



Original Article

Assessing Carbon Stocks in A Tropical Forest Ecosystem of High Conservation Value: A Case Study in Bac Kan Province, Vietnam

Do Thi Nhung¹, Dang Do Lam Phuong¹, Nguyen Thi Diem My¹,
Bui Quang Thanh¹, Pham Ngoc Hai², Pham Van Manh^{1,*}

¹VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

²Forest Inventory and Planning Institute, Ministry of Agriculture and Rural Development,
Ngoc Hoi, Vinh Quynh, Thanh Tri, Hanoi, Vietnam

Received 17 February 2024

Revised 01 August 2024; Accepted 8 August 2024

Abstract: Carbon stocks (CS) is a crucial factor in understanding the carbon cycle and enhancing forest quality monitoring, supporting sustainable forestry management and policy adjustment. This study shows a non-invasive method for estimating aboveground biomass (AGB) and CS, integrating multi-source remote sensing, topography and field data. The tropical forest ecosystem in Bac Kan province was chosen because this is the province with the largest forest cover in Vietnam and is considering participating in the global carbon credit market. The Cubist model was developed using Sentinel-1A SAR data, indices from Landsat-9 OLI-2 images and topographic data. The accuracy of Cubist models is evaluated through statistical indicators such as: Root mean square deviation (RMSE), Coefficient of determination (R^2) and Mean absolute error (MAE). Among 130 Cubist prediction models, the Model 1 demonstrated the highest accuracy for estimating AGB in the study area. Results indicate that the accumulated carbon stock is primarily concentrated in Evergreen broadleaved forest on soil mountain (EBFS) accounting for about 40% or approximately 2.6 million MgC; Mixed wood-bamboo forest on soil mountain (MWBF) accounting for about 23%, or 1.5 million MgC; and Plantation on soil mountain (PFS) accounting for about 22%, or 1.5 million MgC. The study provides a comprehensive view of forest ecosystem conservation and improves monitoring, protection and restoration of high-value forests.

Keywords: Remote sensing Tropical forest, Carbon stocks, High conservation value, Bac Kan province.

* Corresponding author.

E-mail address: manh10101984@gmail.com

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5069>

Đánh giá trữ lượng carbon tích lũy trong hệ sinh thái rừng nhiệt đới có giá trị bảo tồn cao: Nghiên cứu trường hợp tại tỉnh Bắc Kạn, Việt Nam

Đỗ Thị Nhung¹, Đặng Đỗ Lâm Phương¹, Nguyễn Thị Diễm My¹,
Bùi Quang Thành¹, Phạm Ngọc Hải², Phạm Văn Mạnh^{1,*}

¹Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội,
334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

²Viện Điều tra, Quy hoạch rừng, Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn,
Ngọc Hồi, Vĩnh Quỳnh, Thanh Trì, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 17 tháng 01 năm 2024

Chỉnh sửa ngày 01 tháng 8 năm 2024; Chấp nhận đăng ngày 8 tháng 8 năm 2024

Tóm tắt: Trữ lượng carbon tích lũy (CS) là yếu tố quan trọng để hiểu chu trình carbon và cải thiện giám sát chất lượng rừng, hỗ trợ quản lý và điều chỉnh chính sách lâm nghiệp bền vững. Nghiên cứu này trình bày phương pháp ước tính sinh khối trên mặt đất (AGB) và CS không xâm lấn, sử dụng kết hợp dữ liệu viễn thám đa nguồn, địa hình và đo đạc ngoài thực địa. Hệ sinh thái rừng nhiệt đới tại tỉnh Bắc Kạn được chọn vì đây là tỉnh có độ che phủ rừng lớn nhất Việt Nam và đang xem xét tham gia thị trường tín chỉ carbon toàn cầu. Mô hình Cubist được phát triển dựa trên các dữ liệu Sentinel-1A SAR, chỉ số từ ảnh Landsat-9 OLI-2 và dữ liệu địa hình. Độ chính xác của các mô hình Cubist được đánh giá qua các chỉ số thống kê như: Sai số bình phương trung bình gốc (RMSE), Hệ số xác định (R^2) và Sai số tuyệt đối trung bình (MAE). Trong số 130 mô hình dự đoán từ Cubist, mô hình 1 có độ chính xác tốt nhất để ước tính AGB tại khu vực. Kết quả cho thấy CS tập trung chủ yếu ở các hệ sinh thái Rừng lá rộng thường xanh trên núi đất (EBFS) chiếm khoảng 40%, tương đương với khoảng 2,6 triệu MgC; Rừng hỗn giao tre gỗ trên núi đất (MWBF) chiếm khoảng 23%, tương đương 1,5 triệu MgC; và Rừng trồng trên núi đất (PFS) chiếm khoảng 22%, cũng tương đương với 1,5 triệu MgC. Nghiên cứu cung cấp cái nhìn toàn diện về bảo tồn hệ sinh thái rừng và cải thiện quy trình theo dõi, bảo vệ và phục hồi các khu rừng giá trị cao.

Từ khóa: Viễn thám, Rừng nhiệt đới, CS, Giá trị bảo tồn cao, Tỉnh Bắc Kạn.

1. Mở đầu

Rừng và lâm nghiệp đóng vai trò quan trọng trong việc thực hiện Chương trình nghị sự 2030 của Liên Hợp Quốc về các Mục tiêu Phát triển bền vững (SDGs) [1]. Bảo tồn các hệ sinh thái rừng đã trở thành một trong những ưu tiên hàng đầu trên thế giới nhằm đối phó với những thách

thức như mất môi trường sống, suy giảm đa dạng sinh học [2]. Rừng được công nhận là kho dự trữ carbon lớn nhất trên hành tinh, thường được lưu trữ dưới dạng sinh khối trên mặt đất (AGB) và có vai trò quan trọng trong việc đóng góp vào nỗ lực giảm nhẹ biến đổi khí hậu, cung cấp dịch vụ hệ sinh thái thiết yếu [3]. Trong lĩnh vực lâm nghiệp, việc định lượng sinh khối là cần thiết để

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: manh10101984@gmail.com

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5069>

đánh giá năng suất CS của hệ sinh thái rừng. Đánh giá CS là yếu tố then chốt để xác định lượng carbon trong sinh khối và tiềm năng của hệ sinh thái rừng như một bể chứa carbon [4, 5]. Quản lý rừng bền vững ở khu vực nhiệt đới là một phân quan trọng trong nỗ lực giảm biến đổi khí hậu toàn cầu, vì những khu vực này thường tích lũy lượng carbon lớn hơn trên mỗi đơn vị diện tích so với bất kỳ hệ sinh thái nào khác trên bề mặt lục địa [6, 7]. Các nghiên cứu trước đây đã tiến hành tính toán sinh khối trên mặt đất và đánh giá CS, cũng như xem xét các loại rừng cụ thể. Tuy nhiên, thông tin toàn diện về tổng trữ lượng AGB và CS trên diện rộng vẫn còn hạn chế [8, 9]. Các phương pháp truyền thống để đánh giá trữ lượng AGB và CS dựa trên các phép đo trực tiếp trên thực địa cho kết quả chính xác cao, nhưng có nhược điểm về chi phí lớn, tốn nhiều thời gian và công sức, đồng thời bị hạn chế về mặt không gian. Điều này đặc biệt rất khó khăn đối với các khu rừng nhiệt đới có địa hình phức tạp và khó tiếp cận [10, 11].

Phát triển và áp dụng các phương pháp gián tiếp như mô hình học máy hoặc phương trình sinh khối đang ngày càng trở nên phổ biến trên toàn thế giới. Công nghệ viễn thám đã được chứng minh là có khả năng hiệu quả trong việc đo lường và giám sát sinh khối của các khu rừng. Các thiết bị cảm biến, bao gồm cả cảm biến chủ động (radar) và cảm biến bị động (quang học), đã được sử dụng để xác định lượng sinh khối trên quy mô rộng [12, 13]. Việc kết hợp dữ liệu từ nhiều nguồn khác nhau để ước tính AGB thường mang lại kết quả chính xác hơn so với chỉ dựa vào một nguồn dữ liệu duy nhất. Điều này đặc biệt quan trọng ở các khu vực rừng nhiệt đới, nơi điều kiện môi trường phức tạp và sự đa dạng sinh học cao có thể làm giảm độ chính xác của các phương pháp đo lường đơn lẻ [14]. Landsat-9 được phóng lên quỹ đạo ngày 27/9/2021 với độ cao quỹ đạo khoảng 705 km và góc nghiêng 98,2°, là vệ tinh mới nhất trong dòng vệ tinh Landsat mang theo thiết bị chụp ảnh đa phổ OLI-2 cung cấp các ảnh chụp bề mặt Trái đất với độ chính xác bức xạ chi tiết hơn ở các dải sóng nhìn thấy, cận hồng ngoại và sóng ngắn so với thế hệ trước [15]. Trong khi đó, radar khẩu độ tổng hợp

(SAR) là một kỹ thuật radar sử dụng để tạo ra hình ảnh có độ phân giải không gian cao. SAR phát sóng điện từ xuống bề mặt Trái đất và thu lại tán xạ phản hồi từ các đối tượng trên bề mặt. Sentinel-1A SAR băng tần C, phóng lên quỹ đạo ngày 3/4/2014 với độ cao quỹ đạo khoảng 693 km và góc nghiêng 98,18°, có khả năng thâm nhập vào lớp thực vật nhưng không thể xuyên qua hoàn toàn vật liệu như thân cây dày. Do đó, radar băng tần C cung cấp các thông tin giá trị về cấu trúc tán lá và lớp trên cùng của thực vật, hỗ trợ trong việc phân tích và ước lượng sinh khối trong mọi điều kiện thời tiết và có tiềm năng lớn trong việc xác định trữ lượng carbon [13, 16, 17]. Tuy nhiên, việc kết hợp dữ liệu Sentinel-1 SAR và Landsat-9 OLI-2 vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ trong mô hình ước tính AGB tại hệ sinh thái rừng nhiệt đới ẩm, đặc biệt ở các khu rừng đặc dụng. Bên cạnh việc chọn dữ liệu viễn thám phù hợp, việc lựa chọn thuật toán tối ưu cũng là rất quan trọng trong việc thiết lập mô hình ước tính AGB. Phương pháp hồi quy thống kê truyền thống đơn giản và dễ tính toán, nhưng không thể mô tả một cách đầy đủ và hiệu quả mối quan hệ phi tuyến phức tạp giữa AGB và dữ liệu viễn thám [18]. Để cải thiện khả năng lượng hóa phi tuyến tính, các thuật toán học máy như: Cây quyết định (decision tree), Mạng nơ-ron nhân tạo (artificial neural network), K-láng giềng gần nhất (k-nearest neighbor), Máy vector hỗ trợ (support vector machine), đã được áp dụng để ước tính AGB từ nguồn dữ liệu viễn thám. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng các thuật toán dựa trên Cây quyết định hay Rừng quyết định ngẫu nhiên, cho kết quả tốt trong việc ước tính sinh khối [19, 20]. Hơn nữa, các thuật toán học máy thường có nhiều tham số có thể điều chỉnh theo từng khu vực nghiên cứu, đóng vai trò quan trọng trong việc tinh chỉnh mô hình. Tuy nhiên, quá trình điều chỉnh tham số này thường bị bỏ qua, độ nhạy của các tham số trong mô hình học máy dựa trên cây quyết định là khác nhau và quá trình tinh chỉnh tham số đó có ý nghĩa quan trọng đối với mức độ chính xác và hiệu quả của các mô hình trong việc ước tính AGB [13, 21].

