

**BỘ NÔNG NGHIỆP VÀ MÔI TRƯỜNG
VIỆN KHOA HỌC THỦY LỢI VIỆT NAM**

**BÁO CÁO SẢN PHẨM 2
XÂY DỰNG BỘ DỮ LIỆU PHỤC VỤ PHÂN VÙNG LŨ
QUÉT TỪ DỮ LIỆU ĐỊA KHÔNG GIAN**

**ĐỀ TÀI: NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO
VÀ DỮ LIỆU ĐỊA KHÔNG GIAN ĐỂ PHÂN VÙNG LŨ
QUÉT QUY MÔ CẤP HUYỆN**

Cơ quan chủ quản: Bộ Nông nghiệp và Môi trường
Tổ chức chủ trì: Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam
Chủ nhiệm: Lê Văn Thìn
Thời gian thực hiện: 01/2023÷06/2025

HÀ NỘI - 2025

MỤC LỤC

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN CÁC NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG DỮ LIỆU ĐỊA KHÔNG GIAN TRONG XÁC ĐỊNH LŨ QUÉT	1
1.1. Tổng quan các loại dữ liệu địa không gian và ứng dụng trong nghiên cứu lũ quét.	1
1.1.1. Giới thiệu về dữ liệu địa không gian	1
1.1.2. Quá trình phát triển ảnh viễn thám theo lịch sử.....	3
1.1.3. Các loại ảnh viễn thám và ứng dụng.....	9
1.1.4. Các dữ liệu địa không gian khác	52
1.2. Tổng quan các nghiên cứu ứng dụng dữ liệu địa không gian trong xác định lũ quét.	61
1.2.1. Các phương pháp xác định lũ quét.....	61
1.2.2. Tổng hợp các dữ liệu địa không gian trong nghiên cứu lũ quét	73
1.3. Cấu trúc dữ liệu viễn thám được sử dụng trong phân vùng lũ quét	80
1.3.1. Đặc tính kỹ thuật của dữ liệu viễn thám	81
1.3.2. Định dạng và chuẩn dữ liệu	81
1.3.3. Cấu trúc dữ liệu theo loại cảm biến	82
CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG BẢN ĐỒ THẨM PHỦ TỪ ẢNH VIỄN THÁM	83
2.1. Chuẩn bị dữ liệu	85
2.2. Xây dựng mô hình phân loại thẩm phủ	88
2.2.1. Lựa chọn mô hình phân loại	88
2.2.2. Xây dựng mô hình phân loại.....	92
CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG CÁC BẢN ĐỒ THÀNH PHẦN PHỤC VỤ ĐÁNH GIÁ XÁC ĐỊNH LŨ QUÉT	97
3.1. Dữ liệu và chuẩn hóa dữ liệu.....	98
3.2. Xây dựng các bản đồ thành phần	105
KẾT LUẬN, KIẾN NGHỊ	120
TÀI LIỆU THAM KHẢO	121

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN CÁC NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG DỮ LIỆU ĐỊA KHÔNG GIAN TRONG XÁC ĐỊNH LŨ QUÉT

1.1. Tổng quan các loại dữ liệu địa không gian và ứng dụng trong nghiên cứu lũ quét.

1.1.1. Giới thiệu về dữ liệu địa không gian

Dữ liệu địa không gian là dữ liệu không lồ do các trung tâm nghiên cứu và tổ chức tạo ra, đòi hỏi phải truy cập và truy xuất nhanh chóng để đưa ra các quyết định quan trọng liên quan đến khủng hoảng như thiên tai, hỏa hoạn... Dữ liệu này bao gồm việc sử dụng hệ thống máy chủ khổng lồ để cung cấp tài nguyên tính toán và lưu trữ để truy cập và tìm kiếm dữ liệu này, điều này đặt ra những thách thức do khối lượng dữ liệu khổng lồ, vị trí ảnh chụp đa dạng và mang tính toàn cầu, đặc biệt là tính không đồng nhất về định dạng và cấu trúc giữa các loại dữ liệu [1].

Dữ liệu địa không gian là dữ liệu về các đối tượng, sự kiện hoặc hiện tượng có vị trí trên bề mặt Trái Đất [2]. Vị trí này có thể tĩnh trong ngắn hạn (ví dụ: vị trí của một con đường, một trận động đất, trẻ em sống trong nghèo đói) hoặc động (ví dụ: một chiếc xe đang di chuyển hoặc một người đi bộ, sự lây lan của một bệnh truyền nhiễm). Dữ liệu địa không gian kết hợp thông tin vị trí (thường là tọa độ trên Trái Đất), thông tin thuộc tính (các đặc điểm của đối tượng, sự kiện hoặc hiện tượng đang xét) và thường cả thông tin thời gian (thời gian hoặc khoảng thời gian mà vị trí và thuộc tính tồn tại).

Nhiều dữ liệu địa không gian có mối quan tâm chung đối với nhiều người dùng. Ví dụ, đường xá, địa phương, vùng nước và tiện ích công cộng hữu ích như thông tin tham khảo cho nhiều mục đích. Vì lý do này, cho dù được thu thập bởi tổ chức công cộng hay tư nhân, một lượng lớn dữ liệu địa không gian có sẵn dưới dạng dữ liệu mở. Điều này có nghĩa là nó có thể được truy cập tự do bởi người dùng và được cung cấp thông qua các tiêu chuẩn mở. Việc phát triển và sử dụng các tiêu chuẩn mở trong cộng đồng địa không gian đã được hỗ trợ mạnh mẽ do phạm vi rộng lớn của các ứng dụng mà dữ liệu địa không gian có thể được áp dụng và do số lượng lớn các cơ quan trên toàn cầu và địa phương tham gia vào việc thu thập dữ liệu như vậy. Hệ thống Google Earth Engine (GEE) là một trong những hệ thống lớn nhất thế giới về dữ liệu địa không gian toàn cầu, cho phép người dùng có thể truy cập, sử dụng dữ liệu địa không gian trên toàn thế giới miễn phí.

Theo truyền thống, dữ liệu địa không gian chủ yếu được thu thập bởi các bộ, ngành chính phủ, thường liên quan đến nhiều bộ, ngành trong bất kỳ khu vực quản lý nào. Ví dụ, một bộ, ngành có thể chịu trách nhiệm thu thập dữ liệu ranh giới đất đai (địa chính), một bộ, ngành khác chịu trách nhiệm thu thập dữ liệu đường xá và giao thông, một bộ,

ngành khác chịu trách nhiệm thu thập dữ liệu môi trường và một bộ, ngành khác chịu trách nhiệm thu thập dữ liệu y tế, v.v., theo từng lĩnh vực chuyên môn của họ. Việc tích hợp dữ liệu từ các bộ, ngành khác nhau thường khó khăn do sử dụng các định dạng, mô hình dữ liệu và ngữ nghĩa khác nhau. Ví dụ, bộ, ngành chịu trách nhiệm về ranh giới đất đai có thể đã thu thập dữ liệu về đường xá theo nghĩa là khu vực đã được xác nhận là đường xá hợp pháp, trong khi bộ, ngành chịu trách nhiệm bảo trì đường xá có thể đã thu thập dữ liệu về con đường được xây dựng: vật liệu, bề mặt và diện tích vật lý của chính con đường đó, và bộ, ngành liên quan đến bảo tồn có thể đã thu thập dữ liệu về các điểm giao cắt đường xá của động vật hoang dã. Trong mỗi trường hợp, "đường xá" có nghĩa khác nhau (có ngữ nghĩa khác nhau), có khả năng có các thuộc tính khác nhau, cấu trúc dữ liệu khác nhau và cơ chế nhận dạng khác nhau. Hơn nữa, tình huống này lặp lại ở mỗi khu vực quản lý khác nhau, do đó các bộ, ngành duy trì cùng một loại dữ liệu (ví dụ: ranh giới đất đai) ở các khu vực quản lý khác nhau sử dụng các định dạng, cấu trúc và ngữ nghĩa khác nhau cho dữ liệu của riêng họ. Trong những trường hợp cần chia sẻ dữ liệu giữa các khu vực quản lý, điều này gây ra các vấn đề. Ví dụ, ở Úc, mỗi tiểu bang và lãnh thổ sử dụng hệ thống, định dạng và cấu trúc riêng của họ cho mỗi bộ dữ liệu địa không gian khác nhau, khiến việc tạo ra dữ liệu thống nhất trên toàn tiểu bang và lãnh thổ hoặc tạo ra một bộ dữ liệu quốc gia cho các vấn đề toàn quốc trở nên rất khó khăn. Ở châu Âu, những thách thức tương tự đã xảy ra với sự bổ sung của sự khác biệt ngôn ngữ. Ví dụ, dữ liệu về các địa điểm được bảo vệ thường yêu cầu một cách tiếp cận xuyên biên giới vì môi trường sống của các loài không dừng lại ở biên giới quốc gia, nhưng mỗi quốc gia duy trì bộ dữ liệu riêng của mình với các định dạng và cấu trúc khác nhau [2].

Do những thách thức tích hợp dữ liệu này, dữ liệu địa không gian mở đã là một mục tiêu quan trọng trong cộng đồng địa không gian trong một số năm. Hiệp hội Địa không gian Mở (OGC) đã phát triển một số tiêu chuẩn để cho phép chia sẻ dữ liệu mở, trong đó không thể không kể đến Đặc tả Dịch vụ Tính năng Web (WFS), định nghĩa một yêu cầu dịch vụ web và định dạng phản hồi để cho phép các nhà cung cấp dữ liệu cung cấp dữ liệu của họ cho người dùng dữ liệu. Tiêu chuẩn này và các tiêu chuẩn OGC khác chủ yếu tập trung vào định dạng dữ liệu và không giải quyết mô hình dữ liệu hoặc ngữ nghĩa của nội dung dữ liệu.

Dữ liệu địa không gian và viễn thám có mối quan hệ đồng điệu chặt chẽ trong nghiên cứu và ứng dụng thực tiễn. Về bản chất, dữ liệu viễn thám chính là một dạng dữ liệu địa không gian, mang thông tin về vị trí địa lý và thuộc tính của đối tượng. Ảnh vệ tinh, dữ liệu radar đều được địa chiểu và tích hợp vào hệ thống thông tin địa lý.

Trong xử lý và phân tích, hai loại dữ liệu này hỗ trợ cho nhau. Dữ liệu viễn thám cung cấp thông tin bề mặt Trái Đất theo thời gian thực, trong khi dữ liệu địa không gian

khác (DEM, bản đồ địa chất, thổ nhưỡng...) cung cấp thông tin nền tảng. Sự kết hợp này tạo ra khả năng phân tích toàn diện.

Về công nghệ, các phần mềm GIS hiện đại đều tích hợp công cụ xử lý ảnh viễn thám. Ngược lại, các phần mềm viễn thám cũng có khả năng phân tích không gian. Sự hội tụ này phản ánh mối liên kết không thể tách rời giữa hai lĩnh vực. Trong xu hướng phát triển, công nghệ địa không gian và viễn thám ngày càng hòa quyện, tạo nên các giải pháp tổng thể trong nhiều ứng dụng từ quản lý tài nguyên đến ứng phó thiên tai.

1.1.2. Quá trình phát triển ảnh viễn thám theo lịch sử

Viễn thám là khoa học thu thập thông tin về bề mặt trái đất mà không cần tiếp xúc vật lý với nó. Kỹ thuật này bao gồm việc sử dụng nhiều thiết bị khác nhau để thu thập thông tin về bề mặt trái đất, chẳng hạn như các đặc điểm, tính chất vật lý và điều kiện của nó. Viễn thám có lịch sử lâu đời bắt đầu từ đầu thế kỷ 19.

Trường hợp đầu tiên được ghi nhận về cảm biến từ xa có thể bắt nguồn từ năm 1858 khi nhiếp ảnh gia người Pháp Gaspard-Félix Tournachon chụp ảnh trên không Paris từ khinh khí cầu [3]. Những bức ảnh của ông cho thấy thành phố từ góc nhìn của một chú chim và cung cấp một góc nhìn mới về bối cảnh và thiết kế của thành phố.

Việc sử dụng sớm nhất của cảm biến từ xa là cho mục đích quân sự, cụ thể là để trinh sát trong Thế chiến thứ nhất. Máy bay được sử dụng để chụp ảnh trên không của lãnh thổ đối phương, sau đó được phân tích để phục vụ cho tình báo quân sự. Trong Thế chiến thứ hai, công nghệ cảm biến từ xa đã tiến bộ đáng kể với sự phát triển của máy bay trinh sát ảnh, chẳng hạn như Lockheed P-38 Lightning và North American P-51 Mustang. Những máy bay này được trang bị máy ảnh có thể chụp ảnh mặt đất có độ phân giải cao từ độ cao lớn.

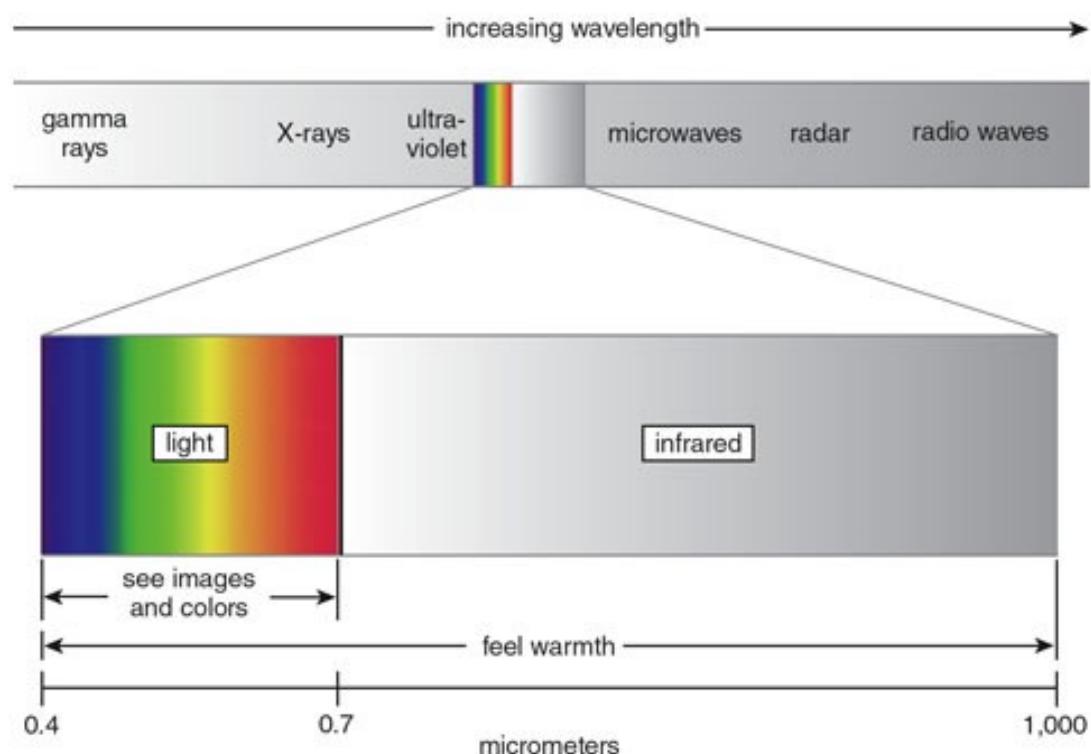
1.1.2.1. Phát hiện ra tia hồng ngoại (1800)

Việc phát hiện ra tia hồng ngoại của Sir William Herschel vào năm 1800 đã đánh dấu sự khởi đầu của việc hiểu biết về quang phổ điện từ [4]. Các thí nghiệm của Herschel bao gồm việc truyền ánh sáng mặt trời qua lăng kính và đo nhiệt độ thay đổi trong các màu ánh sáng khác nhau. Ông phát hiện ra rằng nhiệt độ tăng lên vượt quá ánh sáng đỏ có thể nhìn thấy, dẫn đến việc xác định bức xạ hồng ngoại. Khám phá này đã đặt nền tảng cho các cuộc khám phá trong tương lai về sóng điện từ và các ứng dụng của chúng trong công nghệ cảm biến từ xa, cho phép các nhà khoa học hiểu và sử dụng các bước sóng vượt quá quang phổ có thể nhìn thấy cho nhiều mục đích khác nhau.

Ranh giới giữa ánh sáng và hồng ngoại được xác định bởi giới hạn bước sóng dài của phản ứng của mắt người (một dải bước sóng hẹp từ 0,4 đến 0,7 micromet). Kinh nghiệm hàng ngày sẽ không khiến mọi người tin rằng ánh sáng và hồng ngoại là cùng

một loại năng lượng. Thật vậy, hai bằng chứng thuyết phục cho thấy, về mặt logic, rằng chúng không liên quan.

Đầu tiên, chúng ta trải nghiệm ánh sáng và hồng ngoại khác nhau bằng các giác quan khác nhau. Mọi người nhìn thấy ánh sáng, cảm nhận các bước sóng khác nhau thành các màu khác nhau, nhưng mọi người chỉ cảm thấy hồng ngoại như hơi ấm. Thứ hai, ánh sáng và hồng ngoại không phải lúc nào cũng được tìm thấy cùng nhau. Hầu hết các nguồn sáng cũng phát ra hồng ngoại, nhưng hồng ngoại thường được tìm thấy riêng lẻ. Một ví dụ quen thuộc là một chiếc lò nướng điện không đủ nóng để phát sáng: Nếu căn phòng hoàn toàn tối, mọi người vẫn có thể cảm nhận được hơi ấm từ lò nướng nhưng không thể nhìn thấy nó. Tia hồng ngoại trải dài trong phạm vi bước sóng giữa ánh sáng và vi sóng, lên đến khoảng 1.000 micromet.

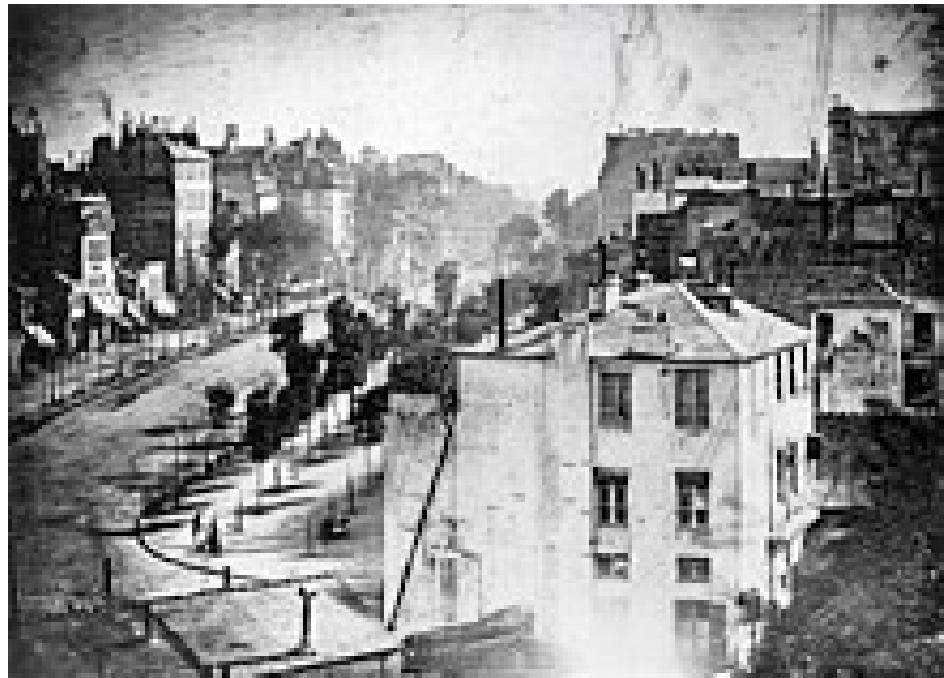


Hình 1. Bước sóng ánh sáng và bước sóng hồng ngoại

1.1.2.2. Sự khởi đầu của kỹ thuật nhiếp ảnh đen trắng (1839)

Trong khi phát hiện của Herschel về tia hồng ngoại cung cấp nền tảng lý thuyết về ánh sáng ngoài tầm nhìn, phát minh của Daguerre đã giúp chụp ảnh bằng các nguyên lý đó trong các ứng dụng thực tế. Sự kết hợp giữa hiểu biết về các bước sóng khác nhau (nhờ Herschel) và có phương pháp ghi lại hình ảnh (nhờ Daguerre) đã tạo tiền đề cho những tiến bộ trong tương lai về công nghệ cảm biến từ xa.

Năm 1839, Louis Daguerre giới thiệu quy trình daguerreotype [5], đây là phương pháp chụp ảnh đầu tiên được công khai. Kỹ thuật này bao gồm việc phơi sáng một tấm đồng mạ bạc, tạo ra những hình ảnh có độ chi tiết cao, thu hút công chúng. Khả năng chụp các chi tiết tinh tế của daguerreotype đã đánh dấu một cột mốc quan trọng trong nghiệp ảnh, cho phép ghi lại các sự kiện lịch sử và chân dung cá nhân. Sự phổ biến của quy trình này đã thúc đẩy những tiến bộ nhanh chóng trong các kỹ thuật và vật liệu chụp ảnh, cuối cùng dẫn đến sự quan tâm rộng rãi của công chúng đối với nghiệp ảnh như một hình thức nghệ thuật và phương tiện truyền thông.



Hình 2. Một trong những bức ảnh đầu tiên được thực hiện vào năm 1937 hoặc 1938 do Louis Daguerre sử dụng quy trình daguerreotype

Cụm từ sự ra đời của nghiệp ảnh đã được nhiều tác giả khác nhau sử dụng để chỉ những điều khác nhau – hoặc là việc công khai quá trình này (vào năm 1839) như một phép ẩn dụ để chỉ ra rằng trước đó, quá trình chụp ảnh daguerreotype đã được giữ bí mật hoặc là ngày chụp bức ảnh đầu tiên bằng máy ảnh hoặc máy ảnh (sử dụng quy trình nhựa đường hoặc heliography)

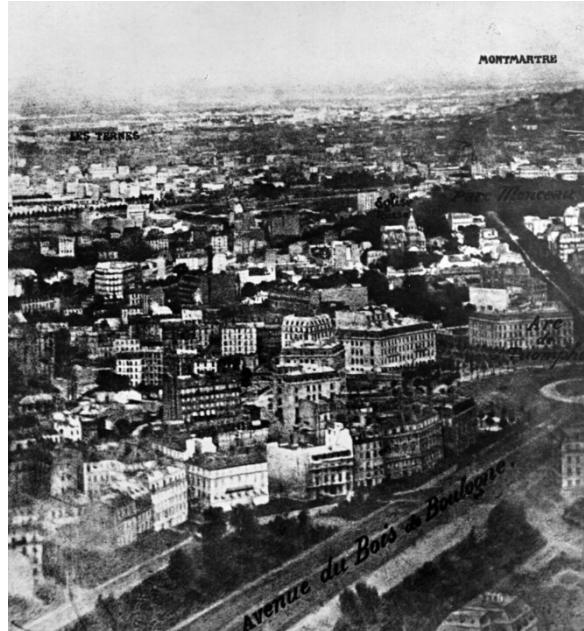
1.1.2.3. Phát hiện ra cả phô hồng ngoại và phô nhìn thấy (1847)

Năm 1847, các nhà khoa học đã mở rộng hiểu biết của mình để bao gồm cả phô hồng ngoại và phô nhìn thấy (được hiểu là có chung đặc tính như phản xạ và khúc xạ) [4]. Khám phá này nhấn mạnh rằng các bước sóng khác nhau có thể được sử dụng cho nhiều ứng dụng khác nhau ngoài việc chỉ biểu diễn trực quan. Khả năng chụp ảnh bằng ánh sáng hồng ngoại trở nên quan trọng đối với các ứng dụng cảm biến từ xa sau này, đặc biệt là trong việc đánh giá các điều kiện môi trường như sức khỏe thảm thực vật và thay đổi sử dụng đất.

1.1.2.4. Chụp ảnh từ khinh khí cầu (1850-1860)

Giai đoạn từ năm 1850 đến năm 1860 chứng kiến những người tiên phong thử nghiệm chụp ảnh trên không bằng khinh khí cầu. Gaspard-Félix Tournachon (Nadar) [6] đã chụp thành công hình ảnh từ các vị trí cao, cung cấp góc nhìn mới về cảnh quan và môi trường đô thị. Sự đổi mới này chịu ảnh hưởng trực tiếp từ những tiến bộ trước đó trong nhiếp ảnh và chứng minh cách nhìn từ trên không có thể nâng cao nỗ lực lập bản đồ và ghi chép địa lý (hình bên).

1.1.2.5. Xây dựng lý thuyết về phổ điện từ (1873)



Năm 1873, James Clerk Maxwell đã phát triển lý thuyết về sóng điện từ, cũng có nền tảng khoa học để hiểu cách ánh sáng hoạt động như một sóng và một hạt [7]. Khung lý thuyết này rất quan trọng để hiểu cách các bước sóng khác nhau có thể được khai thác cho mục đích giao tiếp và quan sát. Công trình của Maxwell dựa trên những khám phá trước đó về tia hồng ngoại và ánh sáng nhìn thấy, mở đường cho những tiến bộ trong tương lai về công nghệ cảm biến từ xa dựa trên bức xạ điện từ.

1.1.2.6. Chụp ảnh từ máy bay (1906)

Những bức ảnh chụp trên không thành công đầu tiên được chụp từ máy bay diễn ra vào năm 1906 khi phi công George Lawrence chụp ảnh trên bầu trời San Francisco bằng máy ảnh khổ lớn treo trên máy bay hai tầng [8]. Sự đổi mới này cải thiện đáng kể độ phân giải không gian so với chụp ảnh bằng khinh khí cầu, cho phép lập bản đồ chi tiết hơn và các nỗ lực trinh sát. Các kỹ thuật được phát triển thông qua chụp ảnh bằng khinh khí cầu trước đó đã đặt nền tảng cho sự tiến bộ này, nâng cao khả năng trinh sát quân sự và các sáng kiến quy hoạch đô thị.



Hình 3. Hình ảnh được chụp từ máy bay năm 1906 thực hiện bởi Lawrence
1.1.2.7. Sự phát triển của công nghệ radar (1930-1940)

Sự phát triển của công nghệ radar trong những năm 1930 đến 1940 đánh dấu bước tiến đáng kể trong khả năng cảm biến từ xa bổ sung cho các kỹ thuật hình ảnh quang học. Các quốc gia như Đức, Hoa Kỳ và Anh đã đầu tư mạnh vào nghiên cứu radar trong Thế chiến II, nhận ra tiềm năng phát hiện các vật thể ở khoảng cách xa bất kể điều kiện tầm nhìn. Bước nhảy vọt về công nghệ này dựa trên các phương pháp hình ảnh trước đó bằng cách cung cấp một phương tiện quan sát thay thế không bị ảnh hưởng bởi thời tiết hoặc điều kiện ánh sáng.

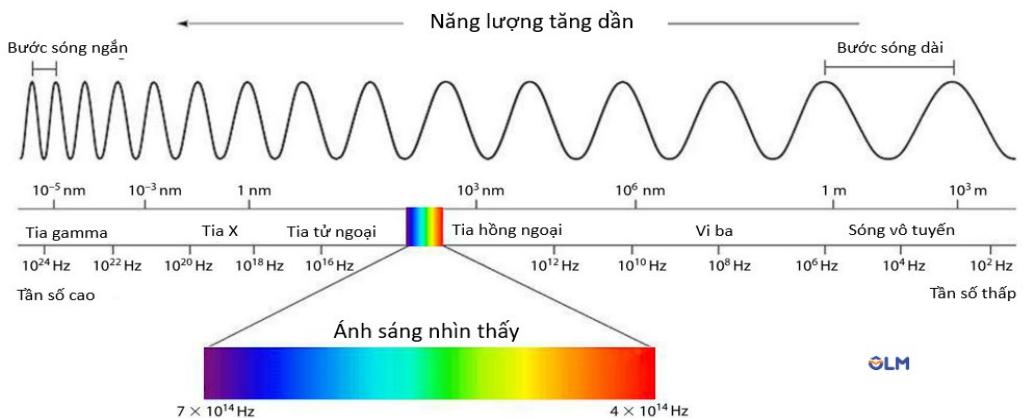
Công việc phát triển nghiêm túc về radar bắt đầu vào những năm 1930, nhưng ý tưởng cơ bản về radar có nguồn gốc từ các thí nghiệm cổ điển về bức xạ điện từ do nhà vật lý người Đức thực hiện Heinrich Hertz vào cuối những năm 1880 [9]. Hertz bắt đầu xác minh bằng thực nghiệm công trình lý thuyết trước đó của nhà vật lý người Scotland James Clerk Maxwell. Maxwell đã xây dựng các phương trình tổng quát của trường điện từ, xác định rằng cả ánh sáng và sóng vô tuyến đều là ví dụ về sóng điện từ chịu sự chi phối của cùng một định luật cơ bản nhưng có tần số rất khác nhau. Công trình của Maxwell dẫn đến kết luận rằng sóng vô tuyến có thể phản xạ từ các vật thể kim loại và khúc xạ bởi môi trường điện môi, giống như sóng ánh sáng. Hertz đã chứng minh các đặc tính này vào năm 1888, sử dụng sóng vô tuyến ở bước sóng 66 cm (tương ứng với tần số khoảng 455 MHz).



Early military radar system

1.1.2.8. Xác định phạm vi quang phổ từ khả kiến đến vô hình (1950)

Vào đầu những năm 1950, các nhà nghiên cứu bắt đầu xác định toàn bộ dải quang phổ bao gồm cả bước sóng nhìn thấy và không nhìn thấy (như hồng ngoại) [10]. Sự hiểu biết toàn diện này cho phép các nhà khoa học phát triển các cảm biến có khả năng thu thập dữ liệu trên nhiều dải quang phổ, nâng cao khả năng giám sát các thay đổi về môi trường như sức khỏe thảm thực vật và chất lượng nước—một sự tiến hóa bắt nguồn từ những khám phá trước đó về bức xạ hồng ngoại. Đây cũng chính là thời điểm bắt đầu nghiên cứu về các ảnh đa phổ.



Hình 4. Dải bước sóng điện từ

1.1.2.9. Khám phá không gian (1961)

Vào ngày 12 tháng 4 năm 1961, Yuri Gagarin trở thành người đầu tiên bay quanh Trái Đất trên tàu Vostok 1, đánh dấu một cột mốc quan trọng trong khám phá không gian, mở rộng khả năng quan sát vượt ra ngoài các phương pháp máy bay truyền thống [11]. Sự kiện này mở ra những con đường mới để chụp ảnh Trái Đất từ không gian bằng công nghệ vệ tinh, dựa trên những tiến bộ trước đây trong chụp ảnh trên không đồng thời giới thiệu những khả năng mới cho việc giám sát toàn cầu.

1.1.2.10. Lần đầu tiên sử dụng thuật ngữ Viễn thám (1960-1970)

Thuật ngữ "viễn thám" lần đầu tiên được đặt ra trong giai đoạn này khi các nhà khoa học tìm cách định nghĩa hoạt động thu thập thông tin về một vật thể hoặc khu vực mà không cần tiếp xúc trực tiếp thông qua các cảm biến trên vệ tinh hoặc máy bay bởi Evelyn Lord Pruitt [12]. Khung khái niệm này đã cung cấp cho viễn thám như một lĩnh vực riêng biệt trong khoa học môi trường và địa lý, dẫn đến việc tăng cường tài trợ nghiên cứu và những tiến bộ công nghệ dựa trên các kỹ thuật hình ảnh trước đó.



Evelyn Lord Pruitt, 1918–2000

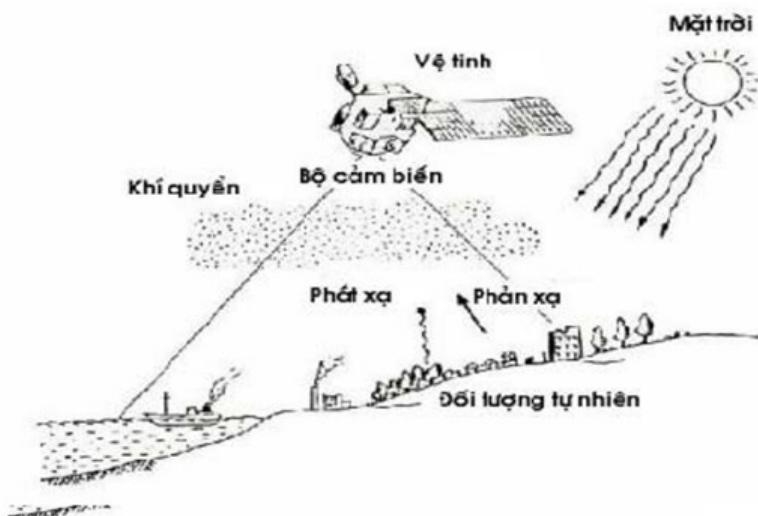
1.1.2.11. Phóng vệ tinh Landsat-1 (1972)

Vào ngày 23 tháng 7 năm 1972, NASA đã phóng Landsat-1 - vệ tinh đầu tiên được thiết kế riêng cho mục đích quan sát Trái đất - đánh dấu một thời điểm quan trọng trong lịch sử cảm biến từ xa [13]. Được trang bị máy quét đa phổ (MSS), Landsat-1 cung cấp phạm vi phủ sóng liên tục của bề mặt Trái đất theo thời gian, cho phép giám sát có hệ thống các thay đổi về sử dụng đất, hoạt động nông nghiệp, tỷ lệ phá rừng và mở rộng đô thị - những tiến bộ có thể thực hiện được nhờ nhiều thập kỷ nghiên cứu về công nghệ hình ảnh.

Từ năm 1972 cho đến nay, rất nhiều loại vệ tinh khác với mục đích quan sát trái đất đã được phóng lên quỹ đạo nhằm nghiên cứu các hiện tượng tự nhiên, dự báo thời tiết và các hoạt động khác phục vụ con người. Đây là nguồn tài nguyên vô cùng quý giá trong việc hiểu rõ hơn về các hiện tượng và cơ chế hình thành, đồng thời có thể nhận biết kịp thời những thay đổi của trái đất và đưa ra những dự đoán trong tương lai.

1.1.3. Các loại ảnh viễn thám và ứng dụng

Nguyên lý cơ bản của viễn thám đó là đặc trưng phản xạ hay bức xạ của các đối tượng tự nhiên tương ứng với từng giải phổ khác nhau. Kết quả của việc giải đoán các lớp thông tin phụ thuộc rất nhiều vào sự hiểu biết về mối tương quan giữa đặc trưng phản xạ phổ với bản chất, trạng thái của các đối tượng tự nhiên. Những thông tin về đặc trưng phản xạ phổ của các đối tượng tự nhiên sẽ cho phép các nhà chuyên môn chọn các kênh ảnh tối ưu, chứa nhiều thông tin nhất về đối tượng nghiên cứu, đồng thời đây cũng là cơ sở để phân tích nghiên cứu các tính chất của đối tượng, tiến tới phân loại chúng.



Hình 5. Mô tả về nguyên lý thu thập dữ liệu ảnh bằng công nghệ viễn thám.

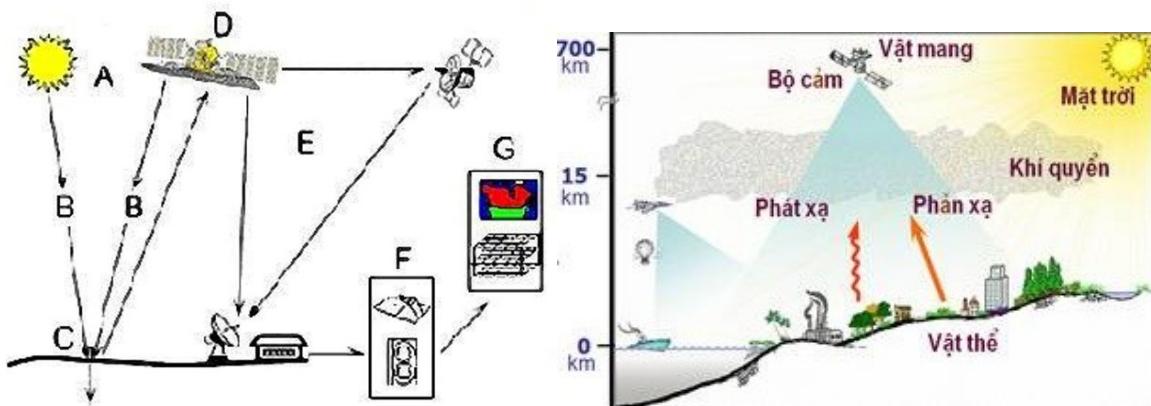
Bộ cảm biến là thiết bị được sử dụng để thu thập sóng điện từ được phản xạ / bức xạ từ vật thể, cảm biến đó có thể là máy chụp hoặc máy quét. Những phương tiện dùng để

mang các cảm biến này được gọi là vật mang, chúng có thể là máy bay, tàu con thoi, vệ tinh hoặc khinh khí cầu...

Nguồn năng lượng chính được sử dụng để thu thập dữ liệu trong công nghệ viễn thám là bức xạ mặt trời, bộ cảm biến được đặt trên vật mang thu nhận năng lượng của sóng điện từ do các vật thể phản xạ hay bức xạ lại. Thông tin về năng lượng mà các vật thể phản xạ được thu thập lại bởi ảnh viễn thám, thông qua quá trình xử lý tự động trên máy tính hoặc giải đoán trực tiếp hình ảnh theo kinh nghiệm của chuyên gia viễn thám để cho ra kết quả cuối cùng.

Toàn bộ quá trình thu nhận và xử lý ảnh bằng công nghệ viễn thám bao gồm 5 thành phần cơ bản sau:

- Nguồn cung cấp năng lượng.
- Sự tương tác của nguồn năng lượng đó với khí quyển.
- Sự tương tác của năng lượng với các vật thể trên bề mặt Trái Đất.
- Chuyển đổi năng lượng phản xạ từ vật thể thành dữ liệu ảnh số thông qua bộ cảm biến.
- Hiển thị ảnh số, là đầu vào cho việc giải đoán và xử lý dữ liệu.



Hình 6. Sơ đồ về quá trình thu nhận, xử lý và ứng dụng của viễn thám.

Trong đó:

- A: Năng lượng sóng điện từ được bức xạ từ nguồn cấp.
- B: Năng lượng từ A tương tác với các yếu tố có trong khí quyển.
- C: Năng lượng từ B tương tác với các thành phần trên bề mặt Trái Đất.
- D: Năng lượng C phản xạ lại và được ghi nhận bởi bộ cảm biến.
- E: Năng lượng sau khi thu nhận bởi cảm biến được truyền về trạm thu để xử lý.
- F: Giải đoán và phân tích ảnh viễn thám thu nhận được.
- G: Ứng dụng dữ liệu sau khi giải đoán vào các lĩnh vực khác nhau.

Quá trình thu thập dữ liệu thông qua bộ cảm biến chịu tác động mạnh mẽ bởi khả năng lan truyền sóng điện từ trong khí quyển. Mỗi dải phổ điện từ sẽ có đặc điểm và một tốc độ lan truyền sóng khác nhau, ví dụ như:

- **Khả kiến (hay còn gọi là bước sóng nhìn thấy):** Có bước sóng từ 0,4 – 0,76μm, rất ít hấp thu bởi oxy, hơi nước. Năng lượng phản xạ cực đại khi bước sóng đạt 0,5μm trong khí quyển. Năng lượng do dải phổ điện từ này cung cấp giữ vai trò quan trọng trong viễn thám.
- **Sau Khả kiến (cận hồng ngoại – hồng ngoại sóng ngắn):** Hồng ngoại gần trung bình, có bước sóng từ 0,77-1,34 & 1,55-2,4, năng lượng phản xạ mạnh với các bước sóng hồng ngoại gần từ 0,77 – 0,9, sử dụng trong chụp ảnh hồng ngoại theo dõi biến đổi thực vật từ 1,55-2,4
- **Hồng ngoại nhiệt:** Có bước sóng từ 3 – 22μm, có một số vùng bị hấp thụ mạnh bởi hơi nước, dải sóng điện từ này giữ vai trò quan trọng trong việc phát hiện cháy rừng và hoạt động của núi lửa (từ 3,5 – 5μm). Bức xạ nhiệt của Trái Đất có năng lượng cao nhất được phát hiện qua dải sóng hồng ngoại nhiệt tại bước sóng 10μm.
- **Vô tuyến (Radar):** Có bước sóng từ 1mm – 30cm, dải sóng điện từ này không được hấp thụ mạnh từ khí quyển, cho phép cảm biến thu nhận dữ liệu 24/24 mà không bị ảnh hưởng bởi mây, sương mù hay mưa.

Bảng 1. Tông hợp các ảnh viễn thám phân loại theo cơ chế hoạt động

Tiêu chí	Ảnh viễn thám quang học (Optical)	Ảnh hồng ngoại nhiệt (Thermal IR)	Ảnh radar chủ động (Active Radar)	Ảnh viễn thám vi ba thụ động (Passive Microwave)
Phân nhóm	Ảnh thụ động (Passive)	Ảnh thụ động (Passive)	Ảnh chủ động (Active)	Ảnh thụ động (Passive)
Dải phổ	0.4-2.5 μm (Visible & Near-IR)	3-14 μm (Thermal IR)	1 mm - 1 m (Microwave)	1 mm - 1 m (Microwave)
Mô tả/Giới thiệu	Thu nhận bức xạ phản xạ từ mặt trời trong dải sóng nhìn thấy và cận hồng ngoại	Thu nhận bức xạ nhiệt tự nhiên từ vật thể trên bề mặt Trái đất	Phát và thu sóng radar chủ động (bao gồm cả SAR)	Thu nhận bức xạ tự nhiên trong dải vi ba
Ưu điểm	<ul style="list-style-type: none"> - Độ phân giải không gian cao - Dễ giải đoán - Chi phí thấp 	<ul style="list-style-type: none"> - Hoạt động cả ngày và đêm - Phát hiện nhiệt độ 	<ul style="list-style-type: none"> - Hoạt động mọi thời tiết - Xuyên qua mây 	<ul style="list-style-type: none"> - Không cần nguồn phát - Đo được độ ẩm

Tiêu chí	Ảnh viễn thám quang học (Optical)	Ảnh hồng ngoại nhiệt (Thermal IR)	Ảnh radar chủ động (Active Radar)	Ảnh viễn thám vi ba thụ động (Passive Microwave)
	- Có thông tin màu sắc thực	- Theo dõi hoạt động nhiệt	- Độ phân giải cao (SAR)	- Xuyên qua mây nhẹ
Nhược điểm	<ul style="list-style-type: none"> - Phụ thuộc thời tiết - Không xuyên mây - Chỉ hoạt động ban ngày 	<ul style="list-style-type: none"> - Độ phân giải trung bình - Ảnh hưởng bởi điều kiện khí quyển - Chi phí thiết bị cao 	<ul style="list-style-type: none"> - Chi phí rất cao - Xử lý phức tạp - Nhiều tín hiệu 	<ul style="list-style-type: none"> - Độ phân giải thấp - Tín hiệu yếu - Dễ nhiễu
Ứng dụng chung	<ul style="list-style-type: none"> - Bản đồ thực vật - Quy hoạch đô thị - Giám sát môi trường 	<ul style="list-style-type: none"> - Phát hiện cháy rừng - Nghiên cứu độ nhiệt - Theo dõi hoạt động núi lửa 	<ul style="list-style-type: none"> - Bản đồ 3D - Quan trắc biển - Giám sát biến dạng 	<ul style="list-style-type: none"> - Dự báo thời tiết - Đo độ ẩm đất - Nghiên cứu đại dương
Ứng dụng cho lũ quét	<ul style="list-style-type: none"> - Đánh giá thiệt hại - Lập bản đồ rủi ro - Theo dõi phục hồi 	<ul style="list-style-type: none"> - Phát hiện vùng ngập - Đánh giá nhiệt độ nước - Theo dõi dòng chảy 	<ul style="list-style-type: none"> - Bản đồ ngập chi tiết - Giám sát đê điều - Cảnh báo sớm 	<ul style="list-style-type: none"> - Đánh giá độ ẩm đất - Dự báo mưa - Theo dõi tích nước
Danh sách ảnh	Landsat, SPOT, Sentinel-2...	ASTER, Thermal, MODIS, Landsat TIR...	TerraSAR-X, Sentinel-1, RADARSAT...	SMOS, AMSR-E, SSM/I...
Cơ chế hoạt động	Thu bức xạ phản xạ ánh sáng mặt trời	Thu bức xạ nhiệt từ vật thể	Phát và thu sóng radar phản xạ	Thu bức xạ tự nhiên dài vi ba

Ngoài các loại ảnh viễn thám trên, có một sự kết hợp giữa ảnh radar chủ động và vi ba thụ động và được gọi là vi ba kết hợp. Ảnh này có độ phân giải thấp hơn các ảnh radar chủ động và tập trung vào môi trường chuyên biệt như độ ẩm đất. Các ảnh này thường sử dụng băng tần L-band để quan trắc yếu tố chuyên biệt. Một ví dụ về ảnh này là SMAP, CIMR...

1.1.3.1. Ảnh viễn thám quang học

1. Giới thiệu chung

Cảm biến quang học từ xa là quá trình thu thập thông tin về một vật thể hoặc khu vực từ xa bằng cách sử dụng bức xạ điện từ trong quang phổ. Điều này bao gồm ánh

sáng khả kiến cũng như các bước sóng cận hồng ngoại (NIR) và hồng ngoại sóng ngắn (SWIR). Các cảm biến quang học thu được ánh sáng mặt trời phản chiếu từ các bề mặt, cho phép phân tích các đặc điểm và vật liệu bề mặt khác nhau.

Cảm biến quang học từ xa liên quan đến việc thu thập dữ liệu từ các cảm biến đo bức xạ điện từ phản xạ từ hoặc phát ra từ các vật thể trên bề mặt Trái đất. Các bước sóng chính được sử dụng trong cảm biến quang học từ ánh sáng nhìn thấy (khoảng 0,4 đến 0,7 micromet) đến hồng ngoại gần (0,7 đến 1,5 micromet) và hồng ngoại sóng ngắn (1,5 đến 3 micromet). Dữ liệu thu thập được có thể được xử lý để tạo ra hình ảnh cung cấp thông tin chi tiết về nhiều thông số môi trường khác nhau.

Các ảnh viễn thám quang học phổ biến hiện nay bao gồm: (1) Landsat; (2) Sentinel-2; (3) SPOT; (4) ASTER; (5) WorldView... Trong đó, ảnh Landsat và ảnh Sentinel-2 là phổ biến hơn cả do sự miễn phí và khả năng dễ tiếp cận. Ảnh Landsat có độ phân giải là 30m trong khi đó ảnh Sentinel-2 có độ phân giải là 10m.

Giám sát bề mặt, đặc biệt là sự che phủ bề mặt có ý nghĩa quan trọng trong nhiều ngành nghề, đặc biệt là sự biến động của lớp phủ, sự thay đổi này có mối liên hệ mật thiết đối với sự phát triển của tự nhiên và con người.

Ngoài các kênh phổ màu (R, G, B), các kênh có bước sóng cận hồng ngoại và hồng ngoại sóng ngắn đã làm cho dữ liệu viễn thám mang nhiều ý nghĩa hơn so với các ảnh chụp thông thường thông qua các chỉ số. Mỗi chỉ số có những đặc điểm khác nhau và diễn tả các mối liên hệ khác nhau đối với các đối tượng bề mặt.

Bảng 2. Các chỉ số giám sát bề mặt sử dụng NIR và SWIR

T T T	Tên Chỉ Số	Công Thức	Kênh Sử Dụng	Ứng Dụng Chính	Giá Trị Điển Hình
1	NDVI	(NIR - Red) / (NIR + Red)	NIR, Red	Sức khỏe thực vật	-1 đến 1
2	NDWI	(Green - NIR) / (Green + NIR)	NIR, Green	Phát hiện vùng nước	-1 đến 1
3	NBR	(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)	NIR, SWIR	Đánh giá cháy rừng	-1 đến 1
4	NDMI	(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)	NIR, SWIR	Độ ẩm thực vật	-1 đến 1
5	MSI	SWIR / NIR	NIR, SWIR	Căng thẳng nước	> 0
6	SR	NIR / Red	NIR, Red	Sinh khối thực vật	> 0

T T	Tên Chỉ Số	Công Thức	Kênh Sử Dụng	Ứng Dụng Chính	Giá Trị Điển Hình
7	NDBI	$(\text{SWIR} - \text{NIR}) / (\text{SWIR} + \text{NIR})$	NIR, SWIR	Khu vực xây dựng	-1 đến 1
8	SAVI	$[(1 + L) * (\text{NIR} - \text{Red})] / [\text{NIR} + \text{Red} + L]$	NIR, Red	Điều chỉnh ảnh hướng nền đất	-1 đến 1
9	EVI	$2.5 * [(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + 6 * \text{Red} - 7.5 * \text{Blue} + 1)]$	NIR, Red, Blue	Hiệu chỉnh khí quyển	-1 đến 1
10	ARVI	$[(\text{NIR} - (2 * \text{Red} - \text{Blue})) / (\text{NIR} + (2 * \text{Red} - \text{Blue}))]$	NIR, Red, Blue	Loại bỏ ảnh hướng khí quyển	-1 đến 1
11	RVI	NIR / Red	NIR, Red	Tỷ số phản xạ	> 0
12	DVI	NIR - Red	NIR, Red	Chênh lệch thực vật	> 0
13	TVI	$\sqrt{[(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red}) + 0.5]}$	NIR, Red	Biến đổi chỉ số thực vật	0 đến 1
14	OSAVI	$(1 + 0.16) * (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red} + 0.16)$	NIR, Red	Điều chỉnh ảnh hướng nền đất	-1 đến 1
15	GEMI	$\eta * (1 - 0.25 * \eta) - [(\text{Red} - 0.125) / (1 - \text{Red})]$	NIR, Red	Chỉ số toàn cầu môi trường	-1 đến 1

2. Ứng dụng ảnh viễn thám quang học trong xác định lũ quét

Dữ liệu sử dụng đất/lớp phủ: Băng tần xanh lam, xanh lục, và đỏ được sử dụng để phân loại các loại lớp phủ bề mặt khác nhau. Trong khi đó, băng tần cận hồng ngoại đặc biệt hữu ích trong việc phân biệt giữa các loại thảm thực vật và đất trống. Kết hợp các băng tần này cho phép tạo ra bản đồ sử dụng đất chi tiết, giúp xác định các khu vực có khả năng tạo ra dòng chảy bề mặt cao.

Chỉ số thực vật: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) được tính từ băng tần đỏ và cận hồng ngoại. NDVI giúp đánh giá mật độ và sức khỏe của thảm thực vật, là yếu tố quan trọng trong việc làm chậm dòng chảy và giảm nguy cơ lũ quét. Theo dõi NDVI theo thời gian có thể giúp phát hiện các thay đổi trong thảm thực vật có thể ảnh hưởng đến nguy cơ lũ quét.

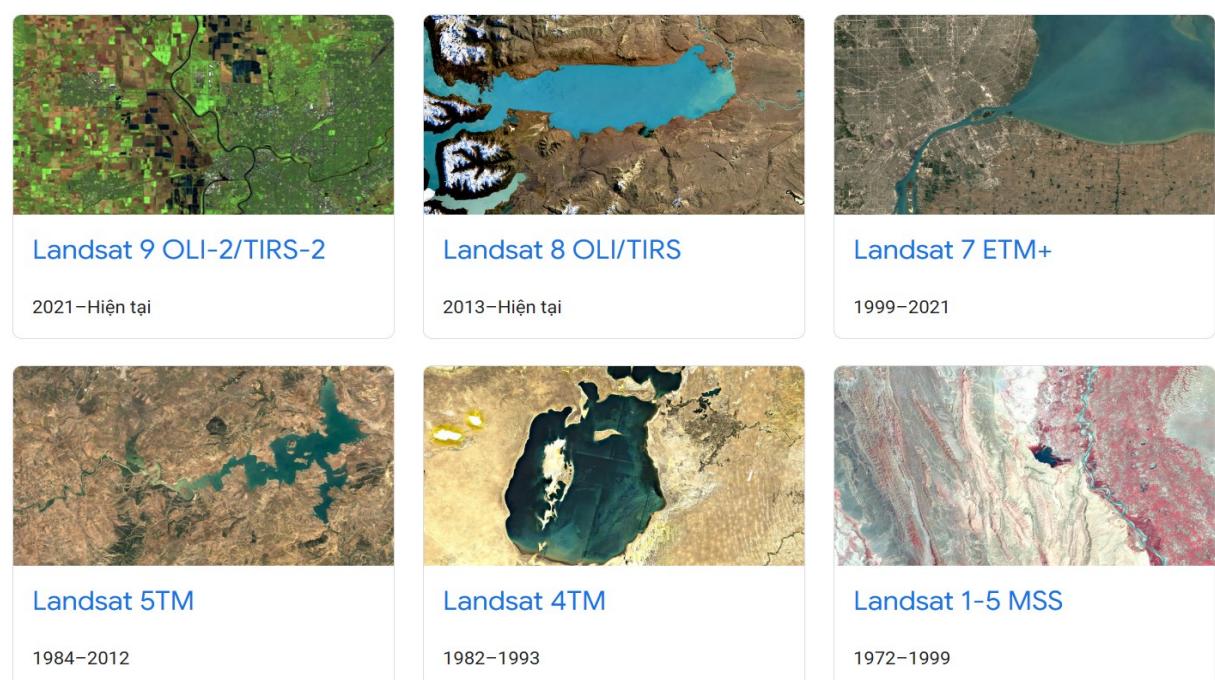
Dữ liệu độ ẩm đất: Các băng tần SWIR (hồng ngoại sóng ngắn) nhạy với độ ẩm đất và có thể được sử dụng để ước tính độ ẩm bề mặt. Chỉ số Độ ẩm Khác biệt Chuẩn hóa (NDMI) được tính từ băng tần NIR và SWIR cung cấp thông tin về độ ẩm thực vật và

đất. Thông tin này rất quan trọng trong việc đánh giá khả năng hấp thụ nước của đất trước các sự kiện mưa lớn.

Dữ liệu thủy văn: Băng tần coastal aerosol và đỏ có thể được sử dụng để xác định các vùng nước nông và theo dõi sự thay đổi trong diện tích mặt nước. Điều này giúp xác định các khu vực có khả năng bị ngập lụt cao và theo dõi sự mở rộng của các vùng nước sau các sự kiện mưa lớn.

Dữ liệu địa hình: Mặc dù ảnh viễn thám quang học không trực tiếp cung cấp dữ liệu độ cao, nhưng các băng tần đa phổ có thể được sử dụng để tăng cường chất lượng của DEM hiện có. Ảnh Landsat

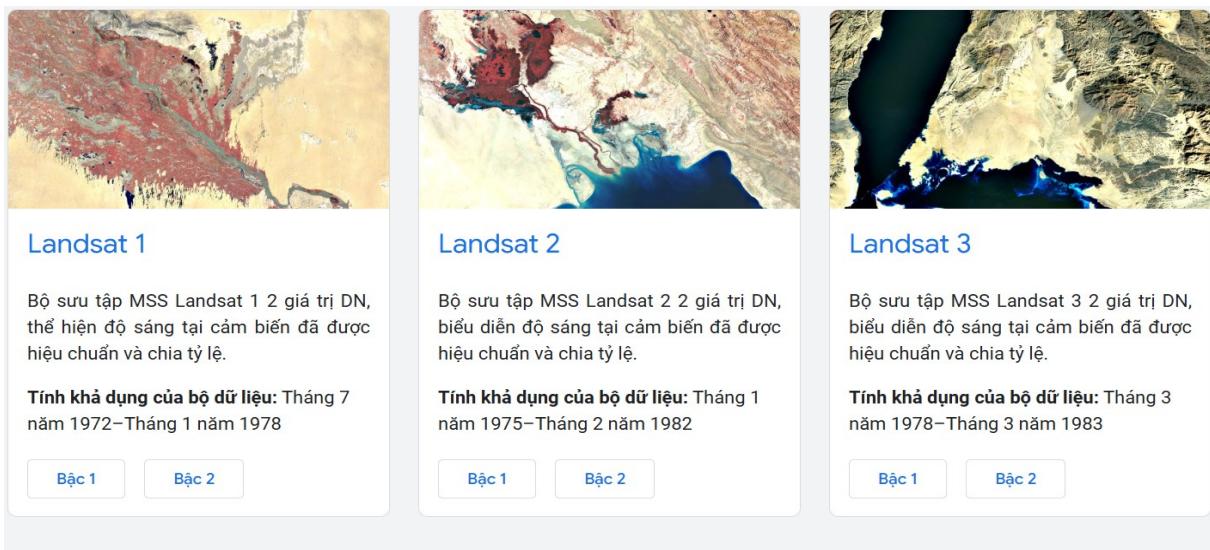
a. Giới thiệu chung về ảnh Landsat



Hình 7. Các sản phẩm của ảnh Landsat qua các thời kỳ

Landsat là một trong những chương trình vệ tinh quan sát Trái Đất lâu đời và quan trọng nhất, cung cấp dữ liệu liên tục về bề mặt hành tinh của chúng ta từ năm 1972 đến nay. Chương trình này là kết quả hợp tác giữa NASA và Cục Khảo sát Địa chất Hoa Kỳ (USGS), với mục tiêu thu thập dữ liệu đa phổ về bề mặt Trái Đất. Qua 9 thế hệ vệ tinh, Landsat đã trải qua nhiều cải tiến về công nghệ cảm biến, độ phân giải không gian và phổ, cũng như khả năng xử lý và phân phối dữ liệu.

