

## Ước tính sinh khối trên mặt đất trong rừng kín lá rộng thường xanh bằng viễn thám UAV-RGB: Nghiên cứu điển tại xã A Lưới 4, thành phố Huế

Nguyễn Quang Vinh<sup>1</sup>, Nguyễn Thị Thanh Hải<sup>1</sup>, Phạm Ngọc Hải<sup>1</sup>, Phạm Tuấn Anh<sup>1</sup>, Nguyễn Hữu Đức<sup>1</sup>, Đỗ Tố Như<sup>1</sup>, Trương Tất Đo<sup>2</sup>, Đỗ Thị Nhung<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Viện Điều tra, Quy hoạch rừng, Bộ Nông nghiệp và Môi trường

<sup>2</sup>Cục Lâm nghiệp và Kiểm lâm, Bộ Nông nghiệp và Môi trường

<sup>3</sup>Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội

### UAV-RGB based remote sensing estimation of above-ground biomass for evergreen broadleaf forests: A case study in A Lưới 4 commune, Hue city

Nguyen Quang Vinh<sup>1</sup>, Nguyen Thi Thanh Hai<sup>1</sup>, Pham Ngoc Hai<sup>1</sup>, Pham Tuan Anh<sup>1</sup>, Nguyen Huu Duc<sup>1</sup>, Do To Nhu<sup>1</sup>, Truong Tat Do<sup>2</sup>, Do Thi Nhung<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Forest Inventory and Planning Institute, Ministry of Agricultural and Environment

<sup>2</sup>Vietnam Administration of Forestry, Ministry of Agricultural and Environment

<sup>3</sup>VNU University of Science, Vietnam National University, Hanoi

\*Corresponding author: donhung1262@gmail.com

<https://doi.org/10.55250/jo.vnuf.15.3.2026.128-137>

#### Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 16/11/2025

Ngày phản biện: 18/12/2025

Ngày quyết định đăng: 22/01/2026

#### Từ khóa:

Máy bay không người lái (UAV), phương trình tăng trưởng dị hợp, rừng kín lá rộng thường xanh, sinh khối trên mặt đất (AGB).

#### Keywords:

Above-ground biomass (AGB), allometric growth equation, evergreen broadleaf forests, unmanned aerial vehicles (UAV).

#### TÓM TẮT

Thu thập dữ liệu sinh khối trên mặt đất (AGB) với độ phân giải không gian cao từ máy bay không người lái (UAV) cho phép thu thập dữ liệu ảnh RGB với độ phân giải không gian siêu cao để ước tính chính xác sinh khối trên mặt đất (AGB) cho từng kiểu rừng là rất cần thiết để đánh giá khả năng hấp thụ carbon. Trong nghiên cứu này, dữ liệu UAV-RGB thu thập tại rừng kín lá rộng thường xanh ở xã A Lưới 4, Thành phố Huế được xử lý để tạo mô hình số độ cao (DEM) và ảnh trực giao kỹ thuật số. Từ các biến trích xuất, nghiên cứu xây dựng mô hình ước tính AGB cho kiểu rừng nghiên cứu. Mô hình đã lựa chọn được phương trình tối ưu để ước tính AGB từ dữ liệu UAV-RGB. Mô hình ước tính AGB này đạt độ chính xác với  $R^2=0,91$ ,  $RMSE=32,95$  Mg ha<sup>-1</sup>, và  $MAE=29,84$  Mg ha<sup>-1</sup>. Kết quả cho thấy, Rừng kín lá rộng thường xanh trung bình (TXB) và Rừng kín lá rộng thường xanh nghèo (TXN) có phân bố AGB tương tự nhau với phần lớn diện tích nằm ở ngưỡng AGB trung bình 100–150 Mg ha<sup>-1</sup> và AGB cao 150–200 Mg ha<sup>-1</sup>, với khoảng một nửa diện tích rơi vào khoảng 50–150 Mg ha<sup>-1</sup> và hơn 30% ở ngưỡng 150–200 Mg ha<sup>-1</sup>. Ngoài ra, nghiên cứu cho thấy phương pháp sử dụng dữ liệu UAV-RGB để trích xuất các chỉ số vật lý, kết hợp mô hình hồi quy đa biến là một kỹ thuật thực tiễn và hiệu quả để ước tính AGB ở rừng kín lá rộng thường xanh mưa ẩm nhiệt đới.

#### ABSTRACT

Collecting aboveground biomass (AGB) data at high spatial resolution using unmanned aerial vehicles (UAVs) enables the acquisition of ultra-high-resolution RGB imagery. This allows for accurate estimation of AGB for each forest type, which is essential for assessing carbon sequestration capacity. In this study, UAV-RGB data acquired over evergreen broadleaf forest in A Lưới 4 commune, Huế city, were processed to generate a digital elevation model and orthomosaic imagery. Based on the extracted variables, an aboveground biomass AGB estimation model was developed for the target forest type. The selected optimal equation for estimating AGB from UAV-RGB data. The AGB estimation model achieved accuracy with  $R^2=0.91$ ,  $RMSE=32.95$  Mg ha<sup>-1</sup>, and  $MAE=29.84$  Mg ha<sup>-1</sup>. The results indicate that the two forest classes, medium evergreen broadleaf forest and evergreen

*broadleaf forest, exhibit similar AGB distributions, with most areas falling within the moderate AGB range of 100–150 Mg ha<sup>-1</sup> and the high range of 150–200 Mg ha<sup>-1</sup>; approximately half the area lies between 50–150 Mg ha<sup>-1</sup> and over 30% within 150–200 Mg ha<sup>-1</sup>. The study further demonstrates that extracting physical indices from UAV-RGB data combined with multivariate regression modeling is a practical and effective technique for estimating AGB in tropical humid evergreen broadleaf forests.*

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sinh khối trên mặt đất (Above-Ground Biomass – AGB) là một chỉ tiêu quan trọng phản ánh năng lực hấp thụ carbon tổng thể của rừng, đồng thời là nền tảng năng lượng và nguồn vật chất cho sự vận hành của toàn bộ hệ sinh thái rừng [1]. Ước tính AGB có ý nghĩa then chốt đối với quản lý rừng bền vững, đánh giá động thái carbon và xây dựng các chiến lược ứng phó với biến đổi khí hậu [2]. Giám sát hiệu quả tài nguyên rừng là một trong những phương thức then chốt để thực hiện công tác bảo vệ hệ sinh thái [3]. Tuy nhiên, các phương pháp điều tra thực địa truyền thống gặp nhiều hạn chế do yêu cầu nguồn lực lớn và khó triển khai trên diện rộng, đặc biệt trong các khu rừng có địa hình phức tạp và độ che phủ cao [4]. Dữ liệu viễn thám vệ tinh được sử dụng rộng rãi trong giám sát và lập bản đồ sinh khối trên mặt đất ở quy mô lớn [5]. Tuy nhiên, độ phân giải không gian hạn chế, hiện tượng bão hòa tín hiệu trong các khu rừng có sinh khối cao và chu kỳ thu thập dữ liệu chưa linh hoạt làm giảm hiệu quả của phương pháp này trong các nghiên cứu chi tiết. Trong khi, việc quản lý và quy hoạch rừng bền vững tại Việt Nam đòi hỏi hệ thống dữ liệu chi tiết, cập nhật và có độ tin cậy cao nhằm trang bị cho các nhà quản lý rừng sự hiểu biết toàn diện hơn về động thái của rừng. Điển hình rừng kín lá rộng thường xanh là kiểu hệ sinh thái rừng nhiệt đới đặc trưng, trong đó thảm thực vật chủ yếu gồm các loài cây lá rộng không rụng lá theo mùa, có mật độ cao và tán rừng khép kín, hình thành cấu trúc nhiều tầng phức tạp, hạn chế bức xạ mặt trời xuống tầng dưới. Đây là một trong những hệ sinh thái rừng có sinh khối cao, đóng vai trò quan trọng trong duy trì đa dạng sinh học, điều hòa khí hậu và lưu trữ carbon [2].

