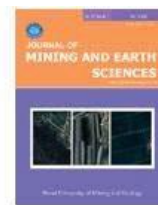




Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <https://jmes.humg.edu.vn>



Zoning debris flow risk in Than Uyen region, Lai Chau province through machine learning models



Bac Kinh Dang ^{1,*}, Huong Thanh Nguyen ¹, Huong Trong Nguyen ², Hieu Nguyen ¹,
Liem Van Ngo ¹, Bao Van Dang ³, Duc Minh Dao ⁴, Hieu Minh Nguyen ¹

¹ Faculty of Geography, VNU University of Science, Vietnam National University, Hanoi, Vietnam

² People's Committee of Muong Kim Commune, Lai Chau Province, Vietnam

³ Vietnam Quaternary - Geomorphology Association, Vietnam Geological Association, Hanoi, Vietnam

⁴ Institute of Earth Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23rd July 2025

Revised 09th Nov. 2025

Accepted 04th Dec. 2025

Keywords:

Debris flow,
GIS,
Linear regression,
Machine learning,
Remote sensing.

ABSTRACT

Debris flows are one of the most common and hazardous types of natural disasters in mountainous regions of Vietnam, particularly in the Than Uyen region, Lai Chau Province. This region is characterized by steep terrain, high rainfall, degraded vegetation cover, and weak soil structure, all of which contribute to the frequent triggering of debris flows. This study aims to assess debris flow susceptibility using Linear Regression and the Random Forest (RF) model, integrating remote sensing data, GIS, and field surveys. A total of ten input variables were selected to train the models using 422 sample points. The RF model demonstrated superior performance, achieving an accuracy of 86% and an AUC of 0.91, compared to 74% accuracy and an R^2 of 0.65 from the regression model. Given its higher reliability and practical relevance, the RF model was used to generate a debris flow susceptibility map for the entire region. Field validation conducted in Khoen On, Ta Mung, and Muong Cang communes confirmed a strong spatial agreement between high-susceptibility zones and actual debris flow events. The study recommends implementing early warning systems, continuous monitoring, and resettlement planning in high-susceptibility areas. It also emphasizes integrating the model outputs into spatial planning frameworks to enhance climate change adaptation and disaster risk reduction in mountainous areas.

Copyright © 2026 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: dangkinhbac@hus.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(1).05



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <https://tapchi.humg.edu.vn>



Phân vùng nguy cơ dòng bùn đá tại khu vực Than Uyên, tỉnh Lai Châu bằng mô hình học máy

Đặng Kinh Bắc ^{1,*}, Nguyễn Thanh Hương ¹, Nguyễn Trọng Hưởng ², Nguyễn Hiệu ¹,
Ngô Văn Liêm ¹, Đặng Văn Bào ³, Đào Minh Đức ⁴, Nguyễn Minh Hiếu ¹

¹ Khoa Địa lý, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, Việt Nam

² UBND xã Mường Kim, tỉnh Lai Châu, Việt Nam

³ Hội Đệ tứ - Địa mạo Việt Nam, Tổng hội Địa chất Việt Nam, Hà Nội, Việt Nam

⁴ Viện Các Khoa học Trái Đất, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 23/7/2025

Sửa xong 09/11/2025

Chấp nhận đăng 04/12/2025

Từ khóa:

Dòng bùn đá,

GIS,

Học máy,

Hồi quy tuyến tính,

Viễn thám.

TÓM TẮT

Dòng bùn đá là một trong những loại hình thiên tai phổ biến và nguy hiểm tại các khu vực miền núi Việt Nam, đặc biệt tại khu vực Than Uyên, tỉnh Lai Châu - nơi đặc trưng bởi địa hình dốc, lượng mưa lớn, thảm phủ suy giảm và nền đất yếu tạo điều kiện dễ kích hoạt hiện tượng dòng chảy bùn đá. Nghiên cứu này nhằm đánh giá nguy cơ dòng bùn đá thông qua mô hình hồi quy tuyến tính và Random Forest (RF), kết hợp với dữ liệu viễn thám, GIS và điều tra thực địa. Sau khi lựa chọn mười biến đầu vào, hai mô hình được huấn luyện qua 422 điểm mẫu. RF thể hiện hiệu suất vượt trội với độ chính xác 86% và AUC đạt 0,91, so với 74% và $R^2 = 0,65$ của mô hình hồi quy. Để đảm bảo độ tin cậy và tính ứng dụng thực tiễn, kết quả mô hình RF được sử dụng để xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ tại biến trên toàn khu vực. Kiểm chứng thực địa tại các xã Khoen On, Tà Mung và Mường Cang cho thấy sự trùng khớp cao giữa phân vùng nguy cơ và các điểm dòng bùn đá thực tế. Nghiên cứu khuyến nghị triển khai các hệ thống cảnh báo sớm, giám sát liên tục và lập kế hoạch di dời dân cư khỏi vùng nguy cơ cao, đồng thời lồng ghép kết quả vào quy hoạch không gian nhằm nâng cao khả năng thích ứng với biến đổi khí hậu và thiên tai vùng núi.

© 2026 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

**Tác giả liên hệ*

E - mail: dangkinhbac@hus.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(1).05

1. Mở đầu

Dòng bùn đá là một trong những hiện tượng tai biến địa chất phổ biến nhất trên thế giới, xảy ra khi khối vật chất đất, đá mất ổn định và dịch chuyển xuống dốc do tác động của lực trọng trường, thường dưới ảnh hưởng kết hợp của mưa lớn, động đất, hoặc hoạt động can thiệp của con người (Dang và nnk., 2018; Geertsema và nnk., 2009).

Hiện nay ở Việt Nam hầu hết các tác giả thống nhất rằng hiện tượng “dòng bùn đá” và “lũ bùn đá” đều có liên quan với trượt lở đất, song theo các cách tiếp cận khác nhau, trong nhiều trường hợp hai thuật ngữ này được dùng thay thế nhau. Theo cách tiếp cận địa mạo, dòng bùn đá (debris flow) là một dạng đặc biệt của trượt lở đất, được thể hiện qua ba cuốn sách kinh điển về trượt lở đất và dòng bùn đá của Varnes (1978), Jakob và Hungr (2005) và Takahashi (2014). Trong hệ thống phân loại kinh điển của Varnes (1978), trượt lở đất (landslide) được chia thành sáu nhóm chính dựa trên cơ chế và hình thái chuyển động, gồm: (1) đổ lở; (2) lật; (3) trượt; (4) lan truyền ngang; (5) trượt chảy; và (6) các chuyển động dạng dòng. Trong nhóm cuối, Varnes xác định các dòng đất, dòng bùn, dòng đá và dòng bùn đá là kiểu đặc trưng nhất của trượt lở dạng dòng. Cách tiếp cận này trở thành nền tảng cho hệ phân loại hiện đại và được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu trượt lở toàn cầu. *Dòng bùn đá* là trượt lở dạng dòng có tốc độ di chuyển rất nhanh, trong đó có trên 50% vật liệu là hạt thô (sỏi, cuội, đá tảng) bị vỡ vụn hoàn toàn, bão hòa nước và tạo thành hỗn hợp có độ nhớt cao, chuyển động như một chất lỏng đặc dưới tác động của trọng lực theo khe rãnh hẹp trên sườn núi xuống phía dưới. Dòng bùn đá với vật liệu hỗn hợp này có thể mang theo đá tảng lớn, khi di chuyển nhanh trên khe suối nhỏ thường va đập mạnh vào đất đá trên sườn và gây đào khoét mạnh đáy khe rãnh. Jakob & Hungr (2005) kế thừa hệ thống phân loại của Varnes và khẳng định rằng debris flow là một dạng chuyển động sườn dốc thuộc nhóm landslide, đặc trưng bởi sự phá vỡ hoàn toàn cấu trúc vật liệu và chuyển động dạng dòng liên tục. Trong khi đó, Takahashi (2014) tiếp cận debris flow chủ yếu từ góc độ cơ học dòng chảy trầm tích, thừa nhận nguồn gốc landslide của debris flow song nhấn mạnh rằng debris flow có hành vi thủy lực đặc trưng, cần mô tả bằng các

phương trình động lực học thay vì cơ học đất truyền thống.

Quá trình tiến hóa từ trượt lở đất đến dòng bùn đá và cuối cùng là lũ bùn đá được xem là một chuỗi liên tục của chuyển động đất - đá do trọng lực kết hợp với động lực dòng chảy. Giai đoạn đầu, *trượt lở* hình thành khi lớp vật liệu phong hóa mất ổn định và dịch chuyển như một khối trượt. Khi khối trượt này bị phá vỡ, hòa trộn với nước, chuyển sang trạng thái chảy sệt như bùn đặc và hình thành *dòng bùn đá* có vận tốc lớn trong các khe dốc. Khi dòng này chảy xuống vùng thấp hơn, lượng nước được gia tăng làm hỗn hợp loãng dần, biến thành *lũ bùn đá*, gây bồi lấp mạnh ở thung lũng. Chuỗi tai biến này phù hợp với khung lý luận quốc tế về tai biến sườn dốc, đã được ghi nhận trong nhiều sự kiện lớn ở vùng núi Việt Nam, điển hình là thảm họa lũ quét bùn đá Làng Nủ tháng 10/2024.

