

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP TỶ SỐ TẦN SUẤT KẾT HỢP GIS TRONG XÂY DỰNG BẢN ĐỒ NGUY CƠ TRƯỢT LỞ ĐẤT HUYỆN PÁC NẶM – TỈNH BẮC KẠN

Hà Thị Hằng^{a,*}, Khúc Thành Đông^a, Lê Văn Thao^b, Nguyễn Thanh Phương^b, Đỗ Thị Phương Thảo^b

^a*Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
số 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

^b*Khoa Trắc Địa - Bản đồ và quản lý đất đai, Trường Đại học Mỏ - Địa chất,
số 18 phố Viên, quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 21/9/2022, Sửa xong 27/10/2022, Chấp nhận đăng 04/11/2022

Tóm tắt

Trượt lở đất là một trong những tai biến địa chất nguy hiểm nhất tại các khu vực vùng núi, đe dọa trực tiếp tới tính mạng và tài sản của con người. Trong khi đó, bản đồ nguy cơ trượt lở đất có thể cung cấp những thông tin hữu ích trong việc lập kế hoạch ứng phó hoặc cảnh báo sớm trước mỗi mùa mưa bão. Tình trạng biến đổi khí hậu như hiện nay khiến cho tai biến trượt lở đất càng trở nên khó lường, điều này đòi hỏi các bản đồ nguy cơ trượt lở cần được cập nhật thường xuyên, liên tục. Bên cạnh đó, sự hạn chế về nhân lực và trang thiết bị tại các tỉnh vùng núi của Việt Nam cũng đặt ra những thách thức không nhỏ. Vì vậy, nghiên cứu này đề xuất sử dụng phương pháp tỷ số tần suất FR kết hợp GIS trong thành lập bản đồ nguy cơ trượt lở cho huyện Pác Nặm, tỉnh Bắc Kạn. Trong đó, sử dụng 146 điểm trượt lở lịch sử và 10 yếu tố đầu vào liên quan chặt chẽ với điều kiện địa hình, môi trường, khí hậu khu vực nghiên cứu. Kết quả kiểm chứng cho thấy bản đồ nguy cơ trượt lở đất có thể ứng dụng hiệu quả trong quản lý, phòng tránh và giảm thiểu thiệt hại do tai biến trượt lở.

Từ khóa: bản đồ nguy cơ trượt lở; phương pháp tỷ số tần suất; GIS; huyện Pác Nặm.

APPLICATION OF FREQUENCY RATIO METHOD AND GIS IN LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAP-
PING FOR PAC NAM DISTRICT, BAC KAN PROVINCE

Abstract

Landslides are one of the most dangerous geological hazards in mountainous areas that directly threaten human lives and properties every year. Meanwhile, a landslide susceptibility map can provide useful information for local authorities in implementing suitable land-use planning, mitigating, and establishing the early warning system. Facing the current global climate change, landslide events also have been unpredictable and complicated. This fact requires landslide susceptibility maps need to be updated regularly and continuously. In addition, the mountain areas of Vietnam have faced the limitation of human resources and types of equipment. This proposed method has the capacity for quick calculation and high reliability. Thus, this study used the FR model and GIS technology to build a landslide susceptibility map for the Pac Nam district, Bac Kan province. This proposed method has the capacity for quick calculation and high reliability. The input data consists of 146 historical landslide positions and 10 layers related to the topographical, environmental, and climatic conditions. Based on the ROC curve analysis results of the test dataset, the resulting map of this study can be effectively applied in the management, prevention, and mitigation of landslide risks in mountainous regions.

Keywords: landslide susceptibility map; frequency ratio; GIS; Pac Nam district.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2023-17\(1V\)-07](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2023-17(1V)-07) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: hanght@huce.edu.vn (Hằng, H. T.)

1. Giới thiệu

Trượt lở đất (TLĐ) là một trong những loại hình thiên tai phổ biến nhất trên thế giới cũng như ở Việt Nam. Trượt lở đất từ lâu đã được xem là một trong những tai biến địa chất nguy hiểm nhất, bởi chúng đe dọa trực tiếp tới tính mạng con người, tài sản, cơ sở hạ tầng. Tình trạng biến đổi khí hậu đang diễn ra trên toàn cầu, cùng với đó là các hoạt động nhân sinh (phá rừng, bạt núi mở đường, ...), lượng mưa lớn tập trung và kéo dài nhiều ngày, địa hình, địa chất bất lợi, ... được xem là những yếu tố kích hoạt, góp phần tạo nên sự hình thành tai biến trượt lở đất tại các khu vực vùng núi [1]. Theo đó, tai biến trượt lở đất được dự báo sẽ ngày càng gia tăng cả về tần suất xuất hiện lẫn cường độ phá hủy [2]. Từ trước tới nay, bản đồ dự báo xu hướng và nguy cơ xảy ra trượt lở đất vẫn được xem là một phương thức quản lý rủi ro trượt lở đất một cách hiệu quả nhất, bởi chúng cung cấp những thông tin hữu ích liên quan đến vị trí không gian của những khu vực dễ xảy ra trượt lở. Điều này giúp cho các cơ quan quản lý có kế hoạch quy hoạch, sử dụng đất phù hợp, hoặc có kế hoạch ứng phó, di dời nhà cửa trước mỗi mùa mưa bão, hoặc thực hiện các giải pháp cảnh báo sớm tới người dân. Mặc dù vậy, trước diễn biến bất thường của thời tiết, sự phức tạp của các loại hình tai biến trượt lở đất, điều kiện vật chất hiện có mà mỗi đơn vị, cơ quan, cá nhân có thể sử dụng các phương thức lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất khác nhau nhằm đảm bảo độ chính xác dự báo theo yêu cầu cũng như đáp ứng được những yêu cầu kỹ thuật hiện có của địa phương [3].

Trên thế giới, việc ứng dụng các phương pháp phân tích thống kê đa biến trong xây dựng bản đồ nguy cơ trượt lở đất được tiến hành rộng khắp ở nhiều nơi, nhiều quốc gia trong những năm gần đây bởi tính linh hoạt, dễ hiểu và dễ ứng dụng [4, 5]. Đây được xem là nhóm phương pháp đánh giá định lượng, giảm thiểu tính chủ quan của con người và tạo ra các kết quả dự báo đáng tin cậy [5]. Theo cách tiếp cận này, nhiều phương pháp đã được áp dụng cho đánh giá, thành lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất, trong đó có thể kể đến phương pháp hồi quy tuyến tính hay phương pháp hồi quy logistic [6, 7], hoặc phương pháp tỷ số tần suất [8–13], hoặc phương pháp giá trị thông tin [4], hoặc phương pháp trọng số bằng chứng [14–16]. Trong đó, phương pháp tỷ số tần suất là phương pháp được sử dụng phổ biến hơn cả trong thành lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất với nhiều ưu điểm như: độ chính xác dự báo tin cậy, dễ thao tác, có thể cập nhật liên tục, dễ dàng, ... [8, 11].

Nhìn chung, việc nghiên cứu và ứng dụng các phương pháp phân tích thống kê đa biến trong lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất được tiến hành rộng rãi ở nhiều nơi trên thế giới, trong đó, phương pháp tỷ số tần suất được ứng dụng rộng rãi trong đánh giá nguy cơ trượt lở đất cho các khu vực nghiên cứu ở các quy mô khác nhau. Hầu hết các nghiên cứu này đều sử dụng một tập hợp các yếu tố đầu vào có vai trò quan trọng đối với sự hình thành tai biến trượt lở đất trong khu vực nghiên cứu, như: lượng mưa, độ cao, độ dốc địa hình, địa chất, lớp phủ thực vật, vô phong hóa, khoảng cách tới đường giao thông, ... Bên cạnh khả năng có thể đánh giá nguy cơ trượt lở cho các khu vực địa lý rộng lớn, phương pháp tỷ số tần suất còn có rất nhiều ưu điểm như: đánh giá mang tính khách quan, có khả năng lặp lại của phép phân tích với các biến số khác nhau, thao tác dễ dàng, linh hoạt, ... đây được xem là những ưu thế vượt trội của phương pháp tỷ số tần suất so với các phương pháp đánh giá truyền thống trước đây [15]. Đặc biệt, phương pháp tỷ số tần suất không đòi hỏi cấu hình máy tính quá mạnh, các thao tác xử lý đơn giản, rất phù hợp cho các đơn vị quản lý ở vùng núi, nơi vẫn còn hạn chế về mặt công nghệ cũng như về nhân lực [17].