Trong những năm gần đây, sự phát triển nhanh chóng của công nghệ thiết bị bay không người lái (Unmanned Aerial Vehicle – UAV) đã mở ra hướng tiếp cận mới trong nghiên cứu sinh khối rừng [6]. Ứng dụng công nghệ máy bay không người lái (UAV) trong ngành lâm nghiệp mang lại nhiều lợi thế vượt trội, phù hợp với các định hướng phát triển bền vững (SDGs 9,12,13) ở cả cấp quốc gia và toàn cầu. Đặc biệt trong bối cảnh SDG 13, nhấn mạnh vai trò quan trọng của rừng như một trong những bể chứa carbon [7]. Việc ứng dụng các công cụ hiện đại như UAV trong nghiên cứu và giám sát rừng cho phép thu thập dữ liệu liên tục về biến động trữ lượng carbon theo thời gian [8]. UAV đã bắt đầu được ứng dụng trong một số nghiên cứu và dự án thí điểm tại Việt Nam, tuy nhiên việc khai thác dữ liệu UAV, đặc biệt là UAV-RGB cho mục tiêu định lượng sinh khối rừng vẫn còn hạn chế và thiếu các mô hình ước tính được hiệu chỉnh phù hợp với điều kiện của từng hệ sinh thái rừng. Mặc dù các phương trình sinh khối dựa trên dữ liệu vệ tinh đã được áp dụng rộng rãi, khả năng chuyển giao của chúng sang các hệ sinh thái rừng tại Việt Nam còn hạn chế. Sự thiếu hụt các mô hình sinh khối được hiệu chỉnh từ dữ liệu UAV-RGB và số liệu thực địa, trong khi mối quan hệ giữa các chỉ số UAV-RGB và sinh khối mang tính phi tuyến, phụ thuộc mạnh vào cấu trúc rừng, cho thấy nhu cầu cấp thiết phải phát triển các phương trình sinh khối phù hợp nhằm nâng cao độ chính xác và hiệu quả giám sát tài nguyên rừng.

Xuất phát từ những vấn đề trên, nghiên cứu này hướng tới xây dựng mô hình ước tính sinh khối trên mặt đất dựa trên ảnh UAV-RGB cho một hệ sinh thái rừng điển hình là Rừng lá rộng thường xanh. Nghiên cứu tập trung phân tích mối quan hệ giữa AGB đo thực tế và các biến

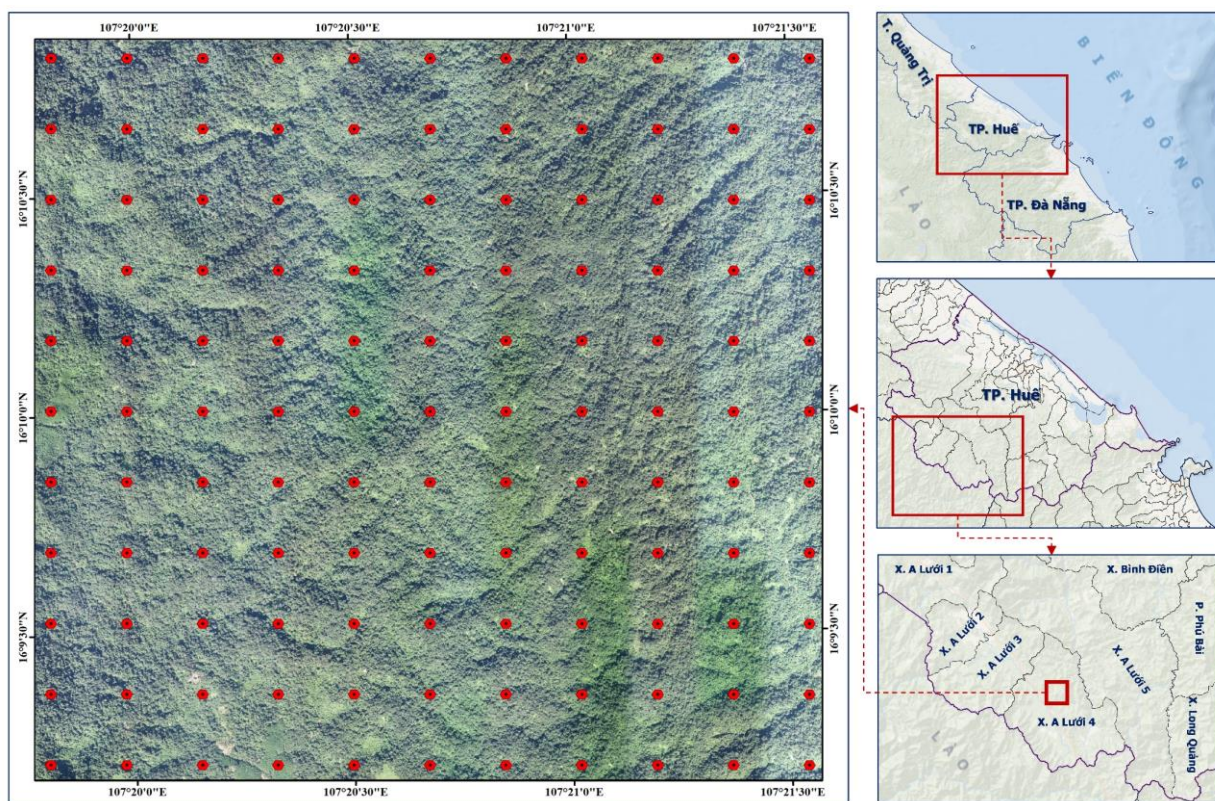
đặc trưng trích xuất từ ảnh UAV-RGB, đồng thời đánh giá hiệu quả của mô hình hồi quy trong việc ước tính sinh khối rừng. Kết quả nghiên cứu kỳ vọng cung cấp cơ sở khoa học cho việc ứng dụng UAV-RGB trong giám sát tài nguyên rừng và đánh giá động thái carbon ở quy mô chi tiết.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Đặc điểm khu vực nghiên cứu