Landsat 1, được phóng vào năm 1972, mở đầu kỷ nguyên mới trong quan sát Trái Đất từ không gian. Vệ tinh này được trang bị hai cảm biến chính: Hệ thống Camera Trở lại (RBV) và Bộ quét Đa phổ (MSS). MSS trở thành cảm biến chính, cung cấp dữ liệu trong bốn băng tần phổ với độ phân giải 80m. Landsat 2 và 3 tiếp tục sử dụng công nghệ tương tự, với một số cải tiến nhỏ.

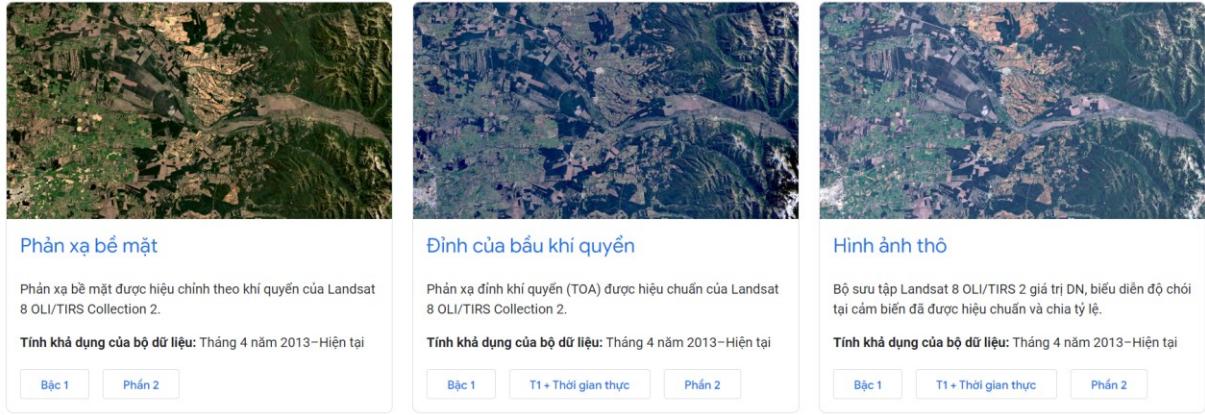


Hình 8. Ảnh Landsat 1→5 và tính khả dụng của dữ liệu

Bước nhảy vọt đầu tiên đến với Landsat 4 và 5, được phóng vào những năm 1980. Hai vệ tinh này được giới thiệu cảm biến Thematic Mapper (TM), cung cấp dữ liệu với độ phân giải không gian 30m trong sáu băng tần quang học và một băng tần nhiệt với độ phân giải 120m. Sự cải thiện này cho phép phân tích chi tiết hơn về thảm thực vật, địa chất và sử dụng đất.

Landsat 7, phóng vào năm 1999, đánh dấu một cột mốc quan trọng với việc giới thiệu cảm biến Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). ETM+ duy trì độ phân giải 30m cho các băng tần quang học, nhưng cải thiện độ phân giải của băng tần nhiệt lên 60m và thêm một băng toàn sắc với độ phân giải 15m. Tuy nhiên, sự có với Bộ hiệu chỉnh dòng quét (SLC) vào năm 2003 đã ảnh hưởng đến chất lượng dữ liệu, tạo ra các khoảng trống trong hình ảnh.

Landsat 8, phóng vào năm 2013, đánh dấu một bước tiến lớn với hai cảm biến mới: Bộ thu hình tác nghiệp đất (OLI) và Cảm biến hồng ngoại nhiệt (TIRS). OLI cung cấp dữ liệu trong chín băng tần phổ, bao gồm một băng tần mới để phát hiện mây cirrus và một băng tần ven bờ/aerosol. TIRS thu thập dữ liệu trong hai băng tần nhiệt với độ phân giải 100m (được lấy mẫu lại thành 30m). Landsat 8 cũng cải thiện độ phân giải bức xạ lên 12-bit, cho phép phân biệt tốt hơn giữa các đặc điểm bề mặt.



Hình 9. Ảnh Landsat 8 được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu gần đây

Landsat 9, phóng vào năm 2021, là vệ tinh mới nhất trong series, với cấu hình tương tự như Landsat 8 nhưng có một số cải tiến về hiệu suất và độ tin cậy của cảm biến. Ngoài ra, landsat 9 còn bổ sung thêm một máy dò quang hồng ngoại lượng tử (QWIP) để phát hiện các bước sóng dài của ánh sáng do Trái đất phát ra có cường độ phụ thuộc vào nhiệt độ bề mặt. Các bước sóng này, được gọi là hồng ngoại nhiệt, nằm ngoài phạm vi thị giác của con người. QWIP là giải pháp thay thế mới, chi phí thấp hơn cho công nghệ hồng ngoại thông thường, sử dụng nhạy cảm với hai dải bước sóng hồng ngoại nhiệt, giúp phân tách nhiệt độ bề mặt Trái đất với nhiệt độ của khí quyển. Do đó, ảnh Landsat 9 cũng có thể được xếp vào nhóm ảnh viễn thám hồng ngoại nhiệt.

Bảng 3. Các kênh phổ ảnh landsat

Kênh phổ	Độ phân giải	Bước sóng (μm)	Mô tả
B1	30 mét	0,43 - 0,45 μm	Khí dung ven biển
B2	30 mét	0,45 - 0,51 μm	Màu xanh da trời (B)
B3	30 mét	0,53 - 0,59 μm	Màu xanh lá (G)
B4	30 mét	0,64 - 0,67 μm	Màu đỏ (R)
B5	30 mét	0,85 - 0,88 μm	Cận hồng ngoại (NIR)
B6	30 mét	1,57 - 1,65 μm	Hồng ngoại sóng ngắn 1 (SWIR1)

Kênh phô	Độ phân giải	Bước sóng (μm)	Mô tả
B7	30 mét	2,11 - 2,29 μm	Sóng ngắn hồng ngoại 2 (SWIR2)
B8	15 mét	0,52 - 0,90 μm	Dải 8 Toàn sắc
B9	30 mét	1,36 - 1,38 μm	Tua quăn
B10	30 mét	10,60 - 11,19 μm	Hồng ngoại nhiệt 1, lấy mẫu lại từ 100m đến 30m (TIR1)
B11	30 mét	11,50 - 12,51 μm	Hồng ngoại nhiệt 2, lấy mẫu lại từ 100m đến 30m (TIR2)
QA_PIXEL	30 mét		Bộ sưu tập Landsat 2 OLI/TIRS QA Bitmask

b. Những đặc điểm nổi bật của ảnh Landsat

Điểm mạnh chính của ảnh Landsat bao gồm:

- Tính liên tục lịch sử: Với hơn 50 năm dữ liệu liên tục, Landsat cung cấp bộ dữ liệu dài hạn nhất về sự thay đổi bề mặt Trái đất, cho phép phân tích xu hướng dài hạn trong sử dụng đất, biến đổi khí hậu và các quá trình môi trường khác.
- Độ phủ toàn cầu: Landsat thu thập dữ liệu trên toàn bộ bề mặt Trái đất (trừ các vùng cực), cho phép nghiên cứu và so sánh ở quy mô toàn cầu.
- Độ phân giải không gian trung bình: Độ phân giải 30m là lý tưởng cho nhiều ứng dụng, cân bằng giữa chi tiết và khả năng bao quát diện tích lớn.
- Đa phô: Các băng tần đa dạng cho phép phân tích nhiều khía cạnh khác nhau của bề mặt Trái đất, từ thảm thực vật đến địa chất và nước.
- Chất lượng dữ liệu cao: Dữ liệu Landsat được hiệu chỉnh bức xạ và hình học, giảm thiểu nhu cầu tiền xử lý phức tạp.
- Miễn phí và dễ tiếp cận: Từ năm 2008, dữ liệu Landsat được cung cấp miễn phí, tạo điều kiện cho việc sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu và ứng dụng.

c. Ứng dụng của ảnh Landsat

Ứng dụng của ảnh Landsat rất đa dạng và bao gồm:

- Giám sát biến đổi khí hậu: Theo dõi sự thu hẹp của sông băng, tan băng ở Bắc Cực, và thay đổi mực nước biển.
- Quản lý tài nguyên nước: Đánh giá chất lượng nước, theo dõi mực nước hồ và sông, và quản lý tài nguyên nước ngọt.
- Nông nghiệp: Dự báo mùa vụ, đánh giá sức khỏe cây trồng, và theo dõi tình trạng hạn hán.

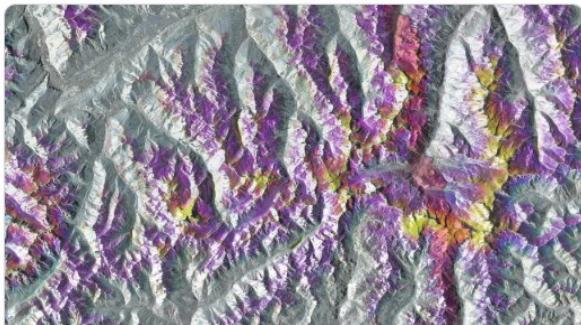
- Lâm nghiệp: Giám sát phá rừng và tái sinh rừng, đánh giá sinh khối và đa dạng sinh học.
- Quy hoạch đô thị: Theo dõi sự mở rộng đô thị và thay đổi sử dụng đất.
- Quản lý thiên tai: Đánh giá thiệt hại sau thiên tai, lập bản đồ ngập lụt và cháy rừng.
- Địa chất và khai thác khoáng sản: Lập bản đồ địa chất, phát hiện khoáng sản và đánh giá tác động môi trường của hoạt động khai thác.
- Nghiên cứu sinh thái: Theo dõi sự thay đổi hệ sinh thái, đánh giá đa dạng sinh học và môi trường sống của động vật hoang dã.
- Năng lượng tái tạo: Xác định vị trí tối ưu cho các trang trại năng lượng mặt trời và gió.

Một ví dụ cụ thể về ứng dụng ảnh Landsat là trong việc giám sát sự mở rộng đô thị ở các thành phố lớn. Bằng cách sử dụng chuỗi ảnh Landsat từ những năm 1980 đến nay, các nhà nghiên cứu có thể định lượng được tốc độ và hướng mở rộng của các khu đô thị, đánh giá tác động đến đất nông nghiệp và hệ sinh thái xung quanh, và dự báo xu hướng phát triển trong tương lai. Quy trình này thường bao gồm việc phân loại sử dụng đất từ ảnh Landsat ở các thời điểm khác nhau, sau đó so sánh kết quả để xác định các khu vực chuyển đổi từ đất nông nghiệp hoặc tự nhiên sang đất đô thị.

Một ứng dụng quan trọng khác là trong lĩnh vực nông nghiệp chính xác. Bằng cách sử dụng các chỉ số thực vật như NDVI từ ảnh Landsat, nông dân và các nhà quản lý có thể đánh giá sức khỏe cây trồng trên diện tích lớn, phát hiện sớm các vấn đề như sâu bệnh hoặc thiếu nước, và tối ưu hóa việc sử dụng phân bón và thuốc trừ sâu. Điều này không chỉ giúp tăng năng suất mà còn góp phần bảo vệ môi trường thông qua việc sử dụng hiệu quả hơn các nguồn tài nguyên.

3. Ảnh Sentinel-2

a. Giới thiệu chung về ảnh Sentinel-2



Sentinel-1 SAR GRD: Radar khía độ tổng hợp băng tần C

Dữ liệu khả dụng: 2014 – Hiện tại

Nhiệm vụ Sentinel-1 cung cấp dữ liệu từ một thiết bị radar khía độ tổng hợp (SAR) băng tần C phân cực kép. Các thiết bị SAR có khả năng thu thập dữ liệu có ý nghĩa trong mọi điều kiện thời tiết (kể cả mây) vào ban ngày và ban đêm. Dữ liệu Sentinel-1 được sử dụng trong nhiều lĩnh vực, bao gồm hoạt động hàng hải, lập bản đồ băng biển, viện trợ nhân đạo, ứng phó khẩn hoảng và quản lý rừng.



Sentinel-2 MSI: Thiết bị đa quang phổ

Dữ liệu khả dụng: 2015 – Hiện tại

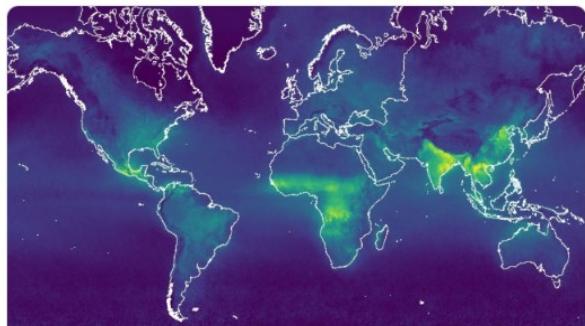
Nhiệm vụ Sentinel-2 thu thập hình ảnh đa phổ có độ phân giải cao, hữu ích cho nhiều ứng dụng, bao gồm theo dõi thảm thực vật, lớp đất và lớp nước, thay đổi lớp phủ đất, cũng như rủi ro nhân đạo và thảm họa.



Sentinel-3 OLCI EFR: Thiết bị đo màu đại dương và đất liền

Dữ liệu khả dụng: 2016 – Hiện tại

Thiết bị Sentinel-3 cung cấp các phép đo có hệ thống về đại dương, đất liền, băng và bầu khí quyển của hành tinh, bao gồm nhiệt độ, màu sắc và độ cao của bề mặt biển cũng như độ dày của băng biển.

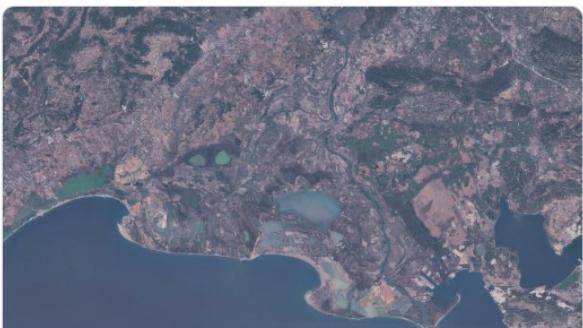


Sentinel-5P TROPOMI: Thiết bị giám sát tầng đối lưu

Dữ liệu khả dụng: 2018 – Hiện tại

Nhiệm vụ tiền thân Sentinel-5 thu thập dữ liệu hữu ích để đánh giá chất lượng không khí, bao gồm nồng độ: ôzôn, mêtan, fomanđehit, khí dung, cacbon monoxit, nitơ oxit và lưu huỳnh dioxit.

Hình 10. Các sản phẩm của Sentinel

 Phản xạ bề mặt Độ phản xạ bề mặt được hiệu chỉnh theo khí quyển cấp độ 2A. Tính khả dụng của bộ dữ liệu : 2017-03-28 – Hiện tại	 Phản xạ đỉnh khí quyển Độ phản xạ đỉnh khí quyển chỉnh lưu cấp độ 1C. Tính khả dụng của bộ dữ liệu : 27-06-2015 – Hiện tại
--	--

Hình 11. Các sản phẩm của Sentinel-2

Sentinel-2 là một phần quan trọng trong chương trình Copernicus của Cơ quan Vũ trụ Châu Âu (ESA), được thiết kế để cung cấp dữ liệu quan sát Trái đất với độ phân giải cao, tần suất thu nhận lớn và phạm vi phổ rộng. Hệ thống Sentinel-2 bao gồm hai vệ tinh giống hệt nhau (Sentinel-2A và Sentinel-2B) được phóng vào năm 2015 và 2017, cho phép chu kỳ lặp lại 5 ngày tại xích đạo và thậm chí ngắn hơn ở các vĩ độ cao hơn.

Bảng 4. Các kênh phổ ảnh Sentinel-2

Kênh phổ	Độ phân giải	Bước sóng	Mô tả
B1	60 mét	443,9nm (S2A) / 442,3nm (S2B)	Sol Khí
B2	10 mét	496,6nm (S2A) / 492,1nm (S2B)	Màu xanh da trời (B)
B3	10 mét	560nm (S2A) / 559nm (S2B)	Màu xanh lá (G)
B4	10 mét	664,5nm (S2A) / 665nm (S2B)	Màu đỏ (R)
B5	20 mét	703,9nm (S2A) / 703,8nm (S2B)	Cạnh đỏ 1
B6	20 mét	740,2nm (S2A) / 739,1nm (S2B)	Cạnh đỏ 2

Kênh phô	Độ phân giải	Bước sóng	Mô tả
B7	20 mét	782,5nm (S2A) / 779,7nm (S2B)	Cạnh đỏ 3
B8	10 mét	835,1nm (S2A) / 833nm (S2B)	NIR
B8A	20 mét	864,8nm (S2A) / 864nm (S2B)	Cạnh đỏ 4
B9	60 mét	945nm (S2A) / 943,2nm (S2B)	Hơi nước
B11	20 mét	1613,7nm (S2A) / 1610,4nm (S2B)	SWIR 1
B12	20 mét	2202,4nm (S2A) / 2185,7nm (S2B)	SWIR 2
AOT	10 mét		Độ dày quang học của Sol Khí
WVP	10 mét		Áp suất hơi nước. Độ cao mà nước sẽ đạt được nếu hơi nước ngưng tụ thành chất lỏng và phân tán đều trên cột.
SCL	20 mét		Bản đồ phân loại cảnh (Giá trị "Không có dữ liệu" là 0 bị che đi)
TCI_R	10 mét		Hình ảnh màu thực, kênh đỏ
TCI_G	10 mét		Hình ảnh màu thực, kênh xanh
TCI_B	10 mét		Hình ảnh màu thực, kênh màu xanh
MSK_CL DPRB	20 mét		Bản đồ xác suất đám mây (thiếu trong một số sản phẩm)
MSK_SN WPRB	10 mét		Bản đồ xác suất tuyết (thiếu trong một số sản phẩm)
QA10	10 mét		Luôn luôn trống rỗng
QA20	20 mét		Luôn luôn trống rỗng
QA60	60 mét		Mặt nạ mây. Đã bị che phủ trong khoảng thời gian từ 2022-01-25 đến 2024-02-28 bao gồm.

b. Những đặc điểm nổi bật của ảnh Sentinel-2

Độ phân giải không gian cao:

Sentinel-2 cung cấp độ phân giải không gian từ 10m đến 60m tùy thuộc vào băng tần. Cụ thể:

- 10m: 4 băng tần (Blue, Green, Red, NIR)
- 20m: 6 băng tần (4 băng "Red Edge", 2 băng SWIR)
- 60m: 3 băng tần (Coastal aerosol, Water vapour, SWIR-Cirrus)

Độ phân giải 10m cho các băng tần chính cho phép phân tích chi tiết về thảm thực vật, đô thị hóa và các đặc điểm bề mặt khác.

Phạm vi phổ rộng:

Với 13 băng tần phổ, Sentinel-2 cung cấp thông tin phong phú về các đặc tính bề mặt Trái đất. Đặc biệt, sự hiện diện của các băng tần "Red Edge" cho phép phân tích chi tiết hơn về tình trạng thảm thực vật.

Tần suất thu nhận cao:

Chu kỳ lặp lại 5 ngày (và thậm chí ngắn hơn ở các vĩ độ cao) cho phép theo dõi các thay đổi nhanh chóng trên bề mặt Trái đất, đặc biệt hữu ích trong nông nghiệp và quản lý thiên tai.

Phạm vi bao phủ rộng:

Mỗi cảnh ảnh Sentinel-2 bao phủ một diện tích 100 x 100 km, cho phép nghiên cứu các hiện tượng quy mô lớn.

Chất lượng dữ liệu cao:

Sentinel-2 cung cấp dữ liệu 12-bit, cho phép phân biệt tốt hơn giữa các đặc tính bề mặt tinh tế.

c. Ứng dụng của ảnh Sentinel-2:

Trong lĩnh vực nông nghiệp chính xác, Sentinel-2 đã tạo ra một cuộc cách mạng trong cách chúng ta theo dõi và quản lý cây trồng. Với độ phân giải không gian 10m và 13 kênh phổ, vệ tinh này cho phép chúng ta phân tích chi tiết sức khỏe cây trồng thông qua các chỉ số thực vật như NDVI và các chỉ số Red Edge. Điều này không chỉ giúp dự đoán năng suất một cách chính xác mà còn cho phép phát hiện sớm các dấu hiệu stress do hạn hán hoặc sâu bệnh, từ đó tối ưu hóa việc sử dụng phân bón và thuốc trừ sâu.

Trong lĩnh vực lâm nghiệp và quản lý môi trường, khả năng giám sát liên tục của Sentinel-2 đặc biệt có giá trị. Chúng tôi có thể theo dõi sự thay đổi của thảm thực vật rừng theo thời gian thực, phát hiện các hoạt động phá rừng bất hợp pháp, và đánh giá tác động của biến đổi khí hậu đến hệ sinh thái. Các kênh cận hồng ngoại của vệ tinh

cung cấp thông tin quý giá về sinh khối và trữ lượng carbon, góp phần quan trọng trong các nghiên cứu về biến đổi khí hậu.

Đối với quy hoạch đô thị và quản lý vùng ven biển, độ phân giải cao của Sentinel-2 cho phép chúng tôi tạo ra các bản đồ sử dụng đất chi tiết và theo dõi những thay đổi trong không gian đô thị. Đặc biệt trong việc giám sát vùng ven biển, các kênh phổ đặc biệt của vệ tinh giúp phân tích chất lượng nước và theo dõi sự thay đổi của hệ sinh thái ven biển như rừng ngập mặn.

Trong bối cảnh của biến đổi khí hậu và thiên tai, Sentinel-2 đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá thiệt hại và hỗ trợ công tác ứng phó. Khả năng chụp ảnh thường xuyên (mỗi 5 ngày tại xích đạo) cho phép theo dõi và đánh giá nhanh chóng tác động của các sự kiện thiên tai như lũ lụt, cháy rừng và xói lở đất.

Một ví dụ cụ thể về ứng dụng của Sentinel-2 trong nông nghiệp chính xác có thể là việc theo dõi sức khỏe cây trồng trong một vùng canh tác lúa. Bằng cách sử dụng chuỗi ảnh Sentinel-2 trong suốt mùa vụ, chúng ta có thể:

- Tạo bản đồ NDVI để theo dõi sự phát triển của cây lúa qua các giai đoạn.
- Sử dụng các chỉ số Red Edge để phát hiện sớm các dấu hiệu stress do thiếu dinh dưỡng hoặc sâu bệnh.
- Uớc tính sinh khối và dự đoán năng suất dựa trên mối quan hệ giữa các chỉ số thực vật và dữ liệu thực địa.
- Phát hiện các khu vực có vấn đề về tưới tiêu bằng cách phân tích chỉ số độ ẩm.
- Tối ưu hóa việc sử dụng phân bón bằng cách xác định các khu vực cần bổ sung dinh dưỡng.

Qua việc sử dụng dữ liệu Sentinel-2 này, nông dân và các nhà quản lý có thể đưa ra quyết định kịp thời và chính xác hơn, dẫn đến việc sử dụng nguồn lực hiệu quả hơn và tăng năng suất cây trồng.

Tóm lại, ảnh Sentinel-2 với độ phân giải cao, phạm vi phổ rộng và tần suất thu nhận lớn, cung cấp một công cụ mạnh mẽ cho nhiều ứng dụng trong lĩnh vực quan sát Trái đất. Khả năng cung cấp thông tin chi tiết về thảm thực vật, kết hợp với tính sẵn có và miễn phí của dữ liệu, làm cho Sentinel-2 trở thành một nguồn dữ liệu quan trọng cho các nhà nghiên cứu, quản lý tài nguyên và hoạch định chính sách trên toàn cầu.

1.1.3.2. Ảnh viễn thám hồng ngoại nhiệt

1. Giới thiệu chung

Ảnh viễn thám hồng ngoại nhiệt (Thermal Infrared Remote Sensing) là một công nghệ khoa học tiên tiến cho phép con người quan sát và phân tích bề mặt Trái Đất thông qua việc ghi nhận bức xạ nhiệt và năng lượng điện từ ở dải sóng hồng ngoại. Khác với

ánh chụp thông thường chỉ thu nhận ánh sáng nhìn thấy được, ảnh hồng ngoại cung cấp những thông tin sâu sắc và chi tiết về nhiệt độ, cấu trúc vật lý và đặc tính năng lượng của các đối tượng.

Nguyên Lý Hoạt Động: Mọi vật thể có nhiệt độ trên 0 Kelvin đều phát ra bức xạ điện từ ở dải sóng hồng ngoại. Các cảm biến hồng ngoại trên vệ tinh hoặc máy bay chuyên dụng sẽ thu nhận năng lượng này và chuyển đổi thành hình ảnh số. Mỗi pixel trong ảnh sẽ được gán một giá trị màu tương ứng với mức độ nhiệt được phát hiện, thường được thể hiện qua bảng màu từ lạnh (màu xanh) đến nóng (màu đỏ).

Ứng dụng của công nghệ này vô cùng rộng rãi và sâu sắc. Đối với lũ quét - một trong những thiên tai nguy hiểm nhất ở các khu vực miền núi - ảnh nhiệt cung cấp khả năng giám sát độc đáo. Các nhà khoa học có thể phát hiện sự thay đổi nhiệt độ và độ ẩm của sườn núi, từ đó nhận diện những khu vực có nguy cơ cao xảy ra lũ quét. Những điểm bất thường về nhiệt độ đất, sự chênh lệch nhiệt độ giữa các lớp địa chất, và độ ẩm bề mặt trở thành những tín hiệu cảnh báo sớm. Công nghệ này còn cho phép nghiên cứu sâu về mối quan hệ giữa địa hình, độ che phủ thực vật và khả năng hình thành các loại hình thiên tai thủy văn. Những thay đổi trong độ phủ thực vật, sự biến đổi của lớp đất trồi, và các yếu tố môi trường khác đều có thể được phát hiện thông qua phân tích nhiệt.

Ngoài các kênh phổ cận hồng ngoại (NIR) và hồng ngoại sóng ngắn (SWIR), ảnh viễn thám hồng ngoại nhiệt còn có thêm một số các kênh phổ liên quan đến nhiệt như kênh phổ TIR (Thermal infrared), LST (Land Surface Temperature), TCI (Temperature Condition Index), TTI (Thermal Thermal Index), HTI (Heat Stress Index)... Đây là các kênh phổ quan trọng trong việc nghiên cứu nhiệt, sinh thái và nông nghiệp.

Bảng 5. Một số các chỉ số liên quan đến kênh phổ hồng ngoại nhiệt

T T	Tên Chỉ Số	Công Thức	Ứng Dụng Chính	Ý Nghĩa	Giá Trị Điển Hình
1	LST (Land Surface Temperature)	Trực tiếp từ giá trị nhiệt độ bức xạ	Nhiệt độ bề mặt đất	Đo nhiệt độ chính xác	0 đến 50°C
2	NDTI (Normalized Difference Temperature Index)	$\frac{(TIR1 - TIR2)}{(TIR1 + TIR2)}$	Phát hiện thay đổi nhiệt	Biến động nhiệt độ	-1 đến 1
3	WDI (Water Deficit Index)	$(LST - NDVI)$	Thiếu hụt nước	Ưng suất nước của thực vật	> 0

T T	Tên Chỉ Số	Công Thức	Ứng Dụng Chính	Ý Nghĩa	Giá Trị Điển Hình
4	TCI (Temperature Condition Index)	Tỷ lệ so sánh LST với giá trị chuẩn	Điều kiện nhiệt	Căng thẳng nhiệt	0 đến 1
5	TTI (Thermal Thermal Index)	Tích hợp nhiệt độ bề mặt và độ che phủ	Động lực sinh học	Tác động nhiệt	-1 đến 1
6	HTI (Heat Stress Index)	So sánh LST với ngưỡng nhiệt	Ứng suất nhiệt	Mức độ căng thẳng nhiệt	> 0
7	TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index)	Mối quan hệ giữa LST và NDVI	Khô hạn	Độ khô của thực vật	0 đến 1
8	IAI (Inverse Atmospheric Index)	Hiệu chỉnh ảnh hưởng khí quyển	Loại bỏ nhiễu	Độ chính xác nhiệt	-1 đến 1
9	SI (Surface Index)	Tích hợp nhiều kênh nhiệt	Đặc tính bề mặt	Phân loại bề mặt	0 đến 1
10	UTFB (Urban Thermal Field Boundary)	Tích hợp nhiệt độ và địa hình	Ranh giới nhiệt đô thị	Biến động nhiệt đô thị	Định tính

Bảng 6. Một số ảnh vệ tinh phổ biến có các kênh phổ hồng ngoại nhiệt

Tên	Kênh phổ hồng ngoại nhiệt	Độ phân giải	Chu kỳ ảnh
Landsat 8	2 Dải hồng ngoại nhiệt (10,6 - 11,19 μm, 11,5 - 12,51 μm)	100 mét	16 ngày
Landsat 9	2 Dải hồng ngoại nhiệt (10,6 - 11,19 μm, 11,5 - 12,51 μm)	100 mét	16 ngày
MODIS (Terra và Aqua)	36 dải, bao gồm 2 dải hồng ngoại nhiệt (10,78 - 11,28 μm, 11,45 - 12,27 μm)	1km, 500m, 250m, 500m	1-2 ngày
VIIIRS (Suomi NPP và NOAA-20)	22 dải, bao gồm 4 dải hồng ngoại nhiệt (3,7 - 3,9 μm, 10,76 - 11,28 μm, 11,45 - 12,49 μm, 12,0 - 12,5 μm)	750m, 375m, 750m, 750m	1 ngày
Dòng GOES-R (GOES-16, GOES-17, GOES-18)	16 dải, bao gồm 4 dải hồng ngoại (3,9 - 4,0 μm, 6,15 - 6,9 μm, 10,3 - 11,3 μm, 11,9 - 12,5 μm)	2km, 4km, 8km, 2km	Mỗi 15 phút
Meteosat thế hệ thứ ba (MTG-I, MTG-S)	16 kênh quang phổ, bao gồm 3 kênh hồng ngoại (3,9 - 4,1 μm, 10,3 - 12,5 μm, 12,0 - 13,0 μm)	0,5km, 1km, 3km, 4km	Mỗi 10 phút

Sentinel-3	15 kênh quang phổ, bao gồm 2 kênh Hồng ngoại nhiệt (10,85 - 11,2 µm, 11,8 - 12,5 µm)	1km	1-2 ngày
-------------------	--	-----	----------

2. *Ứng dụng ảnh viễn thám hồng ngoại nhiệt trong nghiên cứu lũ quét*

Hồng ngoại nhiệt có thể phát hiện sự gia tăng nhiệt độ nhanh chóng trên đất và nước do hoạt động mưa lớn cục bộ hoặc do các biến động khác như vỡ đập. Do đó, có thể phân tích dữ liệu hồng ngoại nhiệt kết hợp với radar để theo dõi các khu vực mưa lớn và các khu vực có lũ tràn qua.

Chỉ số TDI (Temperature Difference Index) có thể sử dụng để phát hiện vùng ngập lũ do sự khác biệt giữa vùng ngập nước và đất liền hay sử dụng các chỉ số TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index) và SMI (Soil Moisture Index) để đánh giá điều kiện độ ẩm trước và sau trận lũ. Chỉ số độ ẩm còn có thể được ứng dụng để làm điều kiện đầu vào trong các mô phỏng thủy văn.

Chỉ số TAR (Thermal Absorption Ratio) còn có thể đánh giá khả năng thấm nước của đất dựa trên mối quan hệ giữa nhiệt dung và khả năng thấm. Ngoài ra, chỉ số FRTI (Flood Risk Thermal Index) có khả năng cảnh báo sớm vùng có nguy cơ lũ dựa trên việc kết hợp thông tin nhiệt độ với các yếu tố khác

$$FRTI = w1*TVDI + w2*SMI + w3*slope$$

Trong đó, w1, w2 và w3 là các trọng số của các thành phần.

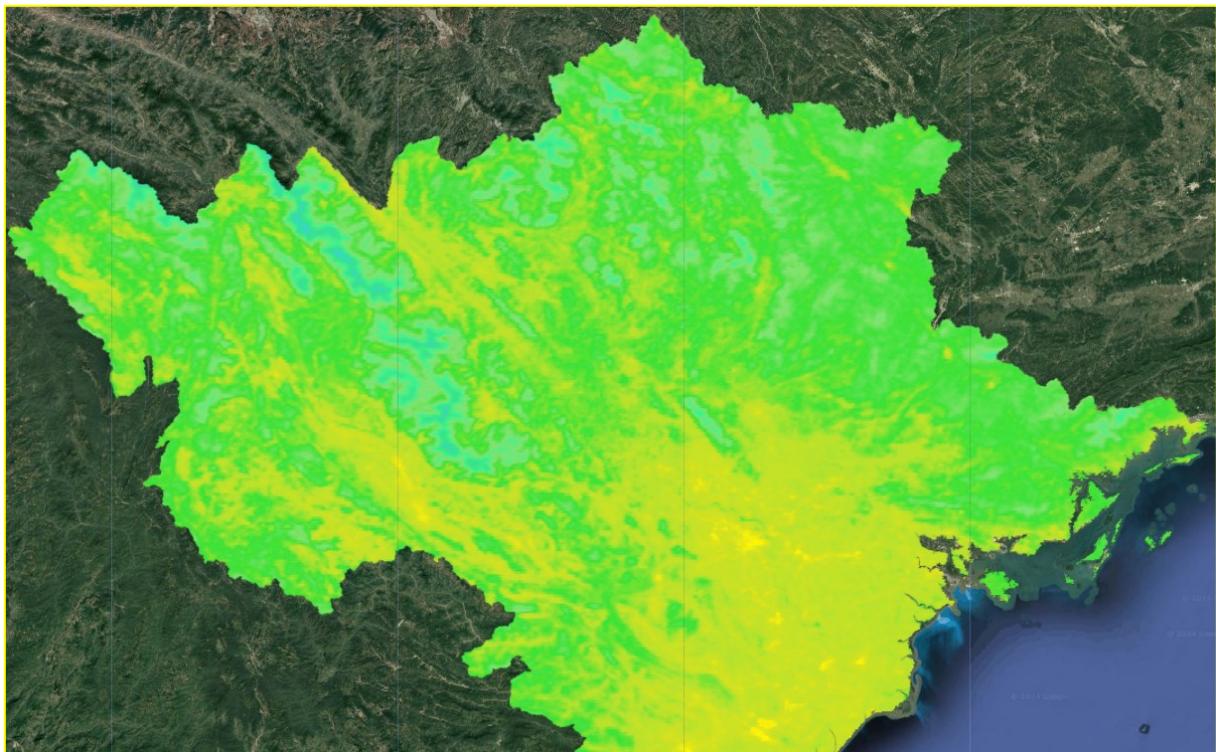
3. *Ảnh MODIS*

a. Giới thiệu chung về ảnh MODIS

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) là một trong những cảm biến quan trọng nhất trong lĩnh vực quan sát Trái đất từ vũ trụ. Được phóng lên quỹ đạo vào năm 1999 trên vệ tinh Terra và sau đó là Aqua vào năm 2002, MODIS đã cung cấp một lượng dữ liệu khổng lồ và liên tục về bề mặt Trái đất, đại dương và khí quyển trong hơn hai thập kỷ qua

MODIS là hệ thống cảm biến có độ phân giải phổ cao, với 36 kênh phổ trải dài từ ánh sáng nhìn thấy đến hồng ngoại nhiệt. Trong đó, các kênh 1-2 có độ phân giải 250m (bao gồm dài đỏ và cận hồng ngoại), các kênh 3-7 có độ phân giải 500m (từ xanh lam đến sóng ngắn hồng ngoại), và các kênh 8-36 có độ phân giải 1000m (từ cận hồng ngoại đến hồng ngoại nhiệt). Độ phân giải không gian của MODIS dao động từ 250m đến 1km, tùy thuộc vào kênh phổ. Về thời gian, MODIS có khả năng cung cấp dữ liệu toàn cầu với chu kỳ lặp lại mỗi 1-2 ngày, cho phép theo dõi thường xuyên các biến đổi trên bề mặt Trái Đất. Với vùng quét rộng 2330 km theo hướng vuông góc (cross track) và 10

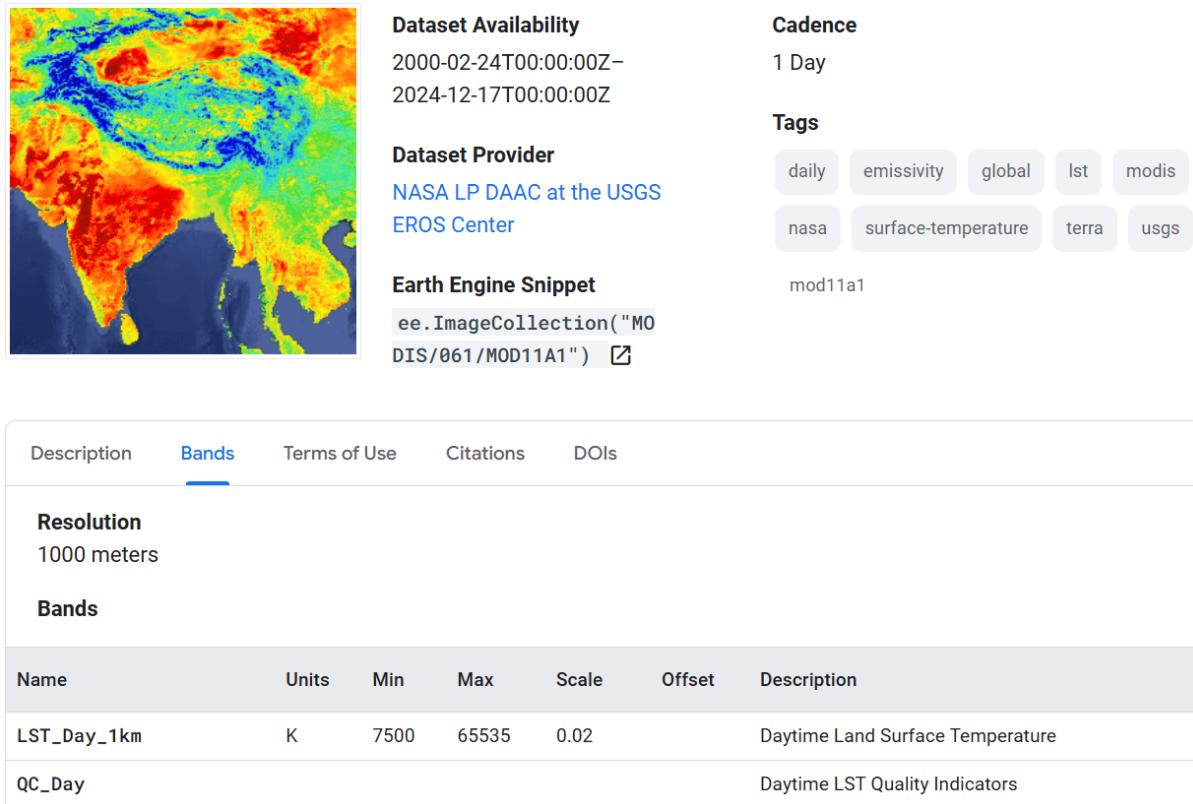
km dọc theo đường quỹ đạo tại nadir, MODIS đảm bảo khả năng bao phủ lớn, thích hợp cho các nghiên cứu môi trường và khí hậu. Độ phân giải bức xạ của MODIS đạt 12 bit, giúp cải thiện độ chi tiết và độ chính xác của dữ liệu quan trắc.



Hình 12. Nhiệt độ trung bình khu vực miền núi phía Bắc năm 2023 (Ảnh MOD11A1 – Google Earth Engine – Band LST_Day_1km)

Sản phẩm MOD11A1 V6.1 cung cấp nhiệt độ bề mặt đất (LST) hàng ngày và các giá trị độ phát xạ trong lưới 1200 x 1200 km. Giá trị nhiệt độ được lấy từ sản phẩm dải MOD11_L2. Trên vĩ độ 30 độ, một số pixel có thể có nhiều quan sát trong đó các tiêu chí về bầu trời quang đãng được đáp ứng. Khi điều này xảy ra, giá trị pixel là giá trị trung bình của tất cả các quan sát đủ điều kiện. Được cung cấp cùng với cả dải nhiệt độ bề mặt ban ngày và ban đêm và các lớp chỉ báo chất lượng của chúng là dải MODIS 31 và 32 và sáu lớp quan sát.

MOD11A1.061 Terra Land Surface Temperature and Emissivity Daily Global 1km



Hình 13. Ảnh MODIS 11A1.061 về nhiệt độ bề mặt hằng ngày miễn phí trên Earth Engine với trường LST_Day_1km (độ Kenvin)

b. Những đặc điểm nổi bật của anh MODIS

MODIS nổi bật với khả năng cung cấp dữ liệu toàn cầu với tần suất quan sát cao (1-2 ngày/lần), cho phép theo dõi liên tục các hiện tượng tự nhiên và thiên tai. Đặc biệt trong lĩnh vực giám sát lũ lụt và lũ quét, các kênh hồng ngoại nhiệt của MODIS đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá nhiệt độ bề mặt và độ ẩm đất - những yếu tố then chốt trong dự báo và giám sát thiên tai. Khả năng quan sát cả ngày và đêm của cảm biến này cũng là một lợi thế đáng kể trong việc theo dõi diễn biến thiên tai liên tục.

Về phổ điện tử, MODIS có 36 kênh phổ trải dài từ vùng nhìn thấy đến hồng ngoại nhiệt, với độ phân giải phổ cao. Mỗi kênh được thiết kế để quan sát những đặc trưng cụ thể của bề mặt đất, đại dương và khí quyển. Ví dụ, các kênh trong dải sóng nhìn thấy (kênh 1-2) có độ phân giải 250m phù hợp cho nghiên cứu thảm thực vật, trong khi các kênh hồng ngoại nhiệt cung cấp thông tin nhiệt độ bề mặt với độ chính xác cao.

MODIS cung cấp nhiều sản phẩm dẫn xuất đã được xử lý ở các mức độ khác nhau (Level 1-4), giúp người dùng tiết kiệm thời gian và công sức trong xử lý dữ liệu. Các sản phẩm này được chuẩn hóa và có độ tin cậy cao, bao gồm chỉ số thực vật (MOD13), nhiệt độ bề mặt (MOD11), albedo (MOD43), và nhiều sản phẩm khác. Điều này tạo

thuận lợi cho việc tích hợp dữ liệu vào các hệ thống GIS và ứng dụng trong nhiều lĩnh vực nghiên cứu.

Đặc điểm quan trọng khác là độ phủ không gian rộng lớn với swath width lên đến 2330km. Điều này cho phép quan sát các hiện tượng quy mô lớn và theo dõi các quá trình toàn cầu. Tuy độ phân giải không gian không cao như một số vệ tinh khác (250m-1km), nhưng đây lại là ưu điểm trong nghiên cứu các hiện tượng diễn ra trên diện rộng như biến đổi khí hậu hay suy thoái môi trường.

Về mặt kỹ thuật, MODIS có độ ổn định và độ chính xác bức xạ cao nhờ hệ thống hiệu chuẩn trên thiết bị. Điều này đảm bảo chất lượng dữ liệu theo thời gian và cho phép so sánh giữa các thời điểm khác nhau. Khả năng này đặc biệt quan trọng trong nghiên cứu các xu hướng dài hạn và phát hiện những thay đổi tinh tế trong hệ thống Trái đất.

Một ưu điểm nữa là tính sẵn có và miễn phí của dữ liệu MODIS. NASA cung cấp toàn bộ dữ liệu thông qua các cổng thông tin như LAADS DAAC, cho phép tải xuống dễ dàng. Điều này thúc đẩy việc sử dụng rộng rãi trong cộng đồng khoa học và ứng dụng thực tiễn. Hơn nữa, có nhiều công cụ và phần mềm hỗ trợ xử lý dữ liệu MODIS, tạo điều kiện thuận lợi cho người dùng ở mọi trình độ.

c. Ứng dụng của ảnh MODIS

Trong phân tích nhiệt độ bề mặt (LST), MODIS cung cấp dữ liệu với độ chính xác cao nhờ các thuật toán hiệu chỉnh khí quyển tiên tiến. Điều này cho phép chúng ta không chỉ theo dõi sự thay đổi nhiệt độ theo thời gian mà còn phát hiện các điểm nóng bất thường - dấu hiệu quan trọng của các hiện tượng cực đoan như cháy rừng hoặc hoạt động địa nhiệt. Kết hợp với các chỉ số thực vật, dữ liệu LST còn giúp đánh giá tình trạng stress của thực vật, một yếu tố quan trọng trong việc dự báo nguy cơ lũ quét ở các khu vực đồi núi.

Đối với giám sát lũ lụt, MODIS đặc biệt hiệu quả nhờ khả năng phân biệt vùng ngập nước thông qua sự kết hợp của các kênh phổ khác nhau. Chỉ số độ ẩm đất (TVDI) được tính toán từ dữ liệu MODIS giúp xác định các khu vực có nguy cơ cao về lũ quét do đất bão hòa nước. Việc theo dõi những thay đổi trong độ ẩm đất theo thời gian thực cho phép các nhà quản lý đưa ra cảnh báo sớm và có biện pháp ứng phó kịp thời.

Ngoài ra, khả năng tích hợp dữ liệu MODIS với các mô hình thủy văn và dự báo thời tiết tạo nên một hệ thống giám sát và cảnh báo sớm thiên tai hiệu quả. Dữ liệu lịch sử từ năm 2000 đến nay cũng là nguồn thông tin quý giá cho việc nghiên cứu xu hướng và mô hình hóa các hiện tượng thiên tai, góp phần vào công tác quy hoạch và phòng chống thiên tai dài hạn.

Mặc dù độ phân giải không gian của MODIS (250m-1km) có thể là một hạn chế trong một số ứng dụng cụ thể, nhưng đây lại là ưu điểm trong việc giám sát các hiện

tượng quy mô lớn như lũ lụt diện rộng hoặc các xu hướng biến đổi môi trường khu vực. Điều này, kết hợp với tầm suất quan sát cao và khả năng xử lý nhanh, làm cho MODIS trở thành công cụ không thể thiếu trong hệ thống giám sát và cảnh báo sớm thiên tai hiện đại.

4. *Ảnh ASTER*

a. Giới thiệu ảnh ASTER

Ảnh ASTER là sản phẩm của một máy ảnh đa phổ được phóng lên tàu vũ trụ Terra của NASA vào tháng 12 năm 1999. ASTER có thể thu thập dữ liệu trong 14 dải quang phổ từ vùng nhìn thấy được đến vùng hồng ngoại nhiệt. Mỗi cảnh bao phủ một khu vực rộng 60 x 60 km. Những cảnh này, do USGS tạo ra, chứa độ sáng tại cảm biến đã hiệu chuẩn, chỉnh lưu trực giao và địa hình đã hiệu chỉnh. Mặc dù vậy, không phải tất cả 14 dải đều được thu thập trong mỗi cảnh. Thuộc tính có tên ORIGINAL_BANDS_PRESENT chứa danh sách các dải có trong mỗi cảnh. Trung bình, chu kỳ ảnh của ASTER là 16 ngày.

Bảng 7. Các kênh phổ trong ảnh ASTER L1T Radiance

Kênh phổ	Độ phân giải	Bước sóng	Mô tả
B01	15 mét	0,520-0,600μm	VNIR_Band1 (màu xanh lá cây/vàng có thể nhìn thấy)
B02	15 mét	0,630-0,690μm	VNIR_Band2 (màu đỏ có thể nhìn thấy)
B3N	15 mét	0,780-0,860μm	VNIR_Band3N (cận hồng ngoại, hướng thiên đỉnh)
B04	30 mét	1.600-1.700μm	SWIR_Band4 (hồng ngoại sóng ngắn)
B05	30 mét	2,145-2,185μm	SWIR_Band5 (hồng ngoại sóng ngắn)
B06	30 mét	2,185-2,225μm	SWIR_Band6 (hồng ngoại sóng ngắn)
B07	30 mét	2,235-2,285μm	SWIR_Band7 (hồng ngoại sóng ngắn)
B08	30 mét	2,295-2,365μm	SWIR_Band8 (hồng ngoại sóng ngắn)
B09	30 mét	2.360-2.430μm	SWIR_Band9 (hồng ngoại sóng ngắn)
B10	90 mét	8,125-8,475μm	TIR_Band10 (hồng ngoại nhiệt)
B11	90 mét	8.475-8.825μm	TIR_Band11 (hồng ngoại nhiệt)
B12	90 mét	8,925-9,275μm	TIR_Band12 (hồng ngoại nhiệt)
B13	90 mét	10.250-10.950μm	TIR_Band13 (hồng ngoại nhiệt)
B14	90 mét	10.950-11.650μm	TIR_Band14 (hồng ngoại nhiệt)

ASTER được thiết kế với ba hệ thống cảm biến riêng biệt, mỗi hệ thống hoạt động ở các vùng phổ khác nhau:

- Vùng phổ nhìn thấy và cận hồng ngoại (VNIR)
- Vùng phổ hồng ngoại sóng ngắn (SWIR)
- Vùng phổ hồng ngoại nhiệt (TIR)

Trong đó, hệ thống TIR của ASTER L1T Radiance là một trong những công cụ quan trọng nhất để nghiên cứu nhiệt độ bề mặt Trái Đất từ không gian. Hệ thống này hoạt động trong dải bước sóng từ 8 đến 12 micromet, với độ phân giải không gian 90m - một độ phân giải khá tốt đối với ảnh hồng ngoại nhiệt từ vệ tinh. Ảnh ASTER có thể dễ dàng xác định được chỉ số NDVI hoặc chỉ số độ ẩm đất (NDMI) từ band B02 đến band B04.

Bên cạnh ảnh ASTER L1T, ASTER còn có một sản phẩm là ASTER DEM (GDEM 003 hay GDEM V3). Phiên bản đầu tiên của ASTER GDEM, phát hành vào tháng 6 năm 2009, được tạo ra bằng cách sử dụng hình ảnh cặp lặp thể được thu thập bởi thiết bị ASTER trên tàu Terra. Phạm vi phủ sóng của ASTER GDEM trải dài từ vĩ độ 83 độ bắc đến vĩ độ 83 độ nam, bao gồm 99 phần trăm khối đất liền của Trái Đất. GDEM V3 cải tiến bổ sung thêm các cặp âm thanh nối, cải thiện phạm vi phủ sóng và giảm hiện tượng nhiễu. Thuật toán sản xuất tinh chỉnh cung cấp độ phân giải không gian được cải thiện, tăng độ chính xác theo chiều ngang và chiều dọc. ASTER GDEM V3 duy trì định dạng GeoTIFF và cùng cấu trúc lưới và ô như V1 và V2, với các bài đăng dài 30 mét và ô 1 x 1 độ.

Ngoài ra, ASTER cũng có sản phẩm ASTER Water Body Dataset (ASTWBD). Sản phẩm raster này xác định tất cả các vùng nước là đại dương, sông hoặc hồ. Mỗi ô GDEM có một ô Water Body tương ứng.

b. Những đặc điểm nổi bật của ảnh ASTER

Điểm đặc trưng quan trọng nhất của ASTER là độ phân giải không gian cao và đa dạng theo từng vùng phổ. Khu vực phổ nhìn thấy và cận hồng ngoại (VNIR) có độ phân giải 15m, vùng hồng ngoại sóng ngắn (SWIR) là 30m, và vùng hồng ngoại nhiệt (TIR) là 90m. Sự kết hợp này tạo nên ưu thế trong việc nghiên cứu chi tiết bề mặt đất.

Một đặc điểm độc đáo của ASTER là khả năng chụp ảnh lặp thể nhờ có thêm một bộ cảm biến quan sát ngược trong dải VNIR. Điều này cho phép tạo ra các mô hình số độ cao (DEM) với độ chính xác cao, đặc biệt hữu ích trong nghiên cứu địa hình và địa mạo. DEM ASTER thường được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu địa chất, địa mạo và đánh giá rủi ro thiên tai.

ASTER có 14 kênh phổ được thiết kế tối ưu cho nghiên cứu địa chất và khoáng sản. Các kênh trong vùng SWIR đặc biệt nhạy với thành phần khoáng vật, cho phép phân

bietet các loại đá và khoáng vật khác nhau. Điều này làm cho ASTER trở thành công cụ quan trọng trong thăm dò khoáng sản và lập bản đồ địa chất.

Về mặt nhiệt, năm kênh trong vùng TIR của ASTER cung cấp thông tin chi tiết về nhiệt độ và phát xạ bề mặt. Đây là ưu điểm vượt trội so với nhiều cảm biến khác thường chỉ có một hoặc hai kênh nhiệt. Khả năng này cho phép nghiên cứu chi tiết về nhiệt độ đô thị, hoạt động núi lửa và các hiện tượng địa nhiệt.

Dữ liệu ASTER được xử lý ở nhiều cấp độ khác nhau, từ dữ liệu thô đến các sản phẩm dẫn xuất như chỉ số thực vật, nhiệt độ bề mặt, phản xạ phổ. Đặc biệt, bộ thư viện phổ ASTER cung cấp thông tin tham chiếu quý giá cho việc phân loại đối tượng và nghiên cứu thành phần vật chất.

c. Ứng dụng của ảnh ASTER

Ảnh viễn thám hồng ngoại nhiệt ASTER với 5 kênh phổ trong dải TIR (8-12 μm) và độ phân giải 90m đóng vai trò quan trọng trong nghiên cứu các hiện tượng thiên tai. Trong nghiên cứu lũ lụt, dữ liệu nhiệt ASTER cho phép phát hiện các vùng ngập thông qua sự khác biệt nhiệt độ giữa nước và đất liền. Nước có nhiệt dung cao hơn nên nhiệt độ thay đổi chậm hơn so với bề mặt đất, đặc biệt trong ảnh chụp ban đêm. Điều này giúp xác định được phạm vi ngập lụt ngay cả khi có mây mù che phủ trong dải sóng nhìn thấy.

Đối với lũ quét, các kênh nhiệt ASTER giúp phát hiện các điều kiện tiền lũ thông qua việc theo dõi độ ẩm đất và nhiệt độ bề mặt. Sự thay đổi đột ngột của nhiệt độ bề mặt có thể là dấu hiệu của điều kiện bão hòa nước trong đất - yếu tố kích hoạt lũ quét. Đặc biệt, khả năng đo nhiệt độ chính xác nhờ nhiều kênh phổ cho phép phát hiện các khu vực tích tụ nước ngầm, là tiền đề của hiện tượng lũ quét.

Trong nghiên cứu sạt lở đất, dữ liệu nhiệt ASTER đóng vai trò quan trọng trong việc phát hiện các dị thường nhiệt - dấu hiệu của biến động địa chất. Sự thay đổi nhiệt độ bề mặt có thể phản ánh sự thay đổi độ ẩm đất hoặc chuyển động của khối đất. Các kênh nhiệt cũng giúp xác định ranh giới giữa các khối địa chất khác nhau thông qua sự khác biệt về đặc tính nhiệt, từ đó đánh giá được độ ổn định của sườn dốc.

Một ứng dụng quan trọng khác là việc sử dụng dữ liệu nhiệt ASTER trong phát hiện các khu vực có dòng chảy ngầm. Những khu vực này thường có nhiệt độ khác biệt so với môi trường xung quanh và có thể là yếu tố gây mất ổn định sườn dốc. Khả năng đo nhiệt độ với độ chính xác cao của ASTER cho phép phát hiện những thay đổi nhỏ trong trường nhiệt độ bề mặt, từ đó cảnh báo sớm nguy cơ sạt lở.

Khả năng phân biệt các loại vật liệu dựa trên đặc tính phát xạ nhiệt cũng là một ưu điểm của ASTER trong nghiên cứu thiên tai. Điều này giúp xác định các khu vực có

thành phần vật liệu dễ bị tác động bởi nước, là yếu tố quan trọng trong đánh giá nguy cơ sạt lở và lũ quét.