Ở Việt Nam, trong những năm gần đây, tai biến trượt lở đất xảy ra với tần suất và cường độ ngày càng tăng, gây ra những thiệt hại nghiêm trọng, điển hình ở các tỉnh miền núi phía Bắc, trong đó có huyện Pác Nặm – Tỉnh Bắc Kạn [18]. Trượt lở đất là một dạng tai biến vừa có tính chất tiềm ẩn, vừa có tính chất hiểm họa, gây rất nhiều thiệt hại lớn, những khó khăn bất lợi cho cuộc sống sinh hoạt của người dân [3]. Do đó, việc lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất nhằm phục vụ công tác cảnh báo sớm tới

người dân hay hỗ trợ ra quyết định đối với những đơn vị quản lý là việc làm hết sức cần thiết và có ý nghĩa. Chính vì vậy, trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu sử dụng các phương pháp phân tích thống kê khác nhau trong đánh giá nguy cơ trượt lở đất tại những khu vực vùng núi khác nhau. Điển hình như có nghiên cứu ứng dụng phương pháp chỉ số thống kê trong dự báo nguy cơ trượt lở đất khu vực xã Nấm Dần, huyện Xín Mần, tỉnh Hà Giang [19] hoặc cho khu vực thành phố Bắc Kạn [20]; hoặc sử dụng hàm hồi quy tính toán thể tích khối trượt và bản đồ dự báo quy mô thể tích khối trượt tại thị xã Bắc Kạn [21].

Ở Việt Nam, có hai nhóm yếu tố chính gây ra sạt lở đất bao gồm: nhóm yếu tố ảnh hưởng và nhóm yếu tố tác động. Đối với nhóm yếu tố ảnh hưởng, có tới 39 yếu tố bao gồm: hình thái địa hình, địa chất - thủy văn và hoạt động con người. Đối với các yếu tố tác động đến sạt lở đất, bao gồm: mưa, động đất và hoạt động của con người, trong đó, lượng mưa được xem là yếu tố tác động chính [18]. Tuy nhiên, việc thu thập đầy đủ và lựa chọn các yếu tố đầu vào này cho những nghiên cứu đánh giá nguy cơ trượt lở đất không hề đơn giản, điều này phụ thuộc lớn vào tính sẵn có cũng như tầm quan trọng của những dữ liệu này.

Từ các lý do nêu trên, dựa trên các nguồn dữ liệu sẵn có và thu thập được, cũng như tình hình trang thiết bị tại khu vực huyện Pác Nặm – tỉnh Bắc Kạn, nghiên cứu này đề xuất sử dụng phương pháp tỷ số tần suất Frequency Ratio (FR) – thuộc nhóm phương pháp phân tích thống kê đa biến – trong thành lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất huyện Pác Nặm – tỉnh Bắc Kạn nhằm phục vụ công tác cảnh báo sớm cũng như hỗ trợ ra quyết định, phòng tránh và giảm thiểu rủi ro do tai biến trượt lở.

2. Quy trình nghiên cứu và dữ liệu sử dụng

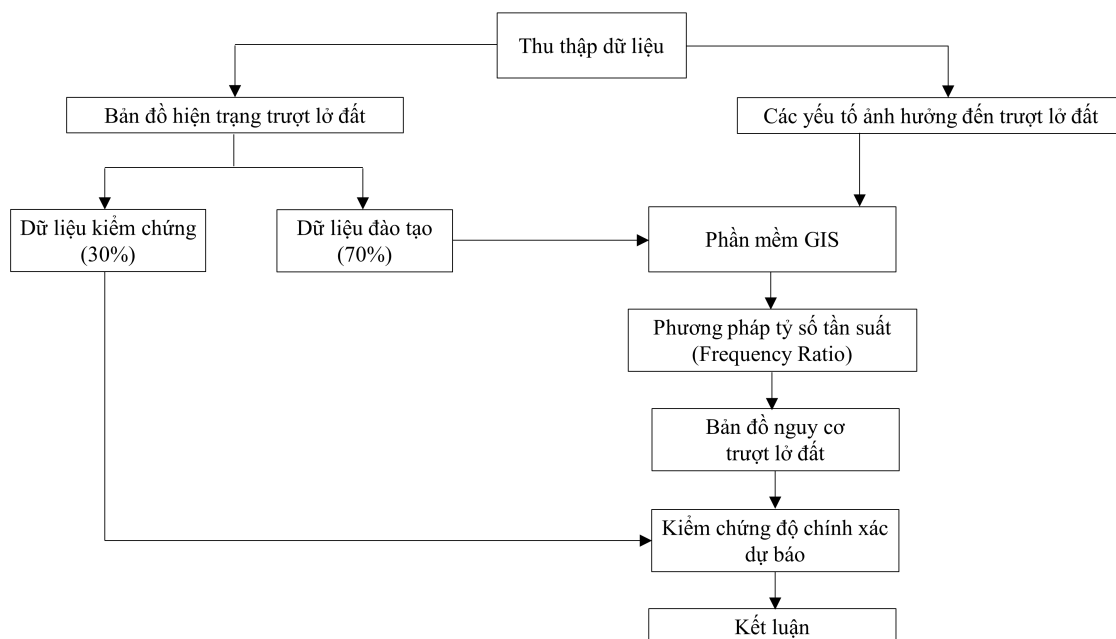
2.1. Khu vực nghiên cứu

Pác Nặm là một huyện miền núi, nằm ở phía Bắc của tỉnh Bắc Kạn, cách trung tâm Thành phố Bắc Kạn khoảng 95 km. Phía Đông giáp huyện Nguyên Bình (tỉnh Cao Bằng); phía Tây giáp huyện Na Hang (tỉnh Tuyên Quang); phía Bắc giáp huyện Bảo Lâm, Bảo Lạc (tỉnh Cao Bằng); phía Nam giáp huyện Ba Bể (tỉnh Bắc Kạn). Tổng diện tích đất tự nhiên năm 2021 của huyện là 47.364 ha. Với đặc thù là huyện miền núi, Pác Nặm có địa hình phức tạp, có độ dốc lớn (trung bình từ 400 – 1.200 m so với mặt nước biển), chia cắt mạnh.

Huyện Pác Nặm có hệ thống sông ngòi khá dày đặc, gồm có 3 con sông lớn: Sông Năng, sông Công Bằng, sông Nghiên Loan. Hệ thống suối bao gồm trên 40 con suối lớn nhỏ: Suối Nặm Khiêu (Nhạn Môn), suối Khuổi Tuôn (Nghiên Loan), suối Nà Lại, Khuổi Mạn (Bằng Thành), suối Khuổi Khiêu (Bộc Bó), suối Khuổi Trảng (Giáo Hiệu), ... Lượng mưa trung bình năm của huyện là 1.346 mm, trong đó, các tháng có lượng mưa lớn là tháng 4, 5, 6, 7 trong năm, với tổng lượng mưa của 4 tháng này chiếm tới 90% tổng lượng mưa cả năm. Chính vì vậy, trong nhiều năm qua, Pác Nặm là một trong những huyện chịu thiệt hại nặng nề nhất của tỉnh Bắc Kạn do ảnh hưởng của mưa lũ và trượt lở đất đá [18].

2.2. Quy trình nghiên cứu

Sơ đồ quy trình nghiên cứu được thể hiện trong Hình 1. Trong đó, dữ liệu thu thập phục vụ cho đánh giá, thành lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất bao gồm: 1). Bản đồ hiện trạng trượt lở đất; 2). Các yếu tố ảnh hưởng tới trượt lở đất. Trên cơ sở các nguồn dữ liệu thu thập, tiến hành phân tích, đánh giá và tính toán trong phần mềm GIS theo nội dung của phương pháp tỷ số tần suất FR. Từ đó, xây dựng bản đồ nguy cơ trượt lở đất và kiểm chứng độ chính xác dự báo của bản đồ kết quả này.