Theo ước tính của Ngân hàng Thế giới, hàng năm có khoảng 4,8 triệu người trên toàn cầu bị ảnh hưởng bởi dòng bùn đá, gây thiệt hại hàng tỷ USD về tài sản, cơ sở hạ tầng và sinh kế (Anh và Tứ, 2012; Zhao và Lu, 2018). Trong bối cảnh biến đổi khí hậu, các hiện tượng thời tiết cực đoan - đặc biệt là mưa lớn bất thường - diễn ra với tần suất ngày càng cao, làm gia tăng đáng kể nguy cơ dòng bùn đá tại các vùng đồi núi (Malet và Maquaire, 2012). Tại Việt Nam, dòng bùn đá là loại hình tai biến phổ biến thứ hai sau lũ quét, chủ yếu tập trung ở các tỉnh miền núi phía Bắc (An, 2023; Chu và Nguyễn, 2008). Các số liệu từ Trung tâm Dự báo Khí tượng Thủy văn quốc gia cho thấy, trong giai đoạn 2000-2020, trung bình mỗi năm có khoảng 50-100 vụ dòng bùn đá nghiêm trọng, khiến hàng trăm người thiệt mạng và bị thương, làm hư hỏng hàng ngàn hecta đất nông nghiệp, nhà ở và tuyến giao thông (Dang và nnk., 2024). Tỉnh Lai Châu là một trong những khu vực chịu ảnh hưởng nặng nề nhất do địa hình chia cắt mạnh, nền đá phong hóa yếu, mật độ mưa lớn và hoạt động khai thác đất dốc diễn ra phổ biến (Nguyen và nnk., 2022). Trong năm 2018, tại khu vực Than Uyên, tỉnh Lai Châu, đã xảy ra hiện tượng sụt lún và trượt lở đất dạng dòng nghiêm trọng tại bản Nà Phạ, xã Mường Kim, đe dọa 61 hộ dân với 228 nhân khẩu, trong đó 56 hộ nằm trong vùng nguy hiểm. Sự cố này gây ảnh hưởng đến đời sống người dân và tiềm ẩn nguy cơ đối với các công trình công cộng trong khu vực.

Trước những rủi ro ngày càng lớn, việc đánh giá và phân vùng nguy cơ dòng bùn đá trở thành nhu cầu cấp thiết phục vụ quy hoạch không gian, ứng phó thiên tai và đảm bảo an toàn dân cư. Nhiều phương pháp nghiên cứu đã được phát triển để mô hình hóa nguy cơ dòng bùn đá, có thể chia làm ba nhóm chính: phương pháp thống kê (như hồi quy logistic, hồi quy tuyến tính đa biến), phương pháp phân tích định tính (như AHP, Delphi) và các phương pháp học máy (như Random Forest, SVM, MLP, CNN) (Tran và nnk., 2024). Trong số đó, mô hình hồi quy tuyến tính vẫn được sử dụng rộng rãi do có khả năng diễn giải rõ mối quan hệ giữa các yếu tố ảnh hưởng và hiện tượng dòng bùn đá, phù hợp với các nghiên cứu địa phương có nguồn lực hạn chế. Ngược lại, các mô hình học máy - đặc biệt là Random Forest - đang ngày càng được ưa chuộng do hiệu năng cao, khả năng xử lý dữ liệu phi tuyến và đánh giá mức độ quan trọng của các biến đầu vào (Piralilou và nnk., 2019).

Tuy nhiên, vẫn còn tồn tại nhiều khoảng trống trong nghiên cứu dòng bùn đá tại Việt Nam. Thứ nhất, phần lớn các nghiên cứu vẫn thiên về ứng dụng một mô hình đơn lẻ, thiếu sự đối chiếu, so sánh hệ thống giữa các mô hình nhằm kiểm chứng độ tin cậy và tính ứng dụng thực tế. Thứ hai, việc tích hợp các nguồn dữ liệu mới như ảnh Sentinel-2, chỉ số viễn thám (NDVI, BSI, MSI...), mô hình số độ cao và điều tra thực địa chưa được khai thác đầy đủ (Tehrani và nnk., 2021). Thứ ba, nhiều nghiên cứu còn thiếu tính không gian hóa nguy cơ trên nền GIS để tạo ra các bản đồ nguy cơ trực quan phục vụ ra quyết định quản lý (Tran và nnk., 2024). Những khoảng trống này đặt ra yêu cầu cần thiết cho việc kết hợp các phương pháp hiện đại với dữ liệu đa nguồn nhằm nâng cao chất lượng đánh giá và dự báo dòng bùn đá.

Xuất phát từ thực tiễn đó, nghiên cứu này lựa chọn khu vực Than Uyên - nơi có điều kiện tự nhiên phức tạp, nhiều điểm dòng bùn đá được ghi nhận thực tế - làm khu vực nghiên cứu để thực hiện đánh giá và phân vùng nguy cơ dòng bùn đá. Bằng cách ứng dụng đồng thời hai mô hình phổ biến là hồi quy tuyến tính và Random Forest, nghiên cứu này hướng đến việc đánh giá hiệu suất dự báo ở các mức độ khác nhau tại vùng núi Việt Nam. Kết quả phân tích chạy các mô hình được tích hợp với số liệu thực tế để xác định chính xác những vấn đề tồn tại. Việc so sánh kết quả từ hai

mô hình không chỉ giúp nâng cao tính khách quan trong phân vùng nguy cơ, mà còn góp phần để đánh giá chính xác các vấn đề tồn tại của hai mô hình với thực tế, hướng đến mục tiêu quản lý rủi ro thiên tai bền vững, thích ứng với biến đổi khí hậu. Mục tiêu của bài báo là: (1) tích hợp dữ liệu viễn thám, GIS và điều tra thực địa để xây dựng cơ sở dữ liệu không gian về các yếu tố nguy cơ dòng bùn đá; (2) xây dựng và hiệu chỉnh hai mô hình hồi quy tuyến tính và Random Forest nhằm đánh giá khả năng dự báo nguy cơ dòng bùn đá; (3) so sánh hiệu năng và mức độ giải thích của hai mô hình; và (4) thành lập bản đồ phân vùng nguy cơ dòng bùn đá tại Than Uyên, phục vụ công tác quản lý rủi ro thiên tai và quy hoạch phát triển vùng núi.

2. Phạm vi và phương pháp nghiên cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu

Khu vực Than Uyên là một đơn vị hành chính nằm ở phía Đông Nam tỉnh Lai Châu, thuộc vùng núi Tây Bắc Việt Nam. Khu vực này có tọa độ địa lý từ 21°58' đến 22°16' vĩ độ Bắc và từ 103°35' đến 104°00' kinh độ Đông. Tổng diện tích tự nhiên của khu vực khoảng 79.926,8 ha, bao gồm 12 đơn vị hành chính cấp xã, trong đó địa hình chủ yếu là núi cao, chia cắt mạnh và có độ dốc lớn. Than Uyên tiếp giáp với khu vực Tân Uyên (phía Tây), khu vực Mường La - tỉnh Sơn La (phía Đông Nam), khu vực Văn Bàn - tỉnh Lào Cai (phía Bắc) và khu vực Sìn Hồ (phía Tây Bắc). Với vị trí chuyển tiếp giữa cao nguyên đá vôi Lai Châu và thung lũng sông Đà, Than Uyên là khu vực có đặc điểm địa chất - địa hình đa dạng, đồng thời là vùng có hoạt động địa động lực mạnh.

Địa hình Than Uyên bị chia cắt mạnh bởi các dãy núi và sườn dốc lớn, với độ cao trung bình từ 400 đến trên 1.500 m so với mực nước biển. Các dãy núi chạy theo hướng Tây Bắc - Đông Nam, xen kẽ với thung lũng hẹp và khe sâu tạo điều kiện thuận lợi cho sự phát triển của mạng lưới sông suối. Hệ thống sông Nậm Mu, một nhánh của sông Đà, đóng vai trò là trục thủy văn chính, chảy qua nhiều xã trung tâm của khu vực như Mường Kim, Mường Cang và Tà Mung. Đây cũng là khu vực có mật độ mưa lớn, trung bình khoảng 2.000÷2.500 mm/năm, tập trung chủ yếu trong mùa mưa từ tháng 5 đến tháng 10 (Hung và nnk., 2015). Các đợt mưa lớn kéo dài thường gây ra hiện tượng trượt lở đất dạng dòng, đứt gãy đường giao thông

và đe dọa đến an toàn khu dân cư vùng chân núi. Về địa chất, khu vực Than Uyên nằm trong đới cấu trúc Sông Hồng - Sông Chảy, bao gồm các đá trầm tích, đá biến chất và đá magma với mức độ phong hóa cao (Vũ và nnk., 2017). Đặc biệt, khu vực này có nhiều thành tạo đá phiến sét, đá phiến mica và đá granite bị phong hóa, dễ mất ổn định khi ngấm nước. Hiện tượng hoạt động kiến tạo, đứt gãy địa chất và hiện tượng dòng bùn đá nhỏ diễn ra thường xuyên trong mùa mưa, nhất là ở các khu vực có độ dốc trên 25° , lớp phủ thực vật nghèo nàn hoặc bị phá rừng.