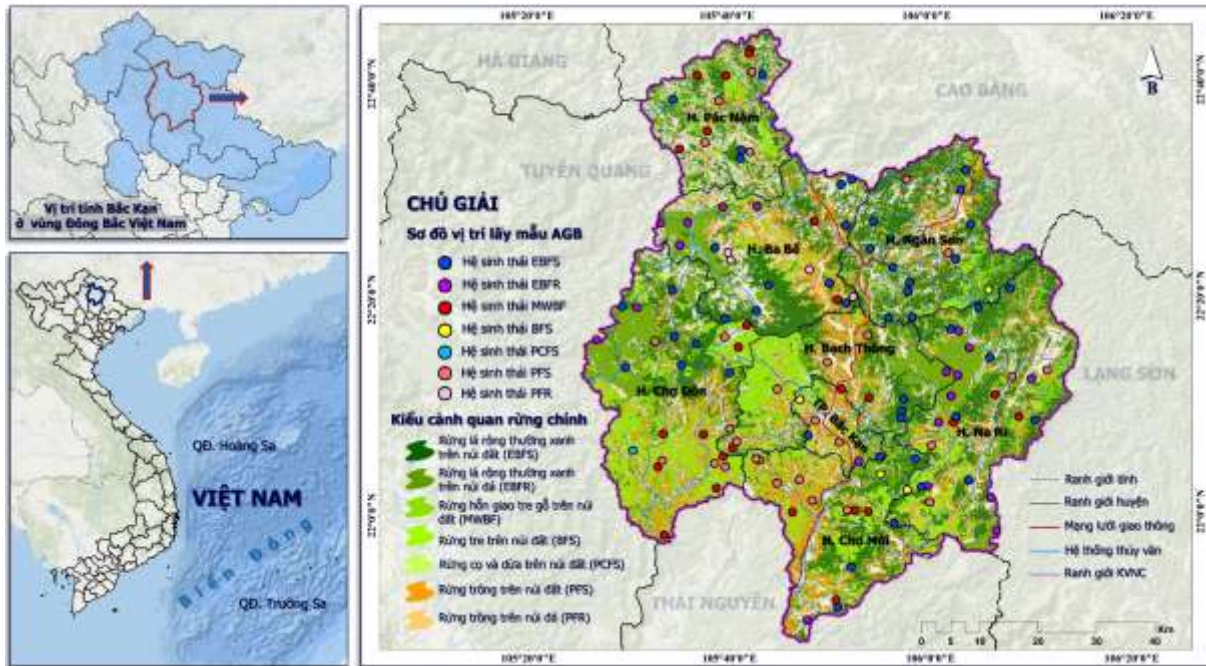
Tại các khu rừng nhiệt đới, đặc biệt ở khu vực Đông Bắc (Việt Nam) các phép đo thực địa

trên quy mô lớn kết hợp với dữ liệu viễn thám để xác định CS vẫn còn hạn chế. Bắc Kạn là tỉnh có tỷ lệ che phủ rừng cao nhất toàn quốc, việc đánh giá và định lượng CS vô cùng quan trọng, đặc biệt trong bối cảnh tiềm năng phát triển mạnh mẽ của thị trường tín chỉ carbon rừng trong định hướng phát triển và bảo tồn hệ sinh thái rừng bền vững [22]. Tuy nhiên, việc thiếu hụt dữ liệu về sinh khối trên tất cả các khu vực rừng địa phương sẽ cản trở việc tính toán tín chỉ carbon trong các chính sách giảm phát thải của tỉnh trở nên phức tạp và ít hiệu quả hơn. Hạn chế này cũng gây ra trở ngại cho việc thực hiện các thỏa thuận và cam kết đa phương về biến đổi khí hậu ở cả cấp độ địa phương và quốc gia tại Việt Nam [23]. Trong các hệ sinh thái rừng có giá trị cao, việc ngăn chặn mất mát và bảo tồn các khu rừng giàu trữ lượng carbon đóng vai trò vô cùng quan trọng. Điều này không chỉ giúp giảm thiểu tác động của biến đổi khí hậu mà còn bảo vệ môi trường, duy trì hệ sinh thái tự nhiên và bảo tồn nguồn gen động thực vật. Trong nghiên cứu này, một mô hình tích hợp sử dụng dữ liệu từ Sentinel-1 SAR và Landsat-9 OLI-2, kết hợp với phương pháp hồi quy dựa trên thuật toán học máy Cubist được áp dụng để ước tính AGB và xác định phân bố không gian của CS trong hệ sinh thái rừng đặc trưng tại tỉnh Bắc Kạn. Đây là một phương pháp không xâm lấn trong ước tính sinh khối, với ưu điểm là khả năng thu thập dữ liệu trên diện rộng mà không làm gián đoạn hệ sinh thái tự nhiên, đồng thời tiết kiệm được thời gian và chi phí so với các phương pháp khác. Mục tiêu của nghiên cứu bao gồm: i) Xác định mô hình phù hợp nhất để ước tính AGB từ dữ liệu sinh khối được tính toán trên thực địa, kết hợp dữ liệu viễn thám đa nguồn và dữ liệu địa hình; ii) Lượng hóa và thành lập bản đồ phân bố không gian trữ lượng AGB và CS. Kết quả nghiên cứu như là một tài liệu cung cấp thông tin hữu ích giúp cho các nhà quản lý, hoạch định chính sách thiết lập các dự án bảo tồn những khu vực rừng có giá trị cao trong trữ lượng carbon, nhằm hướng tới mục tiêu phát triển bền vững và hướng tới phát thải ròng về 0 (Net Zero) vào năm 2050.

2. Khu vực nghiên cứu và hệ sinh thái rừng nhiệt đới

Bắc Kạn với diện tích tự nhiên khoảng 4.860 km² là một tỉnh miền núi nằm ở trung tâm vùng Đông Bắc, Việt Nam. Khoảng 80% diện tích là địa hình đồi núi với độ cao trung bình khoảng 600 m so với mực nước biển, địa hình bị chia cắt bởi nhiều dãy núi cao và sườn dốc. Khí hậu nằm trong vành đai mưa nhiệt đới ẩm của Đông Nam Á, với mùa mưa và mùa khô rõ rệt. Lượng mưa trung bình mỗi năm từ 1.400 đến 1.600 mm, độ ẩm trung bình khoảng 84% và nhiệt độ trung bình hàng năm là 22 °C. Khu vực nghiên cứu có hệ sinh thái phong phú và đa dạng, bao gồm rừng tự nhiên, rừng trồng, đất nông nghiệp, khu dân cư và đất ngập nước. Trong đó, rừng chiếm khoảng 86% tổng diện tích đất tự nhiên, với tỷ lệ che phủ rừng ước tính khoảng 73,4% (cao nhất cả nước), rừng đóng vai trò quan trọng trong sự phát triển kinh tế-xã hội của tỉnh [22].

Bắc Kạn với hệ sinh thái rừng phong phú góp phần quan trọng vào công tác bảo tồn đa dạng sinh học, giảm thiểu biến đổi khí hậu. Bắc Kạn có bảy hệ sinh thái rừng chính, gồm: Rừng lá rộng thường xanh trên núi đất (EBFS), Rừng lá rộng thường xanh trên núi đá (EBFR), Rừng hỗn giao tre gỗ trên núi đất (MWBF), Rừng tre trên núi đất (BFS), Rừng cọ và dứa trên núi đất (PCFS), Rừng trồng trên núi đất (PFS) và Rừng trồng trên núi đá (PFR), được xác định và phân loại từ dữ liệu kiểm kê rừng năm 2020 bởi Viện Điều tra, Quy hoạch rừng, Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn. Đáng chú ý, ba khu rừng đặc dụng bao gồm: i) Vườn quốc gia Ba Bể hơn 10 nghìn ha; ii) Khu bảo tồn thiên nhiên Kim Hy có diện tích vùng lõi hơn 15,7 nghìn ha và vùng đệm gần 23 nghìn ha; và iii) Khu bảo tồn loài và sinh cảnh Nam Xuân Lạc vùng lõi 4,1 nghìn ha, vùng đệm 16,3 nghìn ha. Hệ thực vật tại các khu vực có rừng trên địa bàn đa dạng và có giá trị sinh thái cao. Các khu vực này được coi là trung tâm bảo tồn nguồn gen quý cho động và thực vật khu vực Đông Bắc, Việt Nam.



Hình 1. Vị trí nghiên cứu và các ô tiêu chuẩn trong hệ sinh thái rừng tại tỉnh Bắc Kạn.

3. Phương pháp nghiên cứu và dữ liệu sử dụng

3.1. Dữ liệu sử dụng

3.1.1. Thu thập số liệu thực địa

Bộ dữ liệu thực địa bao gồm 130 ô điều tra được thu thập đại diện cho trữ lượng AGB ở các khu vực có rừng (rừng tự nhiên và rừng trồng). Các ô mẫu được thu thập, cập nhật và tính toán trong giai đoạn từ 2020-2023. Ô điều tra được thiết kế đáp ứng các tiêu chí sau: i) Tính đại diện của các loại rừng đang nghiên cứu và các điều kiện địa hình tương ứng; ii) Độ che phủ của một số kích thước cây khác nhau; iii) Thiết lập trên các khu rừng ít bị xáo trộn, nơi có cây lớn. Đối với ô điều tra cây gỗ rừng tự nhiên có diện tích 1.000 m², hình tròn, bán kính 17,84 m, tâm trùng với tâm ô đo đếm để điều tra, thu thập số liệu cây gỗ rừng tự nhiên (Rừng lá rộng thường xanh trên núi đất, Rừng lá rộng thường xanh trên núi đá, Rừng hỗn giao tre gỗ trên núi đất, Rừng tre trên núi đất, Rừng cọ và dừa trên núi đất). Đối với ô điều tra cây gỗ rừng trồng có diện tích 500 m², hình tròn, bán kính 12,62 m, tâm trùng với tâm ô