Khảo sát thực địa được tiến hành tại một khu rừng kín lá rộng thường xanh ở trung tâm xã A Lưới 4, thành phố Huế (tọa độ  $107^{\circ}10'30''E - 107^{\circ}21'35''E$ ;  $16^{\circ}09'00''N - 16^{\circ}11'00''N$ ), ở độ cao 456 - 837 m so với mực nước biển (Hình 1). Khu vực nghiên cứu thuộc dải núi phía Tây thành phố Huế, đặc trưng bởi địa hình đồi núi dốc, các thung lũng sâu và sự phân hóa độ cao mạnh mẽ. Điều kiện khí hậu tại đây tương đối mát mẻ. Khu vực đồng thời nằm ở vùng biên giới tiếp giáp với Lào, thuộc địa bàn xã A Lưới 4,

nơi sở hữu hệ sinh thái rừng đa dạng, đóng vai trò quan trọng trong bảo tồn đa dạng sinh học và góp phần giảm thiểu tác động của biến đổi khí hậu. Trong phạm vi khu vực thử nghiệm, ba kiểu hệ sinh thái rừng kín lá rộng thường xanh chủ đạo đã được xác định, bao gồm: Rừng kín lá rộng thường xanh trung bình (TXB), nghèo (TXN) và phục hồi (TXP). Việc phân loại được thực hiện dựa trên dữ liệu kiểm kê rừng năm 2025 do Viện Điều tra, Quy hoạch rừng – Bộ Nông nghiệp và Môi trường cung cấp. Tuy nhiên, trong những năm gần đây, khu vực đang chịu áp lực suy giảm diện tích rừng và mất mát đa dạng sinh học do hoạt động khai thác gỗ trái phép và mở rộng đất canh tác. Do đó, việc tăng cường giám sát định kỳ diện tích và trữ lượng rừng, kết hợp với các biện pháp bảo vệ nghiêm ngặt, là yêu cầu cấp thiết nhằm hạn chế suy thoái, thúc đẩy phục hồi hệ sinh thái rừng và bảo tồn đa dạng sinh học.



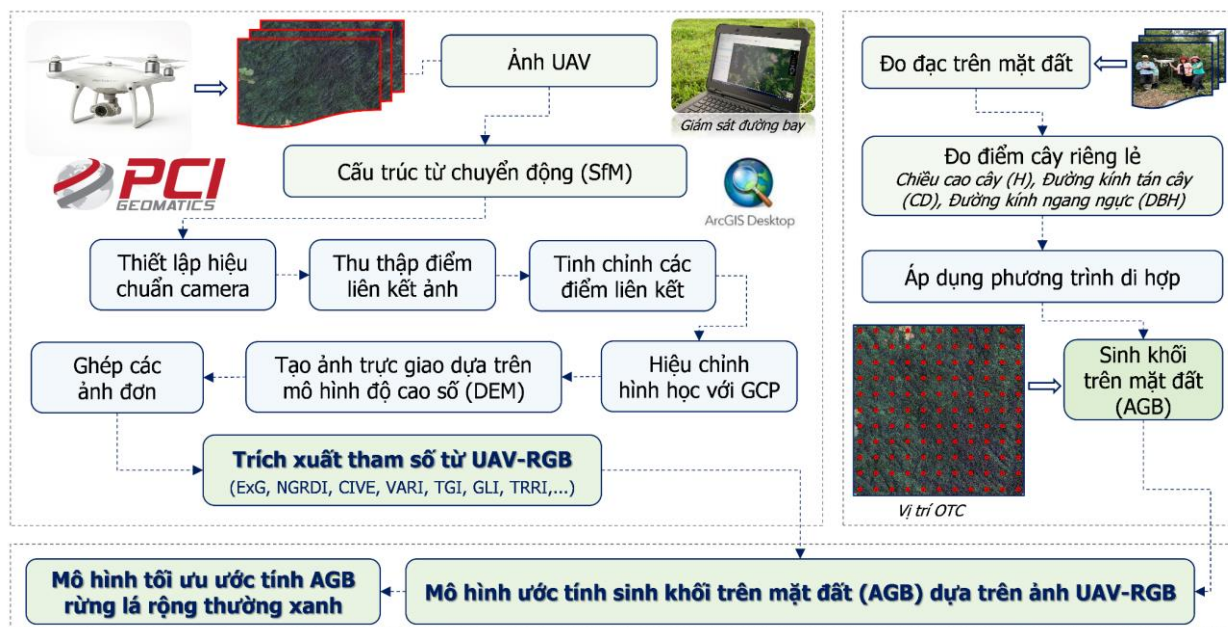
Hình 1. Vị trí khảo sát OTC trong rừng kín lá rộng thường xanh trên hình ảnh UAV-RGB năm 2025 tại khu vực trung tâm xã A Lưới 4, thành phố Huế, Việt Nam

### 2.2. Phương pháp nghiên cứu và dữ liệu sử dụng

Nghiên cứu sử dụng các chỉ số vật lý trích xuất từ ảnh UAV-RGB làm biến dự đoán để xây

dựng mô hình hồi quy đa biến được tinh chỉnh nhằm ước lượng sinh khối trên mặt đất (AGB). Giá trị AGB dự đoán từ mô hình dựa trên dữ liệu UAV-RGB được so sánh trực tiếp với AGB

đo tại hiện trường để đánh giá độ chính xác. Toàn bộ quy trình xử lý dữ liệu, trích xuất biến và xây dựng, hiệu chỉnh mô hình được minh họa trong Hình 2.



Hình 2. Quy trình ước tính AGB rừng lá rộng thường xanh dựa trên dữ liệu UAV-RGB

### 2.2.1. Thu thập dữ liệu thực địa

Bộ dữ liệu thực địa gồm 119 ô điều tra (OTC) được thu thập và cập nhật trong năm 2025 nhằm đại diện cho sinh khối trên mặt đất ở Rừng kín lá rộng thường xanh; các ô mẫu được lựa chọn theo tiêu chí phản ánh đầy đủ trạng thái rừng và điều kiện địa hình, bao phủ các lớp kích thước cây khác nhau và ưu tiên khu vực ít bị xáo trộn có cây lớn. Mỗi ô cây gỗ kín lá rộng thường xanh có dạng hình tròn diện tích 500 m<sup>2</sup> (bán kính 12,62 m) với tâm trùng tâm cụm ô trong lưới mắt 300 m × 300 m; mục tiêu là thu thập dữ liệu về cây gỗ cả ở rừng trồng trên đất và trên nền đá. Các cây có đường kính tại 1,3 m (D1,3) ≥ 6 cm được kiểm đếm và đo chi tiết (đường kính, chiều cao) bằng thiết bị đo khoảng cách và đo cao, có hiệu chỉnh theo độ dốc khi cần, trong khi các cây có D1,3 < 6 cm chỉ được kiểm đếm số lượng trong ô mẫu phụ. Dữ liệu thu được được sử dụng để tính AGB thực tế bằng các phương trình sinh khối chuyên biệt phù hợp với hệ sinh thái rừng tại xã A Lưới 4 [9]; giá trị AGB quan sát nằm trong khoảng

15,7–360,7 Mg ha<sup>-1</sup>, với giá trị trung bình 133 Mg ha<sup>-1</sup> và độ lệch chuẩn 65,4 Mg ha<sup>-1</sup>. Trong nghiên cứu này, các ô mẫu được phân bố theo từng kiểu hệ sinh thái rừng, bao gồm 30 ô thuộc rừng kín lá rộng thường xanh trung bình (TXB), 61 ô thuộc rừng kín lá rộng thường xanh nghèo (TXN) và 28 ô thuộc rừng kín lá rộng thường xanh phục hồi (TXP). Việc bố trí ô mẫu được thực hiện theo phương pháp phân tầng ngẫu nhiên, bảo đảm phản ánh đúng tỷ lệ phân bố của các hệ sinh thái rừng chủ yếu tại xã A Lưới 4. Tập dữ liệu thu thập được sau đó được chia thành hai nhóm độc lập, trong đó 70% số ô mẫu được sử dụng cho quá trình huấn luyện mô hình và 30% còn lại được dùng để kiểm định và đánh giá độ chính xác của mô hình dự đoán.