Về mặt xã hội, dân cư Than Uyên chủ yếu là đồng bào dân tộc thiểu số như Thái, Mông, Khơ Mú, sinh sống rải rác tại các bản làng vùng đồi núi (Schmitter và nnk., 2010). Hoạt động sản xuất nông nghiệp theo phương thức canh tác nương rẫy, làm ruộng bậc thang, kết hợp khai thác lâm sản là phổ biến, dẫn đến hiện tượng xâm lấn đất dốc, làm suy giảm thảm thực vật và làm tăng nguy cơ dòng bùn đá. Nhiều tuyến đường liên xã, liên bản, đặc biệt là đường tỉnh lộ 106 và 129, đi qua các vùng sườn dốc, tiềm ẩn nguy cơ cao về mất an toàn giao thông do xuất hiện các dòng bùn đá vào mùa mưa. Với sự hội tụ của các điều kiện tự nhiên bất lợi, hoạt động nhân sinh mạnh mẽ và biến đổi khí hậu ngày càng rõ nét, Than Uyên là địa bàn có tần suất dòng bùn đá cao, cần được nghiên cứu sâu nhằm xác định các vùng có nguy cơ và đề xuất giải

pháp quản lý hiệu quả trong bối cảnh phát triển bền vững vùng núi Tây Bắc.

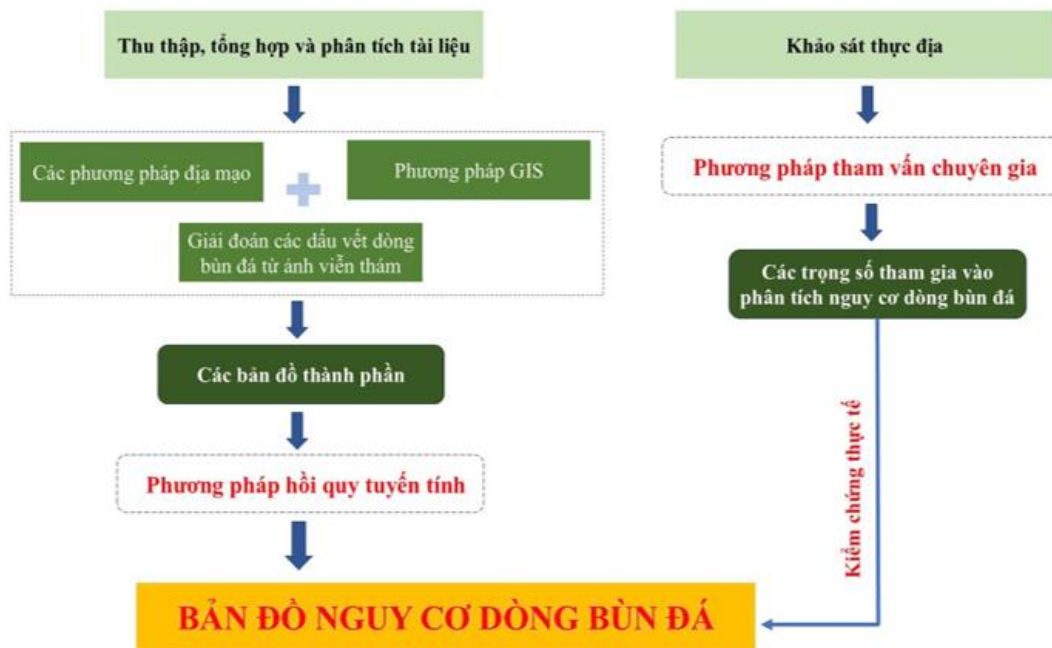
2.2. Quy trình và phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Quy trình nghiên cứu

Quy trình nghiên cứu được xây dựng theo ba giai đoạn chính nhằm đảm bảo tính hệ thống, từ thu thập dữ liệu đến phân tích mô hình và không gian hóa kết quả (Hình 1). Giai đoạn đầu tiên là thu thập và xử lý dữ liệu đầu vào, bao gồm ảnh vệ tinh Sentinel-2, mô hình số độ cao (DEM ALOS PALSAR), các bản đồ địa hình, thủy văn, lớp phủ thực vật, cùng với dữ liệu điều tra hiện trường và phỏng vấn người dân tại các điểm dòng bùn đá đã xảy ra. Các chỉ số viễn thám như NDVI, BSI, SAVI, MSI, NDBI được tính toán nhằm phản ánh đặc trưng bề mặt.

Giai đoạn thứ hai là xây dựng và huấn luyện mô hình. Hai mô hình được áp dụng song song là hồi quy tuyến tính và Random Forest. Các biến đầu vào được lựa chọn thông qua phân tích thống kê và đánh giá tương quan, sau đó đưa vào mô hình để tính xác suất nguy cơ dòng bùn đá.

Giai đoạn cuối cùng là tích hợp kết quả mô hình vào hệ thống GIS để xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ dòng bùn đá theo năm cấp độ, phục vụ mục tiêu phân tích không gian và hỗ trợ quản lý rủi ro thiên tai.



Hình 1. Sơ đồ quy trình nghiên cứu.

Song song với dữ liệu viễn thám, mô hình số độ cao (DEM) ALOS PALSAR (JAXA, 2008) với độ phân giải 12,5 m được sử dụng để tính toán các chỉ số địa hình như độ cao, độ dốc, hướng dốc và độ lồi lõm địa hình (terrain roughness). Bên cạnh đó, các lớp dữ liệu bổ sung như bản đồ sông suối, mạng lưới đường giao thông, khu dân cư và hiện trạng sử dụng đất được thu thập từ Sở Tài nguyên và Môi trường tỉnh Lai Châu.

Dữ liệu thực địa đóng vai trò quan trọng trong việc xây dựng bộ dữ liệu chuẩn hóa cho mô hình. Nhóm nghiên cứu đã thu thập 211 điểm dòng bùn đá trong các năm 2018-2024 trên địa bàn tỉnh Lai Châu, xác định chính xác vị trí và đặc điểm dòng bùn đá thông qua dữ liệu ảnh vệ tinh, thực địa kiểm chứng bằng UAV và GPS cầm tay. Ngoài ra, 211 điểm không bị dòng bùn đá (đối chứng) được lựa chọn ngẫu nhiên tại các khu vực có điều kiện tương tự nhưng ổn định về địa hình, để phục vụ huấn luyện mô hình phân loại hai trạng thái (xuất hiện và không xuất hiện dòng bùn đá). Tập dữ liệu huấn luyện gồm 422 điểm này được chuyển thành lớp điểm không gian có gắn nhãn nhị phân (0-1) để sử dụng cho các mô hình phân tích.

2.2.2. Lựa chọn biến và phân tích tương quan

Tập dữ liệu ban đầu bao gồm 16 biến độc lập liên quan đến yếu tố địa hình, lớp phủ bề mặt, thủy văn và hạ tầng. Các biến này bao gồm: độ dốc, độ cao tuyệt đối, chia cắt sâu, vỏ phong hóa, thành phần địa chất, mật độ đứt gãy, khoảng cách đứt gãy, mật độ sông suối, lượng mưa trung bình, độ ẩm bề mặt (MSI), độ che phủ thực vật (NDVI), chỉ số đất trống (BSI), chỉ số thảm thực vật hiệu chỉnh ảnh hưởng đất trống (SAVI), chỉ số xây dựng (NDBI) và chỉ số tổn thương tổng hợp (CIT_Index) (Hình 2). Việc lựa chọn các biến không chỉ dựa vào kinh nghiệm chuyên gia và tài liệu tiền cứu, mà còn thông qua phân tích thống kê, kiểm định tương quan giữa các biến và mức độ phân biệt xảy ra - không xảy ra dòng bùn đá (Bảng 1).

Để đảm bảo tính hợp lý của mô hình và tránh hiện tượng đa cộng tuyến, nhóm nghiên cứu sử dụng phân tích tương quan hệ số Pearson và kỹ thuật lựa chọn biến từng bước (stepwise selection) dựa trên chỉ số AIC (Akaike Information Criterion) (Zhou và nnk., 2025). Các biến có hệ số tương quan cao ($|r| > 0.7$) hoặc không có ý nghĩa thống kê ($p > 0.05$) bị loại bỏ khỏi mô hình. Kết quả cuối cùng chọn ra 10 biến có ảnh hưởng rõ rệt đến

nguy cơ dòng bùn đá, được sử dụng làm biến đầu vào cho cả hai mô hình hồi quy tuyến tính và Random Forest.