Hình 1. Sơ đồ quy trình nghiên cứu

2.3. Dữ liệu sử dụng

Trong nghiên cứu này, dữ liệu được sử dụng bao gồm:

a. Bản đồ hiện trạng trượt lở đất

Bản đồ hiện trạng trượt lở đất là thông số đầu vào quan trọng nhất trong các mô hình đánh giá nguy cơ trượt lở đất bởi nó mô tả và cung cấp các vị trí không gian đã từng xảy ra trượt lở đất trong quá khứ [5]. Trong nghiên cứu này, bản đồ hiện trạng trượt lở đất bao gồm 146 điểm trượt lở được thu thập thông qua dữ liệu lịch sử trong giai đoạn từ năm 2011 – 2021 tại Ban chỉ đạo Phòng chống lụt bão huyện Pắc Nặm. Bản đồ hiện trạng trượt lở đất không chỉ phục vụ cho đánh giá nguy cơ mà còn có thể sử dụng để kiểm chứng độ chính xác của bản đồ dự báo vì “quá khứ và hiện tại là chìa khóa cho tương lai. Những điều kiện và quá trình hình thành trượt lở đã và đang xảy ra cũng sẽ diễn ra tương tự ở trong tương lai” [22]. Trong nghiên cứu này, 146 vị trí trượt lở lịch sử được chia ngẫu nhiên thành 2 tập mẫu: 1). 70% tập điểm đào tạo (102 vị trí trượt lở); 2). 30% tập điểm kiểm tra (44 vị trí trượt lở).

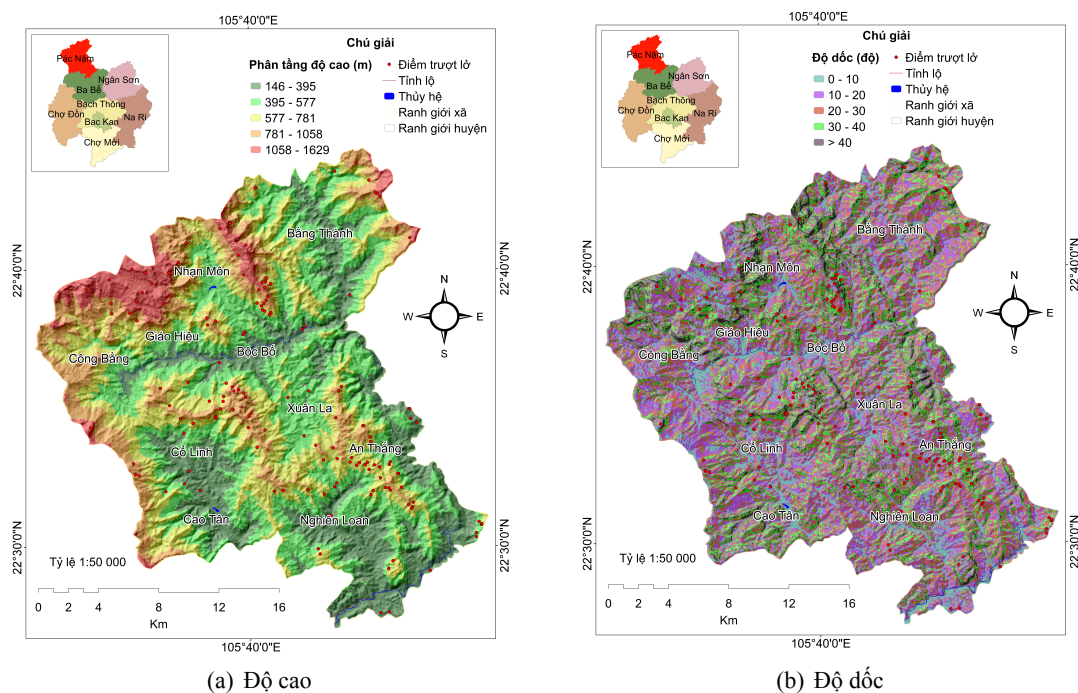
b. Các yếu tố ảnh hưởng đến trượt lở đất

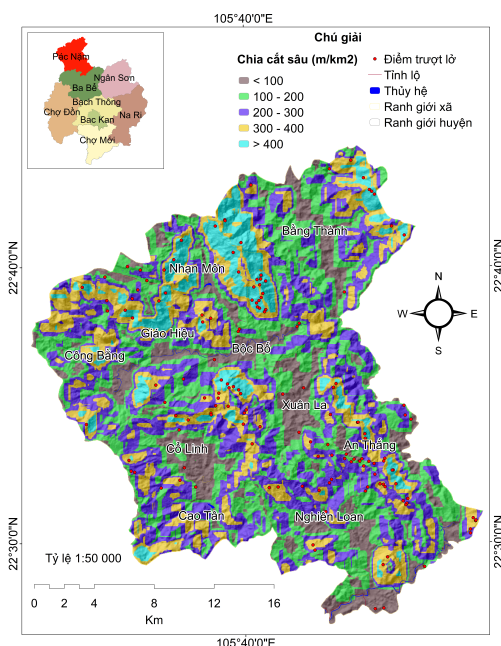
Việc thu thập đầy đủ các yếu tố phục vụ cho đánh giá nguy cơ trượt lở đất là một việc rất khó khăn, bên cạnh đó, quá trình phân tích, chồng xếp trong GIS cũng khá phức tạp. Chính vì vậy, nhiều nghiên cứu đã sử dụng các yếu tố đánh giá chủ yếu dựa vào tính sẵn có, khả năng thu thập chúng cũng như quy mô, diện tích khu vực nghiên cứu. Trong nghiên cứu này, căn cứ vào nguồn dữ liệu thu thập được, quy mô khu vực nghiên cứu, lựa chọn 10 yếu tố chính cho đánh giá nguy cơ trượt lở đất (Bảng 1), bao gồm: 1). Độ cao; 2). Độ dốc địa hình; 3). Chia cắt ngang; 4). Chia cắt sâu; 5). Chỉ số độ ẩm địa hình TWI; 6). Sử dụng đất; 7). Lượng mưa trung bình; 8). Thạch học; 9). Vỏ phong hóa; 10). Đới cấu trúc.

Bảng 1. Dữ liệu sử dụng trong đánh giá nguy cơ trượt lở đất tại huyện Pác Nặm

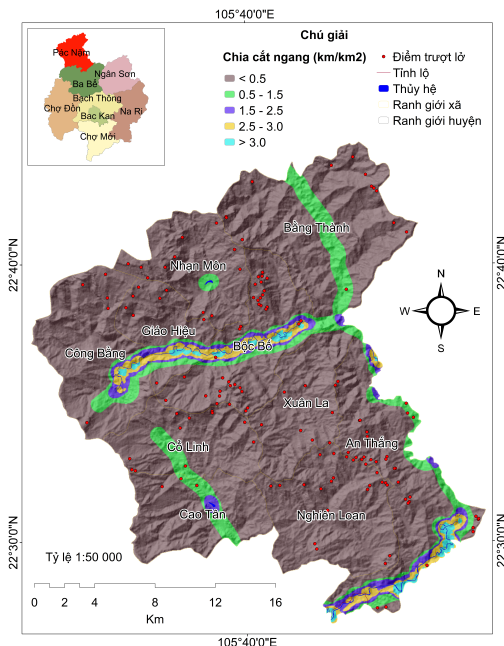
STT	Các yếu tố lựa chọn	Nguồn	Độ phân giải không gian	Năm thu thập	Định dạng dữ liệu
1	Độ cao	Earthdata Search	30 m	2020	Grid
2	Độ dốc	Earthdata Search	30 m	2020	Grid
3	Chia cắt ngang	Bản đồ mật độ sông suối – Bộ Tài nguyên và Môi trường	30 m	2015	Vector
4	Chia cắt sâu	Dẫn xuất từ DEM	30 m	2020	Grid
5	TWI	Dẫn xuất từ DEM	30 m	2020	Grid
6	Lượng mưa trung bình năm	7 trạm đo mưa	-	2020	Point
7	Sử dụng đất	Tổng cục quản lý đất đai – Bộ Tài nguyên và Môi trường	1:50 000	2020	Vector
8	Thạch học		1:50 000	2015	Vector
9	Vỏ phong hóa	Tổng cục địa chất khoáng sản – Bộ Tài nguyên và Môi trường	1:50 000	2015	Vector
10	Đới cấu trúc		1:50 000	2015	Vector

Các yếu tố ảnh hưởng này được xử lý, tính toán, chuyển đổi và hiển thị dưới dạng dữ liệu raster với độ phân giải không gian là 30 m trong phần mềm ArcGIS 10.5 (Hình 2).