### 2.2.2. Thu thập và xử lý dữ liệu ảnh UAV-RGB

Nghiên cứu sử dụng ảnh UAV-RGB được thu thập bằng thiết bị Phantom 4 Pro. Các ảnh được chụp ở độ cao bay trung bình khoảng m so với mặt đất trong điều kiện thời tiết ổn định, trời quang mây nhẹ, không mưa và gió yếu, với tỷ lệ chồng phủ ảnh khoảng 80%. Tập dữ liệu đầu

vào gồm 407 ảnh JPEG, được xử lý bằng quy trình sáu bước sử dụng công cụ OrthoEngine tích hợp trong phần mềm PCI Geomatica Banff. Do đặc thù rừng kín lá rộng thường xanh, mật độ cây cao và cấu trúc tán phức tạp. Quy trình tiền xử lý nhằm tạo ảnh trực giao, mô hình số độ cao là bước then chốt trước khi trích xuất các chỉ số vật lý. Các bước quan trọng trong quá trình tiền xử lý dữ liệu UAV sẽ được giới thiệu ngắn gọn như sau: (i) Thiết lập hiệu chuẩn camera: Xác định và hiệu chỉnh các biến dạng do thấu kính, tiêu cự và phối cảnh. Các tham số được nhập thủ công gồm tiêu cự, độ lệch điểm chính, kích thước cảm biến (chiều rộng, chiều cao chip), hệ số tỷ lệ Y, hệ số xuyên tâm và hệ số lệch tâm; (ii) Thu thập các điểm nối: Điểm nối là các điểm nhận dạng được trong vùng chồng lấp giữa hai hoặc nhiều ảnh. Áp dụng kỹ thuật tương quan ảnh để tìm các điểm nối tối ưu; tổng cộng 23.040 điểm nối được phát hiện trên 407 ảnh, đóng vai trò then chốt trong việc liên kết toàn bộ tập ảnh; (iii) Tinh chỉnh điểm: Loại bỏ các điểm nối có sai số lớn bằng cách kiểm tra RMS (phần dư x và y trên mỗi điểm). Sau bước tinh lọc, còn lại 19.540 điểm nối; các điểm có RMS > 0,5 bị loại khỏi mô hình tính toán; (iv) Nắm chỉnh hình học với GCP: Sử dụng 15 điểm kiểm soát mặt đất (GCP) đo thực địa với độ chính xác  $\pm 0,5$  pixel để cải thiện định vị địa lý. Các GCP được nhận diện rõ trên ảnh thô và toàn bộ dữ liệu được hiệu chỉnh theo hệ tọa độ WGS84/UTM Zone 48N; (v) Tạo ảnh trực giao dựa trên DEM: Tạo ảnh trực giao cho từng khung bằng cách kết hợp ảnh thô, ảnh cặp cực và Mô hình số độ cao (DEM) thu được trong quá trình bay. Việc này nâng cao hiệu quả tương quan ảnh và giảm khả năng khớp sai; độ phân giải không gian của DEM đạt 0,31 m; (vi) Ghép ảnh: Chỉnh sửa thủ công 407 ảnh trực giao để ghép thành một ảnh hợp nhất với cân bằng màu đồng nhất. Với tỷ lệ chồng lấp khoảng 80%, các lỗi liên quan đến máy ảnh và tọa độ đã được loại bỏ bằng công cụ ghép ảnh của PCI Geomatica Banff. Sau khi ảnh hợp nhất và các mô hình địa hình được tạo, khu vực rừng kín lá rộng thường xanh sẽ được sử dụng để

trích xuất các chỉ số vật lý phục vụ phân tích; chi tiết phương pháp trích xuất được trình bày trong phần 2.2.3.

### **2.2.3. Lựa chọn chỉ số viễn thám và mô hình ước tính sinh khối trên mặt đất**

- **Lựa chọn chỉ số viễn thám ước tính AGB**

Công nghệ cảm biến từ xa đã góp phần nâng cao đáng kể hiệu quả giám sát thảm thực vật [10]. Các chỉ số thực vật quang học (OVIs), với công thức toán học đơn giản hoặc các phép biến đổi phản xạ giữa hai hay nhiều kênh phổ ở các dải sóng khác nhau, cho phép thể hiện rõ ràng trạng thái thảm thực vật và giảm thiểu ảnh hưởng của các yếu tố gây nhiễu như đặc điểm bề mặt hay tác động của khí quyển [11]. Nhờ khả năng tập trung vào thông tin cốt lõi của thảm thực vật, OVIs được ứng dụng rộng rãi trong nhiều nghiên cứu từ quy mô địa phương đến toàn cầu đặc biệt là trong nghiên cứu sinh thái rừng [12]. Các chỉ số này dựa trên nền tảng vật lý của phản xạ phổ thu nhận từ cảm biến từ xa, phản ánh sự tương tác phức tạp giữa ánh sáng, khí quyển và thảm thực vật. Tuy nhiên, quá trình ước tính AGB bằng mô hình học máy, việc tích hợp quá nhiều chỉ số viễn thám có thể làm tăng độ phức tạp không cần thiết, gây ra hiện tượng đa cộng tuyến giữa các biến đầu vào, làm giảm tính ổn định của mô hình, kéo dài thời gian xử lý và ảnh hưởng đến độ chính xác của kết quả dự đoán. Do đó, một bước quan trọng trong tối ưu hóa quy trình nghiên cứu sinh khối trên mặt đất là loại bỏ các chỉ số viễn thám có mức độ đóng góp thấp hơn trong mô hình. Trong bối cảnh đó, ảnh UAV-RGB có độ phân giải không gian siêu cao, khả năng linh hoạt trong thu nhận dữ liệu cho phép mô tả chi tiết cấu trúc tán cây, chiều cao, mật độ và các đặc trưng hình thái của thảm thực vật mà nhiều chỉ số quang học truyền thống khó thể hiện. Nhờ vậy, việc sử dụng OVIs từ dữ liệu UAV-RGB giúp tăng cường khả năng mô tả biến động thảm thực vật và cải thiện hiệu quả ước tính sinh khối rừng. Dựa trên các tài liệu hiện có, trong nghiên cứu này, các chỉ số viễn thám được trích xuất từ UAV-RGB được mô tả trong Bảng 1.