đo đếm, để điều tra cây gỗ rừng trồng (Rừng trồng trên núi đất, Rừng trồng trên núi đá). Đối với các cây có $D_{1,3} \geq 6$ cm được kiểm đếm và đo chi tiết bằng các thiết bị đo khoảng cách, chiều cao và tự cải bằng độ dốc. Đối với những cây có $D_{1,3} < 6$ cm, thì chỉ kiểm đếm số lượng cây trong ô mẫu phụ. Các thông số thiết yếu này được sử dụng để tính toán trữ lượng AGB thực tế dựa trên các phương trình sinh khối phù hợp riêng với hệ sinh thái rừng hiện có ở Bắc Kạn. Các giá trị trữ lượng AGB dao động từ 44,37 Mg ha⁻¹ đến 285,89 Mg ha⁻¹, với giá trị trung bình là 157,73 Mg ha⁻¹ và độ lệch chuẩn là 27,29 Mg ha⁻¹. Trong đó, các ô mẫu được phân bố theo hệ sinh thái rừng với 48 ô mẫu thuộc Rừng lá rộng thường xanh trên núi đất (EBFS), 19 ô mẫu thuộc Rừng lá rộng thường xanh trên núi đá (EBFR), 23 ô mẫu thuộc Rừng hỗn giao tre gỗ trên núi đất (MWBF), 4 ô mẫu thuộc Rừng tre trên núi đất (BFS), 4 ô mẫu thuộc Rừng cọ và dừa trên núi đất (PCFS), 28 ô mẫu thuộc Rừng trồng trên núi đất (PFS) và 4 ô mẫu thuộc Rừng trồng trên núi đá (PFR). Các ô mẫu thực địa được phân tầng ngẫu nhiên, có tính đến tỷ lệ các hệ sinh thái rừng

nhật đới phổ biến ở Bắc Kạn. Các ô mẫu này được chia thành hai tập mẫu riêng biệt, với 70% tập mẫu được sử dụng cho quá trình huấn luyện và 30% tập mẫu còn lại được sử dụng để đánh giá độ chính xác của mô hình dự đoán.

3.1.2. Ảnh viễn thám và dữ liệu GIS

Dữ liệu ảnh vệ tinh đa phổ Landsat-9 OLI-2 với độ che phủ mây dưới 3% và dữ liệu Sentinel-1A SAR đều được thu thập miễn phí từ <https://earthexplorer.usgs.gov> và <https://search.asf.alaska.edu>, được sử dụng để ước tính AGB. Khu vực nghiên cứu được lựa chọn từ một cảnh ảnh Landsat-9 OLI-2 và hai cảnh ảnh Sentinel-1A SAR thu nhận vào cùng thời điểm trong ngày. Việc sử dụng dữ liệu ảnh viễn thám

từ cùng một thời điểm tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình tiền xử lý dữ liệu, bao gồm: i) Đảm bảo chất lượng ảnh tối ưu so với các ảnh khác trong cùng giai đoạn; ii) Sử dụng ảnh từ một ngày cụ thể giúp duy trì tính nhất quán, giảm thiểu ảnh hưởng của các yếu tố tạm thời như ánh sáng, mây mù, và nhiễu, dù chúng không ảnh hưởng lớn đến diện tích rừng nhưng có thể ảnh hưởng đến chất lượng ảnh; và iii) Xử lý và phân tích nhiều ảnh chụp vào các thời điểm khác nhau có thể yêu cầu nhiều thời gian và tài nguyên hơn. Do đó, nghiên cứu lựa chọn sử dụng dữ liệu từ một ngày chụp với chất lượng ảnh tốt nhất, kết hợp với các dữ liệu khác như bản đồ khảo sát và bản đồ kiểm kê rừng, nhằm tổng hợp và phân loại các hệ sinh thái rừng đặc trưng trong khu vực nghiên cứu.

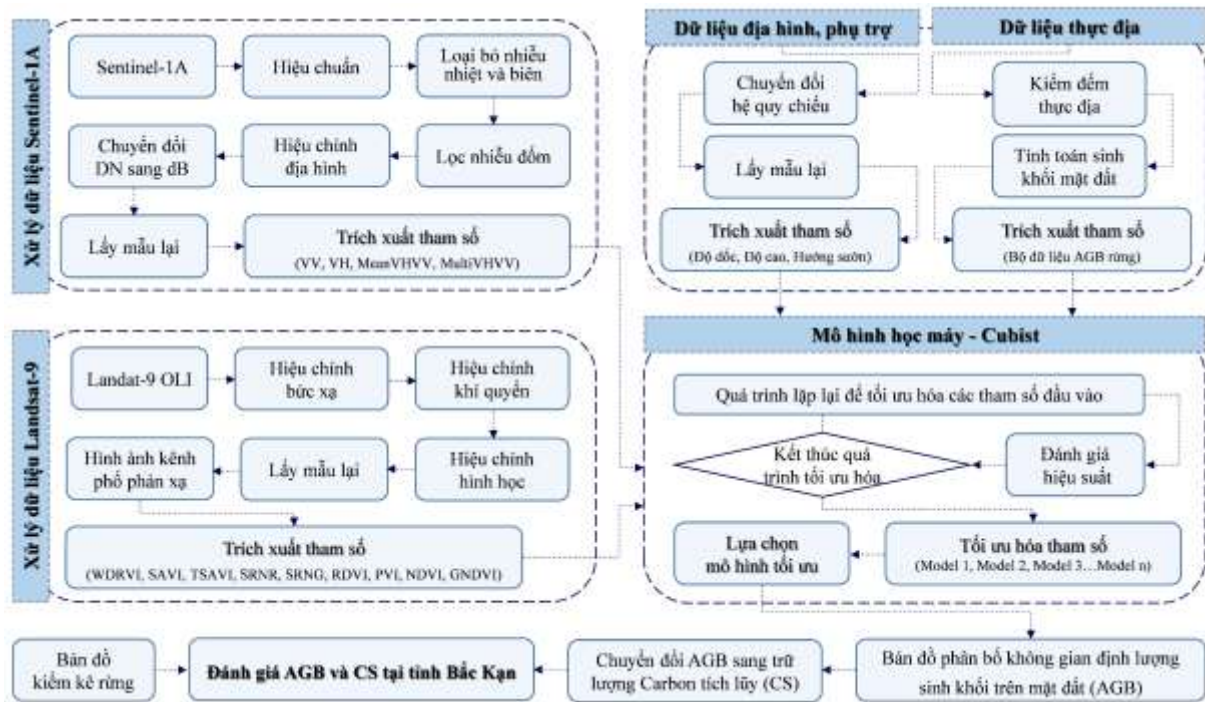
Bảng 1. Dữ liệu sử dụng và đặc tính cảm biến của ảnh vệ tinh Landsat-9 OLI-2, Sentinel-1A SAR

Ngày thu thập	Loại dữ liệu sử dụng	Chế độ ảnh	Độ phân giải phổ/ Bước sóng	Độ phân giải không gian/tỷ lệ
2022-12-19	Landsat-9 OLI-2 (Collection 2, Level-1)	Đa phổ	Blue (0,452 – 0,512 μm)	30 m
			Green (0,533 – 0,590 μm)	
			Red (0,636 – 0,673 μm)	
			NIR (0,851 – 0,879 μm)	
			SWIR-1 (1,566 – 1,651 μm)	
			SWIR-2 (2,107 – 2,294 μm)	
2022-12-19	Sentinel-1A SAR (Level-1 data)	Phân cực	VV (5,546 cm)	10 m
			VH (5,546 cm)	
2020	Bản đồ khảo sát	N/A	N/A	1:50.000
2020	Bản đồ kiểm kê rừng	N/A	N/A	1:50.000

3.2. Phương pháp nghiên cứu

Tích hợp công nghệ viễn thám và hệ thống thông tin địa lý (GIS), cho phép tạo ra cái nhìn tổng quan chi tiết về phân bố không gian trữ lượng AGB và CS trong khu vực nghiên cứu. Hơn nữa, ứng dụng mô hình học máy hỗ trợ việc lựa chọn được mô hình tốt nhất để ước tính AGB trong các hệ sinh thái rừng đặc trưng của tỉnh Bắc Kạn. Nghiên cứu này mở rộng và cải tiến công trình của Đỗ Thị Nhung và cộng sự (2023) [14], sử dụng viễn thám tích hợp và thuật toán

học máy để ước tính AGB, đồng thời chứng minh tính phù hợp và linh hoạt về dữ liệu viễn thám đa nguồn trong các khu vực rừng nhiệt đới khác nhau. Quy trình được thực hiện như minh họa trong Hình 2 gồm: i) Tiền xử lý dữ liệu viễn thám quang học và radar; ii) Mô hình hóa AGB thực tế và các chỉ số dự đoán; iii) Đánh giá độ chính xác của các mô hình ước tính AGB; iv) Lựa chọn mô hình phù hợp để ước tính AGB cho khu vực nghiên cứu; và v) Đánh giá sự phân bố không gian trữ lượng AGB và CS trong hệ sinh thái rừng nhiệt đới ở tỉnh Bắc Kạn.



Hình 2. Khung phương pháp định lượng AGB và CS trong hệ sinh thái rừng nhiệt đới ở tỉnh Bắc Kạn.

3.2.1. Mô hình định lượng sinh khối trên mặt đất

- Xử lý và lựa chọn các biến độc lập trong mô hình dự đoán

Hình ảnh vệ tinh Landsat-9 OLI-2 được hiệu chỉnh bức xạ/khí quyển về phản xạ bề mặt sử dụng quy trình xử lý ATCOR (Atmospheric and Topographic Correction) được tích hợp trong gói phần mềm Catalyst Professional (<https://catalyst.earth/>) theo các bước sau: i) Hiệu chỉnh phản xạ đỉnh khí quyển (TOA); ii) Loại bỏ mây và sương mù khỏi ảnh (Haze removal); và iii) Chuyển đổi giá trị bức xạ thành giá trị phản xạ bề mặt (Ground reflectance). Ảnh vệ tinh Sentinel-1A SAR với hai phân cực VV (Vertical-Vertical) và VH (Vertical-Horizontal), được xử lý bằng công cụ Sentinel-1 (S1TBX) trong gói phần mềm mã nguồn mở SNAP (<https://step.esa.int/>) theo các bước: i) Hiệu chuẩn các giá trị hình ảnh thô (DN) thành hệ số tán xạ ngược (σ^0); ii) Sử dụng bộ lọc thích ứng tăng cường Frost với kích thước cửa sổ di chuyển (7x7) để giảm nhiễu đốm (hay nhiễu hạt) và làm mịn các hệ số tán xạ ngược; và iii) Hiệu

chỉnh biến dạng địa hình bằng dữ liệu mô hình số độ cao (DEM) với độ phân giải không gian 30 m. Cuối cùng, cả hai dữ liệu Landsat-9 OLI-2 và Sentinel-1A SAR đều được tham chiếu địa lý về hệ tọa độ WGS-84, múi 48. Hình ảnh viễn thám quang học cung cấp thông tin hữu ích về điều kiện rừng nhiệt đới, bằng cách chuyển đổi các ảnh tỷ số giữa các dải quang phổ để tăng cường sự đóng góp của các đặc điểm thực vật hoặc các thành phần lý sinh của thực vật (lá, cành, thân). Trong khi, dải băng tần C từ ảnh SAR có bước sóng ngắn hơn so với các dải băng tần khác (L-band, P-band,...) khả năng đâm xuyên vào tán rừng và thăm thực vật không cao. Dải băng tần C rất nhạy cảm với độ ẩm đất, có thể gây nhiễu và ảnh hưởng đến tín hiệu tán xạ ngược từ các thành phần cấu trúc rừng [13, 17]. Nghiên cứu tiến hành thử nghiệm kết hợp sử dụng dữ liệu Sentinel-1A SAR với hình ảnh viễn thám quang học từ vệ tinh Landsat-9 OLI-2 đa phổ, để phân tích tương quan và ước tính AGB trong hệ sinh thái rừng nhiệt đới. Việc sử dụng quá nhiều chỉ số thực vật biến đổi có thể gây ra các vấn đề như đa cộng tuyến, giảm hiệu quả và

tính ổn định của mô hình [21]. Do đó, mười sáu chỉ số (biến độc lập) được trích xuất từ dữ liệu Landsat-9 OLI-2, Sentinel-1A SAR và từ dữ liệu địa hình đã được lựa chọn phù hợp để đảm bảo

ước tính AGB chính xác và tin cậy (Bảng 2), trong đó tất cả các chỉ số được tích hợp vào mô hình ước tính AGB tại khu vực nghiên cứu.