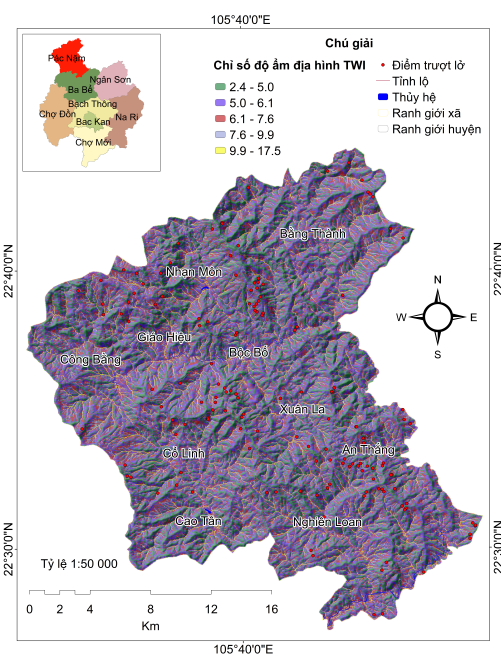




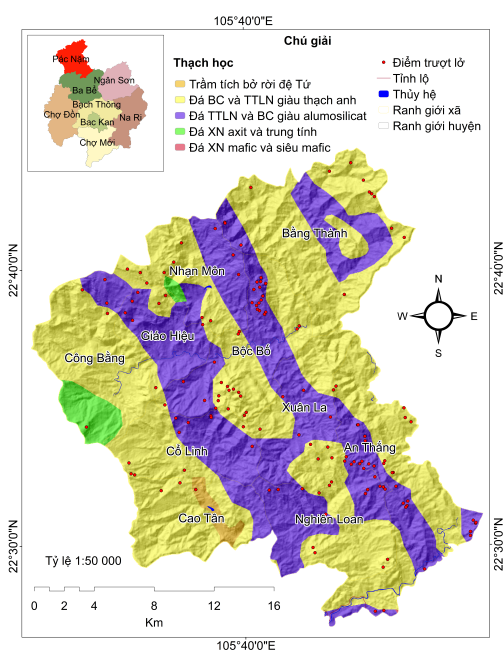
(c) Chia cắt sâu



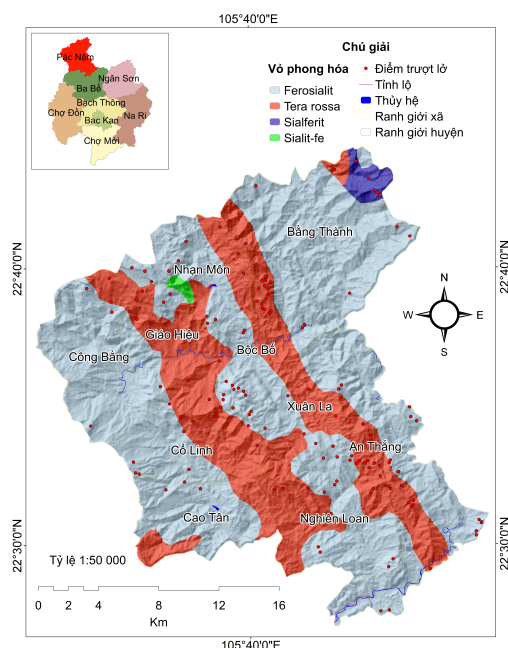
(d) Chia cắt ngang



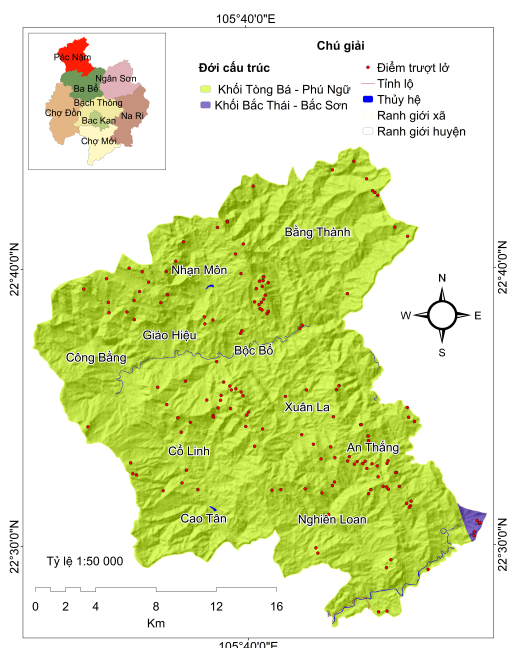
(e) Chỉ số độ ẩm địa hình TWI



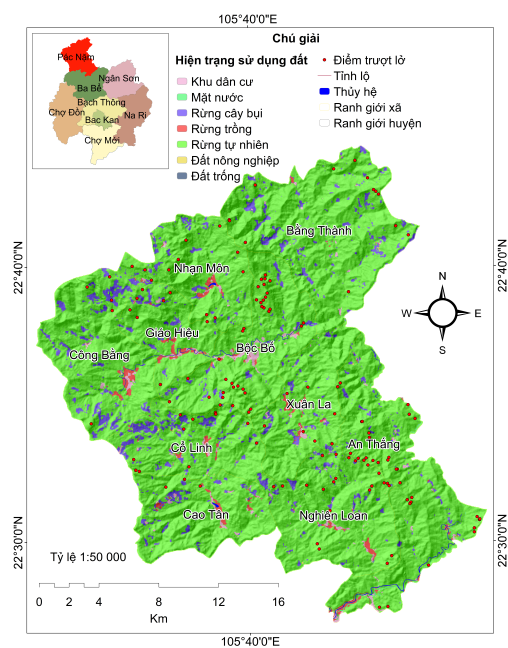
(f) Thạch học



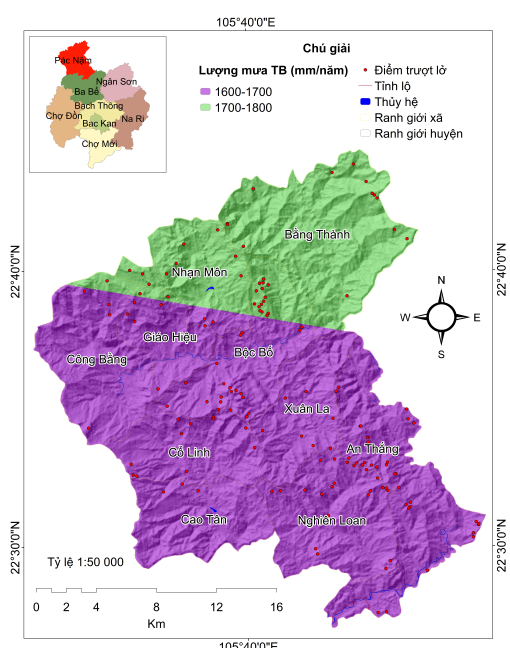
(g) Vỏ phong hóa



(h) Đới cấu trúc



(i) Sử dụng đất



(j) Lượng mưa TB năm

Hình 2. Bản đồ 10 lớp yếu tố chuyên đề sử dụng trong đánh giá nguy cơ trượt lở

3. Phương pháp nghiên cứu

3.1. Phương pháp tỷ số tần suất FR

Phương pháp tỷ số tần suất là một trong những mô hình xác suất đơn giản được đề xuất từ rất lâu, phương pháp này dựa trên các mối quan hệ không gian giữa hiện trạng trượt lở đã từng xảy ra trong quá khứ với các yếu tố ảnh hưởng tới sự hình thành trượt lở [23]. Theo đó, giá trị FR cao hơn cho thấy mối quan hệ không gian chặt chẽ hơn giữa các sự kiện trượt đất và yếu tố ảnh hưởng [24]. Giá trị tỷ lệ tần suất cho từng yếu tố gây ra trượt lở được tính toán bằng cách kết hợp giữa bản đồ hiện trạng trượt lở và bản đồ các yếu tố gây ra trượt lở theo phương trình sau [24]:

$$FR = \frac{N_i^p / N}{N_i^{Lp} / N_L} \quad (1)$$

trong đó:

- FR là giá trị tỷ số tần suất của từng yếu tố ảnh hưởng đến trượt lở đất.
- N_i^p là số lượng pixel trong mỗi lớp yếu tố ảnh hưởng đến trượt lở đất.
- N là tổng số lượng pixel trong khu vực nghiên cứu.
- N_i^{Lp} là số lượng pixel trượt lở phân bố trong mỗi lớp yếu tố ảnh hưởng đến trượt lở đất.
- N_L là tổng số lượng pixel trượt lở trong toàn bộ khu vực nghiên cứu.