**Bảng 1. Các biến dự đoán từ ảnh UAV-RGB**

Biến độc lập	Phương trình/Tên	Ý nghĩa sinh thái
TRRI	$TRRI=(R+G+B)/3$	Chỉ số TRRI có liên hệ chặt chẽ với sinh khối trên mặt đất (AGB) vì nó phản ánh mức độ sáng của bề mặt và mức độ che phủ tán rừng. Giá trị TRRI thấp thường tương ứng với rừng có tán dày, xanh tốt và sinh khối cao do hấp thụ mạnh ánh sáng. Ngược lại, TRRI cao cho thấy rừng thưa, suy thoái hoặc bề mặt đất lộ nhiều hơn, dẫn đến AGB thấp.
ExG	$ExG=2 \times G - R - B$	Chỉ số ExG nhấn mạnh tín hiệu màu xanh trong ảnh RGB, nên phản ánh trực tiếp mức độ che phủ và sức sống của thảm thực vật rừng. Giá trị ExG cao cho thấy tán lá xanh tốt, mật độ dày và sinh khối (AGB) cao; ngược lại, ExG thấp thường liên quan đến rừng thưa, suy thoái hoặc bề mặt đất lộ. Nhờ khả năng nhạy với biến động tán lá từ ảnh RGB, ExG là biến đầu vào hữu ích giúp cải thiện độ chính xác của các mô hình dự đoán AGB.
VARI	$VARI=(G-R)/(G+R-B)$	Chỉ số VARI có ý nghĩa đối với ước tính sinh khối trên mặt đất (AGB). VARI phản ánh mức độ xanh và mật độ che phủ của tán lá, giá trị VARI cao thường tương ứng với sinh khối lớn do tán rừng dày và hoạt động quang hợp mạnh. Ngược lại, giá trị VARI thấp cho thấy thảm thực vật thưa hoặc suy thoái, dẫn đến AGB thấp.
CIVE	$CIVE=0,44 \times R - 0,88 \times G + 0,38 \times B + 18,78$	CIVE cao thường xuất hiện ở khu vực có ít vật chất xanh, như rừng thưa, suy thoái, lá khô hoặc đất trống. CIVE thấp phản ánh thảm thực vật xanh tốt, tán lá dày và hoạt động quang hợp mạnh.
NGRDI	$NGRDI = (G - R)/(G + R)$	NGRDI là chỉ số quang học có ý nghĩa sinh thái rõ rệt, phản ánh mức độ xanh, hoạt động quang hợp, mật độ tán lá và tình trạng sinh trưởng của thảm thực vật. Những đặc tính này có mối quan hệ chặt chẽ với sinh khối trên mặt đất (AGB), khiến NGRDI trở thành biến giải thích quan trọng trong các mô hình ước tính AGB từ dữ liệu UAV-RGB.
TGI	$TGI = -0.5 \times \{190 \times (R-G) - 120 \times (R-B)\}$	TGI càng thấp (giá trị âm lớn) cho thấy thảm thực vật càng xanh, tán lá dày và hoạt động quang hợp mạnh, thường gắn với AGB cao. Ngược lại, TGI cao phản ánh tán lá kém xanh, rừng thưa hoặc suy thoái, tương ứng với AGB thấp. Nhờ độ nhạy với hàm lượng diệp lục, TGI là chỉ số hữu ích trong đánh giá sức khỏe tán rừng và hỗ trợ ước tính sinh khối.

• *Mô hình ước tính 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 [13]. Bên cạnh đó, mô hình học máy Random Forest (RF) cho thấy ưu thế trong việc xử lý các mối quan hệ phi tuyến và tập biến đầu vào có kích thước lớn [14]. Trong nghiên cứu này, RF được sử dụng như một công cụ hỗ trợ sàng lọc biến thông qua đánh giá mức

độ quan trọng của từng biến, trong khi mô hình hồi quy đa thức được sử dụng cho việc ước tính sinh khối trên mặt đất và trình bày kết quả cuối cùng. Thông qua cơ chế tổng hợp từ nhiều cây quyết định, RF giúp giảm sai số và hạn chế hiện tượng quá khớp, từ đó hỗ trợ lựa chọn các chỉ số viễn thám phù hợp để xây dựng phương trình ước tính AGB. Dựa trên kết quả sàng lọc biến từ RF và bước hiệu chỉnh mô hình hồi quy đa thức, phương trình ước tính AGB được lựa chọn để áp dụng trong nghiên cứu này được trình bày ở công thức 5.

$$\overline{AGB} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i(X) \quad (1)$$

Trong đó:

N: số lượng cây trong Random Forest;

$T_i(X)$ : giá trị AGB dự đoán từ cây quyết định thứ  $i$ ;

X: tập biến độc lập (các chỉ số viễn thám trích xuất từ dữ liệu UAV-RGB).

• **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 lựa chọn mô hình tối ưu để ước tính sinh khối trên mặt đất (AGB) từ dữ liệu UAV-RGB. Quy trình 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. Trong mỗi vòng lặp huấn luyện mô hình Random Forest, 83 ô mẫu AGB thực đo (tương ứng 70% tổng số mẫu) được sử dụng làm dữ liệu huấn luyện, trong khi 36 ô mẫu còn lại (30%) được dùng để kiểm tra và đánh giá mức độ phù hợp của mô hình. Để đảm bảo mô hình không chỉ đạt hiệu suất cao trên dữ liệu huấn luyện mà còn có khả năng tổng quát hóa tốt đối với dữ liệu chưa từng thấy, nghiên cứu áp dụng phương pháp xác thực chéo để đánh giá hiệu suất của mô hình ước tính AGB. Cụ thể, kỹ thuật xác thực chéo 10-fold được sử dụng theo khuyến nghị của các nghiên cứu trước [2]. Dữ liệu được chia ngẫu nhiên thành 10 tập con; tại mỗi vòng lặp, một tập con được dùng để kiểm tra mô hình, trong khi chín tập còn lại được dùng để huấn luyện. Quá trình này được lặp lại 10 lần để đảm bảo tất cả các tập con đều được sử dụng cho cả hai mục đích huấn luyện và kiểm tra. Hiệu suất của mô hình RF được đánh giá dựa trên ba chỉ số chính: Hệ số xác định ( $R^2$ ) theo công thức 2, sai số bình phương

trung bình gốc (RMSE) theo công thức 3 và sai số tuyệt đối trung bình (MAE) theo công thức 4.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum e^2}{\sum y^2} = \frac{\beta_2 \sum y_t x_{2t} + \beta_3 \sum y_t x_{3t}}{\sum y_t^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

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

Trong đó:

e: sai số dự đoán (chênh lệch giữa giá trị dự đoán và giá trị thực tế);

y: độ lệch giữa giá trị thực tế và giá trị trung bình của biến phụ thuộc;

n: số lượng mẫu;

$y_i$ : giá trị thực tế của quan sát thứ  $i$ ;

$\hat{y}_i$ : giá trị dự đoán tương ứng.