Bảng 2. Các biến dự đoán từ ảnh Landsat-9 OLI-2, Sentinel-1A SAR và dữ liệu từ địa hình

Biến độc lập		Tên/phương trình	Tham khảo
Chỉ số quang phổ từ Landsat-9 OLI-2	Chỉ số sắc tố không nhạy cảm với cấu trúc (Structurally Independent Pigment Index)	$SIPI = \frac{(NIR - BLUE)}{(NIR - RED)}$	[24]
	Chỉ số thực vật khác biệt chuẩn hóa (Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$	
	Tỷ số kênh cận hồng ngoại và xanh lục (Simple Ratio Near Infrared/Green)	$SRNG = \frac{NIR}{GREEN}$	[14]
	Tỷ số kênh cận hồng ngoại và đỏ Tỷ lệ đơn gian cận hồng ngoại/đỏ)	$SRNR = \frac{NIR}{RED}$	
	Chỉ số thực vật hiệu chỉnh đất (Soil Adjusted Vegetation Index)	$SAVI = \frac{1.25 \times (NIR - RED)}{NIR + RED + 0.25}$	[25]
	Chỉ số thực vật phạm vi động rộng (Wide Dynamic Range Vegetation Index)	$WDRVI = \frac{0.1NIR - RED}{0.1NIR + RED}$	[26]
	Chỉ số thực vật khác biệt chuẩn hóa xanh lục (Green Normalized Difference Vegetation Index)	$GNDVI = \frac{(NIR - GREEN)}{(NIR + GREEN)}$	[27]
	Chỉ số thực vật chuyển đổi điều chỉnh đất (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index)	$TSAVI = \frac{a \cdot NIR - a \cdot RED - b}{RED + a \cdot NIR - ab}$	[26]
	Chỉ số thực vật vuông góc (Perpendicular Vegetation Index)	$PVI = (\alpha \times NIR) - (\beta \times RED)$	[28]
Chỉ số tán xạ ngược từ Sentinel-1A SAR	Phân cực truyền dọc – nhận ngang (Vertical Transmit-Horizontal Receive)	VH (dB)	[13]
	Phân cực truyền dọc – nhận dọc (Vertical Transmit-Vertical Receive)	VV (dB)	
	Chỉ số phân cực trung bình (Polarization mean)	$MeanVHVV = (VH + VV)/2$	
	Chỉ số phân cực tích (Polarization multiply)	$MultiVHVV = (VH \times VV)$	
Chỉ số từ địa hình	Độ cao (DEM 30 m)	ELEVATION	
	Độ dốc (DEM 30 m)	SLOPE	
	Hướng dốc (DEM 30 m)	ASPECT	

- Mô hình định lượng sinh khối trên mặt đất sử dụng thuật toán học máy

Trong các mô hình hồi quy hiện nay, phương pháp hồi quy tuyến tính đa bội từng bước đã được sử dụng để xác định các biến đầu vào quan trọng, đặc biệt là các chỉ số thực vật liên quan đến sinh khối [14, 29, 30]. Từ nghiên cứu đầu

tiên của Quinlan (1992) được công bố, mô hình lập thể Cubist đã trở thành một công cụ phổ biến trong việc giải quyết nhiều vấn đề liên quan đến ứng dụng hồi quy [31]. Cubist là một phương pháp học máy được thiết kế để xử lý các bài toán hồi quy, với điểm mạnh ở sự kết hợp các kỹ thuật từ nhiều phương pháp khác nhau để tận dụng ưu

điểm của từng phương pháp và giảm thiểu nhược điểm của chúng, xây dựng một mô hình dự đoán chính xác và tối ưu [12, 32]. Mô hình Cubist chọn một tập hợp cụ thể các biến dự đoán, sử dụng cây quyết định (decision tree) tích hợp hồi quy tuyến tính (linear regression) và hồi quy từng phần (piecewise regression) vào các nút và nhánh của cây trước khi chia nhỏ dữ liệu thành các lớp con dựa trên đặc điểm quan trọng nhất. Hồi quy tuyến tính trong mô hình Cubist là một phương pháp thống kê cổ điển được sử dụng để dự đoán giá trị của một biến phụ thuộc (sinh khối trên mặt đất) dựa trên giá trị của một biến hoặc nhiều biến độc lập (các chỉ số ước tính). Bằng cách áp dụng hồi quy tuyến tính trong từng phân vùng của cây quyết định, Cubist có thể tạo ra các mô hình dự đoán chính xác và linh hoạt hơn. Điều này giúp tăng cường khả năng của mô hình trong việc nắm bắt các mối quan hệ phi tuyến tính phức tạp giữa các biến. Thông qua thuật toán học máy, Cubist có thể xác định các biến có tầm quan trọng thấp và loại bỏ chúng, giảm số lượng biến đầu vào và cải thiện hiệu suất của mô hình dự đoán. Các mô hình dự đoán vẫn được liên kết bằng cách sử dụng kết hợp tuyến tính của hai mô hình được thể hiện theo Công thức (1).

$$\hat{y}_{par} = a \times \hat{y}_{(k)} + (1 - a) \times \hat{y}_{(p)} \quad (1)$$

Trong đó, \hat{y}_k là dự đoán từ mô hình hiện tại và \hat{y}_p là mô hình gốc phía trên trong nhánh mô hình, với hệ số a đại diện cho việc làm mượt hay mịn mô hình và được thực hiện theo công thức (2).

$$a = \frac{Var(e_p) - Cov(e_k, e_p)}{Var(e_p - e_k)} \quad (2)$$

Trong đó, $Var(e_p)$ tỉ lệ với sai số bình phương trung bình gốc (RMSE) của mô hình gốc, e_p là phần dư của mô hình gốc, e_k là phần dư là giá trị tương tự đối với mô hình dự đoán. Với hai bộ dữ liệu e_p và e_k , phương sai (Var) và hiệp phương sai (Cov) được tính toán. Nếu hệ số a gần với 0, điều này cho thấy hai mô hình không có mối quan hệ tuyến tính.

- Đánh giá độ chính xác của mô hình ước tính sinh khối trên mặt đất

Nghiên cứu tiến hành đơn giản hóa các mô hình thực nghiệm và chọn ra một mô hình tối ưu nhất để ước tính AGB từ dữ liệu viễn thám đa nguồn kết hợp với dữ liệu địa hình. Điều này được thực hiện thông qua việc ước tính sai số dự đoán kỳ vọng và sử dụng các chỉ số đánh giá độ chính xác của mô hình dự đoán. Trong nghiên cứu, 91 ô mẫu AGB thực tế (chiếm 70%) được sử dụng cho mỗi vòng lặp của quá trình huấn luyện mô hình Cubist, trong khi 39 số mẫu còn lại (30%) được dùng để đánh giá độ chính xác của các mô hình dự đoán (mức độ phù hợp của một mô hình hồi quy với dữ liệu). Xác thực chéo (Cross validation-CV) được sử dụng để đánh giá tính ổn định mô hình không chỉ hoạt động tốt trên dữ liệu huấn luyện mà còn có thể tổng quát hóa tốt trên dữ liệu chưa thấy trong việc ước tính AGB, từ đó điều chỉnh và cải thiện mô hình cho phù hợp hơn. Để đánh giá hiệu suất của các mô hình dự đoán, nghiên cứu đã sử dụng phương pháp xác thực chéo 10-fold như đã được đề xuất trong nghiên cứu trước đây [17]. Đầu tiên, dữ liệu được chia ngẫu nhiên thành 10 tập hợp con, với một trong các tập hợp con được sử dụng làm tập dữ liệu để đánh giá độ chính xác mô hình và chín tập hợp con còn lại được sử dụng để huấn luyện. Việc huấn luyện được lặp lại 10 lần và sử dụng tất cả các tập con. Đánh giá độ chính xác của các mô hình dự đoán trong Cubist, nghiên cứu sử dụng Hệ số xác định (R^2) theo Công thức 3; Sai số bình phương trung bình gốc (RMSE) theo Công thức 4; và Sai số tuyệt đối trung bình (MAE) theo Công thức 5.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum e^2}{\sum y^2} = \frac{\hat{\beta}_2 \sum y_t x_{2t} + \hat{\beta}_3 \sum y_t x_{3t}}{\sum y_t^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (5)$$

Trong đó, e là sai số dự đoán (giữa giá trị dự đoán và giá trị thực tế); y là hiệu giữa giá trị thực tế và giá trị trung bình của biến phụ thuộc; n là số lượng mẫu; y_i là giá trị thực tế; và \hat{y}_i là giá trị dự đoán. Giá trị R^2 cao hơn và các giá trị RMSE, MAE thấp hơn cho thấy độ chính xác của mô hình ước tính AGB tốt hơn.