Bản đồ chỉ số nhạy cảm trượt lở đất LSI (Landslide Susceptibility Index) được tạo ra bằng cách tổng hợp tất cả các giá trị FR của n yếu tố ảnh hưởng trong môi trường GIS theo công thức sau [24]:

$$LSI = FR_1 + FR_2 + \dots + FR_n \quad (2)$$

Bản đồ chỉ số nhạy cảm trượt lở đất LSI này sẽ được phân loại lại để tạo thành bản đồ phân vùng nguy cơ trượt lở đất. Chỉ số LSI cho biết mức độ nhạy cảm của khu vực nghiên cứu với sự xuất hiện của tai biến trượt lở đất. Theo đó, nếu giá trị này càng lớn thì cho thấy khả năng xảy ra tai biến trượt lở đất càng lớn và ngược lại, giá trị này càng nhỏ thì cho thấy khả năng xảy ra tai biến trượt lở đất càng thấp [25].

3.2. Phương pháp đường cong ROC

Bản đồ nguy cơ trượt lở đất có thể kiểm chứng thông qua vị trí các điểm trượt lở thu thập được trong tương lai, hoặc thông qua việc sử dụng các chỉ số thống kê, hoặc thông qua việc xác định giá trị diện tích dưới đường cong AUC (Area Under the Curve) ghi nhận tín hiệu ROC (Receiver Operating Characteristic) [4, 5]. Phương pháp đường cong ROC là một trong những phương pháp kiểm chứng độ chính xác dự báo phổ biến và kinh điển trong các nghiên cứu đánh giá trượt lở đất [26–30]. Do đó, trong nghiên cứu này, độ chính xác của bản đồ dự báo nguy cơ trượt lở được đánh giá bằng phương pháp diện tích dưới đường cong AUC. Trong đó, giá trị diện tích dưới đường cong AUC đại diện cho mối quan hệ giữa tỷ lệ phần trăm của bản đồ nguy cơ trượt lở và tỷ lệ điểm ảnh trượt lở sử dụng cho quá trình đào tạo hoặc cho quá trình kiểm tra. Nếu giá trị AUC càng cao thì hiệu suất dự báo của mô hình càng chính xác, cụ thể, nếu AUC bằng 1 thì mô hình dự báo rất tốt; nếu AUC bằng 0,5 thì mô hình không có giá trị dự báo. Thông thường, hiệu suất dự báo của mô hình là xuất sắc khi $AUC = 0,9 - 1,0$; tốt khi $AUC = 0,8 - 0,9$; khá khi $AUC = 0,6 - 0,7$; không giá trị khi $AUC = 0,5 - 0,6$ [26, 27].

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Kết quả xác định giá trị FR của các yếu tố ảnh hưởng đến trượt lở đất

Bản đồ hiện trạng trượt lở đất với 102 điểm trượt lở (70% tập điểm đào tạo) được chồng xếp riêng biệt với từng loại bản đồ chuyên đề trong môi trường GIS để tính toán giá trị FR của 10 lớp yếu tố ảnh hưởng đến trượt lở đất. Kết quả tính toán giá trị FR của 10 yếu tố ảnh hưởng đến trượt lở đất trên địa bàn huyện Pác Nặm, tỉnh Bắc Kạn được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả tính toán giá trị FR của 10 yếu tố ảnh hưởng đến trượt lở đất tại huyện Pác Nặm

TT	Lớp dữ liệu	Phân lớp	Số pixel trong từng phân lớp	% số pixel trong từng phân lớp (A)	Số pixel trượt lở trong từng phân lớp	% số pixel trượt lở trong từng phân lớp (B)	FR = B/A
1	Độ cao (m)	146 - 395	133518	23,02	24300	10,20	1,606
		395 - 577	184607	31,83	20700	12,24	0,990
		577 - 781	145034	25,01	16200	38,78	0,986
		781 - 1058	83950	14,48	3600	27,89	0,379
		1058 - 1629	32806	5,66	900	10,88	0,242
		Tổng	579915	100	65700	100	4,203
2	Độ dốc (độ)	0 - 10	83343	14,37	10800	6,80	1,144
		10 - 20	159575	27,52	16200	21,09	0,896
		20 - 30	174246	30,05	18000	29,93	0,912
		30 - 35	120863	20,84	14400	31,29	1,052
		> 35	41888	7,22	6300	10,88	1,328
		Tổng	579915	100	65700	100	5,331
3	TWI	2,4 - 5,0	188979	32,59	22500	35,37	1,051
		5,0 - 6,1	214414	36,97	22500	42,86	0,926
		6,1 - 7,6	114336	19,72	12600	14,29	0,973
		7,6 - 9,9	44037	7,59	5400	7,48	1,082
		9,9 - 17,5	18149	3,13	2700	0,00	1,313
		Tổng	579915	100	65700	100	5,345
4	Thạch học	Đá biến chất và trầm tích lục nguyên giàu thạch anh	350625	60,46	34200	46,26	0,861
		Đá xâm nhập axit và trung tính	14029	2,42	1800	0,68	1,133
		Đá trầm tích lục nguyên và biến chất giàu aluminosilicat	209872	36,19	29700	52,38	1,249
		Trầm tích bờ rời đệ Tứ	5394	0,93	0	0,68	0,000
		Đá xâm nhập mafic và siêu mafic	33	0,01	0	0,00	0,000
		Tổng	579953	100	65700	100	3,243
5	Lượng mưa trung bình	1600 - 1700	422793	72,90	53100	72,79	1,109
		1700 - 1800	157160	27,10	12600	27,21	0,708
		Tổng	579953	100	65700	100	1,816
6	Vô phong hóa	Ferosialit	389765	67,44	45900	51,02	1,036
		Tera rossa	178761	30,93	17100	45,58	0,841
		Sialferit	7537	1,30	1800	3,40	2,101
		Sialit-fe	1845	0,32	900	0,00	4,291
		Tổng	577908	100	65700	100	8,269

TT	Lớp dữ liệu	Phân lớp	Số pixel trong từng phân lớp	% số pixel trong từng phân lớp (A)	Số pixel trượt lở trong từng phân lớp	% số pixel trượt lở trong từng phân lớp (B)	FR = B/A
7	Chia cắt sâu (m/km ²)	< 100	85187	14,69	17100	6,12	1,772
		100 - 200	169029	29,14	14400	14,29	0,752
		200 - 300	171613	29,59	18000	22,45	0,926
		300 - 400	106880	18,43	13500	29,25	1,115
		> 400	47288	8,15	2700	27,89	0,504
		Tổng	579997	100	65700	100	5,069
8	Chia cắt ngang (km/km ²)	< 0.5	497365	85,75	48600	92,52	0,863
		0.5 - 1.5	47650	8,22	11700	4,76	2,168
		1.5 - 2.5	14919	2,57	1800	0,00	1,065
		2.5 - 3.0	14604	2,52	2700	2,72	1,632
		> 3.0	5449	0,94	900	0,00	1,458
		Tổng	579987	100	65700	100	7,185
9	Hiện trạng sử dụng đất	Mặt nước	7750	1,33	0	0,00	0,000
		Rừng tự nhiên	139201	23,96	54900	97,28	3,487
		Đất nông nghiệp	2845	0,49	0	0,00	0,000
		Rừng trồng	66804	11,50	0	0,00	0,000
		Rừng cây bụi	296039	50,96	4500	0,00	0,134
		Khu dân cư	67338	11,59	6300	1,36	0,827
		Đất trống	19	0,00	0	1,36	0,000
		Rừng trồng	931	0,16	0	0,00	0,000
		Tổng	580927	100	65700	100	4,449
10	Đới cấu trúc	Khối Tổng Bá - Phú Ngừ	577422	99,56	63000	96,60	0,963
		Khối Bắc Thái - Bắc Sơn	2531	0,44	2700	3,40	9,417
		Tổng	579953	100	65700	100	10,380

Qua kết quả xác định giá trị FR của 10 yếu tố ảnh hưởng đến trượt lở đất trên địa bàn huyện Pác Nặm, tỉnh Bắc Kạn, nhận thấy:

- Trong lớp dữ liệu độ cao, giá trị tỷ số tần suất cao nhất lần lượt là 1,606; 0,990; 0,986 ở các phân lớp độ cao 146 – 395 m; 395 – 577 m; 577 – 781 m. Còn giá trị tỷ số tần suất thấp nhất lần lượt là 0,379 và 0,242 ở các phân lớp độ cao là 781 – 1058 m và 1058 – 1629 m. Giá trị FR tổng của lớp dữ liệu này là 4,203.

