

**XÂY DỰNG BẢN ĐỒ NHẠY CẢM TRƯỢT LỞ ĐẤT
BẰNG MÔ HÌNH TÍCH HỢP AHP-WOE VÀ AHP-FR:
NGHIÊN CỨU THỬ NGHIỆM TẠI KHU VỰC XÃ BẢN XÈO, TỈNH LÀO CAI**

Phạm Văn Sơn¹, Trịnh Hải Sơn², Nguyễn Huy Dương¹, Trịnh Thành^{3*}

¹ Trung tâm Địa tin học, Ứng dụng Viễn thám và Tai biến địa chất,
Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản (VIGMR)

² Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản (VIGMR)

³ Khoa Trí tuệ Nhân tạo và Khoa học Dữ liệu,
Trường Công nghệ thông tin, Đại học Phenikaa

* Email: thanh.trinh@phenikaa-uni.edu.vn

Ngày nhận bài: 9/6/2026; ngày hoàn thành phản biện: 13/6/2026; ngày duyệt đăng: 30/6/2026

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày phương pháp đánh giá, lập bản đồ nhạy cảm trượt lở đất tại khu vực xã Bản Xèo, tỉnh Lào Cai bằng cách ứng dụng các mô hình tích hợp AHP-WOE và AHP-FR. Bộ dữ liệu đầu vào bao gồm 51 điểm trượt lở và 59 vùng trượt lở (dữ liệu trượt lở được chia ngẫu nhiên thành 70% để huấn luyện và 30% để kiểm định) cùng với 10 bản đồ yếu tố điều kiện liên quan đến trượt lở đất. Trọng số cho từng phân lớp được tính bằng WOE và FR. Phương pháp AHP (với CR=0,036) được áp dụng để xác định trọng số giữa các bản đồ yếu tố. Kết quả thực nghiệm cho thấy mô hình WOE-AHP cho thấy khả năng dự báo thực tế tốt hơn so với mô hình FR-AHP. Cụ thể, mô hình WOE-AHP đã phân vùng mức độ nguy cơ "Rất cao" chiếm 13,0% diện tích khu vực. Đặc biệt, trên tập dữ liệu kiểm tra độc lập, WOE-AHP hạn chế đáng kể sai số dự báo an toàn (âm tính giả) khi xác định 5,01% điểm trượt lở thực tế vào các vùng có mức độ "Rất thấp" và "Thấp", trong khi tỷ lệ dự báo sai này ở mô hình FR-AHP lên tới 22,47%. Nghiên cứu cũng định lượng hóa và chỉ ra rằng các yếu tố tự nhiên bao gồm đặc điểm thạch học, độ dốc địa hình đóng vai trò chủ đạo mang tính quyết định đối với độ ổn định sườn dốc. Trong khi đó, mạng lưới giao thông được xác định là tác nhân nhân sinh chính góp phần lớn vào cơ chế kích hoạt trượt lở cục bộ. Những phát hiện này cung cấp cơ sở khoa học tin cậy hỗ trợ chính quyền địa phương trong việc quy hoạch dân cư và xây dựng các chiến lược chủ động phòng ngừa rủi ro.

Từ khóa: Trượt lở đất, Phân tích thứ bậc (AHP), Trọng số bằng chứng (WOE), Tỷ số tần suất (FR), Lập bản đồ nhạy cảm.

1. MỞ ĐẦU

Trượt lở đất là một dạng tai biến địa chất nguy hiểm, thường xảy ra ở các khu vực miền núi, gây thiệt hại to lớn về người và tài sản. Tại Việt Nam, với 3/4 diện tích đất liền là đồi núi và trung du, nhiều khu vực ghi nhận các vụ trượt lở xảy ra hàng năm, tàn phá tài sản, cơ sở hạ tầng và thậm chí gây chết người (Long & De Smedt, 2012; Hung và cộng sự, 2016; Thanh và cộng sự, 2023). Do đó, việc xác định các khu vực có độ nhạy cảm cao với trượt lở đóng vai trò ưu tiên hàng đầu trong phát triển vùng núi nhằm giúp các nhà quy hoạch triển khai các chiến lược phòng ngừa rủi ro và giảm thiểu thiệt hại. Trong những năm gần đây, các phương pháp lập bản đồ nhạy cảm trượt lở truyền thống thường được chia thành hai nhóm: định tính và định lượng (Van Westen và cộng sự, 1997).

Các phương pháp định lượng như trọng số bằng chứng (WOE) và tỷ số tần suất (FR), sử dụng các mối quan hệ thống kê để tìm trọng số (Rasyid và cộng sự, 2016; Schicker & Moon, 2012). Các phương pháp thống kê định lượng này được sử dụng đem lại tính khách quan do dựa trên dữ liệu thực tế, thường đòi hỏi bộ dữ liệu mẫu lớn và phụ thuộc vào chất lượng lấy mẫu. Mặt khác, phương pháp định tính AHP phụ thuộc vào ý kiến chuyên gia, có ưu điểm trong trường hợp dữ liệu không đầy đủ, cho phép đánh giá chủ quan tầm quan trọng của các yếu tố. Một ưu điểm quan trọng của AHP là tỷ số nhất quán (CR) được tích hợp sẵn, cho phép kiểm tra định lượng mức độ logic và nhất quán trong các đánh giá của chuyên gia, từ đó giúp giảm bớt tính chủ quan. Quá trình phân tích thứ bậc (AHP) là một ví dụ nổi bật của phương pháp định tính, đặc biệt hiệu quả ở các khu vực nghiên cứu có dữ liệu hạn chế và cần dựa vào kiến thức chuyên gia để đánh giá tầm quan trọng của từng yếu tố (Saaty, 1980; Nguyen & Liu, 2019). Mặc dù các mô hình học máy đang phát triển mạnh mẽ (Gameiro và cộng sự, 2022; Taalab và cộng sự, 2018; Thanh và cộng sự, 2023), AHP vẫn vô cùng hiệu quả khi số lượng mẫu trượt lở thu thập được hạn chế và chủ yếu nằm dọc theo các tuyến đường, và đặc biệt kết hợp với các phương pháp định lượng.

Khoảng trống nghiên cứu hiện nay là sự kết hợp giữa phương pháp định lượng (FR, WOE) và định tính (AHP) vẫn chưa được chú trọng đúng mức tại nhiều khu vực nghiên cứu cụ thể. Việc kết hợp AHP với FR và WOE là thực sự cần thiết nhằm tận dụng tối đa hiệu quả của hai hướng tiếp cận: FR và WOE sẽ đảm nhiệm việc tính toán khách quan trọng số của các phân lớp bên trong từng bản đồ yếu tố dựa trên mối quan hệ thống kê với điểm trượt lở; trong khi đó, AHP sẽ sử dụng tri thức chuyên gia để xác định tầm quan trọng tổng thể giữa các yếu tố với nhau. Sự tích hợp này giúp mô hình ổn định hơn, giảm tính chủ quan của AHP và khắc phục được hiện tượng thiên lệch dữ liệu của các mô hình thống kê thuần túy.

Nhằm giải quyết những vấn đề trên, mục tiêu chính của nghiên cứu này là xây dựng và đánh giá hệ phương pháp tích hợp giữa định lượng (FR, WOE) và định tính

(AHP) để thiết lập bản đồ nhạy cảm trượt lở đất (LSM) có độ chính xác và độ tin cậy phù hợp với thực tiễn của khu vực nghiên cứu. Nghiên cứu được thử nghiệm tại khu vực xã Bản Xèo, tỉnh Lào Cai, hướng tới việc tạo ra một mô hình tối ưu có khả năng phân bố diện tích rủi ro trượt lở đất đá hợp lý. Nghiên cứu không chỉ so sánh tính hiệu quả của các mô hình tích hợp (AHP-WOE và AHP-FR), mà còn cung cấp một công cụ cảnh báo trượt lở đáng tin cậy, làm cơ sở khoa học vững chắc hỗ trợ chính quyền địa phương trong công tác quy hoạch sử dụng đất, quản lý rủi ro và xây dựng các chiến lược phòng ngừa thiên tai dài hạn.