Giá trị  $R^2$  càng cao và RMSE, MAE càng thấp phản ánh hiệu suất mô hình tốt hơn, cho thấy khả năng ước tính AGB chính xác và ổn định hơn.

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

#### 3.1. Mô hình ước tính AGB dựa trên thuật toán học máy Random Forest

Trong nghiên cứu này, sinh khối trên mặt đất (AGB) được mô hình hóa bằng hồi quy đa thức bậc hai sử dụng các chỉ số quang phổ được tính từ ảnh UAV-RGB (TRRI, ExG, VARI, CIVE, NGRDI, TGI) làm biến độc lập. Trước khi xây dựng mô hình, các biến được sàng lọc nhằm loại bỏ hiện tượng đa cộng tuyến và hạn chế đưa vào những chỉ số có đóng góp thấp, qua đó cải thiện tính ổn định và độ chính xác của mô hình hồi quy. Trong tổng số 70 mô hình dự đoán AGB tiềm năng từ mô hình RF, mô hình tốt nhất đạt hiệu suất cao với  $R^2=0,91$ ,  $RMSE=32,95 \text{ Mg ha}^{-1}$  và  $MAE=29,84 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Phương trình cuối cùng được chọn để ước tính AGB cho rừng kín lá rộng thường xanh tại xã A Lưới 4 (thành phố Huế) được trình bày ở công thức 5.

$$AGB_{GO} = 20 \times (-1,724 + 0,276 \times ExG - 0,00084 \times ExG^2 - 12,712 \times NGRDI + 68,63 \times NGRDI^2) \quad (5)$$

Phương trình biểu diễn AGB dưới dạng hàm bậc hai của hai chỉ số quang phổ ExG và NGRDI, do đó mối quan hệ giữa mỗi chỉ số và AGB mang tính phi tuyến. Sự xuất hiện đồng thời của các thành phần tuyến tính và bậc hai cho thấy ảnh hưởng của từng biến lên AGB phụ thuộc vào giá trị hiện tại của biến đó, không chỉ phụ thuộc vào mối tương quan thuận-nghịch và độ lớn của hệ

số tuyến tính. Đối với ExG, hệ số tuyến tính thuận (dương) cho thấy ở vùng giá trị thấp, AGB có xu hướng tăng khi ExG tăng. Tuy nhiên, hệ số bậc hai nghịch (âm) làm cho đường cong quan hệ có dạng lõm xuống với AGB tăng đến một mức cực đại rồi giảm khi ExG tiếp tục tăng vượt qua ngưỡng đó. Vì vậy, sự gia tăng ExG không phải lúc nào cũng tương ứng với gia tăng AGB; cần

xác định vị trí của quan sát so với điểm cực đại để đánh giá đúng chiều và cường độ tác động. Ngược lại, NGRDI có hệ số tuyến tính âm nhưng hệ số bậc hai dương, tạo nên một đường cong lõm lên với AGB giảm khi NGRDI tăng trong một khoảng ban đầu, đạt điểm cực tiểu, rồi tăng trở lại khi NGRDI vượt qua ngưỡng đó. Điều này có nghĩa là NGRDI có thể tác động tiêu cực lên AGB ở vùng giá trị thấp nhưng chuyển sang tác động tích cực ở vùng giá trị cao hơn; do đó phân bố giá trị NGRDI trong mẫu dữ liệu quyết định hiệu ứng trung bình quan sát được.

### 3.2. Đánh giá phân bố không gian AGB rừng kín lá rộng thường xanh tại xã A Lưới 4

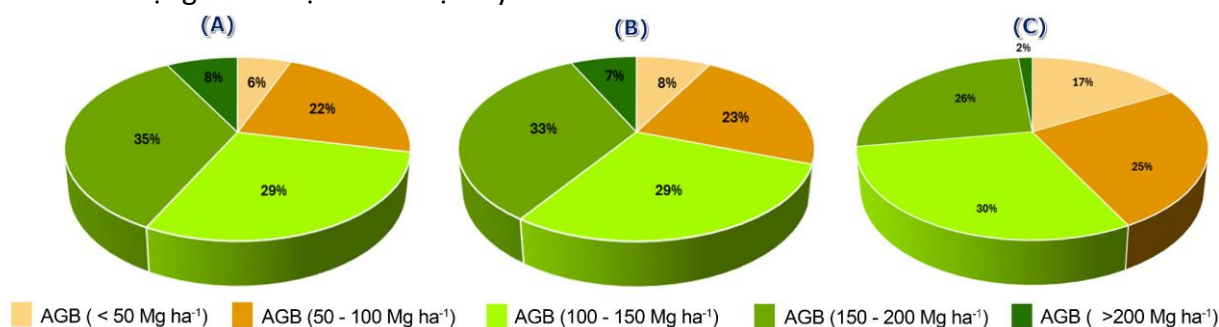
Dựa trên công thức 5, bản đồ phân bố không gian sinh khối trên mặt đất rừng kín lá rộng thường xanh đã được xây dựng (Hình 4). Các khu vực không có rừng, chẳng hạn như đất trống, đất nông nghiệp và vùng nước mặt đã bị loại khỏi kết quả của bản đồ định lượng AGB. Bản đồ phân bố không gian AGB được phân loại theo các mức mật độ sinh khối khác nhau, bao gồm: dưới 50 Mg ha<sup>-1</sup>, 50-100 Mg ha<sup>-1</sup>, 100-150 Mg ha<sup>-1</sup>, 150-200 Mg ha<sup>-1</sup>, và trên 200 Mg ha<sup>-1</sup>. Đồng thời, kết quả tổng diện tích được cung cấp cho từng ngưỡng sinh khối tương ứng cho các hệ sinh thái rừng kín lá rộng thường xanh tại xã A Lưới, thành phố Huế.

**Bảng 2. Phân bố sinh khối trên mặt đất của các kiểu rừng kín lá rộng thường xanh**

	<50 Mg ha <sup>-1</sup>	50-100 Mg ha <sup>-1</sup>	100-150 Mg ha <sup>-1</sup>	150-200 Mg ha <sup>-1</sup>	>200 Mg ha <sup>-1</sup>	Diện tích (ha)
TXB	13,02	48,69	62,72	75,24	17,22	216,89
TXN	38,33	106,64	137,51	158,64	33,83	474,94
TXP	34,09	51,33	60,66	52,58	3,08	201,73
<b>Diện tích (ha)</b>	<b>85,44</b>	<b>206,65</b>	<b>260,89</b>	<b>286,45</b>	<b>54,13</b>	<b>893,56</b>

