

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT**

BÁO CÁO SINH HOẠT HỌC THUẬT

**NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG QGIS VÀ PHƯƠNG PHÁP
THỐNG KÊ TRONG ĐÁNH GIÁ VÀ PHÂN VÙNG NGUY CƠ
TRƯỢT LỞ**

Cán bộ thực hiện: TS. Dương Văn Bình

Đơn vị: Bộ môn Địa chất công trình – Khoa KH& KT Địa chất

Hà Nội, 2026

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT**

BÁO CÁO SINH HOẠT HỌC THUẬT

**NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG QGIS VÀ PHƯƠNG PHÁP
THỐNG KÊ TRONG ĐÁNH GIÁ VÀ PHÂN VÙNG NGUY CƠ
TRƯỢT LỞ**

Cán bộ thực hiện

Bộ môn Địa chất công trình

TS. Dương Văn Bình

TS. Nguyễn Văn Phóng

Hà Nội, 2026

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU	1
1. Tổng quan về trượt lở và nghiên cứu đánh giá nguy cơ trượt lở đất	3
1.1. Tổng quan về trượt lở đất đá.....	3
1.2. Nghiên cứu đánh giá nguy cơ trượt lở đất.....	4
2. Khái quát về khu vực nghiên cứu và hiện trạng trượt lở	6
3. Phương pháp và dữ liệu nghiên cứu.....	8
3.1. Phương pháp nghiên cứu	8
3.2. Dữ liệu nghiên cứu.....	11
3.2.1. Bản đồ kiểm kê trượt lở khu vực nghiên cứu.....	11
3.2.2. Mô hình số độ cao (DEM)	12
3.2.3. Bản đồ cao độ địa hình.....	14
3.2.4. Bản đồ độ dốc địa hình.....	16
3.2.5. Bản đồ thạch học.....	18
3.2.6. Bản đồ lượng mưa.....	20
3.2.7. Bản đồ sử dụng đất.....	22
3.2.8. Bản đồ khoảng cách đến đường giao thông.....	24
4. Kết quả phân vùng trượt lở đất	25
5. Kết luận	29
6. Tài liệu tham khảo.....	30

MỞ ĐẦU

Trượt lở đất là một trong những tai biến địa chất nguy hiểm, thường xuyên xảy ra tại các khu vực có địa hình đồi núi, điều kiện địa chất phức tạp và chế độ mưa tập trung. Hiện tượng này không chỉ gây thiệt hại lớn về người và tài sản mà còn ảnh hưởng nghiêm trọng đến hạ tầng kỹ thuật, môi trường và quá trình phát triển kinh tế - xã hội. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu toàn cầu, sự gia tăng về cường độ và tần suất của các hiện tượng mưa cực đoan, kết hợp với các hoạt động nhân sinh như phá rừng, mở rộng đô thị, xây dựng giao thông và khai thác khoáng sản đã làm gia tăng đáng kể nguy cơ phát sinh trượt lở đất. Do đó, việc nghiên cứu đánh giá và phân vùng nguy cơ trượt lở đất một cách định lượng, có cơ sở khoa học là yêu cầu cấp thiết trong công tác quy hoạch lãnh thổ và giảm nhẹ rủi ro thiên tai.

Trong những thập kỷ gần đây, sự phát triển của hệ thống thông tin địa lý (GIS) và công nghệ viễn thám đã mở ra nhiều hướng tiếp cận hiệu quả trong nghiên cứu tai biến địa chất, đặc biệt là trong phân tích không gian và xây dựng bản đồ nguy cơ trượt lở. GIS cho phép tích hợp, quản lý và phân tích đồng thời nhiều lớp dữ liệu khác nhau như địa hình, địa chất, thảm phủ, lượng mưa và mạng lưới thủy văn, từ đó xác định mối quan hệ không gian giữa các yếu tố ảnh hưởng và hiện tượng trượt lở. Trong số các phần mềm GIS hiện nay, QGIS – một nền tảng mã nguồn mở – ngày càng được sử dụng rộng rãi nhờ khả năng tùy biến cao, hỗ trợ nhiều công cụ phân tích và phù hợp với điều kiện triển khai tại các quốc gia đang phát triển.

Bên cạnh đó, các phương pháp thống kê đã được chứng minh là công cụ hữu hiệu trong việc lượng hóa mối quan hệ giữa các yếu tố gây trượt và xác suất xảy ra trượt lở. Các phương pháp như chỉ số tần suất (Frequency Ratio), hồi quy logistic (Logistic Regression), phân tích đa biến và các mô hình xác suất khác cho phép đánh giá mức độ đóng góp của từng yếu tố (độ dốc, hướng dốc, thạch học, khoảng cách đến đứt gãy, lượng mưa, sử dụng đất, v.v.) đối với nguy cơ trượt lở. Việc kết hợp các phương pháp thống kê với môi trường GIS không chỉ nâng cao độ chính xác của kết quả mà còn cho phép trực quan hóa kết quả dưới dạng bản đồ phân vùng nguy cơ.

Tại Việt Nam, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào đánh giá nguy cơ trượt lở đất ở các khu vực miền núi phía Bắc, miền Trung và Tây Nguyên, tuy nhiên việc ứng dụng các phần mềm mã nguồn mở như QGIS kết hợp với các phương pháp

thống kê vẫn còn chưa được khai thác đầy đủ, đặc biệt trong các nghiên cứu mang tính ứng dụng phục vụ quy hoạch và quản lý địa phương. Do đó, việc nghiên cứu, xây dựng quy trình đánh giá nguy cơ trượt lở dựa trên QGIS và các phương pháp thống kê là cần thiết, vừa đảm bảo tính khoa học, vừa có khả năng áp dụng rộng rãi trong thực tiễn.

Xuất phát từ những vấn đề trên, nghiên cứu này được thực hiện nhằm ứng dụng QGIS kết hợp với phương pháp thống kê để đánh giá và phân vùng nguy cơ trượt lở đất cho khu vực nghiên cứu. Các yếu tố ảnh hưởng chính được lựa chọn, xử lý và chuẩn hóa trong môi trường GIS; đồng thời, mối quan hệ giữa các yếu tố này với hiện tượng trượt lở được phân tích bằng các phương pháp thống kê phù hợp. Trên cơ sở đó, bản đồ phân vùng nguy cơ trượt lở được xây dựng với các cấp độ khác nhau, phục vụ công tác cảnh báo, quy hoạch sử dụng đất và giảm thiểu rủi ro thiên tai. Kết quả nghiên cứu góp phần hoàn thiện phương pháp luận trong đánh giá nguy cơ trượt lở và cung cấp cơ sở khoa học cho công tác quản lý lãnh thổ theo hướng bền vững.

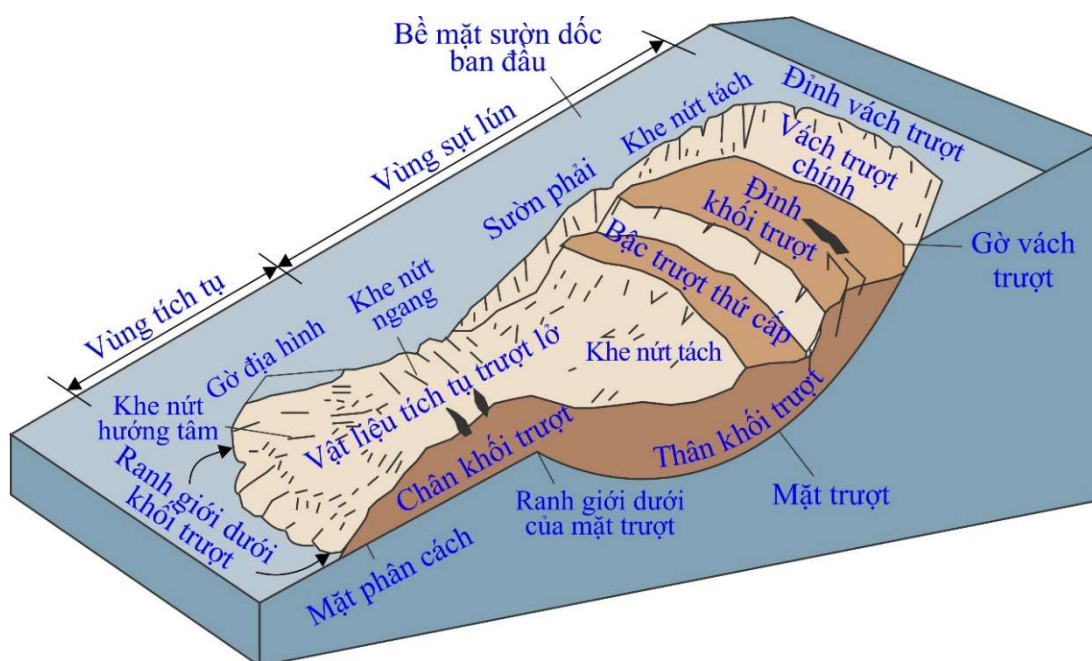
1. Tổng quan về trượt lở và nghiên cứu đánh giá nguy cơ trượt lở đất

1.1. Tổng quan về trượt lở đất đá

Các nghiên cứu trên thế giới cho thấy tồn tại nhiều quan điểm khác nhau về khái niệm “quá trình trượt lở”, tuy nhiên, trong phần lớn các định nghĩa đều có những đặc điểm chung sau [2]:

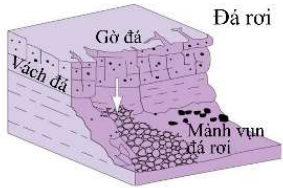
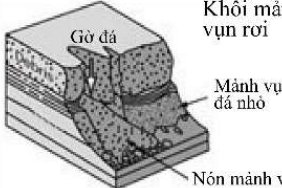
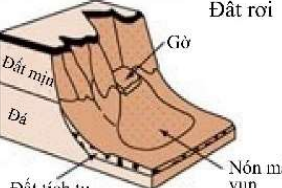
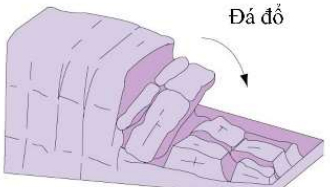
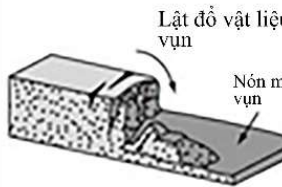
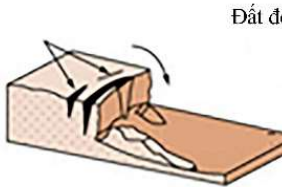
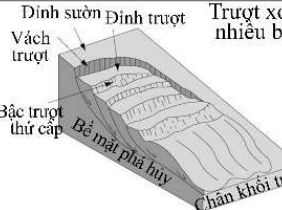
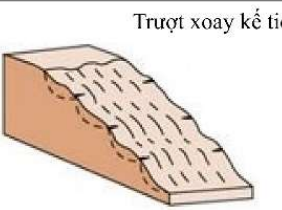
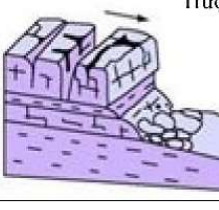
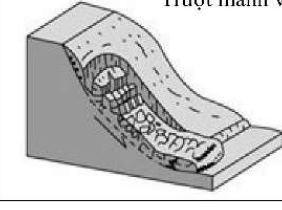
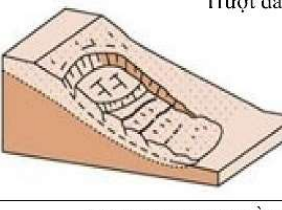
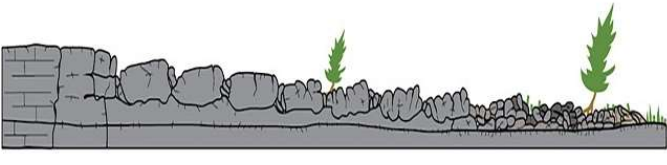
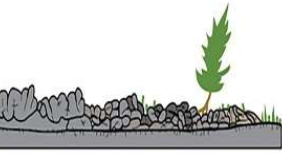
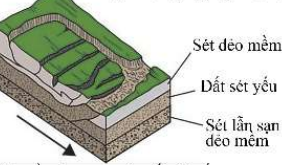
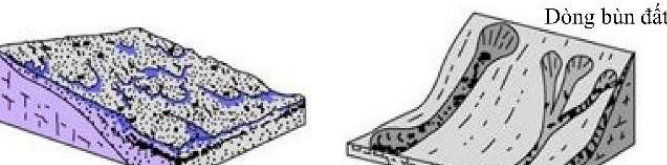
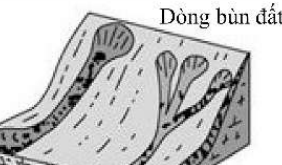
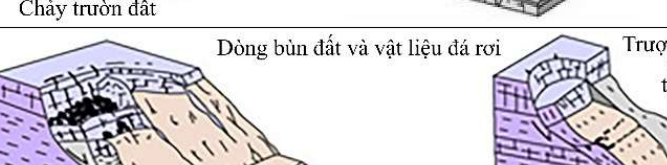
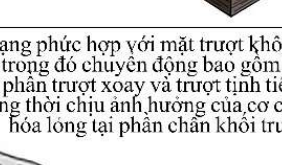
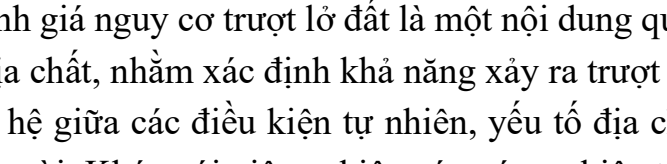
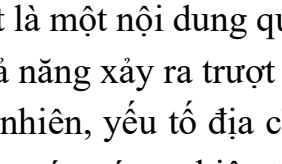
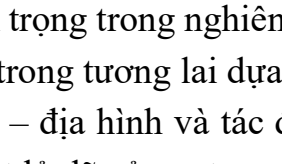
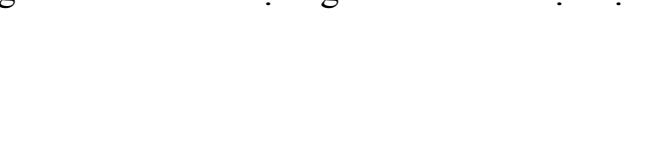
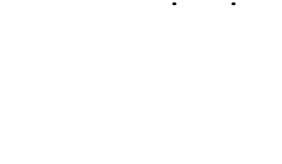
- Trượt lở được hiểu là sự dịch chuyển của khối vật liệu đất đá xuống dốc;
- Lực chi phối chính là trọng lực của khối vật liệu;
- Sự chuyển động xảy ra dưới dạng trượt hoặc, trong một số trường hợp, dưới dạng dòng chảy;
- Quá trình dịch chuyển diễn ra mà khối vật liệu vẫn duy trì tiếp xúc với nền ổn định bên dưới.

Ngoài ra, thuật ngữ “trượt lở” còn có các từ đồng nghĩa như “chuyển động khối” (mass movement), “phá hủy sườn dốc” (slope failure), thường được sử dụng để mô tả các dạng và quy mô khác nhau của hiện tượng này. Hình 1.1 minh họa các thành phần cơ bản của một khối trượt lở [14]:



Hình 1.1. Các thành phần cơ bản của khối trượt

Trượt lở đất rất đa dạng về quy mô, cấu trúc, nguyên nhân hình thành, cũng như các điều kiện chi phối sự phát sinh và phát triển, cơ chế và động lực của quá trình. Hiện nay, tồn tại nhiều hệ thống phân loại khác nhau đối với các quá trình trượt lở. Khác với cách phân loại phổ biến trong thực tiễn nghiên cứu của Nga, trên thế giới các hiện tượng trượt lở thường được xem xét trong một hệ thống phân loại chung của các quá trình trọng lực. Dựa trên các nghiên cứu của nhiều tác giả [8, 14, 26], các quá trình trọng lực có thể được chia thành các loại cơ bản sau (Hình 1.2).