2. PHƯƠNG PHÁP, NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở lý thuyết

Nghiên cứu sử dụng mô hình nhạy cảm trượt lở dựa trên các phương pháp định lượng và định tính. Tỷ số tần suất và Trọng số bằng chứng được dùng để tính trọng số cho mỗi lớp của yếu tố, sau đó AHP được dùng để đánh giá tầm quan trọng của từng bản đồ yếu tố.

a) Cơ sở lý thuyết phương pháp Tỷ số tần suất (FR)

Phương pháp Tỷ số tần suất (FR) là một phương pháp thống kê đơn giản, được sử dụng rộng rãi để phân tích mối quan hệ giữa sự xuất hiện của trượt lở và từng phân lớp của một yếu tố điều kiện (Rasyid và cộng sự, 2016; Yalcin, 2008). Cho một yếu tố điều kiện j , trọng số của mỗi lớp i trong yếu tố j (ký hiệu là FR_j^i) được tính theo tỷ lệ giữa số pixel trượt lở được thu thập trong lớp i so với tổng số pixel trượt lở, chia cho tỷ lệ số pixel của lớp i so với tổng diện tích khu vực nghiên cứu. Được xác định bằng phương trình sau:

$$FR_j^i = \left(\frac{L_j^i}{L} \right) * \left(\frac{S}{S_j^i} \right) \quad (1)$$

Trong đó:

- L và S lần lượt là tổng số pixel trượt lở thu thập được và tổng số pixel trong toàn bộ khu vực nghiên cứu.
- L_j^i và S_j^i lần lượt là số lượng pixel trượt lở nằm trong lớp i của yếu tố j , và tổng số pixel của lớp i trong yếu tố j .

b) Cơ sở lý thuyết phương pháp Trọng số bằng chứng (WOE)

WOE là một kỹ thuật thống kê được sử dụng phổ biến trong lập bản đồ nhạy cảm trượt lở đất, dựa trên mối quan hệ giữa các mẫu trượt lở quan sát được và các yếu tố điều kiện (Tehrany và cộng sự, 2014; Schicker & Moon, 2012). Trọng số WOE cuối cùng của một lớp được tính toán bằng cách lấy hiệu giữa trọng số dương (WOE^+) và trọng số âm (WOE^-).

Đối với một lớp i trong yếu tố j , trọng số WOE của lớp i được tính toán như sau:

$$WOE_j^{i+} = \ln \left(\frac{L_j^i}{L} * \frac{S}{S_j^i} \right) \quad (2)$$

$$WOE_j^{i-} = \ln \left(\frac{(L-L_j^i)}{L} * \frac{S}{(S-S_j^i)} \right) \quad (3)$$

$$WOE_j^i = WOE_j^{i+} - WOE_j^{i-} \quad (4)$$

Trong đó, các đại lượng L , S , L_j^i và S_j^i được mô tả tương tự như trong Phương trình (1).

c) Đánh giá trọng số bằng quá trình phân tích thứ bậc (AHP)

Khác với FR và WOE, phương pháp AHP dựa trên kiến thức của chuyên gia để đánh giá mức độ quan trọng của mỗi yếu tố. Quá trình này bao gồm các bước (Saaty, 1980): (1) Xây dựng mô hình phân cấp, (2) Lập ma trận so sánh từng cặp giữa các yếu tố, (3) Tính toán vector riêng để thu được trọng số, và (4) Đánh giá mức độ điều chỉnh của ma trận bằng giá trị tỷ số nhất quán (CR). Nếu giá trị $CR < 0,1$, ma trận có độ nhất quán chấp nhận được và trọng số các yếu tố sẽ được sử dụng để lập bản đồ độ nhạy cảm. Giá trị CR được tính thông qua giá trị riêng lớn nhất của ma trận và một chỉ số ngẫu nhiên tùy thuộc vào bậc của ma trận.

Nếu $CR > 0,1$, quy trình của phương pháp AHP sẽ quay lại Bước (2) để xây dựng lại mô hình. Ngược lại, nếu $CR < 0,1$, trọng số của các yếu tố thu được ở Bước 4 sẽ được sử dụng để xây dựng bản đồ độ nhạy trượt lở đất.

$$CR = \frac{\lambda_{max} - d}{(d-1) * R_i} \quad (5)$$

Trong đó:

R_i là giá trị chỉ số nhất quán ngẫu nhiên tương ứng với bậc của ma trận; d là bậc của ma trận so sánh. Các giá trị này được tra cứu từ *Bảng 1*; λ_{max} là giá trị riêng lớn nhất và được tính toán ở Bước 3.

Bảng 1: Bảng chỉ số nhất quán ngẫu nhiên (R_i) (Saaty & Vargas, 1991)

d	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R_i	0	0	0,5 8	0,9 0	1,1 2	1,2 4	1,3 2	1,4 1	1,4 5	1,4 9	1,5 1	1,5 3	1,5 6	1,5 7	1,5 9

Các giá trị trong ma trận so sánh cặp của mô hình AHP trong nghiên cứu này không hoàn toàn mang tính chủ quan cá nhân của chuyên gia. Nó được xây dựng dựa trên sự phân tích, tổng hợp ý kiến, tri thức của các chuyên gia địa chất, tai biến địa chất, kết hợp đối chiếu với các kết quả từ các tài liệu tham khảo và nghiên cứu trước đây. Việc kết hợp này giúp hệ thống hóa các kinh nghiệm thực tế, đảm bảo các điểm số so sánh

giữa các yếu tố, phản ánh sát với thực tiễn và hiện trạng trượt lở đất đá tại khu vực nghiên cứu.

d) Quy trình tính chỉ số tổng hợp LSI cho AHP-FR và AHP-WOE

Sau khi tính toán được trọng số của từng phân lớp (FR_j^i hoặc WOE_j^i) bằng phương pháp định lượng và trọng số của từng yếu tố điều kiện ($W_{AHP,j}$) bằng phương pháp AHP, quy trình tích hợp để tạo ra bản đồ được thực hiện thông qua công thức tính tổng có trọng số. Chỉ số nhạy cảm trượt lở tổng hợp (LSI) cho mỗi pixel trên bản đồ được tính bằng các phương trình sau:

- Đối với mô hình AHP - FR:

$$LSI_{AHP-FR} = \sum_{j=1}^n (W_{AHP,j} * FR_j^i) \quad (6)$$

- Đối với mô hình AHP - WOE:

$$LSI_{AHP-WOE} = \sum_{j=1}^n (W_{AHP,j} * WOE_j^i) \quad (7)$$

Trong đó: n là tổng số yếu tố điều kiện (bản đồ tác nhân) được sử dụng; $W_{AHP,j}$ là trọng số AHP của bản đồ tác nhân thứ j; FR_j^i và WOE_j^i lần lượt là trọng số FR và WOE của phân lớp i thuộc yếu tố j.

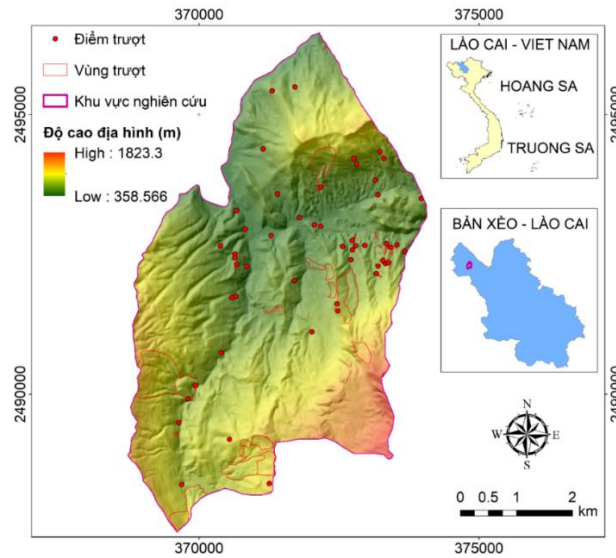
2.2. Khu vực nghiên cứu và các tài liệu cần thiết để tính toán

a) Khu vực nghiên cứu

Khu vực nghiên cứu nằm ở phần phía tây xã Bản Xèo, tỉnh Lào Cai (Hình 1). Đây là một xã vùng núi ở phía tây bắc của tỉnh, nằm gần biên giới Việt Nam - Trung Quốc. Xã có diện tích tự nhiên khoảng 78,3 km², được giới hạn trong tọa độ từ 22°27'00" đến 22°35'00" vĩ độ Bắc và từ 103°43'00" đến 103°50'00" kinh độ Đông. Xã Bản Xèo có ranh giới hành chính phía đông giáp xã Bát Xát; phía nam giáp xã Ngũ Chỉ Sơn; phía tây giáp các xã Mường Hum và Dền Sáng; và phía bắc giáp xã Trịnh Tường (thông tin từ trang web tinhthanhvn.com).