3.2.2. Định lượng trữ lượng carbon tích lũy trong hệ sinh thái rừng nhiệt đới

Sự phát triển của mô hình ước tính AGB phụ thuộc rất nhiều vào việc sử dụng các biến độc lập (các chỉ số ước tính) và hiệp phương sai thích hợp, có khả năng tác động đến cả AGB dự đoán cũng như các biến được chọn. Các nghiên cứu trước đây đã sử dụng hệ số chuyển đổi trữ lượng carbon là 47% theo quy định của hệ số chuyển đổi carbon mặc định sinh khối [33, 34]. Trong nghiên cứu cụ thể này, hệ số chuyển đổi liên quan đến mối quan hệ giữa sinh khối trên mặt đất và sinh khối dưới mặt đất được xác lập riêng cho rừng nhiệt đới. Điều quan trọng cần lưu ý là nghiên cứu tập trung vào định lượng trữ lượng carbon trong hệ sinh thái rừng nhiệt đới như: Rừng lá rộng thường xanh trên núi đất (EBFS), Rừng lá rộng thường xanh trên núi đá (EBFR), Rừng hỗn giao tre gỗ trên núi đất (MWBF), Rừng tre trên núi đất (BFS), Rừng cọ và dừa trên núi đất (PCFS), Rừng trồng trên núi đất (PFS) và Rừng trồng trên núi đá (PFR). Nghiên cứu áp dụng tỷ lệ rễ-chồi (Root-Shoot Ratio - RSR) là một chỉ số quan trọng trong nghiên cứu trữ lượng carbon. RSR cho biết mối quan hệ giữa phần rễ và phần trên mặt đất (chồi, thân, lá) của cây. Đối với hệ sinh thái rừng nhiệt đới, giá trị RSR được đề xuất mặc định là 0,205 đối với giá trị AGB dưới 125 Mg ha⁻¹ và 0,235 đối với giá trị AGB trên 125 Mg ha⁻¹. CS được tính theo Công thức 6 dưới đây.

$$CS_i = [AGB_i + (AGB_i \times RSR)] \times 47\% \quad (6)$$

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Mô hình ước tính AGB dựa trên thuật toán học máy Cubist

Thuật toán học máy trong mô hình Cubist được áp dụng để ước tính AGB trong khu vực nghiên cứu, sử dụng dữ liệu sinh khối thu thập trên thực địa cùng với các chỉ số dự đoán được tính toán từ dữ liệu ảnh viễn thám đa nguồn

(WDRVI, SAVI, TSAVI, SRNR, SRNG, RDVI, PVI, NDVI, GNDVI, VH, VV, MultiVHVV, MeanVHVV), kết hợp với các chỉ số được trích xuất từ dữ liệu địa hình (ASPECT, ELEVATION, SLOPE) được sử dụng làm biến độc lập. Mô hình Cubist lựa chọn các tham số tối ưu có tác động đáng kể đến độ chính xác của các mô hình dự đoán bằng cách loại bỏ các biến đầu vào ít quan trọng trong quá trình tính toán hồi quy. Kết quả kết hợp của các biến dự đoán từ 130 mô hình được tính toán trong Cubist và các chỉ báo thống kê tổng thể đánh giá độ chính xác của các mô hình ước tính AGB được thể hiện trong Bảng 3. Các số liệu đánh giá độ chính xác mô hình dự đoán với CV-RMSE trong khoảng từ 33,35 Mg ha⁻¹ đến 46,33 Mg ha⁻¹; giá trị CV-R² từ 0,62 đến 0,78; và CV-MAE từ 32,80 Mg ha⁻¹ đến 45,13 Mg ha⁻¹. Trong khi đó, các giá trị đánh giá độ chính xác thực tế trong mô hình ước tính AGB từ dữ liệu viễn thám đa nguồn và dữ liệu địa hình, có giá trị cao hơn không đáng kể so với các giá trị đánh giá độ chính xác của mô hình.

Nhìn chung, ước tính sinh khối trên mặt đất từ mô hình Cubist với các đại lượng đánh giá thống kê CV-RMSE, CV-R² và CV-MAE nằm trong khoảng trung bình (dao động từ 20 đến 50 Mg ha⁻¹) của các nghiên cứu tương tự [13, 14, 17]. Đặc biệt, Model 1 đạt độ chính xác cao trong ước tính AGB với giá trị R² là 0,77; RMSE là 35,90 Mg ha⁻¹; và giá trị MAE là 34,66 Mg ha⁻¹ (Bảng 3). Kết quả tính toán bằng cách sử dụng sáu biến dự đoán từ ba chỉ số quang phổ của ảnh vệ tinh Landsat-9 OLI-2 (WDRVI, SRNG, SRNR), hai chỉ số từ ảnh Sentinel-1A SAR (VV, MeanVHVV) và một biến từ dữ liệu địa hình (SLOPE). Kết quả Model 1 được lựa chọn là mô hình tối ưu để ước tính AGB trong số các mô hình Cubist được tính toán từ ảnh vệ tinh đa nguồn kết hợp với dữ liệu địa hình tại tỉnh Bắc Kạn (Việt Nam), được tính theo Công thức 7.

$$AGB = 4,35 - (65 \times WDRVI) + (20,8 \times SRNG) + (17,8 \times SRNR) + (1,21 \times SLOPE) - (2,08 \times VV) - (0,14 \times MeanVHVV) \quad (7)$$

Bảng 3. Các biến được chọn từ mô hình khác nhau và chỉ báo thống kê từ mô hình Cubist bằng cách sử dụng tập dữ liệu kiểm chứng

Lựa chọn mô hình	Số biến được chọn	Các biến tối ưu dự đoán định lượng sinh khối trên mặt đất (AGB)	Đánh giá độ chính xác					
			CV-RMSE	CV-R ²	CV-MAE	RMSE	R ²	MAE
Model 1	6	WDRVI, SRNG, SRNR, VV, MeanVHVV, SLOPE	33,35	0,78	32,80	35,90	0,77	34,66
Model 2	8	WDRVI, ASPECT, SRNR, SRNG, VV, SAVI, GNDVI, SLOPE	34,15	0,75	33,81	38,73	0,73	37,00
Model 3	5	WDRVI, NDVI, SRNR, GNDVI, VV	37,67	0,72	35,44	38,7	0,71	37,76
Model 4	7	VV, MultiVHVV, PVI, SRNR, RDVI, TSAVI, SLOPE	38,40	0,71	36,39	40,25	0,69	38,55
Model 5	6	ASPECT, NDVI, SRNG, VV, SLOPE, GNDVI	38,07	0,71	36,18	40,88	0,68	38,63
Model 6	6	VV, SRNR, TSAVI, PVI, VH, SLOPE	40,17	0,69	38,07	41,71	0,67	38,77
Model 7	4	ASPECT, WDRVI, GNDVI, SLOPE	40,50	0,69	37,66	43,04	0,66	39,50
Model 8	5	WDRVI, NDVI, SRNR, PVI, VV	42,09	0,67	39,55	43,39	0,63	40,59
Model 9	5	ASPECT, SRNG, SAVI, SLOPE, GNDVI	42,12	0,66	40,19	44,64	0,63	41,84
Model 10	8	WDRVI, ASPECT, SRNR, SRNG, VV, SAVI, GNDVI, SLOPE	46,33	0,62	45,13	46,73	0,61	43,94

Việc lựa chọn các chỉ số quang phổ WDRVI, SRNG và SRNR từ sự kết hợp giữa các kênh ảnh Red, Nir và Green của ảnh vệ tinh Landsat-9 OLI-2, phản ánh giá trị phản xạ và hấp thụ của thực vật, cung cấp thông tin về mật độ và sức sống của rừng. WDRVI là một chỉ số cải tiến của NDVI, giúp tăng độ nhạy trong việc đo lường mật độ thực vật, đặc biệt trong các vùng có tán lá dày đặc. Hệ số âm (-65) có nghĩa là khi giá trị của WDRVI giảm (giá trị càng xa 0), giá trị AGB sẽ giảm đi đáng kể. Điều này có thể do khi mật độ thực vật quá dày, bức xạ mặt trời không xuyên qua được tán lá, làm giảm khả năng sinh trưởng của thực vật dưới tán. Hai chỉ số SRNG và SRNR đều có hệ số dương cao (20,8 và 17,8) phản ánh mối quan hệ tích cực giữa sức sống của thực vật và sinh khối. SRNG và SRNR thể hiện sự khác biệt trong phản xạ cấu trúc rừng ở các vùng bước sóng khác nhau của vùng nhìn thấy và cận hồng ngoại. Các chỉ số WDRVI, SRNG, SRNR từ ảnh viễn thám quang học, có khả năng tăng cường mối quan hệ tuyến tính giữa sinh khối và kênh Nir, từ đó làm giảm

độ bão hòa của các biến [17, 35]. Trong khi đó, phân cực VV được mô hình Cubist lựa chọn trong định lượng sinh khối rừng, như đã được thảo luận trong các công trình nghiên cứu gần đây [13, 14]. Phân cực VV nhạy cảm với độ dày của tán cây, chiều cao cây và mật độ cây, cho phép phân tích chi tiết về cấu trúc rừng và sự phân bố sinh khối trong không gian của hệ sinh thái rừng nhiệt đới. Hệ số âm (-2,08) cho thấy sự tăng lên của VV (giá trị tiến gần tới 0) có liên quan đến sự giảm đi của giá trị AGB. Chỉ số MeanVHVV phản ánh sự đóng góp yếu hơn của phân cực VH so với VV. Chỉ số MeanVHVV là giá trị trung bình của hai phân cực VH và VV, sự kết hợp này giúp giảm nhiễu và mang tính ổn định cao hơn so với việc sử dụng tổng của VH và VV trong ước tính sinh khối trên mặt đất. Việc lựa chọn chỉ số trung bình từ hai phân cực VH và VV cho phép khai thác thông tin từ cả hai chiều tín hiệu, góp phần cải thiện độ chính xác trong ước tính AGB, đặc biệt trong hệ sinh thái rừng nhiệt đới có cấu trúc thảm thực vật phức tạp. Do đó, hệ số (-0,14) chỉ ra mối quan hệ

tương tự như VV, tức là giá trị MeanVHVV càng lớn thì giá trị AGB sẽ giảm đi đáng kể. Ngoài ra, sự đóng góp của độ dốc (SLOPE) cũng là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng tích cực đến sự phân bố sinh khối rừng. Hệ số dương (1,21) cho thấy sự phân bố của sinh khối theo độ cao và độ dốc của địa hình trong khu vực nghiên cứu, SLOPE có tương quan thuận với AGB tập trung chủ yếu ở khu vực có độ dốc trung bình (15-30°). Ở những khu vực có độ dốc trung bình tạo điều kiện thuận lợi cho sự tích tụ chất hữu cơ, qua đó thúc đẩy sự phát triển của rừng và gia tăng trữ lượng sinh khối. Đặc biệt, SLOPE còn có vai trò đáng kể đến khả năng hấp thụ, phản xạ và tán xạ ngược của bức xạ đến các thành phần của rừng. Độ dốc địa hình quá cao (trên 45°) thường làm giảm lượng bức xạ nhận được tại một vị trí cụ thể trong khu vực, điều này góp phần giải thích thêm mối liên hệ giữa SLOPE và sinh khối. Sự hạn chế bức xạ có thể ảnh hưởng tiêu cực đến sinh trưởng và phát triển của rừng.

