

Tổng quan về ứng dụng viễn thám trong ước tính trữ lượng các-bon rừng ngập mặn

Nguyễn Văn Thị¹, Nguyễn Hải Hòa^{1*}, Nguyễn Việt Dương²

¹Trường Đại học Lâm nghiệp

²Vườn Quốc gia Bến En, tỉnh Thanh Hóa

Overview of remote sensing applications in estimation of mangrove carbon stocks

Nguyen Van Thi¹, Nguyen Hai Hoa^{1*}, Nguyen Viet Duong²

¹Vietnam National University of Forestry

²Ben En National Park, Thanh Hoa province

*Corresponding author: hoanhh@vnuf.edu.vn

<https://doi.org/10.55250/jo.vnuf.14.5.2025.110-119>

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 27/04/2025

Ngày phản biện: 28/05/2025

Ngày quyết định đăng: 27/06/2025

Từ khóa:

Ảnh quang học, các-bon rừng,
rừng ngập mặn, sinh khối rừng,
tổng quan, viễn thám.

Keywords:

Forest biomass, forest carbon,
mangrove forest, optical imagery,
review, remote sensing.

TÓM TẮT

Viễn thám đóng vai trò quan trọng trong nghiên cứu rừng ngập mặn (RNM), đặc biệt trong ước tính sinh khối và trữ lượng các-bon. Bài báo này tổng quan các ứng dụng viễn thám trong nghiên cứu RNM, tập trung vào bốn nhóm dữ liệu chính: ảnh quang học, ảnh radar, dữ liệu LiDAR và phương pháp kết hợp. Ảnh quang học từ Landsat và Sentinel-2 giúp phân loại RNM và ước tính sinh khối qua chỉ số thực vật, nhưng dễ bị ảnh hưởng bởi mây che phủ, đặc biệt ở khu vực nhiệt đới. Ảnh radar như Sentinel-1 và ALOS PALSAR có khả năng xuyên mây và cung cấp thông tin về cấu trúc tán rừng, nhưng độ ẩm đất có thể gây nhiễu tín hiệu. LiDAR mang lại độ chính xác cao trong đo chiều cao tán rừng và trữ lượng các-bon, tuy nhiên chi phí thu thập dữ liệu cao và khó triển khai rộng rãi. Việc kết hợp ảnh quang học và radar giúp nâng cao độ chính xác trong ước tính sinh khối và các-bon, nhưng phương pháp này vẫn chưa được nghiên cứu rộng rãi và cần các thử nghiệm thực tế. Bài báo nhấn mạnh sự cần thiết của các phương pháp tích hợp để hỗ trợ bảo tồn và quản lý bền vững hệ sinh thái RNM.

ABSTRACT

Remote sensing plays a crucial role in mangrove forest (MF) research, particularly in estimating biomass and carbon stock. This paper provides an overview of remote sensing applications in MF research, focusing on four main data types: optical imagery, radar imagery, LiDAR data, and combined methods. Optical imagery from Landsat and Sentinel-2 helps classify MF and estimate biomass through vegetation indices, but it is susceptible to cloud cover, especially in tropical areas. Radar imagery, such as Sentinel-1 and ALOS PALSAR, can penetrate clouds and provide information about canopy structure, but soil moisture may cause signal interference. LiDAR offers high accuracy in measuring canopy height and carbon stock, but data collection costs are high, and it is difficult to deploy on a large scale. Combining optical and radar imagery enhances accuracy in estimating biomass and carbon stock, but this method is not widely researched and requires practical testing. The paper emphasizes the need for integrated methods to support the sustainable conservation and management of MF ecosystems.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Rừng ngập mặn (RNM) là một trong những

hệ sinh thái quan trọng nhất trên thế giới, đóng
vai trò quan trọng trong bảo vệ bờ biển, duy trì

đa dạng sinh học và hấp thụ các-bon nhằm giảm thiểu tác động của biến đổi khí hậu [1]. Chúng có khả năng lưu trữ một lượng lớn các-bon cả trong sinh khối trên mặt đất và trong đất [2]. Tuy nhiên, diện tích rừng ngập mặn đang suy giảm nhanh chóng [3]. Do đó, việc theo dõi và đánh giá trữ lượng các-bon trong rừng ngập mặn là một nhiệm vụ cấp thiết trong công tác bảo tồn và phát triển bền vững.

Viễn thám đã trở thành một công cụ quan trọng trong nghiên cứu rừng ngập mặn nhờ khả năng cung cấp dữ liệu liên tục trên quy mô lớn, giúp theo dõi sự thay đổi về diện tích, cấu trúc và sinh khối của rừng [4]. Các phương pháp viễn thám hiện nay bao gồm sử dụng ảnh quang học, Radar khẩu độ tổng hợp (SAR) và quét laser (LiDAR) [5]. Nhiều nghiên cứu đã sử dụng ảnh vệ tinh quang học để đánh giá sức khỏe thảm thực vật và sinh khối rừng ngập mặn [6]. Trong khi đó, Radar khẩu độ tổng hợp (SAR) lại có ưu thế trong việc thu nhận dữ liệu ngay cả trong điều kiện thời tiết bất lợi, giúp cải thiện độ chính xác trong ước tính sinh khối rừng [7]. Ngoài ra, công nghệ LiDAR với khả năng đo lường chiều cao tán rừng đã cho phép ước tính chính xác hơn về sinh khối rừng ngập mặn [8].

Kết hợp ảnh quang học và SAR sẽ giúp cải thiện độ chính xác trong ước tính sinh khối và trữ lượng các-bon rừng ngập mặn. Mặc dù đã có một số nghiên cứu bước đầu về phương pháp này, nhưng việc ứng dụng kết hợp hai nguồn dữ liệu này vẫn chưa phổ biến và cần được nghiên cứu sâu hơn [9].

