C et al. Flash flood and landslide susceptibility analysis for a mountainous roadway in Vietnam using spatial modeling. *Quat. Sci. Adv.* **2023**, *11*, 100083.
32. Dang, K.B et al. Deep learning models integrating multi-sensor and -temporal remote sensing to monitor landslide traces in Vietnam. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* **2024**, *105*, 104391.
33. Dung, B.T.; Hoang, N.D.; Nguyen, H.; Tran, X.L. Spatial prediction of shallow landslide using Bat algorithm optimized machine learning approach: A case study in Lang Son Province, Vietnam. *Adv. Eng. Inf.* **2019**, *42*, 100978.
34. Viet, N.T et al. Exploring deep learning models for roadside landslide prediction: Insights and implications from comparative analysis. *Phys. Chem. Earth. Parts A/B/C* **2024**, *136*, 103741.

35. Dung, B.T.; Pradhan, B.; Lofman, O.; Revhaug, I.; Dick, O.B. Spatial prediction of landslide hazards in Hoa Binh province (Vietnam): A comparative assessment of the efficacy of evidential belief functions and fuzzy logic models. *CATENA* **2012**, *96*, 28–40.
36. Thanh, P.T.N.; Nong, D.; Raghavan Sathyan, A.; Garschagen, M. Vulnerability assessment of households to flash floods and landslides in the poor upland regions of Vietnam. *Clim. Risk Manage.* **2020**, *28*, 100215.
37. Pham, N.T.T.; Nong, D.; Garschagen, M. Farmers' decisions to adapt to flash floods and landslides in the Northern Mountainous Regions of Vietnam. *J. Environ. Manage.* **2019**, *252*, 109672.
38. Luu, C.; Ha, H.; Thong, X.T.; Ha, T.V.; Duy, B.Q. Landslide susceptibility and building exposure assessment using machine learning models and geospatial analysis techniques. *Adv. Space Res.* **2024**, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.08.046>.
39. Goepel, K. Implementing the Analytic Hierarchy Process as a Standard Method for Multi-Criteria Decision Making in Corporate Enterprises – A New AHP Excel Template with Multiple Inputs. 2013.
40. Sultana, N.; Tan, S.; Hossen, M.F. Landslide risk assessment by integrating hazards and vulnerability indices in Southeast Bangladesh. *Int. J. Disaster Risk Reduct. International.* **2024**, *114*, 104991.

Assessment and mapping of landslide hazard in Bau Trang lake area, Bac Binh district, Binh Thuan province

Le Ngoc Thanh¹, Tran Dang An^{1*}, Luu Hai Tung³

¹ Faculty of Tourism, Nguyen Tat Thanh University; lnthanh@ntt.edu.vn

² Thuyloi University in Southern Campus; antd@tlu.edu.vn

³ HCMC Institute of Resources Geography, VAST; lhtung@hcmig.vast.vn

Abstract: Landslide hazard zoning serves as a basis for establishing safety zones and proposing risk management solutions for livelihoods and socio-economic development activities in the Bàu Trắng area, Bình Thuận Province. A risk zoning map with levels of risk caused by landslides in this area was developed using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method based on survey data of 53 landslide sites in the study area from March 14 to March 16, 2024. Six components were selected, including sedimentary geology, elevation, slope, soil environment, water intrusion potential, and soil permeability. The results show that three survey locations fall within very high-risk zones, including areas where landslides have already occurred. The zones classified as very low, low, medium, high, and very high-risk account for 45.46%, 37.31%, 5.23%, 9.52%, and 2.45% of the total zoned area, respectively. Natural factors contributing to the landslides in the Bàu Trắng area include Holocene aeolian sediment (vQ21-2); low to moderate terrain (elevation 35-37 m); highly variable slopes, ranging from 5 to >25°; yellowish-white sandy soil; high to very high water intrusion potential; and moderately high to high soil permeability. This research's findings provide scientific and practical evidence for proposing structural and non-structural solutions to protect the banks of the Bàu Trắng area.

Keywords: Landslide; Hazard Classification; Bau Trang Lake; Binh Thuan.