4.2. Đánh giá phân bố không gian AGB và trữ lượng carbon tích lũy tại tỉnh Bắc Kạn

Trong các mô hình ước tính AGB, Model 1 với sáu biến (Bảng 3) cho dự đoán chính xác nhất để ước tính AGB trong các hệ sinh thái rừng nhiệt đới tại tỉnh Bắc Kạn. Dựa trên Công thức 7, bản đồ phân bố không gian trữ lượng AGB đã được xây dựng. Các khu vực không có rừng, chẳng hạn như đất trống, đất nông nghiệp, đất dân cư và vùng nước mặt đã bị loại khỏi kết quả của bản đồ định lượng trữ lượng AGB. Bản đồ AGB được phân loại theo các mức mật độ trữ lượng sinh khối khác nhau, bao gồm: dưới 50 Mg ha⁻¹, 50-100 Mg ha⁻¹, 100-150 Mg ha⁻¹, 150-200 Mg ha⁻¹, và trên 200 Mg ha⁻¹. Đồng thời, kết quả tổng diện tích được cung cấp cho từng ngưỡng trữ lượng sinh khối tương ứng cho các hệ sinh thái rừng nhiệt đới khác nhau tại tỉnh Bắc Kạn.



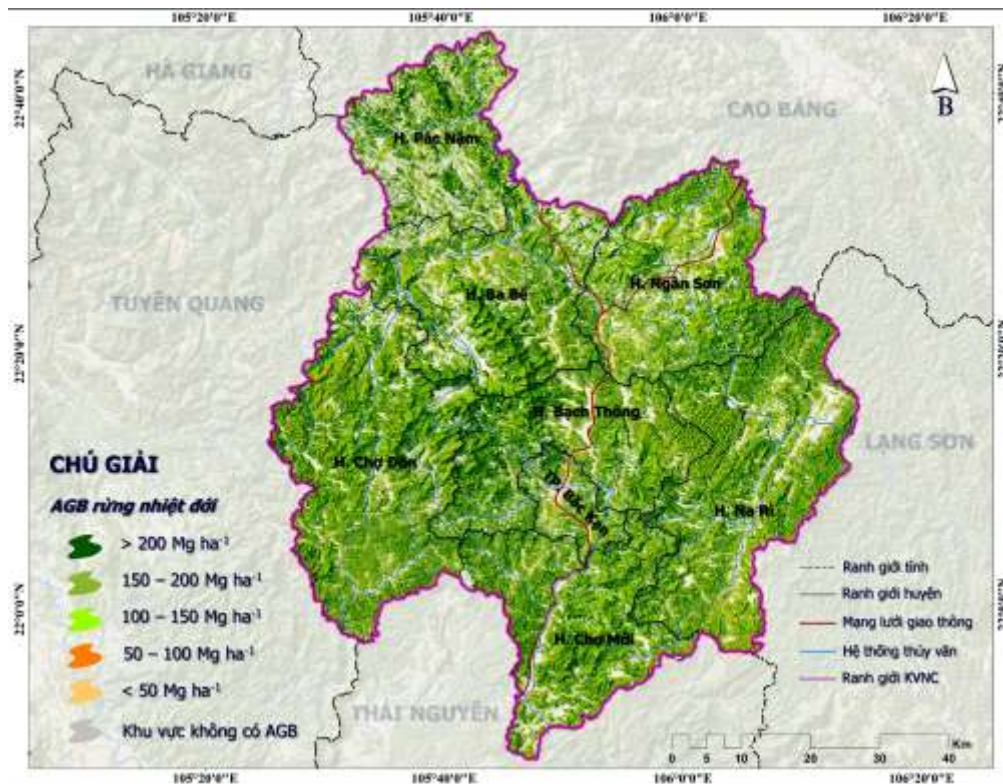
Hình 3. Phân bố trữ lượng sinh khối trên mặt đất (AGB) và carbon tích lũy (CS) theo các hệ sinh thái rừng khác nhau ở tỉnh Bắc Kạn.

Phần lớn hệ sinh thái rừng nhiệt đới ở Bắc Kạn được tập trung ở các ngưỡng trữ lượng sinh

khối: 100-150 Mg ha⁻¹, 150-200 Mg ha⁻¹, và trên 200 Mg ha⁻¹. Phần lớn các khu rừng trong khu

vực nghiên cứu có giá trị AGB trên 150 Mg ha^{-1} , chiếm khoảng 68% tổng diện tích rừng của khu vực này (Hình 3). Trong đó, hệ sinh thái Rừng lá rộng thường xanh trên núi đất (EBFS) có diện tích lớn nhất với 103.002 ha; Rừng hỗn giao tre gỗ trên núi đất (MWBF) với 61.897 ha; Rừng trồng trên núi đất (PFS) có diện tích 57.342 ha; và Rừng lá rộng thường xanh trên núi đá (EBFR) có diện tích 32.792 ha. Ngoài ra, có khoảng 77.744 ha diện tích rừng có giá trị trữ lượng AGB dao động từ $100\text{-}150 \text{ Mg ha}^{-1}$, tập trung chủ yếu ở hệ sinh thái Rừng lá rộng thường xanh trên núi đất (EBFS) với 31.839 ha; Rừng trồng trên

núi đất (PFS) với 18.668 ha; và hệ sinh thái Rừng hỗn giao tre gỗ trên núi đất (MWBF) với 15.241 ha. Có sự khác biệt đáng kể giữa các hệ sinh thái rừng, đặc biệt là giữa Rừng thường xanh lá rộng và Rừng cọ, dừa. Sự khác biệt này là do độ che phủ mặt đất của những cây cao có tán rộng trong hệ sinh thái Rừng lá rộng thường xanh (EBFS, EBFR) lớn hơn so với tán thưa thớt của hệ sinh thái Rừng cây cọ và dừa (PCFS). Tuy nhiên, với sự đa dạng hệ sinh thái rừng tại tỉnh Bắc Kạn, thì phần lớn các hệ sinh thái rừng nhiệt đới ở đây đều có CS cao.



Hình 4. Bản đồ phân bố không gian sinh khối rừng nhiệt đới tại tỉnh Bắc Kạn.

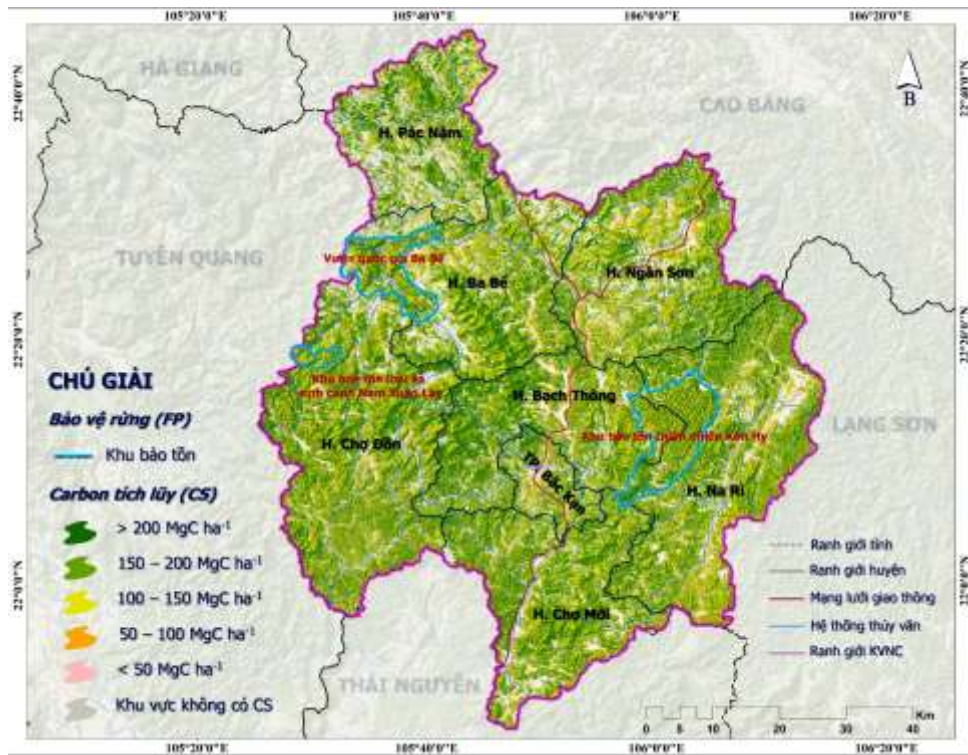
Phân bố không gian về trữ lượng AGB cho thấy sự phù hợp với các quan sát thực tế tại tỉnh Bắc Kạn (Hình 4). Các khu vực được mô tả bằng màu xanh đậm trên bản đồ, biểu thị giá trị AGB có trữ lượng sinh khối trên 200 Mg ha^{-1} trên mỗi pixel, trong khi các khu vực màu xanh lục nhạt hơn biểu thị giá trị sinh khối từ $150\text{-}200 \text{ Mg ha}^{-1}$, và các khu vực màu xanh nõn chuối biểu thị giá

trị AGB trong khoảng từ $100\text{-}150 \text{ Mg ha}^{-1}$. Các khu vực thuộc huyện Ba Bể, Na Rì và Chợ Đồn phân bố chủ yếu là các loại cây cao với đường kính lớn hơn. Hệ sinh thái Rừng lá rộng thường xanh và Rừng hỗn giao tre gỗ tự nhiên là hai trong số các hệ sinh thái rừng bao phủ chủ yếu khu vực này, do được áp dụng các biện pháp bảo vệ nghiêm ngặt. Ngược lại, các khu vực hiện thị

màu vàng nghệ thể hiện phân bố không gian của giá trị AGB từ 50-100 Mg ha⁻¹ và những khu vực màu vàng nhạt biểu thị giá trị AGB dưới 50 Mg ha⁻¹, tương ứng biểu thị giá trị AGB trung bình đến thấp hơn. Tại những khu vực này các hệ sinh thái Rừng lá rộng thường xanh tự nhiên thường thấy trên các đỉnh núi và rặng núi ở phía Đông Bắc của khu vực nghiên cứu.