Tuy nhiên, độ phân giải 90m của kênh nhiệtASTER có thể là một hạn chế trong việc phát hiện các hiện tượng quy mô nhỏ. Ngoài ra, điều kiện thời tiết như mây dày có thể ảnh hưởng đến chất lượng dữ liệu nhiệt. Do đó, việc kết hợp với các dải phổ khác củaASTER và dữ liệu bổ sung là cần thiết để đạt hiệu quả tối ưu trong nghiên cứu và giám sát thiên tai.

1.1.3.3. Ảnh viễn thám sử dụng công nghệ Radar khẩu độ tổng hợp (SAR)

1. Giới thiệu

Ảnh radar khẩu độ tổng hợp (Synthetic Aperture Radar - SAR) là một công nghệ viễn thám tiên tiến, sử dụng kỹ thuật radar chủ động để tạo ra hình ảnh độ phân giải cao về bề mặt Trái đất. Khác với các hệ thống quang học thụ động, SAR có khả năng hoạt động trong mọi điều kiện thời tiết, cả ngày lẫn đêm, và có thể xuyên qua mây, sương mù và thậm chí một phần lớp thực vật. Điều này làm cho SAR trở thành một công cụ vô cùng hữu ích trong nhiều ứng dụng quan trọng như giám sát môi trường, quản lý thiên tai, và an ninh quốc phòng.

Nguyên lý hoạt động của SAR dựa trên việc phát và thu tín hiệu radar từ một ăng-ten di chuyển. Hệ thống SAR phát ra các xung sóng điện từ tần số cao (thường trong dải microwave từ 1-10 GHz) về phía bề mặt Trái đất và thu nhận tín hiệu phản xạ trở lại. Bằng cách xử lý phức tạp các tín hiệu phản xạ từ nhiều vị trí khác nhau dọc theo quỹ đạo bay, SAR có thể tổng hợp một ăng-ten ảo có kích thước lớn hơn nhiều so với ăng-ten vật lý thực tế. Điều này cho phép tạo ra hình ảnh có độ phân giải không gian cao, thậm chí từ các vệ tinh ở độ cao hàng trăm kilômét.

Ảnh SAR thường được thu nhận ở các băng tần khác nhau, mỗi băng tần có đặc điểm và ứng dụng riêng:

- Băng X (8-12 GHz): độ phân giải cao, thích hợp cho ứng dụng đô thị và quân sự
- Băng C (4-8 GHz): cân bằng giữa độ xuyên thấu và độ phân giải, phổ biến trong giám sát môi trường
- Băng L (1-2 GHz): xuyên thấu tốt qua thực vật, ứng dụng trong lâm nghiệp
- Băng P (0.3-1 GHz): xuyên thấu sâu nhất, có thể "nhìn" qua lớp băng dày

Độ phân giải không gian của ảnh SAR có thể đạt từ vài mét đến hàng chục mét, tùy thuộc vào cấu hình hệ thống và chế độ thu nhận. Các chế độ thu nhận phổ biến bao gồm:

- Stripmap: chế độ cơ bản, quét liên tục một dải
- ScanSAR: quét diện tích rộng hơn nhưng độ phân giải thấp hơn

- Spotlight: tập trung vào một khu vực nhỏ để có độ phân giải rất cao

Ảnh SAR chứa thông tin về cả biên độ và pha của tín hiệu phản xạ. Biên độ phản ánh đặc tính tán xạ của bề mặt, trong khi pha chứa thông tin về khoảng cách chính xác từ cảm biến đến mục tiêu. Điều này cho phép tạo ra nhiều sản phẩm khác nhau từ dữ liệu SAR như:

- Ảnh cường độ: biểu diễn năng lượng phản xạ, thường được sử dụng để phân loại lớp phủ
- Ảnh phân cực: khai thác thông tin từ các phân cực khác nhau (HH, VV, HV, VH) để phân biệt các loại bề mặt
- Giao thoa SAR (InSAR): sử dụng thông tin pha để đo độ cao và biến dạng bề mặt với độ chính xác mm
- Đo cao SAR: tạo mô hình số độ cao (DEM) từ cặp ảnh InSAR
- Phân tích chuỗi thời gian: theo dõi biến động dài hạn của bề mặt Trái đất

Mặc dù ảnh SAR có những ưu điểm vượt trội so với ảnh quang học, công nghệ này vẫn phải đối mặt với nhiều thách thức đáng kể trong quá trình thu nhận và xử lý dữ liệu. Một trong những vấn đề phổ biến nhất là hiệu ứng nhiễu đốm (speckle), làm giảm đáng kể chất lượng hình ảnh và gây khó khăn trong quá trình giải đoán. Bên cạnh đó, ảnh SAR thường gặp phải các biến dạng hình học như foreshortening, layover và shadow, đặc biệt là ở những khu vực địa hình phức tạp, điều này có thể ảnh hưởng đến độ chính xác của kết quả phân tích.

So với ảnh quang học, việc giải đoán ảnh SAR đòi hỏi nhiều kinh nghiệm và kiến thức chuyên môn hơn do đặc thù của công nghệ radar.Thêm vào đó, quá trình xử lý ảnh SAR thường phức tạp và đòi hỏi không gian lưu trữ lớn do khối lượng dữ liệu thu nhận được. Cuối cùng, chi phí thu nhận và xử lý ảnh SAR thường cao hơn đáng kể so với ảnh quang học, điều này có thể là một rào cản đối với nhiều dự án nghiên cứu có ngân sách hạn chế.

2. *Ứng dụng ảnh SAR trong nghiên cứu lũ quét*

Ảnh SAR đã khẳng định vai trò quan trọng trong nghiên cứu và giám sát lũ quét nhờ khả năng hoạt động trong mọi điều kiện thời tiết và khả năng xuyên qua mây. Đặc biệt, với các băng tần khác nhau như X-band (TerraSAR-X), C-band (Sentinel-1, Radarsat), và L-band (ALOS PALSAR), ảnh SAR cung cấp nhiều lựa chọn phù hợp cho từng điều kiện địa hình và mục tiêu nghiên cứu cụ thể của lũ quét.

Trong giám sát vùng ngập lũ, băng tần C từ vệ tinh Sentinel-1 được sử dụng phổ biến nhất do chu kỳ quan sát ngắn (6 ngày) và dữ liệu miễn phí. Phương pháp phát hiện vùng ngập thường dựa trên sự thay đổi hệ số tán xạ ngược (backscattering coefficient - σ^0) giữa thời điểm trước và sau lũ. Vùng ngập nước thường có giá trị σ^0 thấp do hiệu

ứng phản xạ gương, trong khi vùng không ngập có giá trị σ^o cao hơn do tán xạ bề mặt và thể tích. Chỉ số Normalized Difference Flood Index (NDFI) được tính từ cặp ảnh SAR đa thời gian thường được sử dụng:

$$NDFI = (\sigma^o_{pre} - \sigma^o_{post}) / (\sigma^o_{pre} + \sigma^o_{post})$$

Trong nghiên cứu biến động địa hình và đánh giá nguy cơ lũ quét, băng tần L từ ALOS PALSAR thể hiện ưu thế vượt trội nhờ khả năng xuyên qua thảm thực vật tốt hơn. Kỹ thuật giao thoa radar (InSAR) được ứng dụng để phát hiện những thay đổi địa hình centimet, từ đó xác định các khu vực có nguy cơ trượt lở cao - yếu tố thường kích hoạt lũ quét trong vùng núi. Phương pháp Persistent Scatterer InSAR (PS-InSAR) thường được sử dụng để theo dõi biến động địa hình dài hạn với độ chính xác cao:

$$\varphi_{defo} = 4\pi/\lambda * d$$

Trong đó φ_{defo} là pha biến dạng, λ là bước sóng radar, và d là độ dịch chuyển theo hướng line-of-sight.

Đối với việc đánh giá độ ẩm đất - yếu tố quan trọng trong dự báo lũ quét, băng tần X từ TerraSAR-X với độ phân giải cao (đến 1m) cho phép quan sát chi tiết điều kiện bề mặt. Mối quan hệ giữa hệ số tán xạ ngược và độ ẩm đất được mô tả qua mô hình Oh:

$$\sigma^o(\theta) = a * mv^b * \cos^c(\theta)$$

Trong đó mv là độ ẩm thể tích của đất, θ là góc tới, a, b, c là các hệ số thực nghiệm.

Việc tích hợp dữ liệu từ nhiều băng tần SAR cho phép khai thác tối đa ưu điểm của từng loại. Ví dụ, kết hợp ảnh Sentinel-1 (C-band) để giám sát ngập thường xuyên với ALOS PALSAR-2 (L-band) để theo dõi biến động địa hình, tạo nên một hệ thống giám sát lũ quét toàn diện. Các chỉ số tích hợp như Multi-temporal SAR Flood Index (MSFI) được phát triển:

$$MSFI = w1*NDFI + w2*\sigma^o_{ratio} + w3*Coherence$$

Trong đó $w1, w2, w3$ là trọng số của các thành phần.

Bên cạnh đó, công nghệ SAR phân cực (PolSAR) cung cấp thông tin bổ sung về cấu trúc và đặc điểm vật lý của bờ biển. Chỉ số Alpha-Entropy (α -H) từ phân tích phân cực được sử dụng để phân loại chi tiết các loại bờ biển, hỗ trợ xác định vùng có nguy cơ lũ quét cao. Kỹ thuật phân cực còn giúp phân biệt giữa vùng ngập nước với các bờ biển phẳng khác thông qua phân tích ma trận tán xạ.

Xu hướng mới trong ứng dụng SAR cho nghiên cứu lũ quét là sử dụng học máy và trí tuệ nhân tạo để tự động hóa quá trình phát hiện và cảnh báo. Các thuật toán như Random Forest và Deep Learning được áp dụng để phân loại ảnh SAR và dự báo nguy

cơ lũ quét dựa trên chuỗi dữ liệu lịch sử. Độ chính xác của các mô hình này có thể đạt trên 90% khi được huấn luyện với dữ liệu đủ lớn và đa dạng.

Tuy nhiên, việc sử dụng ảnh SAR trong nghiên cứu lũ quét vẫn còn một số thách thức cần giải quyết. Hiệu ứng layover và shadow trong vùng núi có thể gây mất thông tin quan trọng. Giải pháp là sử dụng quỹ đạo vệ tinh khác nhau (ascending và descending) để bù đắp thông tin. Ngoài ra, việc xử lý thời gian thực vẫn còn hạn chế do khối lượng dữ liệu lớn và quy trình xử lý phức tạp, đòi hỏi phát triển các thuật toán tối ưu và hạ tầng tính toán mạnh.

3. *Ảnh Sentinel-1*

a. Giới thiệu chung về ảnh Sentinel-1

Ảnh Sentinel-1 có tiềm năng rất lớn trong việc hỗ trợ nghiên cứu, giám sát và dự báo lũ quét. Đây là một công cụ mạnh mẽ có thể cung cấp thông tin quan trọng trong suốt chu kỳ quản lý lũ quét, từ đánh giá nguy cơ, cảnh báo sớm, đến ứng phó khẩn cấp và đánh giá thiệt hại.

Sentinel-1 là một trong những nhiệm vụ quan trọng nhất của Chương trình Copernicus do Cơ quan Vũ trụ Châu Âu (ESA) điều hành. Nhiệm vụ này bao gồm một cặp vệ tinh, Sentinel-1A và Sentinel-1B, được trang bị cảm biến radar khẩu độ tổng hợp (SAR) băng C, cung cấp hình ảnh radar độ phân giải cao của bề mặt Trái Đất trong mọi điều kiện thời tiết, cả ngày lẫn đêm.

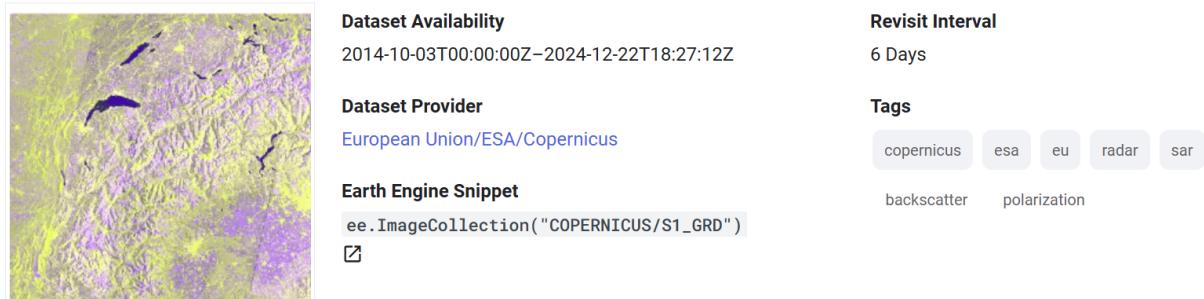
Điểm mạnh nổi bật nhất của ảnh Sentinel-1 là khả năng hoạt động trong mọi điều kiện thời tiết và ánh sáng. Khác với các cảm biến quang học truyền thống, radar SAR của Sentinel-1 có thể xuyên qua mây, sương mù và hoạt động trong bóng tối, đảm bảo thu thập dữ liệu liên tục và đáng tin cậy. Đây là một ưu điểm quan trọng trong việc theo dõi các hiện tượng động như lũ lụt, động đất, hoặc các thay đổi nhanh chóng của bề mặt Trái Đất.

Sentinel-1 cung cấp độ phủ toàn cầu với chu kỳ lặp lại ngắn. Với cặp vệ tinh hoạt động đồng thời, Sentinel-1 có thể cung cấp hình ảnh của hầu hết các khu vực trên thế giới cứ sau 6 ngày, và thậm chí còn ngắn hơn ở các vĩ độ cao. Điều này cho phép theo dõi các hiện tượng động một cách thường xuyên và kịp thời.

Về độ phân giải không gian, Sentinel-1 cung cấp nhiều chế độ thu nhận dữ liệu với độ phân giải khác nhau. Chế độ Strip Map có độ phân giải 5x5m, trong khi chế độ Interferometric Wide Swath, được sử dụng phổ biến nhất, cung cấp độ phân giải 5x20m với độ rộng quét 250km. Điều này cho phép bao phủ diện tích lớn mà vẫn duy trì độ chi tiết đủ cho nhiều ứng dụng.

Một ưu điểm quan trọng khác của Sentinel-1 là khả năng thu nhận dữ liệu ở nhiều chế độ phân cực khác nhau (VV, VH, HH, HV). Điều này cho phép phân tích chi tiết về cấu trúc và đặc tính của các đối tượng trên bề mặt Trái Đất, đặc biệt hữu ích trong việc phân biệt các loại thảm thực vật, đánh giá độ ẩm đất, và theo dõi các thay đổi bề mặt.

Sentinel-1 SAR GRD: C-band Synthetic Aperture Radar Ground Range Detected, log scaling □ ▾



Hình 14. Ảnh Sentinel-1 cung cấp dữ liệu với chu kỳ 6 ngày với độ phân giải 10m

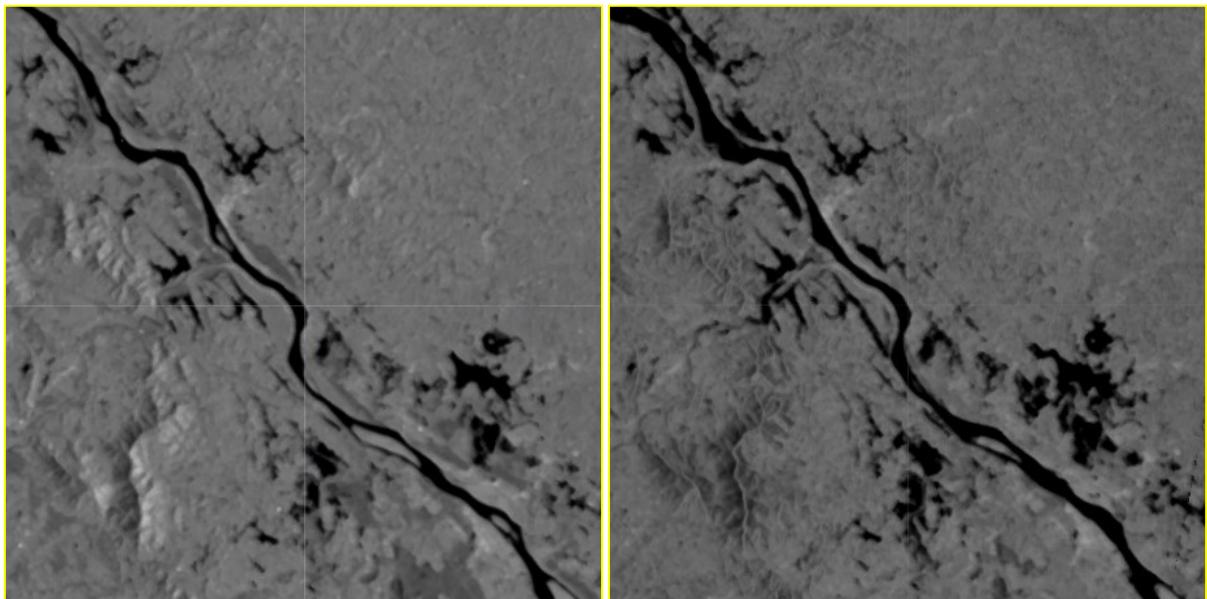
Trên Earth Engine, ảnh Sentinel-1C được phân phối miễn phí với chu kỳ 6 ngày. Với các kênh phổ chính bao gồm:

Bảng 8. Danh sách các kênh phổ chính trong ảnh sentinel-1

Tên	Đơn vị	Tối thiểu	Tối đa	Kích thước điểm ảnh	Mô tả
HH	dB	-50*	1*	10 mét	Đồng phân cực đơn, truyền ngang/nhận ngang
HV	dB	-50*	1*	10 mét	Phân cực chéo bằng tần kép, truyền ngang/nhận dọc
VV	dB	-50*	1*	10 mét	Đồng phân cực đơn, truyền dọc/nhận dọc
VH	dB	-50*	1*	10 mét	Phân cực chéo bằng tần kép, truyền dọc/nhận ngang
angle	độ	0*	90*	20000 mét	Góc tới gần đúng từ hình elip

Dựa vào phân cực có thể hiểu rõ hơn cách mà sóng Radar tương tác với mặt đất. Các phân cực HH và VV nhạy cảm với cấu trúc song song (như mặt nước, mặt đất khu vực đồng bằng), trong khi đó, các phân cực HV, VH lại nhạy cảm với các cấu trúc vật thể phức tạp như cây cối hay các tòa nhà.

Một số ứng dụng như sử dụng phân cực HH, VV để theo dõi mặt nước hoặc khu vực đất sau mưa, sử dụng phân cực VH, HV được ứng dụng để theo dõi đánh giá lớp phủ thực vật hay mật độ rừng...



Hình 15. Sự thay đổi trước (bên trái) và sau (bên phải) khi xảy ra trận mưa lớn tháng 9/2024 - hoàn lưu sau bão Yagi ở khu vực huyện Hạ Hòa, tỉnh Phú Thọ thể hiện trên ảnh Sentinel-1

b. Những đặc điểm nổi bật của ảnh Sentinel-1

Điểm đặc biệt quan trọng của Sentinel-1 nằm ở công nghệ SAR (Synthetic Aperture Radar) tiên tiến, cho phép vệ tinh thu thập dữ liệu độc lập với điều kiện thời tiết và ánh sáng. Khả năng này tạo ra một lợi thế vượt trội so với các hệ thống cảm biến quang học truyền thống, đặc biệt trong việc giám sát các khu vực thường xuyên bị che phủ bởi mây hoặc trong điều kiện thiếu ánh sáng.

Về mặt kỹ thuật, Sentinel-1 hoạt động ở băng tần C (tần số trung tâm 5.405 GHz), một lựa chọn được cân nhắc kỹ lưỡng để đạt được sự cân bằng tối ưu giữa khả năng xuyên qua các lớp phủ thực vật và độ nhạy với các đối tượng trên bề mặt Trái Đất. Băng tần này cho phép tín hiệu radar có khả năng tương tác hiệu quả với nhiều loại đối tượng khác nhau, từ các công trình xây dựng đến vùng thực vật và mặt nước, tạo ra những ứng dụng đa dạng trong nhiều lĩnh vực nghiên cứu và ứng dụng thực tiễn.

Một trong những ưu điểm nổi bật của hệ thống Sentinel-1 là khả năng thu nhận dữ liệu với độ phân giải không gian cao, đạt đến 5×20 mét trong chế độ IW (Interferometric Wide swath), chế độ thu nhận dữ liệu chính của vệ tinh. Độ phân giải này, kết hợp với chu kỳ lặp 6 ngày khi cả hai vệ tinh Sentinel-1A và 1B hoạt động, tạo ra một kho dữ liệu phong phú và liên tục về các thay đổi trên bề mặt Trái Đất. Điều này đặc biệt có giá

trị trong việc giám sát các hiện tượng động như biến dạng địa chất, chuyển động băng hà, hay theo dõi thiên tai.

Khả năng phân cực kép của Sentinel-1 cũng là một đặc điểm quan trọng không thể bỏ qua. Vệ tinh có thể thu nhận dữ liệu ở cả phân cực VV (phát và thu theo phương thẳng đứng) và VH (phát theo phương thẳng đứng, thu theo phương ngang), cung cấp thông tin phong phú về cấu trúc và đặc tính vật lý của các đối tượng trên mặt đất. Thông tin phân cực này đặc biệt hữu ích trong các ứng dụng như phân loại lớp phủ, đánh giá sinh khối rừng, hay giám sát cây trồng nông nghiệp.

Về khía cạnh xử lý dữ liệu, ảnh Sentinel-1 được cung cấp với nhiều mức độ xử lý khác nhau, từ dữ liệu thô (Level-0) đến các sản phẩm đã được hiệu chỉnh hình học và bức xạ (Level-1). Điều này tạo ra sự linh hoạt cho người dùng trong việc lựa chọn mức độ xử lý phù hợp với nhu cầu ứng dụng cụ thể. Đặc biệt, việc ESA cung cấp miễn phí toàn bộ dữ liệu Sentinel-1 đã tạo ra một cuộc cách mạng trong việc tiếp cận và sử dụng dữ liệu radar trong cộng đồng nghiên cứu và ứng dụng viễn thám.

Một ưu điểm khác của dữ liệu Sentinel-1 là khả năng tương thích cao với các phần mềm xử lý ảnh viễn thám phổ biến. Các công cụ chuyên dụng như SNAP (Sentinel Application Platform) được phát triển đặc biệt để xử lý dữ liệu Sentinel, cung cấp các thuật toán và công cụ tối ưu cho việc phân tích và khai thác thông tin từ ảnh radar. Điều này giúp đơn giản hóa quy trình xử lý dữ liệu và mở rộng khả năng ứng dụng của ảnh Sentinel-1 trong nhiều lĩnh vực khác nhau.

c. Ứng dụng của ảnh Sentinel-1

Trong nghiên cứu và giám sát lũ lụt, Sentinel-1 thể hiện ưu thế vượt trội nhờ khả năng thu nhận dữ liệu trong mọi điều kiện thời tiết. Đặc điểm này đặc biệt quan trọng vì các sự kiện lũ lụt thường xảy ra trong điều kiện thời tiết xấu, khi các vệ tinh quang học không thể cung cấp dữ liệu hữu ích do bị mây che phủ. Tín hiệu radar phản xạ từ mặt nước có đặc trưng riêng biệt, thể hiện qua giá trị phản xạ thấp trong ảnh radar, tạo nên sự tương phản rõ rệt với các bề mặt khác. Điều này cho phép xác định chính xác phạm vi ngập lụt, đặc biệt khi so sánh với ảnh tham chiếu trước khi xảy ra lũ. Kỹ thuật phân tích thay đổi dựa trên chuỗi ảnh đa thời gian cho phép theo dõi diễn biến lũ từ khi bắt đầu đến khi rút, cung cấp thông tin quý giá cho công tác ứng phó khẩn cấp và đánh giá thiệt hại.

Đối với hiện tượng lũ quét, mặc dù đây là loại hình thiên tai xảy ra nhanh và khó dự báo, Sentinel-1 vẫn đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá nguy cơ và hậu quả. Chu kỳ quét lặp 6 ngày của cặp vệ tinh Sentinel-1A và 1B cho phép cập nhật thường xuyên về điều kiện bề mặt tại các khu vực có nguy cơ cao. Thông qua việc phân tích độ ẩm đất từ tín hiệu radar và kết hợp với các mô hình địa hình số, các nhà khoa học có thể xác

định những khu vực có khả năng xảy ra lũ quét cao. Đặc biệt, khả năng phát hiện những thay đổi trong cấu trúc địa hình sau sự kiện lũ quét giúp hiểu rõ hơn về cơ chế hình thành và tác động của loại hình thiên tai này.

Trong lĩnh vực nghiên cứu sạt lở đất, công nghệ InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) từ dữ liệu Sentinel-1 đã mang lại những đột phá đáng kể. Kỹ thuật này cho phép phát hiện những chuyển động nhỏ của bề mặt đất với độ chính xác đến milimet, giúp xác định sớm các khu vực có nguy cơ sạt lở. Thông qua việc phân tích chuỗi thời gian dài các ảnh radar, có thể theo dõi quá trình biến dạng chậm của sườn dốc - dấu hiệu cảnh báo sớm cho các sự kiện sạt lở có thể xảy ra. Phương pháp PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR) đặc biệt hiệu quả trong việc giám sát ổn định của các sườn dốc tại khu vực đô thị và cơ sở hạ tầng quan trọng.

Một ứng dụng quan trọng khác của Sentinel-1 trong nghiên cứu các hiện tượng này là khả năng tích hợp với các nguồn dữ liệu khác. Việc kết hợp dữ liệu radar với các mô hình số độ cao độ phân giải cao và dữ liệu khí tượng thủy văn cho phép xây dựng các mô hình dự báo và đánh giá rủi ro toàn diện hơn. Đặc biệt, khả năng xác định độ ẩm đất từ tín hiệu radar góp phần quan trọng trong việc đánh giá điều kiện thuận lợi cho việc hình thành lũ quét và sạt lở đất.

Trong công tác ứng phó khẩn cấp, tốc độ xử lý và cung cấp thông tin từ ảnh Sentinel-1 là một ưu điểm nổi bật. ESA đã phát triển các quy trình tự động để xử lý và phân phối dữ liệu trong thời gian gần thực, cho phép các cơ quan chức năng nhanh chóng tiếp cận thông tin về phạm vi và mức độ ảnh hưởng của thiên tai. Điều này đặc biệt quan trọng trong việc lập kế hoạch sơ tán, cứu hộ và phân bổ nguồn lực ứng phó.

Có thể nói, với những đặc điểm và khả năng độc đáo của mình, Sentinel-1 đã trở thành công cụ không thể thiếu trong công tác nghiên cứu, giám sát và ứng phó với các hiện tượng lũ lụt, lũ quét và sạt lở đất. Việc tiếp tục phát triển các phương pháp và công cụ xử lý dữ liệu tiên tiến sẽ càng nâng cao hiệu quả ứng dụng của hệ thống này trong tương lai, góp phần quan trọng vào công tác giảm thiểu rủi ro thiên tai và bảo vệ cộng đồng.

4. *Ảnh ALOS PALSAR*

a. Giới thiệu về ảnh ALOS PALSAR

ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) là sản phẩm của Cơ quan Thám hiểm Hàng không Vũ trụ Nhật Bản (JAXA), đánh dấu một bước tiến quan trọng trong công nghệ radar tổng hợp khẩu độ. Điểm đặc biệt nổi bật của ALOS PALSAR nằm ở việc sử dụng băng tần L (tần số 1.27 GHz, bước sóng 23.6 cm), tạo nên những ưu điểm độc đáo trong khả năng xuyên qua tán cây và tương tác với các đối tượng trên bề mặt Trái Đất.

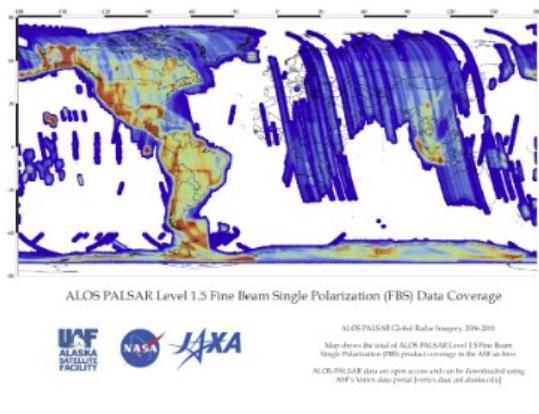
Băng tần L của ALOS PALSAR cho phép tín hiệu radar xuyên sâu hơn qua tán cây so với các hệ thống radar hoạt động ở băng tần C hoặc X. Đặc điểm này làm cho ALOS PALSAR trở thành công cụ đặc biệt hiệu quả trong nghiên cứu về rừng, đặc biệt là trong việc ước tính sinh khối và theo dõi sự thay đổi cấu trúc rừng. Bước sóng dài hơn cũng giúp duy trì độ tương quan pha tốt hơn theo thời gian, tạo điều kiện thuận lợi cho các ứng dụng giao thoa radar (InSAR).

Bảng 9. Các sản phẩm ALOS PALSAR

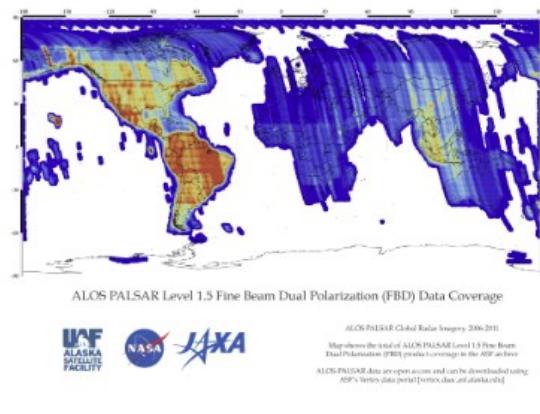
Thuộc tính dữ liệu	Độ phân giải tốt	Độ phân giải tốt, có bổ sung	Quét SAR	Phân cực
Phạm vi thời gian	2006-2011	2006-2011	2006-2011	2006-2011
Chu kỳ lặp lại	46 days	46 days	46 days	46 days
Phạm vi không gian	Toàn bộ khu vực Bắc, Trung và Nam Mỹ được bao gồm hoàn toàn. Các khu vực nằm ngoài châu Mỹ chỉ được bao gồm một phần	Toàn bộ khu vực Bắc, Trung và Nam Mỹ được bao gồm hoàn toàn. Các khu vực nằm ngoài châu Mỹ chỉ được bao gồm một phần	Toàn bộ khu vực Bắc, Trung và Nam Mỹ được bao gồm hoàn toàn. Các khu vực nằm ngoài châu Mỹ chỉ được bao gồm một phần	Toàn bộ khu vực Bắc, Trung và Nam Mỹ được bao gồm hoàn toàn. Các khu vực nằm ngoài châu Mỹ chỉ được bao gồm một phần
Chế độ tia	FBS, DSN	FBD	WB1, WB2	PLR
Băng tần	L-Band (1.27 GHz)	L-Band (1.27 GHz)	L-Band (1.27 GHz)	L-Band (1.27 GHz)
Phân cực	HH or VV	HH+HV or VV+VH	HH or VV	HH+HV or VV+VH
Độ phân giải không gian	10 m	20 m	100 m	30 m

Về mặt kỹ thuật, ALOS PALSAR được trang bị hệ thống anten mảng pha tiên tiến, cho phép điều khiển linh hoạt chùm tia radar và thu nhận dữ liệu ở nhiều chế độ khác nhau. Hệ thống có thể hoạt động ở các chế độ phân cực đơn (HH hoặc VV), phân cực kép (HH+HV hoặc VV+VH) và phân cực toàn phần, cung cấp thông tin phong phú về đặc tính tán xạ của các đối tượng trên mặt đất. Khả năng này đặc biệt hữu ích trong việc phân loại lớp phủ mặt đất và nghiên cứu các đặc tính vật lý của bề mặt.

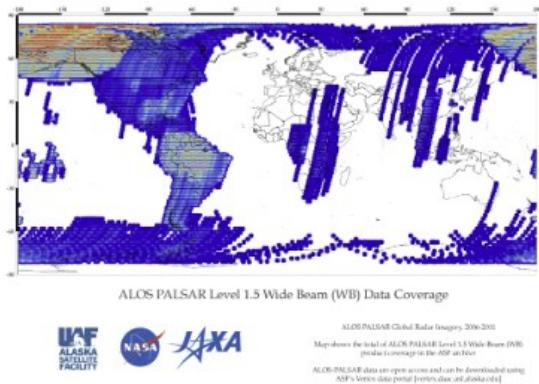
Bản đồ vùng phủ sóng ALOS L1.5 FBS



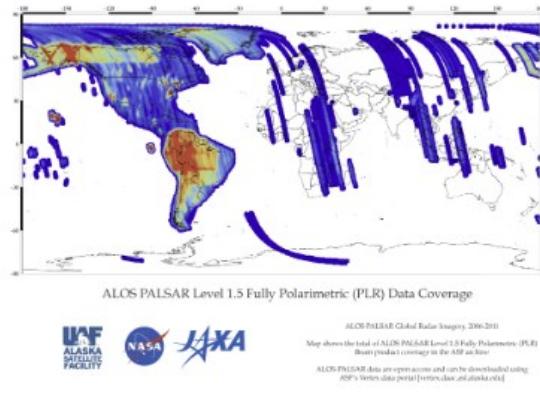
Bản đồ vùng phủ sóng ALOS L1.5 FBD



Bản đồ vùng phủ sóng chùm tia rộng ALOS L1.5



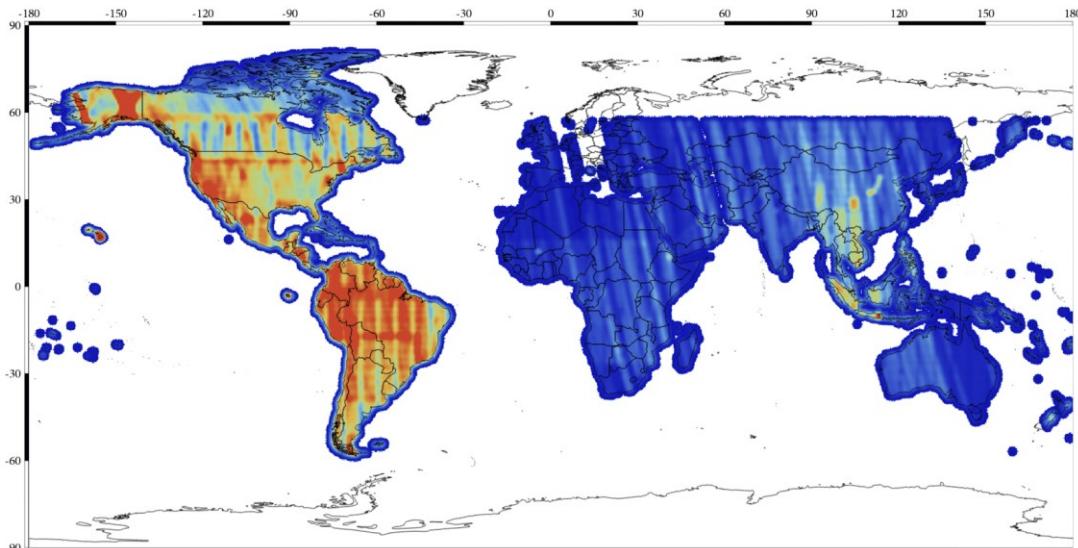
Bản đồ phủ sóng phân cực ALOS L1.5



Hình 16. Hình ảnh phạm vi phủ sóng toàn cầu theo chế độ chụp (tia) ảnh ALOS

Một trong những đặc điểm quan trọng của ALOS PALSAR là độ phân giải không gian cao, có thể đạt đến 10 mét ở chế độ độ phân giải cao (Fine Beam Single Polarization). Điều này cho phép quan sát chi tiết các đối tượng trên mặt đất, từ các công trình xây dựng đến các đặc điểm địa hình tự nhiên. Độ phân giải này, kết hợp với khả năng xuyên qua mây và hoạt động trong mọi điều kiện thời tiết, làm cho ALOS PALSAR trở thành công cụ quan trọng trong nhiều ứng dụng từ quy hoạch đô thị đến quản lý tài nguyên thiên nhiên.

JAXA đã phát triển một hệ thống xử lý dữ liệu toàn diện cho ALOS PALSAR, cung cấp các sản phẩm ở nhiều cấp độ xử lý khác nhau, từ dữ liệu thô đến các sản phẩm đã được hiệu chỉnh hình học và bức xạ. Điều này tạo điều kiện thuận lợi cho người dùng trong việc lựa chọn mức độ xử lý phù hợp với nhu cầu ứng dụng cụ thể của họ. Đặc biệt, việc cung cấp các sản phẩm mosaic toàn cầu đã tạo ra một bộ dữ liệu quý giá cho các nghiên cứu ở quy mô khu vực và toàn cầu.



ALOS PALSAR Radiometric Terrain Correction (RTC) Data Coverage



ALOS PALSAR Global Radar Imagery, 2006-2011

Map shows the total of ALOS PALSAR Radiometric Terrain Correction (RTC) product coverage in the ASF archive

ALOS-PALSAR data are open access and can be downloaded using
ASF's Vertex data portal [vertex.daac.asf.alaska.edu]

Hình 17. Sản phẩm ALOS PALSAR RTC có độ phủ hầu hết trái đất

Dữ liệu ALOS PALSAR đòi hỏi hiểu biết sâu sắc về các nguyên lý hoạt động của radar băng tần L và các kỹ thuật xử lý ảnh SAR. Hiện tượng nhiễu đốm và các biến dạng hình học đặc trưng của ảnh radar cần được xử lý cẩn thận để đảm bảo chất lượng kết quả phân tích. Ngoài ra, sự phức tạp trong việc giải đoán ảnh radar đòi hỏi người sử dụng phải có kiến thức chuyên môn và kinh nghiệm trong lĩnh vực xử lý ảnh radar.

b. Những đặc điểm nổi bật của ảnh ALOS PLASAR

ALOS PALSAR nổi bật với khả năng thu nhận dữ liệu ở nhiều chế độ phân cực khác nhau. Hệ thống có thể hoạt động ở chế độ phân cực đơn (HH hoặc VV), phân cực kép (HH+HV hoặc VV+VH), và thậm chí là phân cực toàn phần trong một số trường hợp đặc biệt. Mỗi chế độ phân cực cung cấp thông tin độc đáo về cách các đối tượng trên mặt đất tương tác với sóng radar, cho phép phân tích chi tiết về cấu trúc và đặc tính vật lý của chúng. Đặc biệt, thông tin từ các chế độ phân cực khác nhau khi kết hợp lại tạo ra bộ dữ liệu phong phú cho việc phân loại lớp phủ mặt đất và nghiên cứu các đặc tính vật lý của bề mặt.

Về độ phân giải không gian, ALOS PALSAR đạt được những tiến bộ đáng kể với khả năng thu nhận dữ liệu ở độ phân giải cao lên đến 10 mét trong chế độ Fine Beam Single Polarization. Độ phân giải này cho phép quan sát chi tiết các đối tượng trên mặt đất, từ các công trình nhân tạo đến các đặc điểm địa hình tự nhiên. Trong chế độ

ScanSAR, mặc dù độ phân giải thấp hơn nhưng bù lại có độ phủ rộng hơn, phù hợp cho các ứng dụng giám sát quy mô khu vực.

Một đặc điểm kỹ thuật quan trọng khác của ALOS PALSAR là độ ổn định về pha của tín hiệu radar. Nhờ sử dụng băng tần L, tín hiệu radar duy trì được độ tương quan pha tốt hơn theo thời gian so với các hệ thống radar hoạt động ở băng tần ngắn hơn. Đặc điểm này đặc biệt quan trọng trong các ứng dụng giao thoa radar (InSAR), cho phép theo dõi chính xác các chuyển động và biến dạng bề mặt đất.

ALOS PALSAR cũng nổi bật với khả năng thu nhận dữ liệu trong mọi điều kiện thời tiết và ánh sáng. Sóng radar băng tần L có khả năng xuyên qua mây và hoạt động trong điều kiện không có ánh sáng mặt trời, đảm bảo tính liên tục trong quan trắc bề mặt Trái Đất. Đặc điểm này đặc biệt hữu ích trong việc giám sát các khu vực thường xuyên bị mây che phủ hoặc trong các tình huống khẩn cấp cần thu thập dữ liệu nhanh chóng.

Về mặt chất lượng dữ liệu, ALOS PALSAR được trang bị hệ thống hiệu chuẩn tiên tiến, đảm bảo độ chính xác và độ tin cậy cao của dữ liệu thu nhận được. Hệ thống được thiết kế với các cơ chế kiểm soát chất lượng nghiêm ngặt, từ quá trình thu nhận dữ liệu đến xử lý và phân phối sản phẩm cuối cùng. Điều này đảm bảo tính nhất quán và độ tin cậy của dữ liệu trong các ứng dụng khoa học và thực tiễn.

c. Ứng dụng của ảnh ALOS PALSAR

Tương tự như ảnh Sentinel-1 sử dụng băng tần C, băng tần L của ALOS PALSAR mạnh hơn và cung cấp nhiều thông tin đáng tin cậy hơn. Trong nghiên cứu và giám sát lũ lụt, ALOS PALSAR thể hiện ưu thế vượt trội nhờ khả năng hoạt động ở băng tần L và thu nhận dữ liệu trong mọi điều kiện thời tiết. Tín hiệu radar ở băng tần L có đặc tính phản xạ đặc trưng khi tương tác với mặt nước, tạo ra sự tương phản rõ rệt giữa vùng ngập và không ngập trong ảnh radar. Đặc điểm này, kết hợp với khả năng xuyên qua mây, giúp ALOS PALSAR trở thành công cụ đặc biệt hữu hiệu trong việc xác định phạm vi ngập lụt ngay cả trong điều kiện thời tiết xấu - khi các vệ tinh quang học không thể thu nhận được dữ liệu có ích. Việc phân tích chuỗi ảnh đa thời gian cho phép theo dõi diễn biến lũ từ khi bắt đầu đến khi rút, cung cấp thông tin quý giá cho công tác ứng phó khẩn cấp và đánh giá thiệt hại.

Trong nghiên cứu về lũ quét, mặc dù đây là loại hình thiên tai xảy ra nhanh và khó dự báo, ALOS PALSAR vẫn đóng vai trò quan trọng thông qua khả năng cung cấp thông tin về điều kiện địa hình và độ ẩm đất. Đặc biệt, khả năng xuyên qua tán cây của băng tần L cho phép tạo ra các mô hình số độ cao (DEM) chính xác, góp phần xác định các khu vực có nguy cơ cao xảy ra lũ quét. Thông tin về độ ẩm đất từ tín hiệu radar băng tần L cũng giúp đánh giá khả năng thẩm nước của đất, một yếu tố quan trọng trong việc dự báo nguy cơ lũ quét.

Trong lĩnh vực nghiên cứu sạt lở đất, ALOS PALSAR thể hiện vai trò đặc biệt quan trọng thông qua công nghệ InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). Băng tần L có ưu điểm trong việc duy trì độ tương quan pha tốt hơn theo thời gian so với các băng tần ngắn hơn, cho phép phát hiện và đo đạc chính xác những chuyển động chậm của bề mặt đất - dấu hiệu cảnh báo sớm cho các sự kiện sạt lở. Kỹ thuật PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR) sử dụng dữ liệu ALOS PALSAR có thể phát hiện những biến dạng nhỏ đến mức milimet, đặc biệt hiệu quả trong việc giám sát ổn định của các sườn dốc.

Một ứng dụng quan trọng khác của ALOS PALSAR trong nghiên cứu các hiện tượng này là khả năng tích hợp thông tin từ nhiều chế độ phân cực khác nhau. Sự kết hợp giữa các chế độ phân cực cho phép phân tích chi tiết hơn về cấu trúc và đặc tính của bề mặt đất, giúp hiểu rõ hơn về các điều kiện thuận lợi cho việc hình thành lũ quét và sạt lở đất. Đặc biệt, thông tin từ chế độ phân cực chéo (HV) rất hữu ích trong việc đánh giá sự thay đổi cấu trúc bề mặt sau các sự kiện thiên tai.

Khả năng xuyên qua tán cây của ALOS PALSAR cũng đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá ổn định của các sườn dốc trong khu vực rừng núi. Tín hiệu radar có thể xuyên qua lớp thảm thực vật và tương tác với bề mặt đất bên dưới, cung cấp thông tin về điều kiện địa chất và độ ẩm đất - những yếu tố quan trọng trong việc đánh giá nguy cơ sạt lở. Điều này đặc biệt hữu ích tại các khu vực có độ che phủ rừng dày, nơi các phương pháp quan trắc truyền thống gặp nhiều khó khăn.

1.1.3.4. Ảnh SMAP (ảnh viễn thám vi ba kết hợp)

a. Giới thiệu về ảnh SMAP

Sản phẩm Độ ẩm đất SMAP Cấp độ 4 (L4) bao gồm độ ẩm đất bề mặt (trung bình theo chiều thẳng đứng 0-5 cm), độ ẩm đất vùng rẽ (trung bình theo chiều thẳng đứng 0-100 cm) và các sản phẩm nghiên cứu bổ sung (chưa được xác thực), bao gồm các biến số lực lượng bề mặt, nhiệt độ đất, thoát hơi nước và bức xạ ròng.

SMAP L4 cung cấp dữ liệu độ ẩm đất không bị gián đoạn. Trong thời gian ngừng hoạt động của thiết bị SMAP, độ ẩm đất SMAP L4 chỉ dựa trên mô phỏng mô hình đất, không có sự đồng hóa đồng thời các quan sát nhiệt độ độ sáng SMAP. Các lần ngừng hoạt động đáng kể của thiết bị SMAP xảy ra trong khoảng thời gian từ ngày 19 tháng 6 đến ngày 23 tháng 7 năm 2019 và từ ngày 6 tháng 8 đến ngày 20 tháng 9 năm 2022.

Dữ liệu nhiệt độ độ sáng băng tần L của SMAP từ các vệ tinh nửa quỹ đạo đi xuống và đi lên (lần lượt là khoảng 6:00 sáng và 6:00 chiều theo giờ địa phương) được đồng hóa vào mô hình bề mặt đất được chia lưới bằng phép chiếu Lưới Trái Đất có thể mở rộng diện tích bằng nhau hình trụ toàn cầu 9 km, Phiên bản 2.0 (EASE-Grid 2.0).

Bảng 10. Các kênh trong ảnh SMAP

Kênh	Đơn vị	Mô tả
sm_surface	Phân số thể tích	Độ ẩm đất lớp trên cùng (0-5 cm)
sm_rootzone	Phân số thể tích	Độ ẩm đất vùng rễ (0-100 cm)
sm_profile	Phân số thể tích	Độ ẩm đất tổng thể (0 cm đến độ sâu nền đá mô hình).
sm_surface_wetness		Độ ẩm của lớp đất trên cùng (0-5 cm; đơn vị độ ẩm). Đơn vị độ ẩm của đất (không có đơn vị) thay đổi từ 0 đến 1, biểu thị độ bão hòa tương đối giữa điều kiện khô hoàn toàn và điều kiện bão hòa hoàn toàn.
sm_rootzone_wetness		Độ ẩm đất vùng rễ (0-100 cm; đơn vị độ ẩm). Đơn vị độ ẩm đất (không có đơn vị) thay đổi từ 0 đến 1, biểu thị độ bão hòa tương đối giữa điều kiện khô hoàn toàn và điều kiện bão hòa hoàn toàn.
sm_profile_wetness		Độ ẩm đất tổng thể (0 cm đến độ sâu nền đá mô hình; đơn vị độ ẩm). Đơn vị độ ẩm đất (không có đơn vị) thay đổi từ 0 đến 1, biểu thị độ bão hòa tương đối giữa điều kiện khô hoàn toàn và điều kiện bão hòa hoàn toàn.
surface_temp	K	Nhiệt độ bề mặt đất trung bình (bao gồm cả diện tích đất phủ tuyết). Không bao gồm các khu vực có nước mờ và băng vĩnh cửu
soil_temp_layer1	K	Nhiệt độ đất ở lớp 1 của mô hình khuếch tán nhiệt đất
soil_temp_layer2	K	Nhiệt độ đất ở lớp 2 của mô hình khuếch tán nhiệt đất
soil_temp_layer3	K	Nhiệt độ đất ở lớp 3 của mô hình khuếch tán nhiệt đất
soil_temp_layer4	K	Nhiệt độ đất ở lớp 4 của mô hình khuếch tán nhiệt đất
soil_temp_layer5	K	Nhiệt độ đất ở lớp 5 của mô hình khuếch tán nhiệt đất
soil_temp_layer6	K	Nhiệt độ đất ở lớp 6 của mô hình khuếch tán nhiệt đất
snow_mass	kg/m ²	Khối lượng tuyết trung bình (hoặc lượng nước tuyết tương đương) trên phần đất của ô lưới
snow_depth	m	Độ sâu của tuyết trong phần đất phủ tuyết của ô lưới
land_evapotranspiration_flux	kg/m ² /giây	Sự thoát hơi nước từ đất

Kênh	Đơn vị	Mô tả
overland_runoff_flux	kg/m ² /giây	Dòng chảy trên mặt đất (bao gồm cả dòng chảy xuyên qua)
baseflow_flux	kg/m ² /giây	Dòng chảy cơ sở
snow_melt_flux	kg/m ² /giây	Tuyết tan
soil_water_infiltration_flux	kg/m ² /giây	Tỷ lệ thấm nước của đất
land_fraction_saturated		Diện tích đất phân đoạn bão hòa và không có tuyết
land_fraction_unsaturated		Diện tích đất phân đoạn không bão hòa (nhưng không héo) và không có tuyết
land_fraction_wilting		Diện tích đất bị héo và không có tuyết
land_fraction_snow_covered		Diện tích đất bị tuyết bao phủ
heat_flux_sensible	W/m ²	Dòng nhiệt cảm nhận từ đất liền
heat_flux_latent	W/m ²	Dòng nhiệt ẩn từ đất liền
heat_flux_ground	W/m ²	Dòng nhiệt mặt đất đi xuống lớp 1 của mô hình khuếch tán nhiệt đất
net_downward_shortwave_flux	W/m ²	Dòng sóng ngắn hướng xuống ròng trên đất liền
net_downward_longwave_flux	W/m ²	Dòng sóng dài ròng xuống đất liền
radiation_shortwave_downward_flux	W/m ²	Sóng ngắn hướng xuống dưới tác động vào bề mặt
radiation_longwave_absorbed_flux	W/m ²	Bức xạ sóng dài được hấp thụ (hướng xuống) ở bề mặt
precipitation_total_surface_flux	kgm ⁻² s ⁻²	Tổng lượng mưa bề mặt (bao gồm cả tuyết rơi)
snowfall_surface_flux	kgm ⁻² s ⁻²	Tuyết rơi trên bề mặt
surface_pressure	K	Nhiệt độ bề mặt đất trung bình (bao gồm diện tích đất phủ tuyết)

Kênh	Đơn vị	Mô tả
height_lowatmmodlay	m	Chiều cao trung tâm của lớp mô hình khí quyển thấp nhất
temp_lowatmmodlay	K	Nhiệt độ không khí ở độ cao trung tâm của lớp mô hình khí quyển thấp nhất
specific_humidity_lowatmmodlay	Phân số khói lượng	Độ ẩm không khí riêng tại độ cao trung tâm của lớp mô hình khí quyển thấp nhất
windspeed_lowatmmodlay	bệnh đa xơ cứng	Tốc độ gió bề mặt ở độ cao trung tâm của lớp mô hình khí quyển thấp nhất
vegetation_greenness_fraction		Độ "xanh" của thảm thực vật hoặc tỷ lệ lá thoát hơi nước trung bình trên diện tích đất* của ô lưới.
leaf_area_index	Phân số diện tích	Chỉ số diện tích lá thực vật
sm_rootzone_pctl	%	Độ ẩm đất vùng rễ (0-100 cm; đơn vị phần trăm)
sm_profile_pctl	%	Độ ẩm đất tổng thể (0 cm đến độ sâu nền đá mô hình; đơn vị phần trăm)
depth_to_water_table_from_surface_in_peat	m	Độ sâu đến mực nước ngầm từ độ cao bề mặt trung bình ở vùng đất than bùn (dương trên mặt đất)
free_surface_water_on_peat_flux	kg/m^2/giây	Thay đổi trong lưu trữ nước mặt tự do trên đất than bùn
mwrtm_vegopacity		Mô hình truyền bức xạ vi sóng: Độ mờ của thảm thực vật.
sm_surface_anomaly		Thử nghiệm

b. Những đặc điểm nổi bật của ảnh SMAP

Ảnh SMAP (Soil Moisture Active Passive) của NASA là một trong những công cụ viễn thám tiên tiến nhất hiện nay, đặc biệt hữu ích trong nghiên cứu và quản lý các hiện tượng thiên tai như lũ lụt, lũ quét và sạt lở đất. Khả năng đo lường độ ẩm đất của SMAP là một bước tiến vượt bậc trong viễn thám. Hệ thống này sử dụng cả radar chủ động và cảm biến thụ động để đo độ ẩm đất bề mặt với độ phân giải không gian khoảng 9 km và độ phân giải thời gian 2-3 ngày. Điều này cho phép giám sát độ ẩm đất trên phạm vi toàn cầu với độ chi tiết cao, hỗ trợ đắc lực trong việc dự đoán và theo dõi các thiên tai liên quan đến nước.

Độ ẩm đất đóng vai trò then chốt trong việc xác định khả năng hấp thụ nước của đất. Khi đất đã bão hòa, lượng nước mưa dư thừa sẽ chảy tràn bề mặt, dẫn đến nguy cơ lũ lụt và lũ quét. Nhờ dữ liệu SMAP, các nhà nghiên cứu có thể phân tích mức độ bão hòa của đất một cách chi tiết, từ đó xây dựng các mô hình dự báo thiên tai chính xác hơn.

SMAP cung cấp dữ liệu đồng nhất trên toàn cầu, vượt qua các hạn chế của các phương pháp truyền thống vốn chỉ đo được tại các trạm quan trắc cố định. Hơn nữa, khả năng cung cấp dữ liệu liên tục theo thời gian thực của SMAP đảm bảo rằng các hiện tượng biến động nhanh, chẳng hạn như lũ quét hoặc mưa lớn, có thể được giám sát hiệu quả.

Sự liên tục của dữ liệu này rất quan trọng trong bối cảnh biến đổi khí hậu, khi mà các hiện tượng thiên tai ngày càng trở nên khó lường và phức tạp hơn. SMAP cho phép các nhà quản lý và nghiên cứu theo dõi những thay đổi ngắn hạn cũng như xu hướng dài hạn trong độ ẩm đất, từ đó đưa ra các dự báo kịp thời và đáng tin cậy.

c. Những ứng dụng nổi bật của ảnh SAMP

Trong phân tích và dự báo lũ lụt, độ ẩm đất là một trong những yếu tố quyết định khả năng thẩm hút nước của đất và là tham số quan trọng trong các mô hình thủy văn. Dữ liệu SMAP cung cấp thông tin độ ẩm đất ở bề mặt với độ phân giải cao, từ đó giúp cải thiện khả năng dự báo lũ.

Trong thực tế, việc kết hợp dữ liệu SMAP với các mô hình thủy văn như HEC-HMS hay VIC đã chứng minh tính hiệu quả trong việc dự đoán dòng chảy và xác định các khu vực có nguy cơ ngập úng. Ví dụ, trước một trận mưa lớn, thông tin từ SMAP có thể được sử dụng để đánh giá độ bão hòa của đất. Nếu đất đã gần bão hòa, nguy cơ lũ lụt sẽ tăng cao do nước không thể thẩm sâu hơn. Bằng cách này, các nhà quản lý có thể triển khai các biện pháp giảm thiểu như xả lũ điều tiết hoặc di dời dân cư khỏi các vùng nguy hiểm.

Tương tự với lũ quét, với khả năng đo lường độ ẩm đất ở cả khu vực rộng lớn và khu vực cụ thể, SMAP giúp xác định những khu vực có độ bão hòa cao và nguy cơ xảy ra lũ quét lớn. Sự kết hợp dữ liệu SMAP với thông tin địa hình từ DEM (Digital Elevation Model), các chuyên gia GIS có thể xây dựng bản đồ nguy cơ lũ quét theo thời gian thực. Các khu vực có độ dốc cao và độ ẩm đất vượt ngưỡng nguy hiểm có thể được cảnh báo sớm. Điều này đặc biệt quan trọng ở các khu vực miền núi nơi lũ quét xảy ra bất ngờ, gây thiệt hại lớn mà không có đủ thời gian để chuẩn bị.

