

**ECOLOGICAL ADAPTATION
ASSESSMENT FOR ARABICA COFFEE
DEVELOPMENT IN MAI SON
DISTRICT, SON LA PROVINCE**

Ngô Thị Hai Yên^{*1}, Phạm Anh Tuấn²,
Bùi Thị Hồng Tuyết³, Lưu Ngọc Trà³
and Lý Thuý Nga³

¹Department of Geography, Hanoi National
University of Education, Hanoi city, Vietnam

²Faculty of Social Sciences, Northwest
University, Son La province, Vietnam

³K72 HQP, Department of Geography,
Hanoi National University of Education,
Hanoi city, Vietnam

*Corresponding Author: Ngô Thị Hải Yến,
email: haiyen@hnue.edu.vn

**ĐÁNH GIÁ THÍCH NGHI SINH THÁI
ĐỂ PHÁT TRIỂN CÂY CÀ PHÊ
ARABICA Ở HUYỆN MAI SƠN,
TỈNH SƠN LA**

Ngô Thị Hải Yến^{*1}, Phạm Anh Tuấn²,
Bùi Thị Hồng Tuyết³, Lưu Ngọc Trà³
và Lý Thuý Nga³,

¹Khoa Địa lí, Trường Đại học Sư phạm
Hà Nội, thành phố Hà Nội, Việt Nam

²Khoa Khoa học Xã hội, Trường Đại học
Tây Bắc, tỉnh Sơn La, Việt Nam

³K72 CLC, Khoa Địa lí, Trường Đại học
Sư phạm Hà Nội, thành phố Hà Nội, Việt Nam

*Tác giả liên hệ: Ngô Thị Hải Yến,
email: haiyen@hnue.edu.vn

Received April 15, 2025.

Revised May 3, 2025.

Accepted May 5, 2025.

Ngày nhận bài: 15/4/2025.

Ngày sửa bài: 3/5/2025.

Ngày nhận đăng: 5/5/2025.

Abstract. This study evaluated the ecological adaptation level of Arabica coffee in Mai Son district, Son La province, by integrating the multi-criteria decision-making (MCDM) method, the hierarchical process (AHP), and the Geographic Information System (GIS). The study identifies ecological factors influencing Arabica coffee growth to develop a zoning map of ecological suitability in the study region. The results indicate that 44.9% of the natural area is classified as high adaptation level (S1), while 32.6% is medium adaptation level (S2). The resulting map was validated through field verification at 51 points, achieving an overall accuracy of 88%. These findings provide a critical scientific basis for land use planning, production optimization, and promotion of sustainable agricultural development in the Mai Son district.

Keywords: AHP, Coffea Arabica, GIS, Mai Son, MCDM, Economic development, Ecological suitability.

Tóm tắt. Nghiên cứu này đánh giá mức độ thích nghi sinh thái của cây cà phê Arabica tại huyện Mai Sơn, tỉnh Sơn La, bằng cách tích hợp phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (MCDM), quy trình phân cấp thứ bậc (AHP) và Hệ thống thông tin địa lí (GIS). Nghiên cứu đã xác định các yếu tố sinh thái ảnh hưởng đến sự sinh trưởng để từ đó xây dựng bản đồ phân vùng thích nghi sinh thái của cây cà phê Arabica ở địa bàn nghiên cứu. Kết quả cho thấy 44,9% diện tích tự nhiên của huyện Mai Sơn có mức độ thích nghi (S1) và 32,6% có mức độ thích nghi trung bình (S2). Bản đồ kết quả được kiểm chứng thực địa tại 51 điểm, đạt độ chính xác tổng thể 88%. Những phát hiện này cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho công tác quy hoạch sử dụng đất, tối ưu hóa sản xuất và thúc đẩy phát triển nông nghiệp bền vững tại huyện Mai Sơn.

Từ khóa: AHP, Coffea Arabica, GIS, Mai Sơn, MCDM, phát triển kinh tế, phù hợp sinh thái.

1. Mở đầu

Cà phê Arabica là một trong những cây trồng nhiệt đới có vai trò quan trọng trong kim ngạch xuất khẩu và sinh kế của hàng triệu nông dân ở các quốc gia đang phát triển, trong đó có Việt Nam [1], [2]. Cà phê Arabica được ưu tiên phát triển ở các vùng có khí hậu mát mẻ, đất đai giàu dinh dưỡng ở khu vực độ cao từ 600 đến 1.800m [3]. Hiện nay, ngành sản xuất cà phê toàn cầu đang đối mặt với các thách thức nghiêm trọng từ biến đổi khí hậu, bao gồm sự gia tăng nhiệt độ, thay đổi lượng mưa và tần suất gia tăng của các hiện tượng thời tiết cực đoan. Những yếu tố khí hậu trên đặt ra yêu cầu cấp thiết về các giải pháp canh tác bền vững, dựa trên cơ sở khoa học để tối ưu hóa sản xuất [4].

Huyện Mai Sơn, tỉnh Sơn La, có địa hình đồi núi đa dạng với độ cao từ 600 đến 1.200 m, khí hậu nhiệt đới gió mùa thuận lợi để phát triển cây công nghiệp dài ngày như cà phê Arabica. Hiện nay, cà phê Arabica đã trở thành nguồn thu nhập chính cho nhiều hộ dân tại huyện Mai Sơn nhờ khai thác tốt tiềm năng về đất feralit đỏ vàng giàu dinh dưỡng và khí hậu mát mẻ. Tuy nhiên, việc phát triển và mở rộng diện tích trồng cà phê tại Mai Sơn chủ yếu dựa trên kinh nghiệm, tự phát, thiếu các quy hoạch khoa học, dẫn đến canh tác trên các khu vực có điều kiện sinh thái không tối ưu làm lãng phí tài nguyên và hiệu quả kinh tế thấp [5]. Do đó, việc đánh giá thích nghi sinh thái cho cây cà phê Arabica là cần thiết để định hướng quy hoạch sử dụng đất bền vững, giảm thiểu rủi ro môi trường, và nâng cao hiệu quả kinh tế cho nông dân.