Vật liệu		ĐÁ GÓC	MẢNH VỤN	ĐẤT
Loại hình dịch chuyển				
				
TRƯỢT	Trượt xoay			
	Trượt tịnh tiến			
TRƯỢT BĂNG				
				
DÒNG CHẢY				
				
PHỨC HỢP				
				

Hình 1.2. Phân loại các quá trình trọng lực sườn dốc

1.2. Nghiên cứu đánh giá nguy cơ trượt lở đất

Đánh giá nguy cơ trượt lở đất là một nội dung quan trọng trong nghiên cứu tai biến địa chất, nhằm xác định khả năng xảy ra trượt lở trong tương lai dựa trên mối quan hệ giữa các điều kiện tự nhiên, yếu tố địa chất – địa hình và tác động của con người. Khác với việc nghiên cứu các sự kiện trượt lở đã xảy ra trong quá

khử, đánh giá nguy cơ (hazard/susceptibility) hướng tới việc dự báo không gian các khu vực có tiềm năng mất ổn định sườn dốc, từ đó phục vụ công tác quy hoạch lãnh thổ, cảnh báo sớm và giảm nhẹ rủi ro thiên tai.

Trên thế giới, các nghiên cứu đánh giá nguy cơ trượt lở đất đã được triển khai từ khá sớm và ngày càng phát triển cả về phương pháp luận lẫn công nghệ áp dụng. Các cách tiếp cận phổ biến có thể được chia thành ba nhóm chính: (i) phương pháp định tính và bán định lượng, (ii) phương pháp thống kê – xác suất, và (iii) phương pháp mô hình vật lý sườn dốc. Mỗi nhóm phương pháp có những ưu điểm và hạn chế riêng, phù hợp với từng điều kiện dữ liệu, quy mô nghiên cứu và mục tiêu ứng dụng cụ thể.

Trong giai đoạn đầu, nhiều nghiên cứu chủ yếu áp dụng phương pháp định tính hoặc bán định lượng, dựa trên kinh nghiệm chuyên gia và phân tích chồng lớp các yếu tố ảnh hưởng trong môi trường GIS. Các yếu tố thường được lựa chọn bao gồm độ dốc, thạch học, cấu trúc địa chất, sử dụng đất, mạng lưới sông suối và hệ thống giao thông. Trọng số của các yếu tố được xác định thông qua phương pháp chuyên gia hoặc các kỹ thuật ra quyết định đa tiêu chí như AHP (Analytic Hierarchy Process). Mặc dù các phương pháp này dễ triển khai và không đòi hỏi nhiều dữ liệu chi tiết, nhưng kết quả đánh giá phụ thuộc nhiều vào tính chủ quan của người thực hiện và khó lượng hóa mức độ không chắc chắn.

Cùng với sự phát triển của thống kê học và công nghệ tính toán, các phương pháp thống kê – xác suất ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong đánh giá nguy cơ trượt lở đất. Các phương pháp tiêu biểu bao gồm chỉ số tần suất (Frequency Ratio), giá trị thông tin (Information Value), hồi quy logistic, phân tích phân biệt và các mô hình học máy. Cách tiếp cận này dựa trên việc phân tích mối quan hệ định lượng giữa phân bố không gian của các điểm trượt lở đã xảy ra và các yếu tố điều kiện, từ đó ước tính xác suất hoặc mức độ nhạy cảm trượt lở cho từng đơn vị không gian. Ưu điểm nổi bật của nhóm phương pháp này là tính khách quan cao hơn, khả năng đánh giá độ chính xác của mô hình và phù hợp với các nghiên cứu ở quy mô khu vực đến tình khi có cơ sở dữ liệu trượt lở tương đối đầy đủ.

Bên cạnh đó, các mô hình vật lý sườn dốc được phát triển nhằm mô phỏng trực tiếp cơ chế mất ổn định của sườn dốc dựa trên các nguyên lý địa kỹ thuật và thủy văn. Các mô hình như sườn dốc vô hạn, Shalstab, SINMAP hoặc các mô hình kết hợp thấm mưa cho phép đánh giá sự thay đổi điều kiện ổn định theo thời gian, đặc biệt hiệu quả trong nghiên cứu trượt lở nông do mưa lớn. Tuy nhiên, việc áp dụng các mô hình vật lý thường đòi hỏi nhiều tham số đầu vào chi tiết (tính chất cơ lý đất đá, mực nước ngầm, điều kiện thấm), do đó gặp khó khăn tại các khu vực thiếu số liệu quan trắc.

Trong những năm gần đây, hệ thống thông tin địa lý (GIS) đã trở thành nền tảng không thể thiếu trong nghiên cứu đánh giá nguy cơ trượt lở đất. GIS cho phép tích hợp đồng thời nhiều lớp dữ liệu không gian, hỗ trợ phân tích chồng lớp, xử lý raster và vector, cũng như trực quan hóa kết quả dưới dạng bản đồ nguy cơ. Đặc biệt, việc sử dụng các phần mềm GIS mã nguồn mở như QGIS đã mở ra khả năng ứng dụng rộng rãi trong điều kiện hạn chế về kinh phí, đồng thời đảm bảo tính minh bạch và khả năng tái lập của quy trình nghiên cứu.

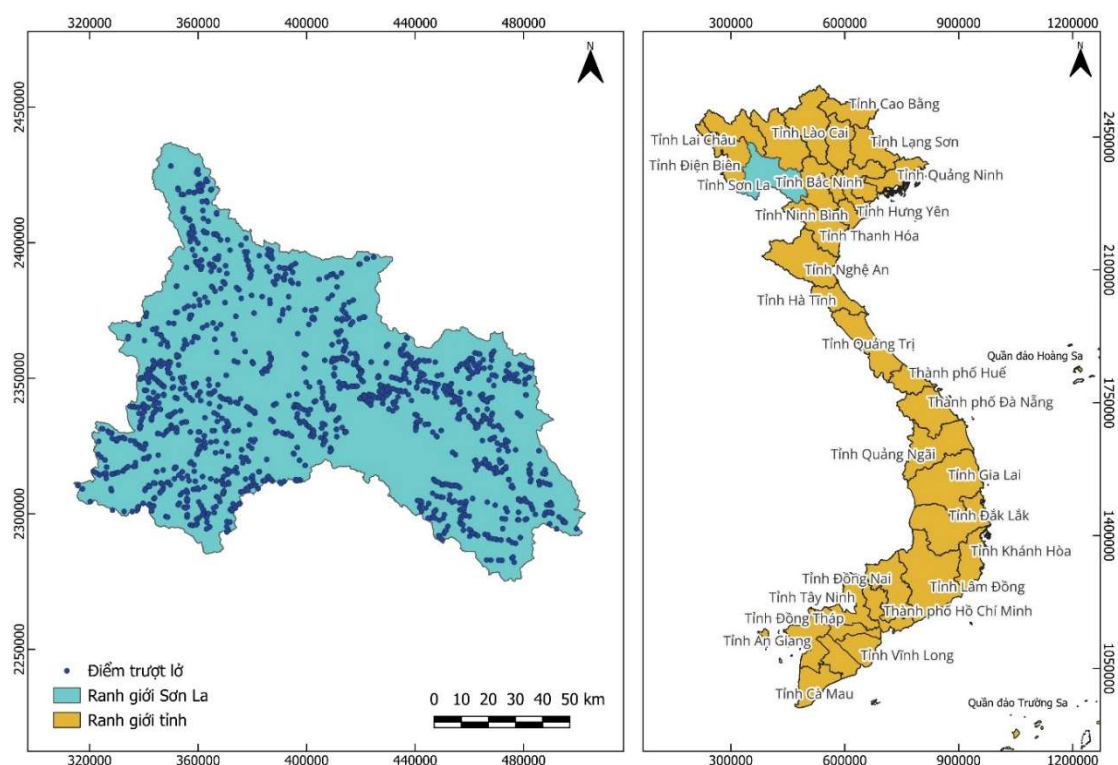
Tại Việt Nam, các nghiên cứu đánh giá nguy cơ trượt lở đất chủ yếu tập trung ở các khu vực miền núi như Tây Bắc, Bắc Trung Bộ và Tây Nguyên – nơi có địa hình phức tạp, lượng mưa lớn và chịu tác động mạnh của các hoạt động nhân sinh. Nhiều công trình đã bước đầu xây dựng được bản đồ nguy cơ trượt lở ở các quy mô khác nhau, phục vụ quy hoạch và cảnh báo thiên tai. Tuy nhiên, việc chuẩn hóa quy trình, mở rộng ứng dụng các phương pháp định lượng và khai thác hiệu quả các phần mềm GIS mã nguồn mở vẫn còn là hướng nghiên cứu và ứng dụng cần tiếp tục được đẩy mạnh.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu đánh giá nguy cơ trượt lở đất theo hướng kết hợp GIS với các phương pháp thống kê được xem là một hướng tiếp cận phù hợp, vừa đảm bảo cơ sở khoa học, vừa có tính khả thi cao trong điều kiện dữ liệu và năng lực kỹ thuật hiện nay. Cách tiếp cận này cho phép xây dựng các bản đồ nguy cơ có độ tin cậy tương đối cao, phục vụ hiệu quả cho công tác quản lý lãnh thổ, quy hoạch sử dụng đất và giảm nhẹ rủi ro trượt lở đất ở quy mô địa phương và khu vực.

2. Khái quát về khu vực nghiên cứu và hiện trạng trượt lở

Tỉnh Sơn La ở trung tâm vùng Tây Bắc có diện tích tự nhiên là 1.410.983 ha, gồm 75 đơn vị hành chính cấp xã, là tỉnh có diện tích lớn thứ 3 của cả nước chiếm 39% diện tích vùng Tây Bắc và bằng 4,15% tổng diện tích tự nhiên toàn quốc. Trung tâm hành chính tỉnh cách thủ đô Hà Nội 302 km về phía Tây Bắc. Tọa độ địa lý: Từ 20°39' đến 22°02' độ vĩ bắc; Từ 103°11' đến 105°02' độ kinh đông.

Phía Bắc giáp tỉnh Lai Châu và Lào Cai. Phía Nam giáp tỉnh Thanh Hóa. Phía Đông giáp tỉnh Phú Thọ. Phía Tây giáp tỉnh Điện Biên. Sơn La có đường biên giới chung với nước CHDCND Lào dài 250 km; có các cửa khẩu Quốc gia Chiềng Khương, Lóng Sập là lợi thế để Sơn La thông thương giao lưu kinh tế với các tỉnh vùng Đông bắc của nước CHDCND Lào. Sơn La là địa bàn có vị trí quan trọng trong chiến lược xây dựng và phòng thủ đất nước.



Hình 2.1. Bản đồ khu vực nghiên cứu

Sơn La thuộc vùng miền núi Tây Bắc. Lịch sử phát triển địa chất kiến tạo cùng với kết quả tác động của các quá trình ngoại sinh đã tạo nên những đặc điểm riêng của địa hình tỉnh Sơn La. Địa hình mang tính chất đồi núi thấp, độ cao trung bình 600 đến 700m. Các hệ thống núi lớn trong tỉnh đều chạy theo hướng Tây Bắc - Đông Nam và cùng với dãy núi Hoàng Liên Sơn ở phía bắc kẹp lấy một dải cao nguyên đá vôi ở giữa đã chia lãnh thổ Sơn La thành hai lưu vực sông Đà và sông Mã. Địa hình Sơn La chiếm trên 85% diện tích là đồi núi. Địa hình thung lũng, các vùng bồn trũng giữa núi chiếm khoảng 15% diện tích. Đồi núi ở Sơn La chủ yếu có độ cao từ 600 đến 700m. Địa hình núi cao trên 2.000m chiếm khoảng 2% diện tích lãnh thổ. Khu vực núi cao tập trung chủ yếu ở khu vực phía đông bắc của tỉnh bao gồm các xã Mường La, Bắc Yên, Phù Yên.

Sơn La có đến 3/4 diện tích là đồi núi có độ dốc khá cao và bề mặt địa hình bị chia cắt mạnh. Sườn đồi núi, ở phần thấp với các vạt dốc tụ có độ dốc trung bình 8-15°, ở phần cao thường có độ dốc 15-20°. Khu vực các vách núi đá vôi có độ dốc rất cao, thậm chí dốc đứng. Diện tích lãnh thổ có độ dốc nhỏ (<8) chủ yếu thuộc cao nguyên Sơn La và Mộc Châu, ngoài ra còn có một số diện tích hẹp của bãi bồi, bậc thềm, bề mặt tích tụ lũ tích và phần sót bề mặt đỉnh núi.

Tây Bắc nói chung và lãnh thổ tỉnh Sơn La nói riêng có chế độ mưa mùa hạ của vùng nhiệt đới gió mùa. Chế độ mưa có sự tương phản rõ rệt: mùa mưa (là thời kỳ hoạt động của gió mùa tây nam) kéo dài 6 tháng, từ tháng 4 đến tháng 9; mùa khô (là thời kỳ hoạt động của gió mùa đông bắc) kéo dài khoảng 5-6 tháng,

từ tháng 10 hoặc 11 của năm trước đến hết tháng 3 của năm sau. Tổng lượng mưa một năm dao động không nhiều, khoảng 1.400 - 1.700 mm/năm. Lượng mưa phân bố không đều theo thời gian, mưa lớn tập trung vào tháng 6, 7, 8, và lượng mưa cũng không đều giữa các khu vực của tỉnh.

3. Phương pháp và dữ liệu nghiên cứu

3.1. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu đánh giá và phân vùng nguy cơ trượt lở đất được thực hiện trên cơ sở kết hợp giữa Hệ thống Thông tin Địa lý (Geographic Information System – GIS) và phương pháp thống kê Tỷ số tần suất sửa đổi (Modified Frequency Ratio – MFR). Đây là một trong những hướng tiếp cận được sử dụng phổ biến trong nghiên cứu tai biến địa chất nhờ khả năng tích hợp hiệu quả dữ liệu không gian và định lượng mối quan hệ giữa hiện tượng trượt lở với các yếu tố điều kiện tự nhiên. Trong nghiên cứu này, phần mềm mã nguồn mở QGIS được sử dụng làm môi trường xử lý, phân tích và trực quan hóa dữ liệu không gian, trong khi phương pháp MFR được áp dụng để xác định mức độ ảnh hưởng của các yếu tố gây trượt lở và xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ.

Hệ thống Thông tin Địa lý (GIS) đóng vai trò quan trọng trong nghiên cứu nguy cơ trượt lở nhờ khả năng lưu trữ, quản lý, tích hợp và phân tích đồng thời nhiều lớp thông tin không gian khác nhau. Theo Burrough và McDonnell (1998) [17], GIS là một hệ thống hỗ trợ thu thập, lưu trữ, xử lý và phân tích dữ liệu địa lý nhằm phục vụ các bài toán quản lý tài nguyên và môi trường. Trong nghiên cứu tai biến trượt lở đất, GIS cho phép tích hợp các yếu tố ảnh hưởng như địa hình, địa chất, thủy văn, hiện trạng sử dụng đất và lượng mưa trong cùng một môi trường phân tích, từ đó hỗ trợ xây dựng các mô hình đánh giá nguy cơ với độ chính xác cao. Sự phát triển của các phần mềm GIS mã nguồn mở, đặc biệt là QGIS, đã tạo điều kiện thuận lợi cho việc ứng dụng GIS trong nghiên cứu khoa học và quản lý thiên tai nhờ tính linh hoạt, khả năng mở rộng và chi phí triển khai thấp [21].