1.1.3.5. Các sản phẩm khí tượng vệ tinh

Các sản phẩm khí tượng vệ tinh là một phân khúc quan trọng của hình ảnh viễn thám, cung cấp dữ liệu khí tượng bề mặt thiết yếu như cột nước tiềm năng trong mây, áp suất,

tốc độ gió, bốc hơi và nhiệt độ. Các sản phẩm này có nguồn gốc từ nhiều hệ thống vệ tinh được thiết kế để theo dõi các điều kiện khí quyển và hỗ trợ dự báo thời tiết. Ví dụ, các vệ tinh được trang bị cảm biến tiên tiến có thể đo độ che phủ của mây, nhiệt độ bề mặt và cấu hình khí quyển, rất quan trọng để hiểu các mô hình và hiện tượng thời tiết [14] [15].

Các sản phẩm lượng mưa vệ tinh thường được xử lý cụ thể để tạo ra ước tính lượng mưa theo không gian và thời gian. Tuy nhiên, vẫn còn một thách thức đáng kể: nhiều sản phẩm lượng mưa này không được hiệu chuẩn hoặc chỉ được hiệu chuẩn một phần bằng dữ liệu trạm mặt đất. Việc thiếu hiệu chuẩn này có thể dẫn đến sự khác biệt giữa các ước tính thu được từ vệ tinh và các phép đo lượng mưa thực tế trên mặt đất [16] [17]. Việc tích hợp dữ liệu vệ tinh với các quan sát mặt đất là điều cần thiết để cải thiện độ chính xác của các ước tính lượng mưa này, vì nó cho phép xác thực và điều chỉnh tốt hơn các thuật toán vệ tinh được sử dụng trong quá trình xử lý dữ liệu [18].

Bảng 11. Tổng hợp một số dữ liệu khí tượng vệ tinh phổ biến

Tên dữ liệu	Đặc điểm nổi bật	Chu kỳ	Ưu điểm	Nhược điểm	Ứng dụng trong lũ quét
IMERG	Kết hợp dữ liệu từ nhiều vệ tinh và số liệu mặt đất	30 phút	<ul style="list-style-type: none"> - Độ phủ toàn cầu ($60^{\circ}\text{N}-60^{\circ}\text{S}$) - Độ phân giải không gian cao (0.1°) - Tích hợp nhiều nguồn dữ liệu 	<ul style="list-style-type: none"> - Độ trễ trong xử lý (3-4 tháng) - Sai số lớn ở vùng núi 	<ul style="list-style-type: none"> - Giám sát mưa thời gian thực - Đánh giá ngưỡng mưa gây lũ
GSMaP	Ước tính lượng mưa từ vệ tinh địa tĩnh và quỹ đạo cực	1 giờ	<ul style="list-style-type: none"> - Cập nhật nhanh (4 giờ) - Độ phân giải không gian tốt (0.1°) 	<ul style="list-style-type: none"> - Độ phủ giới hạn ($60^{\circ}\text{N}-60^{\circ}\text{S}$) - Thiếu hiệu chỉnh mặt đất 	<ul style="list-style-type: none"> - Theo dõi mưa lớn - Cảnh báo sớm lũ quét
CMORPH	Kết hợp dữ liệu vi sóng từ nhiều vệ tinh	30 phút	<ul style="list-style-type: none"> - Độ phân giải thời gian cao - Thuật toán ổn định 	<ul style="list-style-type: none"> - Độ trễ trong xử lý - Sai số ở vùng có địa hình phức tạp 	<ul style="list-style-type: none"> - Phân tích xu thế mưa - Dự báo lũ quét
TRMM	Kết hợp dữ liệu radar và vi sóng	3 giờ	<ul style="list-style-type: none"> - Chuỗi dữ liệu dài - Độ tin cậy cao 	<ul style="list-style-type: none"> - Đã ngừng hoạt động từ 2015 - Độ phân giải thời gian thấp 	<ul style="list-style-type: none"> - Nghiên cứu lịch sử lũ quét - Phân tích ngưỡng mưa

Tên dữ liệu	Đặc điểm nổi bật	Chu kỳ	Ưu điểm	Nhược điểm	Ứng dụng trong lũ quét
PERSIAN N	Sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo để ước tính mưa	1 giờ	- Cập nhật nhanh - Phù hợp vùng nhiệt đới	- Sai số lớn ở vùng vĩ độ cao - Phụ thuộc vào chất lượng training	- Giám sát mưa thời gian thực - Cảnh báo sớm
Himawari	Ước tính mưa từ dữ liệu vệ tinh địa tĩnh	10 phút	- Độ phân giải thời gian rất cao - Cập nhật nhanh	- Chỉ phủ khu vực châu Á-TBD - Sai số lớn với mưa nhỏ	- Theo dõi mây đối lưu - Cảnh báo mưa dông
AMSR2	Dữ liệu mưa từ cảm biến vi sóng	1-2 lần/ngày	- Độ chính xác cao trên biển - Ít bị ảnh hưởng bởi mây	- Độ phủ thời gian thấp - Kém chính xác trên đất liền	- Đánh giá mưa trên biển - Dự báo mưa ven biển
SEVIRI	Ước tính mưa từ vệ tinh Meteosat	15 phút	- Độ phân giải thời gian cao - Phủ châu Âu và châu Phi	- Giới hạn khu vực - Sai số với mưa địa hình	- Theo dõi mây đối lưu - Cảnh báo mưa lớn
FY-4	Dữ liệu mưa từ vệ tinh FY-4 của Trung Quốc	15 phút	- Độ phân giải thời gian cao - Phủ châu Á	- Giới hạn khu vực - Còn mới, cần đánh giá thêm	- Giám sát mưa thời gian thực - Cảnh báo mưa dông
GEO-KOMPSA T	Ước tính mưa từ vệ tinh Hàn Quốc	10 phút	- Độ phân giải thời gian rất cao - Chuyên biệt cho Đông Á	- Phủ giới hạn - Mới đưa vào hoạt động	- Theo dõi mây đối lưu - Dự báo mưa lớn

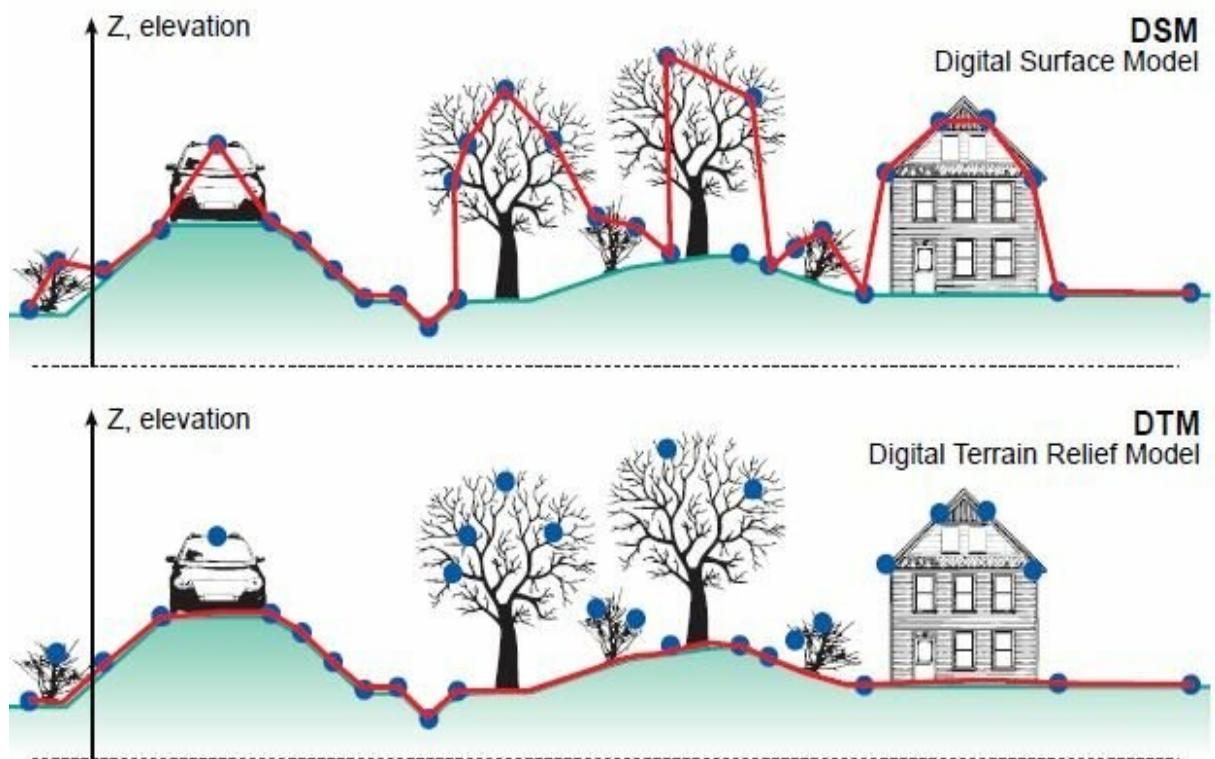
1.1.4. Các dữ liệu địa không gian khác

Ngoài ảnh viễn thám, các loại dữ liệu địa không gian khác là các dữ liệu thực tế thông qua công tác đo đạc trực tiếp tại thực địa, điều tra khảo sát thực tế, tổng hợp từ các nguồn thống kê hay số hóa từ bản đồ giấy...

Nhóm dữ liệu địa không gian này có đặc điểm và quy trình xử lý khác so với ảnh viễn thám, tuy nhiên sự kết hợp tổng thể sẽ giúp khu vực nghiên cứu có đầy đủ bộ dữ liệu cần thiết phục vụ phân tích, đánh giá trong nghiên cứu thiên tai.

Các dữ liệu địa không gian này thường có độ chi tiết cao hơn so với ảnh viễn thám, ví dụ hệ thống sông suối nhỏ khó có thể xác định bằng ảnh viễn thám do độ phân giải thấp (từ 10-30m), tuy nhiên công tác điều tra thực tế có thể xây dựng được các hệ thống sông suối với độ phân giải cao hơn (nhỏ hơn 10m).

Nhiều ảnh viễn thám cung cấp dữ liệu địa hình như DSM (Digital Surface Model – mô hình số cao độ bề mặt) hay DEM (Digital Elevation Model – Mô hình số độ cao), tuy nhiên do cơ chế là sóng phản xạ, nhiều khu vực có thể bị nhiễu dẫn đến những sai số nhất định trong việc xác định cao độ bề mặt địa hình.



Hình 18. Mô hình số địa hình và mô hình số cao độ bề mặt

Bảng 12. Mô hình DEM, DSM và DTM

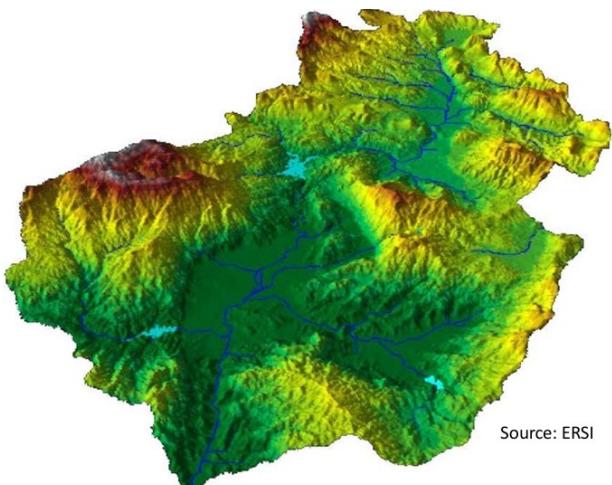
Đặc điểm	DEM	DSM	DTM
Độ cao	Mặt đất trống	Tất cả các đối tượng trên mặt đất	Mặt đất và các yếu tố địa hình quan trọng (như sông suối, đỉnh núi, bờ sông/suối..)
Dữ liệu	Lưới (raster) hoặc điểm độ cao	Lưới (raster) hoặc điểm độ cao	Lưới (raster) và vector

Ứng dụng	Phân tích địa hình, mô phỏng lũ lụt	Mô hình hóa đô thị, quy hoạch đô thị	Phân tích thủy văn, xây dựng đường xá
-----------------	-------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------------

Trong khi đó, nếu dữ liệu địa hình được xây dựng từ công tác khảo sát, dễ dàng có được DTM với độ phân giải rất cao, thể hiện đầy đủ các đối tượng bề mặt như bờ sông hay các con đường một cách hiệu quả.

1.1.4.2. DEM địa hình

Mô hình số độ cao (DEM - Digital Elevation Model) là dạng dữ liệu số hóa biểu diễn địa hình bề mặt Trái đất dưới dạng lưới ô vuông đều. Mỗi ô lưới chứa giá trị độ cao trung bình của khu vực mà nó đại diện, tạo nên bức tranh ba chiều về địa hình. Đây là dữ liệu nền tảng trong các phân tích không gian, đặc biệt trong nghiên cứu tai biến thiên nhiên.

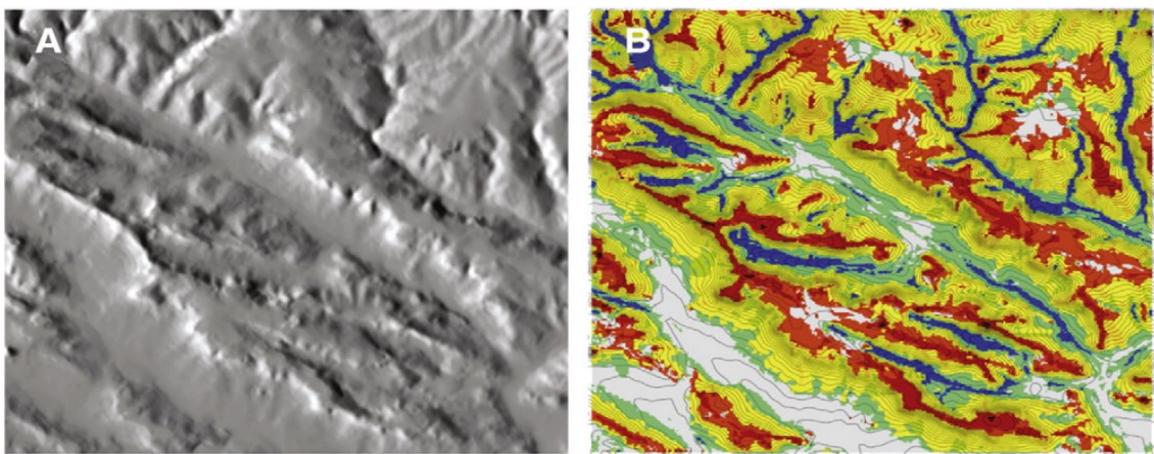


Source: ESRI

DEM được tạo ra từ nhiều nguồn dữ liệu khác nhau như đo đạc mặt đất trực tiếp, công nghệ LiDAR, radar giao thoa (InSAR), hoặc công nghệ lập thể từ ảnh vệ tinh như ASTER. Mỗi phương pháp có ưu nhược điểm riêng, ảnh hưởng đến độ chính xác của mô hình. Chẳng hạn, DEM từ đo đạc mặt đất có độ chính xác cao nhưng tồn kém và khó thực hiện ở vùng địa hình phức tạp, trong khi DEM từ ảnh vệ tinh có thể bao phủ diện tích lớn nhưng độ chính xác thấp hơn.

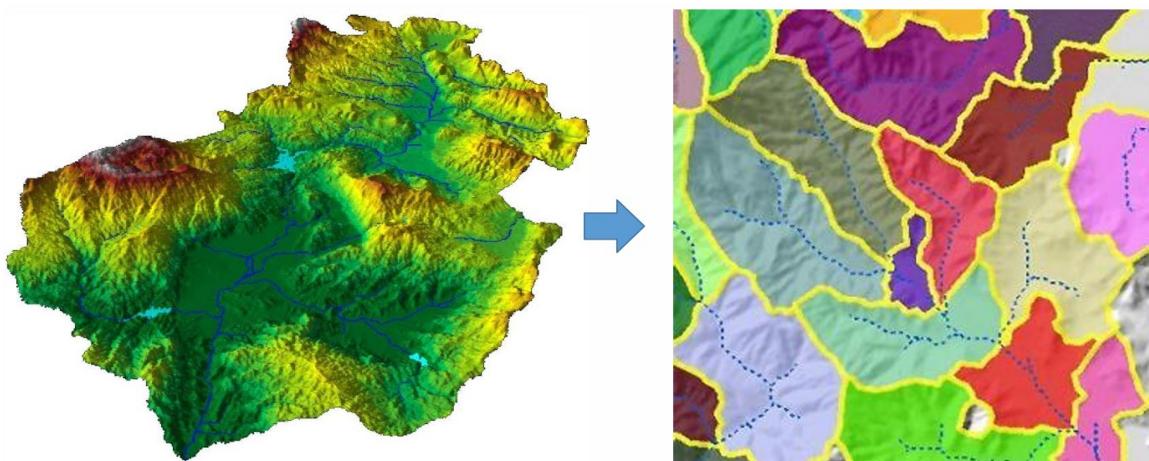
Độ phân giải không gian của DEM ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng biểu diễn chi tiết địa hình. DEM có thể có độ phân giải từ vài mét (như LIDAR) đến hàng trăm mét (như GTOPO30). Việc lựa chọn độ phân giải phù hợp phụ thuộc vào mục đích sử dụng và quy mô nghiên cứu. Trong nghiên cứu lũ lụt đô thị, cần DEM độ phân giải cao để mô phỏng chính xác dòng chảy, trong khi nghiên cứu thủy văn cấp lưu vực có thể sử dụng DEM độ phân giải thấp hơn.

DEM là cơ sở để tính toán nhiều thông số địa hình quan trọng như độ dốc, hướng sườn, độ cong mặt đất, và tích lũy dòng chảy. Những thông số này đóng vai trò thiết yếu trong phân tích rủi ro thiên tai. Ví dụ, trong đánh giá nguy cơ sạt lở đất, độ dốc từ DEM là yếu tố quan trọng hàng đầu, kết hợp với hướng sườn giúp xác định hướng trượt tiềm năng của khối đất.



Hình 19. Xác định địa mạo từ DEM địa hình

Trong phân tích lũ lụt, DEM giúp xác định vùng trũng, hướng dòng chảy và các đường phân thủy. Việc tích hợp DEM vào mô hình thủy văn cho phép mô phỏng quá trình tập trung dòng chảy và dự báo vùng ngập. Đặc biệt, DEM độ phân giải cao còn giúp phát hiện các khu vực có nguy cơ lũ quét cao thông qua phân tích địa hình chi tiết của các lưu vực nhỏ.



Hình 20. Dữ liệu DEM địa hình trong phân tích thủy văn

1.1.4.3. Sử dụng đất

Bản đồ sử dụng đất là một công cụ trực quan và phân tích mạnh mẽ, cung cấp thông tin chi tiết về cách con người sử dụng và quản lý các vùng đất trên bề mặt Trái đất. Đây không chỉ là một loại bản đồ địa lý, mà còn là một lớp dữ liệu quan trọng trong hệ thống thông tin địa không gian, hỗ trợ quy hoạch, quản lý tài nguyên, và phát triển bền vững. Trong bối cảnh phân tích dữ liệu địa không gian tổng thể, bản đồ sử dụng đất đóng vai trò kết nối giữa dữ liệu không gian và các lĩnh vực kinh tế, xã hội, và môi trường.

Bản đồ sử dụng đất phản ánh cách mà con người khai thác và sử dụng các vùng đất, từ các khu đô thị, nông nghiệp, rừng tự nhiên, đến các vùng đất chưa được khai thác. Một trong những đặc điểm nổi bật của bản đồ này là tính chất động và đa chiều. Sự phân

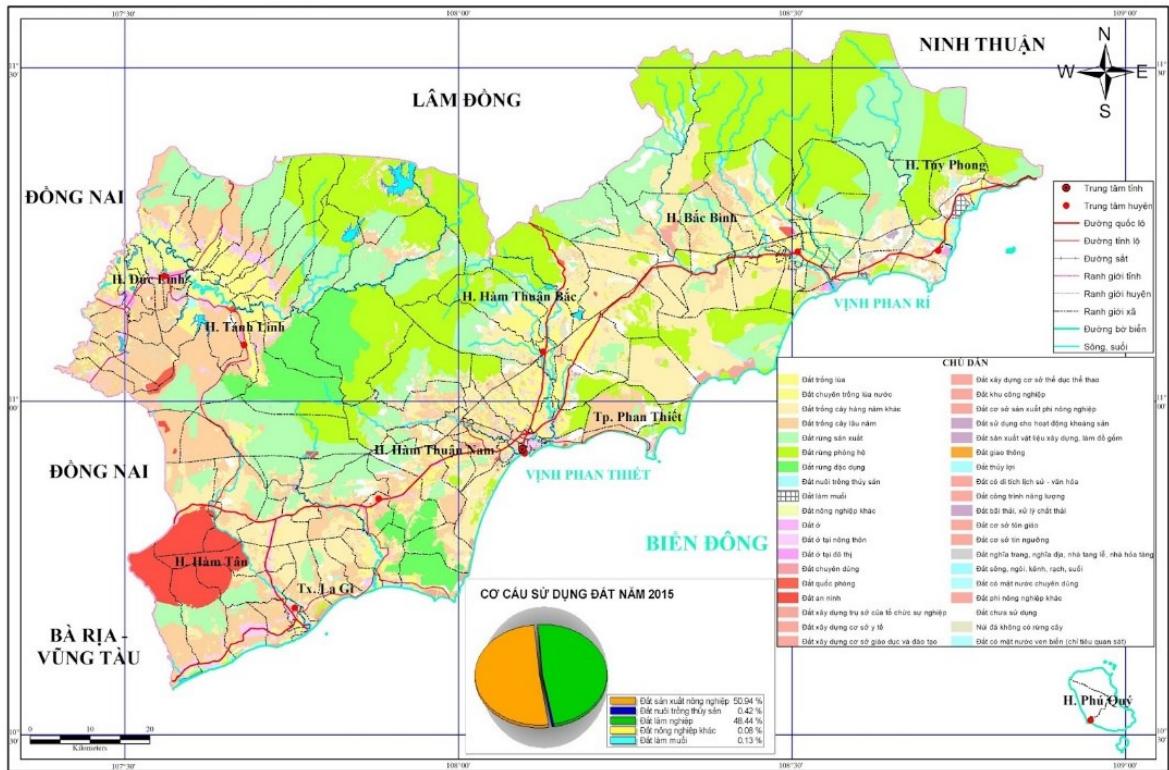
bố sử dụng đất không chỉ thay đổi theo không gian, mà còn biến đổi theo thời gian, phản ánh sự phát triển kinh tế, gia tăng dân số, và tác động của các chính sách quy hoạch.

Bảng 13. Các loại hình sử dụng đất [14]

STT	Loại đất	Mã	STT	Loại đất	Mã
I	NHÓM ĐẤT NÔNG NGHIỆP		4	Đất xây dựng trụ sở của tổ chức sự nghiệp	DTS
1	Đất chuyên trồng lúa nước	LUC	5	Đất xây dựng cơ sở văn hóa	DVH
2	Đất trồng lúa nước còn lại	LUK	6	Đất xây dựng cơ sở y tế	DYT
3	Đất lúa nương	LUN	7	Đất xây dựng cơ sở giáo dục và đào tạo	DGD
4	Đất bàng tròng cây hàng năm khác	BHK	8	Đất xây dựng cơ sở thể dục thể thao	DTT
5	Đất nương rẫy tròng cây hàng năm khác	NHK	9	Đất xây dựng cơ sở khoa học và công nghệ	DKH
6	Đất trồng cây lâu năm	CLN	10	Đất xây dựng cơ sở dịch vụ xã hội	DXH
7	Đất rừng sản xuất	RSX	11	Đất xây dựng cơ sở ngoại giao	DNG
8	Đất rừng phòng hộ	RPH	12	Đất xây dựng công trình sự nghiệp khác	DSK
9	Đất rừng đặc dụng	RDD	13	Đất quốc phòng	CQP
10	Đất nuôi trồng thủy sản	NTS	14	Đất an ninh	CAN
11	Đất làm muối	LMU	15	Đất khu công nghiệp	SKK
12	Đất nông nghiệp khác	NKH	16	Đất khu chế xuất	SKT
II	NHÓM ĐẤT PHI NÔNG NGHIỆP		17	Đất cụm công nghiệp	SKN
1	Đất ở tại nông thôn	ONT	18	Đất cơ sở sản xuất phi nông nghiệp	SKC
2	Đất ở tại đô thị	ODT			
3	Đất xây dựng trụ sở cơ quan	TSC			

STT	Loại đất	Mã
19	Đất thương mại, dịch vụ	TMD
20	Đất sử dụng cho hoạt động khoáng sản	SKS
21	Đất sản xuất vật liệu xây dựng, làm đồ gốm	SKX
22	Đất giao thông	DGT
23.	Đất thủy lợi	DTL
24	Đất công trình năng lượng	DNL
25	Đất công trình bưu chính, viễn thông	DBV
26	Đất sinh hoạt cộng đồng	DSH
27	Đất khu vui chơi, giải trí công cộng	DKV
28	Đất chợ	DCH
29	Đất có di tích lịch sử - văn hóa	DDT
30	Đất danh lam thắng cảnh	DDL

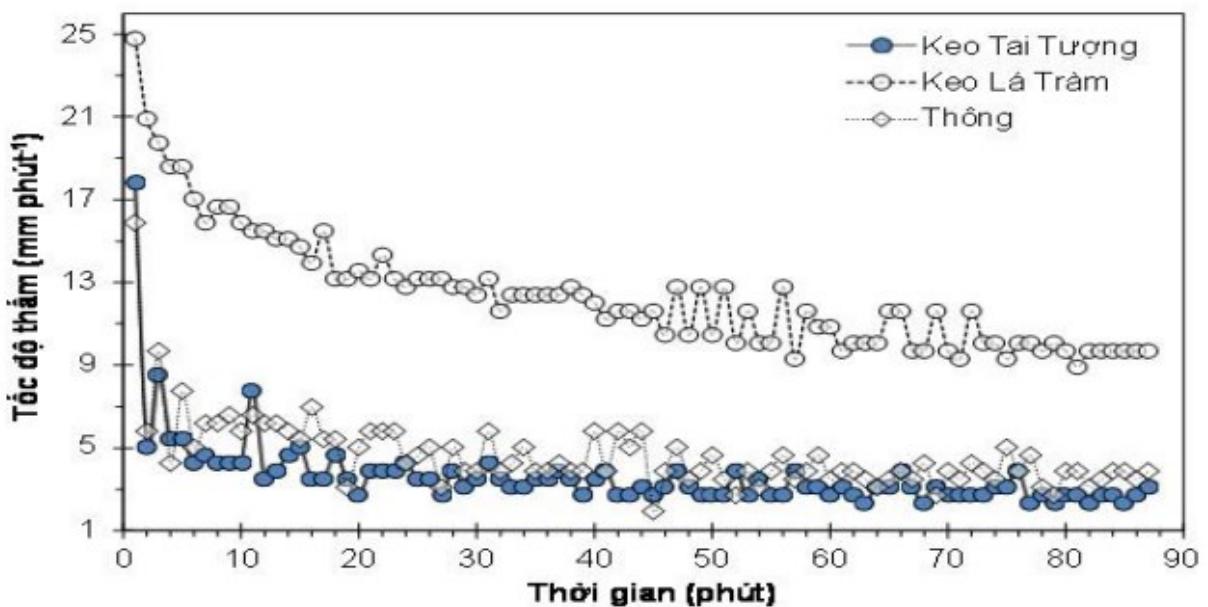
STT	Loại đất	Mã
31	Đất bãi thải, xử lý chất thải	DRA
32	Đất công trình công cộng khác	DCK
33	Đất cơ sở tôn giáo	TON
34	Đất cơ sở tín ngưỡng	TIN
35	Đất làm nghĩa trang, nghĩa địa, nhà tang lễ, nhà hỏa táng	NTD
36	Đất sông, ngòi, kênh, rạch, suối	SON
37	Đất có mặt nước chuyên dùng	MNC
38	Đất phi nông nghiệp khác	PNK
III	NHÓM ĐẤT CHƯA SỬ DỤNG	
1	Đất bằng chưa sử dụng	BCS
2	Đất đồi núi chưa sử dụng	DCS
3	Núi đá không có rừng cây	NCS



Hình 21. Bản đồ sử dụng đất nông nghiệp tỉnh Bình Thuận 2015

Dữ liệu sử dụng đất thường được biểu diễn dưới dạng các lớp thông tin không gian, với mỗi lớp đại diện cho một loại hình sử dụng đất khác nhau. Mỗi đối tượng trên bản đồ đều được liên kết với các thuộc tính như diện tích, loại hình sử dụng, và mức độ can thiệp của con người. Các dữ liệu này thường được thu thập qua các phương pháp viễn thám, khảo sát thực địa, hoặc tích hợp từ các nguồn tài liệu quy hoạch.

Bản đồ sử dụng đất có ý nghĩa vô cùng quan trọng trong nghiên cứu thiên tai, đặc biệt là các loại hình thiên tai do nước gây ra như lũ, lũ quét, sạt lở đất... Loại hình sử dụng đất liên quan mật thiết đến khả năng thẩm nước bề mặt và sự tương tác giữa mưa và mặt đất, tác động đến quá trình tập trung dòng chảy của bề mặt.

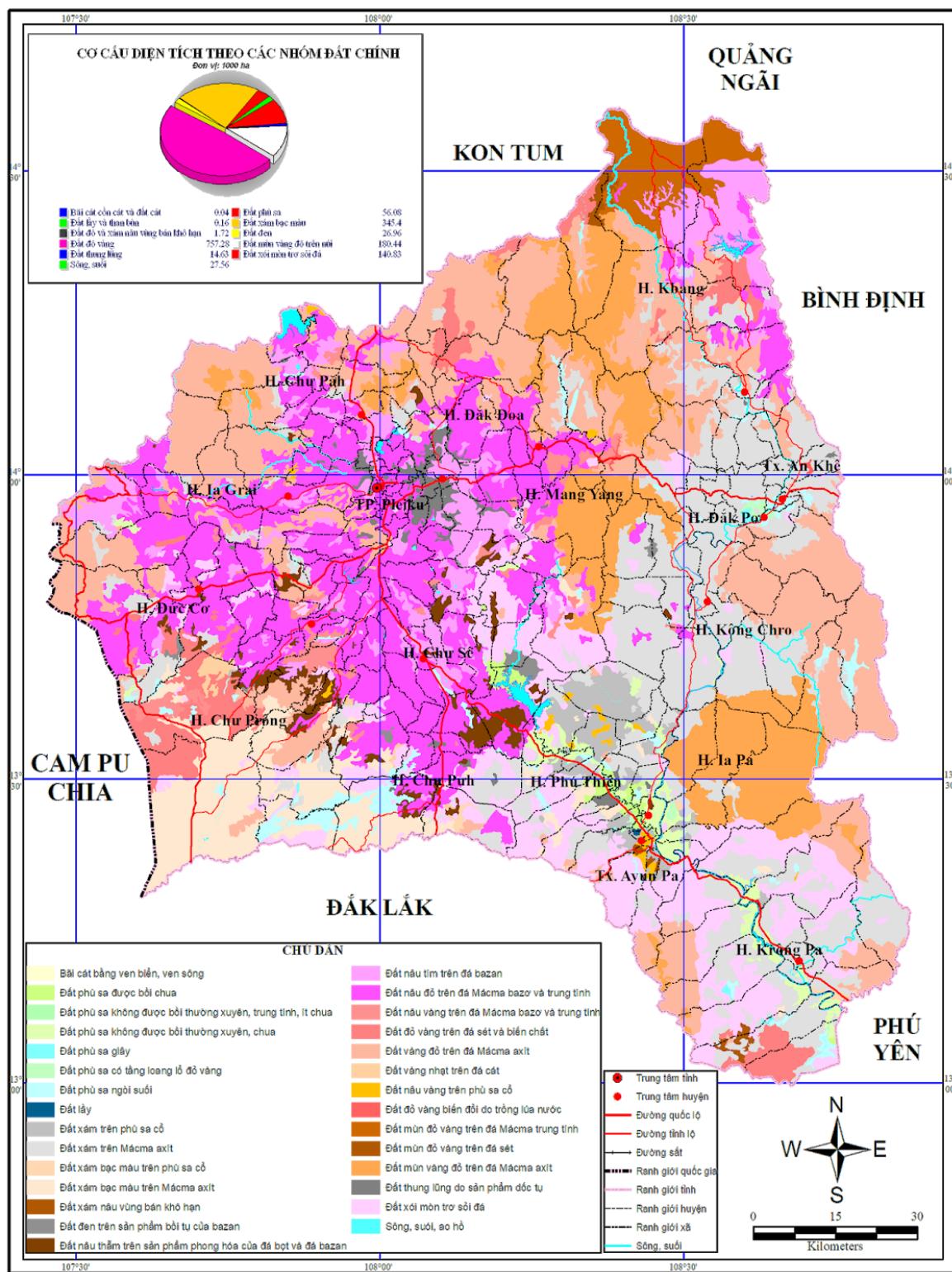


Hình 22. Một nghiên cứu điển hình cho đặc điểm thấm nước của một số loại hình sử dụng đất [15]

1.1.4.4. Địa chất, thổ nhưỡng

Bản đồ địa chất và bản đồ thổ nhưỡng là những loại bản đồ đặc biệt, cung cấp cái nhìn tổng quát và chi tiết về cấu trúc, tính chất của đất và nền địa chất bên dưới bề mặt Trái đất. Chúng không chỉ phản ánh các đặc điểm vật lý và hóa học của đất, mà còn tiết lộ lịch sử địa chất và các quá trình tự nhiên đã định hình bề mặt hành tinh của chúng ta qua hàng triệu năm. Trong bối cảnh dữ liệu địa không gian, bản đồ địa chất/thổ nhưỡng đóng vai trò nền tảng trong việc phân tích, quy hoạch và phát triển bền vững.

Bản đồ địa chất là một biểu đồ không gian thể hiện các lớp đá, cấu trúc địa chất, và các đơn vị địa tầng dưới bề mặt Trái đất. Nó phản ánh các yếu tố như tuổi địa chất, nguồn gốc, và quá trình hình thành của các lớp đất đá, đồng thời chỉ ra các đặc điểm quan trọng như đứt gãy, nếp uốn, hoặc các mỏ khoáng sản. Trong khi đó, bản đồ thổ nhưỡng tập trung vào đặc điểm của lớp đất bề mặt, bao gồm kết cấu, độ phì nhiêu, và khả năng giữ nước. Đây là những thông tin thiết yếu để hiểu về tính năng sử dụng đất và khả năng hỗ trợ các hoạt động sản xuất nông nghiệp, xây dựng hoặc bảo tồn môi trường.



Hình 23. Bản đồ thô nhưỡng tỉnh Gia Lai

Cả hai loại bản đồ đều có chung một đặc điểm quan trọng: tính không gian và sự phân bố theo khu vực. Mỗi đơn vị địa chất hoặc thô nhưỡng trên bản đồ thường được đại diện bởi các ký hiệu, màu sắc và chú thích riêng biệt, giúp người sử dụng dễ dàng nhận diện các đặc điểm nổi bật của khu vực. Dữ liệu này thường được thu thập thông

qua khảo sát thực địa, phân tích mẫu vật, và công nghệ viễn thám hiện đại, tạo nên các lớp thông tin không gian chính xác và đa dạng.

Ngoài ra, cả hai loại bản đồ này đều hỗ trợ các nghiên cứu liên ngành như quản lý tài nguyên nước, bảo tồn đa dạng sinh học, và đánh giá tác động môi trường. Chẳng hạn, trong quản lý lưu vực sông, bản đồ địa chất cung cấp thông tin về độ thâm và dòng chảy ngầm, trong khi bản đồ thổ nhưỡng giúp xác định các khu vực có nguy cơ xói mòn cao. Việc tích hợp hai loại bản đồ này với các dữ liệu địa không gian khác giúp nâng cao độ chính xác và hiệu quả trong các phân tích tổng thể.

1.2. Tổng quan các nghiên cứu ứng dụng dữ liệu địa không gian trong xác định lũ quét.

Dữ liệu địa không gian có ý nghĩa quan trọng trong nghiên cứu lũ quét, nâng cao sự hiểu biết về các yếu tố tác động đến quá trình hình thành lũ quét. Ứng dụng dữ liệu địa không gian trong nghiên cứu lũ quét những năm gần đây dần trở nên phổ biến. Trong phần này, nhóm nghiên cứu sẽ trình bày các phương pháp xác định lũ quét ứng dụng dữ liệu địa không gian trong những năm gần đây và tổng hợp các dữ liệu địa không gian trong nghiên cứu lũ quét.

1.2.1. Các phương pháp xác định lũ quét

1. Bản đồ điều tra/phát hiện lũ quét

Bản đồ điều tra lũ quét là bản đồ thể hiện các vị trí đã từng xảy ra lũ quét trong quá khứ. Loại bản đồ này thường được xây dựng dựa trên công tác điều tra, thu thập số liệu tại khu vực nghiên cứu để xác định khu vực bị lũ quét tràn qua. Tuy nhiên, dưới sự phát triển về công nghệ viễn thám, một số các sự kiện lũ quét có thể được phát hiện dựa trên kết quả giải đoán ảnh vệ tinh.

Phương pháp này sử dụng các ảnh vệ tinh trước và sau trận lũ để làm cơ sở so sánh sự khác biệt tại các khu vực bị lũ quét tràn qua, một số các yếu tố so sánh bao gồm sự khác biệt về độ ẩm, độ phản xạ hoặc địa hình... Trong các trường hợp lũ quét xảy ra, thông thường ảnh chụp không thể “bắt” được đúng thời điểm, đặc biệt tại thời điểm xảy ra lũ quét thường có mưa lớn và mây che phủ, do đó các ảnh viễn thám quang học không chiếm ưu thế để có thể xác định được lũ quét.

Noori và cộng sự đã sử dụng ảnh Sentinel-1 để phát hiện lũ quét cho thành phố Erbil (thủ đô của Kurdistan thuộc Iraq) cho trận lũ ngày 17/12/2021 tại nơi này gây thiệt hại 12 người chết [16]. Ảnh SAR của Sentinel-1 được sử dụng trước và sau trận lũ để phát hiện với 2 chỉ số thay đổi chuẩn hóa NCI (Normalized Change Index) và chỉ số tỷ lệ RI (Ratio Index) kết hợp với ngưỡng bán tự động được sử dụng. Độ chính xác tổng thể của NCI và RI lần lượt là 90,5% và 84,3%. Đánh giá độ chính xác cho thấy phương pháp sử

dụng chỉ số NCI vượt trội hơn phương pháp sử dụng chỉ số RI trong việc phát hiện sự kiện lũ quét ở Thành phố Erbil. Mô hình này khả thi cho việc quản lý thiên tai, cho phép đánh giá thiệt hại đối với cơ sở hạ tầng quan trọng của thành phố và các tài sản khác, do đó hỗ trợ quản lý đô thị hiệu quả và ứng phó kịp thời với các trường hợp khẩn cấp.

Chỉ số thay đổi chuẩn hóa NCI được xây dựng bằng công thức:

$$NCI = \frac{\sigma_{vv(t/t+1)}^0 - \sigma_{vv(t-1)}^0}{\sigma_{vv(t/t+1)}^0 + \sigma_{vv(t-1)}^0}$$

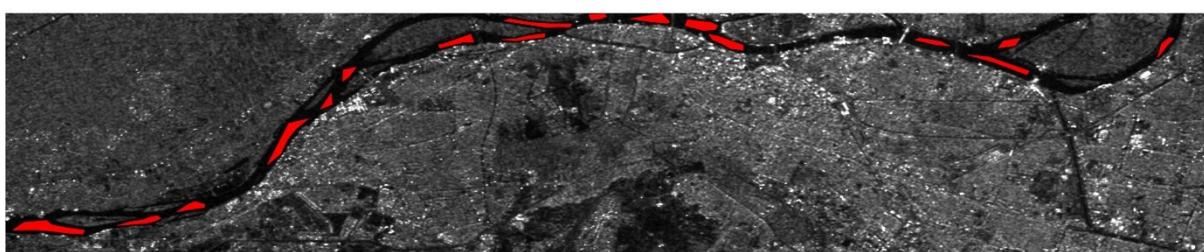
Trong đó, $\sigma_{vv(t/t+1)}^0$ là hệ số tán xạ của phân cực VV trong hoặc sau lũ; $\sigma_{vv(t-1)}^0$ là hệ số tán xạ của phân cực VV trước lũ. Sự thay đổi chuẩn hóa này có giá trị biến thiên từ -1 đến 1, mặc dù vậy một số ô lướt vượt khoảng giá trị này, các chỉ số vượt sẽ bị quy đổi thành NaN (không giá trị), Nếu $NCI = 0$ thể hiện khu vực không có sự thay đổi trước và sau lũ, tuy nhiên khi càng dần về -1, khu vực càng thể hiện bị ngập lũ (do chỉ số tán xạ sau lũ tăng cao hơn khi gặp nước).

Chỉ số tỷ lệ RI được xác định như sau:

$$RI = \frac{\sigma_{vv(t/t+1)}^0}{\sigma_{vv(t-1)}^0}$$

Khoảng giá trị của RI dao động từ $-2 \div 3$, trong đó các giá trị nhỏ hơn 1 được đánh giá là không có biến động, ngược lại, giá trị càng cao thì càng thể hiện sự ngập lũ.

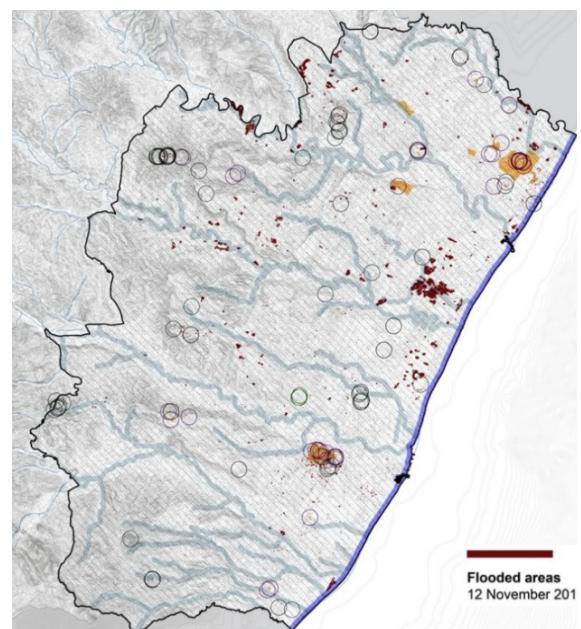
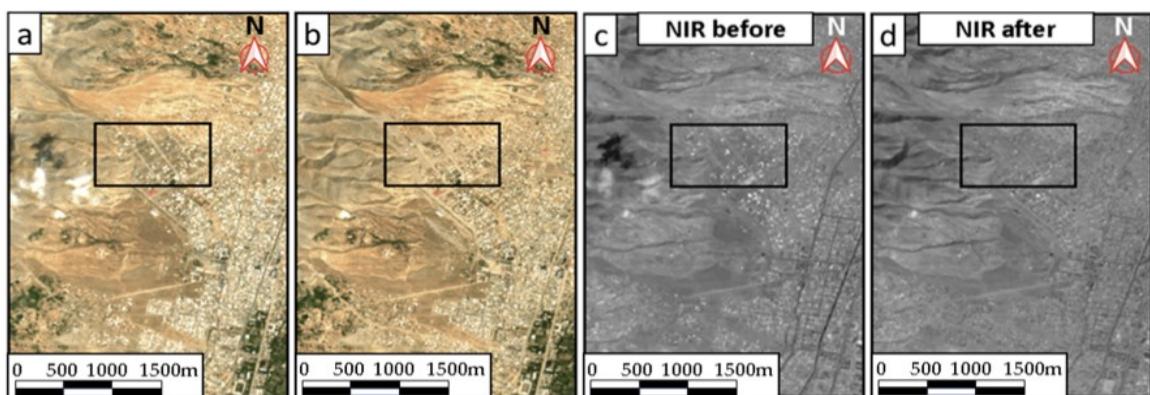
Elkhrachy và cộng sự cũng đã sử dụng ảnh Sentinel-1 kết hợp với hệ thống phân tích thủy văn để phát hiện và mô hình hóa lũ quét tại thành phố Cairo, Ai Cập [17]. Ảnh SAR được sử dụng để phát hiện khu vực xảy ra lũ quét, trong khi đó, mô hình thủy lực HEC-RAS (2 chiều) được sử dụng để mô phỏng lũ. Nghiên cứu sử dụng sự chênh lệch tán xạ ngược trong khoảng từ 19,97 đến 16,53 (dB - decibel) làm khoảng xác định vùng ngập lũ. Kết quả xác định có độ tin cậy lên tới 89,7%.



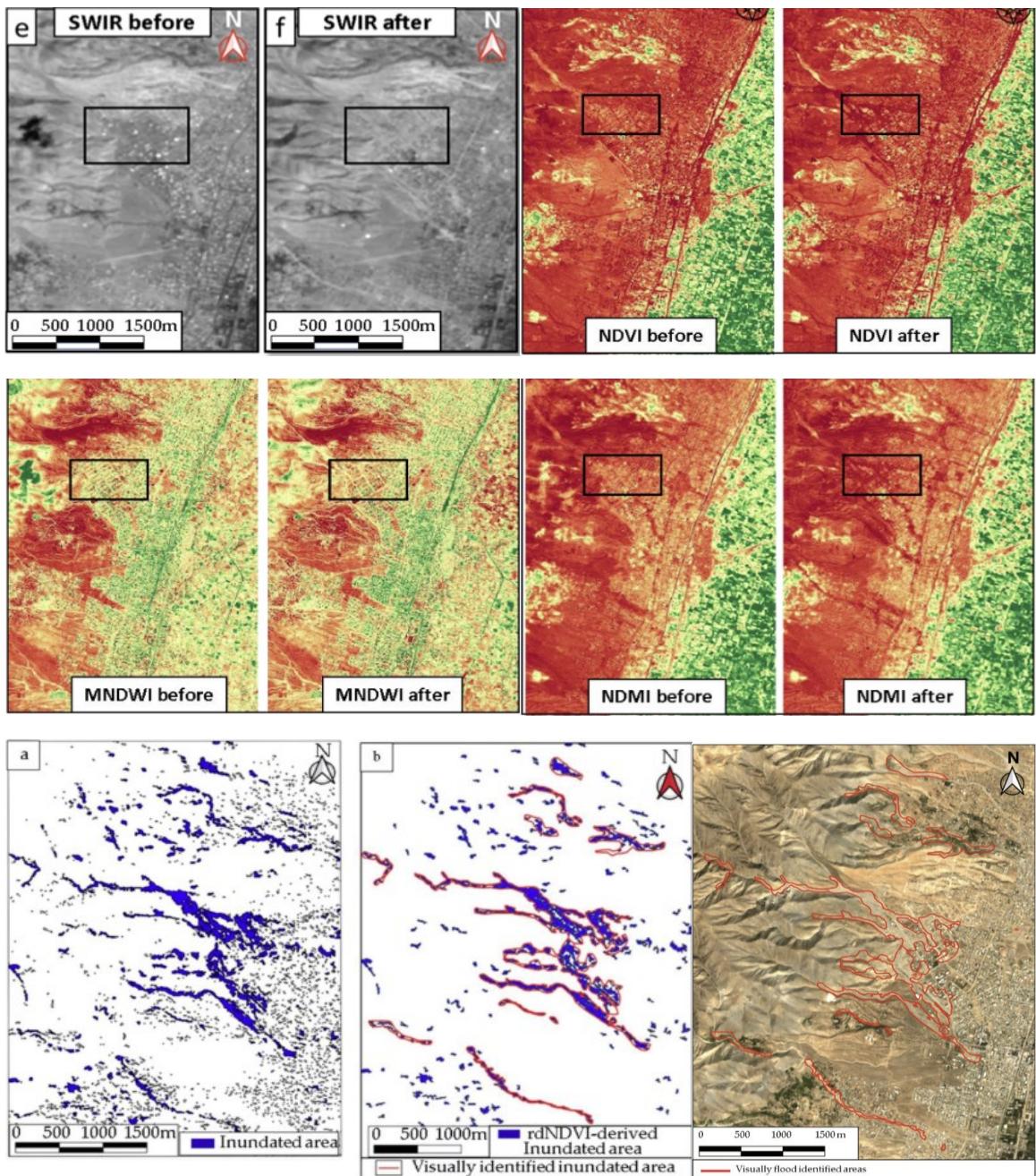
Hình 24. Phát hiện lũ quét sử dụng hệ số tán xạ ngược của ảnh SAR

Gabriele [18] đã sử dụng ảnh Sentinel-1 để xác định sự kiện lũ quét tại khu vực Đồng bằng Metaponto ở Basilicata, miền nam nước Ý. Cụ thể, nghiên cứu tập trung vào việc sử dụng hình ảnh phân cực VV (Vertical-Vertical) vì nó dễ dàng phát hiện nước lũ hơn so với các hình ảnh VH (Vertical-Horizontal) trong các khu vực có địa hình thấp và có nhiều thực vật. Mặc dù không có dữ liệu thực địa để xác thực ngay sau sự kiện, nghiên cứu đã nhấn mạnh rằng việc thực hiện xác thực tại chỗ là cần thiết cho các nghiên cứu trong tương lai. Các phương pháp như khảo sát bằng UAV và ghi lại các dấu hiệu ngập lụt tại hiện trường được đề xuất để cải thiện độ chính xác của phương pháp

Không chỉ ảnh SAR có khả năng phát hiện lũ quét, ảnh viễn thám quang học trong một số trường hợp cũng có thể phát hiện lũ quét trong điều kiện thuận lợi. Atefi và cộng sự đã sử dụng sự khác biệt chuẩn hóa thực vật (NDVI) từ ảnh Sentinel-2 để phát hiện trận lũ quét tháng 8 năm 2020 ở Afghanistan [19].



Kết quả xác định khu vực bị lũ quét của Gabriele



Hình 25. Sự thay đổi từ ảnh viễn thám quang học trước và sau trận lũ quét

Tương tự với Atefi, Elstohy và cộng sự cũng đã sử dụng ảnh Sentinel-2 với sự phân loại tương tự đã áp dụng cho khu vực biển đỏ ở Zafaraana, Ai Cập [20]. Kết quả của sự phát hiện lũ quét được xác định cho độ tin cậy lên tới 98,9%.

Nhìn chung, dưới lợi thế về độ phân giải và chu kỳ ảnh (ảnh landsat độ phân giải 30m và chu kỳ 16 ngày so với ảnh sentinel độ phân giải 10m và chu kỳ 6 ngày), bộ ảnh viễn thám Sentinel dần trở nên phổ biến trong những năm gần đây trong việc phát hiện lũ, lũ quét. Ảnh Landsat được nghiên cứu ít hơn rất nhiều do hạn chế về độ phân giải. Tügel và cộng sự đã sử dụng ảnh Landsat 8 để xác thực (kiểm chứng) các mô phỏng lũ quét trong một nghiên cứu với mục đích xây dựng bản đồ điều tra lũ quét ở khu vực El

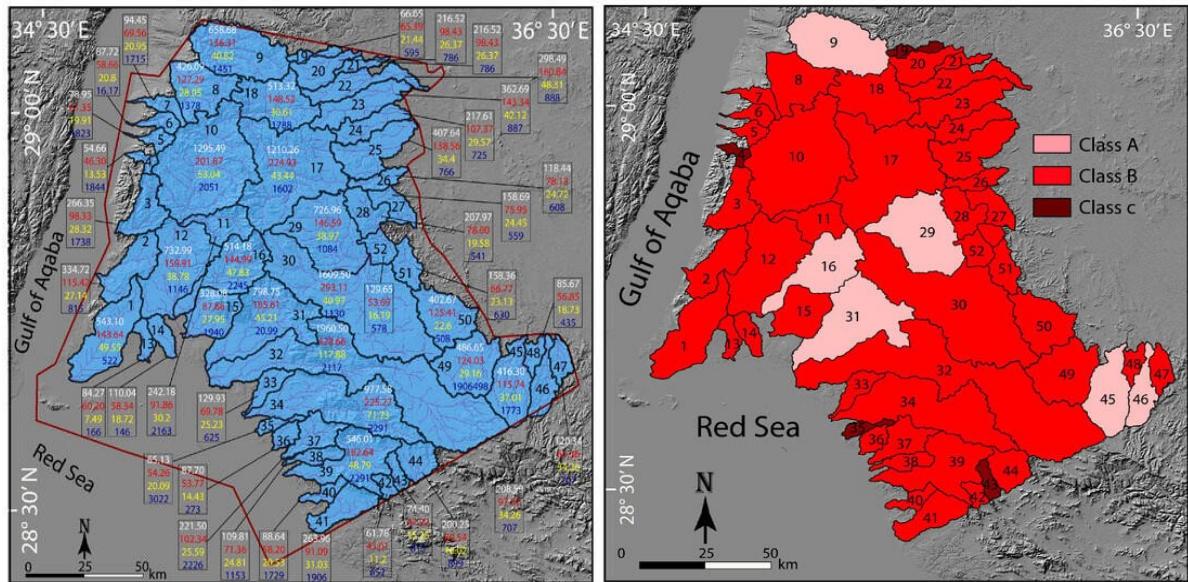
Gouna, Ai Cập [21]. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng việc sử dụng ảnh Landsat có độ phân giải thấp là yếu điểm và chỉ phù hợp để kiểm tra các khu vực ngập lũ trong thời gian dài, đồng thời cũng khuyến nghị sử dụng ảnh Sentinel-2 trong công tác nghiên cứu phát hiện lũ, lũ quét.

2. Dự đoán/dự báo lũ quét

Về dự báo lũ quét, các nghiên cứu thường chia thành 3 loại bao gồm [22]:

- (1) Xác định tính nhạy cảm với lũ quét (Susceptibility): phân ra sự nhạy cảm đối với lũ quét theo cấp độ, các khu vực này là các khu vực dễ chịu ảnh hưởng của lũ quét trong quá khứ và tương lai. Đây là bản đồ tinh và thường phục vụ quy hoạch sử dụng đất, bố trí dân cư, tái định cư.
- (2) Xác định nguy cơ lũ quét (Hazard): phân ra nguy cơ lũ quét theo cấp độ, chỉ rõ được lũ quét sẽ xảy ra trong trường hợp cụ thể nào (ví dụ mưa 200mm trong 3 giờ). Thông thường xác định nguy cơ lũ quét theo kịch bản và theo thời gian thực.
- (3) Xác định rủi ro lũ quét (Risk): phân ra rủi ro lũ quét theo cấp độ, chỉ rõ được lũ quét xảy ra thì sẽ gây thiệt hại như thế nào. Thông thường được lập theo kịch bản.

Bashir và cộng sự đã sử dụng 16 yếu tố từ đặc điểm lưu vực như thứ tự luồng, chiều dài dòng chảy, mật độ thoát nước... kết hợp với phương pháp El-Shamy để xác định bản đồ nguy cơ lũ quét cho khu vực thành phố Neom, Tây Bắc Ả Rập Xê Út [23]. Kết quả cho thấy bốn lưu vực (4, 19, 35 và 43) được ghi nhận là thuộc Lớp C, phản ánh các điều kiện có khả năng xảy ra nguy cơ lũ lụt cao, chiếm khoảng 1,32% tổng diện tích. Sáu lưu vực (9, 16, 29, 31, 45 và 46) được quan sát là thuộc Lớp A, biểu thị các điều kiện nguy cơ lũ lụt thấp, chiếm khoảng 16,9% tổng diện tích, và cuối cùng khoảng 81,78% diện tích thuộc lớp B với điều kiện nguy cơ lũ lụt vừa phải. Phương pháp El-Shamy cho thấy mô hình của phương pháp El-Shamy tương thích với kết quả phân tích hình thái, xác nhận rằng khả năng xảy ra nguy cơ lũ quét nghiêm trọng là tương đối thấp.