Khu vực nghiên cứu có đặc điểm địa hình đa dạng và phức tạp, bị chia cắt mạnh, sườn dốc, có độ cao tuyệt đối trung bình khoảng 800m. Đan xen giữa những dãy núi cao, sườn dốc là các thung lũng suối hẹp chạy dọc theo các lưu vực suối nhánh. Độ dốc trung bình dao động từ 15° đến 50°, có nơi vượt quá 60°. Mặc dù nằm trong khu vực khí hậu nhiệt đới, nóng ẩm mưa nhiều của khu vực miền núi phía bắc, tuy nhiên do ảnh hưởng của địa hình núi cao, độ chia cắt lớn nên khí hậu khu vực mang tính chất của khí hậu cận nhiệt đới và ôn đới ẩm. Mùa nóng từ tháng 5 đến tháng 10, mùa lạnh từ tháng 11 đến tháng 4 năm sau, nhiệt độ trung bình tháng cao nhất vào mùa hè là 16,6°C, và tháng thấp nhất vào mùa đông là 14,3°C. Khu vực này được bao phủ bởi mạng lưới sông suối dày đặc, thảm thực vật đa dạng với rừng tự nhiên và rừng trồng, cùng các đặc điểm

địa chất phức tạp bao gồm các đá trầm tích, đá biến chất và đá magma xâm nhập.



Hình 1: Sơ đồ khu vực nghiên cứu Bản Xèo, tỉnh Lào Cai

b) Các tài liệu cần thiết dùng cho tính toán

Số liệu hiện trạng trượt lở trong nghiên cứu này được xây dựng dựa trên bộ dữ liệu do Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản thực hiện tính đến năm 2017, bao gồm 51 điểm trượt lở, chủ yếu nằm dọc theo các tuyến đường thông qua khảo sát thực địa, kết hợp với 59 vùng trượt lở ở xa khu vực đường giao thông được khoanh vùng bằng công tác phân tích địa hình trên mô hình lập thể số (DEM) và Google Earth tương ứng với thời gian điều tra, khảo sát. Việc sử dụng bộ dữ liệu đồng bộ này đóng vai trò như một tập dữ liệu nền tảng có độ tin cậy cao, phục vụ cho mục tiêu huấn luyện, kiểm tra và so sánh hiệu quả của các mô hình thuật toán (WOE-AHP và FR-AHP) trong nghiên cứu.

Nghiên cứu đã sử dụng 10 bản đồ yếu tố điều kiện (dưới dạng raster với độ phân giải 10m x 10m) bao gồm: bản đồ lớp phủ thực vật, đường giao thông, sông suối, bản đồ địa chất, độ dốc, độ cong địa hình, hướng phơi sườn, độ phân cắt sâu, khoảng cách đến đường giao thông và khoảng cách đến sông suối. Các yếu tố liên tục như độ dốc, độ cong, độ phân cắt sâu, mật độ suối và mật độ đường giao thông được phân thành 5 lớp dựa trên phương pháp Natural Break.

Trong nghiên cứu này, việc lựa chọn các yếu tố điều kiện được thực hiện dựa trên kiến thức về cơ chế trượt lở và sự đánh giá các yếu tố liên quan đến trượt lở tại khu vực nghiên cứu. Các yếu tố điều kiện liên quan đến trượt lở được sử dụng bao gồm 4 nhóm chính:

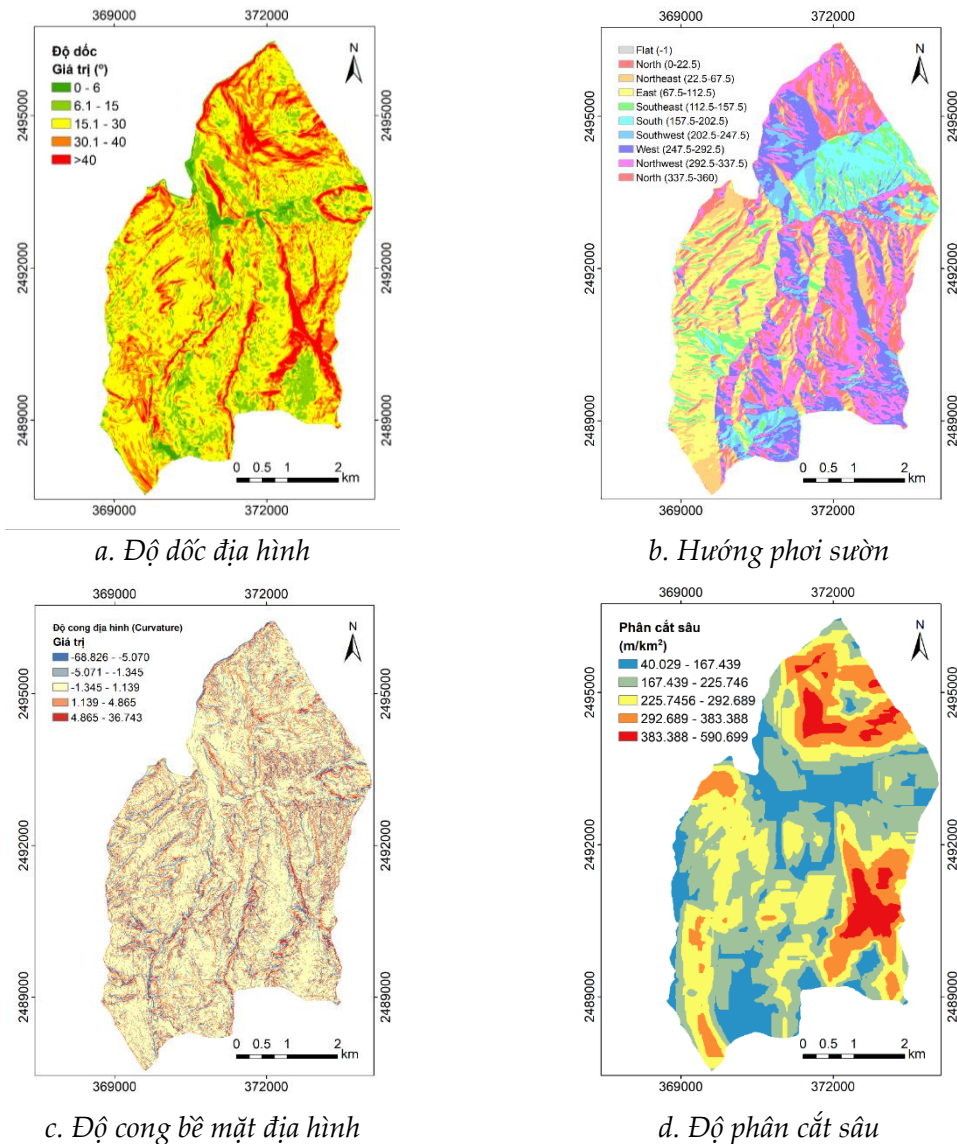
- Nhóm yếu tố địa hình

+ **Độ dốc địa hình (Hình 2a):** Đây là một trong những yếu tố quan trọng và mang tính quyết định nhất ảnh hưởng trực tiếp đến độ ổn định của sườn dốc (Rabby và cộng

sự, 2020; Abedini và cộng sự, 2019). Độ dốc càng lớn thì ứng suất cắt càng tăng, dẫn đến khả năng xuất hiện trượt lở càng cao (Pourghasemi, 2012; Yalcin, 2008).