Trong nghiên cứu này, QGIS được sử dụng để thực hiện toàn bộ quá trình tiền xử lý và phân tích dữ liệu không gian. Các lớp thông tin được chuẩn hóa về hệ tọa độ, độ phân giải và phạm vi nghiên cứu trước khi tiến hành phân tích. Từ các dữ liệu đầu vào, các lớp thông tin chuyên đề được xây dựng và chuyển đổi về dạng raster nhằm phục vụ tính toán thống kê. Các công cụ phân tích không gian của QGIS được sử dụng để trích xuất các tham số địa hình, thực hiện các phép phân tích khoảng cách, chồng xếp dữ liệu và tính toán chỉ số nguy cơ trượt lở. Việc sử dụng QGIS không chỉ giúp tự động hóa quy trình xử lý dữ liệu mà còn tạo điều kiện thuận lợi cho việc cập nhật, tái sử dụng và kiểm chứng kết quả

ngiên cứu.

Các phương pháp thống kê hai biến (bivariate statistical methods) được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu đánh giá và phân vùng nguy cơ trượt lở đất do khả năng lượng hóa mối quan hệ giữa các yếu tố điều kiện và sự phân bố của các điểm trượt lở đã ghi nhận. Cơ sở lý thuyết của các phương pháp này dựa trên giả định rằng các điều kiện địa hình, địa chất, thủy văn và môi trường đã dẫn đến các sự kiện trượt lở trong quá khứ sẽ tiếp tục ảnh hưởng đến khả năng phát sinh các sự kiện tương tự trong tương lai. Nói cách khác, quy luật phân bố không gian của các điểm trượt lở đã xảy ra có thể được sử dụng để dự báo các khu vực tiềm năng xảy ra trượt lở trong tương lai [18, 22].

Trong số các phương pháp thống kê được áp dụng cho phân vùng nguy cơ trượt lở, phương pháp Tỷ số tần suất (Frequency Ratio – FR) được đánh giá là một trong những phương pháp đơn giản, dễ triển khai nhưng mang lại độ tin cậy cao. Phương pháp này xác định mức độ tương quan giữa sự xuất hiện của các điểm trượt lở và từng lớp giá trị của các yếu tố ảnh hưởng thông qua việc so sánh tỷ lệ diện tích xảy ra trượt lở với tỷ lệ diện tích phân bố của từng lớp yếu tố trong toàn bộ khu vực nghiên cứu [15, 16]. Trên cơ sở đó, mỗi yếu tố ảnh hưởng được phân chia thành các lớp giá trị khác nhau, sau đó tính toán giá trị tỷ số tần suất cho từng lớp nhằm đánh giá mức độ thuận lợi đối với sự hình thành trượt lở đất.

Tuy nhiên, phương pháp FR truyền thống có một số hạn chế trong quá trình tổng hợp kết quả từ nhiều yếu tố khác nhau, đặc biệt khi xuất hiện sự chênh lệch lớn giữa các giá trị tỷ số tần suất. Để khắc phục vấn đề này, phương pháp MFR tiến hành chuẩn hóa các giá trị FR nhằm phản ánh chính xác hơn mức độ đóng góp tương đối của từng lớp yếu tố đối với quá trình phát sinh trượt lở. Theo cách tiếp cận này, các giá trị FR được chuyển đổi thành các trọng số chuẩn hóa, cho phép so sánh và tích hợp các yếu tố trong cùng một hệ thống đánh giá. Kết quả là mỗi lớp dữ liệu sẽ được gán một trọng số thể hiện mức độ ảnh hưởng tương đối đến nguy cơ trượt lở đất.

Để đánh giá mức độ ảnh hưởng của các yếu tố điều kiện đến hiện tượng trượt lở đất, nghiên cứu áp dụng phương pháp Tỷ số tần suất sửa đổi (Modified Frequency Ratio – MFR). Phương pháp này được phát triển từ mô hình Tỷ số tần suất (Frequency Ratio – FR), một trong những phương pháp thống kê hai biến (bivariate statistical method) được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu phân vùng nguy cơ trượt lở đất. Cơ sở của phương pháp FR là xác định mối quan hệ giữa sự phân bố không gian của các điểm trượt lở đã ghi nhận với các lớp giá trị của từng yếu tố ảnh hưởng. Giá trị tỷ số tần suất phản ánh khả năng xuất hiện trượt lở trong từng lớp dữ liệu; giá trị càng lớn cho thấy mối liên hệ càng chặt chẽ giữa lớp dữ

liệu đó và hiện tượng trượt lở.

Giá trị tỷ số tần suất của lớp thứ j thuộc yếu tố thứ k được xác định theo công thức:

$$FR_{kj} = \frac{\left(\frac{N_{L,kj}}{N_L}\right)}{\left(\frac{N_{C,kj}}{N_C}\right)} \quad (3.1)$$

Trong đó:

- FR_{kj} : giá trị tỷ số tần suất của lớp j thuộc yếu tố k ;
- $N_{L,kj}$: số ô lưới (điểm) trượt lở nằm trong lớp j của yếu tố k ;
- N_L : tổng số ô lưới (điểm) trượt lở trong khu vực nghiên cứu;
- $N_{C,kj}$: tổng số ô lưới thuộc lớp j của yếu tố k ;
- N_C : tổng số ô lưới của toàn bộ khu vực nghiên cứu.

Giá trị $FR_{kj} > 1$ cho thấy lớp dữ liệu đó có mức độ liên quan cao đến sự xuất hiện trượt lở, trong khi $FR_{kj} < 1$ thể hiện mối liên hệ yếu hơn.

Để loại bỏ ảnh hưởng của sự khác biệt về thang giá trị giữa các lớp dữ liệu, các giá trị FR được chuẩn hóa theo công thức:

$$W_{kj} = \frac{FR_{kj}}{\sum_{j=1}^m FR_{kj}} \quad (3.2)$$

Trong đó:

- W_{kj} : trọng số chuẩn hóa của lớp j thuộc yếu tố k ;
- m : số lớp của yếu tố k .

Mức độ đóng góp của từng yếu tố được xác định thông qua hệ số ảnh hưởng tương đối:

$$R_k = \frac{W_{k,max} - W_{k,min}}{\min(W_{max} - W_{min})} \quad (3.3)$$

Trong đó:

- R_k : Trọng số tương đối của yếu tố k ;
- $W_{k,max}$: Giá trị trọng số chuẩn hóa lớn nhất của yếu tố k ;
- $W_{k,min}$: Giá trị trọng số chuẩn hóa nhỏ nhất của yếu tố k .

Giá trị R_k càng lớn cho thấy yếu tố đó có khả năng phân biệt tốt hơn giữa các khu vực ổn định và khu vực có nguy cơ trượt lở, đồng nghĩa với việc yếu tố đó có vai trò quan trọng hơn trong quá trình hình thành trượt lở đất.

Cuối cùng, chỉ số nguy cơ trượt lở đất được xác định bằng cách tích hợp đồng thời giá trị W_{kj} và trọng số R_k của từng yếu tố theo công thức:

$$LSI = \sum_{k=1}^n (R_k \times W_{kj}) \quad (3.4)$$

Trong đó:

- LSI : Chỉ số nguy cơ trượt lở đất;
- R_k : Trọng số của yếu tố thứ k ;
- W_{kj} : Trọng số chuẩn hóa của lớp j thuộc yếu tố k ;
- n : Số yếu tố tham gia mô hình.

Giá trị LSI càng lớn thể hiện mức độ nhạy cảm và nguy cơ xảy ra trượt lở càng cao. Giá trị chỉ số càng lớn cho thấy khả năng xảy ra trượt lở càng cao. Bản đồ chỉ số nguy cơ sau đó được phân loại thành các cấp nguy cơ khác nhau nhằm phục vụ công tác đánh giá, quản lý và quy hoạch sử dụng đất trong khu vực nghiên cứu.

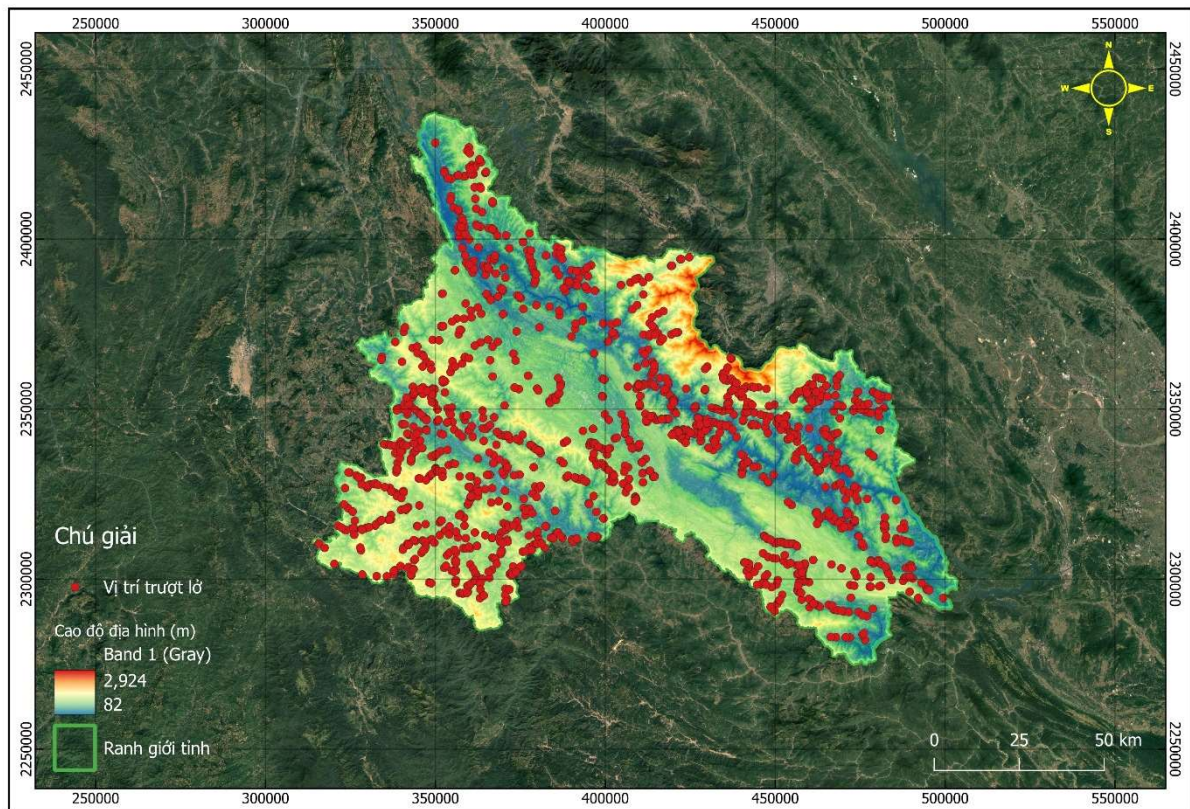
3.2. Dữ liệu nghiên cứu

3.2.1. Bản đồ kiểm kê trượt lở khu vực nghiên cứu

Tỉnh Sơn La có đặc điểm là địa hình hiểm trở, dốc đứng, khí hậu nóng ẩm và mưa theo mùa thường xuyên, là nguyên nhân gây ra nhiều loại thiên tai và sạt lở đất. Từ năm 2011 đến năm 2024, khoảng 358 người bị ảnh hưởng trực tiếp (thiệt mạng, bị thương hoặc mất tích), và thiệt hại vật chất lên tới hơn 8 nghìn tỷ đồng Việt Nam [1].

Bản đồ kiểm kê trượt lở là một trong những dữ liệu đầu vào quan trọng nhất trong nghiên cứu đánh giá và phân vùng nguy cơ trượt lở đất, bởi đây là cơ sở để xác định mối quan hệ giữa hiện tượng trượt lở đã xảy ra với các yếu tố điều kiện trong khu vực nghiên cứu. Trong nghiên cứu này, bản đồ kiểm kê trượt lở được xây dựng trên nền tảng GIS từ việc tích hợp ba lớp dữ liệu chính, bao gồm: (i) lớp dữ liệu ranh giới hành chính các tỉnh, thành phố của Việt Nam sau sắp xếp đơn vị hành chính; (ii) lớp dữ liệu ranh giới hành chính tỉnh Sơn La; và (iii) lớp dữ liệu phân bố các điểm trượt lở trên địa bàn tỉnh Sơn La. Các lớp dữ liệu được chuẩn hóa về cùng hệ tọa độ và tích hợp trong môi trường QGIS nhằm phục vụ cho quá trình quản lý, phân tích và thành lập bản đồ chuyên đề.

Dữ liệu về hiện trạng trượt lở đất được tổng hợp từ nhiều nguồn khác nhau nhằm đảm bảo tính đầy đủ và độ tin cậy của cơ sở dữ liệu. Quá trình xây dựng bản đồ kiểm kê trượt lở bao gồm việc kế thừa các kết quả khảo sát thực địa đã được thực hiện trong khu vực nghiên cứu, giải đoán và đối chiếu ảnh vệ tinh đa thời gian từ Google Earth, phân tích dữ liệu viễn thám, đồng thời thu thập và tổng hợp thông tin từ các báo cáo, công trình nghiên cứu và cơ sở dữ liệu đã được công bố trước đó. Việc kết hợp nhiều nguồn dữ liệu khác nhau giúp nâng cao độ chính xác trong việc xác định vị trí và phạm vi các điểm trượt lở, đồng thời hạn chế sai số do thiếu hụt thông tin từ một nguồn dữ liệu đơn lẻ.



Hình 3.1. Bản đồ kiểm kê trượt lở khu vực nghiên cứu

Kết quả tổng hợp và xử lý dữ liệu cho thấy đã xác định được hơn 1.500 điểm trượt lở phân bố trên địa bàn tỉnh Sơn La. Các điểm trượt lở được số hóa và lưu trữ dưới dạng dữ liệu không gian trong môi trường GIS, qua đó phản ánh tương đối đầy đủ đặc điểm phân bố không gian của hiện tượng trượt lở đất trong khu vực nghiên cứu. Bản đồ kiểm kê trượt lở không chỉ cung cấp cái nhìn trực quan về quy luật phân bố của các điểm trượt lở mà còn là cơ sở quan trọng để tính toán tỷ số tần suất, xác định trọng số các yếu tố ảnh hưởng và xây dựng mô hình phân vùng nguy cơ trượt lở đất theo phương pháp Tỷ số tần suất sửa đổi (Modified Frequency Ratio – MFR) trong các bước nghiên cứu tiếp theo.

3.2.2. Mô hình số độ cao (DEM)

Mô hình số độ cao (Digital Elevation Model – DEM) là một trong những dữ liệu nền tảng trong nghiên cứu đánh giá và phân vùng nguy cơ trượt lở đất. DEM mô tả sự phân bố độ cao của bề mặt địa hình dưới dạng số, cho phép trích xuất và phân tích nhiều yếu tố địa hình có vai trò quan trọng trong quá trình phát sinh và phát triển trượt lở đất. Theo Van Westen et al. (2008) [25], phần lớn các mô hình đánh giá nguy cơ trượt lở hiện nay đều sử dụng DEM làm nguồn dữ liệu đầu vào để xây dựng các yếu tố địa hình như độ dốc, hướng dốc, độ cong địa hình, độ cao địa hình và các chỉ số thủy văn. Các yếu tố này có ảnh hưởng trực tiếp đến sự ổn định sườn dốc thông qua việc kiểm soát quá trình phong hóa, dòng chảy mặt, khả năng thấm nước và sự tích tụ vật liệu trên sườn dốc.