Từ Bảng 2 cho thấy, phần lớn diện tích của ba kiểu rừng kín lá rộng thường xanh (TXB, TXN, TXP) có sinh khối trên mặt đất (AGB) từ 50 Mg ha<sup>-1</sup> đến 200 Mg ha<sup>-1</sup>. Trong đó, TXN (rừng nghèo) có diện tích lớn nhất 474,94 ha, tiếp theo là rừng trung bình 216,89 ha và rừng phục hồi (TXP) 201,73 ha. TXB và TXN có phân bố AGB tương tự nhau: phần lớn diện tích nằm ở ngưỡng AGB trung bình 100–150 Mg ha<sup>-1</sup> và AGB cao 150–200 Mg ha<sup>-1</sup>, với khoảng một nửa diện tích rơi vào khoảng 50–150 Mg ha<sup>-1</sup> và hơn 30% ở ngưỡng 150–200 Mg ha<sup>-1</sup>. Sự tương đồng này cho thấy hai kiểu rừng có cấu trúc cây trưởng thành tương đối đồng nhất và có thể có lịch sử sử dụng đất hoặc mức độ suy thoái

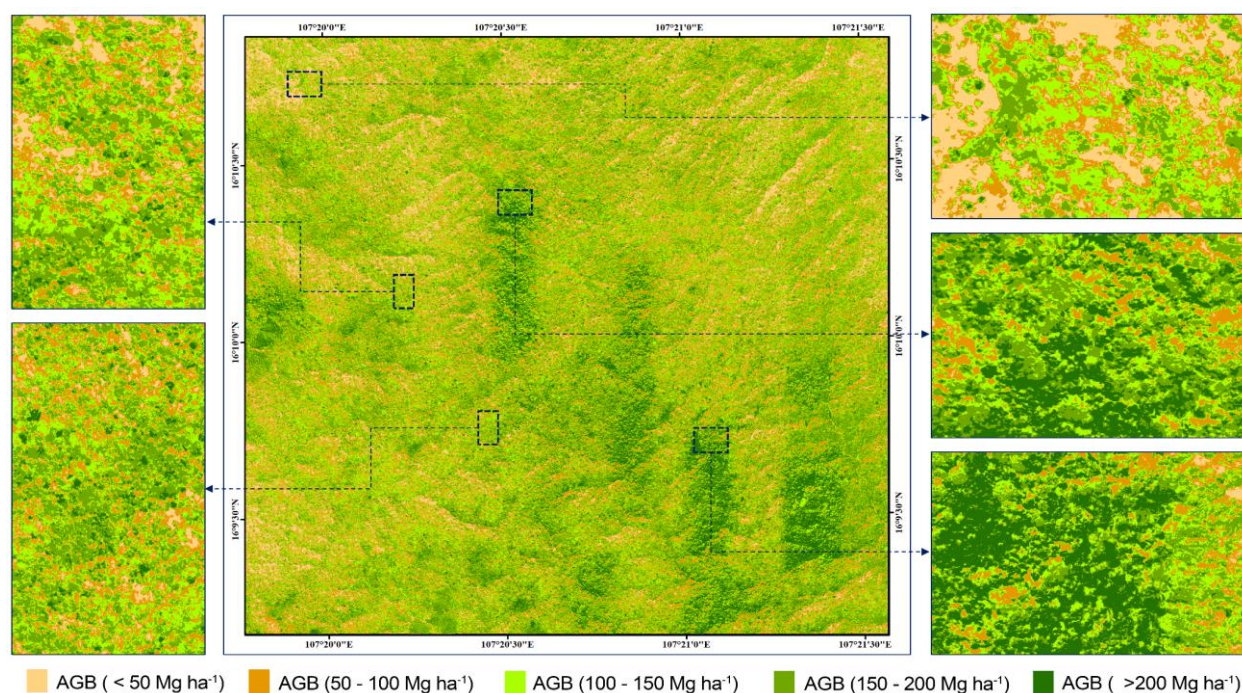
tương tự, dẫn tới AGB trên mặt đất duy trì ở mức tương đối cao. Ngược lại, TXP (rừng phục hồi) phân bố khác biệt rõ rệt: khoảng 25% diện tích có AGB < 50 Mg ha<sup>-1</sup>, trong khi chỉ 3% diện tích đạt AGB > 200 Mg ha<sup>-1</sup> (Hình 3). Mô hình này phản ánh nhiều khoảng trống, mật độ cây trưởng thành thấp và thảm thực vật chưa phát triển đầy đủ, phù hợp với giai đoạn tái sinh hoặc phục hồi sau tác động. Như vậy, TXB và TXN thể hiện cấu trúc sinh khối ổn định và AGB tương đối cao, trong khi TXP đang ở giai đoạn non trẻ với AGB thấp hơn, cho thấy nhu cầu theo dõi tiến trình phục hồi và các biện pháp quản lý nhằm tăng mật độ cây trưởng thành.



**Hình 3. Tỷ lệ phần trăm sinh khối trên mặt đất của Rừng kín lá rộng thường xanh trung bình (A), Rừng kín lá rộng thường xanh nghèo (B) và Rừng kín lá rộng thường xanh phục hồi (C)**

Phân bố không gian sinh khối trên mặt đất (AGB) tại xã A Lưới 4 thể hiện tính tương thích rõ rệt với phân tích thực địa: các mảng xanh đậm trên bản đồ tương ứng với giá trị AGB > 200 Mg ha<sup>-1</sup>, các mảng xanh lục nhạt và xanh nõn chuối lần lượt biểu thị AGB trong khoảng 150–200 Mg ha<sup>-1</sup> và 100–150 Mg ha<sup>-1</sup>, trong khi các dải vàng nghệ và vàng nhạt phản ánh AGB trung bình đến thấp (50–100 Mg ha<sup>-1</sup> và <50 Mg ha<sup>-1</sup>). Việc định lượng AGB tại quy mô pixel

không chỉ cung cấp cơ sở khoa học cho ước tính trữ lượng carbon mà còn nhấn mạnh vai trò then chốt của rừng kín lá rộng thường xanh trong chu trình carbon khu vực và toàn cầu nói chung và khu vực nghiên cứu nói riêng. Đặc biệt, theo như kết quả nghiên cứu thì các khu vực có giá trị ngưỡng AGB >200 Mg ha<sup>-1</sup> cần được ưu tiên bảo tồn để duy trì kho carbon và giá trị đa dạng sinh học.



**Hình 4. Bản đồ phân bố không gian sinh khối rừng kín lá rộng thường xanh tại khu vực xã A Lưới 4**

Trong bối cảnh phát triển kinh tế-xã hội tại A Lưới 4, các khu rừng này đang chịu áp lực lớn từ việc gia tăng từ khai thác gỗ, chuyển đổi đất và các hoạt động sử dụng đất khác. Chính vì vậy, cần kết hợp các biện pháp quản lý bền vững bao gồm: bảo vệ các khu vực AGB cao, phục hồi sinh thái ở vùng AGB thấp, thiết lập hành lang sinh thái và giám sát định kỳ bằng ảnh UAV-RGB để phát hiện sớm suy giảm. Đồng thời khuyến khích cơ chế tham gia cộng đồng và các chính sách khuyến khích bảo tồn nhằm cân bằng mục tiêu phát triển và bảo vệ dịch vụ hệ sinh thái.