Trữ lượng CS được tính toán từ trữ lượng AGB, sử dụng Công thức 6 (xem mục 2.3.2). Thống kê CS được thể hiện trong Hình 3 và phân bố không gian của CS được minh họa trong Hình 5. Kết quả cho thấy tổng trữ lượng CS trên toàn tỉnh Bắc Kạn là 37.947.207 MgC (khoảng 38 triệu tấn carbon), tương đương với khoảng 139 triệu tấn CO₂. Trong đó, Rừng lá rộng thường xanh trên núi đất (EBFS) có trữ lượng CS là 15.077.032 MgC (khoảng 55 triệu tấn CO₂),

chiếm khoảng 40% tổng trữ lượng CS trong các hệ sinh thái rừng nhiệt đới của tỉnh Bắc Kạn. Với Rừng hỗn giao tre gỗ trên núi đất (MWBF) với khoảng 23% (8.817.782 MgC ≈ 32 triệu tấn CO₂) và Rừng trồng trên núi đất (PFS) với khoảng 22% (8.594.634 MgC ≈ 31 triệu tấn CO₂). Ngoài ra, trữ lượng CS của AGB với giá trị trên 150 Mg ha⁻¹ chiếm khoảng 81% tổng trữ lượng CS của khu vực, tương ứng với 30.756.189 MgC hay khoảng 113 triệu tấn CO₂. Điều này phản ánh chính xác và phù hợp với mức độ che phủ rừng hiện tại trên địa bàn tỉnh Bắc Kạn, với những khu vực có màu xanh lục đậm và màu xanh lục nhạt trên bản đồ, thể hiện ngưỡng CS lần lượt trên 200 MgC ha⁻¹ và 150-200 MgC ha⁻¹. Các khu vực này được thể hiện nổi bật và tương ứng với các hệ sinh thái rừng nhiệt đới tại tỉnh Bắc Kạn.



Hình 5. Phân bố không gian CS và vị trí ba khu bảo tồn tại tỉnh Bắc Kạn.

Hệ sinh thái rừng của tỉnh Bắc Kạn đóng vai trò quan trọng trong việc lưu trữ và cân bằng carbon, giảm thiểu tác động xấu của biến đổi khí hậu. Khu vực này chủ yếu là hệ sinh thái Rừng

lá rộng thường xanh tự nhiên, với thành phần loài phong phú và cấu trúc tầng tán đa dạng có khả năng lưu trữ carbon đáng kể. Khu vực nghiên cứu có độ che phủ rừng cao nhất cả nước, đạt

73,4%, với ba khu rừng đặc dụng nổi bật là Vườn quốc gia Ba Bể, Khu bảo tồn thiên nhiên Kim Hy, Khu bảo tồn loài và sinh cảnh Nam Xuân Lạc [22]. Đây là ba khu rừng riêng biệt với hệ sinh thái rừng rất đa dạng và được bảo vệ nghiêm ngặt. Đặc trưng của các khu vực này là sự phong phú của các loại cây rừng, bao gồm cả rừng lá rộng thường xanh và rừng hỗn giao tự nhiên. Các vùng chuyên tiếp giữa những khu rừng này có mức độ lưu trữ carbon cao, dao động từ 100-150 MgC ha⁻¹, đặc biệt là những rừng có độ tuổi lớn

trên các đỉnh núi đá và rặng núi. Với đặc điểm vô cùng đa dạng của hệ sinh thái rừng ở Bắc Kạn, sự ưu thế của hệ sinh thái rừng lá rộng thường xanh tự nhiên và một số rừng trồng, đóng góp quan trọng vào việc duy trì và tăng cường trữ lượng carbon trong khu vực. Việc bảo vệ và quản lý hiệu quả các khu rừng có trữ lượng CS cao này là vô cùng cần thiết và cấp bách, đặc biệt là các khu bảo tồn thiên nhiên nơi sẽ tiếp tục giữ vai trò then chốt trong công tác quản lý và duy trì trữ lượng CS lâu dài và bền vững.



Hình 6. Minh họa đặc điểm một số hệ sinh thái rừng nhiệt đới ở tỉnh Bắc Kạn: A) Vị trí phát họa sơ đồ Khu bảo tồn thiên nhiên Kim Hy, B) Rừng lá rộng thường xanh trên núi đất, C) Rừng tre nứa trên núi đất và D) Rừng lá rộng thường xanh trên núi đá.

Việc định lượng trữ lượng AGB và CS, cũng cố thêm tầm quan trọng của hệ sinh thái rừng nhiệt đới trong chu trình carbon toàn cầu, đặc biệt là trong cách quản lý diện tích rừng hiệu quả cũng như khai thác chúng một cách khoa học. Với sự phát triển kinh tế-xã hội của tỉnh Bắc Kạn

như hiện nay những khu vực rừng này đang phải chịu sức ép lớn từ các hoạt động con người như khai thác gỗ, chuyển đổi đất rừng và các mục đích sử dụng đất khác. Do đó, việc xác định trữ lượng CS trong các hệ sinh thái rừng có ý nghĩa vô cùng quan trọng trong nỗ lực bảo tồn các khu

rừng có giá trị sinh thái cao (Hình 6). Việc tạo ra tín chỉ carbon như một lợi ích tài chính cho cộng đồng địa phương, hỗ trợ trong việc quản lý tài nguyên rừng mang lại lợi ích đáng kể cho các hoạt động nghiên cứu. Thực hiện chiến lược bảo tồn rừng dài hạn đóng vai trò quan trọng trong việc giảm thiểu những tác động không mong muốn của biến đổi khí hậu. Bảo vệ rừng không chỉ ngăn chặn tình trạng mất và suy thoái diện tích rừng, giảm phát thải khí nhà kính mà còn duy trì các bể chứa carbon có giá trị cao. Việc ưu tiên thực hiện các biện pháp quản lý hiệu quả để bảo vệ các hệ sinh thái rừng nhiệt đới có vai trò quan trọng trong việc lưu trữ carbon là cần thiết. Đồng thời, thúc đẩy kết nối giữa các khu bảo tồn và khu rừng trồng lân cận có giá trị lưu trữ carbon cao, như Rừng trồng trên núi đất (PFS) với trữ lượng khoảng 8,5 triệu MgC (31 triệu tấn CO₂), là vô cùng quan trọng. Hiện tại, nghiên cứu chưa bao gồm dữ liệu về tình trạng kết nối hoặc phân mảnh của các khu rừng. Tuy nhiên, nghiên cứu chưa xem xét mức độ liên kết giữa các khu rừng trồng xung quanh các khu rừng đặc dụng hoặc sự phân mảnh của chúng do các yếu tố như phát triển hạ tầng, khai thác rừng, hay các hoạt động khác. Những khu rừng thuộc hệ thống bảo tồn nghiêm ngặt như Vườn Quốc gia Ba Bể, Khu bảo tồn thiên nhiên Kim Hỷ và Khu bảo tồn loài và sinh cảnh Nam Xuân Lạc không được đưa vào đánh giá trong nghiên cứu này. Việc không bao gồm các khu rừng này có thể làm giảm sự đầy đủ của kết quả nghiên cứu về tình trạng và hiệu quả của các hệ sinh thái rừng trong việc lưu trữ carbon và bảo tồn môi trường. Do vậy, nghiên cứu cũng nhấn mạnh việc ưu tiên bảo tồn các khu rừng trọng điểm góp phần tạo ra môi trường sống liên tục và không bị chia cắt giữa các hệ sinh thái rừng, góp phần duy trì chức năng sinh thái, thích ứng với các tác động không mong muốn của biến đổi khí hậu.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã xác định mô hình tối ưu để ước tính AGB từ dữ liệu thực địa, kết hợp với dữ liệu viễn thám đa nguồn và dữ liệu địa hình, cung

cấp các thông tin chi tiết về phân bố không gian của trữ lượng CS trong các hệ sinh thái rừng tại tỉnh Bắc Kạn, Việt Nam. Sinh khối trên mặt đất là một chỉ số định lượng quan trọng trong quản lý và phát triển rừng bền vững, và việc lượng hóa trữ lượng CS là cần thiết để theo dõi các biến đổi bề mặt, cũng như khả năng mất mát và suy thoái của hệ sinh thái rừng nhiệt đới trong khu vực. Kết quả ước tính AGB từ các mô hình Cubist cho thấy các chỉ số đánh giá độ chính xác tốt nhất với RMSE=35,9, R²=0,77 và MAE=34,66, thông qua việc so sánh các hàm tính toán với chỉ báo thống kê tổng thể. Việc lựa chọn mô hình tối ưu và các biến độc lập phù hợp là rất quan trọng để nâng cao độ chính xác của kết quả ước tính AGB. Nghiên cứu đã thử nghiệm các mô hình với dữ liệu đầu vào từ ảnh vệ tinh Landsat-9 OLI-2, Sentinel-1A SAR và dữ liệu địa hình, cho thấy tiềm năng đáng kể của việc kết hợp các nguồn dữ liệu mở này trong việc cải thiện độ chính xác của mô hình ước tính AGB, nhờ vào khả năng cung cấp thông tin chi tiết và bổ sung về đặc điểm thảm thực vật và cấu trúc rừng. Tuy nhiên, việc chỉ sử dụng mô hình Cubist có thể hạn chế khả năng khai thác tối đa thông tin từ dữ liệu. Hy vọng rằng, các nghiên cứu tiếp theo nên xem xét việc kết hợp với các mô hình khác hoặc áp dụng phương pháp tổng hợp để nâng cao độ chính xác của mô hình ước tính AGB trên diện rộng.

Một hệ thống bản đồ được thiết lập để minh họa sự phân bố không gian AGB và trữ lượng CS chỉ có được từ sinh khối trên mặt đất. Việc loại trừ dữ liệu sinh khối đất (SOC) khỏi mô hình phản ánh hiện trạng kiến thức hiện tại trong lĩnh vực này, trong đó thông tin về carbon tích lũy trong đất ở các hệ sinh thái rừng nhiệt đới tự nhiên, đặc biệt là ở các nước Đông Nam Á vẫn còn hạn chế. Các khu rừng nhiệt đới ở khu vực này đang phải đối mặt với những biến đổi nhanh chóng do các hoạt động khác nhau của con người, bao gồm nạn phá rừng, khai thác gỗ và thay đổi phương thức sử dụng đất. Để tăng cường tầm quan trọng của việc bảo tồn hệ sinh thái rừng nhiệt đới tại Việt Nam, các nghiên cứu trong tương lai nên tập trung nhiều hơn vào việc đánh giá tác động kinh tế của mất rừng và suy thoái rừng. Hơn nữa, các cuộc điều tra sắp tới cũng nên

tập trung vào việc tiến hành đánh giá toàn diện về đa dạng sinh học và các dịch vụ hệ sinh thái khác mà rừng cung cấp, nhằm tăng cường vai trò quan trọng của việc bảo tồn hệ sinh thái rừng nhiệt đới trong quá trình chuyển đổi sử dụng đất theo hướng bền vững. Nghiên cứu này là một cách tiếp cận không xâm lấn và đóng góp vào kiến thức chung toàn cầu trong lĩnh vực định lượng trữ lượng sinh khối và carbon tích lũy trong các hệ sinh thái rừng.

Lời cảm ơn

Các tác giả cảm ơn Chương trình Copernicus của Cơ quan vũ trụ Châu Âu (ESA) và Cơ quan Khảo sát địa chất Hoa Kỳ (USGS) đã cung cấp miễn phí dữ liệu viễn thám Sentinel-1A SAR và Landsat-9 OLI-2 được sử dụng. Nghiên cứu này được hỗ trợ bởi Bộ Khoa học và Công nghệ (MOST), trong đề tài mã số ĐTDL.CN-42/23.