Trên thế giới, đã có nhiều nghiên cứu về xác định vùng thích nghi sinh thái cho cây cà phê Arabica. Ở Trung Quốc, các mô hình đánh giá đa tiêu chí (MCDM) kết hợp với công nghệ GIS và viễn thám đã được ứng dụng thành công để xây dựng bản đồ thích nghi, hỗ trợ quy hoạch sản xuất cà phê trong bối cảnh biến đổi khí hậu [6], [7]. Ở Ethiopia, các nghiên cứu không chỉ tập trung vào phân vùng sinh thái hiện tại mà còn dự báo các vùng tiềm năng cho cà phê Arabica trong tương lai dựa trên kịch bản khí hậu [8]. Ở Việt Nam, các nghiên cứu về cà phê chủ yếu tập trung vào khu vực Tây Nguyên, nơi sản xuất cà phê Robusta chiếm ưu thế, với một số công trình đánh giá thích nghi sinh thái cho cà phê tại tỉnh Đắk Lắk [9]. Tuy nhiên, đối với khu vực miền núi như Mai Sơn, các nghiên cứu về thích nghi sinh thái của cà phê Arabica còn hạn chế, chưa phân tích hệ thống dựa trên các yếu tố sinh thái và không gian. Hơn nữa, các nghiên cứu về chỉ dẫn địa lý tại Việt Nam chủ yếu tập trung vào quy trình đăng ký, chưa kết nối chặt chẽ với quy hoạch vùng chuyên canh dựa trên đánh giá sinh thái [9]. Khoảng trống này đòi hỏi một cách tiếp cận mới, tích hợp dữ liệu không gian cập nhật với ý kiến chuyên gia, và các phương pháp phân tích hiện đại để cung cấp cơ sở khoa học cho phát triển cà phê Arabica tại Mai Sơn.

2. Nội dung nghiên cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu, nguồn dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1.1. Khu vực nghiên cứu

Huyện Mai Sơn nằm ở phía Nam của tỉnh Sơn La, trong khoảng từ 20°52'30" đến 21°20'50" vĩ độ Bắc và từ 103°41'30" đến 104°16'00" kinh độ Đông. Diện tích tự nhiên của Mai Sơn là 1.426,7 km², bao gồm một thị trấn và 21 xã, là khu vực có tiềm năng phát triển nông nghiệp đặc thù [2]. Địa hình Mai Sơn chủ yếu là đồi núi, với độ cao từ 600 đến 1.200 m so với mực nước biển, phù hợp với yêu cầu sinh thái của cây cà phê Arabica vốn ưa khí hậu mát mẻ và đất đai giàu dinh dưỡng [2]. Khí hậu khu vực thuộc kiểu nhiệt đới gió mùa, với nhiệt độ trung bình năm từ 20°C đến 23°C và lượng mưa hàng năm dao động từ 1.400 mm đến 1.800 mm, tập trung chủ yếu trong khoảng từ tháng 5 đến tháng 10. Về thổ nhưỡng, các loại đất chủ yếu ở Mai Sơn là đất feralit đỏ vàng (Fs) và feralit vàng đỏ (Fa), đặc trưng bởi hàm lượng dinh dưỡng cao, kết cấu, và khả năng giữ ẩm tốt, chiếm ưu thế trên các địa hình có độ dốc từ 8° đến 25°. Những đặc điểm này tạo điều kiện lý tưởng cho canh tác cà phê Arabica, một cây trồng đòi hỏi đất thoát nước tốt và đất

giàu chất hữu cơ. Kinh tế địa phương phụ thuộc chủ yếu vào nông nghiệp và lâm nghiệp, trong đó cà phê Arabica nổi lên như một cây trồng tiềm năng, đóng góp ngày càng quan trọng vào thu nhập của các hộ dân, đặc biệt tại các xã vùng cao. Tuy nhiên, để khai thác hiệu quả tiềm năng này, cần có các nghiên cứu đánh giá sinh thái và quy hoạch không gian nhằm đảm bảo phát triển bền vững và giảm thiểu rủi ro.

2.1.2. Nguồn dữ liệu phục vụ nghiên cứu

Để xây dựng bản đồ đánh giá thích nghi sinh thái cho cây cà phê Arabica, nghiên cứu này sử dụng đa dạng các nguồn dữ liệu. Các dữ liệu về khí hậu (nhiệt độ, lượng mưa), địa hình (độ cao, độ dốc), và thổ nhưỡng (loại đất, độ pH, độ dày tầng đất) được thu thập từ các nguồn uy tín, bao gồm USGS (Cơ quan Khảo sát Địa chất Hoa Kỳ), WorldClim (cơ sở dữ liệu khí hậu toàn cầu), và Sở Tài nguyên và Môi trường tỉnh Sơn La. Các dữ liệu về ranh giới hành chính và tình hình sản xuất cà phê tại huyện Mai Sơn cũng được cung cấp từ Sở Tài nguyên và Môi trường tỉnh Sơn La, đảm bảo tính cập nhật và phù hợp với bối cảnh địa phương. Ngoài ra, nghiên cứu tham chiếu tiêu chuẩn quốc gia TCVN 8409: 2010 để phân cấp các tiêu chí sinh thái. Tiêu chuẩn này cung cấp khung đánh giá khoa học, đảm bảo tính thống nhất và độ tin cậy trong việc xác định mức độ phù hợp của đất đai cho cây cà phê Arabica. Để bổ sung góc nhìn thực tiễn, nhóm nghiên cứu tiến hành phỏng vấn 08 chuyên gia về địa lý, nông nghiệp và thổ nhưỡng, thu thập ý kiến về mức độ ảnh hưởng của các yếu tố sinh thái đến sự phát triển của cây cà phê. Các phiếu phỏng vấn được xử lý bằng phần mềm Microsoft Excel để tổng hợp và sắp xếp thứ tự ưu tiên của các yếu tố.

2.1.3. Phương pháp nghiên cứu

Để đánh giá thích nghi sinh thái của cây cà phê Arabica tại huyện Mai Sơn, nghiên cứu áp dụng phương pháp phân tích thứ bậc (AHP) kết hợp với hệ thống thông tin địa lý (GIS), nhằm xác định mức độ phù hợp của các yếu tố sinh thái và đề xuất quy hoạch không gian tối ưu. Phương pháp AHP, được phát triển bởi Saaty (1980), sử dụng để tính trọng số cho các chỉ tiêu sinh thái dựa trên ý kiến của 08 chuyên gia về địa lý, nông nghiệp, thổ nhưỡng, và quy hoạch đất đai. Ma trận so sánh cặp được xây dựng bằng thang điểm 9 mức, kết hợp với đặc thù địa lý của huyện Mai Sơn, bao gồm các yếu tố như địa hình, khí hậu, và thổ nhưỡng. Vector trọng số chuẩn hóa được tính toán với tỉ số nhất quán (CR) dưới 0,1, đảm bảo tính logic và độ tin cậy của đánh giá. Các lớp dữ liệu không gian, bao gồm các chỉ tiêu sinh thái như nhiệt độ, lượng mưa, độ cao, loại đất, và độ dốc, được chuẩn hóa và tích hợp bằng phần mềm ArcMap 10.8.1 [10]. Đối với dữ liệu dạng raster (định dạng .tif), quy trình xử lý bao gồm ba bước: (1) phân cấp mức độ thích nghi bằng công cụ *Classify* dựa trên tiêu chuẩn TCVN 8409: 2010; (2) chuyển đổi sang định dạng vector bằng công cụ *Raster to Polygon*; (3) cắt giới hạn khu vực nghiên cứu bằng công cụ *Extract by Mask*. Đối với dữ liệu dạng vector (định dạng .shp), công cụ *Clip* được sử dụng để đảm bảo ranh giới dữ liệu phù hợp với huyện Mai Sơn. Sau khi hoàn tất xử lý, các lớp dữ liệu được chồng xếp bằng công cụ *Intersect* để tính toán cấp độ thích nghi sinh thái tổng hợp, trong đó mỗi lớp được gán trọng số AHP tương ứng [11]. Quy trình này đảm bảo tính chính xác và minh bạch trong việc đánh giá không gian.