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Chiến lược tìm kiếm và cơ sở dữ liệu

Tài liệu được thu thập từ các cơ sở dữ liệu học thuật bao gồm Google Scholar, ScienceDirect, Web of Science, ResearchGate, và các báo cáo chuyên đề của FAO, NASA, ESA, USGS. Từ khóa được sử dụng trong chiến lược tìm kiếm bao gồm: "remote sensing", "mangrove forest", "carbon stock estimation", "biomass", "SAR", "LiDAR", "optical imagery", "Vietnam", kết hợp các toán tử logic AND, OR

để tối ưu kết quả.

2.2. Tiêu chí lựa chọn và loại trừ

- Tiêu chí lựa chọn: để lựa chọn tài liệu, nghiên cứu này áp dụng 4 tiêu chí gồm: (1) Các tài liệu được xuất bản từ năm 2010 trở lại đây; (2) Có nội dung liên quan đến việc sử dụng viễn thám trong ước tính sinh khối hoặc trữ lượng các-bon của rừng ngập mặn; (3) Có thông tin đầy đủ về phương pháp và kết quả nghiên cứu (có thể tái kiểm tra); (4) Viết bằng tiếng Anh hoặc tiếng Việt.

- Tiêu chí loại trừ: nghiên cứu này đưa ra 3 tiêu chí để loại trừ, gồm: (1) Nghiên cứu không tập trung vào RNM (ví dụ: rừng thường xanh, rừng núi đá vôi); (2) Không sử dụng viễn thám trong ước tính sinh khối/các-bon; (3) Tài liệu mang tính mô tả chung, không có phân tích dữ liệu hoặc kết quả thực nghiệm.

2.3. Quy trình trích xuất và tổng hợp dữ liệu

Thông tin được trích xuất gồm: Loại cảm biến sử dụng (optical, SAR, LiDAR, kết hợp); Tên và nguồn dữ liệu (ví dụ: Sentinel-2, ALOS PALSAR, ICESat-2...); Chỉ số thực vật/chỉ tiêu viễn thám sử dụng (NDVI, EVI, độ cao tán...); Phương pháp phân tích (hồi quy, học máy, mô hình cây ngẫu nhiên...); Độ chính xác của mô hình (R^2 , RMSE... nếu có báo cáo) và Địa điểm nghiên cứu (quốc gia/khu vực) và thời gian thực hiện.

2.4. Phân tích và tổng hợp kết quả

Phân tích được thực hiện theo hướng tổng hợp định tính có cấu trúc, phân loại theo từng nhóm công nghệ (optical, SAR, LiDAR, kết hợp). Bên cạnh đó, các bảng tóm tắt được xây dựng để trình bày điểm mạnh – điểm yếu, mức độ phổ biến, ứng dụng thực tế và khả năng tích hợp giữa các công nghệ. Khi có thể, thực hiện so sánh bán định lượng giữa các phương pháp (ví dụ: tỷ lệ sử dụng, độ chính xác trung bình, phân bố theo khu vực địa lý).

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

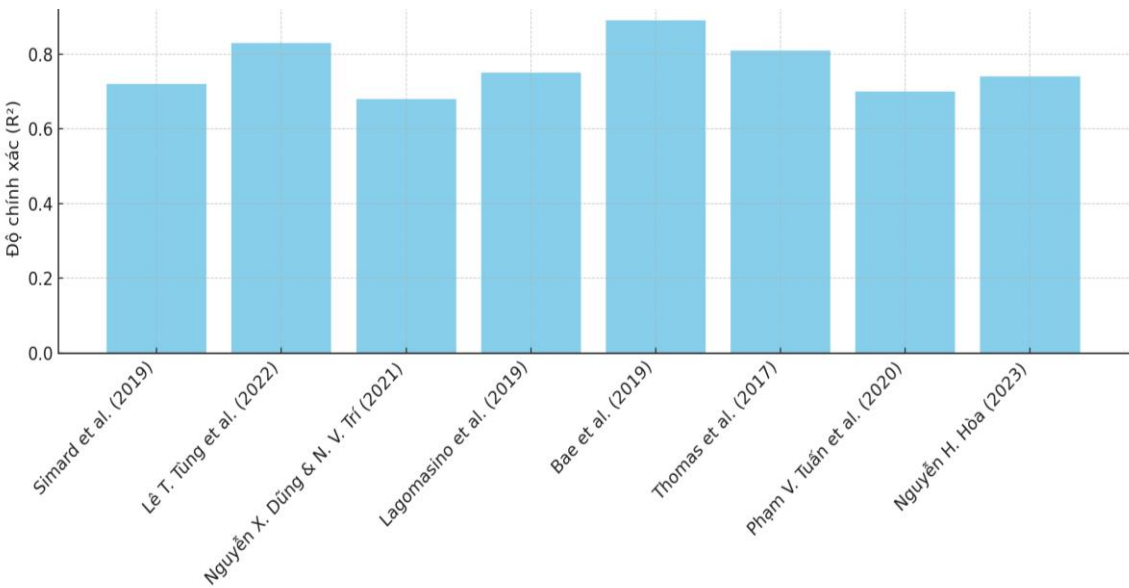
Tổng số 89 tài liệu được trích xuất ban đầu. Sau bước đọc tiêu đề và tóm tắt, còn lại 62 tài liệu. Tiếp tục loại các bài không đáp ứng tiêu chí

về đối tượng nghiên cứu, thời gian và dữ liệu sử dụng, kết quả cuối cùng chọn 49 bài báo để phân tích chi tiết. Sau đây là tổng hợp kết quả nghiên cứu của 10 tác giả tiêu biểu (Bảng 1).