+ Hướng phơi sườn (Hình 2b): Yếu tố này có liên quan trực tiếp đến quá trình bốc hơi nước và độ ẩm của đất ở các khu vực đồi núi, nguyên nhân là do sự khác biệt về hướng chiếu sáng và bức xạ mặt trời, từ đó tác động đến nguy cơ trượt lở (Meten và cộng sự, 2015).

+ Độ cong bề mặt địa hình và độ phân cắt sâu (Hình 2c, d): Thể hiện mức độ nhấp nhô và phân dị của bề mặt địa hình theo chiều dọc. Các yếu tố này bị xói mòn bởi thời tiết hoặc hoạt động canh tác (Carson và Kirkby, 1972; Kaur và cộng sự, 2019), đóng vai trò quyết định trong việc hội tụ dòng chảy, dẫn đến tích tụ vật liệu và gây xói mòn tạo rãnh, làm mất ổn định hệ thống sườn dốc, nguy cơ xảy ra trượt lở.

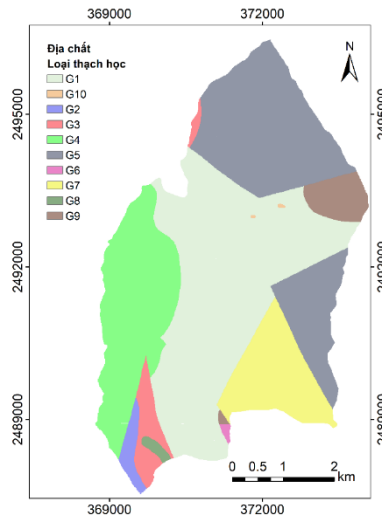


Hình 2: Sơ đồ nhóm các yếu tố địa hình khu vực Bản Xèo, tỉnh Lào Cai

- Nhóm yếu tố địa chất

+ Đặc điểm địa chất (Hình 3): Sự khác biệt về thạch học là yếu tố nội sinh có khả năng kiểm soát sự phát triển của trượt lở. Mỗi loại đá khác nhau dưới tác động của điều kiện khí hậu sẽ hình thành các lớp vỏ phong hóa khác nhau về độ dày và tính chất cơ lý, điều này quyết định mức độ nhạy cảm của đất đá do sự bão hòa nước trên sườn dốc.

Theo tài liệu bản đồ địa chất tỷ lệ 1:50.000, cấu tạo nên bình đồ cấu trúc địa chất của khu vực Bản Xèo gồm các thành tạo địa chất thuộc các phân vị địa tầng (Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản, 2017): Hệ tầng Suối Chiềng (PP_{sc1}); Hệ tầng Sin Quyền (PP_{sq}); Hệ tầng Bản Nguồn (D_{1bn}); Hệ tầng Bản Páp (D_{1-2bp}); Phức hệ Mường Hum (aG/PZ_{2mh}); Phức hệ Ye Yen Sun (G/E_{ys1}); và Phức hệ Po Sen (G/PZ_{1ps}). Trong Bảng 2 mô tả chi tiết các yếu tố địa chất được dùng trong nghiên cứu này.



Hình 3: Sơ đồ yếu tố địa chất khu vực Bản Xèo, tỉnh Lào Cai

Bảng 2: Bảng mô tả các yếu tố địa chất

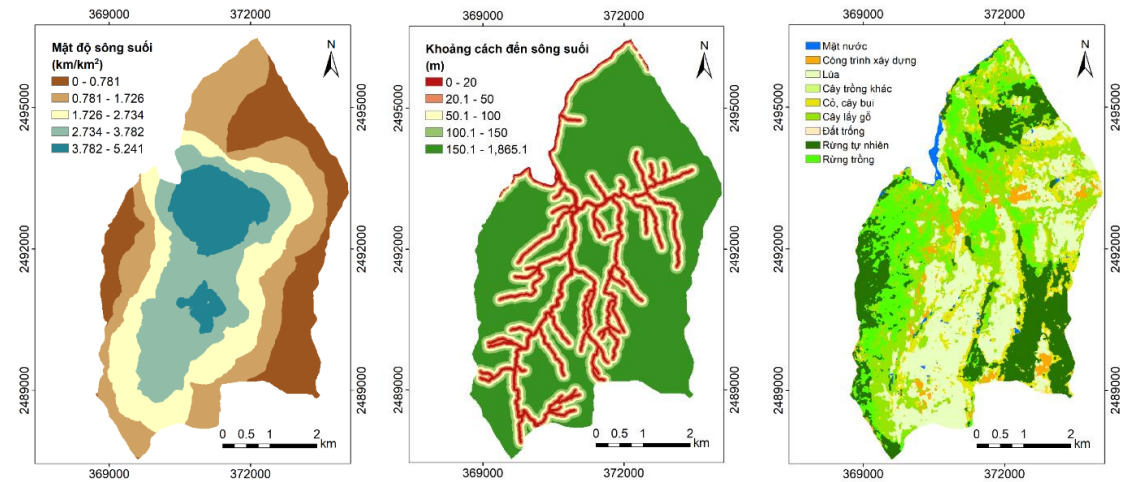
Ký hiệu	Tuổi địa chất	Địa tầng	Mô tả
G1	D_{1bn}	Hệ tầng Bản Nguồn	Đá sừng scapolit-biotit, scapolit-pyroxen, đá phiến biotit, lớp mỏng đá vôi hoa hóa
G2	G/E_{ys1}	Phức hệ Ye Yen Sun	Granit biotit
G3	PP_{sc1}	Hệ tầng Suối Chiềng	Đá phiến biotit-epidot-sphen
G4	aG/PZ_{2mh}	Phức hệ Mường Hum	Granit kiềm dạng gneis
G5	GDi/PZ_{1ps1}	Phức hệ Po Sen (pha 1)	Granodiorit, diorit thạch anh và tonalit

G6	D _{1-2bp}	Hệ tầng Bản Páp	Đá vôi hoa hóa
G7	PP _{sq}	Hệ tầng Sin Quyền	Đá phiến thạch anh mica có graphit
G8	aQ ₂ ¹⁻²	Holocen hạ - trung	Cuội, tảng, sạn, cát, bột.
G9	D _{1-2bp}	Hệ tầng Bản Páp (?)	Đá vôi, đá vôi hoa hóa
G10	G/PZ _{1ps2}	Phức hệ Po Sen (pha 2)	Granit

- Nhóm yếu tố thủy văn và môi trường

+ **Mạng lưới sông suối** (Hình 4a,b): Bao gồm **Khoảng cách đến dòng chảy sông, suối** và **Mật độ dòng chảy sông, suối**. Dòng chảy từ sông suối có khả năng làm xói mòn chân sườn dốc, làm giảm độ ổn định sườn dốc và dẫn đến các nguy cơ trượt lở theo thời gian.

+ **Thảm phủ thực vật** (Hình 4c): Đóng vai trò thiết yếu trong khả năng thấm nước, bay hơi nước và giữ đất trên sườn dốc (Chen và cộng sự, 2019). Sự có mặt hay vắng mặt của thảm thực vật ảnh hưởng lớn đến độ ổn định của đất; thảm thực vật dày giúp rễ cây bám sâu duy trì độ ổn định, trong khi thảm thực vật mỏng, đất trống, đồi trọc dễ dẫn đến xói mòn và mất cân bằng sườn.