- Trong lớp dữ liệu độ dốc, giá trị tỷ số tần suất cao nhất lần lượt là 1,328; 1,144; 1,052; 0,912 ở các phân lớp độ dốc > 350; 0 - 100; 30 - 350 và 20 - 300; giá trị tỷ số tần suất thấp nhất là 0,896 ở phân lớp độ dốc là 10 - 200. Giá trị FR tổng của lớp dữ liệu này là 5,331.

- Trong lớp dữ liệu chỉ số độ ẩm địa hình TWI, giá trị tỷ số tần suất cao nhất lần lượt là 1,313; 1,082; 1,051 ở các phân lớp 9,9 – 17,5; 7,6 – 9,9; 2,4 – 5,0; giá trị tỷ số tần suất thấp nhất là 0,973 và 0,926 ở các phân lớp 6,1 – 7,6 và 5,0 – 6,1. Giá trị FR tổng của lớp dữ liệu này là 5,345.

- Trong lớp dữ liệu chia cắt sâu, giá trị tỷ số tần suất cao nhất lần lượt là 1,722; 1,115; 0,926 ở các phân lớp < 100 m/km²; 300 - 400 m/km²; và 200 – 300 m/km²; giá trị tỷ số tần suất thấp nhất là 0,752; 0,504 ở các phân lớp chia cắt sâu là 100 – 200 m/km² và > 400m/km². Giá trị FR tổng của lớp dữ liệu này là 5,069.

- Trong lớp dữ liệu chia cắt ngang, giá trị tỷ số tần suất cao nhất lần lượt là 2,168; 1,632; 1,458; và 1,065 ở các phân lớp 0,5 – 1,5 km/km²; 2,5 – 3,0 km/km²; > 3,0 km/km²; 1,5 – 2,5 km/km²; giá trị tỷ số tần suất thấp nhất là 0,863 ở phân lớp < 0,5 km/km². Giá trị FR tổng của lớp dữ liệu này là

7,185.

- Trong lớp dữ liệu thạch học, giá trị tỷ số tần suất cao nhất lần lượt là 1,249 và 1,133 ở phân lớp trầm tích Đá trầm tích lục nguyên và biến chất giàu aluminosilicat, Đá xâm nhập axit và trung tính; giá trị tỷ số tần suất thấp nhất là 0,861 và 0,000 ở các phân lớp Đá biến chất và trầm tích lục nguyên giàu thạch anh; Trầm tích bờ rời đệ Tứ; Đá xâm nhập mafic và siêu mafic. Giá trị FR tổng của lớp dữ liệu này là 3,243.

- Trong lớp dữ liệu vỏ phong hóa, giá trị tỷ số tần suất cao nhất lần lượt là 4,291; 2,101; 1,036 ở phân lớp Sialit-fe; Sialferit và Ferosialit; giá trị tỷ số tần suất thấp nhất là 0,841 ở phân lớp Tera rossa. Giá trị FR tổng của lớp dữ liệu này là 8,269.

- Trong lớp dữ liệu đới cấu trúc, giá trị tỷ số tần suất cao nhất là 9,417 ở phân lớp Khối Bắc Thái - Bắc Sơn; giá trị tỷ số tần suất thấp nhất là 0,963 ở phân lớp Khối Tòng Bá - Phú Ngừ. Giá trị FR tổng của lớp dữ liệu này là 10,380.

- Trong lớp dữ liệu lượng mưa TB năm, giá trị tỷ số tần suất từ cao đến thấp lần lượt là 1,109; 0,708 ở các phân lớp 1600 - 1700 mm; 1700 - 1800 mm. Giá trị FR tổng của lớp dữ liệu này là 1,816.

- Trong lớp dữ liệu hiện trạng sử dụng đất, giá trị tỷ số tần suất cao nhất lần lượt là 3,487; 0,827; 0,134 ở các phân lớp Rừng tự nhiên, khu dân cư và rừng cây bụi; giá trị tỷ số tần suất thấp nhất phân bố ở hầu hết các phân lớp còn lại trong lớp dữ liệu hiện trạng sử dụng đất. Giá trị FR tổng của lớp dữ liệu này là 4,449.

Theo kết quả tính toán này, có thể nhận thấy mỗi yếu tố có một vai trò nhất định trong sự hình thành tai biến trượt lở đất trên địa bàn khu vực nghiên cứu. Trong đó, thứ tự ảnh hưởng của các yếu tố tới sự hình thành tai biến trượt lở đất lần lượt được thống kê trong Bảng 3.

Bảng 3. Bảng thống kê thể hiện mức độ ảnh hưởng tới trượt lở đất của các yếu tố tại huyện Pắc Nặm

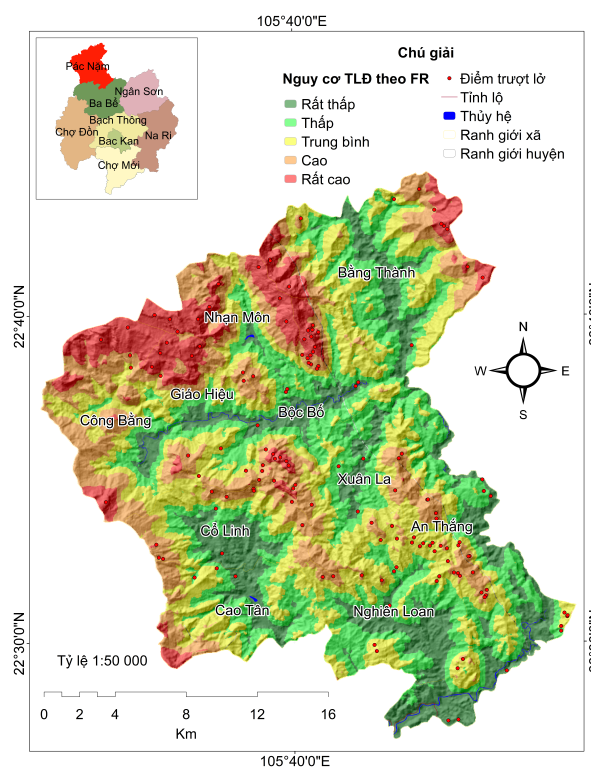
TT	Các lớp yếu tố	Giá trị FR tổng
1	Đới cấu trúc	10,380
2	Vỏ phong hóa	8,269
3	Chia cắt ngang	7,185
4	Chỉ số độ ẩm địa hình TWI	5,345
5	Độ dốc	5,331
6	Chia cắt sâu	5,069
7	Hiện trạng sử dụng đất	4,449
8	Độ cao	4,203
9	Thạch học	3,243
10	Lượng mưa trung bình năm	1,816

Thông thường, ở các khu vực vùng núi, yếu tố lượng mưa được xem là yếu tố chính kích hoạt tai biến trượt lở đất, tuy nhiên, nhận định này là chưa đủ. Ngoài yếu tố lượng mưa, còn cần xem xét tới rất nhiều yếu tố khác như địa hình, độ dốc, hệ thống thực phủ, đới cấu trúc, thạch học, vỏ phong hóa, ... mới có thể đánh giá khả năng hình thành nên tai biến trượt lở đất. Nếu lượng mưa diễn ra nhiều ngày, liên tục, nhưng tại khu vực có địa hình thoải, có hệ thống thực phủ phía trên với đám rễ cắm sâu giữ nước, cấu trúc đá phiến tầng bền vững, lớp vỏ phong hóa mỏng, không nằm giữa hai khe của đới cấu trúc, ... thì khó xảy ra tai biến trượt lở và ngược lại. Chính vì sự phức tạp và khó đoán định của cơ chế hình thành tai biến trượt lở đất, đòi hỏi các nghiên cứu đánh giá nguy cơ trượt lở đất cần được thực hiện liên tục, có thể với các nguồn dữ liệu đầu vào khác nhau, hoặc với các khu vực nghiên cứu

khác nhau, ... [1, 3].