Để kiểm định độ chính xác của mô hình đánh giá, nhóm nghiên cứu thực hiện đối chiếu thực tế bằng cách chọn ngẫu nhiên 51 điểm khảo sát trên nền tảng Google Earth Pro, đại diện cho các khu vực có điều kiện sinh thái và tình hình canh tác khác nhau tại huyện Mai Sơn. Tại mỗi điểm, kết quả phân loại mức độ thích nghi sinh thái từ bản đồ được so sánh trực quan với hiện trạng thực tế, bao gồm loại đất, độ cao, và tình hình trồng cà phê. Kết quả cho thấy mức độ tương đồng đạt 88% giữa mô hình dự đoán và thực địa, khẳng định độ chính xác tương đối cao của phương pháp tích hợp GIS và AHP [12].

2.2. Kết quả nghiên cứu

2.2.1. Lựa chọn và phân cấp chỉ tiêu đánh giá

Để đánh giá thích nghi sinh thái của cây cà phê Arabica tại huyện Mai Sơn, tỉnh Sơn La, nghiên cứu đã tổng quan các nghiên cứu liên quan, ý kiến chuyên gia, 10 chỉ tiêu chính đã được

lựa chọn dựa trên yêu cầu sinh thái của loài cây này và điều kiện tự nhiên thực tế tại khu vực nghiên cứu. Các chỉ tiêu bao gồm: nhiệt độ trung bình năm, lượng mưa trung bình năm, độ cao, độ dốc, hướng dốc, loại đất, độ dày tầng đất, thành phần cơ giới, độ pH của đất, và mức độ đá lộ đầu. Những chỉ tiêu này phản ánh các yếu tố khí hậu, địa hình, và thổ nhưỡng, vốn có vai trò quyết định đến sự phát triển và năng suất của cây cà phê Arabica. Mỗi chỉ tiêu được phân thành bốn cấp độ thích nghi: S1 (thích nghi), S2 (thích nghi trung bình), S3 (ít thích nghi), và N (không thích nghi). Các ngưỡng phân cấp được xây dựng dựa trên tiêu chuẩn quốc gia TCVN 8409: 2010, đồng thời được hiệu chỉnh thông qua tham vấn ý kiến của tám chuyên gia về địa lí, nông nghiệp và thổ nhưỡng tại khu vực Tây Bắc.

Bảng 1. Phân cấp chỉ tiêu đánh giá

Tiêu chí	Thích nghi (S1)	Thích nghi TB (S2)	Ít thích nghi (S3)	Không thích nghi (N)
Nhiệt độ TB năm (°C)	18, 19, 20, 21	22, 23	16-18, 23-24	>25, <16
Lượng mưa TB năm (mm)	1200-1800	1800-2200	2200-2400	<1200, >2400
Độ cao (m)	600-800	500-600, 800-1500	300-500, 1500-2000	<300, >2000
Độ dốc (°)	<8	>8-15	>15-20	>20
Hướng dốc (°)	135-225	225-315	45-135	0-45, 315-360
Loại đất	Ft, Fk, Fu, Fe, Fs	Fv, Fn	Fp, Fđ, Fa, Fq	Đất khác
Độ dày tầng đất (cm)	>100	70-100	50-70	<50
Thành phần cơ giới	Thịt nhẹ, trung bình	Thịt trung bình	Thịt nặng	Cát pha
Độ pH của đất	5.5-6.5	5-5.5 và 6.5-7	4.5-5 và 7-7.5	<4.5, >7.5
Đá lộ đầu	Không có	Rải rác	Cụm	Tập trung

2.2.2. Trọng số các chỉ tiêu đánh giá

Quy trình phân tích thứ bậc (AHP) được áp dụng để xác định mức độ ảnh hưởng của các chỉ tiêu sinh thái đến sự thích nghi của cây cà phê Arabica tại huyện Mai Sơn. Dựa trên ý kiến của tám chuyên gia, ma trận so sánh cặp được xây dựng và tính toán, đạt tỉ số nhất quán (CR) là 0,00959 (<0,1), đảm bảo tính tin cậy và logic của đánh giá. Kết quả cho thấy loại đất là chỉ tiêu có trọng số cao nhất ($W_i = 0,2653$), phản ánh vai trò quan trọng của đặc tính thổ nhưỡng đối với sự phát triển của cây cà phê Arabica, vốn đòi hỏi đất giàu dinh dưỡng và thoát nước tốt. Tiếp theo là nhiệt độ trung bình năm ($W_i = 0,2027$) và độ cao ($W_i = 0,1534$), hai yếu tố quyết định điều kiện khí hậu và môi trường phù hợp cho cây trồng.

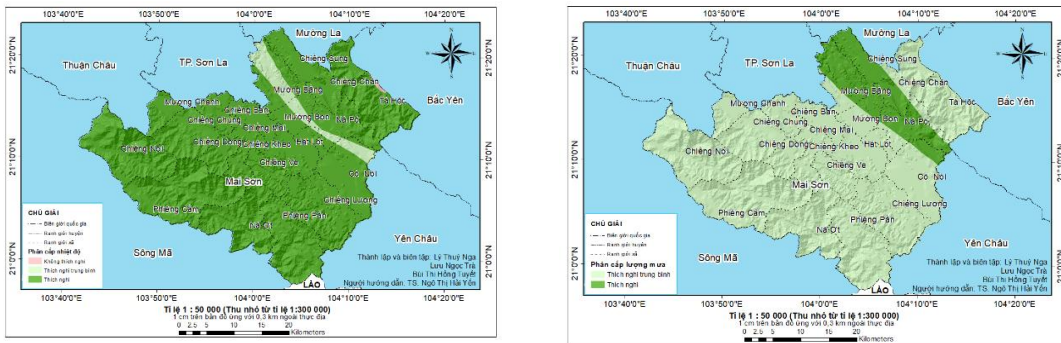
Các chỉ tiêu khác có trọng số thấp hơn, bao gồm lượng mưa trung bình năm ($W_i = 0,1136$), độ dốc ($W_i = 0,0833$), thành phần cơ giới ($W_i = 0,0606$), độ dày tầng đất ($W_i = 0,0442$), độ pH của đất ($W_i = 0,0325$), hướng dốc ($W_i = 0,0250$), và đá lộ đầu ($W_i = 0,0194$). Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây về yêu cầu sinh thái của cây cà phê Arabica, đặc biệt trong các vùng đồi núi có điều kiện tương tự Mai Sơn.

