



# Tích hợp dữ liệu Landsat và Sentinel để đánh giá rừng ngập mặn và trữ lượng khí sinh thái tại Cà Mau

Trần Thị Thúy<sup>1</sup>, Vũ Văn Chất<sup>2</sup>, Huỳnh Xuân Hiệp<sup>3,4\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Cửu Long, Vĩnh Long, Việt Nam

<sup>2</sup>Hội Trắc địa – Bản đồ - Viễn thám Việt Nam, Hà Nội, Việt Nam

<sup>3</sup>Đại học Cần Thơ, Cần Thơ, Việt Nam

<sup>4</sup>CTU-AIMED, Đại học Cần Thơ, Cần Thơ, Việt Nam

Email tác giả liên hệ: [hxhiep@ctu.edu.vn](mailto:hxhiep@ctu.edu.vn)

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17224281>

## Tóm tắt:

Vùng đất ngập nước là một trong những hệ sinh thái quan trọng nhất trên Trái Đất, đóng vai trò thiết yếu trong việc bảo tồn đa dạng sinh học, lọc nước, hấp thụ carbon và sản sinh oxy cho khí quyển. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu ngày càng nghiêm trọng, việc giám sát và đánh giá các khu vực này là vô cùng cần thiết. Viễn thám từ lâu đã được ứng dụng rộng rãi trong theo dõi tài nguyên và môi trường, đặc biệt là với sự hỗ trợ từ các nguồn dữ liệu miễn phí như Landsat và Sentinel. Nghiên cứu này tập trung sử dụng dữ liệu viễn thám đa phổ từ Landsat 8 và Sentinel-2 để xác định khu vực rừng ngập mặn ven biển tại Cà Mau, Việt Nam. Thông qua việc tính toán các chỉ số thực vật như NDVI, NDWI,... nhóm nghiên cứu đã ước lượng được sinh khối trên mặt đất, trữ lượng carbon, khả năng hấp thụ carbon và nồng độ oxy. Kết quả nghiên cứu đã lập được bản đồ phân bố rừng ngập mặn, bản đồ trữ lượng carbon và oxy tương ứng. Những kết quả này góp phần hỗ trợ việc giám sát, bảo tồn và quản lý hiệu quả hệ sinh thái đất ngập nước, đồng thời cung cấp dữ liệu đầu vào quan trọng cho các nghiên cứu khí hậu và môi trường tại Việt Nam.

**Từ khóa:** vùng đất ngập nước, Rừng ngập mặn, Viễn thám, Sinh khối, Carbon và oxy.

Ngày nhận bài: 15/9/2025 Ngày sửa lại: 25/9/2025 Ngày chấp nhận đăng: 25/9/2025 Ngày xuất bản: 04/10/2025

# Integrating Landsat and Sentinel Data to Map Mangroves and Estimate Biomass and Carbon Stocks in Ca Mau, Vietnam

Thuy Thi Tran<sup>1</sup>, Chat Van Vu<sup>2</sup>, Hiep Xuan Huynh<sup>3,4\*</sup>

<sup>1</sup>Mekong University, Vinh Long, Viet Nam

<sup>2</sup>Vietnam Association of Georaphy, Cartography and Remotesensing, Ha Noi, Viet Nam

<sup>3</sup>College of Information and Communication Technology, Can Tho University, Can Tho, Viet Nam

<sup>4</sup>Can Tho University Leading Research Team on Automation, Artificial Intelligence, inforMation tEchnology and Digital Transformation

Corresponding Author Email: [hxhiep@ctu.edu.vn](mailto:hxhiep@ctu.edu.vn)

## Abstract:

Wetlands are among the most important ecosystems on Earth, playing an essential role in biodiversity conservation, water purification, carbon sequestration, and oxygen production for the atmosphere. In the context of increasingly severe climate change, monitoring and assessing these areas has become critically important. Remote sensing has long been widely applied in the monitoring of natural resources and the environment, especially with the support of freely available data sources such as Landsat and Sentinel. This study focuses on the use of multispectral remote sensing data from Landsat 8 and Sentinel-2 to identify coastal mangrove forest areas in Ca Mau, Vietnam. By calculating vegetation indices such as NDVI, NDWI, etc., the research team estimated above-ground biomass, carbon storage, carbon sequestration capacity, and oxygen concentration. The results include the generation of spatial distribution maps of mangrove forests, as well as maps of carbon and oxygen reserves. These findings contribute to the effective monitoring, conservation, and management of wetland ecosystems, while also providing essential input data for climate and environmental studies in Vietnam.