2.2.3. Mô hình hồi quy tuyến tính (Linear Regression - LR)

Hồi quy tuyến tính được áp dụng để xác định mối quan hệ giữa các biến độc lập và xác suất xảy ra dòng bùn đá. Mô hình có dạng tổng quát:

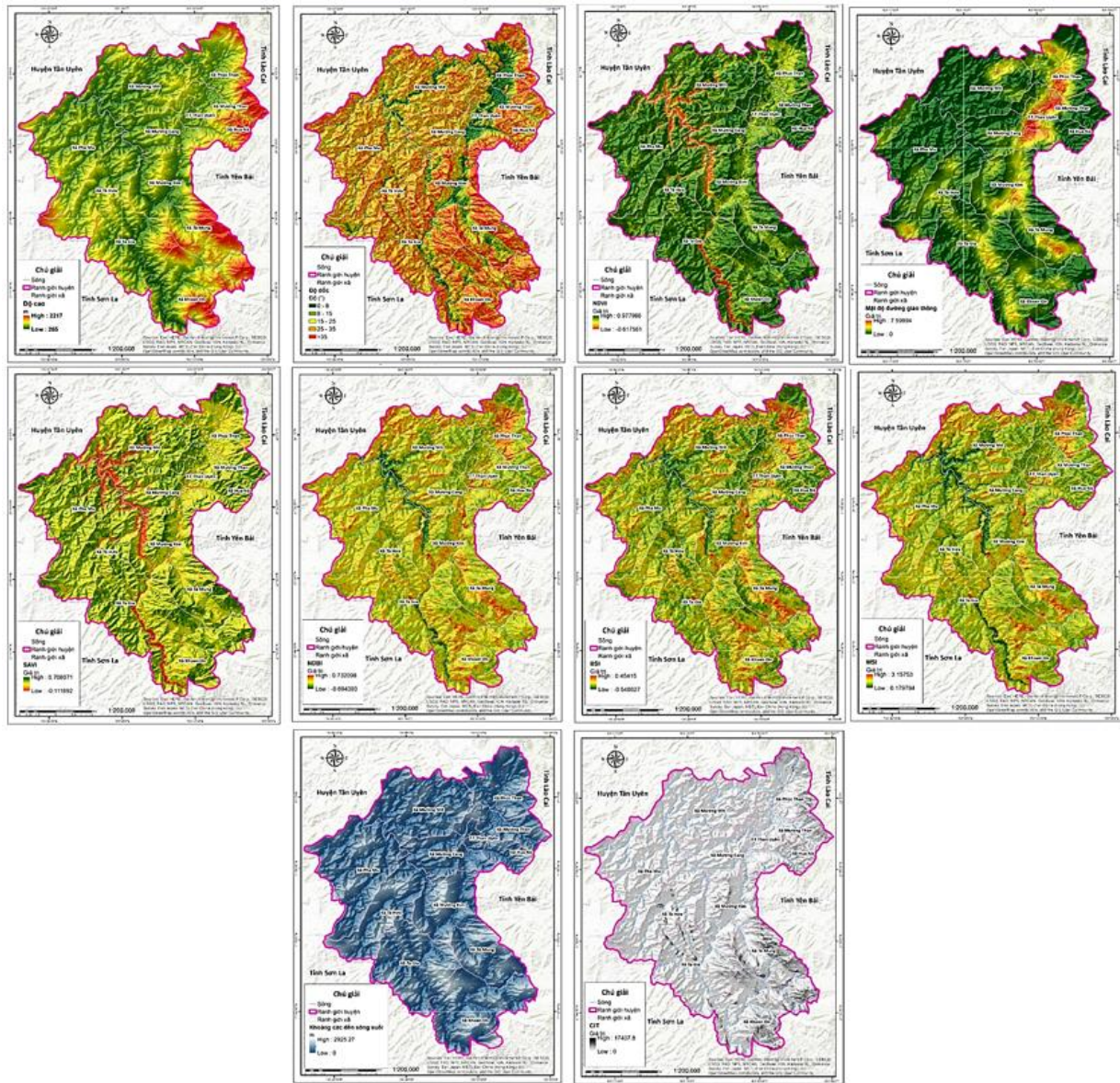
$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (1)$$

Trong đó: Y - xác suất xảy ra dòng bùn đá (giá trị thực tế từ 0 đến 1); X_i - các biến đầu vào như độ dốc NDVI, BSI, khoảng cách đến sông suối, v.v...; β_i - hệ số hồi quy thể hiện mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố. Mô hình được xây dựng và kiểm định bằng phần mềm R, với các chỉ số đánh giá gồm R^2 , hệ số ý nghĩa p-value và phân tích phần dư (residuals) nhằm kiểm tra độ phù hợp.

2.2.4. Mô hình Random Forest (RF)

Mô hình Random Forest (RF) được lựa chọn làm phương pháp học máy để đối chiếu với kết quả thu được từ mô hình hồi quy tuyến tính. RF là một thuật toán học tổ hợp mạnh mẽ, hoạt động bằng cách xây dựng nhiều cây quyết định dựa trên các tập dữ liệu con được tạo ngẫu nhiên, sau đó kết hợp kết quả dự báo của từng cây thông qua cơ chế biểu quyết theo đa số (Lary và nnk., 2016). Ưu điểm nổi bật của RF là khả năng xử lý tốt các mối quan hệ phi tuyến giữa các biến, giảm thiểu hiện tượng quá khớp (overfitting), đồng thời cung cấp chỉ số phản ánh tầm quan trọng của từng biến đầu vào trong mô hình.

Mô hình được thực hiện trên nền tảng R với gói randomForest, sử dụng quy trình huấn luyện chéo và chia tập dữ liệu thành 70% huấn luyện - 30% kiểm định. Các chỉ số đánh giá hiệu suất gồm: độ chính xác (Accuracy), chỉ số ROC-AUC, Precision, Recall và F1-score (Doan và nnk., 2024). Quá trình huấn luyện được thực hiện bằng gói randomForest trong phần mềm R, với số lượng cây trong rừng là 500 nhằm đảm bảo tính ổn định của kết quả. Các tham số như độ sâu tối đa của cây và số lượng biến được lựa chọn tại mỗi nút phân tách được tinh chỉnh thông qua phương pháp kiểm thử chéo. Mô hình RF cũng cung cấp thước đo mức độ quan trọng của từng biến, giúp nhận diện các yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất đến nguy cơ dòng bùn đá.



Hình 2. Sơ đồ các chỉ số được lựa chọn trong đánh giá dòng bùn đá.

Bảng 1. Bảng đánh giá tương quan giữa các chỉ số với khả năng xảy ra dòng bùn đá.

Chỉ số	Trọng số	Sai số chuẩn	Giá trị T	Pr(> t)	Độ tin cậy
Hệ số chặn	2.2e-1	5.1e-2	4.4	1e-5	***
Độ cao	2e-4	9e-6	22.8	< 2e-16	***
Độ dốc	1.5e-2	4.3e-4	34.6	< 2e-16	***
Khoảng cách tới sông suối	-4.7e-5	4.6e-6	-10.3	< 2e-16	***
Mật độ giao thông	-5.5e-2	7.6e-3	-7.2	4.1e-13	***
CIT	-1e-4	1e-5	-9.9	< 2e-16	***
NDVI	-7.2e-1	4.2e-2	-16.8	< 2e-16	***
NDBI	-3.8e+0	1.6e-1	-23	< 2e-16	***
BSI	5.5e+0	1.7e-1	31.9	< 2e-16	***
SAVI	1.5e+0	5.7e-2	27.4	< 2e-16	***
MSI	-4.2e-1	4.6e-2	-9	< 2e-16	***

Ký hiệu độ tin cậy: 0 - '***'; 0.001 - '**'; 0.01 - '*'; 0.05 - '.'; 0.1 - ' '; 1

2.2.5. Tích hợp mô hình vào GIS và thành lập bản đồ nguy cơ

Sau khi xây dựng và hiệu chỉnh hai mô hình LR và RF, các kết quả xác suất được tích hợp vào hệ thống GIS để xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ dòng bùn đá. Kết quả được phân loại theo năm cấp độ: rất thấp, thấp, trung bình, cao và rất cao, dựa trên phương pháp phân lớp tự động (natural breaks). Các bản đồ này được so sánh và phân tích trực quan nhằm xác định vùng có nguy cơ cao, phục vụ quản lý đất đai, quy hoạch hạ tầng và ứng phó thiên tai tại địa phương.

Các bước trên được thực hiện trên phần mềm R và GIS nhằm đảm bảo tính chính xác và khả năng không gian hóa kết quả. Dữ liệu viễn thám (Sentinel-2) được tải và tiền xử lý trên Google Earth Engine, sau đó trích xuất các chỉ số NDVI, SAVI, BSI, MSI, NDBI. Dữ liệu địa hình (DEM ALOS PALSAR) được xử lý trong ArcGIS/QGIS để tính độ cao, độ dốc, hướng dốc và độ gồ ghề địa hình. Các lớp dữ liệu khác như sông suối, đường giao thông, dân cư và sử dụng đất được số hóa, chuẩn hóa hệ tọa độ và chồng lớp để tạo bộ dữ liệu không gian thống nhất.