Bảng 1. Bảng tổng hợp các nghiên cứu tiêu biểu được phân tích trong bài tổng quan

STT	Tác giả/Năm	Quốc gia	Loại cảm biến	Dữ liệu sử dụng	Phương pháp	Chỉ số / Tham số	Độ chính xác
1	Simard và cs (2019)	Toàn cầu	Optical	Landsat	Hồi quy tuyến tính	NDVI	$R^2 = 0,72$
2	Lê Thanh Tùng và cs (2022)	Việt Nam	Optical + SAR + LiDAR	Sentinel-2, ALOS PALSAR, LiDAR	Kết hợp đa nguồn	NDVI, độ cao tán	$R^2 = 0,83$
3	Fatoyinbo & Simard (2013)	Châu Phi	LiDAR	ICESat	Mô hình không gian	Chiều cao tán	RMSE = 10,4 t/ha
4	Nguyễn Xuân Dũng & Nguyễn Văn Trí (2021)	Việt Nam	Optical	Sentinel-2	Hồi quy tuyến tính	NDVI	$R^2 = 0,68$
5	Lagomasino và cs (2019)	Đông Nam Á	SAR + Optical	Sentinel-1, Sentinel-2	Mô hình tích hợp	NDVI, backscatter	$R^2 = 0,75$
6	Bae và cs (2019)	Hàn Quốc	Optical + SAR + LiDAR	Sentinel-2, SAR, LiDAR	Học máy (Random Forest)	NDVI, chiều cao, backscatter	$R^2 = 0,89$
7	Nguyễn Việt Lương (2011)	Việt Nam	LiDAR + Optical	MODIS, LiDAR	Phân tích thời gian	Sinh khối	Không rõ
8	Thomas và cs (2017)	Toàn cầu	Optical + LiDAR	Landsat, LiDAR	Mô hình hồi quy	NDVI + chiều cao	$R^2 = 0,81$
9	Phạm Văn Tuấn và cs (2020)	Việt Nam	Optical	Sentinel-2	Hồi quy tuyến tính	NDVI, SWIR	$R^2 = 0,70$
10	Nguyễn Hải Hòa (2023)	Việt Nam	SAR	Sentinel-1	Hồi quy	Backscatter	$R^2 = 0,74$

Từ số liệu ở Bảng 1, một biểu đồ so sánh độ tin cậy của các mô hình mà các tác giả đã nghiên cứu được thể hiện như Hình 1.



Hình 1. So sánh độ chính xác (R^2) của các nghiên cứu sử dụng dữ liệu viễn thám

Tổng quan về ứng dụng từng loại dữ liệu viễn thám trong ước tính sinh khối và các-bon rừng ngập mặn như sau:

3.1. Ước tính sinh khối và trữ lượng các-bon RNM bằng ảnh quang học

Kết quả thu thập và đánh giá các bài báo và báo cáo của 49 bài báo đã được công bố liên quan đến sử dụng ảnh viễn thám thì có đến 15 công trình (chiếm 30,6%) sử dụng ảnh quang học. Rõ ràng ảnh quang học đã được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu sinh khối và trữ lượng các-bon RNM nhờ khả năng cung cấp dữ liệu phổ phản xạ chi tiết theo nhiều dải sóng, giúp phân biệt RNM với các hệ sinh thái khác [10, 11]. Các chỉ số thực vật như NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) và EVI (Enhanced Vegetation Index) thường được sử dụng để ước tính sinh khối và các-bon dựa trên mối quan hệ giữa chỉ số quang học và mật độ thảm thực vật [12, 13].

3.1.1. Ứng dụng chỉ số thực vật trong ước tính sinh khối và trữ lượng các-bon RNM

Một số nghiên cứu đã sử dụng ảnh Landsat và Sentinel-2 để phát triển mô hình hồi quy giữa NDVI/EVI và sinh khối RNM. Simard và cộng sự đã sử dụng ảnh Landsat để xây dựng bản đồ sinh khối và trữ lượng các-bon RNM toàn cầu, trong đó chỉ số NDVI đóng vai trò quan trọng trong việc xác định mật độ sinh khối. Kết quả nghiên cứu này cho thấy NDVI có tương quan mạnh với sinh khối RNM ở các khu vực ven biển nhiệt đới [14, 15]. Tại Việt Nam, nghiên cứu của Lê Thanh Tùng và cộng sự đã ứng dụng ảnh Sentinel-2 để ước tính sinh khối RNM tại miền Nam, chỉ ra rằng chỉ số NDVI từ Sentinel-2 có độ chính xác cao hơn so với Landsat nhờ độ phân giải tốt hơn [16]. Ngoài ra, Nguyễn Xuân Dũng & Nguyễn Văn Trí đã sử dụng mô hình hồi quy dựa trên chỉ số thực vật để phân tích sự thay đổi sinh khối RNM tại Đồng bằng sông Cửu Long, cho thấy sinh khối RNM giảm đáng kể do tác động của nuôi trồng

thủy sản [15, 17]. Nghiên cứu của Simard và cộng sự đã xây dựng bản đồ trữ lượng các-bon RNM toàn cầu bằng ảnh Landsat, cho thấy rằng RNM có khả năng lưu trữ các-bon cao hơn nhiều so với các hệ sinh thái rừng khác [14, 18]. Tại Việt Nam, Nguyễn Văn Huy và cộng sự (2021) đã sử dụng ảnh Landsat để đánh giá trữ lượng các-bon RNM tại các tỉnh ven biển, cho thấy sự suy giảm nghiêm trọng do mất rừng [19]. Ngoài ra, nghiên cứu của Nguyễn Việt Lương đã sử dụng ảnh MODIS để phân tích biến động trữ lượng các-bon RNM từ năm 2000 đến 2020, nhấn mạnh tác động của biến đổi khí hậu đến hệ sinh thái RNM [13]. MODIS có lợi thế về chu kỳ quét nhanh, giúp cập nhật dữ liệu RNM thường xuyên, mặc dù độ phân giải thấp hơn so với Landsat và Sentinel-2 [20].