**Keywords:** Wetlands, Mangrove forests, Remote sensing, Above-ground biomass, Carbon and oxygen reserves

Submission received: 15/9/2025

Revised: 25/9/2025

Accepted: 25/9/2025

Published: 04/10/2025

## 1. Giới thiệu

Đất ngập nước là một trong những hệ sinh thái giàu tài nguyên và có vai trò sinh thái quan trọng nhất trên Trái Đất. Chúng đóng vai trò như “lá phổi xanh”, điều hòa khí hậu, lọc nước, lưu giữ carbon và duy trì đa dạng sinh học cao [1,2]. Các vùng đất ngập

nước cung cấp nơi cư trú cho nhiều loài động, thực vật, đồng thời hỗ trợ sinh kế cho hàng triệu người thông qua hoạt động nông nghiệp, đánh bắt và du lịch sinh thái [3]. Đặc biệt, hệ sinh thái rừng ngập mặn còn có khả năng hấp thụ và lưu trữ lượng lớn carbon trong sinh khối và đất, đóng vai trò then chốt trong việc giảm thiểu biến đổi khí hậu [4,5].

Tại Việt Nam, mặc dù đã có những nỗ lực bảo tồn, khu vực rừng ngập mặn ven biển. Đặc biệt là tại tỉnh Cà Mau vẫn chưa được nghiên cứu chuyên sâu với sự hỗ trợ của công nghệ hiện đại. Vườn Quốc gia Mũi Cà Mau được công nhận là khu Ramsar thứ 2088 trên thế giới vào năm 2012 [6], sở hữu hệ sinh thái độc đáo với ba mặt giáp biển và chịu ảnh hưởng bởi hai chế độ thủy triều khác nhau. Đây là một điều kiện lý tưởng để nghiên cứu các quá trình sinh thái và lưu trữ carbon.

Hiện nay, công tác phân loại và theo dõi đất ngập nước chủ yếu dựa vào hai phương pháp chính là khảo sát thực địa và viễn thám. Tuy nhiên, phương pháp khảo sát thực địa gặp nhiều hạn chế về chi phí, thời gian, độ chính xác và phạm vi khảo sát, đặc biệt tại các khu vực hẻo lánh và thay đổi theo mùa [7,8]. Trong khi đó, nhu cầu hiện tại là giám sát ở quy mô rộng, liên tục và có tính hệ thống.

Viễn thám được xem là một công cụ hữu hiệu để giám sát và đánh giá các đặc trưng của đất ngập nước với độ phủ không gian lớn, chu kỳ cập nhật nhanh và chi phí tương đối thấp [9,10]. Dữ liệu từ vệ tinh Landsat 8 và Sentinel-2 cung cấp các dải phổ trong vùng khả kiến, cận hồng ngoại (NIR) và trung hồng ngoại (SWIR), cho phép phân biệt lớp phủ mặt đất, ước tính sinh khối, và đánh giá hoạt động quang hợp thông qua các chỉ số như NDVI, EVI, và NDWI [11,12]. Ngoài ra, nghiên cứu chu trình carbon, đặc biệt là dòng CO<sub>2</sub> giữa hệ sinh thái đất ngập nước và khí quyển – đóng vai trò thiết yếu trong đánh giá tác động của biến đổi khí hậu [13]. Viễn thám hiện nay còn cho phép ước tính mức độ hấp thụ CO<sub>2</sub> của thực vật thông qua phản xạ quang phổ, hỗ trợ định lượng khả năng lưu trữ carbon [14,15].