4.2. Kết quả xây dựng bản đồ nhạy cảm trượt lở đất

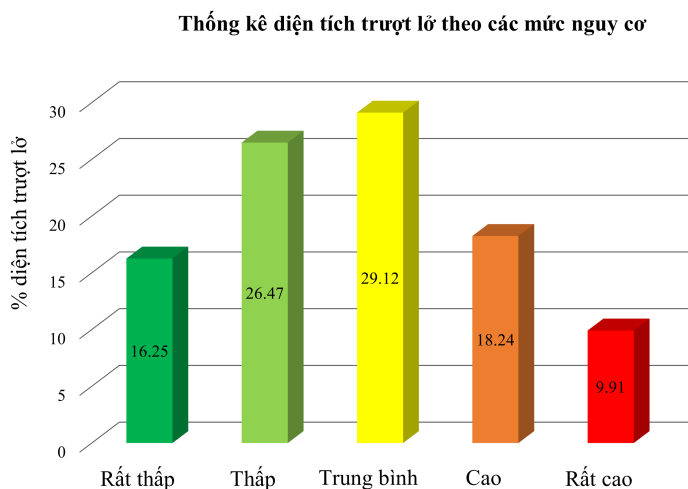
Sau khi tính toán giá trị FR tổng của 10 lớp yếu tố ảnh hưởng đến trượt lở đất, tiến hành xây dựng bản đồ chỉ số nhạy cảm trượt lở đất LSI bằng cách chồng xếp từng lớp yếu tố với giá trị FR tổng tương ứng bằng công cụ Weighted Overlay trong phần mềm ArcGIS 10.5. Bản đồ chỉ số LSI này phản ánh mức độ nhạy cảm với tai biến trượt lở của khu vực nghiên cứu, giá trị chỉ số LSI càng nhỏ thì mức độ nhạy cảm với tai biến trượt lở càng thấp và ngược lại. Để nhận biết các vùng có chỉ số nguy cơ trượt lở đất cao hơn hay thấp hơn các vùng khác, các bản đồ LSI này cần được hiển thị dưới dạng các khoanh vi, định dạng vùng với nguy cơ trượt lở đất theo các mức khác nhau, điều này nhằm giúp cho các nhà quản lý, các nhà quy hoạch có thể căn cứ vào đó để đưa các giải pháp thích ứng, phù hợp cho từng vùng tùy theo từng mức nguy cơ khác nhau. Tùy thuộc vào quy mô khu vực, mức độ nhạy cảm, sự phân bố của tai biến, phần lớn trong các nghiên cứu đánh giá nguy cơ trượt lở đất đều chia thành 3, 4 hoặc 5 vùng nguy cơ [25]. Trong nghiên cứu này, bản đồ chỉ số LSI khu vực huyện Pác Nặm, tỉnh Bắc Kạn được chia thành 5 vùng nguy cơ, bao gồm: rất thấp, thấp, trung bình, cao, rất cao (Hình 3).



Hình 3. Bản đồ nguy cơ trượt lở đất huyện Pác Nặm theo phương pháp FR

Trên bản đồ nguy cơ trượt lở đất được xây dựng bằng phương pháp FR và công nghệ GIS cho thấy, trên địa bàn huyện Pác Nặm có tổng diện tích là 51931,89 km², trong đó có 8440,47 km² (16,25%) nằm trong vùng nguy cơ trượt lở đất ở mức rất thấp; có 13748,67 km² (26,47%) nằm trong vùng nguy cơ trượt lở đất ở mức thấp; có 15120,9 km² (29,12%) nằm trong vùng nguy cơ trượt lở đất ở mức trung bình; có 9473,85 km² (18,24%) nằm trong vùng nguy cơ trượt lở đất ở mức cao; có 5148,00 km² (9,91%) nằm trong vùng nguy cơ trượt lở đất ở mức rất cao (Hình 4). Trong đó, các vùng có nguy

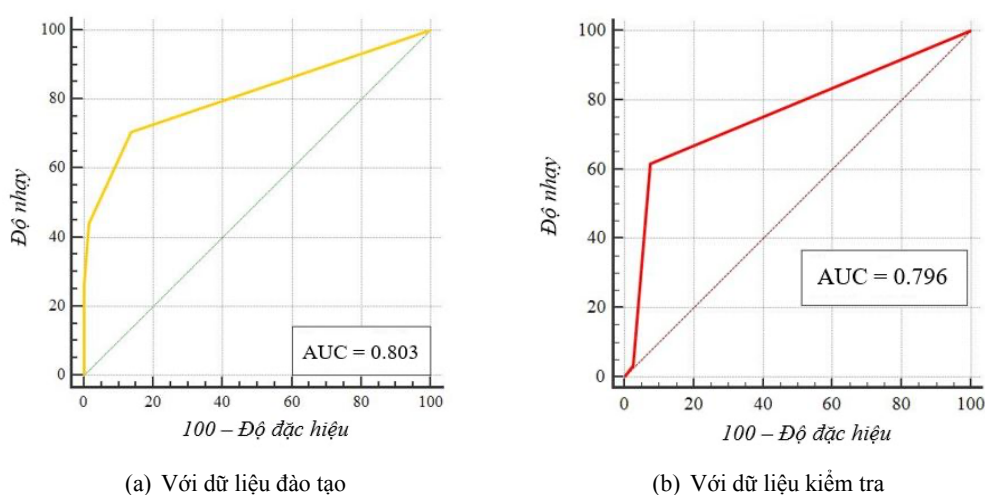
cơ trượt lở đất ở mức cao và rất cao chủ yếu tập trung các khu vực có địa hình núi trung bình và cao, tập trung nhiều tại phía Bắc, Tây Bắc và Đông Bắc khu vực nghiên cứu, tại các xã Công Bằng, Giáo Hiệu, Nhân Môn, Bằng Thành, đây cũng là những khu vực có mật độ chia cắt sâu lớn. Các vùng có nguy cơ trượt lở đất ở mức trung bình phân bố đồng đều và tập trung khá nhiều tại các khu vực bằng phẳng trong huyện Pắc Nặm, nơi đây có mật độ chia cắt sâu khá thấp.



Hình 4. Biểu đồ phân bố vùng nguy cơ trượt lở đất huyện Pắc Nặm.

4.3. Kết quả kiểm chứng độ chính xác dự báo

Bản đồ nguy cơ trượt lở đất có thể kiểm chứng thông qua vị trí các điểm trượt lở sẽ xảy ra trong tương lai, hoặc thông qua việc xác định giá trị diện tích dưới đường cong AUC ghi nhận tín hiệu ROC (Receiver Operating Characteristic), hoặc sử dụng các chỉ số thống kê. Trong đó, phương pháp đường



Hình 5. Kết quả kiểm chứng độ chính xác dự báo bản đồ nguy cơ trượt lở đất huyện Pắc Nặm theo phương pháp FR

cong ghi nhận tín hiệu ROC là một phương pháp kiểm chứng phổ biến và tin cậy hơn cả, phương pháp này được sử dụng trong hầu hết các nghiên cứu dự báo trượt lở nói chung. Chính vì vậy, nghiên cứu này sử dụng phương pháp đường cong ROC được kiểm chứng độ chính xác dự báo của bản đồ nguy cơ thành lập được.

Kết quả kiểm chứng bản đồ nguy cơ trượt lở đất huyện Pác Nặm bằng phương pháp tỷ số tần suất FR cho độ chính xác dự báo khá tốt. Trong đó:

- Đối với 70% tập điểm đào tạo (102 vị trí trượt lở): giá trị diện tích dưới đường cong AUC là 0,803, tương đương với độ chính xác 80,3% (Hình 5(a)).

- Đối với 30% tập điểm kiểm tra (44 vị trí trượt lở); giá trị diện tích dưới đường cong AUC là 0,796, tương đương với độ chính xác 79,6% (Hình 5(b)).

5. Kết luận

Trượt lở đất là một trong những tai biến địa chất nguy hiểm, thường diễn ra ở các khu vực vùng núi, đe dọa trực tiếp tới tính mạng và tài sản của người dân. Trong khi đó, bản đồ nguy cơ trượt lở đất được xem phương thức quản lý rủi ro hiệu quả vì chúng có thể cung cấp những thông tin liên quan đến vị trí không gian, phạm vi phân bố của những khu vực dễ xảy ra trượt lở, điều này trợ giúp cho các đơn vị chức năng trong việc ứng phó, cứu trợ, hoặc thực hiện các chính sách an sinh xã hội phù hợp, ... Bên cạnh đó, sự hạn chế về nhân lực, trang thiết bị, cùng với đó là những diễn biến bất thường của thời tiết trong những năm gần đây đã và đang đặt ra những thách thức không nhỏ đối với công tác phòng chống và giảm thiểu thiên tai tại các khu vực vùng núi của Việt Nam. Trong khi đó, phương pháp tỷ số tần suất FR nằm trong nhóm các phương pháp đánh giá định lượng, với phương thức đánh giá, tính toán nhanh chóng, độ tin cậy cao, không yêu cầu cao về trình độ, trang thiết bị, cập nhật dễ dàng, ... Chính vì vậy, nghiên cứu này đề xuất sử dụng phương pháp tỷ số tần suất FR và công nghệ GIS trong việc thành lập bản đồ nguy cơ trượt lở đất tại huyện Pác Nặm, tỉnh Bắc Kạn. Bản đồ nguy cơ trượt lở đất khu vực huyện Pác Nặm có độ chính xác dự báo khá tốt, AUC = 0,796, trong đó 18,24% diện tích khu vực nằm trong vùng nguy cơ ở mức cao và 9,91% diện tích khu vực nằm trong vùng nguy cơ ở mức rất cao. Bản đồ nguy cơ này hứa hẹn sẽ là một công cụ quản lý hữu ích cho các đơn vị chức năng trong việc phòng chống và giảm thiểu thiệt hại do tai biến trượt lở đất tại các khu vực vùng núi.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2022-XDA-09.