Trên R, dữ liệu huấn luyện gồm 422 điểm được nhập từ shapefile qua gói sf và sp, tính toán tương quan Pearson, loại bỏ biến đa cộng tuyến, sau đó huấn luyện mô hình Linear Regression và Random Forest. Kết quả xác suất nguy cơ được xuất dạng raster, chuyển về GIS để phân loại theo 5 cấp độ và xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ dòng bùn đá.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đánh giá hiệu suất xử lý mô hình dự báo

Hai mô hình được phát triển song song nhằm đánh giá khả năng dự báo nguy cơ dòng bùn đá trên địa bàn khu vực Than Uyên, bao gồm hồi quy tuyến tính (LR) và Random Forest (RF). Cả hai mô hình đều sử dụng chung tập dữ liệu đầu vào. Mô hình hồi quy tuyến tính sau khi hiệu chỉnh bằng phương pháp chọn biến từng bước và loại bỏ lỗi đa cộng tuyến, cho thấy 10 biến có ý nghĩa thống kê cao nhất gồm: độ cao tuyệt đối, độ dốc, khoảng cách đến sông suối, mật độ giao thông, NDVI, NDBI, BSI, SAVI, MSI và CIT. Trong đó, độ dốc và BSI có hệ số hồi quy dương, tức là khi độ dốc và

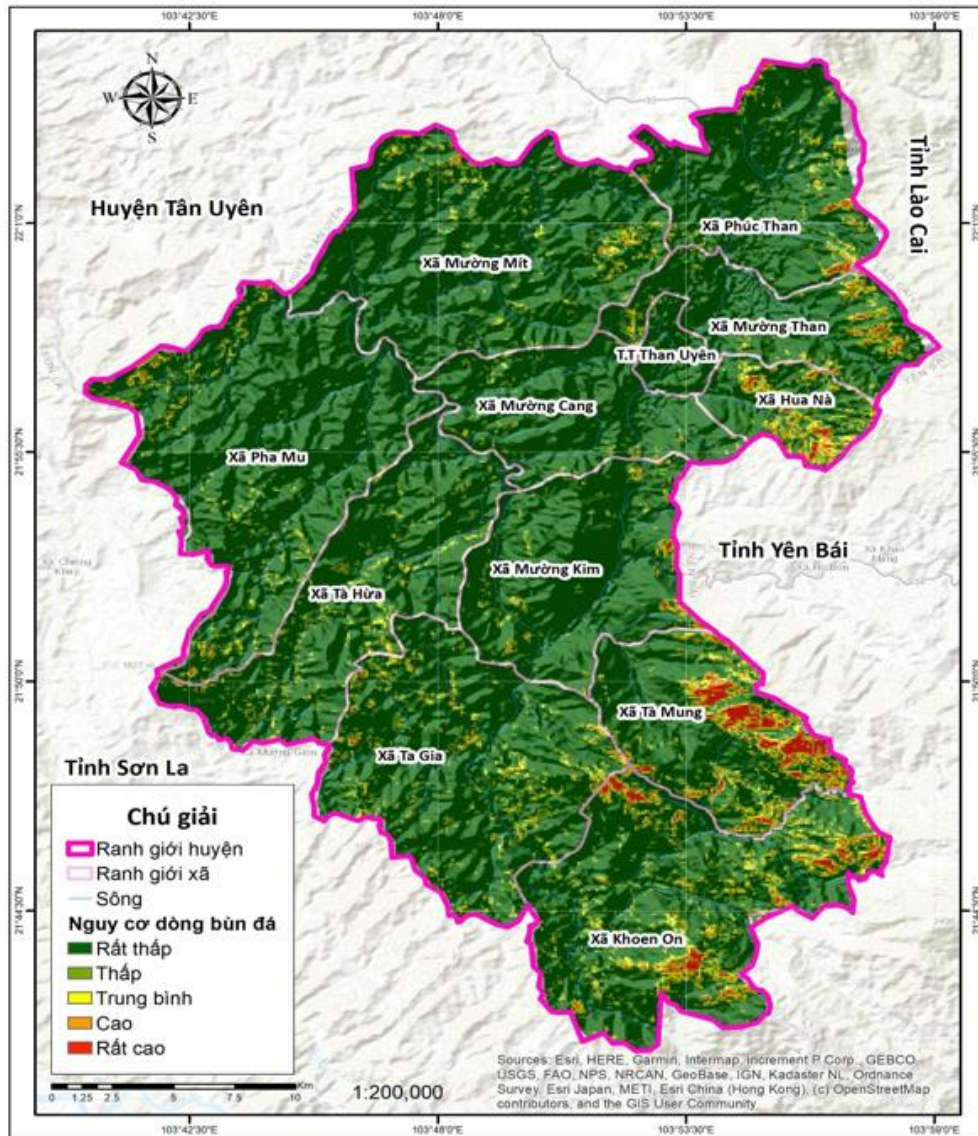
mức độ đất trống tăng, nguy cơ dòng bùn đá cũng tăng. Ngược lại, NDVI có hệ số âm, phản ánh vai trò bảo vệ của thảm thực vật. Mô hình LR đạt hệ số xác định $R^2 = 0,50$ và độ chính xác phân loại (accuracy) đạt 57% khi áp dụng kiểm định chéo trên tập kiểm tra.

Trong khi đó, mô hình Random Forest thể hiện hiệu năng vượt trội ở nhiều chỉ tiêu. Sau quá trình huấn luyện với 500 cây quyết định và tối ưu hóa các tham số bằng kiểm thử chéo, RF đạt độ chính xác lên tới 86%, F1-score đạt 0,84 và AUC (diện tích dưới đường cong ROC) đạt 0,91. Các biến có tầm quan trọng cao nhất trong RF bao gồm: độ dốc, lượng mưa, NDVI, khoảng cách đến đường và BSI - gần tương đồng với mô hình LR, nhưng có mức độ phân biệt rõ ràng hơn giữa các nhóm dòng bùn đá và không dòng bùn đá.

So sánh giữa hai mô hình cho thấy: (i) mô hình LR có ưu điểm là khả năng giải thích rõ ràng, giúp hiểu được vai trò định lượng của từng yếu tố, phù hợp cho việc truyền thông rủi ro và ra quyết định ở cấp địa phương; (ii) mô hình RF có hiệu năng phân loại tốt hơn, thích hợp cho việc xây dựng bản đồ cảnh báo và phân vùng nguy cơ. Vì vậy, trong khi LR cung cấp nền tảng diễn giải khoa học, thì RF đóng vai trò thực dụng hơn trong quản lý rủi ro thiên tai, đặc biệt ở các khu vực miền núi có điều kiện phức tạp như Than Uyên.

3.2. Bản đồ nguy cơ dòng bùn đá khu vực Than Uyên

Sau khi xác định được các biến độc lập có ý nghĩa thống kê, nhóm nghiên cứu đã áp dụng mô hình RF để tính toán giá trị nguy cơ dòng bùn đá trên toàn bộ địa bàn khu vực Than Uyên (Hình 3). Các lớp dữ liệu không gian được chuẩn hóa và chồng xếp theo công thức hồi quy đã thiết lập, với hệ số hồi quy của từng biến đóng vai trò là trọng số thể hiện mức độ ảnh hưởng. Kết quả được thể hiện dưới dạng bản đồ, phân vùng toàn khu vực theo năm mức độ nguy cơ: rất thấp, thấp, trung bình, cao và rất cao. Dựa trên bản đồ nguy cơ này, nghiên cứu tiếp tục chồng ghép với các lớp dữ liệu sử dụng đất, dân cư và hệ thống hạ tầng giao thông nhằm lượng hóa mức độ ảnh hưởng của hiện tượng dòng bùn đá đến các yếu tố kinh tế - xã hội và môi trường. Kết quả phân tích cho thấy phần lớn khu dân cư, đất sản xuất và hạ tầng đều nằm trong các vùng có nguy cơ thấp đến trung bình.



Hình 3. Bản đồ đánh giá nguy cơ dòng bùn đá.

Cụ thể, có tới 1.097,4 ha đất khu dân cư nằm trong vùng nguy cơ rất thấp, tương ứng với gần 39.000 ngôi nhà và khoảng 654.750 người. Trong khi đó, diện tích và dân số giảm dần theo mức độ nguy cơ tăng, cho thấy phần lớn các điểm dân cư đã được quy hoạch tại các vùng tương đối an toàn.