3.1.2. Sử dụng dữ liệu hồng ngoại cận và sóng ngắn trong ước tính sinh khối RNM

Ngoài NDVI và EVI, các nghiên cứu gần đây đã khai thác dải phổ hồng ngoại cận (NIR) và hồng ngoại sóng ngắn (SWIR) để nâng cao độ chính xác trong ước tính sinh khối RNM. Sentinel-2 có các kênh NIR và SWIR giúp tách biệt rõ hơn giữa các tầng sinh thái RNM, cung cấp thông tin chi tiết về mật độ tán rừng [12, 21]. Nghiên cứu của Lagomasino đã kết hợp dữ liệu NIR từ Sentinel-2 với các phép đo thực địa để xây dựng mô hình sinh khối RNM tại Đông Nam Á. Kết quả cho thấy độ chính xác của mô hình tăng lên đáng kể khi kết hợp dữ liệu NIR với NDVI [22]. Tương tự, Bae và cộng sự đã sử dụng ảnh Landsat 8 kết hợp với SWIR để cải thiện khả năng phân biệt RNM và rừng thường xanh, từ đó nâng cao độ chính xác trong ước tính sinh khối [23]. Mặc dù ảnh quang học cung cấp thông tin chi tiết về sinh khối và trữ lượng các-bon RNM, nhưng vẫn tồn tại một số hạn chế: (1) Ảnh quang học dễ bị nhiễu do mây che phủ, đặc biệt là tại các khu vực nhiệt đới ẩm như RNM [24, 25]; (2) Ảnh quang học chủ yếu phản ánh thông tin từ tán rừng, gây khó khăn

trong việc đánh giá sinh khối ở các tầng sinh thái thấp hơn [12] và (3) Giới hạn về độ phân giải thời gian: mặc dù Sentinel-2 cung cấp ảnh mỗi 5 ngày và MODIS có thể cập nhật dữ liệu hàng ngày, nhưng Landsat chỉ cung cấp ảnh mỗi 16 ngày, gây hạn chế trong việc theo dõi biến động sinh khối theo thời gian [11, 26].

3.2. Sử dụng ảnh Radar hoặc LiDAR trong ước tính trữ lượng các-bon rừng ngập mặn

Dữ liệu Radar và LiDAR là hai nguồn thông tin quan trọng giúp nâng cao độ chính xác trong ước tính sinh khối và trữ lượng các-bon RNM nhờ khả năng thu nhận thông tin về cấu trúc rừng ba chiều (3D) và độ cao tán rừng. Trong khi ảnh radar có ưu điểm về khả năng hoạt động trong mọi điều kiện thời tiết, thì LiDAR cung cấp dữ liệu chi tiết về chiều cao tán cây, giúp cải thiện đáng kể mô hình ước tính sinh khối RNM [27, 28]. Trong số 49 tài liệu được tham khảo thì có đến 21 tài liệu (chiếm 42,9%) sử dụng ảnh Radar để nghiên cứu trữ lượng các-bon rừng ngập mặn.

3.2.1. Ứng dụng ảnh Radar trong ước tính trữ lượng các-bon RNM

Radar khẩu độ tổng hợp (SAR - Synthetic Aperture Radar) đã được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu RNM, đặc biệt trong ước tính sinh khối và trữ lượng các-bon nhờ khả năng xuyên qua mây, hoạt động cả ngày lẫn đêm và cung cấp thông tin chi tiết về độ cao tán rừng và mật độ sinh khối [28, 29].

Các nghiên cứu sử dụng dữ liệu Radar tập trung vào hai dải tần phổ biến: (1) Băng C (Sentinel-1, RADARSAT) có độ phân giải cao nhưng bị hạn chế trong việc thâm nhập tán rừng dày đặc [30-32] và (2) Băng L (ALOS PALSAR, NISAR) có bước sóng dài hơn, cho phép thu thập thông tin về cấu trúc RNM và phản ánh rõ hơn sự thay đổi sinh khối [27, 33]. Nghiên cứu của Fatoyinbo và cộng sự đã sử dụng dữ liệu ALOS PALSAR để lập bản đồ sinh khối RNM tại châu Phi, cho thấy băng L có thể

phân biệt tốt giữa RNM trưởng thành và rừng mới tái sinh [34]. Simard và cộng sự đã chứng minh rằng kết hợp ALOS PALSAR với dữ liệu độ cao kỹ thuật số (DEM) giúp cải thiện độ chính xác trong ước tính trữ lượng các-bon RNM trên toàn cầu [6]. Tại Đông Nam Á, nghiên cứu của Lagomasino sử dụng Sentinel-1 và ALOS PALSAR để theo dõi biến động sinh khối RNM, cho thấy radar có thể phát hiện sự suy giảm trữ lượng các-bon trước khi thay đổi cấu trúc rừng xuất hiện trên ảnh quang học [29]. Tại Việt Nam, Trần Thị Lan và cộng sự đã sử dụng dữ liệu ALOS PALSAR để phân tích biến động RNM tại khu vực Nam Trung Bộ, khẳng định rằng radar băng L có thể theo dõi sự suy giảm sinh khối do xâm nhập mặn và mất rừng [35]. Nhiều nghiên cứu cũng đã đánh giá tiềm năng ứng dụng radar trong nghiên cứu RNM Việt Nam, chỉ ra rằng Sentinel-1 có thể cung cấp dữ liệu liên tục nhưng cần kết hợp với các nguồn dữ liệu khác để nâng cao độ chính xác [28, 32].

Dù có nhiều ưu điểm, ảnh radar cũng có hạn chế, đặc biệt là nhiễu tín hiệu do độ ẩm đất cao, gây khó khăn trong việc phân biệt RNM với các loại thực vật khác ở vùng ven biển [21, 27, 36].

3.2.2. Ứng dụng dữ liệu LiDAR trong ước tính trữ lượng các-bon RNM

LiDAR (Light Detection and Ranging) là công nghệ quét laser cung cấp dữ liệu chi tiết về chiều cao tán cây, cấu trúc sinh khối và mật độ thảm thực vật. LiDAR được đánh giá là phương pháp chính xác nhất trong ước tính sinh khối RNM, giúp giảm sai số so với các phương pháp truyền thống [37, 38]. Fatoyinbo và Simard đã sử dụng LiDAR để ước tính sinh khối RNM tại châu Phi, cho thấy độ cao tán rừng có mối tương quan mạnh với sinh khối, giúp cải thiện độ chính xác của mô hình ước tính các-bon [27]. Simard và cộng sự sử dụng dữ liệu LiDAR từ ICESat-2 để lập bản đồ sinh khối RNM toàn cầu, khẳng định rằng kết hợp LiDAR với dữ liệu radar có thể giảm đáng kể sai số trong mô hình ước

tính [38]. Tại Việt Nam, tiềm năng ứng dụng LiDAR trong nghiên cứu RNM có thể phân biệt tốt giữa các tầng thực vật và giúp cải thiện mô hình tính toán sinh khối [39-41]. Hạn chế lớn nhất của LiDAR là chi phí thu thập dữ liệu cao, đặc biệt khi sử dụng trên phạm vi lớn. Ngoài ra, dữ liệu LiDAR cũng đòi hỏi các phương pháp xử lý phức tạp, cần các thuật toán tiên tiến để phân tích dữ liệu điểm mây [23, 42].