Bảng 2. Trọng số của các chỉ tiêu

Chỉ tiêu	Trọng số AHP (Wi)
1. Loại đất	0.2653
2. Nhiệt độ (°C)	0.2027
3. Độ cao (m)	0.1534
4. Lượng mưa (mm)	0.1136
5. Độ dốc (°)	0.0833
6. Thành phần cơ giới	0.0606
7. Độ dày tầng đất (cm)	0.0442
8. Độ pH của đất	0.0325
9. Hướng dốc	0.0250
10. Đá lộ đầu	0.0194

2.2.3. Đánh giá thích nghi sinh thái theo các tiêu chí khí hậu

Để xác định mức độ phù hợp của các yếu tố khí hậu đối với cây cà phê Arabica tại huyện Mai Sơn, tỉnh Sơn La, nghiên cứu áp dụng kỹ thuật phân tích không gian trong phần mềm ArcGIS 10.8.1, sử dụng phương pháp chồng lớp bản đồ. Các bản đồ chuyên đề về nhiệt độ trung bình năm và lượng mưa trung bình năm được xây dựng và kết hợp với trọng số đã xác định thông qua phân tích thứ bậc (nhiệt độ: 0,2027; lượng mưa: 0,1136). Kết quả cung cấp bức tranh tổng quan về điều kiện khí hậu, đảm bảo phản ánh đầy đủ các yêu cầu nghiêm ngặt của cây cà phê Arabica về nhiệt độ và lượng mưa.



Hình 1. Bản đồ đánh giá thích nghi sinh thái theo tiêu chí khí hậu:

a) phân cấp thích nghi sinh thái theo nhiệt độ trung bình năm,

b) phân cấp thích nghi sinh thái theo lượng mưa trung bình năm

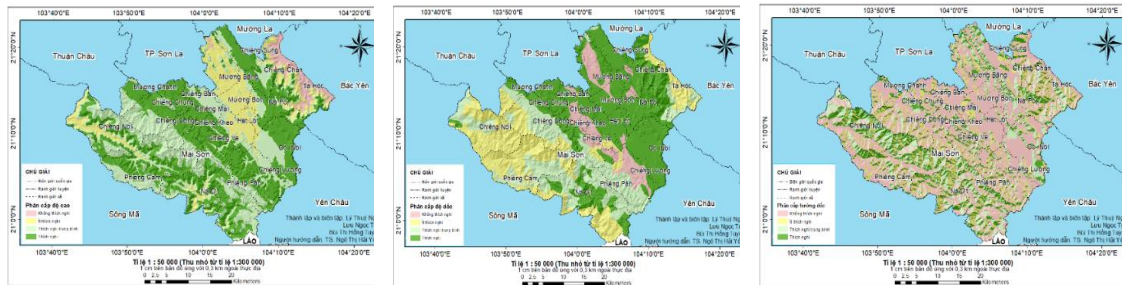
Phân tích cho thấy nhiệt độ tại Mai Sơn rất thuận lợi cho sự phát triển của cây cà phê Arabica. Gần 95,5% diện tích của huyện, tương đương 135.475 ha, nằm trong khoảng nhiệt độ lí tưởng từ 18°C đến 21°C, tạo điều kiện tối ưu cho cà phê sinh trưởng và ra hoa. Chỉ một phần rất nhỏ, khoảng 0,13% diện tích (185 ha), thuộc vùng có nhiệt độ không phù hợp, dưới 16°C hoặc trên 25°C, chủ yếu nằm ở các khu vực rìa huyện với điều kiện khí hậu khắc nghiệt hơn. Diện tích còn lại, khoảng 4,4% (6.010 ha), rơi vào mức nhiệt độ trung bình từ 22°C đến 23°C hoặc ít phù hợp từ 16 đến 18°C và 23°C đến 24°C, thường xuất hiện ở các vùng có độ cao chuyển tiếp.

Về lượng mưa, huyện Mai Sơn đáp ứng tốt nhu cầu nước cho cây cà phê Arabica. Khu vực có lượng mưa từ 1200 đến 1800 mm, đạt mức phù hợp nhất, chiếm khoảng 13,3% diện tích (18.977 ha), chủ yếu ở các xã như Mường Bằng, Na Bó, và một phần Chiềng Sung, nơi lượng

mưa ổn định hỗ trợ cây trong suốt mùa sinh trưởng. Phần lớn diện tích, khoảng 86,7% (123.696 ha), nằm trong khoảng mưa từ 1800 đến 2200 mm, vẫn đảm bảo cung cấp đủ độ ẩm mà không gây hiện tượng úng hoặc thiếu nước. Các vùng có lượng mưa không phù hợp, dưới 1200 mm hoặc trên 2400 mm, chỉ chiếm tỉ lệ không đáng kể, không ảnh hưởng lớn đến kế hoạch mở rộng canh tác.

2.2.4. Đánh giá thích nghi sinh thái theo tiêu chí địa hình

Để xác định mức độ phù hợp của địa hình đối với cây cà phê Arabica tại huyện Mai Sơn, nghiên cứu sử dụng kỹ thuật phân tích không gian trong ArcGIS 10.8.1, tập trung vào ba yếu tố chính: độ cao, độ dốc, và hướng dốc. Các bản đồ chuyên đề được xây dựng và tích hợp với trọng số đã xác định (độ cao: 0,1534; độ dốc: 0,0833; hướng dốc: 0,0250), cung cấp đánh giá chi tiết về khả năng đáp ứng của địa hình cho canh tác cà phê Arabica, vốn ưu tiên các khu vực đồi thấp với độ dốc vừa phải.



Hình 2. Bản đồ đánh giá thích nghi sinh thái theo tiêu chí địa hình:

- a) phân cấp thích nghi sinh thái theo độ cao; b) phân cấp thích nghi sinh thái theo độ dốc; c) phân cấp thích nghi sinh thái theo hướng dốc**

Về độ cao, Mai Sơn sở hữu điều kiện lí tưởng cho cây cà phê Arabica. Khoảng 45,9% diện tích huyện, tương đương 65.056 ha, nằm trong khoảng từ 600 đến 800 m, tạo môi trường mát mẻ và thích hợp cho sự phát triển của cây, tập trung ở các xã như Chiềng Mai, Chiềng Dong, và Mường Bon. Vùng có độ cao từ 500 đến 600 m hoặc 800 đến 1500 m, phù hợp ở mức trung bình, chiếm khoảng 35,8% (51.033 ha), chủ yếu tại các xã như Chiềng Kheo và Mường Chanh. Các khu vực còn lại, khoảng 18,4% (26.581 ha), có độ cao dưới 300 m hoặc trên 2000 m, không phù hợp cho canh tác, thường nằm ở các thung lũng sâu hoặc đỉnh núi cao.