Tuy nhiên, đáng chú ý là vẫn tồn tại những cụm dân cư nằm trong vùng nguy cơ cao và rất cao, đặc biệt tại các xã như Tà Mung, Khoen On, Mường Kim và Tà Gia. Dù chỉ chiếm khoảng 12 ha đất khu dân cư, các vùng này vẫn có hơn 300 ngôi nhà với khoảng 320 người sinh sống, đối mặt với nguy cơ trực tiếp đến an toàn tính mạng và tài sản nếu xảy ra dòng bùn đá quy mô lớn. Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết trong việc tái định cư có chọn

lọc và đầu tư hạ tầng phòng tránh thiên tai cho các khu vực này. Về hệ thống giao thông, mặc dù phần lớn chiều dài đường (619,3 km) nằm trong vùng nguy cơ rất thấp, vẫn có tới 105,8 km đường bị ảnh hưởng trong vùng từ trung bình trở lên, trong đó gần 29 km thuộc vùng nguy cơ cao và rất cao. Các đoạn đường có nguy cơ lớn thường đi qua các địa hình dốc, đất yếu hoặc ven sườn núi - dễ bị cô lập trong mùa mưa lũ. Một số xã như Tà Mung, Tà Gia, Khoen On và Tà Hừa có tuyến tính lộ và đường liên xã đi qua vùng có màu đỏ và cam trên bản đồ, phản ánh nguy cơ thực tế tại địa phương. Việc tăng cường gia cố nền đường, xây dựng hệ thống thoát nước và thiết lập cảnh báo sớm được xem là biện

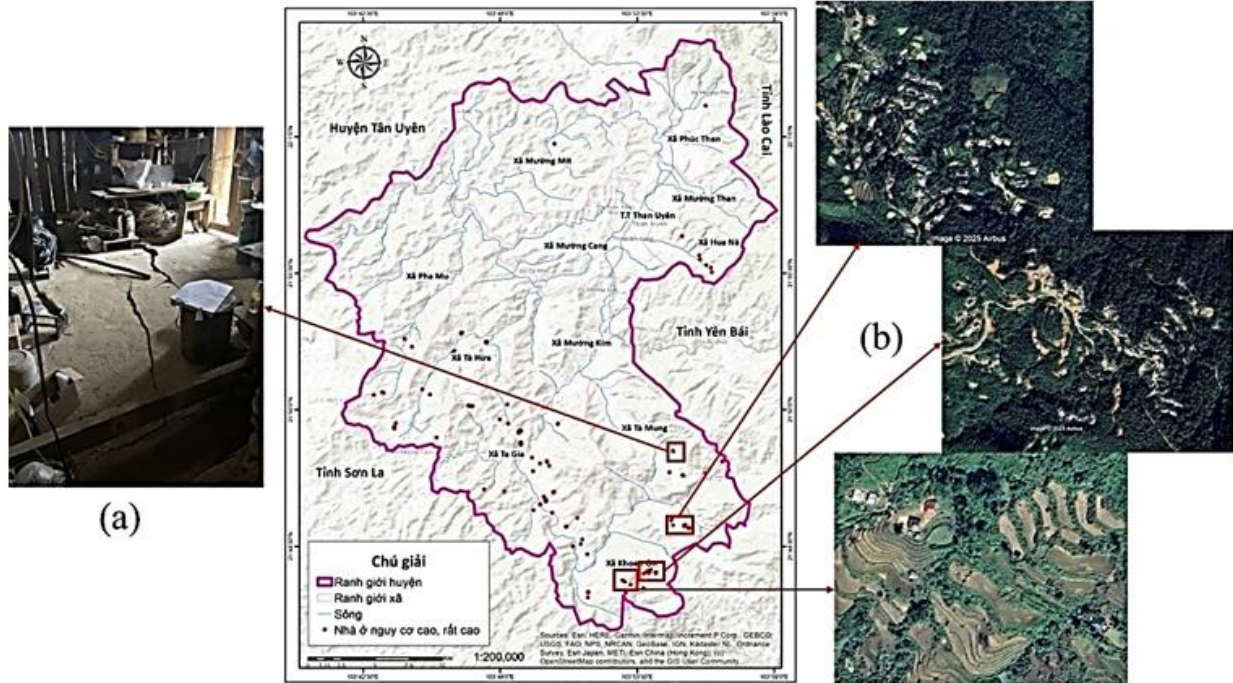
pháp cần ưu tiên trong bối cảnh thiên tai ngày càng bất thường.

Ngoài ra, dòng bùn đá cũng gây tác động lớn đến tài nguyên rừng và sản xuất nông nghiệp. Tổng diện tích rừng trong vùng nghiên cứu là hơn 41.000 ha, trong đó phần lớn (83,1%) nằm trong vùng nguy cơ rất thấp (Hình 4 và Bảng 2). Tuy vậy, vẫn có hơn 3.000 ha rừng thuộc vùng nguy cơ trung bình trở lên, tập trung tại các xã có địa hình hiểm trở như Tà Gia, Khoen Ôn và Tà Mung - nơi từng có hoạt động khai thác rừng hoặc canh tác nương rẫy. Những khu vực này dễ xuất hiện dòng bùn đá, xói mòn và suy giảm chức năng phòng hộ, nhất là trong điều kiện mưa cực đoan ngày càng gia tăng do biến đổi khí hậu.

Về đất nông nghiệp, khoảng 800 ha diện tích sản xuất cũng nằm trong các vùng nguy cơ từ

trung bình đến rất cao. Đây là các khu canh tác ven đồi, chân núi hoặc vùng sườn dốc - nơi có nguy cơ bị vùi lấp hoặc xói trôi khi dòng bùn đá xảy ra. Tình trạng này không chỉ ảnh hưởng trực tiếp đến sinh kế của người dân, mà còn làm gia tăng tính tổn thương của hệ thống nông nghiệp địa phương trong mùa mưa lũ. Kết quả phân tích không gian đã cung cấp một bức tranh toàn diện về mức độ dễ bị tổn thương do dòng bùn đá tại Than Uyên. Bản đồ nguy cơ và bảng thống kê các yếu tố bị ảnh hưởng trở thành công cụ quan trọng phục vụ quy hoạch không gian, bố trí dân cư, bảo vệ hạ tầng và xây dựng chiến lược thích ứng thiên tai cho địa phương trong tương lai.

3.3. Kiểm chứng kết quả tại các khu vực trọng điểm



Hình 4. Khu vực nhà ở nằm trong vùng nguy cơ dòng bùn đá cao, rất cao (ảnh thực địa 3/2025 tại xã Tà Mung (a), ảnh vệ tinh trích xuất từ Google Earth ngày 17/11/2023 (b)).

Bảng 2. Kết quả phân tích không gian các đối tượng sử dụng đất theo nguy cơ dòng bùn đá.

Mức độ nguy cơ	Khu dân cư (ha)	Số nhà	Ước tính số người	Đất nông nghiệp (ha)	Rừng (ha)	Đường giao thông (km)
Rất thấp	1097	38.963	654.750	13.685	34.619	619
Thấp	104	3.348	1.460	1.793	4.035	136
Trung bình	45	1.497	600	657	1.854	75
Cao	9	255	320	122	834	23
Rất cao	2	60	0	11	316	5

Tại khu vực Than Uyên, tỉnh Lai Châu, 3 địa điểm đã được nhóm nghiên cứu ghi nhận dấu hiệu mất ổn định nghiêm trọng, phản ánh rõ nguy cơ dòng bùn đá. Những dấu hiệu ban đầu như nhà nghiêng, nứt nền và biến dạng kết cấu công trình thường xuất hiện trước khi xảy ra dòng bùn đá thực sự. Cụ thể như sau:

3.3.1. Tiềm ẩn dòng bùn đá tại xã Khoen On

Tại Khoen On, hiện tượng mất ổn định được thể hiện rõ qua ba cung nứt lớn dài khoảng 230 m, cao từ 50 cm đến 3 m, phân bố theo bậc, phản ánh cấu trúc địa hình phức tạp. Các vết nứt này là biểu hiện của áp lực nội tại và sự dịch chuyển đất đá ngầm. Dưới chân vạt dòng bùn đá có khoảng 20 hộ

dân sinh sống, nằm trong vùng nguy cơ cao, đặc biệt trong mùa mưa khi nền đất dễ bão hòa nước (Hình 5). Khảo sát tại Khoen On cũng cho thấy sự tồn tại của một vết dòng bùn đá cổ dạng hình chum, kéo dài - dấu tích của hiện tượng dòng bùn đá trong quá khứ. Dạng địa hình này cho thấy vùng đất nền có sự phân bố ứng suất không đều, dễ tái kích hoạt nếu gặp điều kiện thuận lợi như mưa lớn hoặc tác động nhân sinh. Mặc dù khu vực có lớp thực bì khá phát triển, việc tồn tại khe nước ngầm và độ ẩm đất cao lại làm tăng nguy cơ dòng bùn đá khi đất trở nên bão hòa. Trên thực địa, còn ghi nhận các dòng bùn đá - hỗn hợp nước mưa và vật liệu rời - xuất hiện sau mưa lớn, có tốc độ di chuyển nhanh và sức phá hủy lớn (Hình 6).