Mục tiêu của nghiên cứu này là tích hợp dữ liệu viễn thám từ hai nguồn vệ tinh Landsat 8 và Sentinel-2 để thực hiện ba nhiệm vụ chính: (1) phân loại các vùng đất ngập nước tại khu vực nghiên cứu; (2) ước tính sinh khối trên mặt đất của rừng ngập mặn; và (3) dự đoán khả năng lưu trữ carbon cũng như phát thải oxy của hệ sinh thái rừng ngập mặn tại tỉnh Cà Mau, Việt Nam.

Cấu trúc còn lại của bài viết được tổ chức như sau: Phần 2 trình bày khu vực nghiên cứu, phương pháp thu thập và xử lý dữ liệu. Phần 3 trình bày kết quả nghiên cứu. Phần 4 thảo luận các vấn đề liên quan đến kết quả đạt được. Cuối cùng, Phần 5 đưa ra kết luận và đề xuất một số kiến nghị phục vụ công tác bảo tồn và quản lý rừng ngập mặn.

## 2. Các nghiên cứu liên quan

Việc ước tính sinh khối trên mặt đất (*Aboveground Biomass – AGB*) của rừng trên quy mô toàn cầu là một trong những chỉ số thiết yếu để hỗ trợ quản lý rừng bền vững, giảm nhẹ biến đổi khí hậu và bảo tồn dịch vụ hệ sinh thái do rừng cung cấp [2,4]. Trong bối cảnh này, dữ liệu viễn thám từ các cảm biến quang học và radar cung cấp thông tin đa phổ, đa thời gian và với nhiều mức độ phân giải không gian khác nhau, rất phù hợp để mô hình hóa và ước lượng AGB trên diện rộng [15,16].

AGB đóng vai trò như một nguồn tích lũy carbon chính trong hệ sinh thái rừng và là yếu tố quan trọng để theo dõi chu trình carbon toàn cầu. Do đó, việc theo dõi và đo lường chính xác sự biến động của AGB có ý nghĩa lớn trong các chương trình giám sát carbon và lập kế hoạch ứng phó với biến đổi khí hậu [1,2]. Liên Hợp Quốc thông qua Công ước khung về biến đổi khí hậu đã xác định việc ước lượng AGB là bước quan trọng để đánh giá dòng năng lượng, nước và carbon giữa bề mặt đất và khí quyển [17].



Các phương pháp truyền thống ước lượng sinh khối chủ yếu dựa trên đo đạc thực địa và mô hình hóa sinh trưởng cây rừng tại các ô mẫu, sau đó ngoại suy để đánh giá các khu vực lớn hơn [18]. Tuy nhiên, phương pháp này tốn nhiều thời gian, chi phí và khó áp dụng ở những khu vực khó tiếp cận. Trong khi đó, các phương pháp dựa vào viễn thám ngày càng phổ biến do khả năng cung cấp dữ liệu liên tục, bao phủ diện rộng, chi phí thấp và khả năng cập nhật thường xuyên [16,19].

Dữ liệu quang học ghi nhận năng lượng phản xạ từ mặt đất trong các dải phổ khả kiến (VIS), cận hồng ngoại và hồng ngoại sóng ngắn, vốn phản ánh đặc điểm hình thái, sắc tố và cấu trúc tán lá thực vật. Ví dụ, dải xanh lục (Green) biểu thị cường độ hấp thụ năng lượng; dải đỏ (Red) liên quan đến quá trình hấp thụ diệp lục; và dải NIR phản ánh cấu trúc tán cây, có mối liên hệ chặt chẽ với AGB [12,20]. Tuy nhiên, một nhược điểm lớn của cảm biến quang học là phụ thuộc vào ánh sáng mặt trời và dễ bị ảnh hưởng bởi điều kiện thời tiết, đặc biệt là mây che phủ.