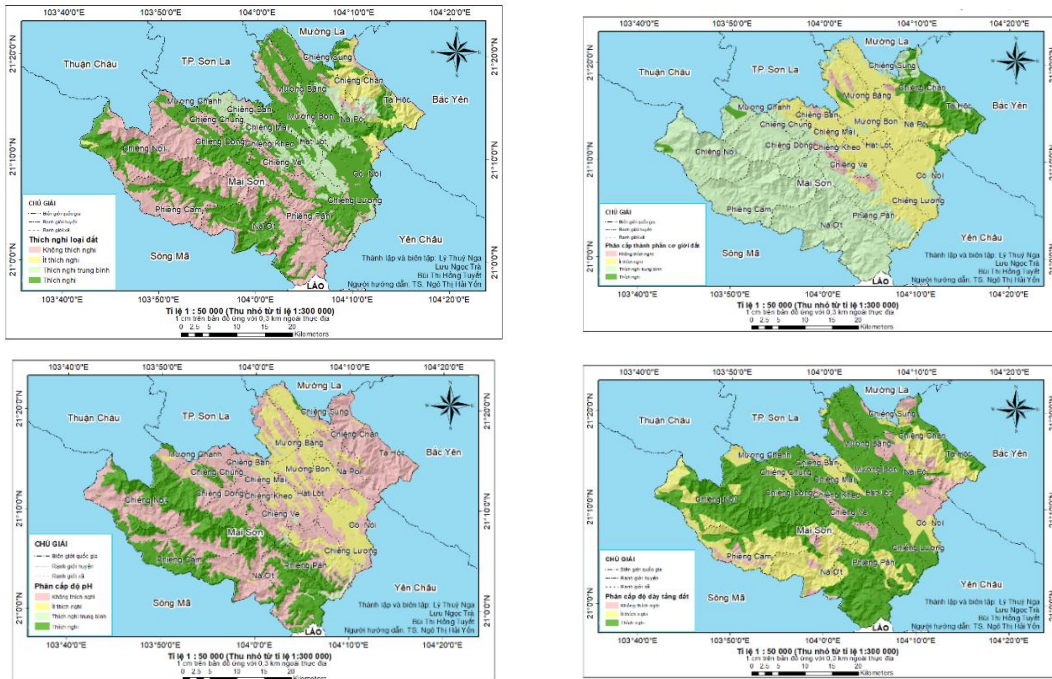
Về độ dốc, Khu vực có độ dốc dưới 8°, lí tưởng cho việc trồng trọt và bảo vệ đất, chiếm 42,4% diện tích (60.265 ha), phân bố chủ yếu ở phía Đông Nam và Đông Bắc, bao gồm các xã Chiềng Sung và Nà Bó. Vùng dốc từ 8 đến 15°, vẫn khả thi nếu có biện pháp chống xói mòn, chiếm 22,9% (32.695 ha). Tuy nhiên, khoảng 34,6% diện tích (49.710 ha) có độ dốc trên 15°, tập trung ở phía Tây huyện tại các xã như Chiềng Mung và Mường Bằng, dễ gặp rủi ro rửa trôi đất nếu sử dụng để trồng cà phê mà không có biện pháp bảo vệ.

Về hướng dốc, khu vực có hướng từ 135° đến 225°, thuận lợi cho việc nhận ánh sáng và tránh gió lạnh, chiếm khoảng 14,9% diện tích (21.215 ha), tập trung tại các xã như Phiêng Păn, Nà Ót, và Chiềng Ve. Vùng có hướng từ 225° đến 315°, phù hợp ở mức trung bình, chiếm 35,9% (51.179 ha), vẫn đáp ứng được nếu quản lí tốt. Tuy nhiên, khoảng 49,3% diện tích (70.276 ha) thuộc các hướng không phù hợp, từ 0° đến 45° hoặc 315° đến 360°, chủ yếu ở phía Bắc và Đông Bắc tại các xã như Tà Hộc, Na Bó, và Chiềng Nọi, nơi ánh sáng hoặc điều kiện gió có thể gây bất lợi cho cây cà phê.

2.2.5. Đánh giá thích nghi sinh thái theo tiêu chí thổ nhưỡng

Để xác định mức độ phù hợp của các yếu tố thổ nhưỡng đối với cây cà phê Arabica tại huyện Mai Sơn, tỉnh Sơn La, nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tích không gian trong phần mềm ArcGIS 10.8.1, áp dụng kỹ thuật chồng lớp bản đồ. Các bản đồ chuyên đề được xây dựng cho năm yếu tố thổ nhưỡng chính: loại đất, thành phần cơ giới, độ dày tầng đất, độ pH, và mức độ đá lộ

đầu. Các yếu tố này được gán trọng số đã xác định thông qua phân tích thứ bậc (loại đất: 0,2653; thành phần cơ giới: 0,0606; độ dày tầng đất: 0,0442; độ pH: 0,0325; đá lộ đầu: 0,0194). Kết quả đánh giá phản ánh khả năng đáp ứng của đất đai tại Mai Sơn đối với yêu cầu sinh thái của cây cà phê Arabica, vốn đòi hỏi đất giàu dinh dưỡng, tơi xốp, và thoát nước tốt.



Hình 2. Bản đồ đánh giá thích nghi sinh thái theo tiêu chí thổ nhưỡng: a) theo loại đất, b) theo thành phần cơ giới đất, c) theo độ pH, d) theo tầng dày

Về loại đất, khoảng 48,8% diện tích huyện, tương đương 69.184 ha, thuộc nhóm đất có khả năng thích nghi, với đặc tính giàu dinh dưỡng và kết cấu phù hợp cho rễ cây phát triển. Những khu vực này chủ yếu nằm ở các xã có điều kiện đất đai thuận lợi như Chiềng Mai, Mường Bon, và Chiềng Sung. Trong khi đó, khoảng 34,5% diện tích (49.140 ha) thuộc nhóm đất không phù hợp, với đặc điểm nghèo dinh dưỡng hoặc kết cấu kém, tập trung ở các xã như Chiềng Nọi và Phiêng Cắm, nơi đất khó đáp ứng nhu cầu của cây cà phê.

Xét về thành phần cơ giới, khu vực phía Đông Bắc huyện ghi nhận 7,4% diện tích (10.588 ha) đạt mức thích nghi, với đất tơi xốp, giữ ẩm tốt, và hỗ trợ cây cà phê phát triển mạnh. Vùng đất có thành phần cơ giới ở mức trung bình, chiếm 56,9% (81.177 ha), phân bố rộng khắp huyện, vẫn đảm bảo điều kiện canh tác nếu được bón phân hợp lý. Tuy nhiên, khoảng 35,6% diện tích (50.905 ha) rơi vào nhóm ít phù hợp hoặc không phù hợp, với đất quá nặng hoặc quá cát, gây khó khăn cho việc giữ nước và dinh dưỡng, chủ yếu ở các xã vùng rìa.