Hình 5. Dòng bùn đá - dòng bùn đá tại xã Khoen On, khu vực Than Uyên, tỉnh Lai Châu.



Hình 6. Rãnh xói và vách dòng bùn đá tại xã Khoen On, khu vực Than Uyên, tỉnh Lai Châu.

Trước thực trạng này, chính quyền đã đề xuất di dời các hộ dân trong vùng nguy cơ cao, nhằm giảm thiểu rủi ro về người và tài sản. Sự kiện mưa lũ năm 2019 là minh chứng rõ rệt: xã Khoen On cùng các địa bàn lân cận đã xảy ra hàng loạt dòng bùn đá, khiến 2 người chết, 3 người bị thương, 25 hộ bị ảnh hưởng và hệ thống giao thông như quốc lộ 279D và 32 bị các trận trượt lở dạng dòng gây hậu quả nghiêm trọng. Việc lưu thông gián đoạn, cứu hộ khó khăn cho thấy cấp thiết phải có hệ thống cảnh báo sớm và phương án ứng phó phù hợp.

Bên cạnh những dấu hiệu mất ổn định địa chất đã ghi nhận tại khu vực Khoen On, báo cáo khẩn cấp của UBND khu vực Than Uyên vào tháng 6/2025 đã có thêm nhiều các minh chứng cụ thể về mức độ nguy hiểm và phạm vi ảnh hưởng của hiện tượng dòng bùn đá. Theo đó, tại bản Đốc - cách khu vực xuất hiện các dòng bùn đá dài khoảng 380 m - đã xuất hiện hệ thống cung nứt và sụt lún lớn, dài khoảng 230 m, sâu từ 0,5÷3 m, trùng với kết quả khảo sát thực địa. Diễn biến này xảy ra trong đợt mưa kéo dài từ ngày 8 đến 20/5/2025, đe dọa trực tiếp đến 49 hộ dân, đặc biệt là 20 hộ nằm sát cung dòng chảy sinh trượt, cùng một số công trình công cộng như nhà văn hóa và trường mầm non. Với 75 hộ, 387 nhân khẩu chủ

yếu là người Thái và Kơ Mú, bản Đốc được xác định có tính nhạy cảm cao với dòng bùn đá, do địa hình - thổ nhưỡng phức tạp và có tiền sử dòng bùn đá từ năm 2024. Trước tình hình đó, chính quyền địa phương đã đề xuất công bố tình huống khẩn cấp và thực hiện di dời khẩn cấp các hộ có nguy cơ cao, đồng thời tăng cường tuyên truyền và kiến nghị hỗ trợ tái định cư. Những thông tin này góp phần củng cố nhận định về nguy cơ dòng bùn đá rất cao tại Khoen On, đặc biệt là bản Đốc và là cơ sở quan trọng trong công tác cảnh báo và quản lý rủi ro thiên tai tại địa phương.

3.3.2. Tiềm ẩn dòng bùn đá tại xã Tà Mung

Tại xã Tà Mung, dòng bùn đá xuất hiện dưới dạng các vết kéo dài từ đỉnh xuống chân dòng chảy chính, kèm theo đó là các vết nứt song song theo sườn dốc. Hiện tượng này xuất phát từ quá trình đất đá bão hòa nước, dẫn đến mất liên kết nội tại và di chuyển vật liệu hỗn độn theo chiều dốc (Hình 7). Sau mỗi trận dòng bùn đá, khả năng tiếp cận khu vực bị ảnh hưởng bị gián đoạn nghiêm trọng do đường giao thông bị phá hủy, nước lũ dâng và khối đất đá hỗn độn chắn đường. Lực lượng cứu hộ gặp khó khăn, chính quyền buộc phải sơ tán khẩn cấp hơn chục hộ dân.



Hình 7. Dấu vết nứt đất cho thấy vật liệu đang di chuyển, có nguy cơ gây dòng bùn đá và nứt nhà dân tại xã Tà Mung, khu vực Than Uyên, tỉnh Lai Châu.

Biện pháp kỹ thuật tạm thời như đắp đất, kè mái dốc và đổ bê tông đã được triển khai để phục hồi giao thông. Tuy nhiên, thực địa vẫn ghi nhận các vết nứt thứ cấp - dấu hiệu cho thấy nền địa chất vẫn đang trong trạng thái bất ổn. Địa hình xã Tà Mung được cấu tạo bởi hai sườn dốc hình chữ V với một dòng suối cắt qua đáy thung lũng. Dòng nước này gây xói mòn chân dốc, làm giảm độ ổn định của sườn núi, đặc biệt trong điều kiện mưa kéo dài. Dòng bùn đá tại đây thường diễn biến theo hiệu ứng dây chuyền, một khối đất mất ổn định có thể kéo theo các khối liền kề, mở rộng quy mô sự cố.

Các yếu tố như cấu trúc địa chất không đồng nhất, khe nứt, mạch nước ngầm cũng góp phần tạo điều kiện cho các dòng bùn đá xảy ra liên hoàn. Việc giám sát liên tục, lắp đặt cảnh báo sớm và đánh giá ổn định địa hình là những bước bắt buộc để giảm rủi ro xảy ra dòng bùn đá, nhất là trong bối cảnh thời tiết cực đoan ngày càng gia tăng do biến đổi khí hậu.

3.3.3. Tiềm ẩn dòng bùn đá tại Xã Mường Cang

Xã Mường Cang đã có dấu hiệu nứt gãy từ năm 1995, chủ yếu xuất hiện trên tường nhà, nền móng và các tuyến đường liên thôn (Hình 8 và 9). Qua khảo sát thực tế tại điểm xuất hiện vết nứt, các

vết nứt xuất hiện liên tục ở nhiều tầng khác nhau. Vị trí cao nhất nằm ở gần đỉnh vùng chấm đỏ (ảnh thực tế nằm ở phía trên bên tay phải của Hình 8). Vùng màu vàng tại Hình 8 chỉ là vị trí thân của dòng bùn đá tiềm ẩn. Trong khi đó, tại vị trí ô màu vàng tại Hình 9 là vị trí đã có những dòng chảy tức thời xuất hiện trong năm 2023. Bên cạnh đó, hiện tượng nứt sàn nhà người dân thì xuất hiện ở phía dưới cả ô màu vàng của Hình 9. Khi kết nối các điểm nứt đất này, nhóm nghiên cứu đã khoanh vùng phần đỉnh và hướng của dòng bùn đá như trong Hình 8 và 9.

Ban đầu, các biện pháp xử lý như trám vữa, gia cố móng và điều chỉnh thoát nước được áp dụng, nhưng không mang lại hiệu quả lâu dài. Các vết nứt tiếp tục mở rộng về chiều dài, độ rộng và độ sâu, lan rộng đến nhiều khu vực. Điều này cho thấy quá trình biến dạng đất nền diễn biến phức tạp và có tính tiệm tiến. Trong mùa mưa, hiện tượng thấm nước làm thay đổi các đặc tính cơ học của vật liệu địa chất, đặc biệt tại các tầng phong hóa và đất bờ rời. Sự thấm nước làm giảm lực ma sát nội bộ, tăng áp suất lỗ rỗng và gia tăng tải trọng khối đất, khiến mái dốc dễ mất ổn định. Hệ thống các vết nứt tại Mường Cang không chỉ giới hạn trong khu dân cư mà lan rộng khắp sườn đồi, từ đỉnh đến chân dốc, ảnh hưởng đến cả hạ tầng giao thông



Hình 8. Vết nứt xuất hiện ở xã Mường Cang, khu vực Than Uyên, tỉnh Lai Châu.



Hình 9. Khe suối chảy ra phía dưới sườn vết nứt xuất lộ năm 2023 trong đêm, tạo ra vết dòng chảy tức thời đổ xuống vườn chè người dân.

và sản xuất nông nghiệp.

Một yếu tố địa hình đáng chú ý là các khe suối xuất hiện trên đồi chè - nơi đất canh tác mỏng, dễ xói mòn. Các khe này làm tăng nguy cơ dòng bùn đá và suy giảm chất lượng đất nông nghiệp. Các công trình dân sinh như nhà ở cũng đã ghi nhận hiện tượng nghiêng, lún và nứt móng - những dấu hiệu sớm của nền đất yếu. Khoảng hơn 20 hộ gia đình tại đây đang sinh sống trong vùng nguy cơ cao, bị đe dọa trực tiếp bởi sự cố sụp đổ công trình nếu không có biện pháp can thiệp kịp thời.

Trong bối cảnh thời tiết cực đoan ngày càng bất thường, việc theo dõi biến dạng địa hình và lượng mưa - dòng chảy cần được duy trì thường xuyên. Hệ thống cảnh báo sớm, kế hoạch sơ tán và sự phối hợp liên ngành là điều kiện bắt buộc nhằm bảo vệ cộng đồng. Quản lý rủi ro dòng bùn đá tại Mường Cang không chỉ là vấn đề kỹ thuật, mà còn là ưu tiên chiến lược để đảm bảo an toàn sinh kế và ổn định lâu dài cho khu vực.