Bên cạnh đó, nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng đặc điểm địa hình là một trong những yếu tố kiểm soát quan trọng nhất đối với sự hình thành trượt lở đất, đặc biệt tại các khu vực miền núi có địa hình phân cắt mạnh như tỉnh Sơn La [6, 12]. Các khu vực có độ dốc lớn, địa hình bị chia cắt mạnh hoặc có sự thay đổi đột ngột về hình thái địa hình thường có mức độ mất ổn định cao hơn và dễ xảy ra trượt lở hơn so với các khu vực địa hình bằng phẳng. Do đó, chất lượng của dữ liệu DEM có ý nghĩa quyết định đối với độ chính xác của các lớp dữ liệu địa hình dẫn xuất cũng như kết quả phân vùng nguy cơ trượt lở đất.

Trong nghiên cứu này, mô hình số độ cao SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) với độ phân giải không gian 30 m được lựa chọn làm nguồn dữ liệu đầu vào để xây dựng các yếu tố địa hình phục vụ phân tích nguy cơ trượt lở đất. Dữ liệu SRTM được Cơ quan Hàng không và Vũ trụ Hoa Kỳ (NASA) công bố và hiện là một trong những bộ dữ liệu địa hình toàn cầu được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu địa chất, địa mạo và tai biến thiên nhiên. Theo Farr et al. (2007) [10], SRTM có ưu điểm nổi bật là phạm vi phủ trùm rộng, độ chính xác tương đối cao và khả năng tiếp cận miễn phí, phù hợp cho các nghiên cứu ở quy mô vùng và cấp tỉnh. Đối với khu vực tỉnh Sơn La, độ phân giải 30 m của SRTM đáp ứng tốt yêu cầu xây dựng các lớp thông tin địa hình phục vụ mô hình đánh giá nguy cơ trượt lở đất.

Quá trình thu thập dữ liệu DEM được thực hiện trực tiếp trong môi trường QGIS. Một trong những ưu điểm của phần mềm QGIS là khả năng kết nối với các nguồn dữ liệu địa hình trực tuyến, cho phép tải dữ liệu DEM theo phạm vi nghiên cứu được xác định trước. Trong quá trình tải dữ liệu, các mảnh DEM riêng lẻ được phần mềm tự động ghép nối thành một mô hình địa hình liên tục, bao phủ toàn bộ khu vực nghiên cứu mà không cần thực hiện các thao tác ghép nối thủ công. Điều này giúp tiết kiệm thời gian xử lý và đảm bảo tính nhất quán của dữ liệu đầu vào.

Sau khi tải về, dữ liệu DEM ban đầu được lưu trữ trong hệ tọa độ địa lý WGS84. Tuy nhiên, để đảm bảo tính chính xác trong các phép tính khoảng cách, diện tích và phân tích địa hình, dữ liệu cần được chuyển đổi sang hệ tọa độ phẳng phù hợp với khu vực nghiên cứu. Trong nghiên cứu này, hệ tọa độ WGS84 UTM Zone 48N được lựa chọn do phù hợp với vị trí địa lý của tỉnh Sơn La và được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu GIS tại khu vực Tây Bắc Việt Nam. Quá trình chuyển đổi hệ tọa độ được thực hiện bằng công cụ Reproject Raster trong QGIS.

Tiếp theo, DEM được cắt theo phạm vi ranh giới hành chính tỉnh Sơn La bằng công cụ Clip Raster by Mask Layer, trong đó lớp dữ liệu ranh giới hành chính được sử dụng làm lớp mặt nạ (mask layer). Bước xử lý này giúp loại bỏ các khu vực nằm ngoài phạm vi nghiên cứu, giảm dung lượng dữ liệu và nâng cao

hiệu quả tính toán trong các bước phân tích tiếp theo. Đồng thời, việc giới hạn phạm vi DEM theo đúng khu vực nghiên cứu cũng góp phần đảm bảo tính nhất quán giữa các lớp dữ liệu đầu vào trong mô hình.

Sau khi hoàn tất các bước xử lý, mô hình DEM được kiểm tra và hiệu chỉnh để đảm bảo tính liên tục, độ chính xác không gian và sự phù hợp với hệ quy chiếu được sử dụng trong nghiên cứu. Kết quả thu được là một mô hình số độ cao hoàn chỉnh của tỉnh Sơn La, đáp ứng đầy đủ yêu cầu về độ phân giải, phạm vi không gian và hệ tọa độ. Mô hình này là cơ sở để xây dựng các bản đồ yếu tố địa hình như độ cao, độ dốc, hướng dốc, độ cong địa hình và các chỉ số địa hình khác phục vụ cho mô hình đánh giá và phân vùng nguy cơ trượt lở đất theo phương pháp Tỷ số tần suất sửa đổi (Modified Frequency Ratio – MFR).

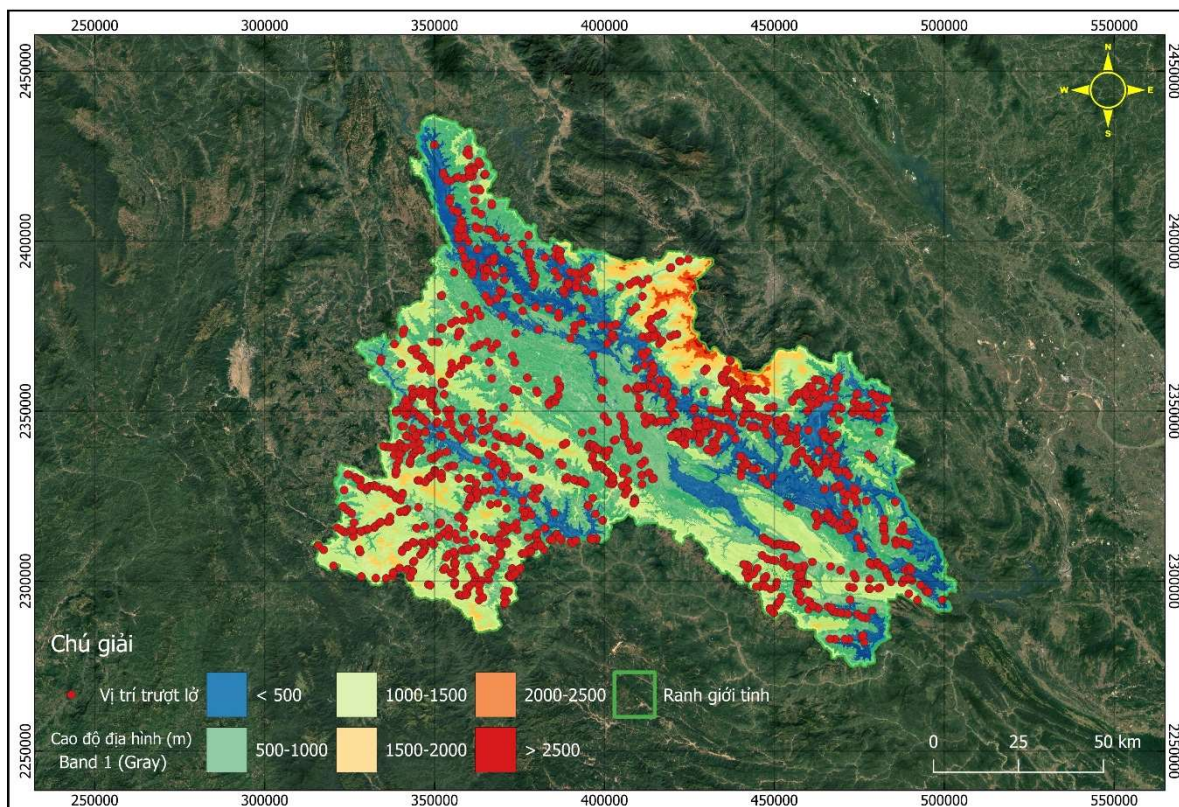
3.2.3. Bản đồ cao độ địa hình

Cao độ địa hình (Elevation) là một trong những yếu tố địa hình cơ bản thường được sử dụng trong các nghiên cứu đánh giá và phân vùng nguy cơ trượt lở đất. Sự thay đổi độ cao địa hình có ảnh hưởng trực tiếp hoặc gián tiếp đến nhiều quá trình tự nhiên như phân bố lượng mưa, nhiệt độ, độ ẩm, mức độ phong hóa đất đá, đặc điểm thảm thực vật và điều kiện thoát nước trên sườn dốc. Những yếu tố này đều có mối quan hệ chặt chẽ với quá trình hình thành và phát triển trượt lở đất. Nhiều nghiên cứu gần đây cho thấy sự phân bố của các điểm trượt lở thường tập trung trong các khoảng cao độ nhất định, phản ánh ảnh hưởng của điều kiện địa hình và môi trường đến tính ổn định của sườn dốc [18].

Trong nghiên cứu này, bản đồ cao độ địa hình được xây dựng từ dữ liệu mô hình số độ cao SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) có độ phân giải không gian 30 m. Sau khi hoàn thành các bước tiền xử lý, bao gồm chuyển đổi hệ tọa độ và cắt dữ liệu theo phạm vi nghiên cứu, lớp DEM được sử dụng trực tiếp để thành lập bản đồ cao độ trong môi trường QGIS. Mỗi ô lưới của mô hình DEM chứa thông tin về độ cao tuyệt đối so với mực nước biển trung bình, qua đó phản ánh chi tiết sự biến đổi địa hình trên toàn bộ khu vực nghiên cứu.

Đối với các nghiên cứu đánh giá nguy cơ trượt lở đất bằng phương pháp thống kê, dữ liệu cao độ liên tục cần được phân chia thành các khoảng giá trị riêng biệt để phục vụ quá trình phân tích mối quan hệ giữa sự phân bố trượt lở và các đai cao độ khác nhau. Theo Pourghasemi et al. (2013) [20], việc phân lớp các yếu tố địa hình là bước quan trọng nhằm xác định mức độ ảnh hưởng của từng khoảng giá trị đối với khả năng phát sinh trượt lở đất. Trong nghiên cứu này, dữ liệu cao độ được phân loại thành các khoảng giá trị phù hợp với đặc điểm địa hình của tỉnh Sơn La, đồng thời bảo đảm số lượng mẫu đủ lớn trong mỗi lớp để phục vụ tính toán theo phương pháp Tỷ số tần suất sửa đổi (Modified Frequency Ratio – MFR).

Quá trình xây dựng bản đồ cao độ được thực hiện bằng các công cụ xử lý raster trong QGIS. Sau khi phân loại, bản đồ được biên tập thành bản đồ chuyên đề với các cấp màu khác nhau thể hiện sự thay đổi độ cao từ thấp đến cao. Đồng thời, diện tích của từng lớp cao độ được thống kê để phục vụ tính toán các chỉ số thống kê trong giai đoạn phân tích nguy cơ trượt lở.



Hình 3.2. Bản đồ cao độ địa hình khu vực nghiên cứu

Bản đồ cao độ địa hình đóng vai trò là một trong những lớp dữ liệu đầu vào quan trọng của mô hình đánh giá nguy cơ trượt lở đất. Thông qua việc chồng xếp với bản đồ kiểm kê trượt lở, lớp dữ liệu này cho phép xác định mức độ ảnh hưởng của các đai cao độ đến sự xuất hiện của các điểm trượt lở trong khu vực nghiên cứu. Kết quả phân tích từ yếu tố cao độ sẽ được tích hợp cùng các yếu tố khác như độ dốc, hướng dốc, độ cong địa hình, khoảng cách đến sông suối, khoảng cách đến đứt gãy và hiện trạng sử dụng đất để xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ trượt lở đất theo phương pháp MFR.

Bảng 3.1. Phân tích quan hệ giữa cao độ địa hình và phân bố trượt lở

Yếu tố	Lớp yếu tố	% Diện tích	% Trượt lở	FR _{kj}	W _{kj}	R _k
Cao độ địa hình, m	< 500	20.91	31.84	1.52	0.4	6.67
	500-1000	48.98	47.98	0.98	0.26	
	1000-1500	24.99	18	0.72	0.19	
	1500-2000	4.01	2.18	0.54	0.14	
	2000-2500	0.99	0	0	0	
	> 2500	0.12	0	0	0	

Mặc dù cao độ địa hình không phải là yếu tố trực tiếp gây ra trượt lở đất, nhưng đây là tham số phản ánh tổng hợp nhiều điều kiện tự nhiên liên quan đến sự ổn định sườn dốc. Do đó, việc xây dựng và phân tích bản đồ cao độ là bước cần thiết nhằm nhận diện quy luật phân bố trượt lở theo không gian và nâng cao độ tin cậy của mô hình đánh giá nguy cơ trượt lở đất trong khu vực nghiên cứu.

3.2.4. Bản đồ độ dốc địa hình

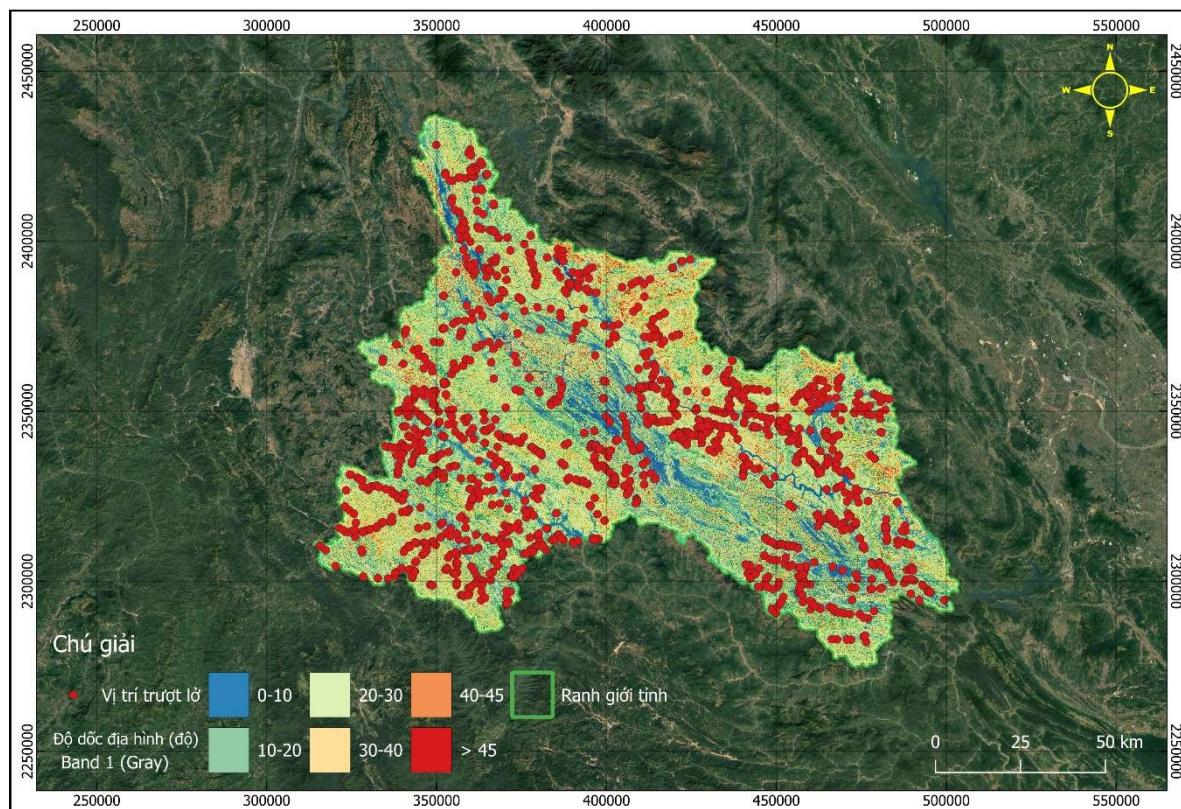
Độ dốc địa hình (Slope) là một trong những yếu tố địa hình có ảnh hưởng trực tiếp và mạnh mẽ nhất đến sự ổn định của sườn dốc, do đó được xem là biến số quan trọng trong hầu hết các nghiên cứu đánh giá và phân vùng nguy cơ trượt lở đất. Về mặt cơ học, độ dốc quyết định sự phân bố ứng suất trọng lực tác động lên vật liệu sườn dốc. Khi độ dốc tăng, thành phần trọng lực song song với mặt dốc cũng tăng theo, làm gia tăng lực gây trượt và giảm mức độ ổn định của mái dốc. Bên cạnh đó, độ dốc còn ảnh hưởng đến quá trình tập trung dòng chảy mặt, khả năng xói mòn và sự tích tụ nước trong tầng phong hóa, từ đó tác động đến khả năng phát sinh các hiện tượng trượt lở đất [11, 24].