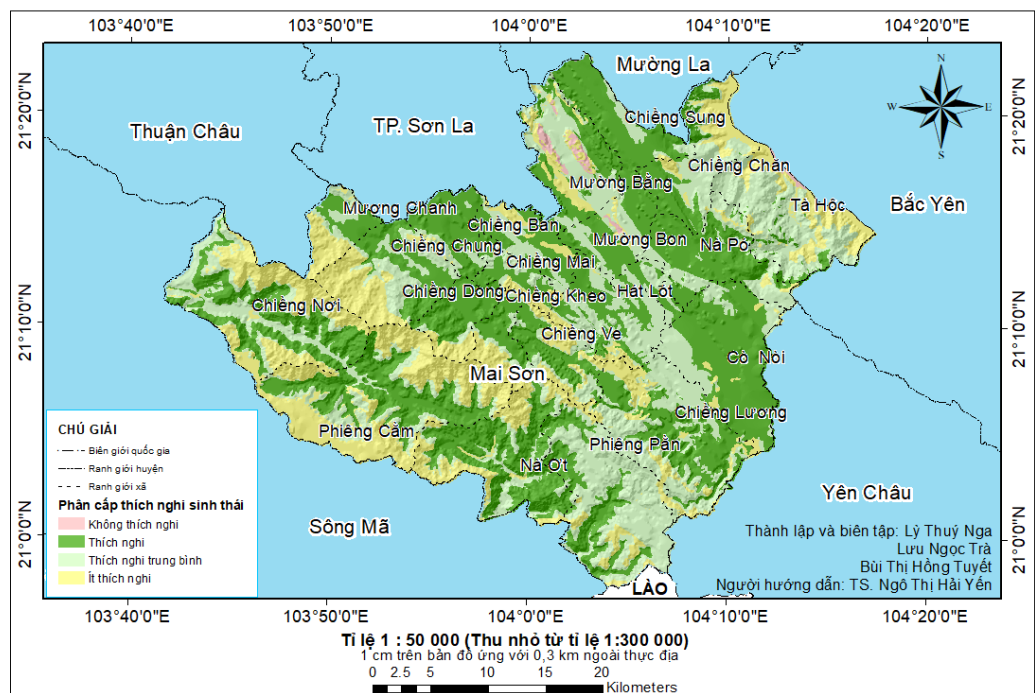
Về độ dày tầng đất, huyện Mai Sơn có 60,3% diện tích, tương đương 85.637 ha, sở hữu tầng đất dày trên 100 cm, tạo điều kiện lí tưởng cho hệ rễ cà phê phát triển sâu và ổn định. Các khu vực này phân bố rộng ở nhiều xã, đặc biệt là phía Nam và Tây Nam huyện. Ngược lại, khoảng 39,7% diện tích (56.593 ha) có tầng đất mỏng, không đáp ứng được yêu cầu của cây cà phê, tập trung tại các xã như Phiêng Cắm, Tà Hộc, và Nà Bó, nơi đất dễ bị rửa trôi hoặc thiếu độ sâu cần thiết.

Đối với độ pH, khoảng 27,2% diện tích (38.807 ha) có độ pH từ 5,5 đến 6,5, phù hợp nhất cho sự hấp thụ dinh dưỡng của cây cà phê Arabica, chủ yếu ở các xã phía Nam và Tây Nam như Chiềng Dong và Mường Chanh. Tuy nhiên, vùng có độ pH không phù hợp, dưới 4,5 hoặc trên 7,5, chiếm tới 52,0% (74.188 ha), tập trung ở phía Đông và Đông Bắc huyện, bao gồm các xã Tà Hộc, Chiềng Chăn, và Nà Bó, nơi đất quá chua hoặc kiềm hóa gây bất lợi cho cây trồng.

Về mức độ đá lộ đầu, huyện Mai Sơn ghi nhận 92,7% diện tích (132.216 ha) gần như không có đá lộ đầu, tạo điều kiện thuận lợi cho việc làm đất và trồng cà phê Arabica, trải rộng trên hầu hết các xã. Chỉ khoảng 2,4% diện tích (3.416 ha) thuộc nhóm không phù hợp, với đá lộ đầu tập trung hoặc thành cụm, gây khó khăn cho canh tác, chủ yếu tại Tà Hộc, Na Bó, và một phần Chiềng Lương.

2.2.6. Đánh giá thích nghi sinh thái tổng hợp

Để đánh giá toàn diện mức độ phù hợp sinh thái của cây cà phê Arabica tại huyện Mai Sơn, tỉnh Sơn La, nghiên cứu sử dụng kỹ thuật chồng lớp có trọng số (Weighted Overlay) trong phần mềm ArcGIS 10.8.1. Bản đồ tổng hợp được xây dựng bằng cách tích hợp mười yếu tố sinh thái chính, bao gồm loại đất, nhiệt độ trung bình năm, độ cao, lượng mưa, độ pH, độ dốc, độ dày tầng đất, thành phần cơ giới, hướng dốc, và mức độ đá lộ đầu. Mỗi yếu tố được gán trọng số theo phương pháp phân tích thứ bậc, trong đó loại đất (0,2653) và nhiệt độ (0,2027) được xác định là hai yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất đến khả năng phát triển của cây cà phê Arabica. Kết quả bản đồ tổng hợp cung cấp cái nhìn toàn diện về phân bố không gian các vùng thích nghi, hỗ trợ định hướng quy hoạch canh tác hiệu quả.



Hình 4. Bản đồ đánh giá thích nghi sinh thái tổng hợp

Khu vực thích nghi (S1) chiếm 44,9% diện tích huyện, tương đương 63.750,9 ha, chủ yếu tập trung ở các xã phía Nam và trung tâm như Chiềng Chung, Chiềng Kheo, Cò Nòi, và Mường Bon. Những khu vực này sở hữu sự kết hợp lý tưởng của các yếu tố sinh thái, với độ cao từ 600 đến 800 m, duy trì nhiệt độ ổn định trong khoảng 19–21°C, phù hợp cho các giai đoạn sinh trưởng và ra hoa của cây cà phê. Lượng mưa trung bình năm dao động từ 1800 đến 2220 mm, đảm bảo cung cấp đủ nước cho các thời kỳ phát triển quan trọng của cây cà phê Arabica. Về đất đai, các khu vực này chủ yếu có đất đỏ vàng trên đá sét, đất đỏ nâu trên đá vôi, và đất nâu vàng trên đá macma bazơ, với đặc tính giàu dinh dưỡng, tầng đất dày trên 100 cm, và khả năng thoát nước tốt. Địa hình tại đây có độ dốc dưới 8°, thuận lợi cho việc áp dụng cơ giới hóa và giảm nguy cơ rửa trôi đất. Thành phần đất thuộc loại thịt trung bình, giữ ẩm tốt và cung cấp dưỡng chất ổn định. Mặc dù độ pH đất có xu hướng chua (3,9–4,1), việc cải tạo bằng cách bổ sung vôi hoặc chất hữu cơ có thể đưa pH về mức tối ưu từ 5,5 đến 6,5. Đặc biệt, khu vực này hầu như không có đá lộ đầu, tạo điều kiện lý tưởng cho canh tác lâu dài.