Tài liệu tham khảo

- [1] Haque, U., Blum, P., da Silva, P. F., Andersen, P., Pilz, J., Chalov, S. R., Malet, J.-P., Aufließ, M. J., Andres, N., Poyiadji, E., Lamas, P. C., Zhang, W., Peshevski, I., Pétursson, H. G., Kurt, T., Dobrev, N., García-Davalillo, J. C., Halkia, M., Ferri, S., Gprindashvili, G., Engström, J., Keellings, D. (2016). *Fatal landslides in Europe*. *Landslides*, 13(6):1545–1554.
- [2] Huang, R., Li, W. (2011). *Formation, distribution and risk control of landslides in China*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 3(2):97–116.
- [3] Đông, K. T., Trọng, T. Đ., Hằng, H. T., Khiên, H. T. (2021). *Đánh giá tác động của lớp phủ đến nhiệt độ bề mặt đất và phân bố không gian nhiệt độ tại một số tuyến đường trên địa bàn thành phố Hà Nội bằng ảnh viễn thám*. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐH XDHN*, 15(7V):143–155.

- [4] Shahabi, H., Ahmad, B. B., Khezri, S. (2012). [Evaluation and comparison of bivariate and multivariate statistical methods for landslide susceptibility mapping \(case study: Zab basin\)](#). *Arabian Journal of Geosciences*, 6(10):3885–3907.
- [5] Youssef, A. M., Pradhan, B., Jebur, M. N., El-Harbi, H. M. (2014). [Landslide susceptibility mapping using ensemble bivariate and multivariate statistical models in Fayfa area, Saudi Arabia](#). *Environmental Earth Sciences*, 73(7):3745–3761.
- [6] Mathew, J., Jha, V. K., Rawat, G. S. (2007). [Application of binary logistic regression analysis and its validation for landslide susceptibility mapping in part of Garhwal Himalaya, India](#). *International Journal of Remote Sensing*, 28(10):2257–2275.
- [7] Raja, N. B., Çiçek, I., Türkoğlu, N., Aydın, O., Kawasaki, A. (2016). [Landslide susceptibility mapping of the Sera River Basin using logistic regression model](#). *Natural Hazards*, 85(3):1323–1346.
- [8] Pham, B. T., Bui, D. T., Indra, P., and, D. M. B. (2015). [Landslide Susceptibility Assessment at a Part of Uttarakhand Himalaya, India using GIS – based Statistical Approach of Frequency Ratio Method](#). *International Journal of Engineering Research and*, V4(11).
- [9] Khan, H., Shafique, M., Khan, M. A., Bacha, M. A., Shah, S. U., Calligaris, C. (2019). [Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan](#). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(1):11–24.
- [10] Silalahi, F. E. S., Pamela, Arifianti, Y., Hidayat, F. (2019). [Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model in Bogor, West Java, Indonesia](#). *Geoscience Letters*, 6(1).
- [11] Hong, H., Xu, C., Bui, D. T. (2015). [Landslide Susceptibility Assessment at the Xiushui Area \(China\) Using Frequency Ratio Model](#). *Procedia Earth and Planetary Science*, 15:513–517.
- [12] Pal, S. C., Chowdhuri, I. (2019). [GIS-based spatial prediction of landslide susceptibility using frequency ratio model of Lachung River basin, North Sikkim, India](#). *SN Applied Sciences*, 1(5).
- [13] Fayeze, L., Pazhman, D., Pham, B. T., Dholakia, M., Solanki, H., Khalid, M., Prakash, I. (2018). Application of frequency ratio model for the development of landslide susceptibility mapping at part of Uttarakhand State, India. *Int. J. Appl. Eng. Res*, 13(9):6846–6854.
- [14] Regmi, A. D., Devkota, K. C., Yoshida, K., Pradhan, B., Pourghasemi, H. R., Kumamoto, T., Akgun, A. (2013). [Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya](#). *Arabian Journal of Geosciences*, 7(2):725–742.
- [15] Barella, C. F., Sobreira, F. G., Zêzere, J. L. (2018). [A comparative analysis of statistical landslide susceptibility mapping in the southeast region of Minas Gerais state, Brazil](#). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(5):3205–3221.
- [16] Mersha, T., Meten, M. (2020). [GIS-based landslide susceptibility mapping and assessment using bivariate statistical methods in Simada area, northwestern Ethiopia](#). *Geoenvironmental Disasters*, 7(1).
- [17] Nohani, Moharrami, Sharafi, Khosravi, Pradhan, Pham, Lee, Melesse (2019). [Landslide Susceptibility Mapping Using Different GIS-Based Bivariate Models](#). *Water*, 11(7):1402.
- [18] Long, N. T., Chí Công, Đ. V., Bình, N. C. and Cường, N. Q. (2020). Đánh giá thực trạng và giải pháp nghiên cứu về sạt lở đất ở Việt Nam giai đoạn 2010 - 2020. *Tạp chí khoa học và công nghệ thủy lợi*, 61: 119–129.
- [19] Huy, B. B., Liễu, N. Q., Thiện, T. M., Khang, H. Đ., Trung, N. T. Dự báo nguy cơ trượt lở đất khu vực xã Năm Dân, huyện Xin Mần, tỉnh Hà Giang. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 4.
- [20] Tân, Đ. V., Hồng, N. T., Vững, N. Ứng dụng GIS và phương pháp chỉ số thống kê trong xây dựng bản đồ nhạy cảm trượt lở đất khu vực thành phố Bắc Kạn. *Tạp chí Khoa học và công nghệ thủy lợi*, 62.
- [21] Liễu, B. B., Huy, T. M., Thiện, N. Q., Khang, H. Đ., Trung, N. T. Dự báo nguy cơ và cường độ phát triển trượt lở khu vực Thị xã Bắc Kạn. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 3+4.
- [22] Varnes, D. J. (1981). [The principles and practice of landslide hazard zonation](#). *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 23(1):13–14.
- [23] Pradhan, B., Lee, S. (2009). [Regional landslide susceptibility analysis using back-propagation neural network model at Cameron Highland, Malaysia](#). *Landslides*, 7(1):13–30.
- [24] Tru, V. N., Hang, H. T., Hoa, P. D., Phuong, N. V. (2021). [Landslide susceptibility mapping along National](#)

- Highway-6, Hoa Binh Province, Vietnam using frequency ratio model and GIS. *International Journal of GEOMATE*, 21(85).
- [25] Mahdadi, F., Boumezbeur, A., Hadji, R., Kanungo, D. P., Zahri, F. (2018). GIS-based landslide susceptibility assessment using statistical models: a case study from Souk Ahras province, N-E Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(17).
- [26] van Westen, C. J., Rengers, N., Soeters, R. (2003). Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment. *Natural Hazards*, 30(3):399–419.
- [27] Ayalew, L., Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1-2):15–31.
- [28] Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A. C., Yomralioglu, T. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *CATENA*, 85(3):274–287.
- [29] Hang, H. T., Hoa, P. D., Tru, V. N., Phuong, N. V. (2021). Application of Shannon's Entropy Model and GIS in Flash Flood Forecasting Along National Highway-6, Hoa Binh Province, Vietnam. *International Journal of GEOMATE*, 21(87).
- [30] Sützen, M. L., Kaya, B. Ş. (2012). Evaluation of environmental parameters in logistic regression models for landslide susceptibility mapping. *International Journal of Digital Earth*, 5(4):338–355.