Nhiều nghiên cứu gần đây cho thấy độ dốc là một trong những yếu tố có mức độ ảnh hưởng cao nhất trong các mô hình đánh giá nguy cơ trượt lở đất, bất kể phương pháp được sử dụng là thống kê, học máy hay mô hình vật lý. Các khu vực có địa hình dốc thường có xác suất xuất hiện trượt lở cao hơn do điều kiện cân bằng cơ học của sườn dốc dễ bị phá vỡ dưới tác động của mưa lớn, phong hóa hoặc các hoạt động nhân sinh [18]. Vì vậy, bản đồ độ dốc được xem là lớp dữ liệu không thể thiếu trong các nghiên cứu phân vùng nguy cơ trượt lở đất.

Trong nghiên cứu này, bản đồ độ dốc được xây dựng từ mô hình số độ cao (DEM) SRTM có độ phân giải không gian 30 m đã được chuẩn hóa và xử lý ở các bước trước. Quá trình tính toán được thực hiện trong môi trường phần mềm QGIS bằng công cụ Slope, thuộc nhóm công cụ phân tích địa hình của phần mềm. Công cụ này tính toán độ dốc bề mặt tại từng ô raster dựa trên sự thay đổi giá trị độ cao giữa các ô lân cận trong mô hình DEM. Kết quả thu được là lớp dữ liệu raster thể hiện độ dốc địa hình trên toàn bộ khu vực nghiên cứu.

Giá trị độ dốc được biểu diễn theo đơn vị độ ($^{\circ}$), phản ánh góc nghiêng của bề mặt địa hình so với mặt phẳng nằm ngang. Sau khi tính toán, lớp dữ liệu độ dốc được phân loại thành các khoảng giá trị phù hợp với đặc điểm địa hình của tỉnh Sơn La nhằm phục vụ phân tích thống kê theo phương pháp Tỷ số tần suất sửa đổi (Modified Frequency Ratio – MFR). Việc phân lớp độ dốc cho phép đánh giá sự khác biệt về tần suất xuất hiện trượt lở giữa các cấp độ dốc khác nhau, từ đó xác định mức độ ảnh hưởng của yếu tố này đến nguy cơ trượt lở đất trong khu vực nghiên cứu.

Bản đồ độ dốc sau khi thành lập được biên tập và trình bày dưới dạng bản đồ chuyên đề với các cấp màu thể hiện sự thay đổi từ địa hình bằng phẳng đến địa hình dốc đứng. Đồng thời, diện tích của từng cấp độ dốc được thống kê để phục vụ tính toán các chỉ số FR_{kj} , W_{kj} và trọng số của yếu tố độ dốc trong mô hình đánh giá nguy cơ trượt lở đất.



Hình 3.3. Bản đồ độ dốc địa hình khu vực nghiên cứu

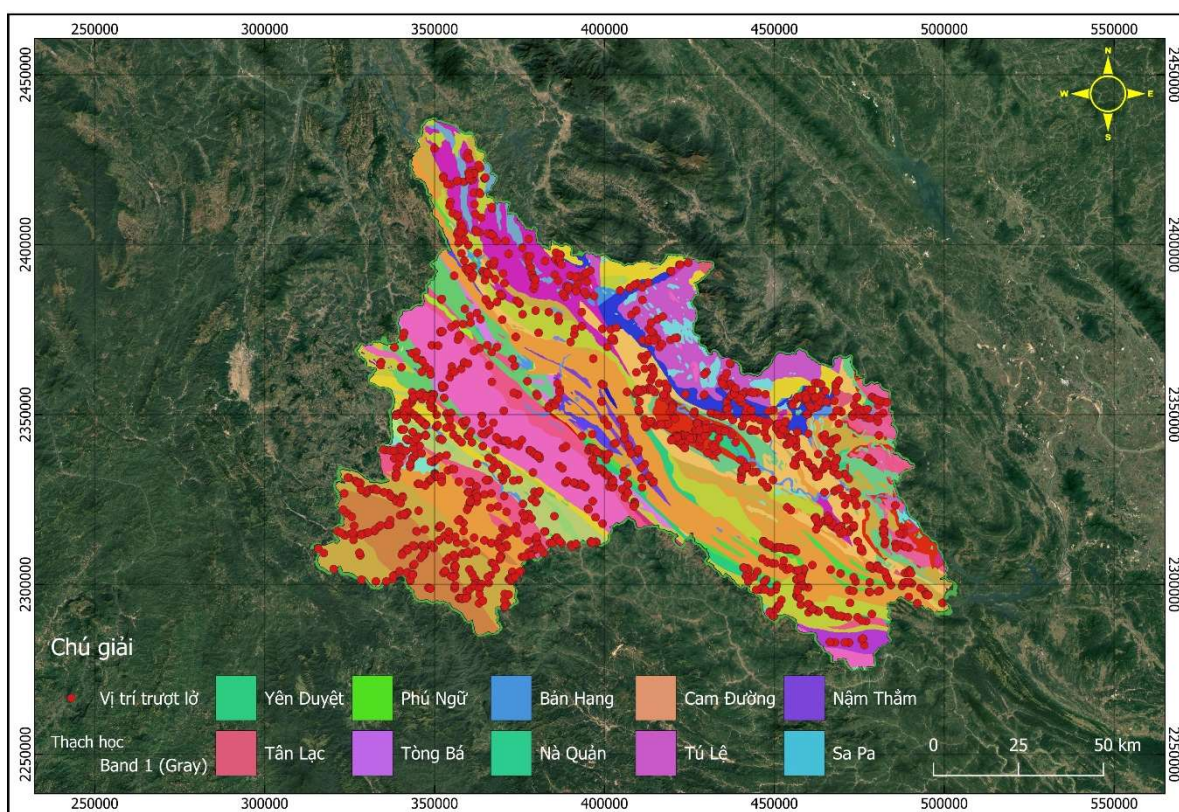
Do phản ánh trực tiếp mức độ nghiêng của bề mặt địa hình và ảnh hưởng đến trạng thái cân bằng của sườn dốc, bản đồ độ dốc được xem là một trong những lớp dữ liệu đầu vào quan trọng nhất trong nghiên cứu này. Kết quả phân tích từ yếu tố độ dốc sẽ được tích hợp với các yếu tố khác như cao độ địa hình, hướng dốc, độ cong địa hình, khoảng cách đến sông suối, khoảng cách đến đứt gãy và hiện trạng sử dụng đất nhằm xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ trượt lở đất cho khu vực nghiên cứu.

Bảng 3.2. Phân tích quan hệ giữa độ dốc địa hình và phân bố trượt lở

Yếu tố	Lớp yếu tố	% Diện tích	% Trượt lở	FR_{kj}	W_{kj}	R_k
Độ dốc địa hình, độ.	0-10	13.38	14.22	1.06	0.22	3.33
	10-20	28.31	30.49	1.08	0.23	
	20-30	36.25	37.92	1.05	0.22	
	30-40	18.41	15.76	0.86	0.18	
	40-45	2.44	1.41	0.58	0.12	
	> 45	1.21	0.19	0.16	0.03	

3.2.5. Bản đồ thạch học

Thạch học (Lithology) phản ánh đặc điểm thành phần và nguồn gốc của các loại đất đá trong khu vực nghiên cứu, đồng thời là một trong những yếu tố có ảnh hưởng đáng kể đến sự ổn định của sườn dốc. Các đặc tính cơ lý của vật liệu địa chất như độ bền kháng cắt, mức độ phong hóa, độ nứt nẻ, khả năng thấm nước và cấu trúc đất đá có vai trò quan trọng trong việc quyết định khả năng phát sinh trượt lở. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng các điểm trượt lở thường có xu hướng tập trung trong những đơn vị thạch học nhất định do sự khác biệt về tính chất cơ học và khả năng chống chịu của vật liệu trước các tác động ngoại sinh [5, 19].



Hình 3.4. Bản đồ địa chất thạch học khu vực nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, bản đồ thạch học được xây dựng từ dữ liệu bản đồ địa chất của khu vực nghiên cứu và được xử lý trong môi trường QGIS. Các đơn vị địa chất có đặc điểm vật liệu tương đồng được phân nhóm nhằm phục vụ cho quá trình phân tích thống kê. Sau khi chuẩn hóa dữ liệu, các lớp thông tin thạch học được chuyển đổi sang định dạng raster với độ phân giải đồng nhất với các lớp dữ liệu đầu vào khác của mô hình. Mỗi ô raster được gán giá trị tương ứng với đơn vị thạch học mà nó thuộc về, tạo cơ sở cho việc chồng xếp không gian với bản đồ kiểm kê trượt lở.

Bản đồ địa chất thạch học sau khi xây dựng được sử dụng để đánh giá mối quan hệ giữa sự phân bố của các điểm trượt lở và từng loại đất đá trong khu vực nghiên cứu. Theo phương pháp Tỷ số tần suất sửa đổi (Modified Frequency Ratio

– MFR), giá trị tỷ số tần suất được tính toán cho từng đơn vị thạch học nhằm xác định mức độ ảnh hưởng của các thành tạo địa chất đến khả năng phát sinh trượt lở đất. Các đơn vị thạch học có giá trị tỷ số tần suất cao được xem là những khu vực có mức độ nhạy cảm trượt lở lớn hơn so với các đơn vị còn lại.

Bảng 3.3. Phân tích quan hệ giữa địa chất thạch học và phân bố trượt lở

Yếu tố	Lớp yếu tố	% Diện tích	% Trượt lở	FR_{kj}	W_{kj}	R_k
Thạch học	Song Ma	5.42	7.1	1.31	0.02	3.5
	De tu	1.27	3.42	2.69	0.04	
	Cao Bang	1.28	0.9	0.7	0.01	
	Ban Nguon	1.28	0.9	0.7	0.01	
	Yen Duyet	1.72	2.45	1.42	0.02	
	Tan Lac	0.28	0.52	1.86	0.03	
	Ba Vi	0.004	0	0	0	
	Bac Son	2.71	1.74	0.64	0.01	
	Yen Chau	6.45	6.65	1.03	0.02	
	Ngoi Thia	3.39	2.77	0.82	0.01	
	Phu Ngu	0.003	0	0	0	
	Tong Ba	0.02	0	0	0	
	Phia Bioc	0.01	0	0	0	
	Song Chay	0.18	0.39	2.17	0.03	
	Nui Chua	0.84	0.45	0.54	0.01	
	Nui Dieng	0.07	0.13	1.86	0.03	
	Ban Hang	0.16	0	0	0	
	Na Quan	0.1	0	0	0	
	Ban Cai	2.2	3.61	1.64	0.03	
	Mau Son	0.6	0.52	0.87	0.01	
	Sinh Quyen	0.07	0	0	0	
	Po Sen	0.01	0.13	13	0.21	
	Cam Duong	0.01	0	0	0	
	Tu Le	4.71	3.29	0.7	0.01	
	Nam Co	8.48	5.16	0.61	0.01	
	Suoi Bang	9.28	9.16	0.99	0.02	
	Lan Pang	0.06	0.06	1	0.02	
	Ha Coi	0.005	0	0	0	
	Nam Tham	0.77	1.23	1.6	0.03	
	Sa Pa	0.01	0.06	6	0.1	
	Nui Vu	0.03	0	0	0	
	Xom Giau	0.002	0	0	0	
	Ben Khe	0.18	0.06	0.33	0.01	
	Phu Sa Phin	1.16	0.26	0.22	0	
	Muong Trai	5.61	7.35	1.31	0.02	
	Chieng Khuong	0.46	0.52	1.13	0.02	
	Tay Trang	4.72	4.65	0.99	0.02	
	Nam Chien	0.01	0	0	0	
	Nam Mu	1.05	0.26	0.25	0	
	Cam Thuy	0.98	0.84	0.86	0.01	

	Dong Son	0.19	0.06	0.32	0.01	
	Ban Pap	2.69	1.61	0.6	0.01	
	Dien Bien Phu	0.05	0.06	1.2	0.02	
	Pu Tra	0.03	0	0	0	
	Bo Xing	0.01	0	0	0	
	Co Noi	0.52	0.39	0.75	0.01	
	Nam Pia	1.59	1.68	1.06	0.02	
	Ha Giang	0.05	0	0	0	
	Huoi Hao	2.88	3.81	1.32	0.02	
	Suoi Be	2.77	4.52	1.63	0.03	
	Dong Giao	15.73	9.16	0.58	0.01	
	Nam Po	0.18	0.32	1.78	0.03	
	Da Dinh	0.04	0.13	3.25	0.05	
	Vien Nam	7.57	13.55	1.79	0.03	
	Nui Nua	0.12	0.13	1.08	0.02	

3.2.6. Bản đồ lượng mưa

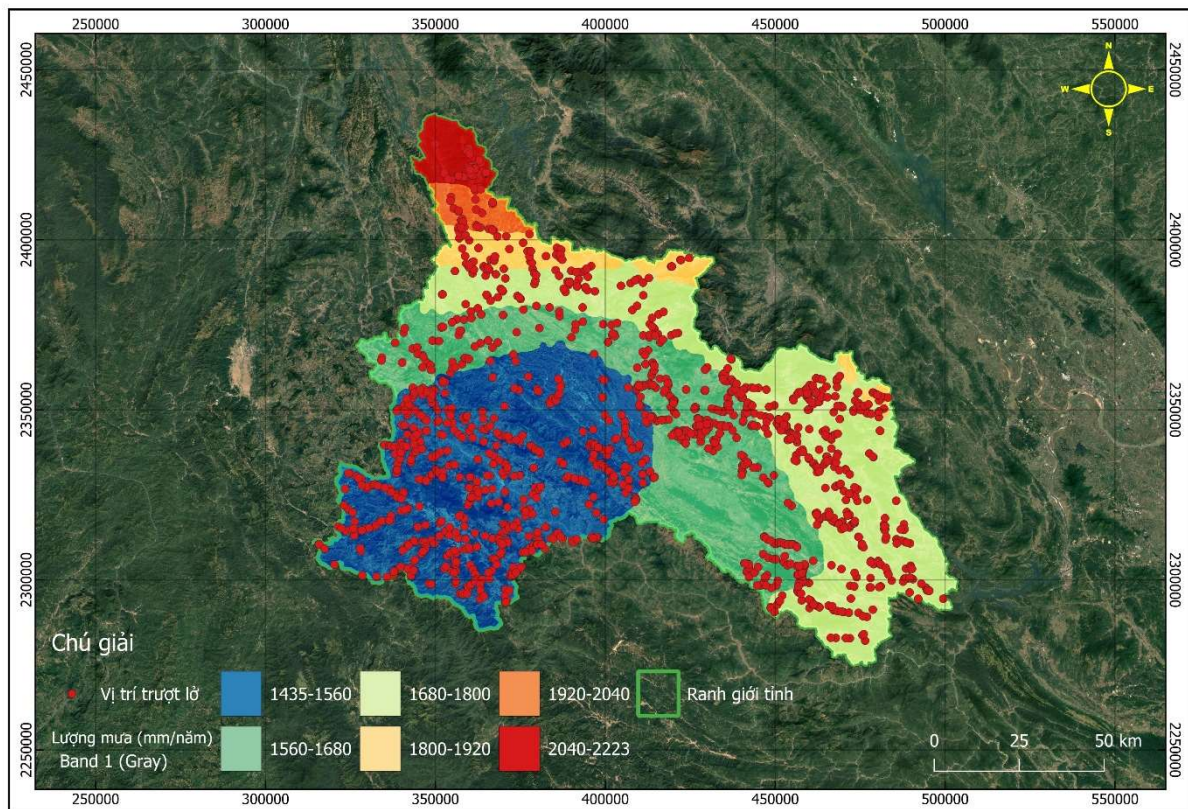
Lượng mưa được xem là một trong những yếu tố kích hoạt quan trọng nhất đối với hiện tượng trượt lở đất, đặc biệt tại các khu vực miền núi có địa hình dốc và lớp phủ phong hóa phát triển mạnh. Nước mưa có thể làm gia tăng hàm lượng nước trong đất, tăng áp lực nước lỗ rỗng, làm giảm lực kháng cắt của vật liệu và từ đó phá vỡ trạng thái cân bằng của sườn dốc. Ngoài ra, mưa lớn kéo dài còn làm gia tăng dòng chảy mặt, thúc đẩy quá trình xói mòn chân dốc và làm suy giảm độ ổn định của khối đất đá trên sườn dốc [3, 7]. Vì vậy, lượng mưa là một trong những yếu tố thường xuyên được đưa vào các mô hình đánh giá nguy cơ trượt lở đất ở quy mô khu vực và lưu vực.

Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng sự phân bố không gian của các điểm trượt lở có mối quan hệ chặt chẽ với đặc điểm phân bố lượng mưa. Các khu vực có lượng mưa lớn hoặc thường xuyên xuất hiện các trận mưa cực đoan thường có xác suất xảy ra trượt lở cao hơn so với các khu vực có lượng mưa thấp. Mặc dù lượng mưa không trực tiếp quyết định vị trí phát sinh trượt lở, nhưng đây là tác nhân kích hoạt quan trọng làm gia tăng khả năng mất ổn định của sườn dốc khi kết hợp với các điều kiện địa hình, địa chất và thảm phủ bề mặt [13].

Trong nghiên cứu này, bản đồ lượng mưa được xây dựng từ dữ liệu khí tượng và dữ liệu mưa không gian thu thập cho khu vực nghiên cứu. Các dữ liệu lượng mưa ban đầu được chuẩn hóa và xử lý trong môi trường QGIS nhằm xây dựng lớp dữ liệu phân bố lượng mưa trên toàn bộ địa bàn tỉnh Sơn La. Trường hợp dữ liệu được thu thập tại các trạm khí tượng riêng lẻ, giá trị lượng mưa được nội suy không gian bằng phương pháp phù hợp để tạo thành bề mặt lượng mưa liên tục. Các điểm dữ liệu được nội suy bằng phương pháp IDW (Inverse Distance Weighting) để xây dựng bề mặt phân bố lượng mưa liên tục cho toàn bộ khu vực nghiên cứu. Kết quả thu được là bản đồ raster thể hiện sự phân bố lượng mưa trung

binh năm trên toàn bộ khu vực nghiên cứu.

Để phục vụ phân tích theo phương pháp Tỷ số tần suất sửa đổi (Modified Frequency Ratio – MFR), dữ liệu lượng mưa liên tục được phân chia thành các khoảng giá trị khác nhau. Việc phân lớp dữ liệu cho phép đánh giá mối quan hệ giữa tần suất xuất hiện trượt lở và từng cấp lượng mưa, từ đó xác định mức độ ảnh hưởng của yếu tố lượng mưa đến nguy cơ phát sinh trượt lở đất. Các khoảng lượng mưa được lựa chọn trên cơ sở đặc điểm khí hậu của khu vực nghiên cứu và bảo đảm số lượng mẫu đủ lớn trong mỗi lớp để phục vụ quá trình tính toán thống kê.



Hình 3.5. Bản đồ lượng mưa trung bình năm khu vực nghiên cứu

Sau khi hoàn thành quá trình xử lý, bản đồ lượng mưa được chuyển đổi về cùng hệ tọa độ, phạm vi không gian và độ phân giải với các lớp dữ liệu đầu vào khác của mô hình. Bản đồ này sau đó được chồng xếp với bản đồ kiểm kê trượt lở nhằm xác định tần suất xuất hiện trượt lở trong từng lớp lượng mưa. Kết quả phân tích được sử dụng để tính toán các chỉ số FR_{kj} , W_{kj} và trọng số của yếu tố lượng mưa trong mô hình MFR.

Do phản ánh ảnh hưởng của điều kiện khí hậu đến quá trình mất ổn định sườn dốc, bản đồ lượng mưa là một trong những lớp dữ liệu đầu vào quan trọng trong nghiên cứu đánh giá nguy cơ trượt lở đất. Kết quả phân tích từ yếu tố này sẽ được tích hợp với các yếu tố địa hình, địa chất, thủy văn và hiện trạng sử dụng đất nhằm xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ trượt lở đất cho tỉnh Sơn La.

Bảng 3.4. Phân tích quan hệ giữa lượng mưa trung bình và phân bố trượt lở

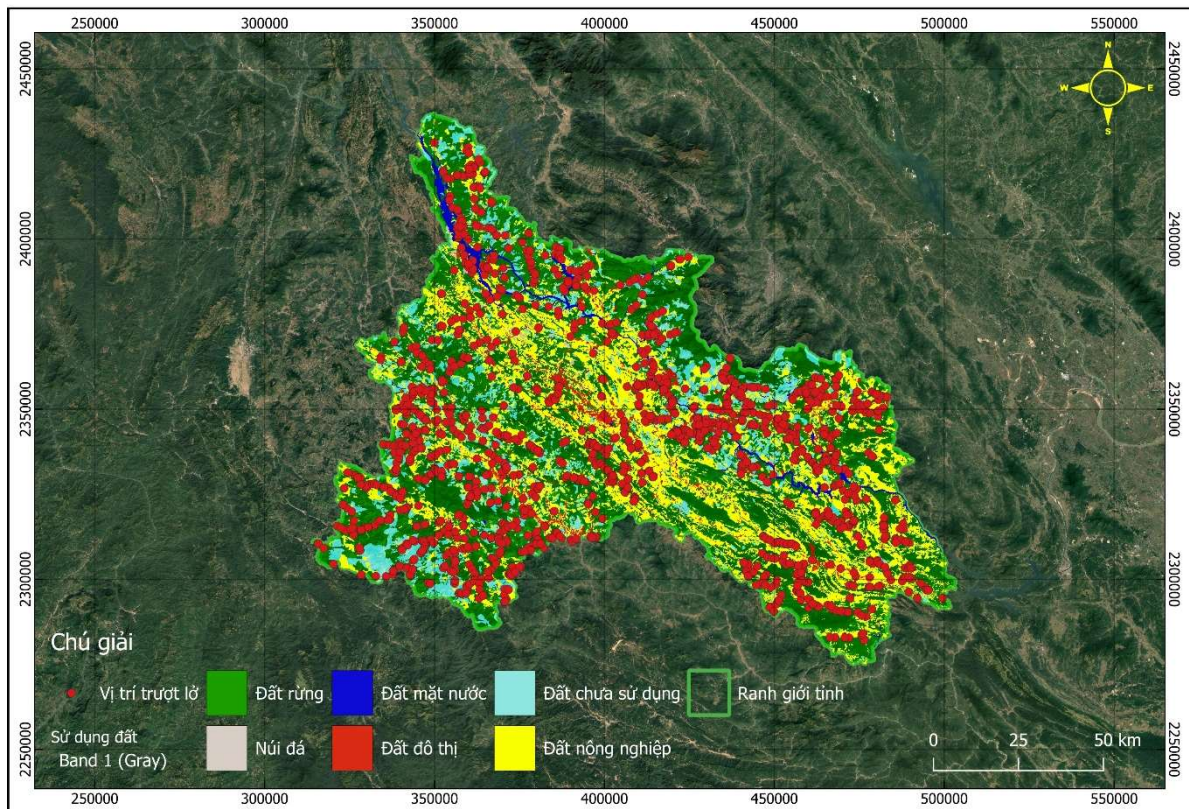
Yếu tố	Lớp yếu tố	% Diện tích	% Trượt lở	FR_{kj}	W_{kj}	R_k
Lượng mưa trung bình, mm/năm	1435-1560	35.42	39.27	1.11	0.2	1
	1560-1680	25.72	23.45	0.91	0.17	
	1680-1800	29.45	29.4	1	0.18	
	1800-1920	4.9	4.16	0.85	0.15	
	1920-2040	2.01	1.54	0.77	0.14	
	2040-2223	2.5	2.18	0.87	0.16	

3.2.7. Bản đồ sử dụng đất

Hiện trạng sử dụng đất là một trong những yếu tố có ảnh hưởng đáng kể đến sự ổn định của sườn dốc và thường được sử dụng trong các nghiên cứu đánh giá nguy cơ trượt lở đất. Các loại hình sử dụng đất khác nhau có khả năng tác động trực tiếp đến đặc tính cơ học của đất, chế độ dòng chảy mặt, khả năng thấm nước và mức độ che phủ của thảm thực vật. Trong đó, thảm thực vật có vai trò quan trọng trong việc gia tăng độ ổn định của sườn dốc thông qua hệ thống rễ cây giúp liên kết các hạt đất, giảm xói mòn bề mặt và hạn chế dòng chảy tập trung. Ngược lại, các khu vực đất trống, đất canh tác trên sườn dốc hoặc các khu vực chịu tác động mạnh của hoạt động nhân sinh thường có nguy cơ xảy ra trượt lở cao hơn do lớp phủ bảo vệ bề mặt bị suy giảm và điều kiện cân bằng tự nhiên của sườn dốc bị phá vỡ [4, 11].

Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng sự thay đổi mục đích sử dụng đất có thể làm thay đổi đáng kể mức độ nhạy cảm trượt lở của một khu vực. Quá trình chuyển đổi rừng tự nhiên sang đất sản xuất nông nghiệp, khai thác khoáng sản hoặc phát triển cơ sở hạ tầng thường làm gia tăng nguy cơ mất ổn định mái dốc do làm giảm khả năng giữ nước và gia cố đất của hệ thực vật, đồng thời làm tăng tác động của các quá trình xói mòn và phong hóa [24]. Do đó, bản đồ sử dụng đất được xem là một lớp dữ liệu quan trọng trong các mô hình đánh giá và phân vùng nguy cơ trượt lở đất.

Trong nghiên cứu này, bản đồ hiện trạng sử dụng đất được xây dựng từ dữ liệu sử dụng đất của khu vực nghiên cứu và được xử lý trong môi trường QGIS. Các loại hình sử dụng đất được chuẩn hóa và phân thành các nhóm chính như đất rừng, đất nông nghiệp, đất xây dựng, đất trống, mặt nước và các loại hình sử dụng đất khác tùy theo đặc điểm dữ liệu đầu vào. Sau khi kiểm tra và hiệu chỉnh dữ liệu không gian, lớp sử dụng đất được chuyển đổi sang định dạng raster với độ phân giải thống nhất với các lớp dữ liệu khác trong nghiên cứu nhằm bảo đảm tính đồng nhất trong quá trình phân tích.



Hình 3.6. Bản đồ sử dụng đất khu vực nghiên cứu

Tiếp theo, lớp bản đồ sử dụng đất được chồng xếp với bản đồ kiểm kê trượt lở để xác định số lượng điểm trượt lở xuất hiện trong từng loại hình sử dụng đất. Thông qua phương pháp Tỷ số tần suất sửa đổi (Modified Frequency Ratio – MFR), mức độ ảnh hưởng của từng loại hình sử dụng đất đến khả năng phát sinh trượt lở được xác định dựa trên mối quan hệ giữa mật độ điểm trượt lở và tỷ lệ diện tích của từng lớp sử dụng đất. Các loại hình sử dụng đất có giá trị tỷ số tần suất cao được xem là những khu vực có mức độ nhạy cảm trượt lở lớn hơn.

Bảng 3.5. Phân tích quan hệ giữa sử dụng đất và phân bố trượt lở

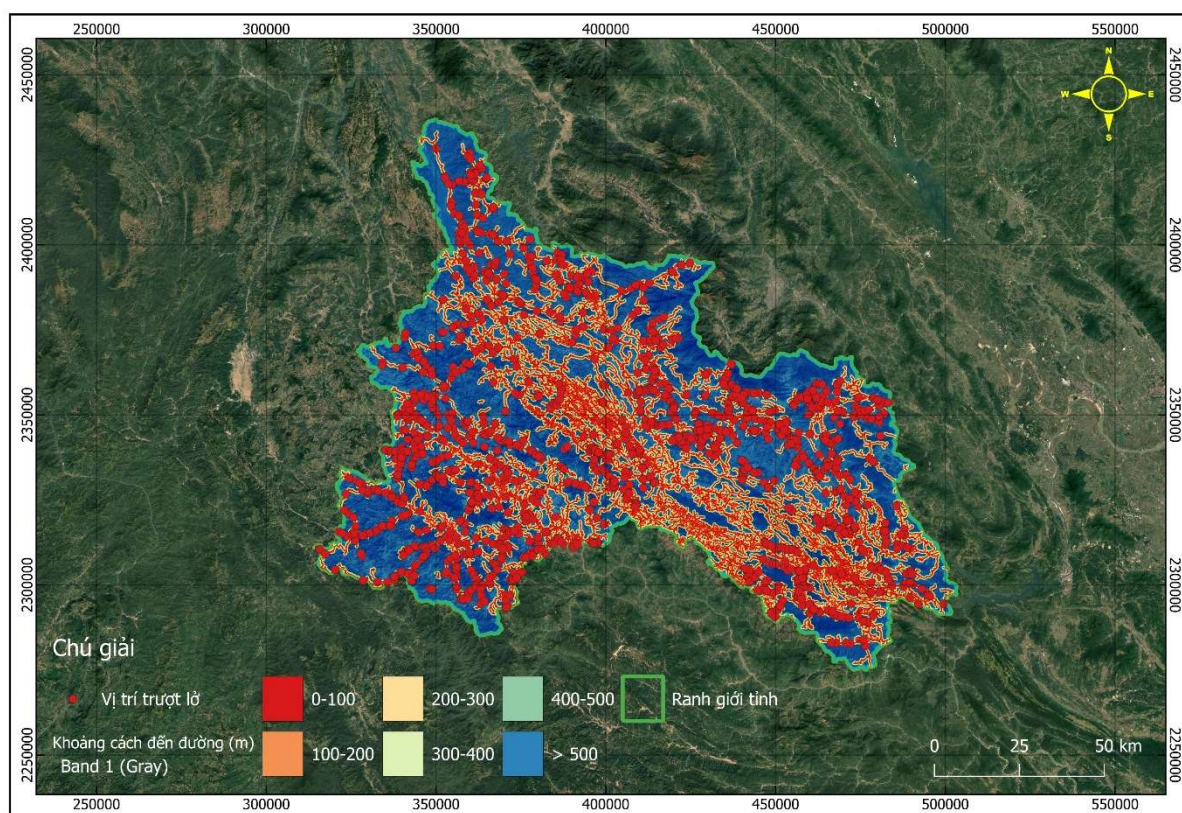
Yếu tố	Lớp yếu tố	% Diện tích	% Trượt lở	FR _{kj}	W _{kj}	R _k
Sử dụng đất	Đất rừng	49.42	35.83	0.73	0.11	5.83
	Núi đá	0.51	0.38	0.75	0.12	
	Đất mặt nước	2.18	0.26	0.12	0.02	
	Đất đô thị	4.01	9.55	2.38	0.37	
	Đất chưa sử dụng	12.94	14.74	1.14	0.18	
	Đất nông nghiệp	30.95	39.23	1.27	0.2	

Sau khi hoàn thành quá trình xử lý, bản đồ sử dụng đất được tích hợp với các lớp dữ liệu khác như cao độ địa hình, độ dốc, thạch học, lượng mưa và các yếu tố môi trường liên quan nhằm xây dựng mô hình đánh giá và phân vùng nguy cơ trượt lở đất cho khu vực nghiên cứu. Việc xem xét yếu tố sử dụng đất không chỉ phản ánh điều kiện tự nhiên mà còn thể hiện tác động của con người đến quá trình phát sinh trượt lở, góp phần nâng cao độ tin cậy của kết quả đánh giá.