4. Kết luận và kiến nghị

4.1. Kết luận

Nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả của cách tiếp cận kết hợp trí tuệ nhân tạo và GIS trong đánh giá nguy cơ dòng bùn đá. Mô hình hồi quy tuyến tính (LR) giúp giải thích rõ vai trò định lượng của các biến, cho thấy độ dốc và BSI làm tăng nguy cơ, trong khi NDVI có tác dụng bảo vệ; tuy nhiên độ chính xác chỉ ở mức trung bình ($R^2 = 0,50$; accuracy $\approx 57\%$). Ngược lại, Random Forest (RF) vượt trội về năng lực dự báo (Accuracy $\approx 86\%$, F1 $\approx 0,84$, AUC $\approx 0,91$), đồng thời cung cấp thước đo tầm quan trọng biến, khẳng định các yếu tố chi phối chính gồm độ dốc, lượng mưa, NDVI, khoảng cách đến đường và BSI. Tích hợp kết quả mô hình vào GIS cho phép lập bản đồ nguy cơ theo 5 cấp độ, hỗ trợ xác định các “điểm nóng” và lượng hóa phơi nhiễm theo đất ở, hạ tầng, rừng và đất nông nghiệp. Kiểm chứng tại Khoen On, Tà Mung và Mường Cang cho thấy dấu hiệu mất ổn định hiện hữu, phù hợp với phân vùng nguy cơ, nhấn mạnh nhu cầu cảnh báo sớm, gia cố công trình và bố trí dân cư an toàn. Như vậy, LR cung cấp nền tảng diễn giải, còn RF là công cụ thực dụng để vận hành cảnh báo và quy hoạch thích ứng ở địa hình miền núi phức tạp.

4.2. Kiến nghị

Từ những kết quả đạt được, việc triển khai hệ thống giám sát, cảnh báo sớm, kết hợp các giải pháp công trình và phi công trình, cũng như sơ tán dân cư khỏi vùng nguy cơ cao là yêu cầu cấp bách nhằm bảo vệ an toàn tính mạng và tài sản cho cộng đồng vùng núi Tây Bắc. Với sự hỗ trợ của trí tuệ nhân tạo và địa không gian, việc thiết lập hệ thống cảnh báo nhanh trên diện rộng cần được triển khai hiệu quả hơn, tiếp cận được tới từng hộ gia đình, giảm thiểu rủi ro, thiệt hại tới người dân miền núi.

Lời cảm ơn

Bài báo này được hoàn thành trong khuôn khổ đề tài nghiên cứu khoa học cấp nhà nước mã số QG.24.75. Tập thể tác giả xin chân thành cảm ơn.

Đóng góp của tác giả

Đặng Kinh Bắc - lên ý tưởng, viết bản thảo và hỗ trợ kinh phí nhóm thực địa; Nguyễn Thanh Hương - chạy mô hình, phân tích dữ liệu và viết bản thảo; Nguyễn Trọng Hưởng - cung cấp dữ liệu và chỉnh sửa bản thảo; Nguyễn Hiệu, Ngô Văn Liêm, Đặng Văn Bào, Đào Minh Đức, Nguyễn Minh Hiếu - đồng tham gia hỗ trợ thực địa, kiểm chứng và chỉnh sửa bản thảo.

Tài liệu tham khảo

- An, P. V. (2023). Phân tích các dạng trượt lở mái dốc các khu tái định cư thủy điện Sơn La và định hướng giải pháp xử lý.
- Anh T. T., Tứ D. N. (2012). 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. *Các Khoa học về Trái đất*, 34(3), 223-232.
- Chu, V. N. và Nguyễn, T. T. H. (2008). Đánh giá nguy cơ tai biến trượt lở dọc tuyến đường 4D trên cơ sở nghiên cứu mối quan hệ giữa cấu trúc địa chất và địa hình. *Tạp chí Địa chất*, 305, 1-8.
- Dang, K. B., Burkhard, B., Müller, F. và Dang, V. B. (2018). Modelling and mapping natural hazard regulating ecosystem services in Sapa, Lao Cai

province, Vietnam. *Paddy and Water Environment*, 16(4), 767-781. <https://doi.org/10.1007/s10333-018-0667-6>.

Dang, K. B., Nguyen, C. Q., Tran, Q. C., Nguyen, H., Nguyen, T. T., Nguyen, D. A., Tran, T. H., Bui, P. T., Giang, T. L., Lenh, T. A., Ngo, V. L., Yasir, M., Nguyen, T. T. và Ngo, H. H. (2024). Comparison between U-shaped structural deep learning models to detect landslide traces. *Science of the Total Environment*, 912, 169113. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169113>.

Doan, V. L., Nguyen, B., Nguyen, C. C. và Nguyen, C. T. (2024). *Effect of time-variant rainfall on landslide susceptibility: A case study in Quang Ngai Province, Vietnam*. 46, 203-221.

Geertsema, M., Highland, L. và Vagueouis, L. (2009). Environmental impact of landslides. In K. Sassa và P. Canuti (Eds.), *Landslides -- Disaster Risk Reduction* (pp. 589-607). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_31.

Hung, P. V., Son, P. Q. và Dung, N. V. (2015). The study evaluated arming of risk of landslide in Hoa Binh and Son La reservoir hydropower area on the basis of analyzing high-resolution remote sensing and geographic information systems. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 37(3), 193-203.

Jakob, M., & Hungr, O. (Eds.). (2005). *Debris-flow hazards and related phenomena*. Springer Praxis books. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5>.

JAXA. (2008). ALOS Data Users Handbook. *Earth observation research and application center Japan aerospace exploration agency*, 158. http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/fdata/ALOS_HB_RevC_EN.pdf.

Lary, D. J., Alavi, A. H., Gandomi, A. H. và Walker, A. L. (2016). Machine learning in geosciences and remote sensing. *Geoscience Frontiers*, 7(1), 3-10. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.003>.

Malet, J. P. và Maquaire, O. (2012). Risk assessment methodologies for soil threats. In *Framework*. <https://doi.org/10.2788/47096>.

- Nguyen, C. N., Nguyen, V. D., Ha, T. G., Dinh, Q. Van, Nguyen, L. M., Huang, B.-S., Pham, T. T., Nguyen, T. H., Le, Q. K. và Nguyen, H. H. (2022). Automatic earthquake detection and phase picking and Muong Te, Lai Chau region: an application of machine learning in observational seismology in Vietnam. *Vietnam Journal of Earth Science*, 43(3), 430-446. <https://doi.org/https://doi.org/10.15625/2615-9783/17253>.
- Piralilou, S. T., Shahabi, H., Jarihani, B., Ghorbanzadeh, O., Blaschke, T., Gholamnia, K., Meena, S. R. và Aryal, J. (2019). Landslide detection using multi-scale image segmentation and different machine learning models in the higher himalayas. *Remote Sensing*, 11(21). <https://doi.org/10.3390/rs11212575>.
- Schmitter, P., Dercon, G., Hilger, T., Thi Le Ha, T., Huu Thanh, N., Lam, N., Duc Vien, T. và Cadisch, G. (2010). Sediment induced soil spatial variation in paddy fields of Northwest Vietnam. *Geoderma*, 155(3-4), 298-307. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.12.014>.
- Takahashi, T. (2014). *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures* (2nd ed.). CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN: 978-1-4665-5304-7. <https://doi.org/10.1201/b17307>.
- Tehrani, F. S., Santinelli, G. và Herrera Herrera, M. (2021). Multi-Regional landslide detection using combined unsupervised and supervised machine learning. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 1015-1038. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1912196>.
- Tran, V. A., Khuc, T. D., Truong, X. Q., Nguyen, A. B. và Phi, T. T. (2024). Application of potential machine learning models in landslide susceptibility assessment: A case study of Van Yen district, Yen Bai province, Vietnam. *Quaternary Science Advances*, 14, 100181. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2024.100181>.
- Varnes, D. J. (1978). *Slope Movement Types and Processes*. In R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.), *Landslides: Analysis and Control* (pp. 11-33). Transportation Research Board Special Report 176. National Academy of Sciences.
- Vũ, T. M. H., Đặng, T. K. P., Ngô, L. A. và Đặng, T. H. V. (2017). Nghiên cứu đánh giá tác động của các hồ chứa Lai Châu, Sơn La và Hòa Bình đến dòng chảy mùa kiệt trên sông Đà. *Tạp chí khoa học kỹ thuật thủy lợi và môi trường*, 57, 26-32.
- Zhao, C. và Lu, Z. (2018). Remote sensing of landslides-A review. *Remote Sensing*, 10(2), 8-13. <https://doi.org/10.3390/rs10020279>.
- Zhou, W., Zhou, Y., Liu, R., Yin, H. và Nie, H. (2025). Predictive modeling of river blockage severity from debris flows: Integrating statistical and machine learning approaches with insights from Sichuan Province, China. *Catena*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108576>.