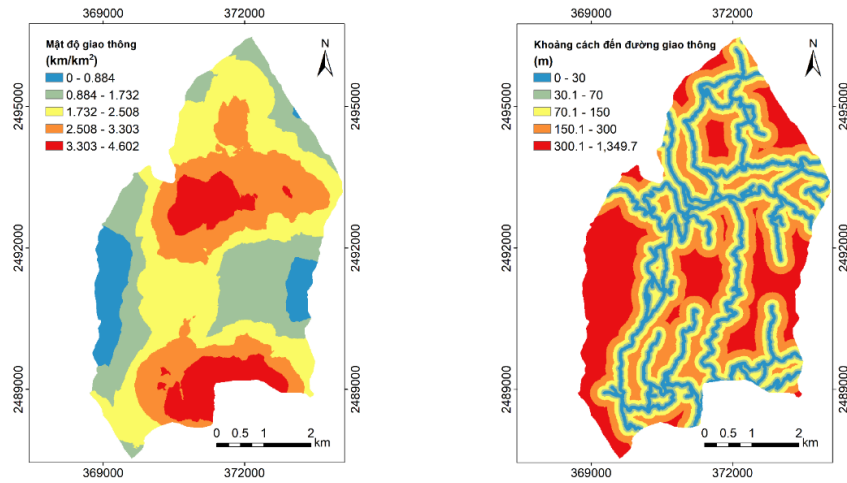
a. Mật độ sông suối b. Khoảng cách đến sông suối c. Thảm phủ thực vật

Hình 4: Sơ đồ nhóm các yếu tố thủy văn và môi trường khu vực Bản Xèo, tỉnh Lào Cai

- Nhóm yếu tố nhân sinh

Mạng lưới giao thông (Hình 5a,b): Các yếu tố được sử dụng bao gồm **Khoảng cách đến đường giao thông** và **Mật độ giao thông**. Việc xây dựng đường sá ở các khu vực đồi núi thường dẫn đến việc phải cắt xén sườn dốc địa hình, làm phá vỡ trạng thái ổn định tự nhiên của mái dốc (Thanh và cộng sự, 2026). Các số liệu khảo sát hiện trường

cho thấy phần lớn các điểm trượt lở được ghi nhận xảy ra dọc theo các tuyến đường giao thông do hoạt động cắt xẻ, tác động vào sườn dốc để phục vụ các hoạt động dân sinh.



a. Mật độ giao thông

b. Khoảng cách đến đường giao thông

Hình 5: Sơ đồ nhóm các yếu tố nhân sinh khu vực Bản Xèo, tỉnh Lào Cai

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

Tính toán trọng số và phân bố độ nhạy cảm

Các mẫu trượt lở được chia ngẫu nhiên thành hai phần: 70% dùng để xây dựng mô hình (*training*), 30% để kiểm tra (*testing*). Dữ liệu 70% được sử dụng để tính toán các trọng số WOE và FR của từng lớp thuộc 10 bản đồ yếu tố. Trọng số AHP được sử dụng để tính trọng số giữa các bản đồ yếu tố. Bảng trọng số FR và WOE của lớp theo từng yếu tố đã được liệt kê tại Bảng 3

Bảng 3: Bảng trọng số FR và WOE của lớp theo từng yếu tố

Lớp	Giá trị	Trọng số FR	Trọng số WOE	Lớp	Giá trị	Trọng số FR	Trọng số WOE
Độ dốc				Hướng phơi sườn			
1	0-6	0,16	-1,87	1	Flat (-1- -0,0000001)	0	0
2	6,1-15	0,75	-0,34	2	(-0.000001 - 22.5)	0,62	-0,52
3	15,1-30	0,97	-0,14	3	Northeast (22.5-67.5)	1,43	0,42
4	30-40	1,40	0,43	4	East (67.5-112.5)	1,13	0,13

Lớp	Giá trị	Trọng số FR	Trọng số WOE	Lớp	Giá trị	Trọng số FR	Trọng số WOE
5	>40	0,90	-0,12	5	Southeast (112.5-157.5)	1,36	0,33
Độ cong bề mặt địa hình				6	South (157.5-202.5)	1,75	0,61
1	-68,826 - -5,070	0,99	-0,01	7	Southwest (202.5-247.5)	1,28	0,27
2	-5,071 - -1,345	1,06	0,05	8	West (247.5-292.5)	0,94	-0,09
3	-1,345 - 1,139	0,98	-0,13	9	Northwest (292.5-337.5)	0,45	-0,92
4	1,139 - 4,865	1,00	-0,01	10	North (337.5-360)	0,53	-0,68
5	4,865 - 36,743	1,04	0,03				
Độ phân cắt sâu							
1	40,029 - 167,439	0,71	-0,41	4	292,689 - 383,388	1,24	0,25
2	167,439 - 225,746	0,86	-0,25	5	383,388 - 590,699	1,17	0,17
3	225,746 - 292,689	1,19	0,22				
Yếu tố địa chất				Thảm phủ thực vật			
0	D_{1bn}	0,75	-0,46	1	Mặt nước	0,18	-1,71
1	G/Ey_{S1}	1,85	0,63	2	Công trình xây dựng	0,17	-1,81
2	PP_{SC1}	2,56	0,98	3	Lúa	0,95	-0,09
3	aG/PZ_{2mh}	1,91	0,83	4	Cây trồng khác	0,38	-0,97
4	GDi/PZ_{1ps1}	0,81	-0,29	5	Cỏ, cây bụi	0,64	-0,49
5	D_{1-2bp}	13,47	2,62	6	Cây lấy gỗ	1,09	0,09
6	PP_{sq}	0,11	-2,34	7	Đất trống	0,14	-1,97
7	aQ_2^{1-2}	3,52	1,27	8	Rừng tự nhiên	1,16	0,17
8	D_{1-2bp}	0,48	-0,74	9	Rừng trồng	1,27	0,28

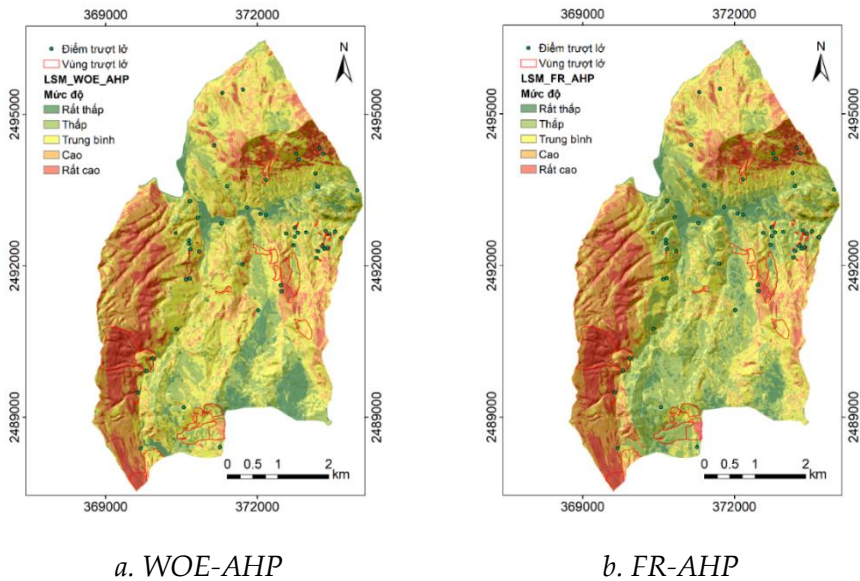
Lớp	Giá trị	Trọng số FR	Trọng số WOE	Lớp	Giá trị	Trọng số FR	Trọng số WOE
9	G/PZ _{1ps2}	0,10	-2,25				
Khoảng cách đến sông suối				Mật độ sông suối			
1	0-20	0,89	-0,13	1	0 - 0,781	0,45	-0,95
2	20-50	1,06	0,06	2	0,781 - 1,726	1,80	0,87
3	50-100	1,02	0,01	3	1,726 - 2,734	1,53	0,55
4	100-150	1,03	0,03	4	2,734 - 3,782	0,54	-0,74
5	150-1865	0,99	-0,10	5	3,782 - 5,241	0,07	-2,80
Khoảng cách đến đường giao thông				Mật độ đường giao thông			
1	0-30	0,88	-0,16	1	0 - 0,884	2,78	1,17
2	30-70	0,77	-0,31	2	0,884 - 1,732	1,57	0,61
3	70-150	0,79	-0,32	3	1,732 - 2,508	0,54	-0,84
4	150-300	0,70	-0,47	4	2,508 - 3,303	0,15	-2,17
5	300-1.349,74	1,74	0,78	5	3,303 - 4,602	1,83	0,71

Bảng 4: Bảng trọng số AHP so sánh giữa các yếu tố thành phần

Yếu tố	Độ dốc	Mật độ sông suối	Độ phân cắt sâu	Khoảng cách sông suối	Thảm phủ	Độ cong địa hình	Hướng phơi sườn	Khoảng cách đến đường	Mật độ đường GT	Địa chất
Trọng số	0,175	0,1	0,103	0,085	0,11	0,077	0,061	0,088	0,093	0,108

Giá trị tỷ số nhất quán (CR): $CR = 0,036 < 0,1$. Thỏa mãn yêu cầu đặt ra.