3.3. Xu hướng sử dụng kết hợp ảnh quang học, Radar và LiDAR trong ước tính sinh khối và trữ lượng các-bon rừng ngập mặn

3.3.1. Ưu điểm và hạn chế của kết hợp nhiều nguồn dữ liệu viễn thám

- Về ưu điểm: Việc kết hợp nhiều nguồn dữ liệu viễn thám sẽ bù trừ được các khuyết điểm và lợi thế của từng loại. Chẳng hạn ảnh quang học rất nhạy cảm với điều kiện thời tiết, dễ bị che phủ bởi mây, đặc biệt ở các khu vực nhiệt đới có RNM phân bố rộng rãi [20, 43]. Hay Radar xuyên mây và hoạt động cả ngày lẫn đêm, nhưng tín hiệu có thể bị nhiễu bởi độ ẩm đất hoặc khó phân biệt giữa các tầng tán rừng [22, 28, 44]. Và LiDAR cung cấp thông tin chi tiết về chiều cao tán cây và cấu trúc rừng, nhưng chi phí thu thập dữ liệu cao và thường chỉ được thực hiện trên quy mô nhỏ [38, 40, 45-47]. Do đó, việc tích hợp dữ liệu từ nhiều nguồn giúp tận dụng thế mạnh của từng loại cảm biến, cải thiện độ chính xác trong phân loại RNM, xác định sinh khối và tính toán trữ lượng các-bon [37].

- Về hạn chế: Mặc dù việc kết hợp nhiều nguồn dữ liệu viễn thám đã mang lại những kết quả khả quan trong ước tính sinh khối và trữ lượng các-bon RNM, vẫn còn một số thách thức như: (1) Chi phí cao khi sử dụng LiDAR hoặc dữ liệu radar độ phân giải cao [40]; (2) Độ chính xác của mô hình phụ thuộc vào phương pháp tích hợp dữ liệu, đặc biệt khi áp dụng các kỹ thuật học máy [23] và (3) Thiếu nghiên cứu ứng dụng tại Việt Nam, đặc biệt là các phương pháp

kết hợp nhiều nguồn dữ liệu để ước tính sinh khối RNM trên quy mô lớn [41].

3.3.2. Ứng dụng trong ước tính sinh khối và trữ lượng các-bon RNM

3.3.2.1. Kết hợp ảnh quang học và Radar

Nhiều nghiên cứu đã kết hợp ảnh quang học với ảnh Radar để nâng cao độ chính xác trong phân loại và ước tính sinh khối RNM. Sự kết hợp Sentinel-2 và Sentinel-1 giúp cải thiện khả năng phân loại RNM, đặc biệt trong điều kiện mây che phủ, đồng thời bổ sung thông tin về cấu trúc rừng từ radar [24, 48]. Nguyễn Xuân Dũng và Nguyễn Văn Trí đã sử dụng ảnh Sentinel-2 kết hợp với Sentinel-1 để lập bản đồ RNM tại Đồng bằng sông Cửu Long, cho thấy độ chính xác cao hơn so với việc sử dụng từng nguồn dữ liệu riêng lẻ [15]. Fatoyinbo và cộng sự đã sử dụng dữ liệu ALOS PALSAR kết hợp với Landsat để phân biệt rõ hơn các tầng sinh thái của RNM và cải thiện mô hình ước tính sinh khối [49].

3.3.2.2. Kết hợp LiDAR với ảnh quang học hoặc Radar

LiDAR đóng vai trò quan trọng trong việc ước tính chính xác chiều cao tán rừng và sinh khối RNM. Tuy nhiên, do chi phí cao và hạn chế về phạm vi thu thập, một số nghiên cứu đã kết hợp LiDAR với ảnh quang học hoặc radar để tối ưu hóa mô hình ước tính [23]. Simard và cộng sự (2019) đã sử dụng dữ liệu LiDAR kết hợp với radar (Sentinel-1, ALOS PALSAR) để nâng cao độ chính xác trong mô hình ước tính các-bon RNM bằng cách kết hợp thông tin chiều cao tán từ LiDAR và dữ liệu phản xạ radar [12, 18]. Thomas và cộng sự (2017) chứng minh rằng sự kết hợp giữa LiDAR và ảnh Landsat giúp cải thiện khả năng dự báo trữ lượng các-bon RNM trên phạm vi lớn [33]. Nguyễn Việt Lương (2011) đề xuất phương pháp tích hợp LiDAR với ảnh MODIS để đánh giá biến động sinh khối RNM theo thời gian.

3.3.2.3. Kết hợp cả ba nguồn dữ liệu Quang học, radar và LiDAR

Một số nghiên cứu gần đây đã thử nghiệm kết hợp cả ba nguồn dữ liệu nhằm tối ưu hóa mô hình ước tính sinh khối và trữ lượng các-bon RNM. Bae và cộng sự (2019) đã sử dụng ảnh Sentinel-2, Sentinel-1 và LiDAR để xây dựng mô hình học máy (Machine Learning), giúp tăng cường khả năng phân loại và ước tính sinh khối RNM [23]. Lê Thanh Tùng & cộng sự (2022) đã kết hợp dữ liệu Sentinel-2, ALOS PALSAR và LiDAR để phân tích trữ lượng các-bon RNM tại khu vực miền Nam Việt Nam, cho thấy phương pháp này có độ chính xác cao hơn so với việc sử dụng riêng lẻ từng loại dữ liệu [41]. Nguyễn & cộng sự (2021) đề xuất kết hợp ảnh quang học (Landsat, Sentinel-2), radar (Sentinel-1) và LiDAR để theo dõi biến động RNM tại các tỉnh ven biển Việt Nam từ năm 2000 đến 2020, giúp xác định các tác động của biến đổi khí hậu và hoạt động con người đến sinh khối RNM [45].