#### 4. KẾT LUẬN

Đánh giá định lượng sinh khối trên mặt đất (AGB) của rừng kín lá rộng thường xanh là nền tảng để đánh giá điều kiện sinh trưởng và khả

năng tích lũy carbon. So với các phương pháp khác, viễn thám bằng UAV-RGB cung cấp một giải pháp khảo sát không phá hủy, có độ phủ không gian cao và chi phí hợp lý thuận lợi cho việc ước tính AGB. Nghiên cứu đề xuất mô hình ước tính AGB cho rừng kín lá rộng thường xanh dựa trên dữ liệu UAV-RGB, tập trung vào việc lựa chọn các chỉ số quang phổ phù hợp, phương pháp xây dựng mô hình hồi quy và đánh giá độ tin cậy của kết quả ước tính. Kết quả nghiên cứu cho thấy mô hình hồi quy đa thức bậc hai sử dụng các chỉ số ExG và NGRDI là phù hợp và có độ chính xác cao trong ước tính AGB đối với rừng kín lá rộng thường xanh. Do đó, mô hình được khuyến nghị áp dụng cho công tác giám sát sinh khối và đánh giá trữ

lượng carbon rừng ở quy mô địa phương tại các khu vực có cấu trúc rừng tương đồng và sinh khối từ trung bình đến cao. Trong các nghiên cứu tiếp theo, hướng phát triển nên ưu tiên xây dựng các mô hình có hiệu quả cao hơn và khả năng chuyển giao tốt giữa các kiểu rừng và vùng sinh thái khác nhau. Điều này giúp tăng cường độ chính xác thông qua hiệu chuẩn hiện trường và tích hợp dữ liệu đa nguồn, đồng thời xây dựng quy trình chuẩn để đánh giá và báo cáo mức độ không chắc chắn của mô hình. Thực hiện những bước này sẽ nâng cao năng lực giám sát động thái carbon rừng và đóng góp trực tiếp vào quản lý rừng bền vững hướng đến mục tiêu phát triển một cách tuần hoàn và bền vững.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Nông nghiệp và Môi trường, Viện Điều tra Quy hoạch rừng, thuộc đề tài “Nghiên cứu ứng dụng ảnh chụp bằng thiết bị bay không người lái trong giám sát rừng và ước tính sinh khối cho một số kiểu rừng ở Việt Nam”.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Taiyong Ma, Chao Zhang, Liping Ji, Zheng Zuo, Mukete Beckline, Yang Hu, Xiaojuan Li & Xiangming Xiao. (2024). Development of forest aboveground biomass estimation, its problems and future solutions: A review. *Ecol Indic.* 159: 111653. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.111653

[2]. Do Thi Nhung, Dang Do Lam Phuong, Nguyen Thi Diem My, Bui Quang Thanh, Pham Ngoc Hai & Pham Van Manh (2024). Assessing Carbon Stocks in A Tropical Forest Ecosystem of High Conservation Value: A Case Study in Bac Kan province, Vietnam. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences.* 40(3): 92-110. DOI: 10.25073/2588-1094/vnuees.5069

[3]. Janine Oettel, Bettina Thalinger, Aglaia Szukala, Linus Munishi & Katharina Lapin. (2025). Monitoring Methods for the Protection of Connectivity in Forest Ecosystems. *Ecological Connectivity of Forest Ecosystems.* Springer Nature Switzerland, Cham. 143–169. DOI: 10.1007/978-3-031-82206-3\_8

[4]. Zoltán L., Tanács E., & Standovár T. (2023). Validation and limitations of large-scale forest condition indicators – An example from Hungary. *Ecol Indic.* 154: 110539. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110539

[5]. Latterini F., Camarretta N., & Watt M.S. (2025). Remote sensing for planning harvesting operations and monitoring their effects on the forest ecosystem: State of the art and future perspectives. *For Ecol Manag.* 597: 123175. DOI: 10.1016/j.foreco.2025.123175

[6]. Yang Liu, Yiguang Fan, Jibo Yue, Yanpeng Ma, Fuqin Yang, Jiejie Fan, Riqiang Chen, Mingbo Bian & Haikuan Feng. (2025). UAV-based remote sensing estimation of above-ground biomass in different crops: A review. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation.* 144: 104938. DOI: 10.1016/j.jag.2025.104938

[7]. Giribabu Dandabathula, Sudhakar Reddy Chintala, Sonali Ghosh, Padmapriya Balakrishnan & Chandra Shekhar Jha. (2021). Exploring the nexus between Indian forestry and the Sustainable Development Goals. *Reg Sustain.* 2(4): 308–323. DOI: 10.1016/j.regsus.2022.01.002

[8]. Suman S., Gupta A., & Srivastava P.K. (2026). Chapter 15 - Role of airborne datasets in forest monitoring. *Advanced Geospatial and Ground Based Techniques in Forest Monitoring.* Elsevier. 327–343. DOI: 10.1016/B978-0-443-18949-4.00001-4

[9]. Bao Huy, Krishna P. Poudel & Hailemariam Temesgen. (2016). Aboveground biomass equations for evergreen broadleaf forests in South Central Coastal ecoregion of Viet Nam: Selection of eco-regional or pantropical models. *For Ecol Manag.* 376: 276–283. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.06.031

[10]. Aishwarya, Meenu Rani, Preeti Kumari, Pankaj Lavania, Garima Gupta, Prabhat Tiwari, Ram Kumar Singh, Manoj Kumar, Manmohan Dobriyal, Manish Srivastav & Pavan Kumar. (2026). Chapter 2 - An overview of remote sensing technology in forest management. *Advanced Geospatial and Ground Based Techniques in Forest Monitoring.* Elsevier. 37–59. DOI: 10.1016/B978-0-443-18949-4.00017-8

[11]. Yelu Zeng, Dalei Hao, Alfredo Huete, Benjamin Dechant, Joe Berry, Jing M. Chen, Joanna Joiner, Christian Frankenberg, Ben Bond-Lamberty, Youngryel Ryu, Jingfeng Xiao, Ghassem R. Asrar & Min Chen. (2022). Optical vegetation indices for monitoring terrestrial ecosystems globally. *Nat Rev Earth Environ.* 3(7): 477–493. DOI: 10.1038/s43017-022-00298-5

[12]. Kai Yan, Si Gao, Guangjian Yan, Xuanlong Ma, Xiuzhi Chen, Peng Zhu, Jinhua Li, Sicong Gao, Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, Ranga B. Myneni & Qiao Wang. (2025). A global systematic review of the remote sensing vegetation indices. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation.* 139: 104560. DOI: 10.1016/j.jag.2025.104560

[13]. Gudisa A., Taddese H., & Garbole J. (2025). Remote sensing and field-based estimation of aboveground biomass of plantation forests: Kofale, South East Ethiopia. *Environ Sustain Indic.* 26: 100680.

[14]. Dang An Thi Ngoc, Subrata Nandy, Ritika Srinet, Luong Nguyen Viet, Surajit Ghosh & A. Senthil Kumar (2019). Forest aboveground biomass estimation using machine learning regression algorithm in Yok Don National Park, Vietnam. *Ecol Inform.* 50: 24–32. DOI: 10.1016/j.indic.2025.100680