Tài liệu tham khảo

- [1] J. Sánchez, M. D. Curt, N. Robert, J. Fernández, Chapter Two - Biomass Resources, The Role of Bioenergy in the Bioeconomy, Elsevier, 2019, pp. 25-111, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813056-8.00002-9>.
- [2] K. Adla, K. Dejan, D. Neira, Š. Dragana, Chapter 9 - Degradation of Ecosystems and Loss of Ecosystem Services, One Health, 2022, pp. 281-327, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822794-7.00008-3>.
- [3] M. A. Njana, B. Mbilinyi, Z. Eliakimu, The Role of Forests in the Mitigation of Global Climate Change: Empirical Evidence from Tanzania, Environmental Challenges, Vol. 4, 2021, pp. 100170, <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100170>.
- [4] G. He, Z. Zhang, Q. Zhu, W. Wang, W. Peng, and Y. Cai, Estimating Carbon Sequestration Potential of Forest and Its Influencing Factors at Fine Spatial-Scales: A Case Study of Lushan City in Southern China, Int. J. Environ. Res. Public Health, Vol. 19, No. 15, 2022, pp. 9184, <https://doi.org/10.3390/ijerph19159184>.
- [5] A. Raihan, R. A. Begum, M. N. M. Said, J. J. Pereira, Assessment of Carbon Stock in Forest Biomass and Emission Reduction Potential in Malaysia, Forests, Vol. 12, No. 10, 2021, pp. 1294, <https://doi.org/10.3390/f12101294>.
- [6] B. Mackey, C. F. Kormos, H. Keith, W. R. Moomaw, R. A. Houghton, R. A. Mittermeier, D. Hole, S. Hugh, Understanding the Importance of Primary Tropical Forest Protection As A Mitigation Strategy, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, Vol. 25, No. 5, 2020, pp. 763-787, <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09891-4>.
- [7] M. Siraj, Forest Carbon Stocks in Woody plants of Chilimo-Gaji Forest, Ethiopia: Implications of managing Forests for Climate Change Mitigation, South African Journal of Botany, Vol. 127, 2019, pp. 213-219, <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.09.003>.
- [8] S. K. Behera, N. Sahu, A. K. Mishra, S. S. Bargali, M. D. Behera, R. Tuli, Aboveground Biomass and Carbon Stock Assessment in Indian Tropical Deciduous Forest And Relationship with Stand Structural Attributes, Ecol. Eng., Vol. 99, 2017, pp. 513-524, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.046>.
- [9] H. K. Gibbs, S. Brown, J. O. Niles, J. A. Foley, Monitoring and Estimating Tropical Forest Carbon Stocks: Making REDD a reality, Environ Research Lettes, Vol. 2, No. 4, 2007, pp. 045023, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045023>.
- [10] T. D. Pham, K. Yoshino, D. T. Bui, Biomass Estimation of Sonneratia Caseolaris (L.) Engler at A Coastal Area of Hai Phong city (Vietnam) using ALOS-2 PALSAR Imagery and GIS-based Multi-Layer Perceptron Neural Networks, GIScience Remote Sensing, Vol. 54, No. 3, 2017, pp. 329-353, <https://doi.org/10.1080/15481603.2016.1269869>.
- [11] T. V. Pham, T. A. T. Do, H. D. Tran, A. N. T. Do, Assessing the Impact of Ecological Security and Forest Fire Susceptibility on Carbon Stocks in Bo Trach District, Quang Binh Province, Vietnam, Ecological Informatics, Vol. 74, 2023, pp. 101962, <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101962>.
- [12] Y. Jiao, D. Wang, X. Yao, S. Wang, T. Chi, Y. Meng, Forest Emissions Reduction Assessment Using Optical Satellite Imagery and Space LiDAR Fusion for Carbon Stock Estimation, Remote Sensing, Vol. 15, No. 5, 2023, pp. 1410, <https://doi.org/10.3390/rs15051410>.
- [13] M. V. Pham, T. M. Pham, Q. V. V. Du, Q. T. Bui, A. V. Tran, H. M. Pham, T. N. Nguyen, Integrating Sentinel-1A SAR data and GIS to Estimate Aboveground Biomass and Carbon Accumulation for Tropical Forest Types in Thuan Chau district, Vietnam, Remote Sensing Applications: Society and Environment, Vol. 14, 2019, pp. 148-157, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.03.003>.

- [14] D. T. Nhung, N. D. Hung, P. N. Hai, D. D. L. Phuong, N. T. D. My, P. V. Manh, Estimation of Above Ground Biomass Using A Combination of Integrated Remote Sensing and Machine Learning Algorithms: A Case Study in the Western Nghe An Biosphere Reserve, Vietnam, *Journal of Forestry Science and Technology*, Vol. 12, No. 4, 2023, pp. 81-92, <https://doi.org/10.55250/jo.vnuf.12.4.2023.081-092> (in Vietnamese).
- [15] R. Showstack, Landsat 9 Satellite Continues Half-Century of Earth Observations: Eyes in the Sky Serve as A Valuable Tool for Stewardship, *BioScience*, Vol. 72, No. 3, 2022, pp. 226-232, <https://doi.org/10.1093/biosci/biab145>.
- [16] Y. Hu, Y. Nie, Z. Liu, G. Wu, W. Fan, Improving the Potential of Coniferous Forest Aboveground Biomass Estimation by Integrating C- and L-Band SAR Data with Feature Selection and Non-Parametric Model, *Remote Sensing*, Vol. 15, No. 17, 2023, pp. 4194, <https://doi.org/10.3390/rs15174194>.
- [17] M. H. Pham, T. H. Do, V. M. Pham, Q. T. Bui, Mangrove Forest Classification and Aboveground Biomass Estimation Using An Atom Search Algorithm and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, *PLOS ONE*, Vol. 15, No. 5, 2020, pp. e0233110, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233110>.
- [18] H. Yu, Y. Wu, L. Niu, Y. Chai, Q. Feng, W. Wang, T. Liang, A Method to Avoid Spatial Overfitting in Estimation of Grassland Above-Ground Biomass on the Tibetan Plateau, *Ecological Indicators*, Vol. 125, 2021, pp. 107450, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107450>.
- [19] A. T. N. Dang, S. Nandy, R. Srinet, N. V. Luong, S. Ghosh, A. Senthil Kumar, Forest Aboveground Biomass Estimation Using Machine Learning Regression Algorithm in Yok Don National Park, Vietnam, *Ecological Informatics*, Vol. 50, 2019, pp. 24-32, <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2018.12.010>.
- [20] S. D. Madundo, E. W. Mauya, C. J. Kilawe, Comparison of Multi-Source Remote Sensing Data for Estimating and Mapping Above-Ground Biomass in the West Usambara Tropical Montane Forests, *Scientific African*, Vol. 21, 2023, pp. e01763, <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01763>.
- [21] Q. T. Bui, Q. T. Pham, V. M. Pham, V. T. Tran, D. H. Nguyen, Q. H. Nguyen, H. D. Nguyen, N. T. Do, V. M. Vu, Hybrid Machine Learning Models for Aboveground Biomass Estimations, *Ecological Informatics*, Vol. 79, 2024, pp. 102421, <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102421>.
- [22] People's Committee of Bac Kan Province, Summary Report on Bac Kan Province Planning for the Period 2021-2030, Vision to 2050, http://tnmt.backan.gov.vn/uploads/news/2024_05/22.5.2023.01bao-cao-tong-hop-qht-bac-kan-pdf, (accessed on: January 5th, 2024) (in Vietnamese).
- [23] UNFCCC, Vietnam Briefing Discusses the COP26 and Vietnam's Climate Action Plan Including Its Commitment to Achieve Net-Zero Carbon Emissions by 2050, <https://iucn.org/sites/default/files/2022-12/eng-deliver-vn-cop26-committments-on-re-final>, (accessed on: January 5th, 2024).
- [24] B. Brede et al., Non-destructive Estimation of Individual Tree Biomass: Allometric Models, Terrestrial and UAV Laser Scanning, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 280, 2022, pp. 113180, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113180>.
- [25] G. A. Blackburn, Spectral Indices for Estimating Photosynthetic Pigment Concentrations: A Test Using Senescent Tree Leaves, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 4, 1998, <https://doi.org/10.1080/014311698215919>.
- [26] A. A. Gitelson, Y. J. Kaufman, R. Stark, D. Rundquist, Novel Algorithms for Remote Estimation of Vegetation Fraction, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 80, No. 1, 2002, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9).
- [27] C. Buschmann, E. Nagel, In Vivo Spectroscopy and Internal Optics of Leaves As Basis for Remote Sensing of Vegetation, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 14, No. 4, 1993, <https://doi.org/10.1080/01431169308904370>.
- [28] N. H. Broge, E. Leblanc, Comparing Prediction Power and Stability of Broadband and Hyperspectral Vegetation Indices for Estimation of Green Leaf Area Index and Canopy Chlorophyll Density, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 76, No. 2, 2001, [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(00\)00197-8](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(00)00197-8).
- [29] N. Kaveh, A. Ebrahimi, E. Asadi, Comparative Analysis of Random Forest, Exploratory Regression, and Structural Equation Modeling for Screening Key Environmental Variables in Evaluating Rangeland Above-Ground Biomass, *Ecological Informatics*, Vol. 77, 2023, pp. 102251, <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102251>.
- [30] O. Mutanga, E. Adam, M. A. Cho, High Density Biomass Estimation for Wetland Vegetation Using Worldview-2 Imagery and Random Forest Regression Algorithm, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 18, 2012, pp. 399-406, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.03.012>.

- [31] J. R. Quinlan, Learning with Continuous Classes, Proceedings of Australian Joint Conference on Artificial Intelligence, 1992, pp. 343-348.
- [32] L. Brilli, M. Chiesi, C. Brogi, R. Magno, L. Arcidiaco, L. Bottai, G. Tagliaferri, M. Bindi, F. Maselli, Combination of Ground and Remote Sensing Data to Assess Carbon Stock Changes in the Main Urban Park of Florence, Urban Forestry & Urban Greening, Vol. 43, 2019, pp. 126377, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126377>.
- [33] K. Mokany, R. J. Raison, A. S. Prokushkin, Critical Analysis of Root: Shoot Ratios in Terrestrial Biomes, Global Change Biology, Vol. 12, No. 1, 2006, pp. 84-96, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x>.
- [34] H. Shiferaw, T. Kassawmar, G. Zeleke, Above and Belowground Woody-Biomass and Carbon Stock Estimations at Kunzila watershed, Northwest Ethiopia, Trees, Forests and People, Vol. 7, 2022, pp. 100204, <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100204>.
- [35] K. Prabhakara, W. D. Hively, G. W. McCarty, Evaluating the Relationship Between Biomass, Percent Groundcover and Remote Sensing Indices Across Six Winter Cover Crop Fields in Maryland, United States, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 39, 2015, pp. 88-102, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.03.002>.