4. THẢO LUẬN

Nghiên cứu tổng quan này cho thấy các phương pháp viễn thám hiện đại đóng vai trò ngày càng quan trọng trong việc ước tính sinh khối và trữ lượng các-bon rừng ngập mặn (RNM). Tuy nhiên, sự khác biệt về loại cảm biến, phương pháp xử lý và bối cảnh địa lý đã dẫn đến hiệu quả và độ chính xác khác nhau giữa các nghiên cứu.

4.1. So sánh hiệu quả giữa các loại viễn thám

- Ảnh quang học (Sentinel-2, Landsat) được

sử dụng rộng rãi nhờ chi phí thấp và khả năng tiếp cận cao [10, 13, 19, 45]. Các chỉ số như NDVI, EVI phản ánh tốt tình trạng thảm thực vật và sinh khối, tuy nhiên độ chính xác trung bình ($R^2 \approx 0,65-0,72$) và dễ bị ảnh hưởng bởi mây, đặc biệt ở các vùng nhiệt đới như Việt Nam [2, 28].

- Dữ liệu radar (Sentinel-1, ALOS PALSAR) khắc phục hạn chế mây che phủ, cung cấp thông tin về độ cao tán rừng và mật độ sinh khối [9, 27, 34, 48]. Radar băng L (như ALOS PALSAR) thể hiện độ xuyên thấu cao hơn và cho kết quả tốt hơn so với băng C (Sentinel-1) [22, 27]. Tuy nhiên, tín hiệu radar có thể bị nhiễu do độ ẩm đất ven biển, làm giảm độ chính xác mô hình [21, 36, 44].

- LiDAR cho phép thu nhận cấu trúc 3D rừng với độ chính xác vượt trội ($R^2 > 0,85$ trong nhiều nghiên cứu) [5, 14, 27, 40, 47]. Các nghiên cứu như Simard và cộng sự (2019) cho thấy LiDAR là công cụ hiệu quả nhất để ước tính chiều cao tán cây và trữ lượng các-bon [14]. Tuy nhiên, hạn chế lớn nhất là chi phí thu thập và độ phủ không đều trên toàn cầu.

- Phương pháp kết hợp đa nguồn dữ liệu (Optical + SAR + LiDAR) đang là xu hướng hiện đại, giúp khắc phục hạn chế riêng của từng nguồn và tăng độ chính xác mô hình lên đến $R^2 = 0,89$ trong nghiên cứu học máy [23, 33, 41]. Tuy nhiên, việc tích hợp đòi hỏi đồng bộ dữ liệu, xử lý phức tạp và hạ tầng kỹ thuật mạnh – hiện chưa phổ biến tại Việt Nam [40, 45].

Bảng 2. Tổng hợp các đặc điểm kỹ thuật, ưu điểm và hạn chế của các loại cảm biến viễn thám trong nghiên cứu RNM

Loại dữ liệu	Ưu điểm	Hạn chế	Ví dụ nghiên cứu
Ảnh quang học	Độ phân giải không gian tốt, chỉ số NDVI phổ biến	Nhạy với mây che	Simard và cs (2019), Nguyen và cs (2021)
Radar	Hoạt động mọi thời tiết, phản ánh cấu trúc	Nhiều do độ ẩm đất	Fatoyinbo & Simard (2013), Tran và cs (2022)
LiDAR	Độ chính xác cao, đo chiều cao tán rừng	Chi phí cao	Simard và cs (2019), Bae và cs (2019)
Kết hợp	Tăng độ chính xác, giảm sai số	Yêu cầu xử lý phức tạp	Pham và cs (2019), Bae và cs (2019)

4.2. Khoảng trống nghiên cứu

Phân tích cho thấy một số khoảng trống chính cần được chú trọng:

- Thiếu phân tích định lượng tổng hợp (meta-analysis): Hầu hết nghiên cứu hiện nay mới dừng lại ở mô tả, thiếu thống kê tổng hợp so sánh độ chính xác giữa các phương pháp (chỉ số R^2 , sai số tuyệt đối trung bình – MAE...) [4].

- Thiếu tích hợp tại Việt Nam: Hiếm có nghiên cứu trong nước kết hợp đầy đủ cả ba nguồn dữ liệu (quang học, SAR, LiDAR); phần lớn dừng ở việc kết hợp Sentinel-1 và Sentinel-2 [15, 32, 45].

- Chưa đánh giá tính ứng dụng thực tiễn: Rất ít nghiên cứu đề cập đến khả năng tích hợp kết quả vào hệ thống quản lý đất ngập nước, REDD+ hay theo dõi biến đổi khí hậu theo thời gian dài [1, 18, 30].