Vùng thích nghi trung bình (S2) chiếm 32,6% diện tích, tương đương 46.299,1 ha, phân bố ở các xã như Chiềng Mai, Mường Chanh, và một phần Chiềng Sung. Tổng cộng, các khu vực S1 và S2 chiếm hơn 77% diện tích huyện (110.050 ha), cho thấy tiềm năng lớn để phát triển cà phê Arabica. Những khu vực S2 có điều kiện gần tương tự S1, nhưng một số yếu tố như độ cao (500–600 m hoặc 800–1500 m) hoặc lượng mưa (gần 2200 mm) có thể yêu cầu các biện pháp hỗ trợ như tưới bổ sung hoặc cải tạo đất để đạt hiệu quả tối ưu.

Khu vực ít thích nghi (S3) chiếm 21,9% diện tích, tương đương 31.113,1 ha, phân bố ở rìa các xã như Chiềng Nọi, phía Tây Mường Chanh, phía Đông Chiềng Sung, Chiềng Chăn, và Tà Hộc. Những khu vực này thường có đất vàng đỏ trên đá macma axit hoặc đất vàng nhạt trên đá cát, với địa hình quá cao (trên 1500 m) hoặc quá thấp (dưới 500 m) cho cây cà phê, và độ dốc từ 15° trở lên. Mặc dù không lí tưởng, các vùng này vẫn có thể được khai thác nếu áp dụng kĩ thuật canh tác phù hợp, như làm bậc thang hoặc bổ sung dinh dưỡng cho đất.

Vùng không thích nghi (N) chỉ chiếm 0,5% diện tích huyện, tương đương 742,1 ha, phân bố chủ yếu ở phía Đông Bắc tại các xã như Tà Hộc, Mường Bằng, và một phần Mường Bon. Những khu vực này gặp nhiều hạn chế nghiêm trọng, với độ dốc trên 25°, gây khó khăn cho cơ giới hóa và làm tăng nguy cơ đất bị rửa trôi. Độ cao thường dưới 300 m, dẫn đến nhiệt độ cao, không thích hợp. Tầng đất mỏng dưới 50 cm, hạn chế khả năng phát triển của bộ rễ, trong khi độ pH dưới 4,0 cho thấy đất quá chua, cản trở hấp thụ dinh dưỡng. Thành phần cơ giới đất tại đây là đất cát, gây khô hạn nhanh, hoặc quá sét, dẫn đến bí rễ trong mùa mưa. Những yếu tố này khiến việc trồng cà phê Arabica tại các khu vực này không khả thi, với hiệu quả kinh tế thấp và rủi ro cao.

Kết quả tổng hợp làm rõ sự phân bố không gian của các mức thích nghi sinh thái tại Mai Sơn, cung cấp cơ sở để ưu tiên phát triển các vùng chuyên canh ở khu vực S1 và S2, đồng thời định hướng cải tạo hoặc loại bỏ canh tác ở các vùng S3 và N nhằm đảm bảo hiệu quả và bền vững.

Bảng 3. Thống kê diện tích các cấp thích nghi tổng hợp

Cấp thích nghi	Kí hiệu	Diện tích (ha)	Tỉ lệ (%)
Thích nghi	S1	63.750,9	44,9
Thích nghi trung bình	S2	46.299,1	32,6
Ít thích nghi	S3	31.113,1	21,9
Không thích nghi	N	742,1	0,5
Tổng cộng		141.905,3	100,0

Ghi chú: Diện tích sông, hồ chiếm khoảng 764,7 ha, được loại trừ.

2.2.7. Kiểm chứng kết quả đánh giá

Để xác minh độ chính xác của bản đồ thích nghi sinh thái cho cây cà phê Arabica tại huyện Mai Sơn, tỉnh Sơn La, nghiên cứu tiến hành kiểm chứng thực tế tại 51 điểm trồng cà phê, được chọn ngẫu nhiên trên nền tảng Google Earth Pro. Trong số này, 32 điểm thuộc các xã đã được cấp chứng nhận chỉ dẫn địa lí, bao gồm Mường Chanh, Chiềng Chung, Chiềng Ban, Chiềng Mai, Chiềng Mung, Chiềng Kheo, Chiềng Dong, và Phiêng Păn. 19 điểm còn lại nằm ở các xã chưa có chỉ dẫn địa lí, như Nà Ót, Chiềng Sung, Mường Bon, Chiềng Chăn, Nà Bó, Cò Nọi, và Chiềng Nọi. Kết quả kiểm chứng được so sánh với phân cấp thích nghi của bản đồ để đánh giá mức độ tương đồng giữa kết quả đánh giá và thực tế.

Sau khi cập nhật, so sánh bản đồ thích nghi sinh thái được so sánh lại với 51 điểm trồng cà phê để xác minh độ tin cậy. Kết quả cho thấy 45 điểm, tương ứng 88%, thuộc mức thích nghi (S1), trong khi 6 điểm còn lại thuộc mức thích nghi trung bình (S2). Không có điểm nào rơi vào mức ít thích nghi (S3) hoặc không thích nghi (N), khẳng định độ chính xác cao của bản đồ trong việc dự đoán các khu vực phù hợp để trồng cà phê Arabica.

3. Kết luận

Nghiên cứu đã đánh giá thích nghi sinh thái cho cây cà phê Arabica tại huyện Mai Sơn, tỉnh Sơn La, thông qua tích hợp phương pháp phân tích đa tiêu chí, phân tích thứ bậc và hệ thống thông tin địa lí. Kết quả xác định 77,5% diện tích huyện (110.050 ha) có mức thích nghi đến trung bình (S1 và S2), tập trung tại các xã như Chiềng Chung, Chiềng Kheo, và Cò Nòi, nhờ điều kiện lí tưởng về độ cao (600-800 m), nhiệt độ (19-21°C), lượng mưa (1800-2200 mm) và đất giàu dinh dưỡng. Phân tích AHP nhấn mạnh loại đất là yếu tố quan trọng nhất (trọng số 0,2653), tiếp theo là nhiệt độ (0,2027) và độ cao (0,1534), với tỉ số nhất quán 0,00959, đảm bảo độ tin cậy cao. Bản đồ thích nghi sinh thái, đạt độ tương đồng 88% qua kiểm chứng tại 51 điểm, không chỉ cung cấp cơ sở khoa học cho quy hoạch sử dụng đất mà còn đề xuất vùng chuyên canh trên 65.735 ha và định hướng mở rộng chỉ dẫn địa lí, góp phần nâng cao hiệu quả sản xuất, chất lượng cà phê và giá trị thương hiệu cà phê Mai Sơn.