Hình 26. Kết quả xây dựng bản đồ nguy cơ lũ quét theo El-Shamy của Bashir

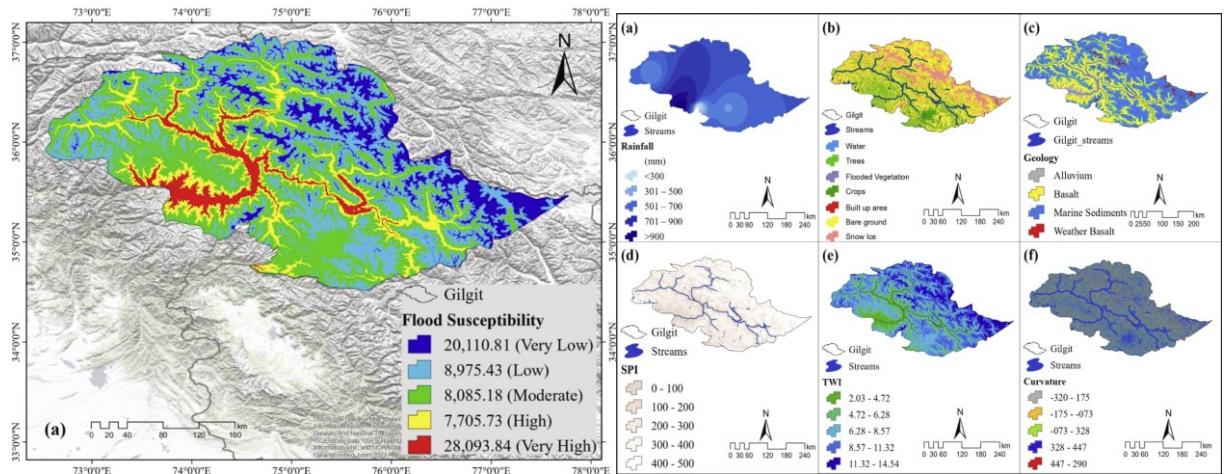
Hoàn toàn các kết quả nghiên cứu của Bashir sử dụng để xây dựng bản đồ nhạy cảm với lũ quét, tuy nhiên nghiên cứu sử dụng cụm từ “nguy cơ” là chủ yếu. Trên thực tế, rất nhiều các nghiên cứu không làm rõ các thuật ngữ này một cách rõ ràng.

Tariq và cộng sự đã sử dụng các dữ liệu địa không gian kết hợp với phương pháp thủy văn để đánh giá mức độ nhạy cảm với lũ quét cho khu vực Gilgit-Baltistan [24]. Nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tích thứ bậc (AHP) kết hợp tỷ lệ tần suất (FR) để xây dựng bản đồ nhạy cảm với lũ quét. 12 yếu tố bao gồm: (1) E - Cao độ; (2) S - Độ dốc; (3) DR - Khoảng cách đến sông/suối; (4) G - Địa mạo; (5) DD - Mật độ thoát nước; (6) F - Tích lũy dòng chảy; (7) R - Lượng mưa; (8) LULC - Sử dụng đất; (9) G - Địa chất; (10) SPI - Công suất dòng chảy; (11) TWI - Chỉ số ám địa hình; và (12) C - Độ cong địa hình.

Bảng 14. Bảng điểm AHP trong nghiên cứu của Tariq

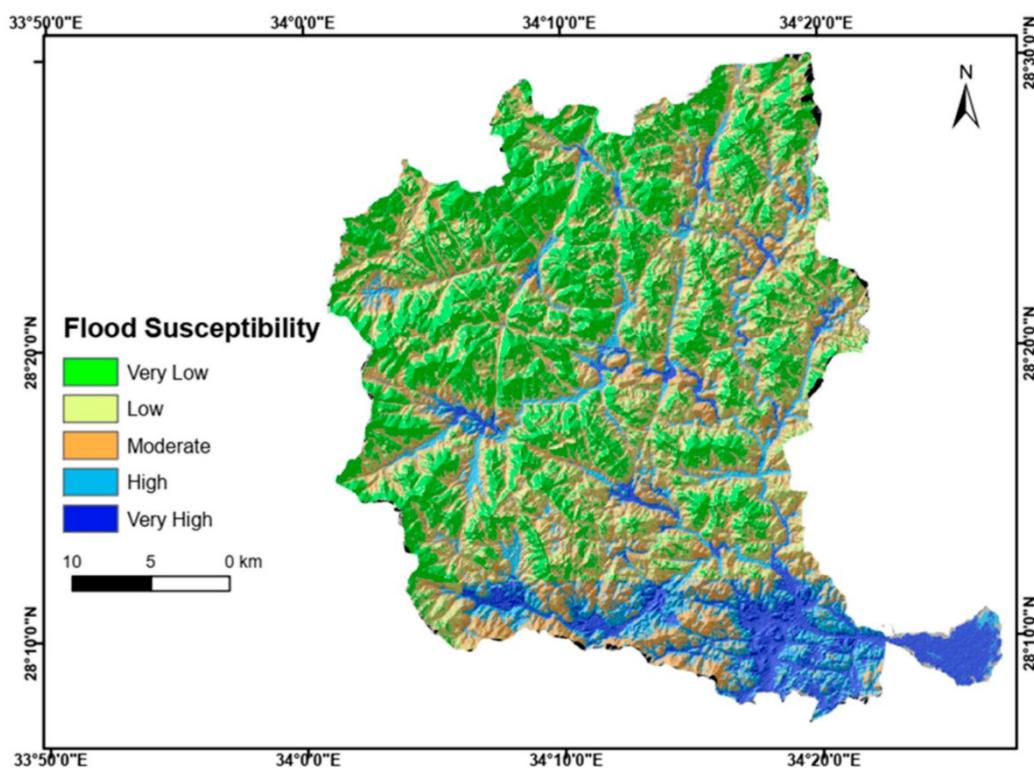
Tham số	E	S	DR	G	DD	F	R	G.1	LULC	SPI	TWI	C
E	1	2	3	4	4	5	5	6	6	7	8	8
S	0.5	1	2	3	3	4	4	5	5	6	7	8
DR	0.33	0.5	1	2	3	3	4	5	4	6	6	7
G	0.25	0.33	0.5	1	2	3	3	4	4	5	6	7
DD	0.25	0.33	0.33	0.5	1	2	3	4	3	5	6	7
F	0.2	0.25	0.33	0.33	0.5	1	2	3	3	4	5	6
R	0.18	0.25	0.25	0.33	0.33	0.5	1	2	2	3	5	6

Tham số	E	S	DR	G	DD	F	R	G.1	LULC	SPI	TWI	C
G	0.18	0.2	0.25	0.25	0.33	0.33	0.5	1	2	3	4	5
LULC	0.15	0.2	0.2	0.25	0.25	0.25	0.33	0.5	1	2	4	5
SPI	0.11	0.15	0.18	0.2	0.2	0.2	0.25	0.33	0.5	1	2	4
TWI	0.12	0.14	0.18	0.2	0.2	0.18	0.25	0.25	0.25	0.5	1	3
C	0.12	0.15	0.2	0.15	0.15	0.15	0.18	0.2	0.2	0.2	0.5	1

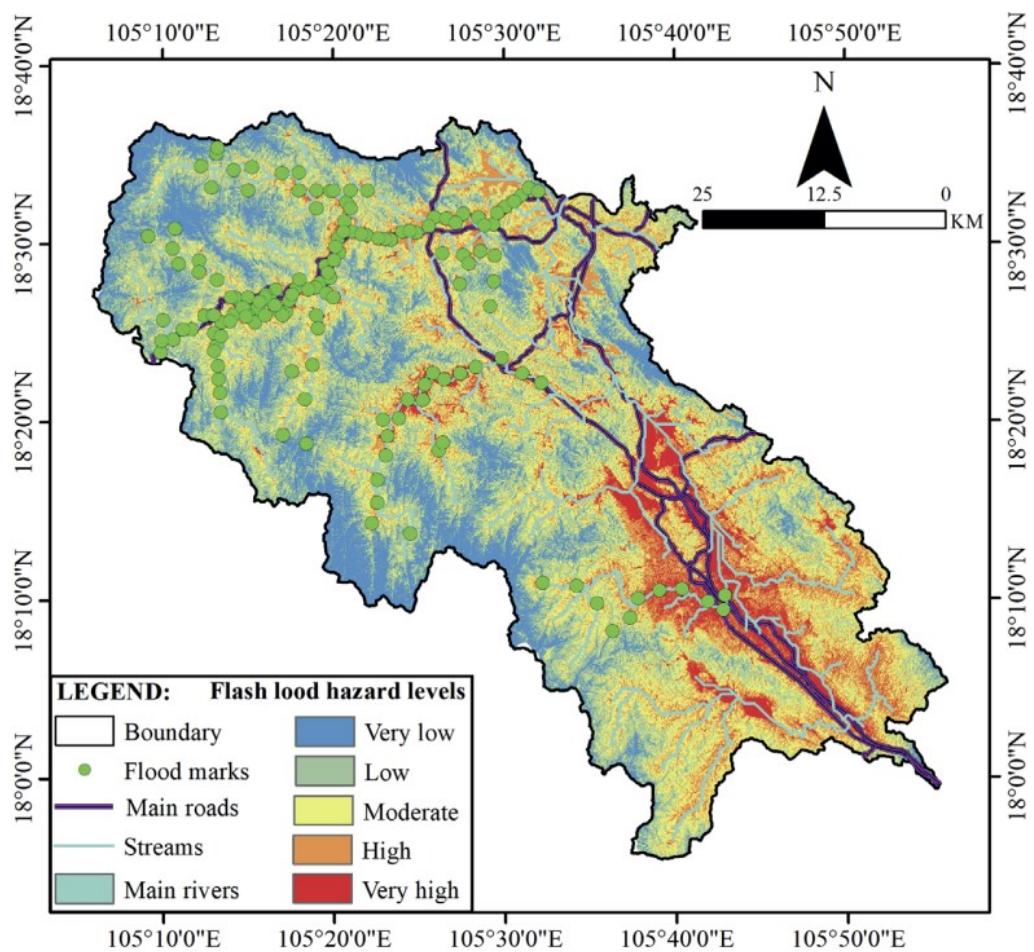


Hình 27. Kết quả xây dựng bản đồ nhạy cảm với lũ quét cho Gilgit-Baltistan

Shawky và cộng sự [25] đã sử dụng phương pháp AHP cho các yếu tố địa không gian với các trọng số cuối được áp dụng bao gồm: lượng mưa 0,31; độ dốc 0,221; mật độ thoát nước 0,158; địa chất 0,107, độ cao so với sông suối 0,074; địa mạo 0,051, hệ số nhám Melton 0,035; độ cong ngang 0,022 và chỉ số công suất dòng chảy là 0,022.



Hình 28. Bản đồ nhạy cảm với lũ quét cho Wadi Kid, Ai Cập theo Shawky

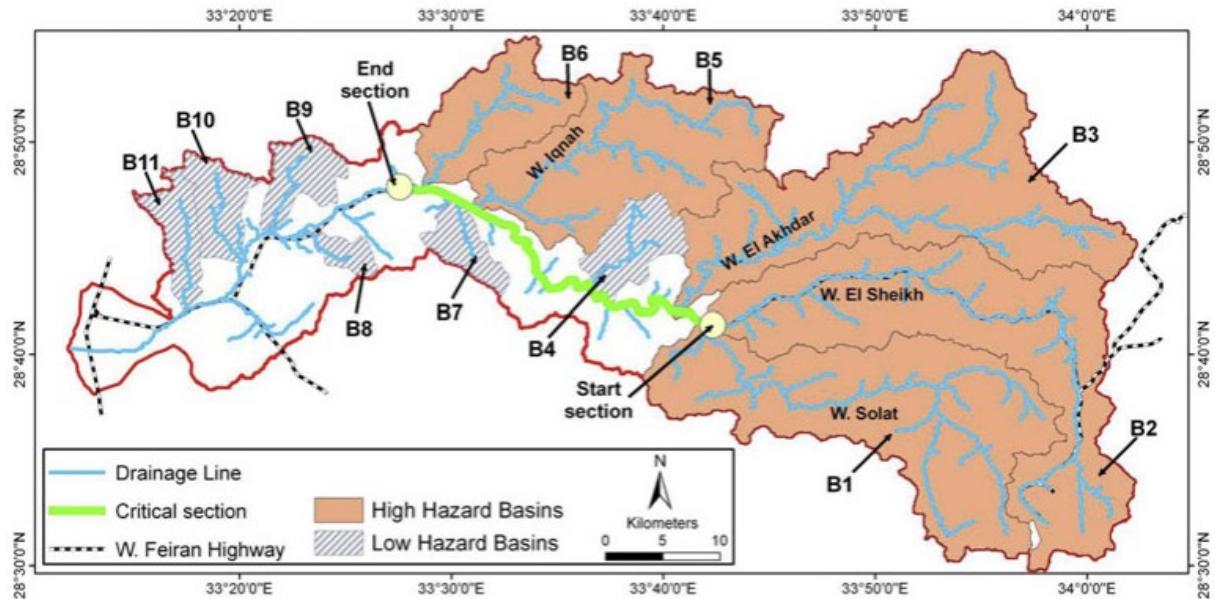


Hình 29. Bản đồ “nguy cơ” lũ quét cho lưu vực sông Ngàn Phô và Ngàn Sâu

Nguyễn Tiến Thành và cộng sự [26] trong đề tài Nghiên cứu, đánh giá rủi ro do lũ quét phục vụ công tác phòng chống và giảm nhẹ thiên tai cho các lưu vực sông miền núi – Áp dụng thí điểm cho lưu vực sông Ngàn Phố - Ngàn Sâu đã sử dụng ảnh landsat 8 kết hợp với phương pháp AHP và các thuật toán GIS để xây dựng bản đồ nguy cơ lũ quét cho khu vực sông Ngàn Phố - Ngàn Sâu. Chỉ số độ ẩm địa hình (TWI), độ cao, độ dốc, hướng địa hình, lượng mưa, lớp phủ đất, chỉ số thảm thực vật khác biệt chuẩn hóa (NDVI), khoảng cách đến sông và đường, và chiều dài dòng chảy đã được sử dụng trong nghiên cứu này để tạo ra cơ sở dữ liệu không gian gồm mười yếu tố thăm dò ảnh hưởng đến sự xuất hiện của lũ quét tại khu vực nghiên cứu. Lượng mưa được sử dụng là lượng mưa năm.

Kết quả đánh giá trọng số theo AHP cho thấy, chỉ số ẩm địa hình, khoảng cách đến sông suối và lượng mưa năm có giá trị hệ số gần bằng nhau (gần bằng 0,14) các chỉ số khác có giá trị thấp hơn đáng kể. Về bản chất, đây là bản đồ nhạy cảm với lũ quét và là bản đồ tinh, không đánh giá được nguy cơ trong điều kiện cụ thể.

Scofield và cộng sự đã sử dụng dữ liệu GEOS (Geostationary Operational Environmental Satellites) để dự báo lũ quét từ những năm 1990s [24]. Vệ tinh GEOS cung cấp sự giám sát liên tục đối với các "tác nhân kích hoạt" khí quyển đối với các điều kiện thời tiết khắc nghiệt như lốc xoáy, lũ quét, mưa đá và bão hàng giờ. Khi các điều kiện này phát triển, vệ tinh GOES có thể theo dõi sự phát triển của bão và theo dõi chuyển động của chúng. Hình ảnh vệ tinh GOES cũng được sử dụng để ước tính lượng mưa trong các cơn mưa để cảnh báo lũ quét cũng như ước tính lượng tuyết rơi và phạm vi phủ tuyết nói chung [25]. Scofield sử dụng dữ liệu IR (độ phân giải 4km) và dữ liệu bốc hơi (độ phân giải 8km) kết hợp với phương pháp “Satellite Forecasting Funnel” để dự báo. Phương pháp này sử dụng các mô hình khái niệm, các sản phẩm độ ẩm và mưa lớn được thu thập từ dữ liệu vệ tinh để dự đoán các điều kiện thời tiết có thể dẫn đến lũ quét. Phương pháp bao gồm việc phân tích các đặc điểm trong dữ liệu vệ tinh và các thông số khí quyển để xác định khả năng xảy ra lũ quét.



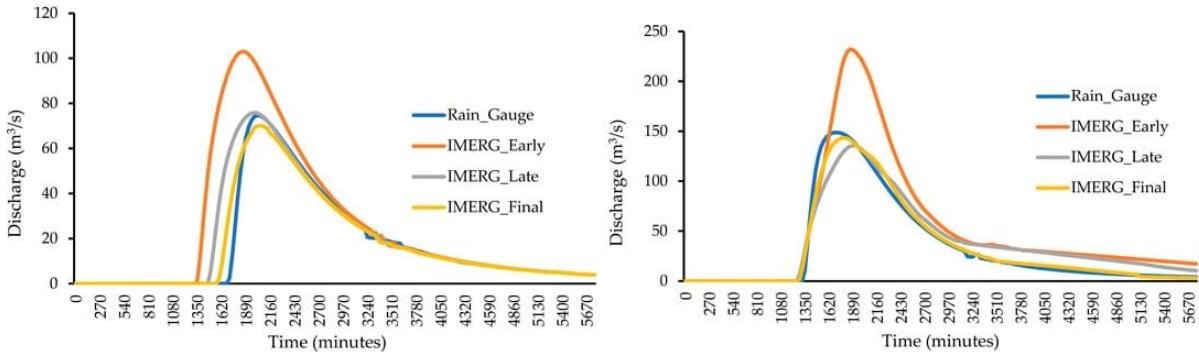
Hình 30. Phân loại nguy cơ lũ quét dọc đường St. Katherine, Ai Cập

Youssef và cộng sự đã sử dụng ảnh SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) ở độ phân giải 90m kết hợp với ảnh Landsat ETM+ ở độ phân giải 30m và dữ liệu địa không gian khác (địa chất và địa hình) để ước tính rủi ro lũ quét dọc theo đường St. Katherine, phía nam Sinai, Ai Cập [26]. 17 tham số tính toán từ các sản phẩm địa không gian được sử dụng để ước tính nguy cơ lũ quét cho 11 tiểu lưu vực. Mỗi tham số được đánh giá và xếp hạng từ 1÷5 cho mức độ rủi ro từ thấp đến cao, sau đó được tổng hợp và chuẩn hóa theo từng khu vực. Kết quả chỉ ra các đoạn đường có rủi ro lũ quét cao tương ứng.

Dữ liệu địa không gian có ý nghĩa quan trọng trong dự báo/cảnh báo lũ quét, ngoài các dữ liệu quan trắc bề mặt như nhiệt độ, độ ẩm hay những ghi nhận biến đổi về màu sắc, địa hình, các dữ liệu khí tượng cũng được sử dụng một cách linh hoạt và mạnh mẽ. Đây là một trong những dữ liệu tiềm năng có thể đánh giá được nguy cơ lũ quét trong điều kiện cụ thể theo thời gian thực bằng các sản phẩm mưa vệ tinh như IMERG, GSMAP...

Dữ liệu khí tượng bao gồm nhiều thông tin liên quan đến thời tiết, chẳng hạn như nhiệt độ, lượng mưa, tốc độ gió và áp suất khí quyển, tất cả đều liên quan đến các vị trí địa lý cụ thể. Dữ liệu này thường được thu thập thông qua các phương pháp như quan sát vệ tinh và các trạm thời tiết mặt đất, khiến nó vốn có bản chất không gian. Dữ liệu khí tượng không chỉ được coi là dữ liệu không gian địa lý do tính chất dựa trên vị trí của nó mà còn đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao hiểu biết của chúng ta về động lực khí hậu và cải thiện khả năng dự báo thời tiết. Dữ liệu khí tượng bao gồm các tính chất của dữ liệu địa không gian như: (1) thành phần không gian; (2) thành phần thời gian; và (3) khả năng tích hợp vào hệ thống thông tin địa lý.

Hamouda và cộng sự đã sử dụng lượng mưa IMERG và CHIRPS để dự báo nguy cơ lũ quét cho khu vực tại UAE [30]. Nghiên cứu đã kết hợp lượng mưa IMERG và CHIRPS để hiệu chỉnh các lượng mưa vệ tinh với trạm quan trắc từ mặt đất, sau đó kết hợp với sử dụng mô hình thủy văn GSSHA (Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis) để mô phỏng lũ. Kết quả mô phỏng trận lũ ngày 09/12/2019–12/01/2020 cho 03 lưu vực sông bao gồm: Wadi Ham, Wadi Taween và Wadi Midaq.



Hình 31. Mô phỏng lũ bằng mô hình thủy văn GSSHA cho các sản phẩm mưa dự báo IMERG cho Wadi Ham (trái) và Wadi Taween (phải)

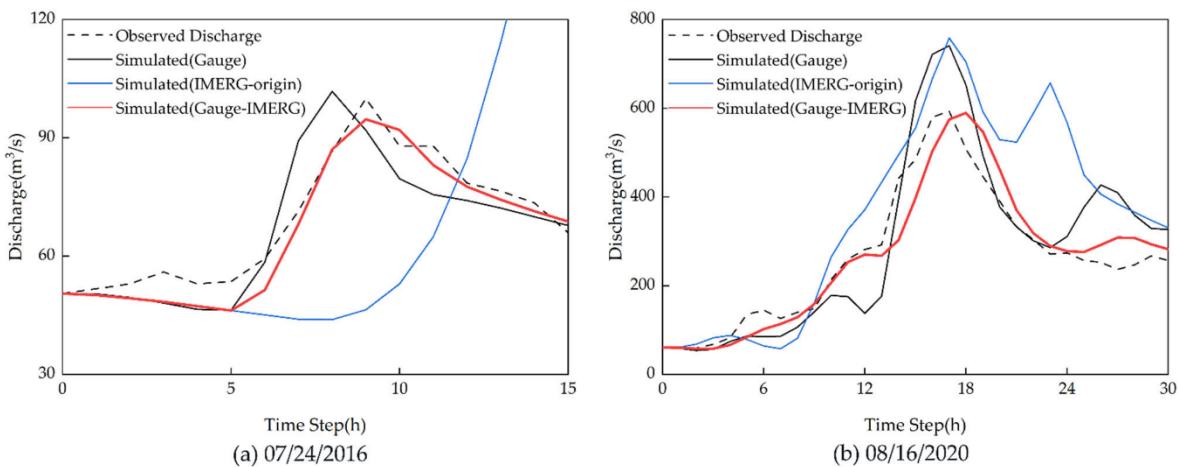
Mặc dù không có quan trắc thực tế để kiểm chứng, nghiên cứu đã giả định dòng chảy được tạo ra bởi lượng mưa thực đo là giá trị dòng chảy thực để so sánh. Kết quả cho thấy dòng sản phẩm IMERG final có độ tương quan chặt chẽ với dòng chảy so với lượng mưa thực đo. Tuy nhiên, các sản phẩm IMERG early lại có thời gian dự báo chiếm ưu thế hơn các sản phẩm còn lại, do đó nó phù hợp với công tác dự báo nguy cơ lũ quét.

Ziv và cộng sự đã sử dụng lượng hơi nước có trong khí quyển có khả năng sinh thủy PWV (Precipitable Water Vapor) của hệ thống định vị vệ tinh toàn cầu GNSS (Ground-Based Global Navigation Satellite System) với 74 trạm hoạt động trên khắp thế giới để dự báo lũ quét cho khu vực Địa Trung Hải [31]. Nghiên cứu sử dụng 9 trạm GNSS khu vực Địa Trung Hải và sử dụng mô hình SVM (Support Vector Machine), RF (Random Forest), MLP (Multilayered Perceptron) để đào tạo và kiểm chứng cho 107 trận lũ quét, kết quả chỉ ra được sự tương quan chặt chẽ giữa lượng PWV từ 2–6 giờ trước khi xảy ra lũ quét là nhân tố quan trọng trong việc dự báo nguy cơ lũ quét.

Meyer và cộng sự đã sử dụng bộ dữ liệu “Radar-Online-Adjustment” của RADOLAN từ cơ quan thời tiết Đức và lựa chọn các sự kiện mưa trên 40mm/h để xem xét, đánh giá các thông số khí quyển nhằm tìm ra đặc điểm của các sự kiện cực đoan gây lũ quét ở Tây Âu từ năm 1981 đến năm 2020 [32]. Nghiên cứu cho thấy độ ẩm trong khí quyển tăng đáng kể và sự gia tăng bất ổn định của khí quyển với sự biến động lớn giữa các năm và không thể xác định được xu hướng của dữ liệu, khẳng định sự tương tác giữa các quá trình liên quan rất phức tạp nên cần có nghiên cứu phân tích chuyên sâu hơn về hình thái mưa.

Lũ quét thường xảy ra ở khu vực miền núi và các khu vực này thường có ít trạm quan trắc được lắp đặt, do đó công tác dự báo hay xác định lũ quét càng trở nên gắt khó khăn. Sapountzis và cộng sự đã sử dụng lượng mưa vệ tinh để phân tích thủy văn lũ quét ở các lưu vực không có trạm quan trắc ở khu vực Địa Trung Hải [33]. Lượng mưa vệ tinh được sử dụng là GPM-IMERG và được hiệu chỉnh với một số trạm quan trắc lân cận. Nghiên cứu chỉ ra rằng lượng mưa GPM-IMERG chưa hiệu chuẩn không thể giải thích được hiện tượng lũ quét trong khu vực và dữ liệu quan trắc mưa chỉ tin cậy khi nằm trong lưu vực xảy ra lũ quét. Điều này cho thấy dữ liệu mưa vệ tinh trong dự báo nguy cơ lũ quét là chưa đủ đảm bảo độ tin cậy nếu không xác định được tương quan chặt chẽ với lượng mưa trạm quan trắc bề mặt (công tác hiệu chỉnh).

Tang và cộng sự cũng đã sử dụng lượng mưa IMERG kết hợp với các trạm mưa quan trắc mặt đất và sử dụng mô hình học sâu (LSTM) để hiệu chỉnh làm đầu vào cho mô phỏng lũ quét khu vực miền núi ở Tây Nam, Trung Quốc [34]. Kết quả cho thấy việc áp dụng dữ liệu IMERG gốc được sử dụng trực tiếp trong mô hình thủy văn HEC-HMS có độ chính xác thấp hơn nhiều so với dữ liệu đo đạc và dữ liệu hợp nhất. Mô phỏng sử dụng lượng mưa hợp nhất trong HEC-HMS cho hiệu suất tốt hơn nhiều so với dữ liệu đo đạc. NSE trung bình cải thiện từ 0,84 lên 0,87 để hiệu chuẩn và từ 0,80 lên 0,84 để xác minh, trong khi NSE thấp hơn cải thiện từ 0,81 lên 0,84 để hiệu chuẩn và từ 0,73 lên 0,86 để xác minh, điều này cho thấy độ chính xác và độ mạnh đều được cải thiện đáng kể. Điều này cho thấy việc sử dụng các trạm quan trắc thưa thớt ở khu vực miền núi hay sử dụng các dữ liệu vệ tinh chưa được hiệu chỉnh có hiệu suất kém hơn nhiều so với sự kết hợp làm tăng cường chất lượng dữ liệu.



Hình 32. Kết quả mô phỏng lũ tại lưu vực Tho Tây, Tây Nam, Trung Quốc

Các dữ liệu IMERG thường được sử dụng do ưu thế về độ phân giải thời gian (hàng giờ), điều này cung cấp một nguồn dữ liệu đáng giá trong mô phỏng lũ quét trong khi các dữ liệu ngày và dữ liệu tháng không đủ chi tiết để mô phỏng, gây ra sự bình quân hóa về lưu lượng đáng kể và làm giảm giá trị đỉnh lũ trong mô phỏng.

Chancay và cộng sự đã sử dụng dữ liệu mưa vệ tinh bao gồm IMERG-E/L, GSMAP và PERSIANN có sự hiệu chỉnh với mưa trạm để dự báo lũ quét cho lưu vực Andean ở Amazon [35]. Mô hình thủy văn GR4H được sử dụng để tính toán xác định nguy cơ lũ quét từ sản phẩm mưa hiệu chỉnh cho 3 lưu vực sông Napo, Jatunyacu, và Tena. Mô hình đã cải thiện khả năng phát hiện từ 43% đến 88%, giảm lỗi ước tính từ 72% đến 93%, so với các sản phẩm lượng mưa dựa trên vệ tinh ban đầu.

Bên cạnh dữ liệu IMERG, các dữ liệu GSMAP [36] [37], CMORPH [38], TRMM [39]... cũng được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu dự báo nguy cơ lũ quét. Các nghiên cứu này thường sử dụng kết quả hiệu chỉnh lượng mưa vệ tinh so với các trạm quan trắc mặt đất làm đầu vào cho mô phỏng dòng chảy để xác định nguy cơ lũ quét. Điều này cho thấy dù đã hiệu chỉnh với mưa trạm nhưng độ tin cậy theo không gian vẫn còn hạn chế. Ngoài ra, phản ứng thủy văn của lưu vực cho ra kết quả tốt hơn việc xác định ngưỡng mưa do có xét đến tương tác của mưa với bề mặt lưu vực.

1.2.2. Tổng hợp các dữ liệu địa không gian trong nghiên cứu lũ quét

Dữ liệu địa không gian đã và đang khẳng định vai trò không thể thiếu trong nghiên cứu, giám sát và cảnh báo sớm lũ quét. Với sự phát triển vượt bậc của công nghệ vệ tinh và kỹ thuật viễn thám, chúng ta đã có thể tiếp cận nguồn dữ liệu phong phú và đa dạng từ nhiều nền tảng khác nhau, mở ra cách tiếp cận mới trong nghiên cứu thiên tai này.

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu ngày càng phức tạp, việc theo dõi và dự báo lũ quét đòi hỏi một cách tiếp cận tổng hợp, trong đó dữ liệu viễn thám đóng vai trò nền tảng. Các công nghệ viễn thám quang học và SAR cho phép chúng ta có cái nhìn toàn diện về điều kiện bề mặt lưu vực, từ thay đổi lớp phủ đến biến động địa hình. Đặc biệt, công nghệ SAR với khả năng hoạt động trong mọi điều kiện thời tiết đã mở ra bước đột phá trong việc giám sát lũ quét thời gian thực, khắc phục hạn chế lớn nhất của viễn thám quang học truyền thống.

Tuy có rất nhiều loại dữ liệu địa không gian có thể được khai thác, sử dụng trong nghiên cứu về thiên tai, phần lớn các nghiên cứu chỉ tập trung vào một nhóm các dữ liệu chính sử dụng làm các yếu tố đầu vào trong việc dự đoán nguy cơ thiên tai hay phân vùng thiên tai. Các yếu tố đầu vào (input factors) được sử dụng trong các nghiên cứu rất đa dạng, bao gồm các đặc trưng địa lý, thủy văn, khí tượng, và nhân tạo.

Để đánh giá bao quát hơn về các phương pháp/mô hình được sử dụng trong lũ quét và dữ liệu sử dụng, nghiên cứu đã phân tích, đánh giá gần 500 nghiên cứu trên toàn thế giới dựa trên cơ sở dữ liệu CrossRef với các từ khóa bao gồm: flash flood; susceptibility; hazard; machine learning; deep learning. Dưới đây là danh sách tổng hợp các yếu tố phổ biến được sử dụng trong các nghiên cứu được rà soát, đánh giá:

Bảng 15. Tổng hợp các dữ liệu phổ biến sử dụng trong nghiên cứu lũ quét

Dữ liệu	Mô tả	Loại dữ liệu
Slope (Độ dốc)	Góc nghiêng của bờ mặt địa hình, ảnh hưởng đến tốc độ dòng chảy.	Địa hình (Topographic)
Elevation (Độ cao)	Độ cao so với mực nước biển, ảnh hưởng đến phân bố mưa và dòng chảy.	Địa hình
Aspect (Hướng dốc)	Hướng của độ dốc, ảnh hưởng đến tiếp xúc ánh sáng và độ ẩm đất.	Địa hình
Distance to River (Khoảng cách đến sông)	Khoảng cách từ điểm nghiên cứu đến sông gần nhất, liên quan đến nguy cơ lũ.	Thủy văn (Hydrological)
Topographic Wetness Index (TWI)	Chỉ số độ ẩm địa hình, biểu thị khả năng tích tụ nước.	Thủy văn
Stream Power Index (SPI)	Chỉ số sức mạnh dòng chảy, liên quan đến năng lượng dòng chảy.	Thủy văn
Topographic Position Index (TPI)	Chỉ số vị trí địa hình, xác định vị trí tương đối (đỉnh, sườn, thung lũng).	Địa hình
Rainfall (Lượng mưa)	Lượng mưa tích lũy hoặc cường độ mưa, yếu tố chính gây lũ quét.	Khí tượng (Meteorological)
Land Use/Land Cover (LULC)	Loại sử dụng đất (nông nghiệp, đô thị, rừng), ảnh hưởng đến khả năng thấm nước.	Nhân tạo (Anthropogenic)
Soil Type (Loại đất)	Đặc tính đất (đất sét, cát, v.v.), ảnh hưởng đến khả năng thấm và dòng chảy.	Địa chất (Geological)
Lithology (Thạch học)	Lớp bề mặt, ảnh hưởng đến khả năng thấm nước và xói mòn.	Địa chất
Stream Density (Mật độ sông)	Mật độ mạng lưới sông trong khu vực, liên quan đến thoát nước.	Thủy văn
Curvature (Độ cong)	Độ cong của địa hình (lồi, lõm), ảnh hưởng đến dòng chảy và tích tụ nước.	Địa hình
Profile Curvature	Độ cong theo hướng dốc, ảnh hưởng đến tốc độ dòng chảy.	Địa hình
Plan Curvature	Độ cong ngang, ảnh hưởng đến hướng dòng chảy.	Địa hình
Distance to Road (Khoảng cách đến đường)	Khoảng cách đến đường, liên quan đến tác động nhân tạo và khả năng tiếp cận.	Nhân tạo
Population Density (Mật độ dân số)	Mật độ dân cư, ảnh hưởng đến mức độ tổn thương và thiệt hại.	Nhân tạo
River Length (Chiều dài sông)	Tổng chiều dài sông trong lưu vực, liên quan đến dòng chảy.	Thủy văn
Basin Area (Diện tích lưu vực)	Diện tích lưu vực, ảnh hưởng đến lượng nước tập trung.	Thủy văn
Soil Moisture (Độ ẩm đất)	Độ ẩm của đất, ảnh hưởng đến khả năng thấm nước và dòng chảy bề mặt.	Thủy văn
Gully Density (Mật độ rãnh xói)	Mật độ các rãnh xói mòn, liên quan đến nguy cơ lũ quét.	Địa hình
Normalized Difference Built-up Index (NDBI)	Chỉ số xây dựng, biểu thị mức độ đô thị hóa.	Nhân tạo
Temperature (Nhiệt độ)	Nhiệt độ môi trường, ảnh hưởng đến bốc hơi và độ ẩm đất.	Khí tượng

Dữ liệu	Mô tả	Loại dữ liệu
Vegetation Cover (Độ phủ thực vật)	Mức độ che phủ thực vật, ảnh hưởng đến xói mòn và thấm nước.	Nhân tạo
Precipitation Estimates (Uớc lượng mưa)	Dữ liệu mưa từ vệ tinh (IMERG, PERSIANN), dùng khi thiếu trạm đo.	Khí tượng
Discharge (Lưu lượng)	Lưu lượng nước trong sông, yếu tố trực tiếp liên quan đến lũ.	Thủy văn
Water Level (Mực nước)	Mực nước sông hoặc hồ, biểu thị tình trạng thủy văn.	Thủy văn

Các yếu tố độ dốc (slope), độ cao (elevation), khoảng cách đến sông (distance to river), lượng mưa (rainfall) và sử dụng đất (LULC) là những yếu tố được sử dụng phổ biến nhất, xuất hiện trong hầu hết các nghiên cứu, do chúng có tác động trực tiếp đến dòng chảy bề mặt và nguy cơ lũ quét.

Dữ liệu khí tượng (như lượng mưa) và địa hình (như độ dốc, độ cao) đóng vai trò quan trọng nhất trong việc dự báo lũ quét. Sử dụng đất (LULC) và Loại đất (Soil Type) ngày càng được chú trọng, đặc biệt trong các nghiên cứu về độ nhạy lũ, vì chúng ảnh hưởng đến khả năng thấm nước và xói mòn.

Dữ liệu từ vệ tinh (IMERG, PERSIANN, Sentinel) ngày càng được sử dụng phổ biến để bổ sung cho các khu vực thiếu trạm đo (ungauged basins). Một số nghiên cứu gần đây đã bắt đầu sử dụng các yếu tố nhân tạo như mật độ dân số và khoảng cách đến đường để đánh giá mức độ tổn thương (vulnerability). Mặc dù vậy, dữ liệu dự báo chưa được hiệu chỉnh có thể gây ảnh hưởng lớn đến kết quả của mô hình.

Các yếu tố ảnh hưởng đến lũ quét không hoạt động độc lập mà tương tác với nhau theo những cách phức tạp và thường phi tuyến tính. Ví dụ, tác động của độ dốc đến dòng chảy có thể được khuếch đại hoặc giảm bớt tùy thuộc vào loại đất và độ phủ thực vật. Một sườn dốc có độ dốc lớn nhưng được bao phủ bởi rừng dày có thể có nguy cơ lũ quét thấp hơn một sườn dốc thoải nhưng bị trơ trụi. Tương tự, cùng một lượng mưa có thể gây ra tác động hoàn toàn khác nhau tùy thuộc vào độ ẩm đất ban đầu, mùa trong năm và đặc tính địa hình.

Hiệu ứng ngưỡng là một đặc điểm quan trọng khác trong mối quan hệ giữa các yếu tố và nguy cơ lũ quét. Nhiều yếu tố có các điểm ngưỡng mà khi vượt qua, nguy cơ lũ quét tăng đột ngột. Chẳng hạn, khi độ ẩm đất đạt đến điểm bão hòa, khả năng thấm giảm đột ngột và dòng chảy bề mặt tăng mạnh. Tương tự, khi cường độ mưa vượt quá khả năng thấm của đất, hiện tượng Hortonian runoff bắt đầu xảy ra, dẫn đến hình thành dòng chảy bề mặt ngay cả trên đất chưa bão hòa.

Sự phức tạp và phi tuyến tính của các mối quan hệ này giải thích tại sao các phương pháp trí tuệ nhân tạo, đặc biệt là machine learning và deep learning, trở nên quan trọng trong nghiên cứu lũ quét. Các thuật toán AI có khả năng học hỏi và nhận diện các mẫu

phức tạp từ dữ liệu, bao gồm cả những tương tác phi tuyến tính và hiệu ứng ngưỡng mà các phương pháp thống kê truyền thống khó có thể nắm bắt được.

Tuy nhiên, việc ứng dụng AI cũng đặt ra yêu cầu cao về chất lượng và tính đại diện của dữ liệu. Mỗi yếu tố cần được đo lường và biểu diễn một cách chính xác, với độ phân giải không gian và thời gian phù hợp. Việc tích hợp các nguồn dữ liệu khác nhau, từ ảnh vệ tinh, dữ liệu khí tượng, thông tin địa chất đến các điều tra thực địa, đòi hỏi các kỹ thuật xử lý dữ liệu tinh vi và hiểu biết sâu sắc về ý nghĩa vật lý của từng yếu tố.

Các yếu tố đầu vào phía trên có thể được phân thành 4 nhóm chính: (1) Nhóm yếu tố địa hình; (2) nhóm yếu tố khí tượng thủy văn; (3) nhóm yếu tố thực phủ và đất; và (4) nhóm yếu tố về hạ tầng.

1. Nhóm yếu tố địa hình

a. Đặc điểm địa hình cơ bản

Độ dốc (Slope) đóng vai trò quyết định trong việc kiểm soát tốc độ dòng chảy bề mặt và khả năng thấm của nước mưa. Khi độ dốc tăng, vận tốc dòng chảy bề mặt tăng theo cấp số nhân, làm giảm thời gian tập trung nước và tăng nguy cơ hình thành lũ quét. Đặc biệt, trên các sườn dốc có độ dốc lớn hơn 15 độ, khả năng thấm của nước vào đất giảm đáng kể do thời gian tiếp xúc ngắn, dẫn đến tăng lượng nước chảy tràn. Điều này giải thích tại sao các khu vực miền núi thường có nguy cơ lũ quét cao hơn so với vùng đồng bằng.

Độ cao (Elevation) ảnh hưởng trực tiếp đến các yếu tố khí hậu như lượng mưa, nhiệt độ và độ ẩm. Ở độ cao lớn, lượng mưa thường tăng do hiệu ứng orographic, tạo điều kiện thuận lợi cho việc hình thành các trận mưa lớn. Đồng thời, sự chênh lệch độ cao trong lưu vực tạo ra gradien thể năng lớn, thúc đẩy quá trình tập trung nước từ thượng nguồn xuống hạ nguồn với tốc độ cao. Các nghiên cứu cho thấy lưu vực có độ chênh cao lớn thường có thời gian tập trung ngắn và nguy cơ lũ quét cao.

Hướng dốc (Aspect) ảnh hưởng đến lượng bức xạ mặt trời nhận được, từ đó tác động đến quá trình bốc hơi, độ ẩm đất và thâm thực vật. Các sườn dốc hướng nam thường nhận nhiều ánh sáng mặt trời hơn, dẫn đến tốc độ bốc hơi cao và độ ẩm đất thấp hơn. Điều này có thể làm giảm khả năng thấm ban đầu của đất, nhưng cũng có thể tạo ra lớp đất khô cứng ở bề mặt, cản trở quá trình thấm khi có mưa lớn. Ngược lại, các sườn dốc hướng bắc thường duy trì độ ẩm cao hơn nhưng cũng có thể nhanh chóng bão hòa khi có mưa.

b. Các chỉ số địa hình phức hợp

Topographic Wetness Index (TWI) là một chỉ số quan trọng phản ánh khả năng tích tụ nước trong địa hình, được tính toán dựa trên tỷ lệ giữa diện tích đóng góp dòng chảy

và độ dốc tại mỗi điểm. Giá trị TWI cao cho thấy khu vực có khả năng tích tụ nước lớn, thường xuất hiện tại các thung lũng, đáy sông hoặc các vùng trũng. Những khu vực này không chỉ dễ bị ngập lụt mà còn có thể trở thành điểm khởi phát cho các dòng lũ quét khi nước tích tụ vượt quá ngưỡng chịu đựng của địa hình.

Stream Power Index (SPI) đánh giá tiềm năng xói mòn của dòng chảy tại mỗi vị trí trong lưu vực. Chỉ số này kết hợp thông tin về diện tích đóng góp dòng chảy và độ dốc để xác định những khu vực có khả năng hình thành dòng chảy mạnh. Các vùng có SPI cao thường tương ứng với các kênh dòng chảy tự nhiên hoặc những khu vực có tiềm năng hình thành rãnh xói mòn. Trong bối cảnh lũ quét, những khu vực này không chỉ dễ bị xói mòn mà còn có thể trở thành con đường chính cho dòng lũ di chuyển với tốc độ cao.

Topographic Position Index (TPI) phân loại các hình thái địa hình dựa trên vị trí tương đối của mỗi điểm so với môi trường xung quanh. Các vùng có TPI âm thường là thung lũng hoặc vùng trũng, nơi nước dễ tập trung và có nguy cơ lũ quét cao. Ngược lại, các vùng có TPI dương là đỉnh núi hoặc sườn núi nổi, ít có nguy cơ bị ngập nhưng có thể là nguồn cung cấp nước cho các khu vực hạ lưu. Sự phân bố TPI trong lưu vực giúp xác định các vùng nguy hiểm và an toàn, hỗ trợ việc quy hoạch sử dụng đất và xây dựng kế hoạch ứng phó thiên tai.

c. Đặc tính đường cong địa hình

Độ cong địa hình (Curvature) mô tả hình dạng bề mặt đất và có tác động trực tiếp đến quá trình dòng chảy. Profile Curvature phản ánh độ cong theo hướng dòng chảy, ảnh hưởng đến tốc độ gia tốc hoặc giảm tốc của nước. Các khu vực có profile curvature âm (lõm) có xu hướng tăng tốc dòng chảy, trong khi các khu vực có giá trị dương (lồi) có xu hướng làm chậm dòng chảy. Plan Curvature mô tả độ cong vuông góc với hướng dòng chảy, quyết định xu hướng hội tụ hoặc phân tán của dòng nước. Các vùng có plan curvature âm là nơi dòng chảy hội tụ, tạo điều kiện cho việc tích tụ nước và hình thành lũ quét.

2. Nhóm yếu tố khí tượng thủy văn

a. Các yếu tố mưa và khí hậu

Lượng mưa (Rainfall) và các ước lượng mưa (Precipitation Estimates) là những yếu tố trực tiếp và quan trọng nhất trong việc hình thành lũ quét. Cường độ mưa, thời gian kéo dài và phân bố không gian của mưa quyết định lượng nước cần được xử lý bởi hệ thống thoát nước tự nhiên và nhân tạo. Các trận mưa có cường độ cao trong thời gian ngắn đặc biệt nguy hiểm vì chúng có thể vượt quá khả năng thẩm và thoát nước của hệ thống, dẫn đến hình thành dòng chảy bè mặt lớn. Tần suất và chu kỳ của các trận mưa

cực đoan cũng ảnh hưởng đến mức độ chuẩn bị và khả năng thích ứng của hệ sinh thái và cộng đồng địa phương.

Nhiệt độ (Temperature) tác động đến quá trình lũ quét thông qua nhiều cơ chế khác nhau. Nhiệt độ cao tăng tốc độ bốc hơi, có thể làm khô đất và giảm khả năng thấm ban đầu. Tuy nhiên, nhiệt độ cao cũng tăng khả năng giữ hơi nước của không khí, có thể dẫn đến các trận mưa lớn hơn khi có điều kiện thuận lợi. Trong mùa đông, chu trình đóng băng - tan băng có thể tạo ra lớp băng cản trở thấm nước, làm tăng dòng chảy bờ mặt. Sự biến đổi nhiệt độ theo mùa cũng ảnh hưởng đến chu trình thực vật và khả năng giữ nước của đất.

b. Đặc tính lưu vực và dòng chảy

Diện tích lưu vực (Basin Area) và chiều dài sông (River Length) là những thông số cơ bản quyết định quy mô và đặc tính của hệ thống thuỷ văn. Lưu vực lớn có khả năng tập trung lượng nước mưa khổng lồ, nhưng cũng có thời gian tập trung dài hơn, cho phép có thêm thời gian cảnh báo. Ngược lại, lưu vực nhỏ có thời gian phản ứng nhanh, có thể hình thành lũ quét đột ngột và khó dự báo. Chiều dài sông chính ảnh hưởng đến thời gian truyền lũ và khả năng điều tiết của hệ thống sông. Các lưu vực có tỷ lệ chiều dài trên chiều rộng lớn thường có đặc tính lũ khác biệt so với các lưu vực có hình dạng tròn hoặc vuông.

Mật độ sông (Stream Density) phản ánh mức độ phát triển của mạng lưới thoát nước tự nhiên trong lưu vực. Mật độ sông cao cho thấy địa hình bị chia cắt mạnh và có hệ thống thoát nước phát triển, có thể giúp thoát nước nhanh nhưng cũng có thể tạo ra nhiều dòng chảy hội tụ, tăng nguy cơ lũ quét tại các điểm giao nhau. Mật độ sông còn liên quan đến các đặc tính địa chất và khí hậu của khu vực, phản ánh lịch sử phát triển địa mạo và khả năng chống xói mòn của đất đá.

Khoảng cách đến sông (Distance to River) là yếu tố quan trọng trong việc đánh giá nguy cơ lũ quét tại từng vị trí cụ thể. Các khu vực gần sông có nguy cơ cao bị ảnh hưởng trực tiếp bởi nước lũ khi mực nước sông dâng cao hoặc khi có lũ quét từ thượng nguồn đổ về. Đồng thời, khoảng cách này cũng ảnh hưởng đến thời gian di chuyển của nước từ một điểm bất kỳ đến hệ thống thoát nước chính, quyết định mức độ tích tụ nước tại chỗ.

3. Nhóm yếu tố thực phủ và đất

a. Thảm thực vật và sử dụng đất

Độ phủ thực vật (Vegetation Cover) đóng vai trò như một lá chắn tự nhiên chống lại lũ quét thông qua nhiều cơ chế bảo vệ. Thảm thực vật không chỉ làm chậm tốc độ dòng chảy bờ mặt mà còn tăng khả năng thấm của đất thông qua hệ thống rễ phát triển. Các khu rừng với độ phủ cao có khả năng chặn giữ một lượng đáng kể nước mưa trên tán lá,

giảm lượng nước trực tiếp rơi xuống đất. Hơn nữa, quá trình thoát hơi nước từ thực vật giúp duy trì chu trình nước địa phương và có thể làm giảm cường độ mưa trong khu vực. Sự suy giảm độ phủ thực vật do phá rừng, cháy rừng hoặc hoạt động phát triển đô thị là một trong những nguyên nhân chính làm tăng nguy cơ lũ quét.

Sử dụng đất và lớp phủ (Land Use/Land Cover - LULC) phản ánh mức độ can thiệp của con người vào môi trường tự nhiên và có tác động trực tiếp đến đặc tính thuỷ văn của lưu vực. Các khu vực đô thị với tỷ lệ bê mặt không thấm nước cao như đường asphalt, mái nhà bê tông làm tăng đáng kể dòng chảy bê mặt và giảm thời gian tập trung nước. Normalized Difference Built-up Index (NDBI) định lượng mức độ đô thị hóa và tương quan mạnh với nguy cơ lũ quét. Ngược lại, các vùng nông nghiệp, đặc biệt là những khu vực có hệ thống canh tác bền vững, có thể duy trì khả năng thấm tốt và giảm nguy cơ lũ. Tuy nhiên, các hoạt động nông nghiệp không bền vững như việc loại bỏ hàng rào cây, san phẳng ruộng bậc thang có thể làm tăng tốc độ xói mòn và dòng chảy bê mặt.

b. Đặc tính đất và địa chất

Loại đất (Soil Type) quyết định khả năng thấm nước và khả năng giữ nước của lớp bê mặt. Đất sét có khả năng thấm chậm nhưng giữ nước tốt, trong khi đất cát có khả năng thấm nhanh nhưng giữ nước kém. Độ ẩm đất (Soil Moisture) ban đầu ảnh hưởng mạnh đến khả năng tiếp nhận nước mưa mới. Đất đã bão hòa nước sẽ không thể hấp thụ thêm nước mưa, dẫn đến tăng dòng chảy bê mặt ngay cả khi cường độ mưa không cao. Các đặc tính vật lý khác của đất như độ xốp, cấu trúc đất, hàm lượng chất hữu cơ cũng ảnh hưởng đến quá trình thấm và dòng chảy.

Thạch học (Lithology) - thành phần đá gốc - ảnh hưởng đến địa hình, loại đất hình thành và đặc tính thuỷ văn ngầm. Các loại đá có tính thấm cao như đá vôi, đá sa thạch có thể tạo ra hệ thống thoát nước ngầm phát triển, giảm dòng chảy bê mặt và nguy cơ lũ quét. Ngược lại, các loại đá kết tinh cứng như granite, basalt có tính thấm thấp, thúc đẩy dòng chảy bê mặt. Cấu trúc địa chất với các đứt gãy, khe nứt cũng có thể tạo ra các con đường thoát nước ưu tiên hoặc ngược lại, cản trở dòng chảy ngầm.

4. Nhóm yếu tố hạ tầng

a. Ảnh hưởng của hoạt động con người

Mật độ dân số (Population Density) không chỉ phản ánh mức độ tập trung con người mà còn gián tiếp chỉ ra mức độ phát triển hạ tầng và thay đổi môi trường. Các khu vực có mật độ dân số cao thường đi kèm với việc xây dựng nhiều công trình, làm thay đổi đặc tính tự nhiên của lưu vực. Điều này không chỉ làm tăng nguy cơ xảy ra lũ quét mà còn làm tăng mức độ tổn thương khi thiên tai xảy ra. Áp lực dân số cũng dẫn đến việc

khai thác tài nguyên quá mức, phá rừng và xây dựng trên các vùng đất có nguy cơ cao, làm gia tăng cả khả năng xảy ra và tác động của lũ quét.

Khoảng cách đến đường (Distance to Road) phản ánh mức độ tiếp cận và phát triển của khu vực. Các con đường không chỉ là yếu tố hạ tầng mà còn có thể thay đổi đáng kể mô hình dòng chảy tự nhiên. Đường giao thông có thể hoạt động như các kênh dẫn nước khi được thiết kế phù hợp, nhưng cũng có thể trở thành rào cản cản trở dòng chảy tự nhiên khi thiết kế không phù hợp. Các công trình cầu, công thoát nước dọc theo đường có thể bị tắc nghẽn trong điều kiện lũ lớn, tạo ra hiệu ứng đập ngăn và làm tăng mực nước thượng lưu.

b. Tác động tích lũy và xói mòn

Mật độ rãnh xói (Gully Density) là chỉ số quan trọng phản ánh mức độ suy thoái đất và nguy cơ lũ quét trong khu vực. Các rãnh xói không chỉ là kết quả của các sự kiện lũ quét trước đây mà còn có thể trở thành con đường ưu tiên cho các dòng lũ tương lai. Sự hiện diện của nhiều rãnh xói cho thấy đất đá trong khu vực dễ bị xói mòn và hệ thống thoát nước tự nhiên đang trong tình trạng mất cân bằng. Các rãnh xói cũng có thể nối kết với nhau, tạo thành mạng lưới thoát nước mới và thay đổi mô hình dòng chảy ban đầu của lưu vực.

1.3. Cấu trúc dữ liệu viễn thám được sử dụng trong phân vùng lũ quét

Dữ liệu viễn thám được tổ chức thành ba dạng cấu trúc chính: raster, vector và point cloud, mỗi loại mang đặc điểm riêng biệt phù hợp với các khía cạnh khác nhau của phân vùng lũ quét.

Dữ liệu raster, với cấu trúc ma trận (hàng và cột), là nền tảng cho việc phân tích không gian liên tục. Mỗi pixel trong dữ liệu raster chứa giá trị số đại diện cho một đặc trưng địa lý, như độ cao, độ dốc hoặc mức độ che phủ thực vật. Trong phân vùng lũ quét, dữ liệu raster đa kênh phẳng (3D: x, y, bands) từ các vệ tinh như Landsat 8 hoặc Sentinel-2 cung cấp thông tin về các đặc tính bề mặt, chẳng hạn như chỉ số thực vật (NDVI) hoặc chỉ số độ ẩm (NDWI), giúp xác định các khu vực dễ bị ngập lụt. Cấu trúc này cho phép tích hợp nhiều lớp dữ liệu, từ độ cao địa hình đến phân loại đất, tạo điều kiện cho các mô hình phân tích không gian phức tạp.

Ngược lại, dữ liệu vector, bao gồm điểm, đường và vùng, phù hợp để mô tả các đối tượng địa lý rời rạc. Trong quản lý lũ quét, các điểm vector có thể đại diện cho các trạm đo thủy văn, cung cấp dữ liệu về lưu lượng nước hoặc mực nước. Các đường vector biểu thị mạng lưới sông suối, hỗ trợ mô phỏng dòng chảy bề mặt, trong khi các vùng vector xác định ranh giới lưu vực hoặc khu vực ngập lụt tiềm năng. Dữ liệu vector, với khả năng gắn thuộc tính chi tiết, cho phép phân tích định tính và định lượng, chẳng hạn như tính toán diện tích vùng nguy cơ hoặc đánh giá tác động của lũ quét lên các khu dân cư.

Dữ liệu point cloud, thường thu thập từ LiDAR, mang lại cái nhìn chi tiết về cấu trúc địa hình 3D. Mỗi điểm trong dữ liệu point cloud chứa tọa độ (X, Y, Z) và các thuộc tính như cường độ phản xạ hoặc phân loại (đất, thực vật, công trình). Trong phân vùng lũ quét, point cloud được sử dụng để tạo các mô hình địa hình số (DTM) và mô hình bề mặt số (DSM), giúp xác định các khu vực có độ dốc cao hoặc các rào cản tự nhiên đối với dòng chảy. Việc phân loại điểm LiDAR thành các nhóm như đất trống hoặc thực vật hỗ trợ xây dựng các mô hình thủy văn chính xác hơn, đặc biệt tại các khu vực miền núi phức tạp.

1.3.1. Đặc tính kỹ thuật của dữ liệu viễn thám

Độ phân giải không gian của dữ liệu viễn thám ảnh hưởng trực tiếp đến mức độ chi tiết trong phân vùng lũ quét. Dữ liệu độ phân giải cao (0.3-4m) từ các vệ tinh như WorldView hoặc Pleiades cho phép phân tích chi tiết các đặc điểm địa hình, như khe hẹp hoặc khu vực sạt lở đất, vốn là những yếu tố kích hoạt lũ quét. Tuy nhiên, dữ liệu này thường có chi phí cao và phạm vi phủ sóng hạn chế. Dữ liệu độ phân giải trung bình (10-30m) từ Landsat hoặc Sentinel-2 phù hợp hơn cho các nghiên cứu vùng rộng, cung cấp thông tin về đặc tính bề mặt và xu hướng sử dụng đất. Dữ liệu độ phân giải thấp (>100m) như MODIS hữu ích trong việc theo dõi các hiện tượng khí tượng quy mô lớn, nhưng ít giá trị trong phân vùng lũ quét do thiếu chi tiết địa hình.