5. KẾT LUẬN

Viễn thám đóng vai trò quan trọng trong ước tính trữ lượng các-bon của rừng ngập mặn, với các phương pháp chính bao gồm ảnh quang học, radar, LiDAR và phương pháp kết hợp. Mỗi phương pháp có những ưu điểm và hạn chế riêng: ảnh quang học giúp phân loại rừng ngập mặn nhưng dễ bị ảnh hưởng bởi mây, radar có khả năng xuyên mây nhưng dễ bị nhiễu do độ ẩm đất và LiDAR mang lại độ chính xác cao nhưng chi phí thu thập dữ liệu lớn. Việc kết hợp các nguồn dữ liệu giúp tận dụng thế mạnh của từng phương pháp, cải thiện độ chính xác trong ước tính sinh khối và trữ lượng các-bon. Tuy nhiên, các nghiên cứu về phương pháp tích hợp này vẫn còn hạn chế và cần nhiều thử nghiệm thực tế để đánh giá hiệu quả. Với những khoảng trống đã được phát hiện trong nghiên cứu này, hướng nghiên cứu tiếp theo ở Việt Nam nên tập trung vào việc kết hợp giữa ảnh quang học và ảnh RADAR hoặc LiDAR để xây dựng các mô hình ước tính trữ lượng các-bon rừng ngập mặn cho khu vực phía Bắc và miền Trung.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Alongi D. M. (2014). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*. 6(1): 195–219.
- [2]. Donato D. C., Kauffman J. B., Murdiyarso D., Kurnianto S., Stidham M. & Kanninen M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*. 45(5): 293–297.
- [3]. Daniel A. Friess, Kerry Lee Rogers, Catherine E. Lovelock, Ken W. Krauss, Stuart E. Hamilton, Shing Yip Lee, Richard Lucas, Jurgenne Primavera, Anusha Rajkaran & Suhua Shi (2019). The state of the world's mangrove forests: Past, present, and future. *Annual Review of Environment and Resources*. 44(1): 89–115.
- [4]. Claudia Kuenzer, Andrea Bluemel, Steffen Gebhardt, Tuan Vo Quoc & Stefan Dech (2011). Remote sensing of mangrove ecosystems: A review. *Remote Sensing*. 3(4): 878–928.
- [5]. Fatoyinbo T. E., Simard M., Smetanka C., Rivera-Monroy V. H., Castañeda-Moya E. & Twilley R. R. (2018). Mangrove forest structure and biomass estimation using spaceborne LIDAR and UAV data. *Remote Sensing of Environment*. 204: 61–72.
- [6]. Marc Simard (2019). "Radar Remote Sensing of Mangrove Forests." *SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*. NASA.
- [7]. Richard Lucas, Ruben Van De Kerchove, Viviana Otero, David Lagomasino, Lola Fatoyinbo, Hamdan Omare, Behara Satyanarayana & Farid Dahdouh-Guebas (2020). Structural characterisation of mangrove forests achieved through combining multiple sources of remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*. 237.
- [8]. Asner G. P., Knapp D. E., Balaji A. & Paez-Acosta G. (2012). Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite. *Journal of Applied Remote Sensing*. 6(1): 063512.
- [9]. Ming D., Zhang X., Chen Y. & Li W. (2022). Integrating optical and SAR data for improved mangrove biomass estimation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 182: 73–88.
- [10]. Nguyễn Văn Huy (2020). Ứng dụng viễn thám trong theo dõi biến động rừng ngập mặn tại Việt Nam. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*. 62(3): 45–55.
- [11]. Rovai A. S., Twilley R. R., Castañeda-Moya E., Midway S. R., Bouillon S., Rivera-Monroy V. H. & Simard M. (2018). Global controls on carbon storage in mangrove forests. *Nature Climate Change*. 8(6): 534–540.

- [12]. Fatoyinbo T. & Simard M. (2013). Height and biomass of mangroves in Africa using LiDAR and radar. *Remote Sensing of Environment*. 134: 377-389.
- [13]. Nguyễn Việt Lương (2011). Viễn thám trong nghiên cứu rừng ngập mặn: Ứng dụng và thách thức. *Hội nghị Khoa học Địa lý Việt Nam lần thứ 5*. 158-169.
- [14]. Simard M., Fatoyinbo T. E., Smetanka C., Rivera-Monroy V. H., Castañeda-Moya E., Thomas N. & Twilley R. R. (2019). Mangrove canopy height and biomass mapping at regional to global scales. *Remote Sensing*. 11(8): 922-931.
- [15]. Nguyễn Xuân Dũng & Nguyễn Văn Trí (2021). Ứng dụng ảnh Sentinel-2 trong lập bản đồ rừng ngập mặn tại Đồng bằng sông Cửu Long. *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn*. 102: 67-79.
- [16]. Lê Thanh Tùng (2022). Ứng dụng Sentinel-2 trong ước tính sinh khối rừng ngập mặn tại miền Nam Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Lâm nghiệp*. 4(2): 56-67.
- [17]. Nguyễn Xuân Dũng & Nguyễn Văn Trí (2021). Sử dụng ảnh Sentinel-2 trong phân loại rừng ngập mặn khu vực Đồng bằng sông Cửu Long. *Tạp chí Khoa học ĐHQGHN: Khoa học Trái Đất và Môi trường*. 37(2): 112-125.
- [18]. Simard M., Fatoyinbo T., Smetanka C., Rivera-Monroy V. H., Castañeda-Moya E., Thomas N. & Van der Stocken T. (2019). Mangrove canopy height globally related to precipitation, temperature and cyclone frequency. *Nature Geoscience*. 12(1): 40-45.
- [19]. Nguyễn Văn Huy (2021). Phân tích biến động rừng ngập mặn tại các tỉnh ven biển Việt Nam từ năm 2000 đến 2020 bằng ảnh Landsat. *Tạp chí Môi trường và Phát triển bền vững*. 29(3): 88-99.
- [20]. Giri C., Ochieng E., Tieszen L. L., Zhu Z., Singh A., T. Loveland & Duke N. (2011). Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*. 20(1): 154-159.
- [21]. Phạm Văn Tuấn (2020). Ứng dụng ảnh Sentinel-2 trong ước tính sinh khối rừng ngập mặn ven biển miền Trung. *Tạp chí Khoa học Đại học Huế*. 29(4): 67-78.
- [22]. Lagomasino D., Fatoyinbo T. & Simard M. (2019). The role of radar and optical remote sensing in monitoring mangrove ecosystems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 149: 98-112.
- [23]. Bae S., Han S., Lee W. & Kim H. (2019). Integrating LiDAR, optical, and SAR data for mangrove biomass estimation using machine learning algorithms. *Remote Sensing*. 11(3): 285.
- [24]. Aslan A., Santos M. J. & Asner G. P. (2021). Remote sensing of mangrove forests: A review of current methods and future opportunities. *Remote Sensing of Environment*. 262: 112-133.
- [25]. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2020). Báo cáo hiện trạng rừng Việt Nam năm 2020.
- [26]. Trần Đình Hòa (2019). Đánh giá khả năng sử dụng dữ liệu MODIS để theo dõi biến động rừng ngập mặn ở Việt Nam. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Biển*. 57(6): 132-143.
- [27]. Fatoyinbo L. & Simard M. (2013). Height and biomass of mangroves in Africa using LiDAR data. *Remote Sensing*. 5(10): 4870-4889.
- [28]. Nguyễn Văn Hùng (2019). Đánh giá tiềm năng sử dụng dữ liệu viễn thám radar trong nghiên cứu rừng ngập mặn Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Lâm nghiệp - Viện Khoa học Lâm nghiệp Việt Nam*. 10(2): 33-44.
- [29]. Lagomasino D., Fatoyinbo L., Lee S. K., Simard M., Trettin C. & Shapiro A. (2019). A comparison of mangrove canopy height estimates from airborne LiDAR and TanDEM-X interferometry in the Zambezi Delta. *Remote Sensing*. 11(6): 678.
- [30]. Dostálová Alena, Hollaus Markus, Milenković Milutin & Wagner Wolfgang (2016). Forest area derivation from Sentinel-1 data. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. III-7.
- [31]. Nguyen Hai Hoa, Vu Van Truong, Nguyen Thi Thu Hien, Ha Tri Son, Nguyen Van Thi, Nguyen Trong Cuong, Nguyen Thi Bich Hao, Phan Duc Le, Tran Thi Huong, Phan Van Dung, Thai Thi Thuy An & Le Phu Tuan (2024). Mangrove above-ground carbon estimation from Sentinel-1A (SAR) and field-based data in Tien Yen district, Quang Ninh province. *Journal of Forestry Science and Technology*. 9(1): 73-85
DOI: 10.55250/jo.vnuf.9.1.2024.073-085
- [32]. Nguyễn Hải Hòa (2023). Nghiên cứu ứng dụng ảnh Radar (SAR) để xác định trữ lượng các bon rừng ngập mặn. Báo cáo tổng kết đề tài nghiên cứu ứng dụng và phát triển công nghệ cấp bộ. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn, 114 trang.
- [33]. Thomas N., Lucas R., Bunting P., Hardy A., Rosenqvist A. & Simard M. (2017). Distribution and drivers of global mangrove forest change, 1996–2010. *PLoS One*. 12(6): e0179302.
- [34]. Temilola E. Fatoyinbo, Marc Simard, Robert A. Washington-Allen & Herman H. Shugart (2008). Landscape-scale extent, height, biomass, and carbon estimation of Mozambique's mangrove forests with Landsat ETM+ and Shuttle Radar Topography Mission