Dựa trên bảng trọng số AHP (Bảng 4), yếu tố độ dốc địa hình (0,175) và địa chất (0,108) được đánh giá là các yếu tố tự nhiên có ảnh hưởng chủ đạo đến mức độ nhạy cảm của toàn vùng. Tuy nhiên, phân tích định lượng FR và WOE cũng chỉ ra sự tác động mang tính cục bộ của yếu tố nhân sinh. Các khu vực có mật độ đường giao thông cao (Bảng 3) cho thấy giá trị FR và WOE dương lớn, phản ánh hiện tượng cắt xẻ sườn dốc làm đường dẫn đến làm mất ổn định chân mái dốc, tạo thành tác nhân kích hoạt gây ra trượt lở đất đá.



Hình 6: Bản đồ nhạy cảm trượt lở đất đá khu vực Bản Xèo, tỉnh Lào Cai

Hình 6 là bản đồ kết quả của 2 phương pháp WOE-AHP và FR-AHP. Bản đồ độ nhạy cảm trượt lở đất (LSM) được phân loại thành 5 mức độ: *Rất thấp, Thấp, Trung bình, Cao, và Rất cao*. Tỷ lệ phân bố về các lớp nhạy cảm của từng bản đồ và pixel trượt được phân bố trong các lớp nhạy cảm của các dữ liệu đào tạo (70%) và dữ liệu kiểm thử (30%), được thể hiện trong Bảng 5.

Bảng 5: Bảng thống kê kết quả phân vùng các mức độ theo phương pháp WOE-AHP và FR-AHP

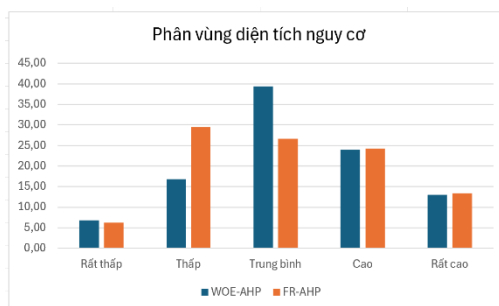
Mức độ	Diện tích từng mức độ		Số lượng điểm ảnh (pixel) trượt trong từng mức độ		Số lượng điểm ảnh (pixel) trượt trong từng mức độ	
	Số điểm ảnh (pixel) của từng lớp	Tỷ lệ (%)	Training	Tỷ lệ (%)	Testing	Tỷ lệ (%)
Phương pháp WOE-AHP						
Rất thấp	20012	6,82	119	0,64	6,0	0,53
Thấp	49195	16,78	1883	10,14	51,0	4,48
Trung bình	115495	39,39	5695	30,65	678,0	59,53

Mức độ	Diện tích từng mức độ		Số lượng điểm ảnh (pixel) trượt trong từng mức độ		Số lượng điểm ảnh (pixel) trượt trong từng mức độ	
	Số điểm ảnh (pixel) của từng lớp	Tỷ lệ (%)	Training	Tỷ lệ (%)	Testing	Tỷ lệ (%)
Cao	70352	23,9 9	4077	21,94	296,0	25,99
Rất cao	38161	13,0 1	6805	36,63	108,0	9,48
Tổng	293238	100, 0	18579	100,00	1139,0	100,00
Phương pháp FR-AHP						
Rất thấp	18311	6,24	291	1,57	22,00	1,93
Thấp	86305	29,4 3	3473	18,69	234,00	20,54
Trung bình	78143	26,6 6	3190	17,17	454,00	39,86
Cao	71324	24,3 2	4420	23,79	362,00	31,78
Rất cao	39132	13,3 4	7205	38,78	67,00	5,88
Tổng	293238	100, 00	18579	100,00	1139,00	100,00

Sự phân bố diện tích và mức độ tập trung của các điểm trượt lở đất trong từng vùng nhạy cảm là tiêu chí quan trọng để đánh giá độ chính xác và khả năng dự báo của các mô hình. Dựa trên kết quả phân vùng mức độ nhạy cảm, hai mô hình WOE-AHP và FR-AHP cho thấy những sự khác biệt về hiệu quả:

Về phân bố diện tích dự báo: Cả hai mô hình đều phân vùng diện tích có nguy cơ "Rất cao" ở mức tương đồng nhau, chiếm tỷ lệ 13,0% với WOE-AHP và 13,3% với FR-AHP. Đây là tỷ lệ phân bố phù hợp đối với một bản đồ dự báo, vừa đủ bao phủ vùng

nguy cơ mà không bị lan rộng quá mức gây khó khăn cho công tác quy hoạch, nhưng cũng không quá hẹp để bỏ sót các điểm có nguy cơ cao. Tuy nhiên, mô hình WOE-AHP có sự phân bố diện tích vào mức "Trung bình" chiếm ưu thế nhất (39,4%), trong khi FR-AHP phân bố dàn đều hơn ở cả 3 mức Thấp, Trung bình và Cao (lần lượt là 29,4%, 26,7% và 24,3%) (Hình 7). Có thể quan sát thấy sự khác nhau về kết quả phân bố các diện tích theo mức độ nhạy cảm tại Hình 8 và Hình 9 đối với 1 khu vực được phóng to cho cả 2 bản đồ kết quả.



Hình 7: Biểu đồ so sánh tỷ lệ phân bố diện tích dự báo của 2 phương pháp

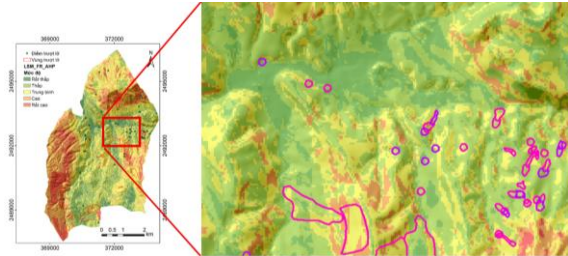
Về độ chính xác trên tập dữ liệu đào tạo (*Training*): Một mô hình phân vùng tốt phải đảm bảo phần lớn các điểm trượt lở phân bố vào khu vực được dự báo nguy cơ Cao và Rất cao, đồng thời hạn chế tối đa việc điểm trượt lở rơi vào vùng an toàn (Thấp và Rất thấp). Trong khi đó:

- Mô hình WOE-AHP cho thấy, có 58,5% (21,9% + 36,6%) số điểm trượt lở phân bố vào vùng "Cao" và "Rất cao", nhưng quan trọng hơn là nó cô lập vùng an toàn rất tốt: chỉ có 10,7% (0,6% + 10,1%) điểm trượt lở rơi vào vùng "Thấp" và "Rất thấp".
- Mô hình FR-AHP có 62,57% (23,79% + 38,78%) số điểm trượt lở đào tạo rơi vào vùng nguy cơ "Cao" và "Rất cao". Tuy nhiên, điểm yếu là mô hình này là vẫn có tới 20,26% (1,57% + 18,69%) số điểm trượt lở vào vùng "Rất thấp" và "Thấp".

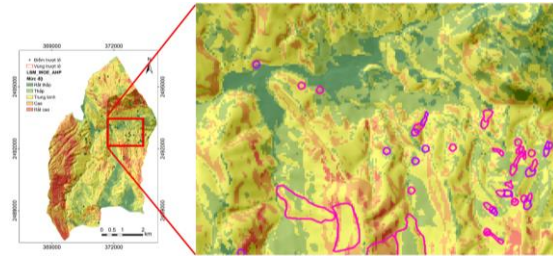
Về khả năng dự báo và độ tin cậy trên tập dữ liệu kiểm tra (*Testing*): Đánh giá trên tập dữ liệu kiểm định độc lập (*Testing*) là tiêu chí quyết định xem mô hình nào có khả năng dự báo thực tiễn tốt hơn. Cả hai mô hình đều có tỷ lệ kiểm tra trùng khớp khu vực trượt lở ở vùng có mức độ "Cao" và "Rất cao" khá tương đương (35,47% đối với WOE-AHP và 37,66% đối với FR-AHP). Tuy nhiên, sự khác biệt quan trọng nằm ở tỷ lệ dự báo sai - tức là mô hình cho kết quả khu vực đó an toàn nhưng thực tế lại xảy ra trượt lở.