Độ phân giải thời gian, hay chu kỳ lặp lại của vệ tinh, đóng vai trò quan trọng trong việc giám sát và dự báo lũ quét. Dữ liệu chuỗi thời gian (time series) dạng 4D (t, x, y, bands) cho phép theo dõi các thay đổi về độ ẩm đất, che phủ thực vật hoặc lượng mưa theo thời gian. Ví dụ, Sentinel-2 với chu kỳ 5 ngày cung cấp dữ liệu thường xuyên để phát hiện các thay đổi bề mặt trước và sau sự kiện lũ. Kết hợp với dữ liệu khí tượng, chuỗi thời gian viễn thám hỗ trợ xây dựng các mô hình dự báo sớm, đặc biệt tại các khu vực có nguy cơ lũ quét cao.

Độ phân giải phổ quyết định khả năng phân biệt các đặc trưng bề mặt. Dữ liệu đa phổ (multispectral) với 3-13 kênh, như từ Sentinel-2, cho phép tính toán các chỉ số như NDVI hoặc NDWI, hỗ trợ xác định các khu vực dễ bị ngập hoặc có nguy cơ sạt lở. Dữ liệu siêu phổ (hyperspectral) với hàng trăm kênh liên tục cung cấp thông tin chi tiết hơn về thành phần vật liệu bề mặt, nhưng ứng dụng trong lũ quét còn hạn chế do chi phí và yêu cầu xử lý phức tạp. Dữ liệu SAR, với khả năng xuyên mây, đặc biệt hữu ích trong điều kiện thời tiết xấu, cung cấp thông tin về độ ẩm đất hoặc thay đổi địa hình sau lũ.

1.3.2. Định dạng và chuẩn dữ liệu

Định dạng dữ liệu viễn thám ảnh hưởng đến khả năng lưu trữ, xử lý và tích hợp. GeoTIFF là định dạng phổ biến cho dữ liệu raster, hỗ trợ tham chiếu không gian và tích hợp nhiều kênh phổ. Trong phân vùng lũ quét, GeoTIFF được sử dụng để lưu trữ các

lớp dữ liệu raster như độ cao, độ dốc hoặc chỉ số thực vật, cho phép xử lý nhanh chóng trong các phần mềm GIS như QGIS hoặc ArcGIS. HDF và NetCDF, với khả năng lưu trữ dữ liệu đa chiều, phù hợp cho chuỗi thời gian hoặc dữ liệu khí tượng, hỗ trợ phân tích các mô hình thủy văn dài hạn.

Dữ liệu vector thường được lưu dưới dạng Shapefile hoặc GeoJSON, cho phép gắn thuộc tính chi tiết và tích hợp với các mô hình thủy văn. Shapefile phổ biến trong các ứng dụng GIS, nhưng GeoJSON ngày càng được ưa chuộng nhờ tính tương thích với các nền tảng web. Dữ liệu point cloud LiDAR thường sử dụng định dạng LAS hoặc LAZ, với LAZ có ưu điểm nén dữ liệu hiệu quả, giảm dung lượng lưu trữ mà vẫn giữ nguyên thông tin tọa độ và thuộc tính. Các định dạng này hỗ trợ tạo DTM/DSM, nền tảng cho các mô hình phân vùng lũ quét.

Metadata đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo chất lượng và khả năng sử dụng của dữ liệu viễn thám. Thông tin không gian, như hệ tọa độ hoặc tham chiếu địa lý, đảm bảo dữ liệu được căn chỉnh chính xác. Thông tin cảm biến, bao gồm loại vệ tinh, thời gian thu thập và tham số cảm biến, giúp đánh giá độ tin cậy của dữ liệu. Các chỉ số chất lượng, như tỷ lệ che phủ mây hoặc lỗi định vị, hỗ trợ lựa chọn dữ liệu phù hợp cho phân tích lũ quét, đặc biệt trong điều kiện thời tiết bất lợi.

1.3.3. Cấu trúc dữ liệu theo loại cảm biến

Dữ liệu quang học, với các kênh phô như Blue, Green, Red, NIR và SWIR, cung cấp thông tin về đặc tính bề mặt. Cấu trúc đa kênh và độ sâu bit (8-bit hoặc 16-bit) ảnh hưởng đến độ chính xác và dung lượng lưu trữ. Trong phân vùng lũ quét, dữ liệu quang học từ Sentinel-2 hoặc Landsat 8 được sử dụng để tính toán các chỉ số như NDVI, hỗ trợ xác định các khu vực có nguy cơ sạt lở do mất che phủ thực vật. Độ sâu 16-bit mang lại độ chính xác cao hơn, đặc biệt khi phân tích các thay đổi tinh vi về độ ẩm đất.

Dữ liệu SAR, với cấu trúc phức hợp (amplitude và phase), cung cấp thông tin về địa hình và độ ẩm trong mọi điều kiện thời tiết. Cấu trúc phân cực (đơn, kép hoặc tứ phân cực) cho phép phân tích chi tiết các đặc trưng bề mặt, như độ nhám hoặc cấu trúc thực vật. Trong lũ quét, SAR từ Sentinel-1 hỗ trợ phát hiện các thay đổi địa hình sau lũ hoặc đánh giá độ ẩm đất, giúp xác định các khu vực dễ bị ngập. Khả năng xuyên mây của SAR đặc biệt quan trọng tại Việt Nam, nơi mùa mưa thường kèm theo mây dày.

Dữ liệu LiDAR, với cấu trúc điểm 3D, cung cấp thông tin chi tiết về địa hình và các đối tượng bề mặt. Mỗi điểm chứa tọa độ, cường độ phản xạ, số lần phản xạ và phân loại, hỗ trợ tạo DTM, DSM hoặc mô hình độ cao tán cây (CHM). Trong phân vùng lũ quét, LiDAR giúp xác định các khu vực có độ dốc cao hoặc khe hẹp, những yếu tố kích hoạt lũ quét. Sản phẩm phái sinh như DTM là nền tảng cho các mô hình thủy văn, cải thiện độ chính xác của dự báo dòng chảy.

CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG BẢN ĐỒ THẨM PHỦ TỪ ẢNH VIỄN THÁM

Dữ liệu thẩm phủ là dữ liệu quan trọng mô tả bề mặt và có tác động đến dòng chảy trong thủy văn. Một số phân loại thẩm phủ chính thường được sử dụng như của Esri và Jaxa do các đơn vị này liên tục phân loại thẩm phủ hàng năm.

Hệ thống phân loại của Esri bao gồm 9 lớp chính như Mặt nước, Rừng cây, Thực vật ngập nước, Cây trồng, Khu vực xây dựng, Đất trống, Tuyết/Băng, Mây che phủ, và Đồng cỏ/Thảo nguyên. Hệ thống này có xu hướng tập trung vào đặc điểm tự nhiên và nhân tạo, với sự nhấn mạnh vào các khu vực ngập nước và thực vật (như rừng ngập mặn, ruộng lúa), phù hợp với phân tích đa dạng sinh học và quản lý tài nguyên ở các khu vực nhiệt đới như Việt Nam.

Hệ thống của JAXA bao gồm 12 lớp như Nước, Khu vực đô thị, Ruộng lúa, Cây trồng khác, Cỏ/cây bụi, Cây gỗ/vườn cây, Đất trống, Rừng thường xanh, Rừng rụng lá, Rừng trồng, Rừng ngập mặn, và Nuôi trồng thủy sản. Hệ thống này chi tiết hơn với sự phân biệt rõ ràng giữa các loại rừng (thường xanh, rụng lá, trồng) và bổ sung lớp Nuôi trồng thủy sản, phản ánh sự quan tâm đến các hoạt động kinh tế ven biển.

Mặc dù các hệ thống phân loại này là hiện hữu, việc phân loại lại thẩm phủ cho một khu vực cụ thể là cần thiết khi mục tiêu chính là tối ưu hóa phân tích thủy văn, đặc biệt trong bối cảnh quản lý tài nguyên nước và dự đoán dòng chảy. Thẩm phủ bề mặt ảnh hưởng trực tiếp đến các quá trình thủy văn như thẩm nước, dòng chảy bề mặt, và bốc hơi, do đó một hệ thống phân loại không phù hợp hoặc thiếu chi tiết có thể dẫn đến sai lệch trong các mô hình thủy văn. Tại một khu vực cụ thể, các đặc điểm tự nhiên và nhân tạo như rừng, đồng cỏ, đất canh tác, hoặc khu vực xây dựng có thể thay đổi theo thời gian do tác động của con người hoặc biến đổi khí hậu, khiến các phân loại có sẵn như của Esri hoặc JAXA không còn phản ánh chính xác thực tế địa phương.

Mục tiêu của việc phân loại lại thẩm phủ để phù hợp với thủy văn là xây dựng một cơ sở dữ liệu chi tiết, phản ánh chính xác điều kiện thực địa, từ đó cải thiện độ tin cậy của các mô hình tính toán dòng chảy như phương pháp hệ số đường cong (curve number) của NRCS. Một phân loại mới có thể tập trung vào các yếu tố như mật độ thực vật, mức độ thẩm nước của đất, và cách quản lý đất (chẳng hạn canh tác theo đường đồng mức hay chăn thả), vốn ảnh hưởng lớn đến lượng nước thẩm vào lòng đất hoặc chảy tràn ra sông ngòi. Ngoài ra, việc này cho phép đánh giá tác động của các thay đổi sử dụng đất, như chuyển từ rừng sang khu vực đô thị hóa, lên tài nguyên nước, đặc biệt trong mùa mưa hoặc lũ lụt. Tại khu vực cụ thể, phân loại lại cũng giúp xác định các vùng dễ bị ngập úng hoặc khô hạn, từ đó hỗ trợ lập kế hoạch thủy lợi và bảo vệ môi trường một cách hiệu quả hơn. Vì vậy, quá trình này không chỉ là cập nhật dữ liệu mà còn là bước

quan trọng để đảm bảo các quyết định quản lý dựa trên cơ sở khoa học, phù hợp với nhu cầu thực tiễn của khu vực nghiên cứu.

Nghiên cứu này tập trung vào lũ quét, điều này đồng nghĩa với việc đi tìm những đặc điểm về sử dụng đất có liên quan đến yếu tố dòng chảy. Nghiên cứu lũ quét đòi hỏi một cách tiếp cận chi tiết về thảm phủ để đánh giá chính xác tiềm năng dòng chảy và ngập úng, đặc biệt trong các khu vực dễ bị tổn thương. Hệ thống phân loại thảm phủ của NRCS, được trình bày trong Chương 8 và Chương 9 của National Engineering Handbook (NEH) [92], cung cấp một khuôn khổ khoa học để phân tích các yếu tố thủy văn như thẩm nước, dòng chảy bì mặt, và khả năng giữ nước. Theo NRCS, thảm phủ được chia thành các lớp sử dụng đất và xử lý đất (land use and treatment classes), bao gồm đất canh tác, đồng cỏ, rừng, và khu vực đô thị, với các điều kiện thủy văn được đánh giá qua các cấp độ như tốt, trung bình, và kém. Đối với lũ quét, việc áp dụng phân loại này giúp xác định các khu vực có hệ số đường cong runoff (CN) cao, vốn phản ánh khả năng dòng chảy nhanh và mạnh, đặc biệt trên đất trống, đất canh tác không che phủ, hoặc khu vực đô thị hóa với nhiều bề mặt không thẩm nước. Ví dụ, đất canh tác để trống (fallow) hoặc cây hàng (row crop) trong điều kiện kém có thể đạt CN từ 76 đến 89 tùy theo nhóm đất, cho thấy nguy cơ lũ quét cao do giảm thẩm nước.

Phân loại theo NRCS cũng nhấn mạnh vai trò của các biện pháp xử lý đất như trồng cây theo đường đồng mực (contouring) hoặc làm bậc thang (terracing), vốn làm chậm dòng chảy và tăng khả năng thẩm, từ đó giảm rủi ro lũ quét. Trong khu vực nghiên cứu, việc kết hợp dữ liệu thực địa về mật độ thực vật, lượng rác hữu cơ, và mức độ chăn thả với bảng CN (như Bảng 9-1)[92] cho phép xây dựng mô hình thủy văn chính xác hơn. Đặc biệt, đối với các khu vực rừng hoặc đồng cỏ, NRCS phân loại theo điều kiện thủy văn (poor, fair, good) dựa trên tỷ lệ che phủ và quản lý, giúp đánh giá tác động của quản lý đất đến dòng chảy cực đoan. Ngoài ra, việc áp dụng phương trình tính CN tổng hợp (equation 9-1 hoặc 9-2) từ Chương 9 [92] cho các khu vực đô thị hoặc hỗn hợp sử dụng đất giúp điều chỉnh rủi ro lũ quét khi có sự thay đổi trong tỷ lệ bề mặt không thẩm. Vì vậy, việc sử dụng hệ thống NRCS không chỉ hỗ trợ phân tích hiện trạng mà còn định hướng chiến lược quản lý thảm phủ để giảm thiểu tác động của lũ quét, đặc biệt trong các khu vực có địa hình dốc hoặc mưa lớn như ở Việt Nam.

Nghiên cứu này thể hiện một nỗ lực hệ thống hóa các đặc điểm tự nhiên và nhân tạo của khu vực Mù Cang Chải nhằm phục vụ mục tiêu thủy văn, đặc biệt trong quản lý dòng chảy và lũ quét. Nhóm 1 (Mặt nước: Hồ, sông, đầm lầy) đại diện cho các khu vực có tiềm năng dòng chảy bì mặt rất thấp do tính chất tự nhiên thẩm nước, với hệ số đường cong runoff (CN) được NRCS xác định là 98, phản ánh khả năng giữ nước tối đa. Nhóm 2 (Rừng rậm: Rừng dày, điều kiện Good) mô tả các khu vực thực vật dày đặc, có khả

năng thấm nước cao nhò lốp thực bì và rác hữu cơ, với CN dao động từ 30-55 tùy thuộc vào nhóm đất, giúp giảm đáng kể nguy cơ lũ quét.

Nhóm 3 (Đất trống: Fallow hoặc đất không có thực vật) chỉ ra các khu vực nông nghiệp để trống hoặc không có che phủ, với CN cao từ 67-89 tùy nhóm đất, cho thấy nguy cơ dòng chảy bề mặt lớn do thiếu thực vật giữ nước. Nhóm 4 (Khu xây dựng: Bè mặt không thấm nước) bao gồm các khu vực như nhà cửa và đường sá, có CN là 98, dẫn đến dòng chảy nhanh và tăng rủi ro lũ quét do không có khả năng thấm. Nhóm 5 (Rừng thưa: Rừng thưa, điều kiện Fair/Poor) đại diện cho vùng thực vật thưa thớt, với CN trung bình từ 55-79, phản ánh giảm khả năng thấm so với rừng rậm và tiềm năng dòng chảy cao hơn.

Nhóm 6 (Ruộng bậc thang: Đất canh tác với hệ thống terracing) nhấn mạnh kỹ thuật canh tác tạo bậc thang, giúp lưu trữ nước và giảm tốc độ dòng chảy, với CN từ 60-80 tùy điều kiện quản lý, mang lại hiệu quả trong kiểm soát lũ. Nhóm 7 (Đất trồng lúa: Đất canh tác ngập nước) bao gồm ruộng lúa, nơi dòng chảy phụ thuộc vào quản lý nước, với CN từ 70-85 tùy mức độ ngập, đòi hỏi đánh giá kỹ lưỡng về hệ thống thủy lợi. Logic của phân loại này nằm ở việc kết hợp các yếu tố tự nhiên (thảm thực vật, nước) và nhân tạo (quản lý đất, xây dựng), phù hợp với phương pháp NRCS, giúp phân tích chi tiết tác động của từng loại thảm phủ lên dòng chảy, hỗ trợ lập kế hoạch giảm thiểu lũ quét tại các khu vực như Mù Cang Chải. Chi tiết được thể hiện trong bảng sau đây:

Bảng 16. Nhóm phân loại thảm phủ sử dụng trong nghiên cứu

Lớp	Mô tả	Điều kiện thủy văn	Ảnh hưởng đến dòng chảy
1	Mặt nước (Hồ, sông, đầm lầy)	Bè mặt nước	Tạo dòng chảy trực tiếp, không thấm thấu
2	Rừng rậm (Rừng dày, điều kiện Good)	Good	Tăng thấm thấu, giảm dòng chảy bề mặt
3	Đất trống (Fallow hoặc đất không có thực vật)	Poor	Tăng dòng chảy bề mặt, giảm thấm thấu
4	Khu xây dựng (Bè mặt không thấm nước)	Impervious	Tạo dòng chảy nhanh, không thấm thấu
5	Rừng thưa (Rừng thưa, điều kiện Fair/Poor)	Fair/Poor	Thấm thấu trung bình, dòng chảy trung bình
6	Ruộng bậc thang (Đất canh tác với hệ thống terracing)	Contoured/terraced	Giảm dòng chảy nhờ lưu trữ nước trong ruộng
7	Đất trồng lúa (Đất canh tác ngập nước)	Wet meadow	Giữ nước lâu dài, dòng chảy chậm

2.1. Chuẩn bị dữ liệu

Nghiên cứu lựa chọn 16 chỉ số đầu vào (NDVI, EVI, GNDVI, GRVI, NDWI1, NDWI2, GSI, NDBI, NDWI, BSI, Slope, Red, Green, Blue, VV, VH) để phân loại thảm phủ theo 7 nhóm (Mặt nước, Rừng rậm, Đất trống, Khu xây dựng, Rừng thưa, Ruộng

bậc thang, Đất trồng lúa) nhằm tận dụng tối đa thông tin từ dữ liệu đa phổ và radar để phân biệt các đặc trưng quang phổ, cấu trúc, và địa hình của từng loại thảm phủ. Trước tiên, các chỉ số thực vật như NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index), và GRVI (Green-Red Vegetation Index) được chọn để đánh giá mật độ thực vật và sức khỏe cây trồng, rất hữu ích trong việc phân biệt Rừng rậm (nhóm 2) và Rừng thưa (nhóm 5) dựa trên sự khác biệt về độ che phủ và sinh khối. NDVI và EVI, với khả năng giảm nhiễu từ khí quyển và đất nền, đặc biệt hiệu quả trong việc xác định các khu vực có thực vật dày đặc (CN thấp, 30-55) so với khu vực thưa thớt (CN 55-79). GNDVI và GRVI bổ sung thông tin về phản xạ ở kênh xanh, hỗ trợ phân loại Đất trồng lúa (nhóm 7) nhờ khả năng phát hiện sự thay đổi quang phổ trong môi trường ngập nước.

Các chỉ số liên quan đến nước như NDWI1, NDWI2, NDWI (Normalized Difference Water Index), và GSI (Green-SWIR Index) đóng vai trò quan trọng trong việc nhận diện Nhóm 1 (Mặt nước) và Nhóm 7 (Đất trồng lúa). NDWI, sử dụng các dải phổ hồng ngoại gần (NIR) và xanh lá (Green), giúp phát hiện các khu vực có nước nhờ đặc tính hấp thụ mạnh ở dải NIR của nước. NDWI1 và NDWI2, với sự kết hợp các dải hồng ngoại ngắn (SWIR), tăng cường khả năng phân biệt giữa mặt nước tự nhiên và đất ngập nước canh tác, hỗ trợ xác định các khu vực có CN cao (98) như mặt nước hoặc CN dao động (70-85) như ruộng lúa. GSI bổ sung thông tin về độ ẩm đất, giúp phân loại chính xác hơn giữa đất trồng (nhóm 3) và đất canh tác ngập nước. Trong khi đó, NDBI (Normalized Difference Built-up Index) và BSI (Bare Soil Index) được sử dụng để nhận diện Nhóm 4 (Khu xây dựng) và Nhóm 3 (Đất trồng). NDBI, dựa trên sự khác biệt giữa hồng ngoại ngắn và hồng ngoại gần, nổi bật trong việc phát hiện bề mặt không thảm nước như nhà cửa (CN 98), trong khi BSI giúp xác định đất trồng hoặc đất đê hoang (CN 67-89) nhờ phản xạ đặc trưng của đất tràn ở dải SWIR.

Các dải quang phổ cơ bản Red, Green, Blue cung cấp thông tin trực tiếp về màu sắc và phản xạ bề mặt, hỗ trợ phân loại trực quan và bổ sung cho các chỉ số tổng hợp, đặc biệt trong việc phân biệt Đất trồng và Khu xây dựng. Dữ liệu radar Sentinel-1 (VV và VH) mang lại giá trị lớn trong việc phân loại các khu vực có cấu trúc bề mặt phức tạp, chẳng hạn như Ruộng bậc thang (nhóm 6). Độ phân cực VV và VH phản ánh độ nhám bề mặt và cấu trúc thực vật, giúp phát hiện các hệ thống terracing (CN 60-80) nhờ sự khác biệt trong tín hiệu tán xạ giữa đất canh tác có cấu trúc và đất trồng. Cuối cùng, Slope (độ dốc) là yếu tố địa hình quan trọng, ảnh hưởng trực tiếp đến dòng chảy bề mặt và khả năng thảm nước, đặc biệt trong các nhóm như Ruộng bậc thang và Rừng rậm, nơi địa hình dốc có thể làm tăng nguy cơ lũ quét nếu không được quản lý tốt.

Bảng 17. Mô tả các tham số đầu vào trong phân loại thảm phủ

T T	Tham số	Mô tả	Ý nghĩa	Lớp tác động chính
1	NDVI	Chỉ số chênh lệch thực vật chuẩn hóa (NIR - Red)/(NIR + Red)	Đánh giá mật độ và sức khỏe thực vật dựa trên phản xạ hồng ngoại gần (NIR) và đỏ (Red), rất hữu ích trong việc phân biệt Rừng rậm và Rừng thưa dựa trên sự khác biệt về độ che phủ và sinh khối.	Rừng rậm (2), Rừng thưa (5)
2	EVI	Chỉ số thực vật cải tiến $(2.5*(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + 6*\text{Red} - 7.5*\text{Blue} + 1))$	Cải thiện NDVI, giảm nhiễu khí quyển và đất nền, đặc biệt hiệu quả trong việc xác định các khu vực có thực vật dày đặc so với khu vực thưa thớt.	Rừng rậm (2), Rừng thưa (5)
3	GNDV I	Chỉ số chênh lệch thực vật xanh (NIR - Green)/(NIR + Green)	Đánh giá sức khỏe thực vật qua phản xạ kẽnh xanh, hỗ trợ phân loại Đất trồng lúa nhờ khả năng phát hiện sự thay đổi quang phổ trong môi trường ngập nước.	Rừng rậm (2), Đất trồng lúa (7)
4	GRVI	Chỉ số thực vật xanh-đỏ (Green - Red)/(Green + Red)	Phân biệt thực vật qua sự chênh lệch giữa kẽnh xanh và đỏ, hỗ trợ phát hiện Đất trồng nhờ phản xạ đặc trưng của đất không che phủ.	Rừng thưa (5), Đất trồng (3)
5	NDWI 1	Chỉ số nước (Green - NIR)/(Green + NIR)	Phát hiện nước qua sự hấp thụ mạnh ở dải NIR, giúp nhận diện Mặt nước và Đất trồng lúa nhờ đặc tính quang phổ của nước bề mặt.	Mặt nước (1), Đất trồng lúa (7)
6	NDWI 2	Chỉ số nước cải tiến (Green - SWIR)/(Green + SWIR)	Tăng cường phát hiện nước qua dải hồng ngoại ngắn (SWIR), giảm nhiễu từ thực vật, hỗ trợ phân biệt giữa mặt nước tự nhiên và đất ngập nước canh tác.	Mặt nước (1), Đất trồng lúa (7)
7	GSI	Chỉ số xanh-SWIR (Green - SWIR)/(Green + SWIR)	Đánh giá độ ẩm đất và nước trên bề mặt, hỗ trợ phân loại Đất trồng lúa và Đất trồng nhờ khả năng phát hiện sự thay đổi độ ẩm.	Đất trồng lúa (7), Đất trồng (3)
8	NDBI	Chỉ số xây dựng (SWIR - NIR)/(SWIR + NIR)	Phát hiện khu vực xây dựng qua phản xạ SWIR cao, nổi bật trong việc nhận diện Khu xây dựng nhờ đặc trưng bề mặt không thấm nước.	Khu xây dựng (4)
9	NDWI	Chỉ số nước tổng quát (NIR - SWIR)/(NIR + SWIR)	Nhận diện nước và vùng ngập qua sự chênh lệch NIR-SWIR, ứng dụng rộng rãi trong phân tích thủy văn cho Mặt nước và Đất trồng lúa.	Mặt nước (1), Đất trồng lúa (7)
10	BSI	Chỉ số đất tràn $((\text{SWIR} + \text{Red}) - (\text{NIR} + \text{Blue})) / ((\text{SWIR} + \text{Red}) + (\text{NIR} + \text{Blue}))$	Phát hiện đất tràn qua phản xạ đặc trưng của đất ở dải SWIR, hỗ trợ phân loại Đất trồng nhờ khả năng nhận diện đất không che phủ.	Đất trồng (3)
11	Slope	Độ dốc địa hình (tính bằng độ hoặc phần trăm)	Đánh giá độ nghiêng của bề mặt, ảnh hưởng trực tiếp đến dòng chảy và khả năng thấm nước, quan trọng trong phân loại Ruộng bậc thang và Rừng rậm.	Ruộng bậc thang (6), Rừng rậm (2)
12	Red	Dải đỏ từ dữ liệu đa phô	Phản xạ ánh sáng đỏ, hỗ trợ phân biệt bề mặt như Đất trồng và Khu xây dựng, cung cấp cơ sở cho các chỉ số tổng hợp khác.	Đất trồng (3), Khu xây dựng (4)
13	Green	Dải xanh từ dữ liệu đa phô	Phản xạ ánh sáng xanh, hỗ trợ phát hiện nước và thực vật, đặc biệt hiệu quả trong nhận diện Mặt nước và Đất trồng lúa.	Mặt nước (1), Đất trồng lúa (7)
14	Blue	Dải xanh lam từ dữ liệu đa phô	Phản xạ ánh sáng xanh lam, hỗ trợ phân biệt đất và nước, giảm nhiễu khí quyển trong phân loại Đất trồng và Mặt nước.	Đất trồng (3), Mặt nước (1)

T T	Tham số	Mô tả	Ý nghĩa	Lớp tác động chính
15	VV	Độ phân cực thẳng đứng (Vertical-Vertical) từ radar Sentinel-1	Phản ánh độ nhám bề mặt và cấu trúc thực vật, hiệu quả trong phân loại Ruộng bậc thang nhờ tín hiệu tán xạ đặc trưng.	Ruộng bậc thang (6), Đất trồng (3)
16	VH	Độ phân cực chéo (Vertical-Horizontal) từ radar Sentinel-1	Phân tích cấu trúc thực vật và bề mặt phức tạp, nhạy với sinh khối và hỗ trợ phân loại Rừng rậm và Ruộng bậc thang.	Rừng rậm (2), Ruộng bậc thang (6)

2.2. Xây dựng mô hình phân loại thảm phủ

2.2.1. Lựa chọn mô hình phân loại

Trong lĩnh vực phân loại thảm phủ từ ảnh viễn thám, có nhiều phương pháp tiếp cận khác nhau có thể được áp dụng. Các phương pháp truyền thống bao gồm phân loại pixel dựa trên ngưỡng phỏ, phương pháp Maximum Likelihood Classification (MLC), Support Vector Machine (SVM), và Random Forest. Trong những năm gần đây, các phương pháp học sâu (deep learning) đã trở thành xu hướng chủ đạo, với các mô hình như Convolutional Neural Networks (CNN), Recurrent Neural Networks (RNN), và các kiến trúc lai ghép phức tạp hơn.

Trong lĩnh vực GIS và viễn thám, các chuyên gia đã không ngừng tìm kiếm những phương pháp phân loại hiệu quả nhất để xử lý tính phức tạp đa chiều của dữ liệu ảnh vệ tinh. Từ những phương pháp truyền thống dựa trên thống kê đến các kỹ thuật máy học hiện đại, mỗi phương pháp đều có những ưu điểm và hạn chế riêng. Tuy nhiên, sự xuất hiện của học sâu (deep learning) nói chung và mạng nơ-ron tích chập (CNN) nói riêng đã mở ra một kỷ nguyên mới trong việc xử lý và phân tích dữ liệu viễn thám, đặc biệt là trong bài toán phân loại thảm phủ.

Lịch sử phát triển của các phương pháp phân loại thảm phủ từ dữ liệu viễn thám có thể được chia thành ba giai đoạn chính, mỗi giai đoạn phản ánh sự tiến bộ về mặt lý thuyết và công nghệ. Giai đoạn đầu tiên là các phương pháp thống kê truyền thống, bao gồm phân loại theo ngưỡng phỏ (spectral threshold classification), phân loại khả năng cực đại (Maximum Likelihood Classification - MLC), và phân loại khoảng cách tối thiểu (Minimum Distance Classification). Những phương pháp này dựa trên giả định cơ bản rằng các lớp thảm phủ khác nhau sẽ có đặc trưng phỏ riêng biệt và có thể được phân tách thông qua các phép toán thống kê đơn giản.

Giai đoạn thứ hai đánh dấu sự xuất hiện của các kỹ thuật máy học truyền thống như Support Vector Machine (SVM), Random Forest (RF), và k-Nearest Neighbors (k-NN). Những phương pháp này đã cải thiện đáng kể khả năng xử lý dữ liệu phi tuyến và có thể kết hợp nhiều loại đặc trưng khác nhau, từ đặc trưng phỏ đến các chỉ số thực vật như NDVI, SAVI. Tuy nhiên, hiệu suất của những phương pháp này phụ thuộc rất nhiều vào

chất lượng của quá trình thiết kế và trích xuất đặc trưng, đòi hỏi kiến thức chuyên môn sâu về lĩnh vực viễn thám.

Giai đoạn thứ ba, hiện tại, chứng kiến sự bùng nổ của các phương pháp học sâu, với CNN đứng đầu như một trong những kiến trúc hiệu quả nhất cho bài toán phân loại ảnh. Bên cạnh CNN, còn có các kiến trúc khác như Recurrent Neural Networks (RNN) được sử dụng cho dữ liệu chuỗi thời gian, Long Short-Term Memory (LSTM) cho việc phân tích xu hướng biến đổi thảm phủ theo thời gian, và các mô hình lai ghép như CNN-RNN, Transformer-based models. Mỗi kiến trúc này đều có những ưu điểm riêng biệt và phù hợp với những loại dữ liệu và bài toán cụ thể.

Mô hình CNN (Convolutional Neural Network) được lựa chọn do khả năng xử lý tự nhiên cấu trúc dữ liệu ảnh viễn thám dạng ma trận nhiều chiều. Dữ liệu viễn thám có cấu trúc ($height \times width \times channels$) phù hợp với kiến trúc CNN, cho phép mô hình xử lý đồng thời thông tin không gian 2D và thông tin phẳng từ các kênh khác nhau. Khác với các thuật toán machine learning truyền thống yêu cầu trích xuất đặc trưng thủ công, CNN có khả năng tự động học các đặc trưng không gian-phẳng phức tạp từ dữ liệu thô, đặc biệt quan trọng khi làm việc với dữ liệu đa phẳng hoặc siêu phẳng có số lượng kênh lớn.

Điểm mạnh cốt lõi của CNN nằm ở khả năng tự động học và trích xuất các đặc trưng không gian ở nhiều cấp độ khác nhau thông qua cơ chế tích chập phân tầng. Trong bối cảnh phân loại thảm phủ viễn thám, điều này có ý nghĩa đặc biệt quan trọng. Các lớp tích chập đầu tiên của CNN có khả năng phát hiện các đặc trưng cấp thấp như cạnh, góc, và kết cấu cục bộ, tương ứng với các yếu tố như đường viền của các khu rừng, mô hình phân bố của cây trồng, hoặc kết cấu bề mặt của các loại đất khác nhau. Khi đi sâu vào các lớp cao hơn, mạng có khả năng tích hợp những đặc trưng cấp thấp này thành các đặc trưng phức tạp hơn, như hình dạng của các khu vực canh tác, mẫu phân bố của thực vật, hay cấu trúc không gian của các khu đô thị.

Khả năng này đặc biệt có giá trị khi xử lý các cảnh quan phức tạp, nơi mà các loại thảm phủ không chỉ được phân biệt bởi đặc trưng phẳng mà còn bởi cấu trúc không gian và mối quan hệ với các đối tượng xung quanh. Ví dụ, để phân biệt giữa rừng tự nhiên và rừng trồng, CNN có thể học được sự khác biệt về mô hình phân bố cây cối, độ đồng nhất của tán lá, hoặc hình dạng của các lô đất, những đặc trưng mà các phương pháp dựa trên phân tích phẳng đơn thuần khó có thể nắm bắt được.

CNN vượt trội trong việc nhận diện các mẫu không gian (spatial patterns) và texture của các lớp thảm phủ khác nhau. Thông qua các lớp convolution với kernel filters, mô hình có thể phát hiện các đặc trưng như biên giới, texture, hình dạng và cấu trúc không gian của từng loại thảm phủ. Điều này đặc biệt quan trọng trong phân loại thảm phủ vì các lớp như rừng, nông nghiệp, đô thị không chỉ khác biệt về đặc tính phẳng mà còn có cấu trúc không gian đặc trưng. Khả năng pooling và hierarchical feature learning cho

phép CNN nắm bắt được cả đặc trưng cục bộ (local features) và đặc trưng toàn cục (global context).

Một trong những đặc tính quan trọng nhất của CNN là tính bất biến đối với các phép biến đổi không gian như tịnh tiến, xoay, và scale thông qua cơ chế chia sẻ trọng số (weight sharing) và pooling. Trong bối cảnh viễn thám, điều này có nghĩa là mô hình có thể nhận dạng cùng một loại thảm phủ bất kể nó xuất hiện ở vị trí nào trong ảnh, có hướng hay kích thước như thế nào. Ví dụ, một khu rừng có thể xuất hiện ở góc trái trên của ảnh này và góc phải dưới của ảnh khác, nhưng CNN vẫn có thể nhận dạng chúng như cùng một lớp thảm phủ.

Khả năng này đặc biệt quan trọng khi xây dựng các mô hình có thể áp dụng trên nhiều khu vực địa lý khác nhau mà không cần training lại từ đầu. Tính tổng quát hóa cao của CNN giúp giảm thiểu sự phụ thuộc vào các đặc trưng cục bộ của từng khu vực, thay vào đó tập trung vào những đặc trưng bản chất của từng loại thảm phủ.

Các phương pháp thống kê truyền thống như Maximum Likelihood Classification dựa trên giả định mạnh mẽ rằng dữ liệu trong mỗi lớp tuân theo phân phối Gaussian đa biến. Trong thực tế, dữ liệu viễn thám hiếm khi thỏa mãn giả định này, đặc biệt khi xử lý các cảnh quan hỗn hợp hoặc các khu vực có sự biến đổi mùa rõ rệt. Điều này dẫn đến việc MLC thường cho kết quả không chính xác khi áp dụng vào dữ liệu thực tế, đặc biệt là ở các vùng chuyển tiếp giữa các loại thảm phủ khác nhau.

Hơn nữa, các phương pháp này chỉ có thể xử lý thông tin phổ và bỏ qua hoàn toàn thông tin không gian quan trọng. Trong khi đó, bối cảnh không gian thường chứa những manh mối quan trọng cho việc phân loại. Ví dụ, một pixel có phản xạ phổ tương tự có thể là cỏ trong công viên hoặc cây trồng trong nông trại, và chỉ thông qua thông tin về các pixel xung quanh mới có thể phân biệt được chính xác.

Mặc dù Support Vector Machine và Random Forest đã cải thiện đáng kể hiệu suất phân loại so với các phương pháp thống kê truyền thống, chúng vẫn gặp phải những hạn chế căn bản. Đầu tiên là sự phụ thuộc nặng nề vào quá trình thiết kế đặc trưng thủ công (hand-crafted features). Hiệu suất của những mô hình này phụ thuộc trực tiếp vào khả năng của người phân tích trong việc xác định và trích xuất những đặc trưng phù hợp. Điều này không chỉ đòi hỏi kiến thức chuyên môn sâu mà còn tốn rất nhiều thời gian và công sức.

Thứ hai, các phương pháp này thường khó xử lý dữ liệu có số chiều lớn. Với dữ liệu siêu phổ có thể lên đến hàng trăm băng, SVM và Random Forest thường yêu cầu các bước tiền xử lý phức tạp như giảm chiều dữ liệu (PCA, ICA) hoặc lựa chọn băng phổ (band selection), có thể dẫn đến mất mát thông tin quan trọng. Hơn nữa, việc kết hợp

thông tin không gian và phổ trong những mô hình này thường được thực hiện một cách thủ công và không tối ưu.

Một hạn chế quan trọng khác của các phương pháp truyền thống là khả năng mở rộng và tự động hóa hạn chế. Khi áp dụng vào các khu vực địa lý mới hoặc loại dữ liệu mới, những phương pháp này thường yêu cầu việc điều chỉnh tham số, thiết kế lại đặc trưng, hoặc thậm chí thay đổi toàn bộ pipeline xử lý. Điều này tạo ra rào cản lớn trong việc triển khai các ứng dụng viễn thám quy mô lớn, nơi mà tính tự động và khả năng tổng quát hóa là yếu tố then chốt.

Dữ liệu ảnh viễn thám có cấu trúc không gian tự nhiên với tính chất địa phương mạnh mẽ - các pixel gần nhau trong không gian thường có mối tương quan cao về mặt thông tin. CNN, với cơ chế receptive field cục bộ và chia sẻ trọng số, được thiết kế đặc biệt để khai thác loại cấu trúc này. Kiến trúc tích chập tự nhiên phù hợp với định lý Tobler đầu tiên của địa lý học: "Mọi thứ đều có liên quan với mọi thứ khác, nhưng những thứ gần nhau có liên quan nhiều hơn những thứ xa nhau."

Hơn nữa, tính chất đa cấp độ của thông tin trong dữ liệu viễn thám - từ kết cấu cục bộ đến cấu trúc cảnh quan rộng lớn - hoàn toàn phù hợp với kiến trúc phân tầng của CNN. Điều này cho phép mô hình học được các biểu diễn phong phú từ mức độ pixel đến mức độ đối tượng và cảnh quan, tạo ra những quyết định phân loại dựa trên nhiều cấp độ thông tin khác nhau.

Trong kỷ nguyên big data của viễn thám, với các vệ tinh như Sentinel-2, Landsat, và MODIS tạo ra hàng terabyte dữ liệu mỗi ngày, khả năng xử lý hiệu quả dữ liệu lớn trở thành yếu tố quyết định. CNN, với khả năng tận dụng GPU computing và các framework tối ưu hóa như TensorFlow, PyTorch, có thể xử lý dữ liệu ở quy mô lớn một cách hiệu quả. Cơ chế batch processing và parallel computing của CNN cho phép xử lý đồng thời nhiều ảnh, giảm đáng kể thời gian tính toán so với các phương pháp truyền thống.

Đặc biệt, với sự phát triển của các kỹ thuật như transfer learning và fine-tuning, CNN có thể được triển khai nhanh chóng cho các khu vực mới mà không cần training từ đầu, đáp ứng nhu cầu giám sát thời gian thực và cập nhật thường xuyên của các ứng dụng viễn thám hiện đại.

Dựa trên phân tích toàn diện về các ưu điểm vượt trội của CNN so với các phương pháp tiếp cận khác, việc lựa chọn kiến trúc này cho bài toán phân loại thảm phủ từ dữ liệu viễn thám được xem là một quyết định có căn cứ khoa học vững chắc. CNN không chỉ đáp ứng được các yêu cầu kỹ thuật cơ bản như độ chính xác cao và khả năng xử lý dữ liệu đa chiều, mà còn mang lại những lợi ích strategic dài hạn như tính tự động hóa cao, khả năng mở rộng, và tiềm năng cải tiến liên tục thông qua các phát triển mới trong lĩnh vực deep learning.

Trong bối cảnh yêu cầu ngày càng cao về độ chính xác, tốc độ xử lý, và khả năng triển khai quy mô lớn của các ứng dụng GIS và viễn thám hiện đại, CNN thể hiện sự cân bằng tối ưu giữa hiệu suất kỹ thuật và tính khả thi trong triển khai thực tế. Quyết định này không chỉ đảm bảo chất lượng kết quả nghiên cứu hiện tại mà còn mở ra khả năng mở rộng và phát triển trong tương lai, phù hợp với xu hướng phát triển của công nghệ viễn thám thế giới.

2.2.2. Xây dựng mô hình phân loại

1. Xây dựng cấu trúc mô hình CNN

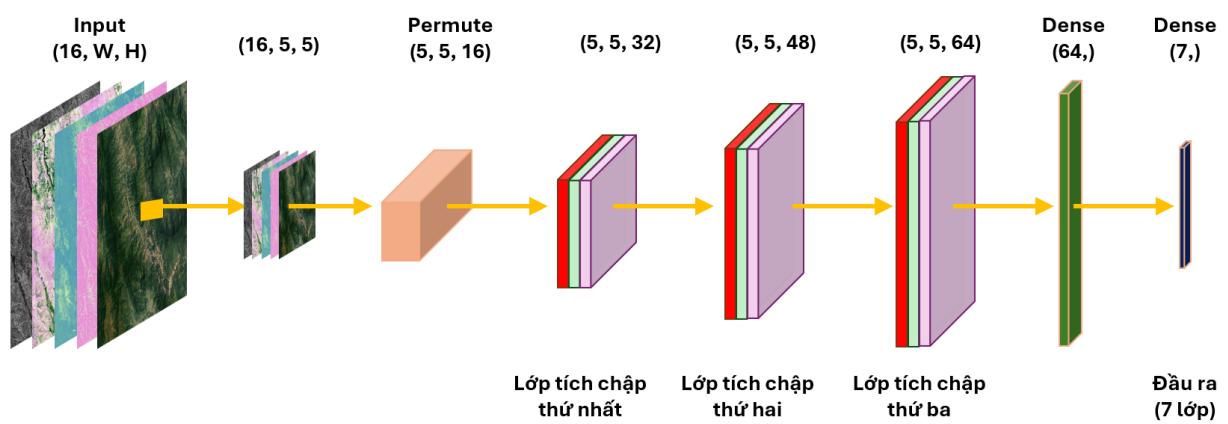
Mô hình CNN được xây dựng bao gồm ba lớp tích chập chính:

Lớp tích chập đầu tiên: Sử dụng kernel 5×5 để nắm bắt các đặc trưng không gian rộng hơn, chẳng hạn như ranh giới giữa rừng và đất trống. Hàm kích hoạt LeakyReLU (negative_slope=0.1) được sử dụng để tránh vấn đề "dying ReLU", trong khi bình thường hóa hàng loạt (batch normalization) giúp ổn định quá trình huấn luyện.

Lớp tích chập giãn nở: Áp dụng dilation rate 2×2 để mở rộng trường tiếp nhận mà không tăng số lượng tham số, cho phép mô hình phát hiện các mẫu không gian lớn hơn như các vùng nước hoặc khu xây dựng. Lớp này sử dụng kernel 3×3 và cũng được theo sau bởi LeakyReLU và batch normalization.

Lớp tích chập thứ ba: Sử dụng kernel 3×3 để xử lý các đặc trưng kết hợp từ các lớp trước, tập trung vào các chi tiết nhỏ hơn như ranh giới giữa ruộng bậc thang và đất trống lúa.

Sau các lớp tích chập, một lớp tổng hợp toàn cục (global average pooling) được sử dụng để giảm số chiều, tiếp theo là hai lớp dày đặc (dense) với 64 và 7 neuron, tương ứng với số lớp đầu ra. Lớp dropout (0.2) được thêm vào để ngăn chặn quá khớp. Mô hình được tối ưu hóa bằng thuật toán Adam với tốc độ học ban đầu 0.00005 và clipnorm=1.0 để kiểm soát gradient lớn. Hàm mất mát sparse categorical crossentropy được sử dụng do nhãn là các giá trị nguyên. Cấu trúc mô hình được minh họa như sau:



Hình 33. Cấu trúc mạng CNN

Trong thiết kế mô hình CNN, số lượng đặc trưng (feature maps) được tăng dần qua các lớp tích chập, từ 32 ở lớp đầu tiên lên 48 ở lớp giãn nở và 64 ở lớp cuối cùng. Chiến lược này nhằm mục đích học các đặc trưng phức tạp hơn ở các tầng sâu, tận dụng mối quan hệ không gian giữa các pixel lân cận để phân biệt các lớp LULC có cấu trúc bề mặt đa dạng, chẳng hạn như ranh giới giữa rừng rậm và đát trống hoặc các mảng không gian lớn của khu xây dựng. So với các phương pháp thu hẹp dần (ví dụ: sử dụng các lớp max pooling hoặc stride lớn để giảm kích thước không gian), cách tiếp cận tăng dần đặc trưng giữ nguyên độ phân giải không gian qua các lớp tích chập, cho phép mô hình duy trì thông tin chi tiết về ranh giới và kết cấu bề mặt. Điều này đặc biệt quan trọng trong phân loại LULC, nơi các đặc trưng không gian như ranh giới giữa ruộng bậc thang và đát trống lúa có thể ảnh hưởng đến kết quả thủy văn. Ngoài ra, việc sử dụng lớp tổng hợp toàn cục (global average pooling) thay vì các lớp thu hẹp dần ở giai đoạn sau giúp giảm số chiều mà không làm mất thông tin tổng quát, đồng thời giảm nguy cơ quá khớp so với các lớp dày đặc truyền thống. Tuy nhiên, nhược điểm của chiến lược này là yêu cầu tính toán cao hơn do kích thước không gian được giữ nguyên qua các lớp, có thể làm tăng thời gian huấn luyện và tiêu tốn tài nguyên trên các tập dữ liệu lớn. Hơn nữa, việc tăng số đặc trưng có thể dẫn đến nguy cơ học các đặc trưng dư thừa nếu không được kiểm soát chặt chẽ bởi các kỹ thuật như dropout và bình thường hóa hàng loạt.

Bảng 18. Mô tả mô hình CNN

TT	Lớp	Loại	Kích thước	Số filter/units	Đặc điểm đặc biệt	Kích thước đầu ra
0	Input	Input	-	-	16 bands, patch 5×5	(16, 5, 5)
1	Permute	Reshape	-	-	Chuyển (16,5,5) \rightarrow (5,5,16)	(5, 5, 16)
2	Conv2D	Tích chập	5×5	32	padding='same', nắm bắt lân cận	(5, 5, 32)
3	LeakyReLU	Kích hoạt	-	-	negative_slope=0.1	(5, 5, 32)
4	BatchNorm	Chuẩn hóa	-	-	Chuẩn hóa theo batch	(5, 5, 32)
5	Conv2D	Tích chập giãn nở	3×3	48	dilation_rate=(2,2), mở rộng trường tiếp nhận	(5, 5, 48)
6	LeakyReLU	Kích hoạt	-	-	negative_slope=0.1	(5, 5, 48)
7	BatchNorm	Chuẩn hóa	-	-	Chuẩn hóa theo batch	(5, 5, 48)
8	Conv2D	Tích chập	3×3	64	padding='same', xử lý đặc trưng kết hợp	(5, 5, 64)
9	LeakyReLU	Kích hoạt	-	-	negative_slope=0.1	(5, 5, 64)
10	BatchNorm	Chuẩn hóa	-	-	Chuẩn hóa theo batch	(5, 5, 64)
11	GlobalAvgPool	Pooling	-	-	Trung bình toàn cục	(64)
12	Dense	Kết nối đầy đủ	-	64	Tầng ẩn	(64)
13	LeakyReLU	Kích hoạt	-	-	negative_slope=0.1	(64)

TT	Lớp	Loại	Kích thước	Số filter/ units	Đặc điểm đặc biệt	Kích thước đầu ra
14	BatchNorm	Chuẩn hóa	-	-	Chuẩn hóa theo batch	(64)
15	Dropout	Regularization	-	-	rate=0.2, giảm overfitting	(64)
16	Dense	Kết nối đầy đủ	-	7	activation='softmax', phân loại 7 lớp	(7)

Tập dữ liệu bao gồm 100,000 mẫu (trên tổng số 122,393 mẫu dựa trên thuật toán không ché số lượng mẫu tối đa) được chia thành tập huấn luyện (80%) và tập xác thực (20%) bằng phương pháp phân chia ngẫu nhiên có phân tầng để đảm bảo phân bố nhãnh đồng đều. Toàn bộ mẫu được lấy ở dạng vùng và chuyển về dạng điểm thông qua công cụ rasterize trong QGIS. Mô hình được huấn luyện trong 50 epoch với kích thước batch là 32. Các callback được sử dụng bao gồm:

EarlyStopping: Dừng huấn luyện nếu hàm mất mát xác thực không cải thiện sau 5 epoch, đồng thời khôi phục trọng số tốt nhất.

ReduceLROnPlateau: Giảm tốc độ học xuống 50% nếu hàm mất mát xác thực không cải thiện sau 3 epoch, với tốc độ học tối thiểu là 1e-6.

Phân bố nhãnh trong tập dữ liệu được trình bày trong Bảng 3, phản ánh sự đa dạng của các lớp LULC trong khu vực nghiên cứu. Bài báo không trình bày bản đồ tập dữ liệu huấn luyện và kiểm tra của mô hình do các mẫu được lấy ở dạng vùng, sau đó chuyển về dạng điểm với độ phân giải là 12,5m (quá nhỏ và gần nhau so với kích thước khu vực nghiên cứu) gây ra hiệu ứng chồng lấn và thể hiện không rõ ràng trong các bản đồ.

Bảng 19. Phân bố nhãnh trong tập dữ liệu huấn luyện

Lớp	Tên	Số mẫu	Tỷ lệ
1	Mặt nước	4,929	4.93%
2	Rừng rậm	24,223	24.22%
3	Đất trống	17,784	17.78%
4	Khu xây dựng	25,505	25.51%
5	Rừng thưa	4,986	4.99%
6	Ruộng bậc thang	17,012	17.01%
7	Đất trồng lúa	5,561	5.56%

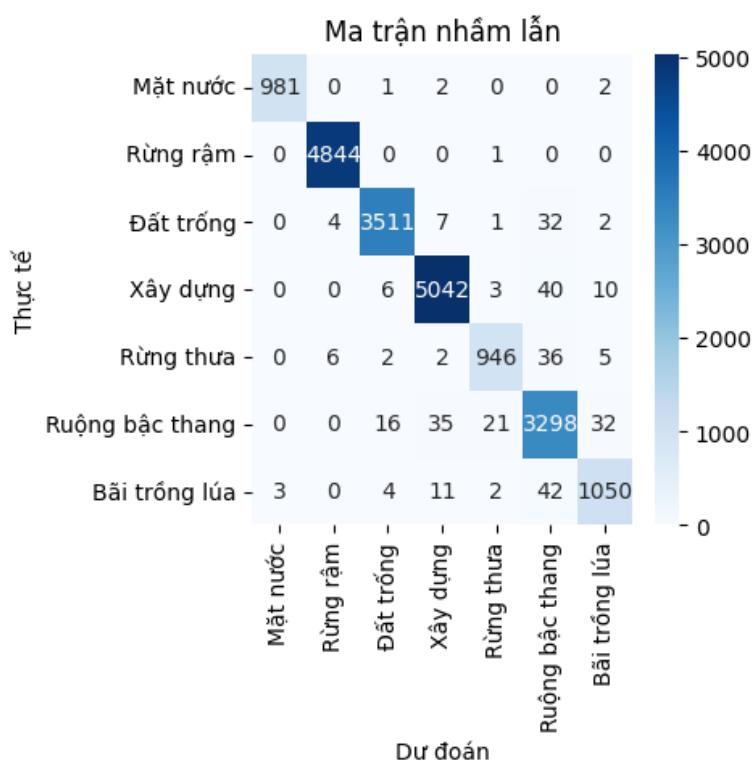
Tập dữ liệu huấn luyện thể hiện sự mất cân bằng đáng kể giữa các lớp, với các lớp như "Khu xây dựng" (25.51%) và "Rừng rậm" (24.22%) chiếm tỷ lệ lớn, trong khi các lớp như "Mặt nước" (4.93%) và "Rừng thưa" (4.99%) có số mẫu ít hơn. Tuy nhiên, mô hình CNN vẫn đạt độ chính xác xác thực cao (98.32%) nhờ vào các chiến lược thiết kế hiệu quả. Thứ nhất, việc sử dụng phân chia ngẫu nhiên có phân tầng (stratified random splitting) đảm bảo rằng tỷ lệ các lớp được duy trì trong cả tập huấn luyện và xác thực, giúp mô hình học được các đặc trưng của các lớp thiểu số. Thứ hai, các lớp tích chập

giản nở và kernel lớn cho phép mô hình nắm bắt các mẫu không gian phức tạp, đặc biệt là ở các lớp hiếm như "Mặt nước", vốn có đặc trưng quang học rõ rệt (NDWI, NDWI1). Ngoài ra, hàm mất mát sparse categorical crossentropy và kỹ thuật dropout (0.2) giúp giảm thiểu tình trạng quá khớp đối với các lớp chiếm ưu thế, đảm bảo mô hình tổng quát hóa tốt trên tất cả các lớp. Những yếu tố này đã giảm thiểu tác động của dữ liệu mờ cân bằng, dẫn đến hiệu suất phân loại đồng đều, như được thể hiện trong ma trận nhầm lẫn.

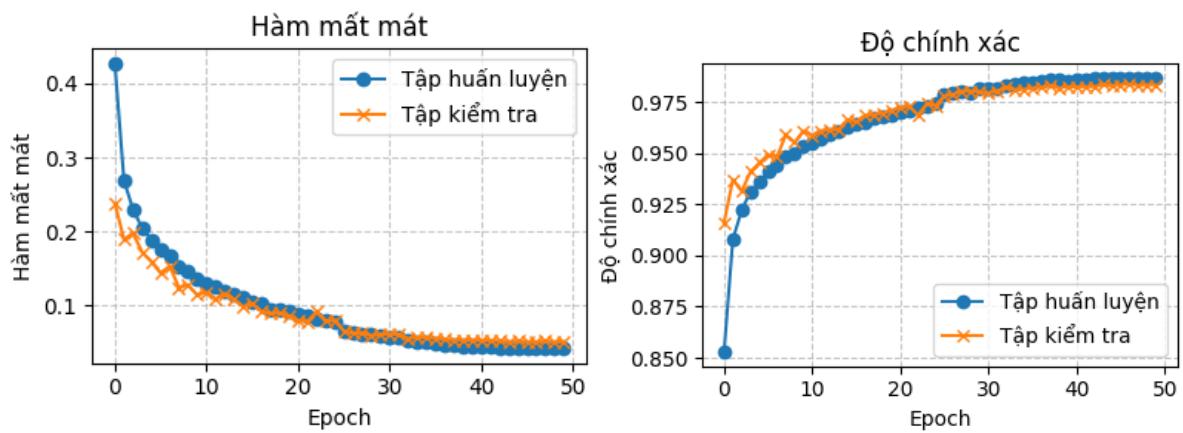
2. Kết quả xây dựng bản đồ thảm phủ

a. Hiệu suất mô hình

Mô hình CNN đạt độ chính xác huấn luyện là 98.68% và độ chính xác xác thực là 98.32% sau 50 epoch. Quá trình hội tụ được thể hiện trong Hình 34, cho thấy hàm mất mát giảm đều và ổn định, đặc biệt sau khi tốc độ học được điều chỉnh tự động. Ma trận nhầm lẫn (Hình 4) cho thấy mô hình phân loại chính xác hầu hết các lớp, với một số nhầm lẫn nhỏ giữa rừng rậm (lớp 2) và rừng thưa (lớp 5) do sự tương đồng về mật độ thực vật. Độ chính xác và độ nhạy của từng lớp được trình bày trong Bảng 20.