So với nghiên cứu tại Vân Nam, Trung Quốc, nơi chỉ khoảng 40% diện tích được đánh giá là phù hợp cho cây cà phê Arabica [12], huyện Mai Sơn, tỉnh Sơn La, cho thấy tiềm năng vượt trội với 77,5% diện tích đạt mức thích nghi

đến trung bình (S1 và S2). Sự khác biệt này xuất phát từ việc nghiên cứu tại Mai Sơn sử dụng dữ liệu địa phương chi tiết, đặc biệt tập trung vào yếu tố thổ nhưỡng, với đất feralit đỏ vàng giàu dinh dưỡng chiếm ưu thế, kết hợp với điều kiện khí hậu và địa hình lí tưởng (độ cao 600–800 m, nhiệt độ 19–21°C). Kết quả này không chỉ củng cố cơ sở khoa học cho quy hoạch sử dụng đất hiệu quả mà còn góp phần giảm thiểu rủi ro môi trường, tối ưu hóa sản xuất và cải thiện sinh kế cho nông dân địa phương.

Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn tồn tại một số hạn chế. Tính chủ quan trong ý kiến chuyên gia khi áp dụng phương pháp AHP có thể ảnh hưởng đến trọng số các tiêu chí [12]. Ngoài ra, nghiên cứu chưa xem xét đầy đủ các yếu tố sinh học như sâu bệnh, vốn có thể tác động đáng kể đến năng suất cà phê Arabica [13]. Các yếu tố kinh tế-xã hội, bao gồm kĩ thuật canh tác, chi phí đầu tư và biến động thị trường, cũng chưa được phân tích sâu, mặc dù chúng đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo tính bền vững của ngành cà phê [14]. Hơn nữa, trong bối cảnh biến đổi khí hậu, các kịch bản dự báo về thay đổi nhiệt độ và lượng mưa, như đã được áp dụng ở Ethiopia [15], chưa được tích hợp để đánh giá tác động dài hạn đến vùng thích nghi.

Để khắc phục, cần mở rộng kiểm chứng thực địa tại nhiều điểm hơn để nâng cao độ chính xác của bản đồ thích nghi, đặc biệt ở các khu vực rìa huyện có điều kiện sinh thái đa dạng. Việc tích hợp các mô hình dự báo khí hậu, như MaxEnt được sử dụng ở Vân Nam [12], sẽ giúp dự đoán sự dịch chuyển của các vùng thích nghi trong tương lai [13]. Đồng thời, phân tích chuỗi giá trị cà phê, từ sản xuất đến tiêu thụ, cần được thực hiện để đảm bảo lợi ích kinh tế lâu dài cho nông dân, như đề xuất trong các nghiên cứu về thích ứng biến đổi khí hậu [16]. Những cải tiến này không chỉ nâng cao độ tin cậy của nghiên cứu mà còn hỗ trợ xây dựng chiến lược phát triển cà phê Arabica bền vững tại Mai Sơn, góp phần nâng tầm thương hiệu cà phê Sơn La trên thị trường quốc tế.

***Lời cảm ơn:** Nghiên cứu được thực hiện dưới sự tài trợ của Bộ Giáo dục và Đào tạo cho đề tài Khoa học Công nghệ cấp Bộ, mã số B2025-SPH-05. Đề tài do Trường Đại học Sư phạm Hà Nội là cơ quan chủ trì, TS. Ngô Thị Hải Yến là chủ nhiệm đề tài.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] NX Vũng & NT Cường, (2023). Tích hợp GIS và AHP đánh giá thích hợp tự nhiên đất trồng cây cà phê vối tại huyện Cư M'gar, tỉnh Đắk Lắk. *Tạp chí Khoa học Tây Nguyên*, 17(63), 45–56.
- [2] *Địa chí Sơn La*, (2020). NXB Chính trị Quốc gia Sự thật, Hà Nội.

- [3] Rahn E & et al, (2013). Climate change adaptation, mitigation and livelihood benefits in coffee production: Where are the synergies? *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(8).
- [4] Ủy ban nhân dân tỉnh Sơn La, (2021). Quyết định phê duyệt đề án phát triển vùng nguyên liệu cà phê gắn với chế biến, bảo vệ môi trường trên địa bàn tỉnh Sơn La. <https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Thuong-mai/Quyết-dinh-331-QD-UBND-2021-De-an-Phat-trien-vung-nguyen-lieu-ca-phe-bao-ve-moi-truong-Son-La-469490.aspx>
- [5] Abigaba D & et al, (2024). The potential of agroforestry to buffer climate change impacts on suitability of coffee and banana in Uganda. *Agroforestry Systems*, 98, 1555–1577. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01009-6>
- [6] Viện Quy Hoạch và Thiết kế Nông nghiệp - Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn, (2010). *Quy trình đánh giá đất sản xuất nông nghiệp phục vụ quy hoạch sử dụng đất cấp huyện TCVN 8409:2010*. Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn.
- [7] Zhang S & et al, (2021). Evaluation of coffee ecological adaptability using Fuzzy, AHP, and GIS in Yunnan Province, China. *Ecological Informatics*, 66, 101472. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101472>
- [8] Nigussie W & et al, (2024). Enhancing coffee agroforestry systems suitability using geospatial analysis and Sentinel satellite data in Gedeo Zone, Ethiopia. *Sensors*, 24(19), 6239. <https://doi.org/10.3390/s24196239>
- [9] Phạm Y & et al, (2019). The impact of climate change and variability on coffee production: A systematic review. *Climatic Change*, 156(4), 609–630. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02538-y>
- [10] Nzeyimana I, Hartemink AE & Geissen V, (2014). GIS-based multi-criteria analysis for Arabica coffee expansion in Rwanda. *PLoS ONE*, 9(10), e107449. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107449>
- [11] Orwa C & et al, (2009). Agroforestry Database: A tree reference and selection guide version 4.0. *World Agroforestry Centre*. <http://www.worldagroforestry.org/sites/treedbs/treedatabases.asp>
- [12] Liu X, Zhang S, Li R, Wang X, Cheng J, Yang Q & Kong H, (2021). AHP-GIS and MaxEnt for delineation of potential distribution of Arabica coffee plantation under future climate in Yunnan, China. *Ecological Indicators*, 132, 108272. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108272>
- [13] Denich M, Martius C, Rodgers C, Kufa T, Obso T & Verlag Göttingen C, (2006). Ecophysiological diversity of wild Arabica coffee populations in Ethiopia: Growth, water relations and hydraulic characteristics along a climatic gradient. In *Ecological Studies* (Vol. 185, pp. 237–250). Springer.
- [14] Rahn E & et al, (2013). Climate change adaptation, mitigation and livelihood benefits in coffee production: Where are the synergies? *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(8).
- [15] Benti F & et al, (2022). Modeling coffee (*Coffea arabica* L.) climate suitability under current and future scenarios in Jimma zone, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(4), 4977–4992. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01385-2>
- [16] Aaron M & Davis P, (2012). The impact of climate change on indigenous Arabica coffee (*Coffea arabica*): Predicting future trends and identifying priorities. *PLoS ONE*, 7(11), e47981. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047981>