- Mô hình WOE-AHP đưa ra mức độ sai số về điểm trượt lở kiểm tra được đánh giá phù hợp với thực tế khi có 5,01% (0,53% + 4,48%) điểm trượt lở xảy ra tại vùng "Rất thấp" và "Thấp".

- Với mô hình FR-AHP, có tới 22,47% (1,93% + 20,54%) số điểm trượt lở kiểm tra nằm ở vùng được dự báo là "Rất thấp" và "Thấp". Việc dự báo sai với tỷ lệ hơn 1/5 như vậy có thể làm giảm sút độ tin cậy của bản đồ khi áp dụng vào thực tiễn quy hoạch phòng chống thiên tai.



Hình 8: Hình ảnh phóng to của một vùng trong bản đồ trượt lở xây dựng bởi mô hình FR-AHP



Hình 9: Hình ảnh phóng to của một vùng trong bản đồ trượt lở xây dựng bởi mô hình WOE-AHP

Từ các phân tích thống kê trên, đối với tập dữ liệu tại khu vực Bản Xèo, phương pháp WOE-AHP cho thấy sự phân bố các cấp độ nhạy cảm hợp lý hơn và có xu hướng kiểm soát hiện tượng dự báo sai an toàn (âm tính giả) tốt hơn phương pháp FR-AHP. Bằng cách tính toán cả trọng số của những vị trí không xảy ra trượt lở (non-landslide weights), mô hình WOE-AHP đã khắc phục được hiện tượng dự báo nhầm khu vực nguy hiểm thành an toàn của phương pháp FR-AHP (Thanh và cộng sự, 2023; Thanh và cộng sự, 2026), qua đó cung cấp một bản đồ nhạy cảm trượt lở đất (LSM) có tính ổn định và tính ứng dụng cao hơn.

Bên cạnh những kết quả đạt được về mặt cải tiến thuật toán, nghiên cứu này vẫn còn một số giới hạn nhất định. Bộ dữ liệu huấn luyện và kiểm định được sử dụng chủ yếu phản ánh hiện trạng trượt lở đất đá tính đến năm 2017. Mặc dù đây là bộ dữ liệu giúp đánh giá tốt hiệu năng của các phương pháp, nhưng nó chưa cập nhật các điểm trượt lở mới phát sinh và hoạt động nhân sinh trong những năm gần đây. Do đó, bản đồ nhạy cảm hiện tại thiên về ý nghĩa kiểm chứng phương pháp luận hơn là phản ánh hiện trạng thời gian thực.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã thực hiện đánh giá có hệ thống và ứng dụng mô hình tích hợp giữa các phương pháp định lượng (WOE, FR) và phương pháp định tính (AHP) để thiết lập bản đồ nhạy cảm trượt lở đất (LSM) tại khu vực nghiên cứu thuộc xã Bản Xèo, tỉnh Lào Cai. Quá trình huấn luyện và kiểm định mô hình đã đem lại những kết quả quan trọng về độ chính xác cũng như khả năng ứng dụng thực tiễn của từng phương pháp.

Dựa trên sự phân bố của các điểm trượt lở vào các vùng dự báo, kết quả đánh giá bước đầu cho thấy mô hình WOE-AHP là một phương pháp tiếp cận có tính ứng dụng cao, tạo ra bản đồ phân vùng cân bằng. So với mô hình FR-AHP, sự kết hợp WOE-AHP thể hiện tiềm năng trong việc hạn chế tỷ lệ phân vùng điểm trượt lở vào vùng an toàn (mức "Rất thấp" và "Thấp"). Dựa trên số liệu thống kê, mô hình WOE-AHP đã dự báo mức độ nguy cơ "Rất cao" chiếm khoảng 13,0% diện tích khu vực nghiên cứu - một tỷ lệ phân bố diện tích cảnh báo được đánh giá là hợp lý. Phương pháp WOE-AHP có khả năng kiểm soát tỷ lệ dự báo sai (âm tính giả) tốt hơn. Trên tập dữ liệu kiểm tra độc lập, mô hình này chỉ xác định 5,01% điểm trượt lở thực tế vào các vùng được dự báo an toàn (mức "Rất thấp" và "Thấp"). Ngược lại, mô hình FR-AHP cho thấy sự hạn chế khi phụ thuộc vào các vị trí lấy mẫu và có tỷ lệ dự báo sai lên tới 22,47%, làm giảm độ tin cậy của bản đồ khi áp dụng vào thực tiễn. Bằng cách tính toán bao gồm cả trọng số của những vị trí không xảy ra trượt lở, mô hình WOE-AHP đã khắc phục được hiện tượng thiên lệch không gian này, giúp phân bố đồng đều, bao quát và phản ánh đúng thực tế điều kiện khu vực hơn.

Bên cạnh đó, thông qua bộ trọng số của mô hình, nghiên cứu đã định lượng hóa và khẳng định vai trò chủ đạo của các yếu tố tự nhiên, trong đó độ dốc địa hình (trọng số AHP 0,175) và đặc điểm thạch học (trọng số AHP 0,108) là hai yếu tố nền tảng quyết định độ nhạy cảm trượt lở của toàn vùng. Đồng thời, nghiên cứu cũng chỉ ra rằng hoạt động nhân sinh (diễn hình là mật độ đường giao thông) tuy có trọng số tổng thể thấp hơn (0,093) nhưng lại đóng vai trò là tác nhân kích hoạt trượt lở đáng kể. Sự kết hợp giữa việc cắt xẻ tạo sườn dốc nhân tạo đã làm gia tăng nguy cơ xảy ra trượt lở cục bộ tại khu vực Bản Xèo.

Bản đồ nhạy cảm trượt lở đất (LSM) được xây dựng từ mô hình WOE-AHP có thể là một công cụ quy hoạch không gian hiệu quả khi áp dụng vào thực tiễn. Nhóm tác giả khuyến nghị chính quyền địa phương có thể xem xét sử dụng bản đồ này làm cơ sở khoa học vững chắc để định hướng quy hoạch sử dụng đất, bố trí dân cư, phát triển cơ sở hạ tầng an toàn và triển khai các chiến lược phòng ngừa, giảm nhẹ rủi ro thảm họa trượt lở đất tại xã Bản Xèo trong tương lai. Trong các nghiên cứu tiếp theo, việc tổ chức khảo sát thực địa để cập nhật, kiểm chứng lại các điểm trượt lở phát sinh sau năm 2017 là yêu cầu cấp thiết để nâng cao hơn nữa tính thời sự của bộ dữ liệu, từ đó giúp bản đồ dự báo phát huy tối đa giá trị thực tiễn.

ĐÓNG GÓP CỦA TÁC GIẢ

Thu thập, xử lý dữ liệu và chạy mô hình: P.V.S, T.H.S, N.H.D; Viết bản thảo: T.T, P.V.S; Chỉnh sửa bản thảo bài báo: T.T, T.H.S.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Phenikaa cho Đề tài mã số PU2025-3-A-01. Nhóm tác giả xin gửi lời cảm ơn đến Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản đã cho phép khai thác và sử dụng các số liệu, tài liệu phục vụ quá trình đánh giá, ứng dụng phương pháp phân tích trong nghiên cứu này.