Hình 34. Ma trận nhầm lẫn của mô hình CNN trên tập kiểm tra

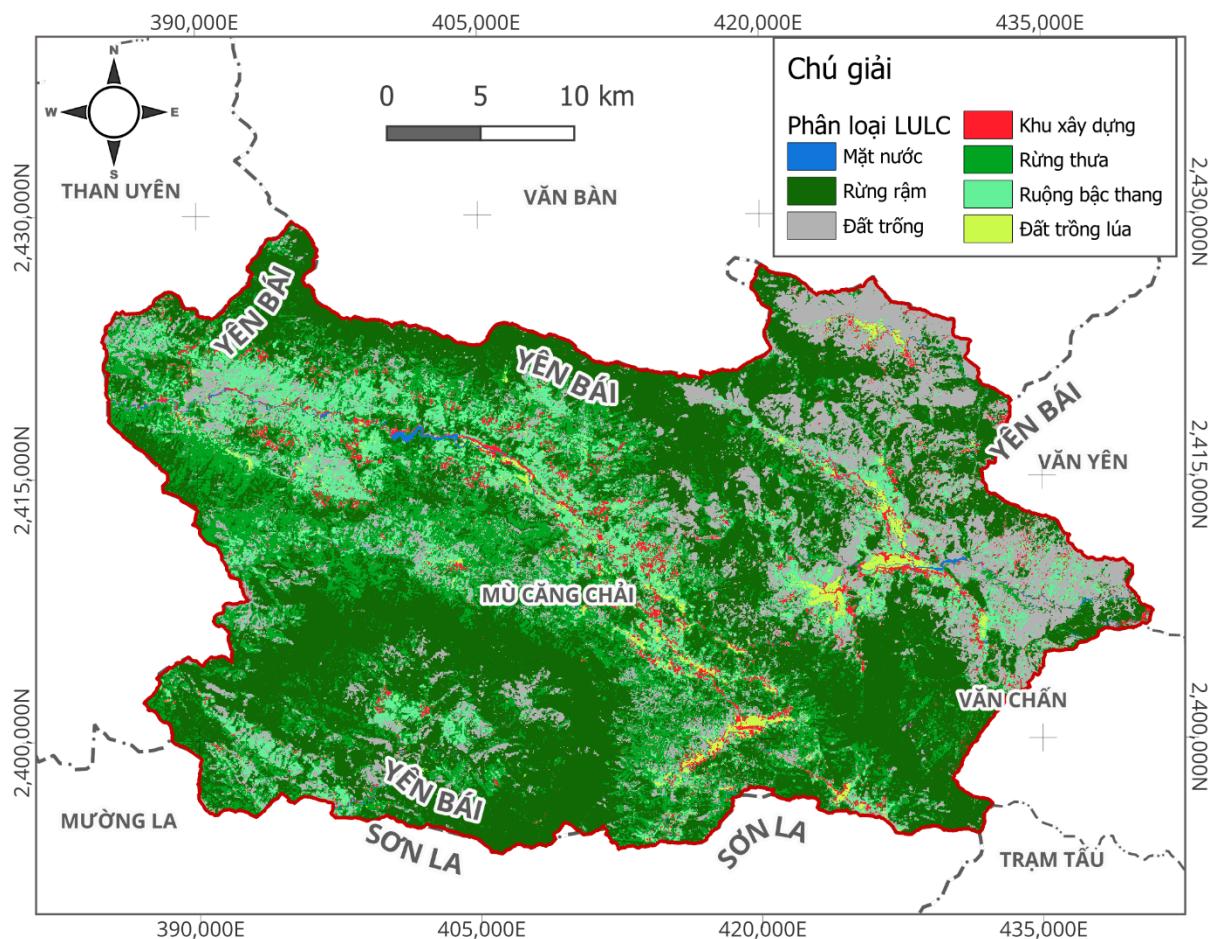


Hình 35. Đồ thị hàm mất mát và độ chính xác trong quá trình huấn luyện

Bảng 20. Độ chính xác và độ nhạy của từng lớp phân loại thảm phủ

Lớp	Tên	Độ chính xác (%)	Độ nhạy (%)	Phương pháp nghiên cứu	ESRI Land Cover	JAXA ALOS
1	Mặt nước	99.7	99.49	Có	Có	Có
2	Rừng rậm	99.79	99.98	Có (Good)	Có (Trees)	Có (chưa phân loại)
3	Đất trống	99.18	98.71	Có (Poor)	Có (Bare ground)	Có (Barren)
4	Khu xây dựng	98.88	98.84	Có (Impervious)	Có (Built-up)	Có (Urban)
5	Rừng thưa	97.13	94.88	Có (Fair/Poor)	Không	Có (chưa phân loại)
6	Ruộng bậc thang	95.65	96.94	Có (Contoured)	Không	Không
7	Đất trồng lúa	95.37	94.42	Có (Wet meadow)	Không	Có (rice)

b. Bản đồ thảm phủ



Hình 36. Bản đồ LULC được tạo ra từ mô hình CNN

Bằng cách sử dụng 16 tham số đầu vào từ Sentinel-1, Sentinel-2 và ALOS, mô hình CNN đã phân loại thành công bảy lớp LULC, mỗi lớp có mối liên hệ rõ ràng với các quá trình thủy văn như thảm thấu và dòng chảy. So với các sản phẩm LULC hiện có như ESRI Land Cover và JAXA ALOS, phương pháp này cung cấp các lớp phân loại chuyên biệt hơn, đặc biệt là ruộng bậc thang, đất trồng lúa và chất lượng rừng (thông qua CSDL rừng), vốn quan trọng trong mô phỏng dòng chảy ở các khu vực nông nghiệp miền núi phía Bắc Việt Nam.

CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG CÁC BẢN ĐỒ THÀNH PHẦN PHỤC VỤ ĐÁNH GIÁ XÁC ĐỊNH LŨ QUÉT

Trong bối cảnh dự đoán nguy cơ lũ quét, việc lựa chọn và hiểu rõ các đặc trưng dữ liệu là yếu tố cốt lõi để xây dựng các mô hình trí tuệ nhân tạo hiệu quả. Các đặc trưng được sử dụng trong nghiên cứu này thuộc bốn nhóm chính: địa hình, thủy văn, thực phủ và khí tượng. Mỗi nhóm đặc trưng phản ánh một khía cạnh cụ thể của môi trường tự nhiên và đóng vai trò quan trọng trong việc xác định mức độ nguy cơ lũ quét. Trong nội

dung này, nhóm nghiên cứu sẽ phân tích chi tiết các đặc trưng trong đó nhấn mạnh ý nghĩa vật lý, cách thu thập, và vai trò của chúng trong việc mô hình hóa nguy cơ lũ quét.

3.1. Dữ liệu và chuẩn hóa dữ liệu

3.1.1. Nhóm dữ liệu địa không gian

Độ dốc địa hình: là một sản phẩm của dữ liệu địa hình, thể hiện vai trò của sự kiểm soát vận tốc dòng chảy và khả năng thấm của bề mặt. Có thể nói rằng độ dốc là một trong những dữ liệu quan trọng nhất đối với loại hình thiên tai lũ quét. Đây cũng là lý do mà lũ quét thường xuyên xảy ra ở các khu vực đồi núi, nơi có độ dốc cao. Có nghiên cứu đã chỉ ra rằng, độ dốc lớn hơn 20° làm giảm khả năng thấm của bề mặt lên tới $40\text{--}60\%$ và làm tăng vận tốc dòng chảy [83]. Công cụ Slope có sẵn trong ArcGIS và QGIS là công cụ chính được sử dụng trong nghiên cứu này.

Độ dốc lòng dẫn: Độ dốc lòng dẫn (channel slope) biểu thị độ nghiêng dọc theo kênh dòng chảy chính, ảnh hưởng đến vận tốc và thời gian tập trung nước. Độ dốc lòng dẫn cao làm tăng nguy cơ lũ quét do giảm thời gian dòng chảy. Khác với độ dốc bề mặt, độ dốc lòng dẫn được tính bằng cách trích xuất hồ sơ dọc (longitudinal profile) của kênh từ DEM, sử dụng công cụ Flow Path Profiling trong ArcGIS hoặc Profile Tool trong QGIS. Độ dốc lòng dẫn được xác định bằng tỷ số giữa chênh lệch độ cao giữa hai điểm trên kênh và chiều dài kênh.

Chiều dài lòng dẫn: Chiều dài lòng dẫn là khoảng cách dọc theo kênh từ điểm cao nhất của lưu vực đến cửa ra, ảnh hưởng đến thời gian tập trung nước. Lòng dẫn ngắn làm tăng nguy cơ lũ quét do nước chảy nhanh. Chiều dài lòng dẫn được tính từ DEM bằng công cụ Flow Length trong ArcGIS hoặc QGIS, sử dụng flow direction để xác định đường đi của dòng chảy.

Diện tích lưu vực: Diện tích lưu vực quyết định lượng nước mưa tích tụ, ảnh hưởng đến quy mô lũ quét. Lưu vực nhỏ với độ dốc cao thường gây lũ quét nhanh. Diện tích lưu vực được tính từ DEM bằng công cụ Watershed trong ArcGIS hoặc QGIS, dựa trên flow direction và flow accumulation.

Khoảng cách đến sông suối: Khoảng cách từ một điểm đến sông suối gần nhất ảnh hưởng đến nguy cơ ngập lũ. Các điểm gần sông (<100 m) dễ bị lũ quét do nhận nước trực tiếp. Khoảng cách được tính bằng công cụ Euclidean Distance trong ArcGIS hoặc QGIS, sử dụng bản đồ dòng chảy chính

Độ cao tương đối đến sông/suối gần nhất: Độ cao tương đối so với sông/suối gần nhất thể hiện khả năng ngập lũ của một điểm. Điểm có độ cao thấp dễ bị lũ quét hơn. Độ cao tương đối được tính bằng cách trừ độ cao DEM của điểm cho độ cao của sông/suối gần nhất, sử dụng ArcGIS hoặc QGIS

Chỉ số ám địa hình (TWI) với vai trò là phản ánh độ bão hòa đất tự nhiên và tiềm năng tạo ra dòng chảy [84]. Với sự liên hệ mật thiết với độ dốc và diện tích lưu vực thượng nguồn ($TWI = \ln(As / \tan(Slope))$), chỉ số TWI càng lớn càng có khả năng xảy ra lũ quét.

Tốc độ thấm bình quân của đất: Tốc độ thấm của đất quyết định lượng nước mưa được hấp thụ hoặc tạo dòng chảy bề mặt. Đất thấm kém (như đất sét) làm tăng nguy cơ lũ quét. Tốc độ thấm bình quân được trích xuất từ bản đồ đất USDA được mô tả trong mục 2.2.1.2, tính trung bình trên lưu vực bằng ArcGIS hoặc QGIS

Chỉ số NDVI bình quân: Chỉ số NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) phản ánh mật độ thảm phủ thực vật, ảnh hưởng đến giữ nước và dòng chảy bề mặt. NDVI thấp làm tăng nguy cơ lũ quét. NDVI bình quân được tính từ ảnh vệ tinh (Landsat, Sentinel-2) bằng công cụ Raster Calculator trong ArcGIS hoặc QGIS

Chỉ số CN bình quân: Chỉ số Curve Number (CN) biểu thị tiềm năng tạo dòng chảy bề mặt dựa trên loại đất và sử dụng đất. CN cao (đất trơ, đô thị) làm tăng nguy cơ lũ quét. CN bình quân được trích xuất từ bản đồ đất và nhóm đất thủy văn, tính trung bình trên lưu vực bằng ArcGIS hoặc QGIS.

3.1.1.2. Nhóm dữ liệu khí tượng thủy văn

Nhóm dữ liệu mưa sẽ được xác định trong phạm vi 24 giờ đến thời điểm xảy ra lũ quét. Trong đó trích xuất các đặc trưng bao gồm: lượng mưa giờ lớn nhất; lượng mưa 3 giờ lớn nhất; và lượng mưa 24 giờ lớn nhất.

3.1.1.3. Dữ liệu lũ quét lịch sử

Dữ liệu lũ quét lịch sử là thành phần cốt lõi để huấn luyện các mô hình trí tuệ nhân tạo (AI) dự đoán nguy cơ lũ quét. Dữ liệu được chia thành ba loại: dữ liệu thực tế, dữ liệu tăng cường, và dữ liệu không phải lũ quét, với các điểm được gán nhãn khác nhau (lũ quét) hoặc 0 (không lũ quét). Quá trình chuẩn bị đảm bảo tính phù hợp thủy văn và tối ưu hóa cho các mô hình như RF, SVM, LR, LGBM, CNN, DNN, và LSTM.

1. Dữ liệu thực tế

Dữ liệu thực tế bao gồm các vị trí đã xảy ra lũ quét, thu thập từ báo cáo thiên tai hoặc bản đồ lũ lịch sử. Vì lũ quét thường được ghi nhận dưới dạng vùng (polygon), dữ liệu được chuyển thành dạng điểm tương ứng với độ phân giải raster (12.5 m) bằng công cụ Polygon to Point trong ArcGIS hoặc QGIS. Mỗi điểm trong khu vực lũ quét ban đầu được gán nhãn lũ quét, đại diện cho nguy cơ lũ quét cao (nhãn 4). Quá trình chuyển đổi đảm bảo giữ nguyên các điểm đại diện cho khu vực chịu ảnh hưởng trực tiếp của lũ quét.

2. Dữ liệu tăng cường

Dữ liệu tăng cường được tạo để mở rộng tập dữ liệu lũ quét dựa trên tình hình thực tế nhằm cải thiện khả năng khai quát hóa của mô hình AI. Lũ quét không chỉ xảy ra trên dòng chảy chính mà còn ảnh hưởng đến các khu vực lân cận như bãi bồi, sườn dốc gần suối, hoặc vùng ngập lũ hạ du. Do đó, một vùng đệm xung quanh các dòng chảy chính tại vị trí lũ quét lịch sử được tạo bằng công cụ Buffer trong ArcGIS hoặc QGIS. Các điểm trong vùng đệm có độ cao tương đối thấp so với lòng suối (≤ 5 m, tính bằng DEM trừ độ cao kênh) được gán nhãn có nguy cơ cao (nhãn 4) vì trên thực tế đây là các đối tượng trực tiếp bị ảnh hưởng.

Nếu ghi nhận lũ lớn trên các nhánh suối mà chưa phân định được là lũ quét hay không phải là lũ quét, các nhánh suối này được gán giá trị nhãn là 3, thể hiện mức độ nguy cơ lũ quét ở mức trung bình. Do đó, cần khảo sát thực tế để nắm bắt được tình hình mưa lũ trên khu vực nghiên cứu. Nhãn 3 được gán cho các điểm thuộc lòng dẫn và lân cận lòng dẫn thuộc khu vực có lũ lớn trong khu vực.

Các nhánh suối khu vực lân cận (thượng và hạ lưu) các nhánh suối gán nhãn 3 được gán nhãn 2 tương ứng với nguy cơ thấp cho các điểm thuộc lòng dẫn, bên cạnh đó các nhánh suối có mưa và tạo ra các dòng chảy thông thường cũng được gán nhãn 2, các nhánh suối này thường được mô tả là các nhánh suối có mức nước lũ thông thường trong mùa mưa lũ, không có ghi nhận về dòng chảy bất thường.

Các đoạn suối thượng nguồn, nơi có diện tích lưu vực nhỏ nằm trên sườn dốc núi không ghi nhận dòng chảy lũ bất thường được gán nhãn 1 (nguy cơ rất thấp). Lý do của việc này là tại các khu vực thượng nguồn, dòng chảy tập trung nhỏ, chưa hình thành đủ năng lượng để có thể hình thành lũ quét trong bất cứ điều kiện nào (không xét đến sạt lở, nghẽn dòng).

Dữ liệu không phải lũ quét (nhãn 0) đóng vai trò quan trọng trong việc huấn luyện mô hình AI, vì gán nhãn sai có thể dẫn đến đánh giá thấp nguy cơ lũ quét. Do dữ liệu lũ quét lịch sử thường không đầy đủ (một số sự kiện có thể không được ghi nhận), việc chọn các điểm không lũ quét đòi hỏi tiêu chí thủy văn chặt chẽ. Các điểm có xác suất lũ quét thấp được chọn dựa trên hai tiêu chí:

- Khoảng cách xa sông/suối: Các điểm cách sông/suối > 200 m, nằm ở vị trí cao (gần đỉnh núi, sườn núi) hoặc có flow accumulation thấp (< 100 ô lưới) được coi là an toàn, vì thiếu lượng nước tập trung cần thiết cho lũ quét. Khoảng cách được tính bằng công cụ Euclidean Distance trong ArcGIS hoặc QGIS
- Lượng mưa thấp: Các điểm có lượng mưa 1 giờ hoặc 6 giờ < 10 mm, trích xuất từ trạm đo, được gán nhãn 0. Nguồn này dựa trên nghiên cứu cho thấy mưa < 10 mm khó kích hoạt lũ quét, ngay cả ở khu vực gần sông/suối [85].

3.1.1.4. Chuẩn hóa dữ liệu

Việc chuẩn hóa dữ liệu (data normalization/standardization) là bước quan trọng trong các bài toán học máy và học sâu, đặc biệt khi các đặc trưng đầu vào có thang đo khác nhau (ví dụ: lượng mưa từ 0-200 mm, độ dốc từ 0-45 độ, NDVI từ 0-1 trong bài toán lũ quét). Chuẩn hóa giúp đưa các đặc trưng về cùng thang đo, đảm bảo mô hình (như RF, SVM, LR, LGBM, DNN, CNN, LSTM) không bị thiên lệch bởi các đặc trưng có giá trị lớn và cải thiện hiệu suất huấn luyện. Các lý do cần phải chuẩn hóa bao gồm:

- Thang đo khác nhau: Các đặc trưng như lượng mưa (mm), độ dốc (độ), flow accumulation (số té bào), hay NDVI (0-1) có đơn vị và phạm vi giá trị khác nhau. Nếu không chuẩn hóa, các đặc trưng có giá trị lớn (như flow accumulation) có thể áp đảo các đặc trưng nhỏ (như NDVI) trong các mô hình nhạy cảm với thang đo, như SVM, LR, DNN, CNN, LSTM.
- Tối ưu hóa mô hình: Chuẩn hóa giúp các thuật toán dựa trên gradient (như DNN, CNN, LSTM) hội tụ nhanh hơn và cải thiện độ chính xác.
- Tính tương thích: Một số mô hình (như SVM) yêu cầu dữ liệu trong cùng phạm vi (ví dụ: [0, 1] hoặc [-1, 1]) để hoạt động hiệu quả.

Các phương pháp chuẩn hóa dữ liệu cơ bản:

1. Min-Max Scaling (Chuẩn hóa tuyến tính)

Min-Max Scaling là một kỹ thuật cơ bản trong xử lý dữ liệu, phát triển từ các phương pháp thống kê và khoa học máy tính từ những năm 1970. Nó được sử dụng rộng rãi trong các thuật toán học máy sớm như mạng nơ-ron và SVM, không gắn với một cá nhân cụ thể mà là sản phẩm của cộng đồng nghiên cứu [86].

a. Các đặc điểm của chuẩn hóa tuyến tính:

- Biến đổi dữ liệu về một phạm vi cố định, thường là [0, 1], bằng cách chia tỷ lệ giá trị dựa trên giá trị nhỏ nhất và lớn nhất của đặc trưng.
- Phù hợp khi mô hình yêu cầu dữ liệu trong phạm vi cố định (như DNN, CNN) và dữ liệu không có nhiều giá trị ngoại lai.

b. Công thức

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

c. Ưu điểm

- Đơn giản, dễ triển khai, giữ nguyên phân bố tương đối của dữ liệu.
- Phù hợp với các mô hình yêu cầu dữ liệu trong [0, 1], như DNN, CNN, SVM.
- Hiệu quả khi dữ liệu có phân bố đều và ít giá trị ngoại lai.

d. Nhược điểm

- Nhạy cảm với giá trị ngoại lai (outliers). Nếu X_{\max} hoặc X_{\min} là ngoại lai, phạm vi chuẩn hóa sẽ bị méo mó.
- Không phù hợp với dữ liệu lệch mạnh (skewed), như flow accumulation hoặc lượng mưa trong lũ quét.

e. Ứng dụng trong lũ quét:

- Phù hợp cho các đặc trưng có phạm vi giới hạn và ít outliers, như NDVI (0-1), chỉ số CN (0-100), hoặc độ dốc (0-90 độ).
- Cần làm sạch outliers (ví dụ: loại bỏ giá trị lượng mưa bất thường) trước khi áp dụng.

2. Standardization (Z-score Normalization)

Standardization dựa trên khái niệm Z-score trong thống kê, phát triển từ các nghiên cứu về phân phối chuẩn của Carl Friedrich Gauss (thế kỷ 19). Trong học máy, nó được chuẩn hóa từ những năm 1980-1990, đặc biệt trong các thuật toán như SVM và hồi quy tuyến tính [87].

a. Đặc điểm của Standardization

- Biến đổi dữ liệu thành phân phối có trung bình bằng 0 và độ lệch chuẩn bằng 1, dựa trên trung bình và độ lệch chuẩn của đặc trưng.
- Phù hợp với các mô hình giả định dữ liệu gần phân phối chuẩn, như SVM, LR, DNN, và dữ liệu có phân bố lệch hoặc outliers.

b. Công thức

$$X_{\text{std}} = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

Trong đó:

X_{std} : Giá trị đã được chuẩn hóa (Z-score) của một điểm dữ liệu.

X : Giá trị gốc của điểm dữ liệu trong tập đặc trưng (ví dụ: lượng mưa, độ dốc, flow accumulation).

μ : Giá trị trung bình (mean) của toàn bộ tập đặc trưng X .

σ : Độ lệch chuẩn (standard deviation) của toàn bộ tập đặc trưng X .

c. Ưu điểm

- Ít nhạy cảm với outliers hơn Min-Max Scaling, vì dựa trên trung bình và độ lệch chuẩn.
- Phù hợp với dữ liệu lệch hoặc có outliers, như lượng mưa, flow accumulation.
- Tốt cho các mô hình dựa trên gradient (DNN, CNN, LSTM) và SVM, LR.

d. Nhược điểm

- Không giới hạn dữ liệu trong phạm vi cố định (giá trị có thể âm hoặc lớn hơn 1), có thể không phù hợp với một số CNN yêu cầu [0, 1].
- Nếu dữ liệu rất lệch, cần biến đổi trước (như log transform).

e. Ứng dụng trong lũ quét

- Lý tưởng cho các đặc trưng có phân bố lệch hoặc outliers, như lượng mưa (1 giờ, 3 giờ, 6 giờ, 24 giờ), flow accumulation, TWI.
- Phù hợp với SVM, LR, DNN, CNN, LSTM, vì chúng nhạy cảm với thang đo.

3. *Robust Scaling*

Robust Scaling dựa trên thống kê mạnh (robust statistics), phát triển từ những năm 1970-1980 để xử lý dữ liệu có outliers. Nó được tích hợp vào các thư viện học máy như Scikit-learn và phổ biến từ những năm 2000 trong các ứng dụng thực tế [88].

a. Đặc điểm của Robust Scaling

- Chuẩn hóa dữ liệu dựa trên trung vị và khoảng tứ phân vị (IQR), thay vì trung bình và độ lệch chuẩn, để giảm ảnh hưởng của giá trị ngoại lai.
- Phù hợp với dữ liệu có nhiều outliers, như flow accumulation ở các điểm trên dòng chảy chính.

b. Công thức

$$X_{\text{robust}} = \frac{X - Q_2}{Q_3 - Q_1}$$

Trong đó Q là các phân phân vị.

c. Ưu điểm

- Rất mạnh với outliers, vì sử dụng trung vị và IQR.
- Phù hợp với dữ liệu có giá trị ngoại lai nghiêm trọng, như flow accumulation, TWI.
- Tốt cho SVM, LR, DNN khi dữ liệu không sạch.

d. Nhược điểm

- Không giới hạn phạm vi, có thể không phù hợp với CNN yêu cầu [0, 1].
- Mất thông tin nếu dữ liệu có phân bố phức tạp hoặc ít outliers.

e. Ứng dụng trong lũ quét

- Lý tưởng cho các đặc trưng có nhiều outliers, như flow accumulation (giá trị lớn trên dòng chảy chính), TWI, hoặc lượng mưa.
- Phù hợp khi dữ liệu chưa được làm sạch hoàn toàn.

4. Log Transformation

Log Transformation bắt nguồn từ thống kê, được sử dụng từ thế kỷ 19 để xử lý dữ liệu lệch. Một biến thể là Box-Cox Transformation, được George E. P. Box và David R. Cox đề xuất năm 1964. Yeo-Johnson Transformation (2000) là phiên bản mở rộng cho cả giá trị âm [89, 90].

a. Đặc điểm của Log Transformation

- Biến đổi dữ liệu bằng hàm logarithm để giảm độ lệch (skewness), đặc biệt với dữ liệu lệch phải (right-skewed). Sau đó, có thể áp dụng Standardization hoặc Min-Max Scaling.
- Phù hợp với các đặc trưng có giá trị dương lớn, như flow accumulation, lượng mưa.

b. Công thức

$$X_{\log} = \log(X + c)$$

Với c là hằng số chuyên đổi

c. Ưu điểm

- Hiệu quả với dữ liệu lệch mạnh (flow accumulation, lượng mưa).
- Giảm tác động của outliers bằng cách nén các giá trị lớn.
- Tăng hiệu quả khi kết hợp với Standardization.

d. Nhược điểm

- Không áp dụng trực tiếp cho giá trị âm hoặc 0 (cần thêm hằng số c).
- Có thể làm mất thông tin nếu dữ liệu không lệch mạnh.
- Thường cần bước chuẩn hóa tiếp theo.

e. Ứng dụng trong lũ quét

- Rất phù hợp cho các đặc trưng lệch mạnh, như flow accumulation, lượng mưa (1 giờ, 3 giờ, 6 giờ, 24 giờ), diện tích lưu vực thượng nguồn.
- Nên kết hợp với Standardization để chuẩn hóa thêm

5. Lựa chọn phương pháp chuẩn hóa trong nghiên cứu

Bảng 21. Tổng hợp một số phương pháp chuẩn hóa dữ liệu phổ biến

Phương pháp	Công thức	Ưu điểm	Nhược điểm	Ứng dụng lũ quét
Min-Max Scaling	$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$	Đơn giản, phạm vi $[0, 1]$	Nhạy cảm với outliers	NDVI, CN, không tốt cho mưa
Standardization	$X_{\text{std}} = \frac{X - \mu}{\sigma}$	Ít nhạy cảm với outliers, tốt cho dữ liệu lệch	Không giới hạn phạm vi	Mưa, TWI

Phương pháp	Công thức	Ưu điểm	Nhược điểm	Ứng dụng lũ quét
Robust Scaling	$X_{\text{robust}} = \frac{X - Q_2}{Q_3 - Q_1}$	Rất mạnh với outliers	Không giới hạn phạm vi	TWI có outliers
Log Transformation	$X_{\log} = \log(X + c)$	Giảm độ lệch, nén outliers	Không áp dụng cho âm/0	Kết hợp với Standardization cho mưa

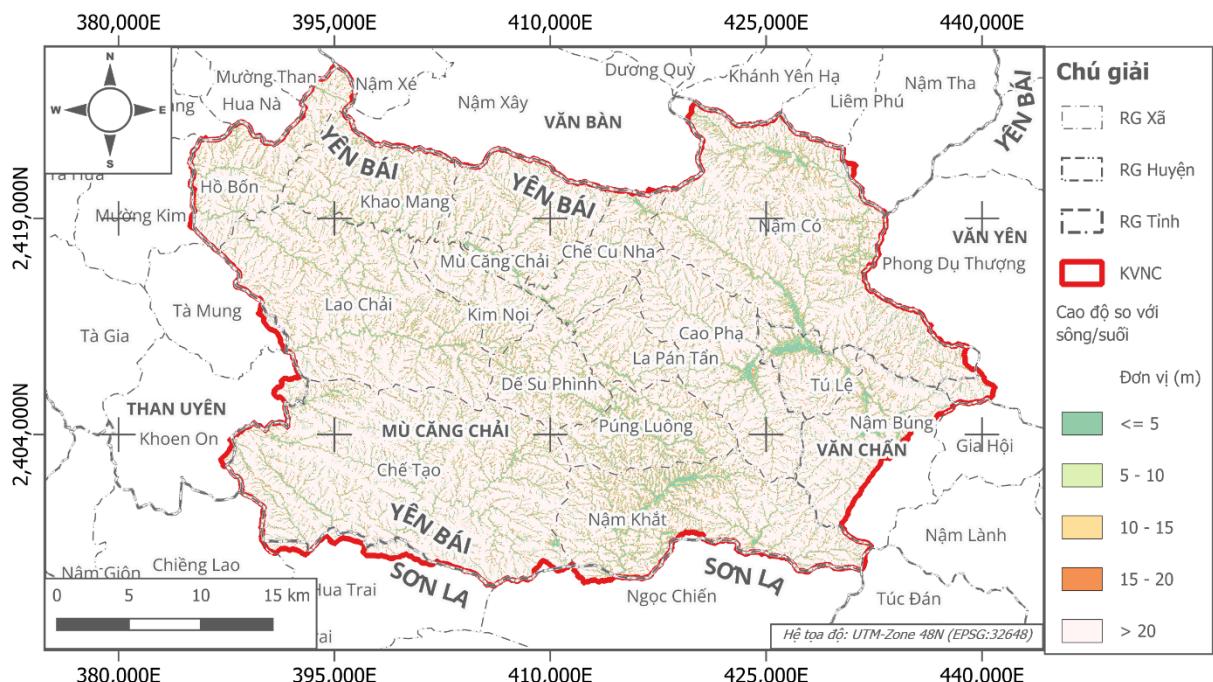
Qua nghiên cứu, đánh giá cho thấy một số dữ liệu đầu vào có đặc trưng lệch như lượng mưa hay chỉ số độ ẩm địa hình, do đó, nghiên cứu này lựa chọn phương pháp ưu tiên: Standardization (Z-score Normalization).

3.2. Xây dựng các bản đồ thành phần

1. Đặc trưng địa hình:

a. Cao độ so với sông suối

Cao độ so với sông suối là chênh lệch độ cao giữa một điểm trên địa hình và cao độ tại sông hoặc suối gần nhất theo hướng dòng chảy, được đo bằng mét. Đặc trưng này phản ánh mức độ dễ bị ngập lụt của một khu vực: các điểm có độ cao thấp so với sông suối thường dễ bị ngập hơn do gần với mực nước. Trong GIS, đặc trưng này được tính toán bằng cách trừ độ cao của điểm địa hình (từ DEM) cho cao độ tham chiếu của dòng chảy gần nhất, thường dựa trên phân tích không gian như thuật toán D8 hoặc D-infinity. Cao độ so với sông suối đặc biệt quan trọng trong các khu vực đồng bằng, nơi sự chênh lệch nhỏ về độ cao có thể dẫn đến khác biệt lớn về nguy cơ lũ lụt.

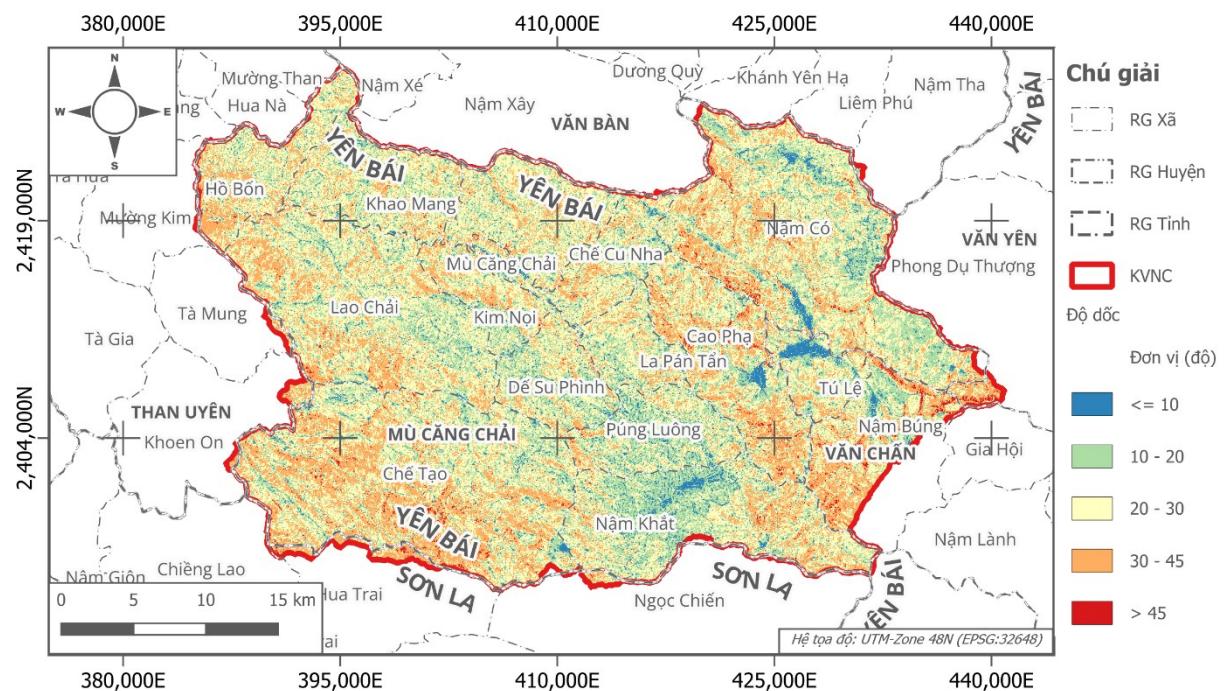


Hình 37. Cao độ các điểm đến sông/suối gần nhất (m)

Nghiên cứu này cho rằng các điểm có chênh lệch độ cao so với sông suối gần nhất nhỏ sẽ dễ bị dòng lũ quét chính ở trên sông tác động, đặc biệt là đối với các cơ sở hạ tầng xung quanh lòng dẫn. Do đó, các điểm có chênh lệch nhỏ sẽ bị gán các giá trị nguy cơ tương đương với các điểm thuộc lòng dẫn dựa trên thuật toán hướng dòng chảy trong phân tích thủy văn. Thuật toán xác định chênh lệch cao độ địa hình được nhóm nghiên cứu xây dựng và phát triển bằng các mã với ngôn ngữ Python. Kết quả được thể hiện trong Hình 37.

b. Độ dốc bình quân lưu vực

Độ dốc địa hình biểu thị mức độ nghiêng của bề mặt địa hình, được tính bằng phần trăm hoặc độ, dựa trên sự thay đổi độ cao giữa các ô lưới trong DEM. Độ dốc ảnh hưởng trực tiếp đến tốc độ dòng chảy bề mặt: địa hình dốc làm tăng tốc độ dòng chảy, giảm khả năng tích tụ nước, trong khi địa hình bằng phẳng dễ gây ngập lụt do nước chảy chậm. Trong mô hình hóa, độ dốc được tính toán bằng các thuật toán GIS như phương pháp Horn hoặc Zevenbergen-Thorne. Đặc trưng này rất quan trọng trong việc xác định các khu vực dễ bị ngập lụt do tích tụ nước hoặc xói mòn do dòng chảy mạnh.

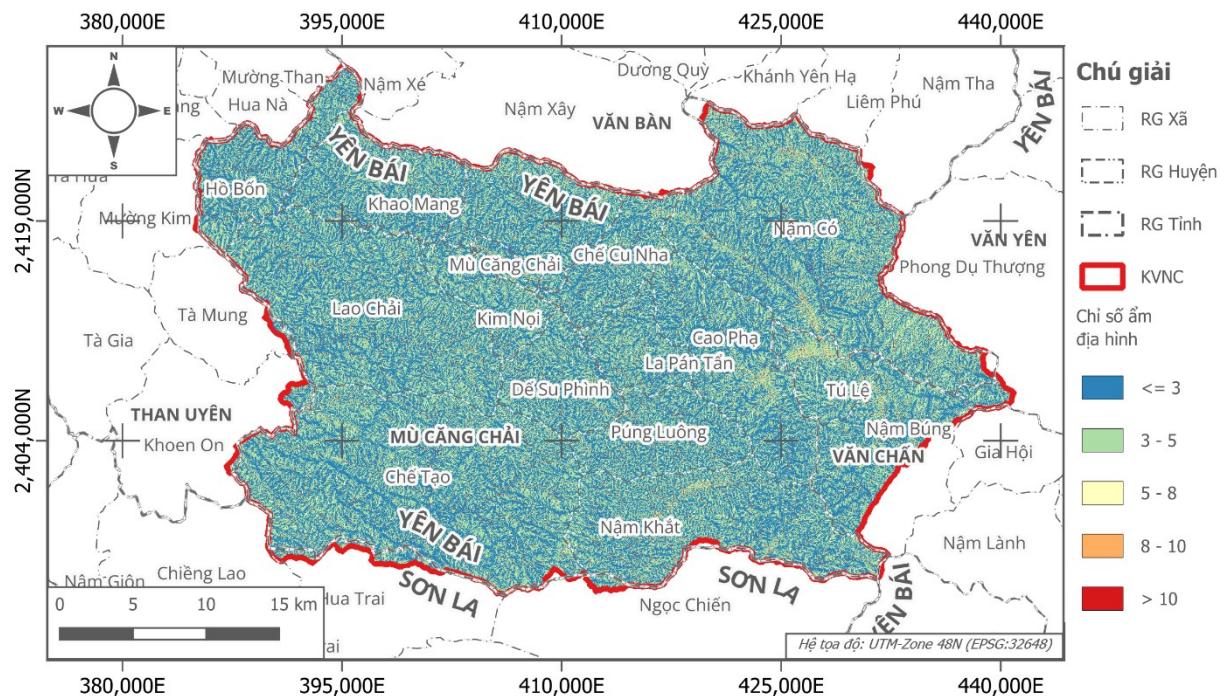


Hình 38. Độ dốc bình quân lưu vực địa hình khu vực nghiên cứu (độ)

Nghiên cứu này xem mỗi điểm là cửa ra của một lưu vực, do đó, dựa trên thuật toán hướng dòng chảy, các ô lưới thuộc mỗi lưu vực sẽ được xác định. Giá trị bình quân độ dốc của tất cả các ô lưới trong một lưu vực sẽ được gán là giá trị độ dốc bình quân lưu vực tại điểm tính. Kết quả thể hiện trong Hình 38. Độ dốc này khác với độ dốc điểm (bề mặt địa hình), nơi thể hiện độ dốc nội tại của từng điểm trên bề mặt.

c. Chỉ số ẩm địa hình

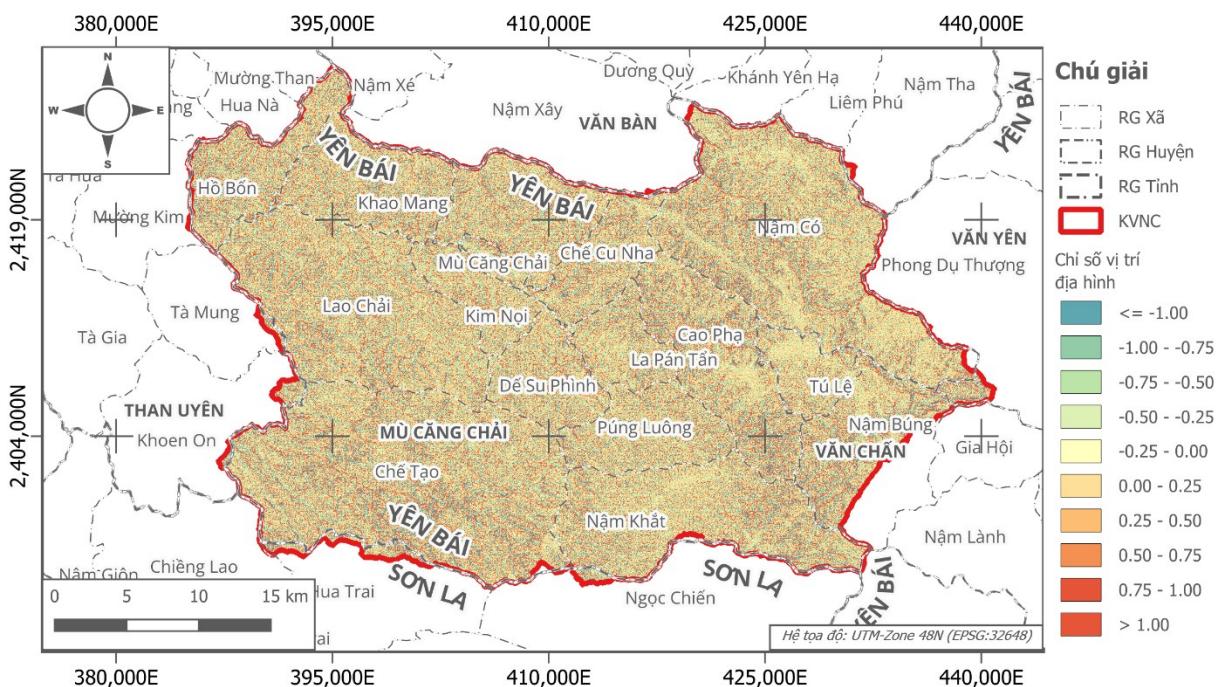
Chỉ số ẩm địa hình (Topographic Wetness Index - TWI) đo lường mức độ tích tụ nước tại một điểm dựa trên độ dốc và diện tích đóng góp dòng chảy. Giá trị TWI cao biểu thị các khu vực dễ tích tụ nước, chẳng hạn như vùng trũng hoặc thung lũng, trong khi giá trị thấp thường xuất hiện ở các khu vực cao hoặc dốc. Đặc trưng này rất hữu ích trong việc xác định các khu vực có nguy cơ ngập lụt cao do khả năng giữ nước lâu dài.



Hình 39. Chỉ số ẩm địa hình các điểm nằm trong khu vực nghiên cứu

d. Chỉ số vị trí địa hình

Chỉ số vị trí địa hình (Topographic Position Index - TPI) so sánh độ cao của một điểm với độ cao trung bình của các điểm xung quanh trong một bán kính nhất định. TPI dương biểu thị các điểm cao hơn khu vực xung quanh (như đỉnh đồi), trong khi TPI âm chỉ các điểm thấp hơn (như thung lũng).

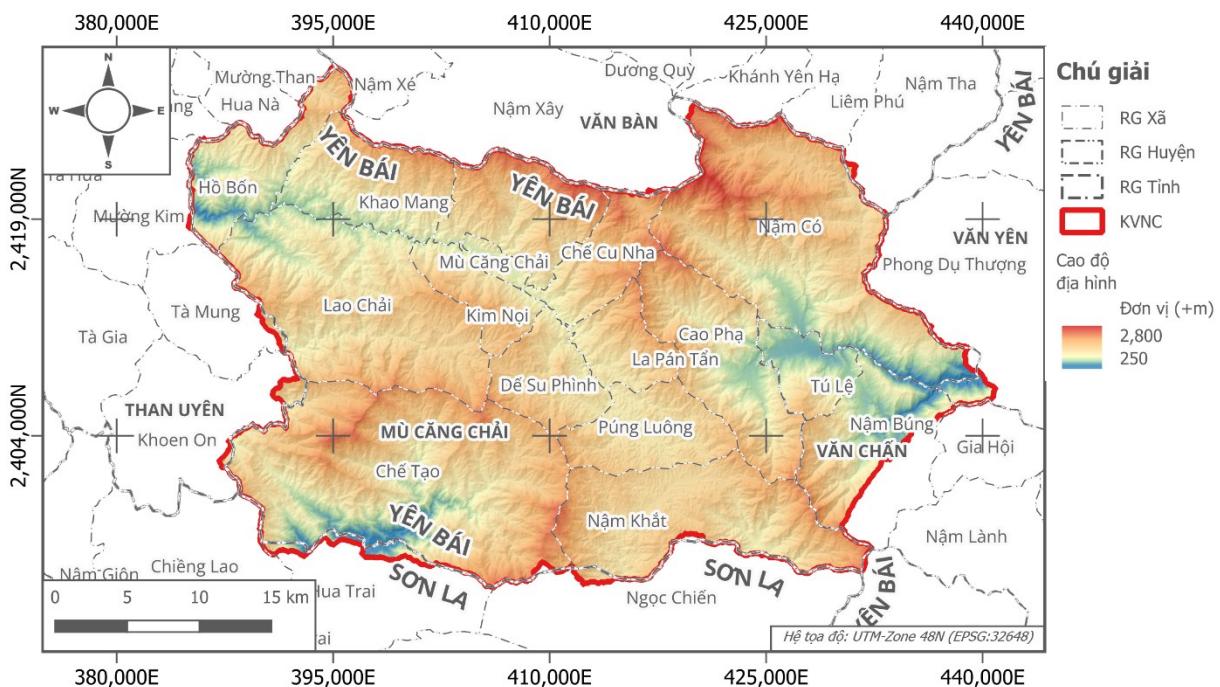


Hình 40. Chỉ số vị trí địa hình trong khu vực nghiên cứu

Đặc trưng chỉ số vị trí địa hình giúp xác định các khu vực dễ bị ngập lụt, đặc biệt là các vùng trũng có TPI âm. Trong GIS, TPI được tính toán bằng cách sử dụng các bộ lọc không gian trên dữ liệu DEM, với bán kính lân cận được chọn dựa trên quy mô địa hình. Kết quả được thể hiện trong Hình 40.

e. Cao độ địa hình

Cao độ địa hình, hay độ cao tuyệt đối so với mực nước biển, được trích xuất trực tiếp từ DEM. Đặc trưng này cung cấp thông tin cơ bản về vị trí của khu vực trong không gian, ảnh hưởng đến khả năng thoát nước và mức độ ngập lụt. Các khu vực có độ cao thấp hơn thường có nguy cơ ngập lụt cao hơn, đặc biệt trong các sự kiện mưa lớn.

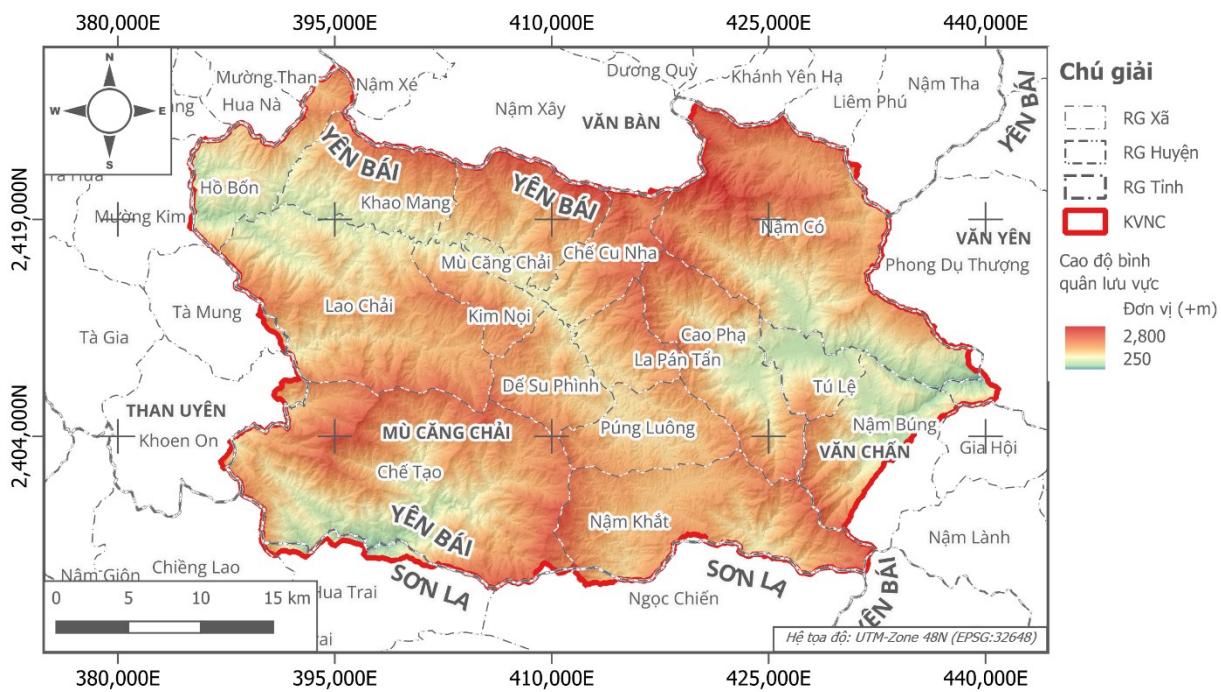


Hình 41. Bản đồ cao độ địa hình khu vực nghiên cứu

f. Cao độ bình quân lưu vực

Cao độ bình quân lưu vực là giá trị trung bình của độ cao trong một lưu vực cụ thể, phản ánh đặc tính chung của địa hình trong khu vực thoát nước. Đặc trưng này hữu ích trong việc đánh giá khả năng thoát nước của toàn bộ lưu vực, các lưu vực có độ cao trung bình lớn hơn thường sẽ có khả năng thoát nước tốt hơn. Trong GIS, cao độ bình quân được tính bằng cách lấy trung bình các giá trị DEM trong phạm vi lưu vực, được xác định thông qua phân tích thủy văn.

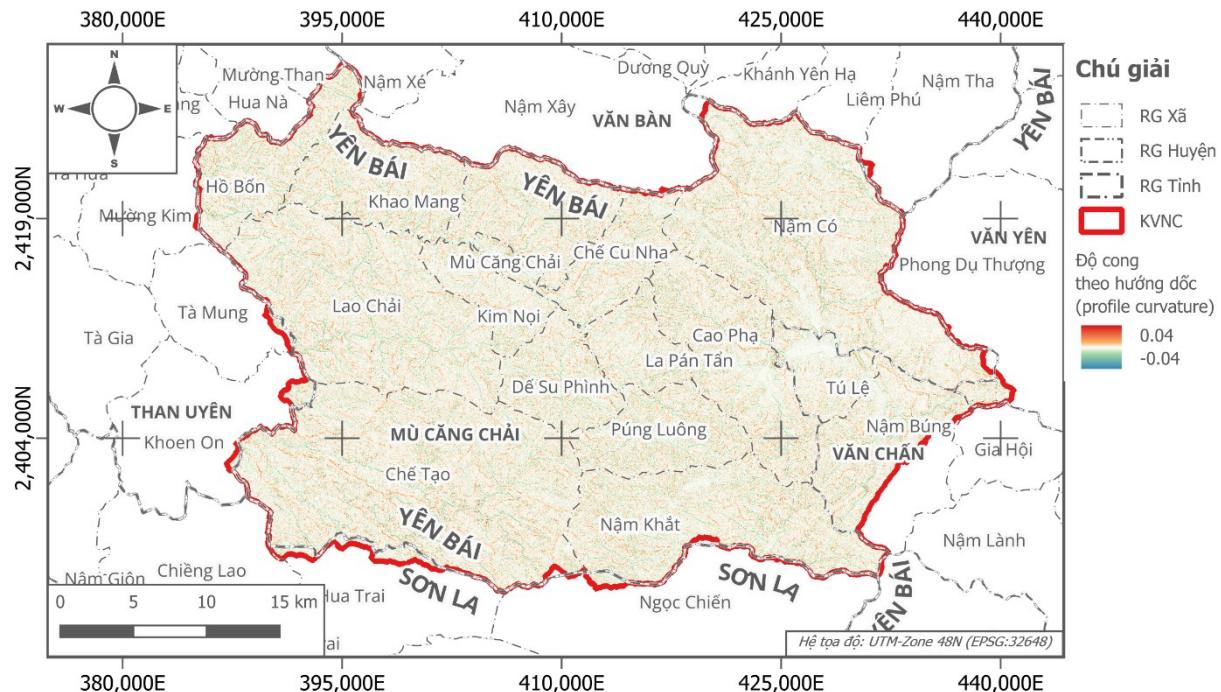
Khác với cao độ địa hình phía trên, mỗi điểm trong cao độ bình quân lưu vực được xem là cửa ra lưu vực theo nguyên tắc ô lưới, do đó, toàn bộ các điểm thuộc lưu vực sẽ được tổng hợp bởi giá trị bình quân và đưa ra giá trị cao độ đại diện cho điểm cửa ra. Kết quả được thể hiện trong Hình 42, giá trị độ cao trong hình này cao hơn giá trị độ cao cục bộ do giá trị độ cao cục bộ là giá trị tại đúng điểm cửa ra, trong khi giá trị độ cao này là giá trị bình quân của lưu vực với điểm cửa ra là thấp nhất.



Hình 42. Bản đồ cao độ bình quân lưu vực khu vực nghiên cứu

g. Độ cong địa hình (theo hướng dốc)

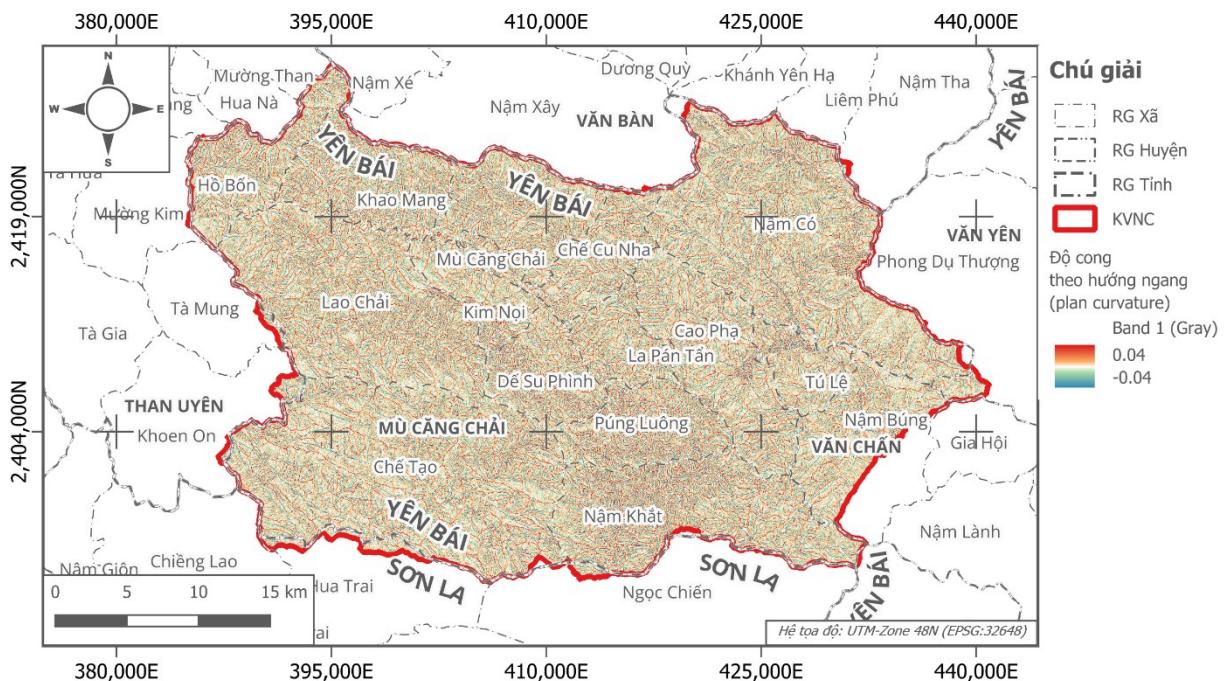
Độ cong theo hướng dốc (profile curvature) đo lường sự thay đổi độ dốc theo hướng dòng chảy, ảnh hưởng đến tốc độ và hướng của dòng chảy bề mặt. Độ cong dương (lồi) làm tăng tốc độ dòng chảy, trong khi độ cong âm (lõm) làm chậm dòng chảy, dẫn đến tích tụ nước. Đặc trưng này được tính toán từ DEM bằng cách sử dụng các đạo hàm bậc hai, thường thông qua các công cụ GIS như ArcGIS Spatial Analyst.



Hình 43. Độ cong địa hình theo hướng dốc khu vực nghiên cứu

h. Độ cong địa hình (phương ngang)

Độ cong phương ngang (plan curvature) đo lường sự thay đổi độ dốc theo phương vuông góc với hướng dòng chảy, ảnh hưởng đến sự phân tán hoặc tập trung của dòng chảy. Độ cong âm biểu thị các khu vực tập trung dòng chảy (như thung lũng), trong khi độ cong dương biểu thị các khu vực phân tán (như sườn đồi). Đặc trưng này giúp xác định các khu vực dễ bị ngập lụt do sự tập trung dòng chảy.