elevation data. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 113.

DOI: 10.1029/2007JG000551

[35]. Trần Thị Lan (2022). Ứng dụng dữ liệu ALOS PALSAR trong phân tích biến động rừng ngập mặn khu vực Nam Trung Bộ. *Tạp chí Khoa học Đại học Đà Nẵng*. 15(2): 145-156.

[36]. Nguyễn Thị Hà (2007). Nghiên cứu mô hình ước tính sinh khối, trữ lượng các bon rừng ngập mặn trên cơ sở ứng dụng viễn thám và GIS tại tỉnh Cà Mau. Luận án tiến sĩ, Trường Đại học Lâm nghiệp.

[37]. Bae S., Ryu Y., Lee H. & Kim J. (2019). Estimation of mangrove aboveground biomass using terrestrial LiDAR and machine learning models. *Remote Sensing of Environment*. 223: 1-12.

[38]. Simard M., Fatoyinbo T. E., Smetanka C., Rivera-Monroy V. H., Castañeda-Moya E. & Twilley R. R. (2019). Mangrove canopy height and biomass mapping at global scale using spaceborne LiDAR. *Remote Sensing*. 11(8): 931.

[39]. Phạm Thị Hằng (2022). Tiềm năng ứng dụng dữ liệu LiDAR trong nghiên cứu cấu trúc rừng ngập mặn. *Tạp chí Tài nguyên và Môi trường*. 15(3): 97-108.

[40]. Phạm Thị Hằng (2022). Đánh giá chi phí và hiệu quả ứng dụng LiDAR trong nghiên cứu rừng ngập mặn. *Tạp chí Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ*. 12(3): 77-89.

[41]. Lê Thanh Tùng (2022). Ứng dụng ảnh Sentinel-2, ALOS PALSAR và LiDAR trong phân tích trữ lượng các-bon rừng ngập mặn tại miền Nam Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Lâm nghiệp*. 3(2): 45-58.

[42]. Nguyễn Việt Lương (2021). Phương pháp tích hợp LiDAR và ảnh MODIS để đánh giá biến động sinh khối rừng ngập mặn. *Tạp chí Khoa học Đo đạc và Bản đồ*. 21(4): 30-42.

[43]. Nguyễn Thị Thanh Hương (2021). Ứng dụng ảnh IKONOS trong nghiên cứu cấu trúc rừng ngập mặn tại Cần Giờ. *Tạp chí Khoa học ĐHQGHN: Khoa học Tự nhiên và Công nghệ*. 37(1): 75-85.

[44]. A Braun (2021). Retrieval of digital elevation models from Sentinel-1 radar data – open applications, techniques, and limitations. *Open Geosciences*. 13(1): 532-569.

[45]. Nguyễn Văn Huy (2021). Kết hợp ảnh quang học (Landsat, Sentinel-2), radar (Sentinel-1) và LiDAR để theo dõi biến động rừng ngập mặn tại các tỉnh ven biển Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Môi trường*. 10(1): 55-69.

[46]. Bae S. W., Lee W. K., Kim M. & Song C. (2019). Estimation of mangrove biomass using LiDAR and optical imagery in Southeast Asia. *Forest Ecology and Management*. 432: 63-75.

[47]. Phạm Thị Hằng (2022). Đánh giá tiềm năng ứng dụng LiDAR trong nghiên cứu rừng ngập mặn Việt Nam. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Biển*. 12(4): 88-99.

[48]. Pham Tien Dat, Junshi Xia, Gerald Baier, Nga Nhu Le & Naoto Yokoya (2019). Mangrove species mapping using Sentinel-1 and Sentinel-2 data in North Vietnam. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*.

[49]. Fatoyinbo L., Simard M. & Shugart H. (2008). Mangrove forest structure and biomass mapping with spaceborne SAR data. *International Journal of Remote Sensing*. 29(7): 2235-2255.