3.2.8. Bản đồ khoảng cách đến đường giao thông

Mạng lưới giao thông là một trong những yếu tố nhân sinh có ảnh hưởng đáng kể đến sự ổn định của sườn dốc và thường được xem xét trong các nghiên cứu đánh giá nguy cơ trượt lở đất. Quá trình xây dựng và khai thác các công trình giao thông, đặc biệt là đường bộ tại khu vực miền núi, thường làm thay đổi điều kiện địa hình tự nhiên thông qua các hoạt động đào cắt mái dốc, đắp nền đường, phá bỏ lớp phủ thực vật và thay đổi chế độ thoát nước bề mặt. Những tác động này có thể làm suy giảm độ ổn định của khối đất đá, tạo điều kiện thuận lợi cho sự hình thành và phát triển các hiện tượng trượt lở đất [9, 23].

Nhiều nghiên cứu đã ghi nhận mật độ trượt lở thường cao hơn tại các khu vực nằm gần đường giao thông so với các khu vực ở xa. Nguyên nhân chủ yếu là do việc đào xẻ sườn dốc để mở đường làm thay đổi trạng thái cân bằng tự nhiên của địa hình, đồng thời làm gia tăng quá trình phong hóa và xói mòn tại các mái taluy. Bên cạnh đó, hệ thống thoát nước không hợp lý hoặc bị hư hỏng trong quá trình khai thác có thể làm tăng lượng nước thấm vào khối đất đá, từ đó thúc đẩy quá trình mất ổn định sườn dốc [9]. Vì vậy, khoảng cách đến đường giao thông được xem là một yếu tố quan trọng trong các mô hình đánh giá nguy cơ trượt lở đất, đặc biệt tại các khu vực miền núi có mật độ giao thông ngày càng gia tăng.



Hình 3.7. Bản đồ khoảng cách đến đường giao thông

Trong nghiên cứu này, bản đồ khoảng cách đến đường giao thông được xây dựng từ lớp dữ liệu mạng lưới giao thông của khu vực nghiên cứu. Dữ liệu đường

giao thông được chuẩn hóa và biên tập trong môi trường QGIS nhằm bảo đảm tính đầy đủ và chính xác về mặt không gian. Trên cơ sở lớp dữ liệu này, công cụ Proximity đã được sử dụng để tính toán khoảng cách từ mỗi vị trí trong khu vực nghiên cứu đến tuyến đường giao thông gần nhất. Kết quả thu được là lớp dữ liệu raster thể hiện khoảng cách liên tục từ các ô lưới đến mạng lưới giao thông.

Để phục vụ cho quá trình phân tích thống kê theo phương pháp Tỷ số tần suất sửa đổi (Modified Frequency Ratio – MFR), dữ liệu khoảng cách được phân chia thành các khoảng giá trị phù hợp với đặc điểm phân bố của mạng lưới giao thông trong khu vực nghiên cứu. Việc phân lớp khoảng cách cho phép đánh giá sự khác biệt về mật độ xuất hiện trượt lở giữa các vùng nằm gần và xa đường giao thông, từ đó xác định mức độ ảnh hưởng của yếu tố này đến khả năng phát sinh trượt lở đất.

Sau khi hoàn thành quá trình xử lý, bản đồ khoảng cách đến đường giao thông được chồng xếp với bản đồ kiểm kê trượt lở nhằm xác định số lượng điểm trượt lở xuất hiện trong từng lớp khoảng cách. Các giá trị tỷ số tần suất được tính toán cho từng khoảng cách nhằm đánh giá mối quan hệ giữa hoạt động giao thông và sự phân bố không gian của các điểm trượt lở. Kết quả phân tích sẽ được tích hợp với các yếu tố khác như địa hình, địa chất, lượng mưa và hiện trạng sử dụng đất để xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ trượt lở đất cho khu vực nghiên cứu.

Bảng 3.6. Phân tích quan hệ giữa khoảng cách đến đường và phân bố trượt lở

Yếu tố	Lớp yếu tố	% Diện tích	% Trượt lở	FR _{kj}	W _{kj}	R _k
Khoảng cách đến đường, m	0-100	18.05	52.53	2.91	0.43	7
	100-200	10.92	27.35	2.5	0.37	
	200-300	8.8	8.84	1	0.15	
	300-400	7.49	0.83	0.11	0.02	
	400-500	6.31	0.64	0.1	0.01	
	> 500	48.43	9.8	0.2	0.03	

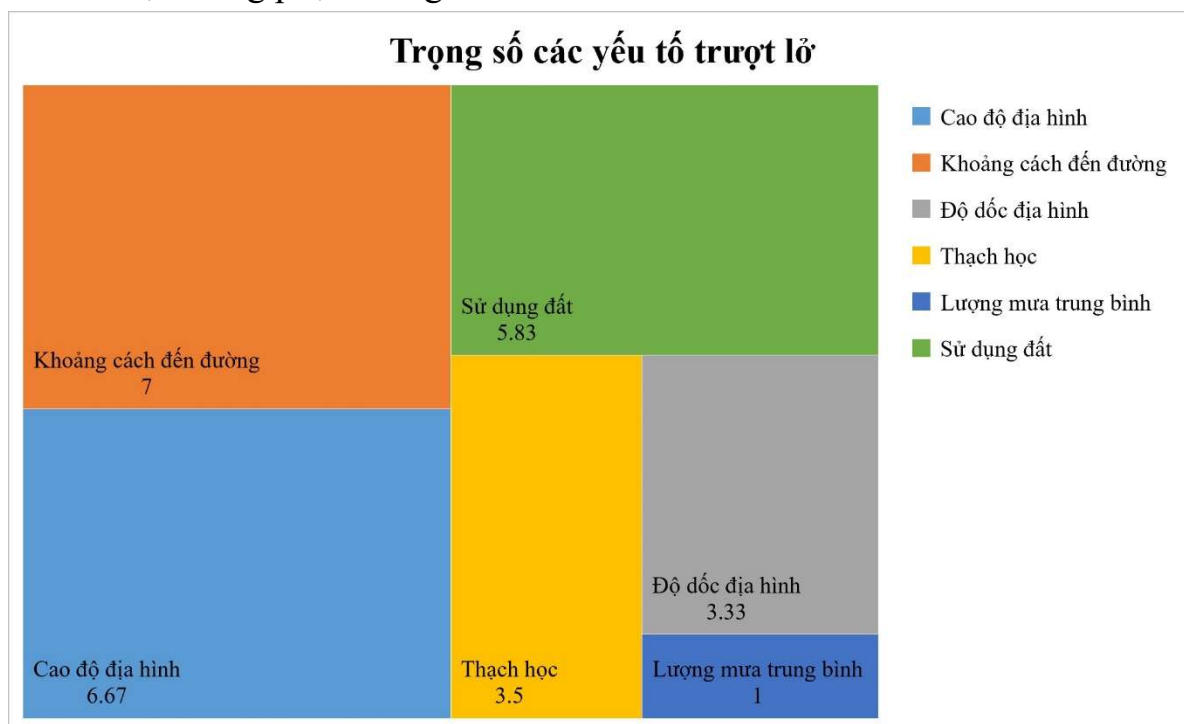
4. Kết quả phân vùng trượt lở đất

Trên cơ sở các yếu tố ảnh hưởng đến trượt lở đất gồm: cao độ địa hình, độ dốc địa hình, thạch học, lượng mưa trung bình năm, hiện trạng sử dụng đất và khoảng cách đến đường giao thông, nghiên cứu đã áp dụng phương pháp Modified Frequency Ratio (MFR) kết hợp môi trường QGIS để xây dựng bản đồ chỉ số nguy cơ trượt lở đất cho tỉnh Sơn La.

Kết quả tính toán trọng số cho thấy mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đến hiện tượng trượt lở đất là khác nhau (Hình 4.1). Trong đó, khoảng cách đến đường giao thông có trọng số lớn nhất (7.00), tiếp theo là cao độ địa hình (6.67) và sử dụng đất (5.83). Các yếu tố thạch học (3.50) và độ dốc địa hình (3.33) có mức độ ảnh hưởng trung bình, trong khi lượng mưa trung bình năm có trọng số thấp nhất (1,00).

Kết quả này cho thấy hoạt động nhân sinh, đặc biệt là quá trình xây dựng và mở rộng hệ thống giao thông miền núi, có vai trò quan trọng trong việc làm gia tăng nguy cơ mất ổn định sườn dốc. Việc cắt xẻ taluy, thay đổi trạng thái cân bằng tự nhiên của sườn dốc và gia tăng quá trình phong hóa đã tạo điều kiện thuận lợi cho các quá trình trượt lở phát sinh.

Bản đồ chỉ số nguy cơ trượt lở đất (LSI) thu được có giá trị dao động từ 0.996 đến 9.101, phản ánh sự khác biệt rõ rệt về mức độ nhạy cảm trượt lở giữa các khu vực trong phạm vi nghiên cứu.

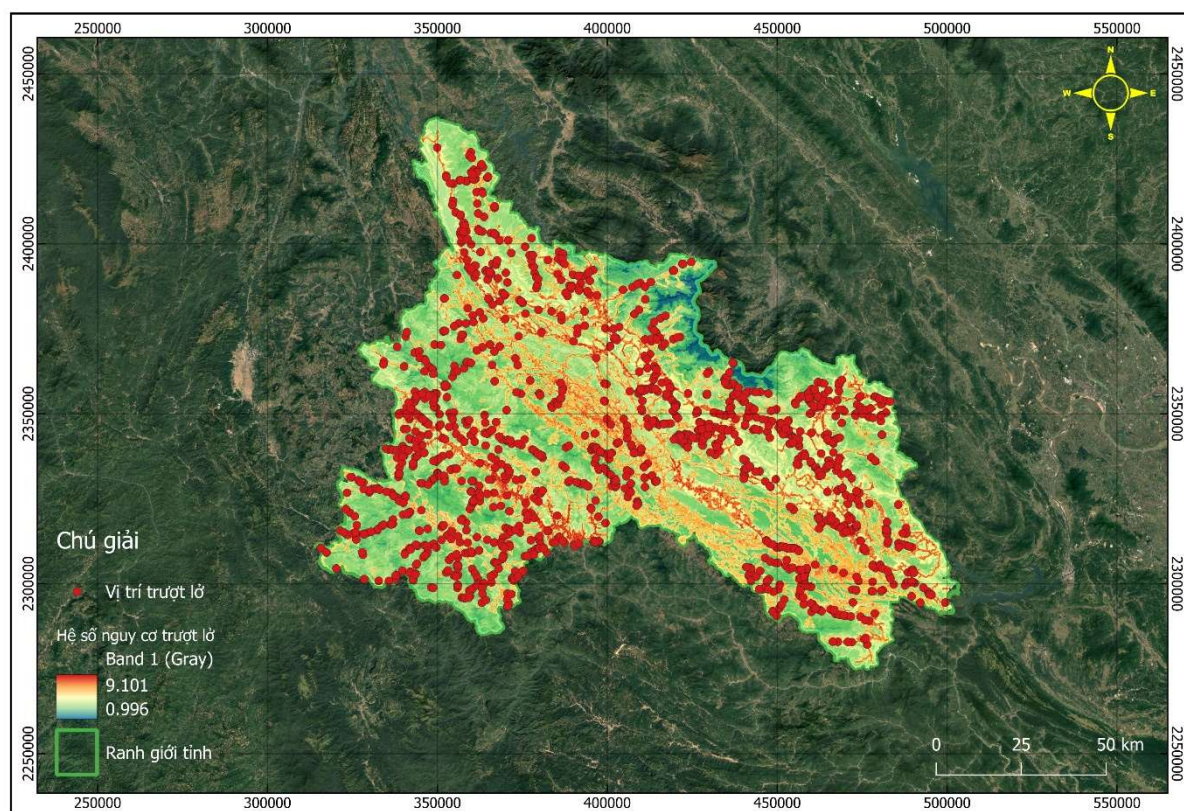


Hình 4.1. Biểu đồ trọng số các yếu tố trượt lở

Dựa trên giá trị chỉ số nguy cơ trượt lở (LSI), khu vực nghiên cứu được phân thành 5 cấp nguy cơ, bao gồm: Rất thấp (2.08%); Thấp (52.64%); Trung bình (17.68%); Cao (21.64%) và Rất cao (5.95%). Kết quả phân vùng được thể hiện trên Hình 4.3.

Quan sát bản đồ cho thấy các vùng có nguy cơ cao và rất cao tập trung chủ yếu dọc theo các tuyến giao thông chính, các sườn núi có địa hình chia cắt mạnh và những khu vực có mật độ điểm trượt lở cao. Ngược lại, các vùng nguy cơ thấp và rất thấp phân bố chủ yếu ở các khu vực địa hình tương đối ổn định, xa đường giao thông hoặc các khu vực có điều kiện địa chất ít thuận lợi cho phát sinh trượt lở.

Sự phân bố không gian của các vùng nguy cơ thể hiện rõ xu thế tập trung theo các thung lũng, sườn núi và hành lang giao thông, phù hợp với đặc điểm địa hình miền núi cao và cấu trúc địa chất phức tạp của tỉnh Sơn La.