Hình 44. Độ cong địa hình theo phương ngang khu vực nghiên cứu

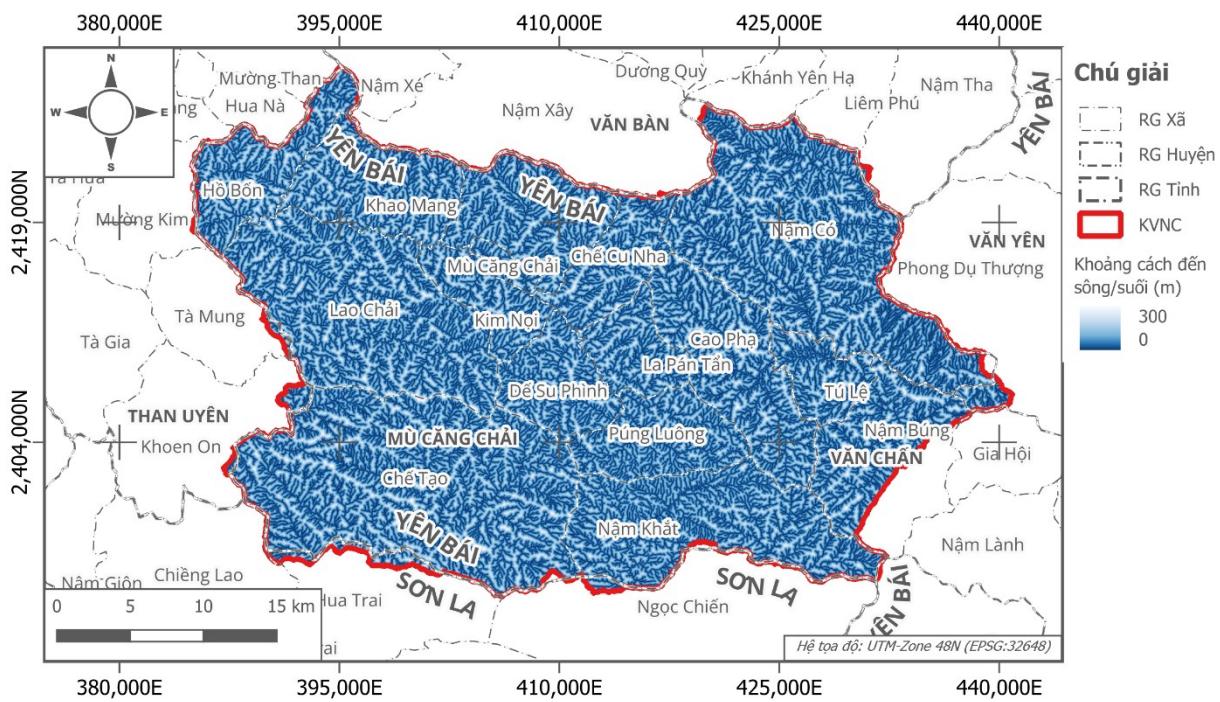
2. Đặc trưng thủy văn:

Các đặc trưng thủy văn mô tả các yếu tố liên quan đến dòng chảy và khả năng thoát nước của hệ thống thủy văn, đóng vai trò quan trọng trong việc dự đoán nguy cơ lũ lụt.

a. Khoảng cách đến sông suối

Khoảng cách đến sông suối là khoảng cách Euclidean từ một điểm địa hình đến dòng chảy gần nhất, được đo bằng mét. Các khu vực gần sông suối thường có nguy cơ ngập lụt cao hơn do dễ bị ảnh hưởng bởi mực nước dâng cao. Trong GIS, đặc trưng này được tính toán bằng cách sử dụng các thuật toán phân tích không gian, cụ thể là proximity analysis, dựa trên mạng lưới sông suối được trích xuất từ DEM.

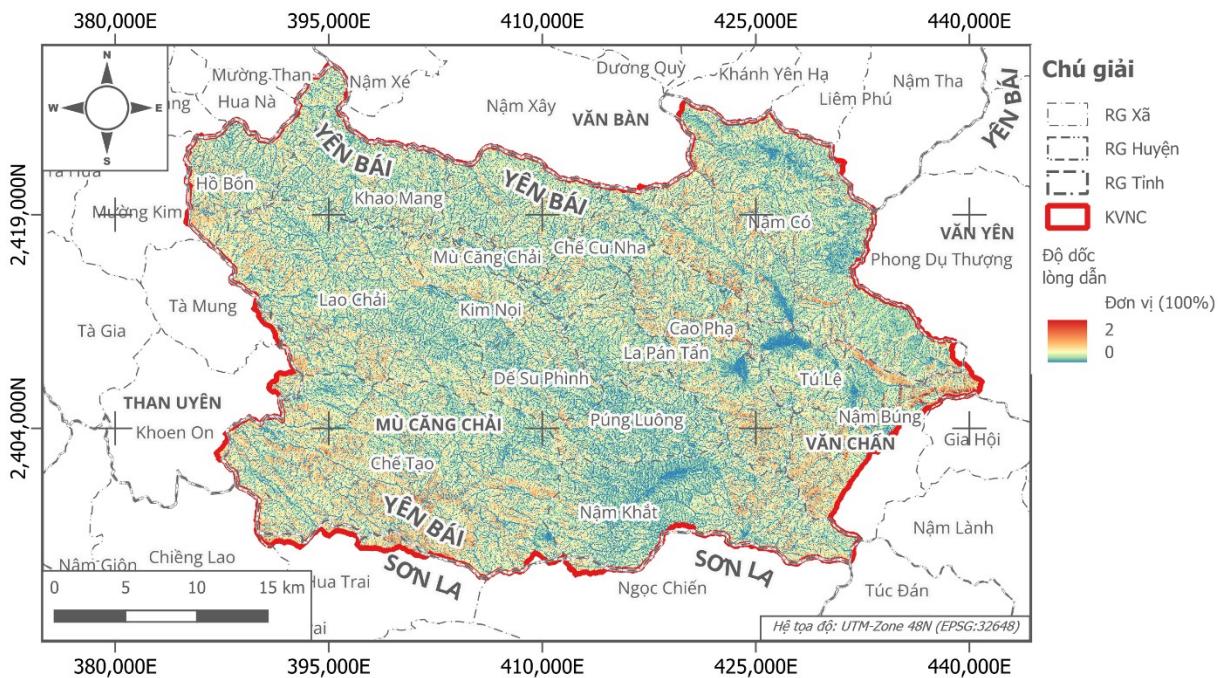
Mạng lưới sông, suối được phân tích từ địa hình theo nguyên lý thủy văn, theo độ phân giải $12,5 \times 12,5$ m trong nghiên cứu này, mạng lưới sông suối được trích xuất có tổng số ô lưới tích lũy (flow accumulation) là 100 ô lưới. Điều này đồng nghĩa là dòng suối bắt đầu từ vị trí mà có diện tích lưu vực thượng nguồn đạt tối thiểu là 15.625m^2 hay $0,015625\text{km}^2$. Kết quả xây dựng bản đồ khoảng cách đến sông, suối của từng vị trí được thể hiện trong Hình 45.



Hình 45. Khoảng cách đến sông, suối trong khu vực nghiên cứu

b. Độ dốc lòng dẫn

Độ dốc lòng dẫn là độ dốc của dòng chảy tại một điểm trên sông hoặc suối, ảnh hưởng đến tốc độ dòng chảy và khả năng thoát nước. Các dòng chảy có độ dốc thấp thường dẫn đến tích tụ nước, làm tăng nguy cơ ngập lụt. Đặc trưng này được tính toán từ DEM bằng cách phân tích mạng lưới dòng chảy và xác định độ dốc tại các điểm dọc theo sông suối.

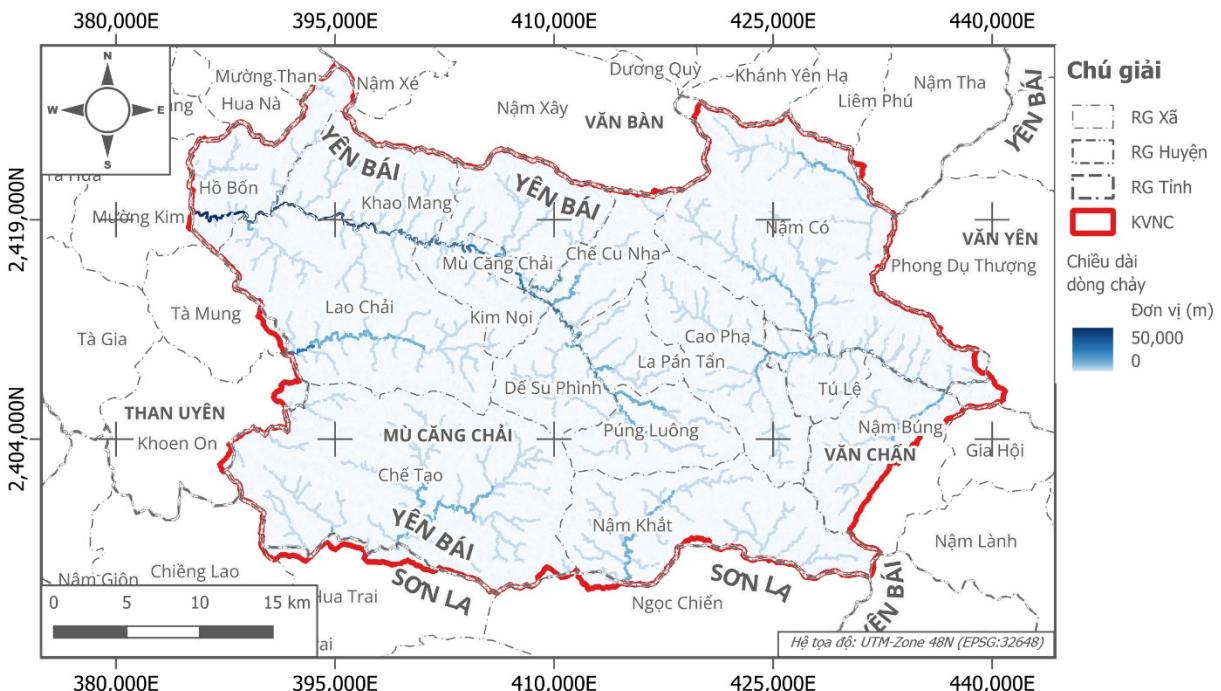


Hình 46. Độ dốc lòng dẫn khu vực nghiên cứu

Nghiên cứu này sử dụng độ dốc lòng dẫn tại một điểm bằng việc xác định hướng dòng chảy ngược về thượng nguồn và lấy trung bình độ dốc các điểm thuộc tuyến lòng dẫn để làm cơ sở xác định độ dốc lòng dẫn. Các suối có độ dốc lòng dẫn lớn dễ gây ra lũ quét hơn các suối có độ dốc nhỏ.

c. Chiều dài dòng chảy

Chiều dài dòng chảy là khoảng cách mà nước chảy từ một điểm nằm xa nhất trên đường phân thủy theo hướng dòng chảy đến điểm cần xác định. Nghiên cứu sử dụng thuật toán GIS kết hợp với D8 (hướng dòng chảy) để xác định chiều dài dòng chảy.



Hình 47. Chiều dài dòng chảy khu vực nghiên cứu

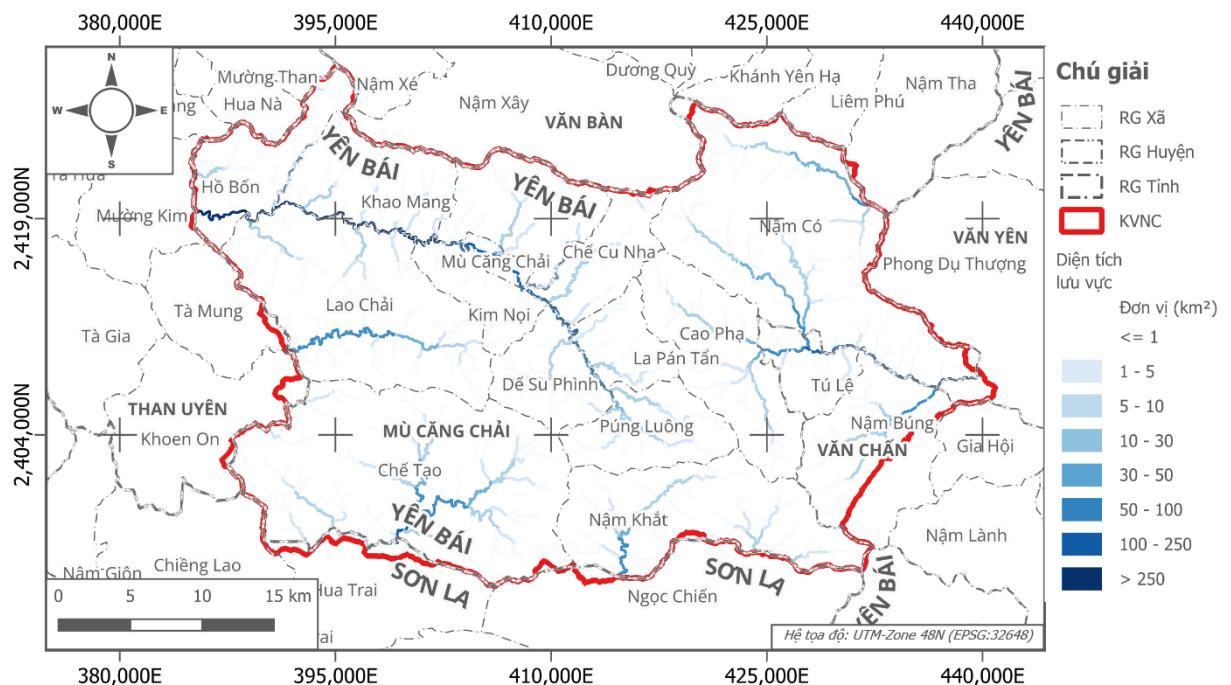
Theo thủy văn, chiều dài dòng chảy có tác động trực tiếp đến thời gian tập trung dòng chảy, đặc biệt trong nghiên cứu lũ quét, chiều dài dòng chảy là một trong các tham số quan trọng. Khi kết hợp với độ dốc lòng dẫn, việc ước tính thời gian tập trung dòng chảy dựa vào lượng mưa thường được thể hiện trong các tính toán thủy văn.

d. Diện tích lưu vực

Diện tích lưu vực là tổng diện tích của khu vực đóng góp dòng chảy vào một điểm cụ thể, được đo bằng mét vuông hoặc kilômét vuông. Lưu vực lớn hơn thường thu nhận lượng nước lớn hơn trong các sự kiện mưa, làm tăng nguy cơ lũ lụt. Đặc trưng này được trích xuất từ DEM bằng cách sử dụng các công cụ phân tích thủy văn như flow accumulation và kích thước pixel tính toán.

Flow accumulation là một số biểu thị tổng số lượng pixel có hướng dòng chảy đi qua nó. Do đó, giá trị này cũng biểu thị số lượng pixel trong một lưu vực mà tại đó là cửa ra của lưu vực. Khi đó, mỗi pixel sẽ có một diện tích (ở độ phân giải 12,5x12,5, diện tích

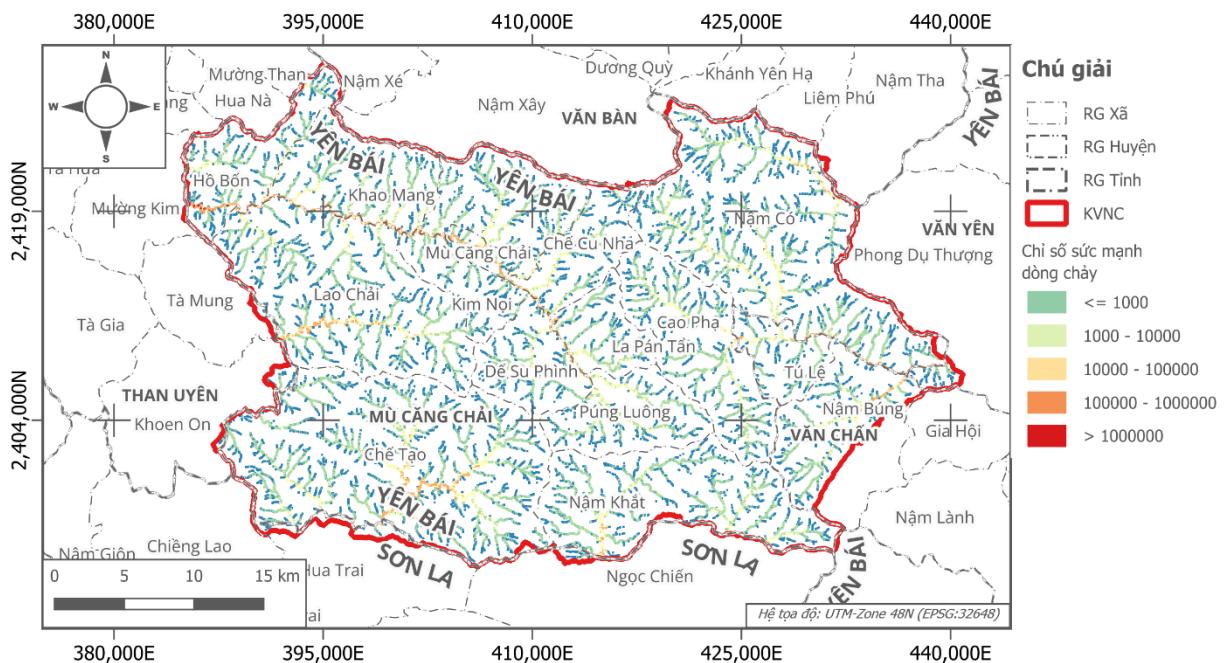
một pixel là 156,25m²). Tích số Flow accumulation và diện tích một pixel chính là bản đồ diện tích lưu vực cho khu vực nghiên cứu.



Hình 48. Bản đồ diện tích lưu vực khu vực nghiên cứu

e. Chỉ số sức mạnh dòng chảy

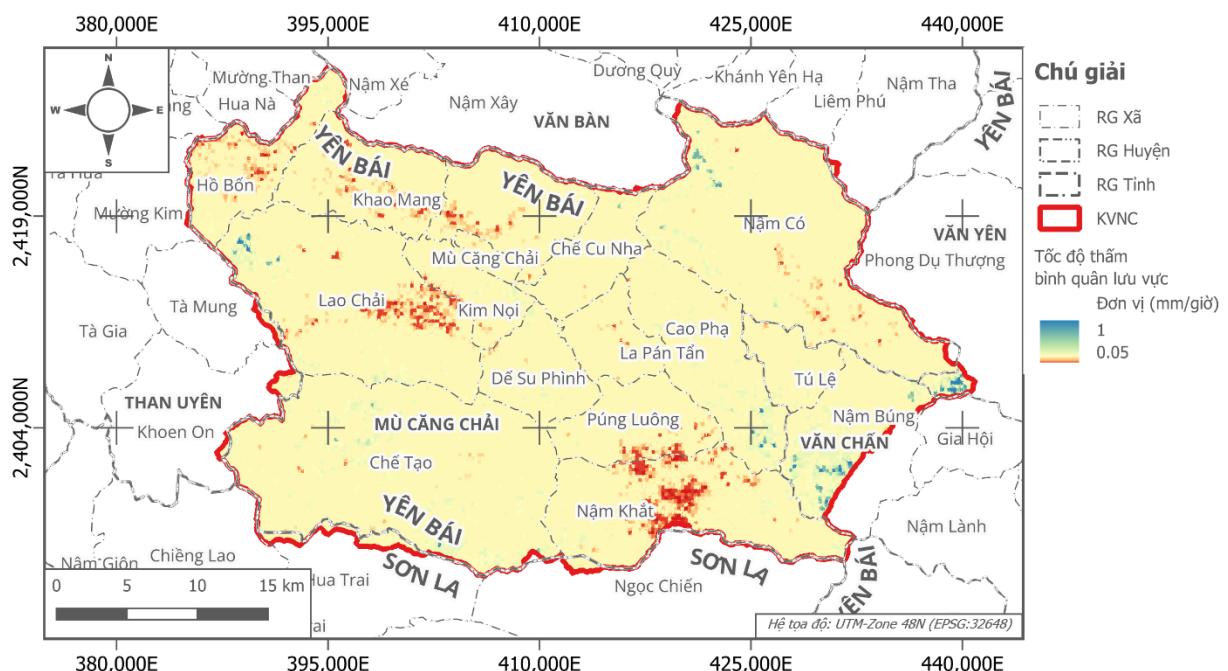
Chỉ số sức mạnh dòng chảy (Stream Power Index - SPI) đo lường khả năng xói mòn hoặc vận chuyển của dòng chảy. SPI cao biểu thị các khu vực có dòng chảy mạnh, có thể dẫn đến xói mòn hoặc lũ quét, trong khi SPI thấp liên quan đến tích tụ nước và ngập lụt.



Hình 49. Chỉ số sức mạnh dòng chảy SPI trên khu vực nghiên cứu

f. Tốc độ thẩm bình quân lưu vực

Tốc độ thấm bình quân đo lường khả năng của đất trong việc hấp thụ nước, được xác định dựa trên loại đất, cấu trúc địa chất, và thực phủ. Các khu vực có tốc độ thấm thấp (như đất sét) dễ bị ngập lụt hơn do nước không thể thấm xuống đất nhanh chóng. Đặc trưng này thường được trích xuất từ bản đồ đất, sau đó được ánh xạ lên lưới raster và cuối cùng là tổng hợp dữ liệu theo lưu vực. Như vậy, lưu vực nào có tốc độ thấm cao sẽ có nguy cơ sinh lũ thấp hơn các lưu vực có độ thấm thấp.



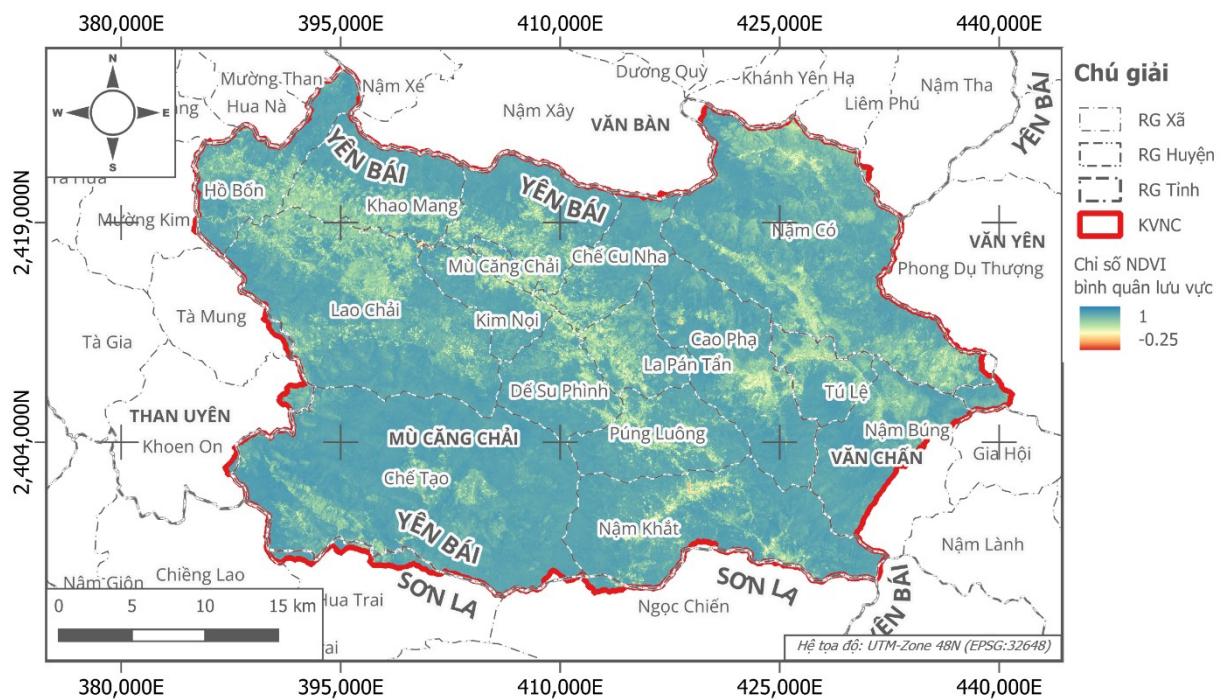
Hình 50. Tốc độ thẩm bình quân lưu vực

3. Đặc trưng thực phủ:

Các đặc trưng thực phủ phản ánh mức độ che phủ của thảm thực vật và các đặc tính bề mặt liên quan đến khả năng giữ nước hoặc thoát nước.

a. Chỉ số NDVI bình quân lưu vực

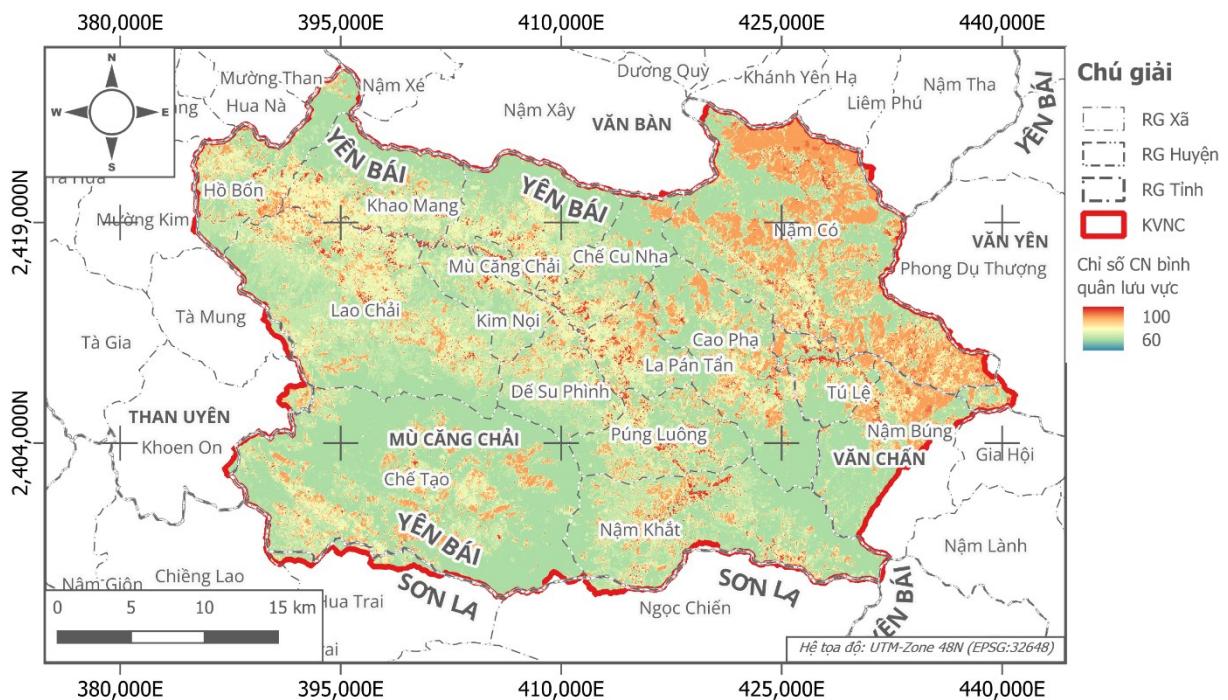
Chỉ số NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) đo lường mức độ che phủ của thảm thực vật dựa trên sự khác biệt giữa phản xạ ánh sáng ở dải hồng ngoại gần và dải đỏ. NDVI cao biểu thị thảm thực vật dày đặc, giúp giảm nguy cơ lũ lụt do khả năng giữ nước và giảm dòng chảy bè mặt. Dữ liệu NDVI thường được thu thập từ hình ảnh vệ tinh như Landsat hoặc Sentinel-2, với độ phân giải không gian phù hợp để phân tích khu vực. Nghiên cứu này sử dụng dữ liệu ảnh Sentinel-2 với độ phân giải 10m để xác định chỉ số NDVI



Hình 51. Chỉ số NDVI bình quân lưu vực khu vực nghiên cứu

b. Chỉ số CN bình quân lưu vực

Chỉ số CN (Curve Number) là một tham số thủy văn biểu thị khả năng giữ nước của bề mặt đất, dựa trên loại đất, thực phủ, và điều kiện sử dụng đất. CN có giá trị từ 0 đến 100, với giá trị cao hơn biểu thị khả năng giữ nước thấp (như khu vực đô thị hóa) và nguy cơ lũ lụt cao hơn. CN thường được lấy từ các bảng tra cứu của USDA hoặc tính toán dựa trên bản đồ đất và thực phủ.

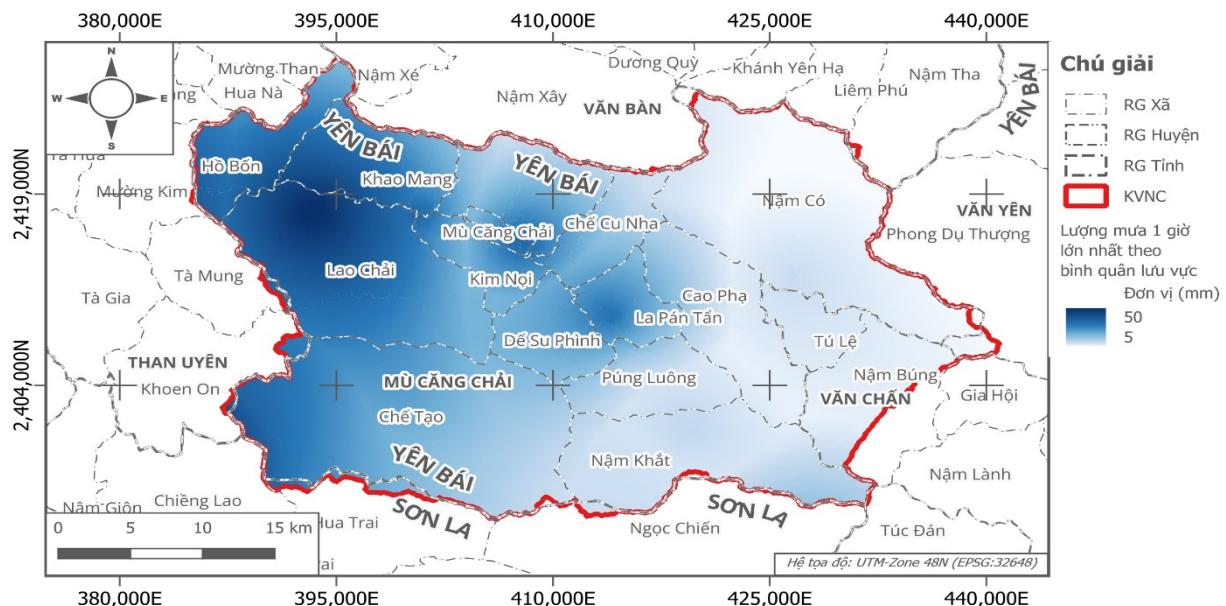


Hình 52. Chỉ số CN bình quân lưu vực

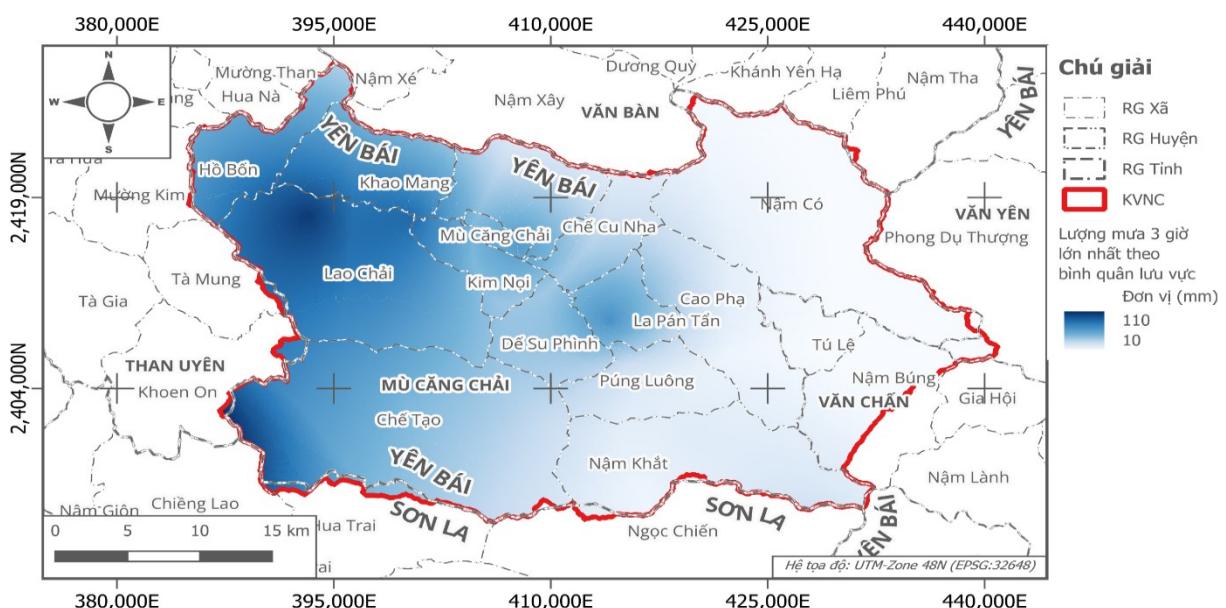
4. Đặc trưng khí tượng:

a. Lượng mưa giờ lớn nhất

Lượng mưa giờ lớn nhất là lượng mưa lớn nhất ghi nhận trong một giờ tại một điểm, được đo bằng milimet. Đặc trưng này phản ánh cường độ mưa cực đại, có thể gây ra lũ quét hoặc ngập lụt đô thị. Trong nghiên cứu này, nhóm nghiên cứu sử dụng lượng mưa giờ lớn nhất trước thời điểm xảy ra lũ quét năm 2023 nằm trong khoảng thời gian tập trung dòng chảy của lưu vực.



Hình 53. Lượng mưa 1 giờ lớn nhất trận lũ 05/08/2023

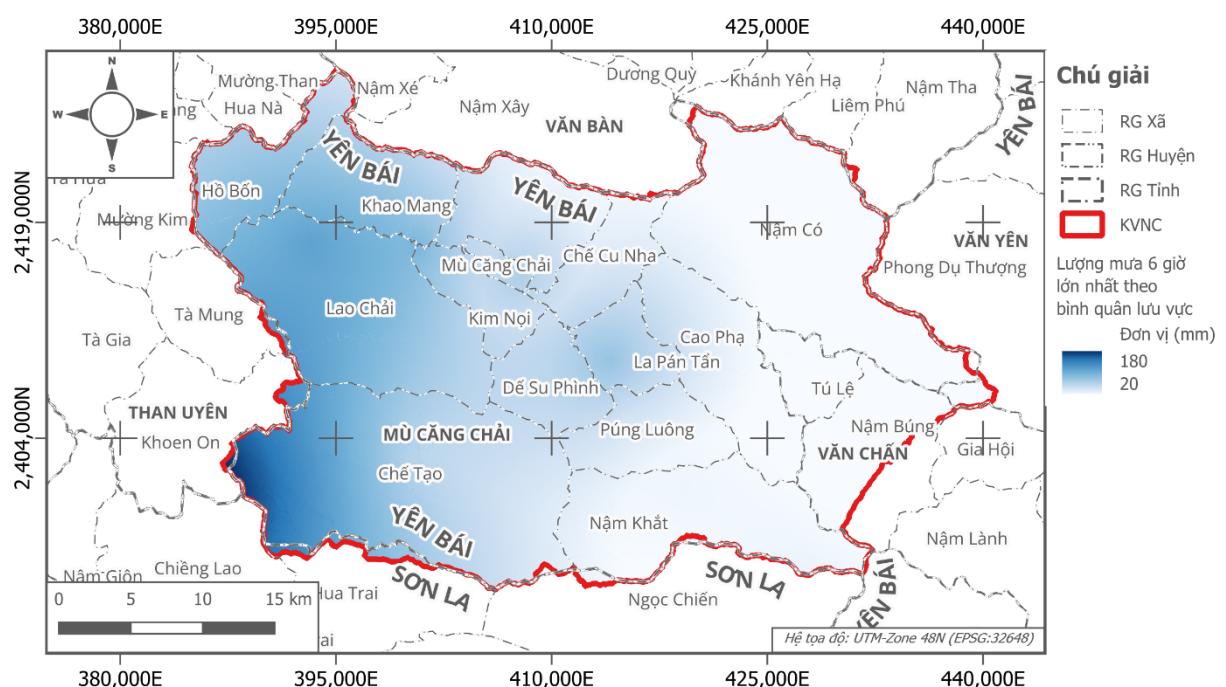


Hình 54. Tổng lượng mưa 3 giờ lớn nhất trận lũ 05/08/2023

Lượng mưa 3 giờ lớn nhất đo lường tổng lượng mưa trong khung thời gian 3 giờ liên tục lớn nhất. Đặc trưng này quan trọng trong việc đánh giá các sự kiện mưa ngắn hạn nhưng có cường độ cao, thường liên quan đến lũ quét.

b. Lượng mưa 6 giờ lớn nhất

Tương tự, lượng mưa 6 giờ lớn nhất đo lường lượng mưa trong khung thời gian 6 giờ. Đặc trưng này hữu ích trong việc đánh giá các sự kiện mưa kéo dài hơn, có thể gây ngập lụt ở các khu vực đồng bằng hoặc lưu vực lớn.

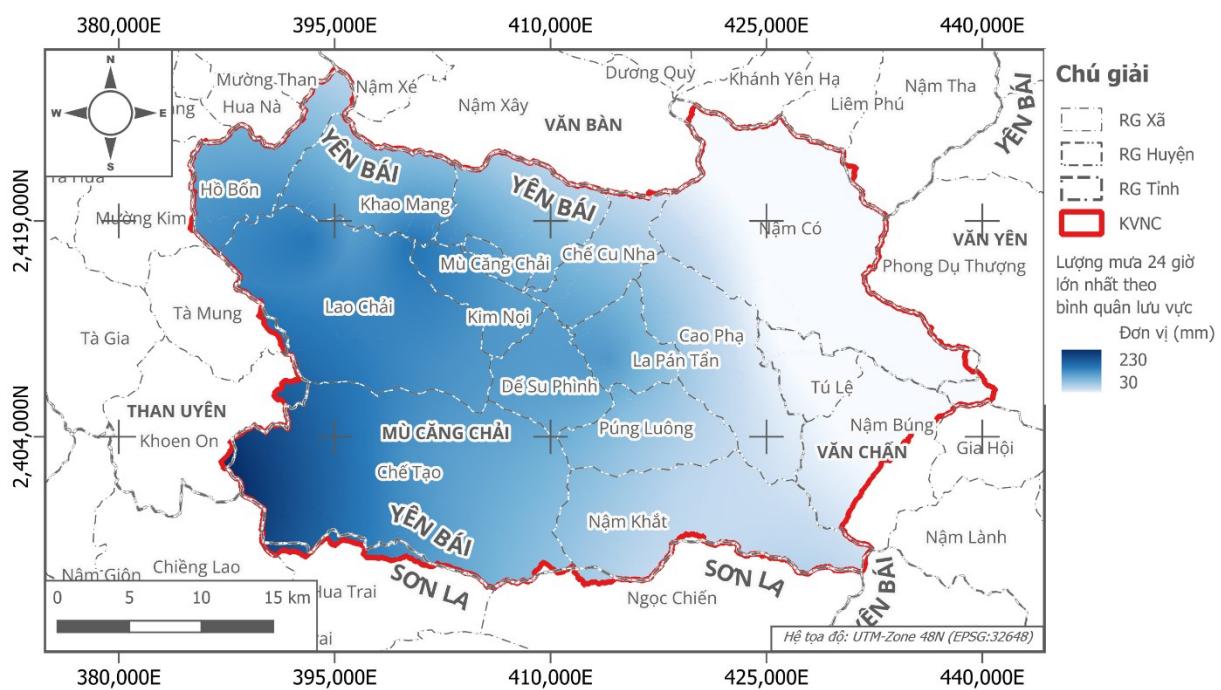


Hình 55. Tổng lượng mưa 6 giờ lớn nhất trận lũ 05/08/2023

Như vậy, trong vòng 6 giờ, lượng mưa tích lũy tại khu vực phía Đông giáp tỉnh Sơn La lên tới hơn 180mm. Đây là lượng mưa rất lớn gây ảnh hưởng trong khu vực, không chỉ vậy, lượng mưa lớn nhất 3 giờ đạt 110mm và mưa giờ lớn nhất là hơn 50mm tại khu vực xã Lao Chải và xã Hồ Bón có thể là nguyên nhân chính gây ra trận lũ quét tại xã Hồ Bón năm 2023.

c. Lượng mưa 24 giờ lớn nhất

Lượng mưa 24 giờ lớn nhất phản ánh tổng lượng mưa trong một ngày, là yếu tố chính trong các sự kiện lũ lụt quy mô lớn. Đặc trưng này đặc biệt quan trọng trong việc dự đoán lũ sông hoặc ngập lụt trên diện rộng.



Hình 56. Tổng lượng mưa 24 giờ lớn nhất trận lũ 05/08/2023

KẾT LUẬN, KIẾN NGHỊ

Báo cáo đã thực hiện tổng quan toàn diện về dữ liệu địa không gian, bao gồm các loại ảnh viễn thám (quang học, radar, nhiệt hồng ngoại, vi ba thụ động) và dữ liệu địa không gian khác, đồng thời xác định rõ vai trò quan trọng của chúng trong phân vùng lũ quét. Cấu trúc của các loại ảnh viễn thám đã được đánh giá kỹ lưỡng, cung cấp cơ sở khoa học cho việc ứng dụng.

Mô hình CNN được xây dựng để tạo bản đồ thảm phủ từ ảnh viễn thám đạt độ chính xác cao (98.68% huấn luyện và 98.32% xác thực sau 50 epoch), phân loại thành 7 lớp thảm phủ theo tiêu chuẩn của Dịch vụ Bảo tồn Tài nguyên Thiên nhiên Hoa Kỳ (NRCS), bao gồm: mặt nước (hồ, sông, đầm lầy), rừng rậm (điều kiện tốt), đất trống (fallow hoặc không có thực vật), khu xây dựng (bè mặt không thảm nước), rừng thưa (điều kiện trung bình/ kém), ruộng bậc thang (đất canh tác với hệ thống terracing), và đất trồng lúa (đất canh tác ngập nước) từ với 16 chỉ số (NDVI, EVI, GNDVI, GRVI, NDWI1, NDWI2, GSI, NDBI, NDWI, BSI, Slope, Red, Green, Blue, VV, VH). Kết quả phân loại này sẽ được kết hợp với bản đồ nhóm đất thủy văn nhằm xác định chỉ số CN trong các công việc tiếp theo, đồng thời chỉ số NDVI ở trên cũng được xác định làm đầu vào để phân vùng lũ quét.

Ngoài ra, báo cáo đã thành công trong việc xây dựng 20 bản đồ thành phần, bao gồm các tham số địa hình, thủy văn, khí tượng và đặc tính watershed, như: eleStream (độ cao so với sông suối gần nhất), disStream (khoảng cách đến sông suối), wSlope (độ dốc trung bình watershed), streamSlope (độ dốc dòng chảy), flowLength (chiều dài dòng chảy), area (diện tích lưu vực), twi (chỉ số độ ẩm địa hình), spi (chỉ số năng lượng dòng chảy), tpi (chỉ số vị trí địa hình), wNdvi (chỉ số thực vật trung bình lưu vực), wCN (chỉ số CN trung bình lưu vực), wInfiRate (tốc độ thẩm trung bình lưu vực), dem (mô hình độ cao số), eleWatershed (độ cao trung bình lưu vực), profCurvature (độ cong mặt cắt), planCurvature (độ cong ngang), max_precip (lượng mưa tối đa), max_3h_precip, max_6h_precip, max_24h_precip (lượng mưa tích lũy tối đa trong 3, 6 và 24 giờ). Những tham số này, đặc biệt là các yếu tố mang tính thủy văn như wCN, wInfiRate, flowLength và các chỉ số mưa, đóng vai trò then chốt trong việc mô phỏng các quá trình thủy văn và cung cấp đầu vào đáng tin cậy cho các mô hình AI trong phân vùng lũ quét.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bakri Bashir, Mohammed, Latiff, Muhammad Shafie Bin Abd, Coulibaly, Yahaya and Yousif, Adil, "A survey of grid-based searching techniques for large scale distributed data," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 60, no. , p. 170–179, 2016, DOI:10.1016/j.jnca.2015.10.010.
- [2] Stock, Kristin and Guesgen, Hans, "Geospatial Reasoning With Open Data," in *Automating Open Source Intelligence*, Elsevier, 2016, DOI:10.1016/b978-0-12-802916-9.00010-5, p. 171–204.
- [3] Wikipedia, "Nadar," Wikipedia, [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nadar>. [Truy cập 15/06/2023].
- [4] White, Jack, "Herschel and the Puzzle of Infrared," *American Scientist*, vol. 100, no. 3, p. 218, 2012, DOI:10.1511/2012.96.218.
- [5] Davidson, Michael W., "Pioneers in Optics: Louis Daguerre and George Eastman," *Microscopy Today*, vol. 18, no. 2, p. 48–49, 2010, DOI:10.1017/s1551929510000118.
- [6] Philip McCouat, "The adventures of Nadar: photography, ballooning, invention and the impressionists," *Journal of Art in Society*, 2016, www.artinsociety.com.
- [7] Maxwell, James Clerk, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Cambridge University Press, 2010, DOI:10.1017/cbo9780511709333.
- [8] Christopher Turner, "George R. Lawrence, Aeronaut Photographer," *Cabinet*, [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://www.cabinetmagazine.org/issues/32/turner.php>. [Truy cập 02/07/2023].
- [9] Kock, Winston E., "Radar," in *The Creative Engineer*, Springer US, 1978, DOI:10.1007/978-1-4615-8792-7_10, p. 219–238.
- [10] Sliney, David H., Bitran, Maurice and Murray, William, *Infrared, Visible, and Ultraviolet Radiation*, Wiley, 2012.
- [11] Heppener, Marc, "Spaceward ho!: The future of humans in space," *EMBO reports*, vol. 9, no. S1, p. , 2008, DOI:10.1038/embor.2008.98.
- [12] Fussell, J., Rundquist and D., & Harrington, J. A., "On defining remote sensing," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 92, no. 9, p. 1507–1511, 1986.
- [13] Landsat Science, "Landsat 1," Landsat Science, [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-1/>. [Truy cập 23/07/2023].
- [14] Riddhish Chetan Soni, "Remote Sensing And Satellite Based Meteorology in India," [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://img.nsdc.org.cn/PORTAL/NSMC/DOC/CONFERENCE/FYSUF/2019/14_India.pdf. [Truy cập 15/07/2023].

- [15] W. Paul Menzel, "Remote Sensing Applications with Meteorological Satellites," [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://cimss.ssec.wisc.edu/rss/geoss/source/Menzel_Satellite_Applications_Book.pdf. [Truy cập 20/07/2023].
- [16] Levizzani, Vincenzo and Cattani, Elsa, "Satellite Remote Sensing of Precipitation and the Terrestrial Water Cycle in a Changing Climate," *Remote Sensing*, vol. 11, no. 19, p. 2301, 2019, DOI:10.3390/rs11192301.
- [17] Thies, B. and Bendix, Jörg, "Satellite based remote sensing of weather and climate: recent achievements and future perspectives," *Meteorological Applications*, vol. 18, no. 3, pp. 262-295, 2011, DOI:10.1002/met.288.
- [18] Sivakumar, M. V. K. and et all., "Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology," [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://www.unisdr.org/files/1682_9970.pdf. [Truy cập 21/08/2023].
- [19] Thông tư 25/2014/TT-BTNMT ngày 19/5/2014 của Bộ TN&MT về bản đồ địa chính, 2014.
- [20] Bùi Xuân Dũng, "Đặc điểm thám nước của đất dưới một số loại hình sử dụng đất tại núi Luốt, Xuân Mai, Hà Nội," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ lâm nghiệp*, vol. 4, p. 47÷58, 2016.
- [21] Noori, Abbas, Ziboon, Abdul Razzak and AL-Hameedawi, Amjad, "Assessment of flash flood detection in Erbil city using change detection indices for SAR images," *Engineering and Technology Journal*, vol. 0, no. 0, p. 1÷9, 2024, DOI:10.30684/etj.2024.151205.1777.
- [22] Elkhrachy, Ismail, Pham, Quoc Bao, Costache, Romulus, Mohajane, Meriame, Rahman, Khalil Ur, Shahabi, Himan, Linh, Nguyen Thi Thuy and Anh, Duong Tran, "Sentinel-1 remote sensing data and Hydrologic Engineering Centres River Analysis System two-dimensional integration for flash flood detection and modelling in New Cairo City, Egypt," *Journal of Flood Risk Management*, vol. 14, no. 2, p. , 2021, DOI:10.1111/jfr3.12692.
- [23] Gabriele, Marzia, "DETECTING AND MAPPING FLASH FLOODING WITH SYNTHETIC APERTURE RADAR (SAR) SATELLITE DATA: THE METAPONTO PLAIN CULTURAL LANDSCAPE CASE STUDY," in *Proceedings ARQUEOLÓGICA 2.0 - 9th International Congress & 3rd GEORES - GEOMatics and pREServation*, 2021, DOI:10.4995/arqueologica9.2021.12115.
- [24] Atefi, Mujeeb Rahman and Miura, Hiroyuki, "Detection of Flash Flood Inundated Areas Using Relative Difference in NDVI from Sentinel-2 Images: A Case Study of the August 2020 Event in Charikar, Afghanistan," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 15, p. 3647, 2022, DOI:10.3390/rs14153647.
- [25] Elstohy, Rasha and Ali, Eman M., "A flash flood detected area using classification-based image processing for sentinel-2 satellites data: A case study of Zafaraana Road at Red Sea," *The Egyptian Journal of Remote Sensing and*

- [26] Tügel, Franziska, Hadidi, Ahmed, Özgen-Xian, Ilhan, Hou, Jingming and Hinkelmann, Reinhard, "Validation of Flash Flood Simulations Using Satellite Images and Community-Based Observations—Impact of Infiltration and Small-Scale Topographical Features," in *Wadi Flash Floods*, Springer Singapore, 2021, DOI:10.1007/978-981-16-2904-4_6, pp. 183-207.
- [27] Javier Hervas and Peter Bobrowsky, "Mapping: Inventories, Susceptibility, Hazard and Risk," in *Landslides - Disaster Risk Reduction*, 2009, pp. 321-349.
- [28] Bashir, Bashar and Alsalmam, Abdullah, "Morpho-Hydrological Analysis and Preliminary Flash Flood Hazard Mapping of Neom City, Northwestern Saudi Arabia, Using Geospatial Techniques," *Sustainability*, vol. 16, no. 1, p. 23, 2023, DOI:10.3390/su16010023.
- [29] Tariq, Aqil, Hashemi Beni, Leila, Ali, Shoaib, Adnan, Shahzada and Hatamleh, Wesam Atef, "An effective geospatial-based flash flood susceptibility assessment with hydrogeomorphic responses on groundwater recharge," *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 23, no. , p. 100998, 2023, DOI:10.1016/j.gsd.2023.100998.
- [30] Shawky, Mohamed and Hassan, Quazi K., "Geospatial Modeling Based-Multi-Criteria Decision-Making for Flash Flood Susceptibility Zonation in an Arid Area," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 10, p. 2561, 2023, DOI:10.3390/rs15102561.
- [31] Nguyen, Tien-thanh, Hoang, Anh-huy, Pham, Thi-thu-huong and Tran, Thi-thu-trang, "Flash Flood Hazard Mapping Using Landsat-8 Imagery, Ahp, And Gis In The Ngan Sau And Ngan Pho River Basins, North-Central Vietnam," *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY*, vol. 16, no. 2, p. 57÷67, 2023, DOI:10.24057/2071-9388-2022-117.
- [32] Scofield, Roderick A. and Achutuni, Rao, "The satellite forecasting funnel approach for predicting flash floods," *Remote Sensing Reviews*, vol. 14, no. 1-3, pp. 251-282, 1996, DOI:10.1080/02757259609532320.
- [33] OSPO, "Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES)," Office of Satellite And Product Operations, [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://www.ospo.noaa.gov/operations/goes/>. [Truy cập 12/12/2023].
- [34] Youssef, Ahmed M., Pradhan, Biswajeet and Hassan, Abdallah Mohamed, "Flash flood risk estimation along the St. Katherine road, southern Sinai, Egypt using GIS based morphometry and satellite imagery," *Environmental Earth Sciences*, vol. 62, no. 3, p. 611÷623, 2010, DOI:10.1007/s12665-010-0551-1.
- [35] Hamouda, Mohamed A., Hinge, Gilbert, Yemane, Henok S., Al Mosteka, Hasan, Makki, Mohammed and Mohamed, Mohamed M., "Reliability of GPM IMERG Satellite Precipitation Data for Modelling Flash Flood Events in Selected

Watersheds in the UAE," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 16, p. 3991, 2023, DOI:10.3390/rs15163991.

- [36] Ziv, Shlomi Ziskin and Reuveni, Yuval, "Flash Floods Prediction Using Precipitable Water Vapor Derived From GPS Tropospheric Path Delays Over the Eastern Mediterranean," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, no. , p. 1÷17, 2022, DOI:10.1109/tgrs.2022.3201146.
- [37] Meyer, Judith, Neuper, Malte, Mathias, Luca, Zehe, Erwin and Pfister, Laurent, "Atmospheric conditions favouring extreme precipitation and flash floods in temperate regions of Europe," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 26, no. 23, p. 6163÷6183, 2022, DOI:10.5194/hess-26-6163-2022.
- [38] Sapountzis, M. and et al., "Utilization and uncertainties of satellite precipitation data in flash flood hydrological analysis in ungauged watersheds," *Global NEST: the international Journal*, vol. 23, no. 3, 2021, DOI:10.30955/gnj.003905.
- [39] Tang, Xuan, Yin, Zhaorui, Qin, Guanghua, Guo, Li and Li, Hongxia, "Integration of Satellite Precipitation Data and Deep Learning for Improving Flash Flood Simulation in a Poor-Gauged Mountainous Catchment," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 24, p. 5083, 2021, DOI:10.3390/rs13245083.
- [40] Chancay, Juseth E. and Espitia-Sarmiento, Edgar Fabian, "Improving Hourly Precipitation Estimates for Flash Flood Modeling in Data-Scarce Andean-Amazon Basins: An Integrative Framework Based on Machine Learning and Multiple Remotely Sensed Data," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 21, p. 4446, 2021, DOI:10.3390/rs13214446.
- [41] Bakheet, Adel and Sefelnasr, Ahmed, "Application of Remote Sensing data (GSMaP) to Flash Flood Modeling in an Arid Environment, Egypt," *The International Conference on Chemical and Environmental Engineering*, vol. 9, no. 6, p. 252÷272, 2018, DOI:10.21608/iccee.2018.34668.
- [42] Khanh Hung, Mai, Saito, Kazuo, Van Khiem, Mai, Duc Tien, Du and Viet Hung, Nguyen, "Application of GS MaP Satellite data in precipitation estimation and nowcasting: evaluations for October 2019 to January 2020 period for Vietnam," *Vietnam Journal of Hydrometeorology*, vol. 5, no. 5, p. 80÷94, 2020, DOI:10.36335/vnjhm.2020(5).80-94.
- [43] Zhao, Gang, Liu, Ronghua, Yang, Mingxiang, Tu, Tongbi, Ma, Meihong, Hong, Yang and Wang, Xiekang, "Large-scale flash flood warning in China using deep learning," *Journal of Hydrology*, vol. 604, p. 127222, 2022, DOI:10.1016/j.jhydrol.2021.127222.
- [44] Tekeli, Ahmet Emre and Fouli, Hesham, "Evaluation of TRMM satellite-based precipitation indexes for flood forecasting over Riyadh City, Saudi Arabia," *Journal of Hydrology*, vol. 541, no. , p. 471÷479, 2016, DOI:10.1016/j.jhydrol.2016.01.014.

- [45] NRCS, "Part 630 - Hydrology," 3/2020. [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1712930634/Part%20630%20-%20Hydrology.pdf>. [Truy cập 11/12/2023].
- [46] He, Fei, Liu, Suxia, Mo, Xingguo and Wang, Zhonggen, "Interpretable flash flood susceptibility mapping in Yarlung Tsangpo River Basin using H2O Auto-ML," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, p. , 2025. DOI:10.1038/s41598-024-84655-y.
- [47] Alarifi, Saad S., Abdelkareem, Mohamed, Abdalla, Fathy and Alotaibi, Mislat, "Flash Flood Hazard Mapping Using Remote Sensing and GIS Techniques in Southwestern Saudi Arabia," *Sustainability*, vol. 14, no. 21, p. 14145, 2022. DOI:10.3390/su142114145.
- [48] Petr Sercl, Martin Pecha, Petr Novak, Hana Kyznarova, Ondrej Ledvinka, Vojtech Svoboda and Jan Danhelka, "Flash Flood Indicator," Czech Hydrometeorological Institute, Prague, 2023. Địa chỉ: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/nakladatelstvi/assets/ffi.pdf>.
- [49] Han J., Kamber M. and Pei J., Data Mining: Concepts and Techniques, Elsevier, 2012. DOI:10.1016/c2009-0-61819-5.
- [50] T. Hastie, R. Tibshirani and J. Friedman, "Model Assessment and Selection," in *The Elements of Statistical Learning*, Springer New York, 2008, pp. 219-259. DOI:10.1007/978-0-387-84858-7_7.
- [51] Pedregosa, Fabian, "Scikit-learn: Machine Learning in Python," 2012.
- [52] Box G. E. P. and Cox D. R., "An Analysis of Transformations," *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, vol. 26, no. 2, pp. 211-252, 1964. Địa chỉ: <https://www.ime.usp.br/~abe/lista/pdfQWaCMboK68.pdf>.
- [53] In-Kwon Yeo and Richard A. Johnson, "A New Family of Power Transformations to Improve Normality or Symmetry," *Biometrika*, vol. 87, no. 4, pp. 954-959, 2000. Địa chỉ: <https://www.jstor.org/stable/2673623>.