LỜI CAM ĐOAN

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

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Abedini, M., Ghasemian, B., Shirzadi, A., Shahabi, H., Chapi, K., Pham, B. T., Bin-Amand, B., & Tien-Bui, D. (2019). *A novel hybrid approach of Bayesian Logistic Regression and its ensembles for landslide susceptibility assessment*. Geocarto International, 34(13), 1427–1457. doi: 10.1080/10106049.2018.1499820
- [2] Carson, M., & Kirkby, M. (1972). *Hillslope form and process*. London: Cambridge University Press.
- [3] Chen, L., Guo, Z., Yin, K., Shrestha, D. P., & Jin, S. (2019). *The influence of land use and land cover change on landslide susceptibility: A case study in Zhushan Town, Xuan'en County (Hubei, China)*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 19(10), 2207–2228. doi: 10.5194/nhess-19-2207-2019
- [4] Gameiro, S., de Oliveira, G. G. & Guasselli, L. A. (2022), *The influence of sampling on landslide susceptibility mapping using artificial neural networks*, Geocarto International, 38(1), 1–23. doi: 10.1080/10106049.2022.2144475.
- [5] Hung, L.Q., Van, N. T. H., Duc, D.M., Ha, L. T. C., Son, P. V., Khanh, N. H., & Binh, L. T. (2016), *Landslide susceptibility mapping by combining the analytical hierarchy process and weighted linear combination methods: a case study in the upper Lo River catchment (Vietnam)*, Landslides, 13(5), 1285–1301. doi: 10.1007/s10346-015-0657-3.
- [6] Kaur, H., Gupta, S., Parkash, S., Thapa, R., Gupta, A., & Khanal, G. C. (2019). *Evaluation of landslide susceptibility in a hill city of Sikkim Himalaya with the perspective of hybrid modelling techniques*. Annals of GIS, 25(2), 113-132. doi: 10.1080/19475683.2019.1575906.
- [7] Long, N., & De Smedt, F., (2012). *Application of an analytical hierarchical process approach for landslide susceptibility mapping in A Luoi district, Thua Thien Hue Province, Vietnam*. Environmental Earth Sciences, 66(7), 1739–1752. doi: 10.1007/s12665-011-1397-x
- [8] Meten, M., Prakash Bhandary, N., & Yatabe, R. (2015). *Effect of landslide factor combinations on the prediction accuracy of landslide susceptibility maps in the Blue Nile Gorge of Central Ethiopia*. Geoenvironmental Disasters, 2(1), 9. doi: 10.1186/s40677-015-0016-7.
- [9] Nguyen, T., & Liu, C. (2019). *A New Approach Using AHP to Generate Landslide Susceptibility Maps in the Chen-Yu-Lan Watershed, Taiwan*. Sensors, 19(3), 505. doi: 10.3390/s19030505.

- [10] Pourghasemi, H. R., Mohammady, M., & Pradhan, B. (2012). *Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran*. CATENA, 97, 71–84. doi: 10.1016/j.catena.2012.05.005.
- [11] Rabby, Y. W., Ishtiaque, A., & Rahman, M. S. (2020). *Evaluating the effects of digital elevation models in landslide susceptibility mapping in rangamati district, Bangladesh*. Remote Sensing, 12(17), 2718. doi: 10.3390/RS12172718.
- [12] Rasyid, A. R., Bhandary, N. P., & Yatabe, R. (2016). *Performance of frequency ratio and logistic regression model in creating GIS based landslides susceptibility map at Lompobattang Mountain, Indonesia*. Geoenvironmental Disasters, 3(1). doi: 10.1186/s40677-016-0053-x
- [13] Saaty, T. L. (1980). *The analytic process: planning, priority setting, resources allocation*. New York, NY, USA: McGraw-Hill Int.
- [14] Saaty, T., & Vargas, L. (1991). *Prediction, projection, and forecasting: applications of the analytic hierarchy process in economics, finance, politics, games, and sports*. Kluwer Academic Pub.
- [15] Schicker, R., & Moon, V. (2012). *Comparison of bivariate and multivariate statistical approaches in landslide susceptibility mapping at a regional scale*. Geomorphology, 161–162, 40–57. doi: 10.1016/j.geomorph.2012.03.036
- [16] Taalab, K., Cheng, T., & Zhang, Y. (2018). *Mapping landslide susceptibility and types using Random Forest*. Big Earth Data, 2(2), 159–178. doi: 10.1080/20964471.2018.1472392
- [17] Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2014). *Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS*. Journal of Hydrology, 512, 332–343. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.008
- [18] Tinhthanhvn.com. (2025). *Thông tin hành chính bản đồ Việt Nam 2025*. Truy cập ngày 01/06/2026 tại: <https://tinhthanhvn.com/province/lao-cai/xa-ban-xeo>
- [19] Thanh Trinh., Binh Thanh Luu., Duong Huy Nguyen., Trang Ha Thi Le., Son Van Pham., & Nhung Vuong Thi. (2023). *A study of non-landslide samples and weights for mapping landslide susceptibility using regression and clustering methods*. Earth Science Informatics, 16(4), 4009–4034. doi: 10.1007/s12145-023-01144-y
- [20] Thanh Trinh., Son Van Pham., Emara, T. Z., Patwary, M. J. A., Duong Huy Nguyen., Binh Thanh Luu., & Linh Nguyen Hoang Khanh. (2026). *Enhancing accuracy and reliability of landslide susceptibility maps through machine learning with non-landslide sampling strategies*. Journal of Earth System Science. Truy cập tại: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12040-026-02773-9>
- [21] Van Westen, C. J., Rengers, N., Terlien, M. T. J., & Soeters, R. (1997). *Prediction of the occurrence of slope instability phenomenon through GIS-based hazard zonation*. Geologische Rundschau, 86(2), 404–414. doi: 10.1007/s005310050149.
- [22] Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản. (2017). *Báo cáo thuyết minh Sơ đồ hiện trạng khô trượt lở đất đá và sơ đồ khoanh vùng nguy cơ trượt lở đất đá tỷ lệ 1:10.000, khu vực xã Bản Xèo, huyện Bát Xát, tỉnh Lào Cai*. Đề án “Điều tra, đánh giá và phân vùng cảnh báo nguy cơ trượt lở đất đá các vùng miền núi Việt Nam”.
- [23] Yalcin, A. (2008). *GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations*. CATENA, 72(1), 1–12. doi: 10.1016/j.catena.2007.01.003.

**DEVELOPING LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPS
USING INTEGRATED AHP-WOE AND AHP-FR MODELS:
A CASE STUDY IN BAN XEO COMMUNE AREA, LAO CAI PROVINCE**

Son Van Pham¹, Hai Son Trinh², Duong Huy Nguyen¹ and Thanh Trinh^{3*}

¹ Centre for Geoinformatics, Remote Sensing Applications and Geohazards (CGRAG),
The Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources (VIGMR)

² The Viet Nam Institute of Geosciences and Mineral Resources (VIGMR)

³ Faculty of Artificial Intelligence and Data Science,
School of computing, Phenikaa University

* Email: thanh.trinh@phenikaa-uni.edu.vn

ABSTRACT

This study presents a method for evaluating and mapping landslide susceptibility in Ban Xeo commune, Lao Cai province, by applying integrated AHP-WOE and AHP-FR models. The input dataset comprises 51 landslide points and 59 landslide zones (randomly split into 70% for training and 30% for testing), along with 10 landslide conditioning factor maps. The weights of individual classes were calculated using the WOE and FR methods. Subsequently, the AHP method (with a consistency ratio $CR = 0,036$) was applied to determine the weights among the factor maps. Experimental results demonstrate that the WOE-AHP model exhibits better practical predictive capability compared to the FR-AHP model. Specifically, the WOE-AHP model allocated 13,0% of the study area to the "Very high" risk zone. Notably, on the independent testing dataset, the WOE-AHP model significantly reduced the false-negative rate (misclassifying as safe) by predicting only 5,01% of actual landslides into the "Very low" and "Low" susceptibility zones, whereas this misclassification rate for the FR-AHP model reached 22,47%. The study also quantified and revealed that natural factors, including lithological characteristics and topographic slope, play a dominant and decisive role in slope stability. Meanwhile, the road network was identified as the primary anthropogenic factor significantly contributing to local landslide triggering mechanisms. These findings provide a reliable scientific foundation to support local authorities in residential planning and the development of proactive risk mitigation strategies.

Keywords: Landslide, Analytic Hierarchy Process (AHP), Weight of Evidence (WOE), Frequency Ratio (FR), Susceptibility mapping.