Hình 4.2. Bản đồ hệ số nguy cơ trượt lở khu vực nghiên cứu

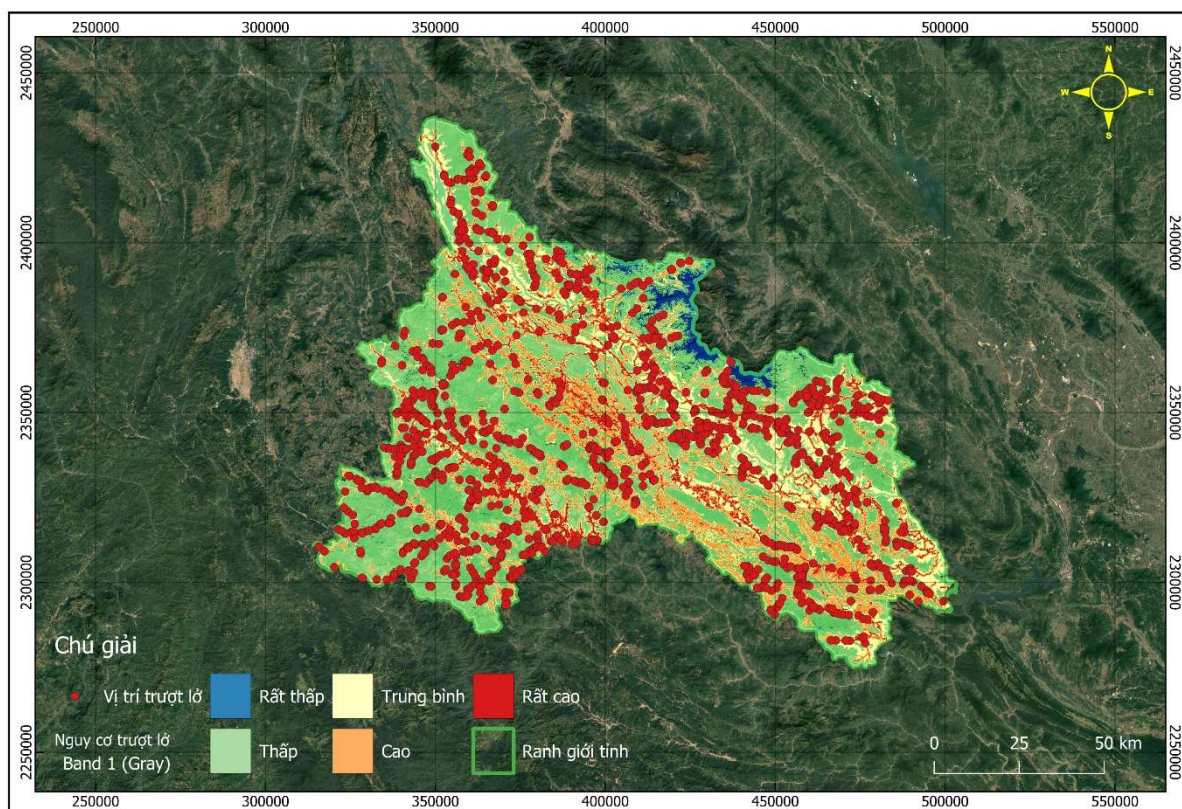
Để đánh giá độ tin cậy của bản đồ phân vùng nguy cơ trượt lở, nghiên cứu đã chồng ghép tập dữ liệu các điểm trượt lở thực tế với bản đồ phân vùng nguy cơ.

Tổng cộng có 73.02% số điểm trượt lở thực tế nằm trong các vùng được xác định có nguy cơ cao và rất cao, trong khi không có điểm trượt lở nào xuất hiện trong vùng nguy cơ rất thấp.

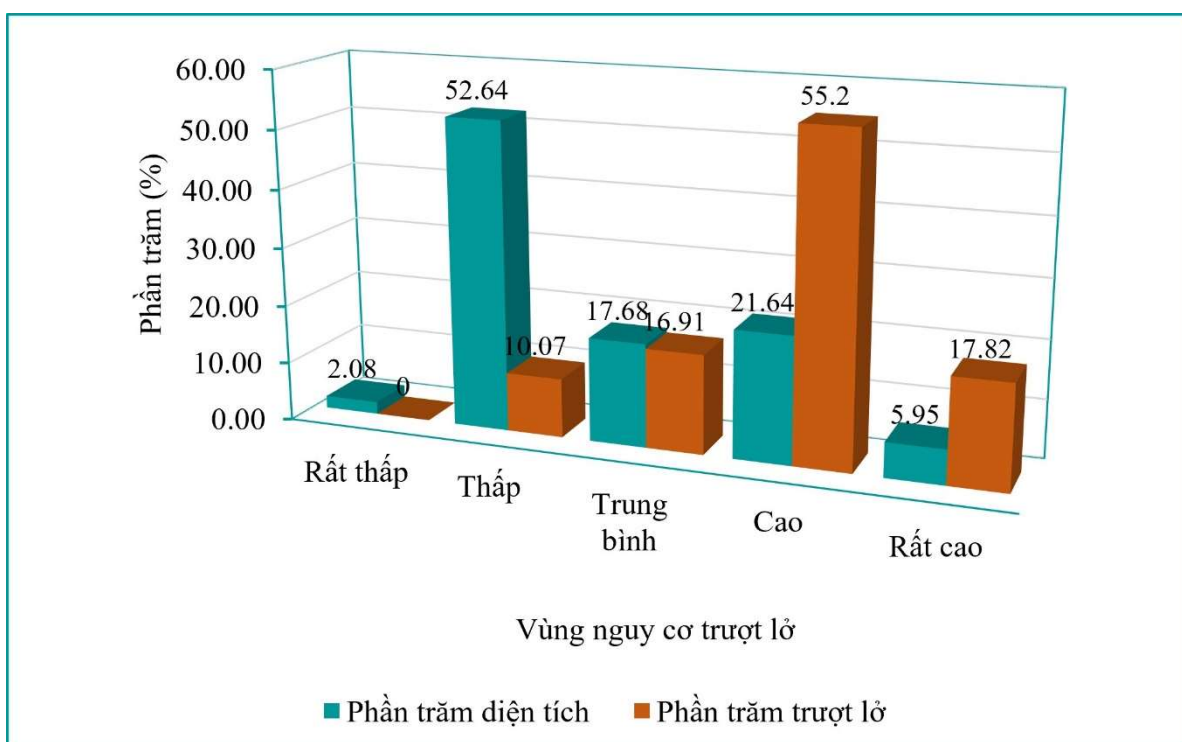
Kết quả này cho thấy mô hình phân vùng đã phản ánh tương đối chính xác quy luật phân bố không gian của hiện tượng trượt lở đất. Các khu vực được đánh giá có nguy cơ cao thực sự là nơi tập trung phần lớn các điểm trượt lở đã ghi nhận ngoài thực địa.

Đặc biệt, vùng nguy cơ cao chiếm tỷ lệ lớn nhất với 55.20% số điểm trượt lở, cho thấy đây là cấp nguy cơ có khả năng dự báo tốt nhất đối với hiện tượng trượt lở trong khu vực nghiên cứu. Trong khi đó, vùng nguy cơ rất cao chiếm 17.82%, phản ánh những khu vực có điều kiện địa hình, địa chất và tác động nhân sinh đặc biệt bất lợi đối với sự ổn định sườn dốc.

Việc hơn 90% số điểm trượt lở (90.0%) tập trung trong các vùng từ trung bình đến rất cao chứng tỏ mô hình MFR có khả năng phân tách tương đối tốt giữa các khu vực ổn định và không ổn định.



Hình 4.3. Bản đồ nguy cơ trượt lở khu vực nghiên cứu



Hình 4.4. Biểu đồ phân bố trượt lở tại các vùng nguy cơ

Kết quả nghiên cứu cho thấy nguy cơ trượt lở đất tại tỉnh Sơn La chịu sự chi phối đồng thời của các yếu tố địa hình, địa chất và hoạt động nhân sinh. Trong đó, yếu tố khoảng cách đến đường giao thông thể hiện vai trò nổi bật nhất. Điều này phù hợp với thực tế tại các tỉnh miền núi Tây Bắc, nơi quá trình xây dựng

đường giao thông thường đi kèm với hoạt động đào cắt taluy có độ dốc lớn, làm suy giảm độ ổn định của sườn dốc.

Ngoài ra, yếu tố cao độ địa hình và sử dụng đất cũng có ảnh hưởng đáng kể đến sự hình thành trượt lở. Các khu vực có địa hình cao, chia cắt mạnh thường đi kèm với độ dốc lớn và quá trình xói mòn mạnh, trong khi các khu vực có lớp phủ thực vật bị suy giảm hoặc chịu tác động của hoạt động sản xuất nông nghiệp dễ phát sinh mất ổn định mái dốc hơn.

Mặc dù lượng mưa được xem là tác nhân kích hoạt quan trọng đối với trượt lở đất, kết quả nghiên cứu cho thấy trọng số của yếu tố này tương đối thấp. Nguyên nhân có thể do dữ liệu lượng mưa được sử dụng ở dạng trung bình nhiều năm, chưa phản ánh được các trận mưa cực đoan ngắn hạn – yếu tố thường đóng vai trò quyết định trong việc kích hoạt các sự kiện trượt lở tại khu vực miền núi.

Nhìn chung, bản đồ phân vùng nguy cơ trượt lở đất được xây dựng đã thể hiện tốt sự phù hợp với dữ liệu thực tế, có thể sử dụng làm cơ sở khoa học phục vụ công tác quy hoạch sử dụng đất, quy hoạch giao thông, cảnh báo thiên tai và quản lý rủi ro trượt lở đất trên địa bàn tỉnh Sơn La.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng thành công bản đồ phân vùng nguy cơ trượt lở đất cho tỉnh Sơn La trên cơ sở tích hợp dữ liệu không gian trong môi trường QGIS và áp dụng phương pháp Tỷ số tần suất sửa đổi (Modified Frequency Ratio – MFR). Sáu yếu tố ảnh hưởng chính được lựa chọn để phân tích gồm: cao độ địa hình, độ dốc địa hình, thạch học, lượng mưa trung bình năm, hiện trạng sử dụng đất và khoảng cách đến đường giao thông.

Kết quả phân tích cho thấy mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đến nguy cơ trượt lở đất là không giống nhau. Trong đó, khoảng cách đến đường giao thông là yếu tố có mức độ tác động lớn nhất với trọng số $R_k = 7.00$, tiếp theo là cao độ địa hình ($R_k = 6.67$) và sử dụng đất ($R_k = 5.83$). Các yếu tố thạch học ($R_k = 3.50$) và độ dốc địa hình ($R_k = 3.33$) có mức độ ảnh hưởng trung bình, trong khi lượng mưa trung bình năm ($R_k = 1.00$) có mức độ ảnh hưởng thấp nhất trong mô hình nghiên cứu. Kết quả này phản ánh vai trò nổi bật của các yếu tố địa hình và hoạt động nhân sinh đối với sự hình thành và phát triển trượt lở đất tại khu vực miền núi Sơn La.

Trên cơ sở tổng hợp các trọng số của các yếu tố ảnh hưởng, bản đồ chỉ số nguy cơ trượt lở đất được thành lập với giá trị dao động từ 0.996 đến 9.101. Kết quả phân vùng đã chia khu vực nghiên cứu thành năm cấp nguy cơ gồm: rất thấp, thấp, trung bình, cao và rất cao. Các vùng nguy cơ cao và rất cao tập trung chủ yếu tại các khu vực địa hình chia cắt mạnh, sườn dốc lớn và dọc theo các tuyến

giao thông chính, trong khi các vùng nguy cơ thấp phân bố ở những khu vực có điều kiện địa hình và địa chất ổn định hơn.

Kết quả kiểm chứng bằng dữ liệu kiểm kê trượt lở cho thấy 55.20% số điểm trượt lở nằm trong vùng nguy cơ cao và 17.82% nằm trong vùng nguy cơ rất cao. Như vậy, tổng cộng 73.02% số điểm trượt lở thực tế tập trung trong hai cấp nguy cơ cao nhất của mô hình. Đồng thời, không ghi nhận điểm trượt lở nào trong vùng nguy cơ rất thấp. Điều này chứng tỏ mô hình MFR đã phản ánh tương đối tốt quy luật phân bố không gian của hiện tượng trượt lở đất và có khả năng dự báo phù hợp đối với khu vực nghiên cứu.

Kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học phục vụ công tác quy hoạch sử dụng đất, quy hoạch phát triển hạ tầng giao thông, quản lý tài nguyên và giảm nhẹ rủi ro thiên tai tại tỉnh Sơn La. Đồng thời, nghiên cứu cũng cho thấy khả năng ứng dụng hiệu quả của phần mềm mã nguồn mở QGIS trong xây dựng cơ sở dữ liệu, xử lý thông tin không gian và thành lập bản đồ phân vùng nguy cơ trượt lở đất ở quy mô cấp tỉnh.

6. Tài liệu tham khảo

1. Нгия Н.Ч., Экзарьян В.Н., Бинь З.В., 2025. Количественная оценка роли природных и техногенных факторов активизации оползней в провинции Шонла, Вьетнам. Известия высших учебных заведений Геология и разведка, Vol. 67, Issue 4, pp. 142-157.
2. Пендин В. В., Фоменко И. К., 2015. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. 320 с.р. ЛЕНАНД, Москва.
3. Aleotti P., Chowdhury R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 58, Issue 1, pp. 21-44. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>
4. Beguería S., 2006. Changes in land cover and shallow landslide activity: A case study in the Spanish Pyrenees. Geomorphology, Vol. 74, Issue 1, pp. 196-206. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X05002692>
5. Budimir M. E. A., Atkinson P. M., Lewis H. G., 2015. A systematic review of landslide probability mapping using logistic regression. Landslides, Vol. 12, Issue 3, pp. 419-436. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0550-5>
6. Corominas J., van Westen C., Frattini P., et al., 2014. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 73, Issue 2, pp. 209-263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
7. Crozier M. J., 2010. Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review. Geomorphology, Vol. 124, Issue 3, pp. 260-267. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X10001881>
8. Cruden D., Varnes D. J., 1996. Landslide Types and Processes. In Robert L. Schuster, A. Keith Turner, (eds), Landslides: investigation and mitigation. Transportation Research Board, U.S. National Academy of Sciences. pp. 36-75. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-003.pdf>

9. Dahal R. K., Hasegawa S., Nonomura A., et al., 2008. GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*, Vol. 54, Issue 2, pp. 311-324. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0818-3>
10. Farr T. G., Rosen P. A., Caro E., et al., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, Vol. 45, Issue 2. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
11. Glade T., Anderson M., Crozier M., 2005. *Landslide Hazard and Risk*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, England.
12. Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, Vol. 31, Issue 1, pp. 181-216. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
13. Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M., Stark C. P., 2008. The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, Vol. 5, Issue 1, pp. 3-17. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1>
14. Highland L., Bobrowsky P., 2008. *The Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides*. 129p. US Geological Survey Circular 1325, Reston, Virginia.
15. Karaman M. O., Çabuk S. N., Pekkan E., 2022. Utilization of frequency ratio method for the production of landslide susceptibility maps: Karaburun Peninsula case, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 29, Issue 60, pp. 91285-91305. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21931-2>
16. Lee S., Pradhan B., 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, Vol. 4, Issue 1, pp. 33-41. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0047-y>
17. McDonnell R., Burrough P. A., 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. 332p. Oxford University Press, Oxford, New York.
18. Merghadi A., Yunus A. P., Dou J., et al., 2020. Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A comparative overview of algorithm performance. *Earth-Science Reviews*, Vol. 207, pp. 103225. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825220302713>
19. Nefeslioglu H. A., Gokceoglu C., Sonmez H., 2008. An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *Engineering Geology*, Vol. 97, Issue 3, pp. 171-191. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795208000148>
20. Pourghasemi H., Pradhan B., Gokceoglu C., Moezzi K. D., 2013. A comparative assessment of prediction capabilities of Dempster–Shafer and Weights-of-evidence models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vol. 4, Issue 2, pp. 93-118. <https://doi.org/10.1080/19475705.2012.662915>
21. QGIS Development Team, 2025. QGIS Geographic Information System. <https://qgis.org>.

22. Reichenbach P., Rossi M., Malamud B. D., et al., 2018. A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, Vol. 180, pp. 60-91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>
23. Sarkar S., Kanungo D., 2004. An Integrated Approach for Landslide Susceptibility Mapping Using Remote Sensing and GIS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 70, pp. 617–625.
24. Sidle R. C., Ochiai H., 2006. Natural Factors Influencing Landslides. *Landslides: Processes, Prediction, and Land Use*. pp. 41-119. <https://doi.org/10.1002/9781118665954.ch3>
25. van Westen C. J., Castellanos E., Kuriakose S. L., 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, Vol. 102, Issue 3, pp. 112-131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
26. Varnes D. J., 1978. Slope Movement Types and Processes. In Robert L Schuster, Raymond J Krizek, (eds), *Landslides: Analysis and Control Special Report 176*. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington. pp. 11-33. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr176/176-002.pdf>