Khắc phục điểm yếu này, dữ liệu radar, đặc biệt là radar khẩu độ tổng hợp (SAR), có khả năng xuyên mây, hoạt động cả ngày lẫn đêm và không phụ thuộc vào điều kiện thời tiết. SAR đo tín hiệu phản xạ từ các vật thể trên mặt đất, bao gồm thảm thực vật, với độ nhạy cao đối với cấu trúc, độ ẩm và mật độ sinh khối [21]. Tín hiệu phản xạ phụ thuộc vào nhiều yếu tố như bước sóng (P, L, C, X), phân cực (HH, HV, VV, VH), địa hình và đặc điểm lớp phủ đất [22]. Trong đó, radar bước sóng dài (L, P) được chứng minh là hiệu quả hơn trong việc ước lượng sinh khối tại các khu vực rừng rậm có mật độ cao [23].

Ngoài ra, LiDAR (*Light Detection and Ranging*) – một công nghệ viễn thám chủ động sử dụng xung laser để đo chiều cao và cấu trúc thảm thực vật – được xem là công cụ chính xác nhất để đo AGB hiện nay [25]. Dữ liệu LiDAR có thể được thu thập từ mặt đất (TLS), từ không trung (ALS) hoặc từ vệ tinh (GEDI, ICESat-2), cho phép xây dựng mô hình độ cao rừng và cấu trúc ba chiều với độ chính xác cao, đặc biệt ở các khu vực rừng có tán che dày đặc [25].

Tuy nhiên, để nâng cao độ chính xác và độ tin cậy trong ước lượng sinh khối rừng, xu hướng hiện nay là tích hợp dữ liệu đa nguồn như quang học, SAR và LiDAR kết hợp với số liệu thực địa để hiệu chỉnh và xác thực mô hình [15,26]. Các nghiên cứu chỉ ra rằng, mô hình kết hợp có thể giảm đáng kể sai số và tăng khả năng khái quát hóa ở các khu vực khác nhau với điều kiện rừng phức tạp.

### 3. Mô hình lý thuyết

#### 3.1. Đặc điểm dữ liệu thu thập

##### 3.1.1. Dữ liệu Landsat 8

Landsat 8 là vệ tinh quan sát Trái Đất được phóng lên vào ngày 11 tháng 2 năm 2013 từ căn cứ không quân Vandenberg, California [27]. Vệ tinh này mang theo hai cảm biến chính là Operational Land Imager (OLI) và Thermal Infrared Sensor (TIRS). OLI đo tín hiệu quang phổ ở vùng khả kiến, gần hồng ngoại và hồng ngoại sóng ngắn (VNIR, NIR, SWIR), trong khi TIRS đo nhiệt độ bề mặt đất trong hai dải nhiệt sử dụng công nghệ tiên tiến dựa trên vật lý lượng tử để phát hiện nhiệt.

Ảnh Landsat 8 có độ phân giải không gian đa phổ là 30 mét và độ phân giải panchromatic là 15 mét, với dải thu ảnh rộng 185 km. Vệ tinh này quỹ đạo đồng bộ theo mặt trời (sun-synchronous) với độ nghiêng  $98,2^\circ$ , bay ở độ cao khoảng 705 km và hoàn thành một vòng quay quanh Trái Đất trong 99 phút. Chu kỳ quay lặp lại của Landsat 8 là 16 ngày, với thời gian qua xích đạo khoảng 10 giờ sáng ( $\pm 15$  phút). Hệ thống quỹ đạo WRS-2 cho phép thu nhận khoảng 740 cảnh ảnh mỗi ngày, với độ chồng lấp băng phổ

thay đổi từ 7% tại xích đạo đến 85% ở vùng cực. Landsat 8 gồm 9 dải phổ OLI (trong đó có một dải panchromatic) và 2 dải phổ nhiệt TIRS (Bảng 1).

*Bảng 1. Các dải phổ của ảnh Landsat*

Băng sóng	Mô tả	Bước sóng (µm)	Độ phân giải (m)
1	Coastal Aerosol	0.43 – 0.45	30
2	Blue	0.45 – 0.51	30
3	Green	0.53 – 0.59	30
4	Red	0.64 – 0.67	30
5	Near-Infrared	0.85 – 0.88	30
6	SWIR 1	1.57 – 1.65	30
7	SWIR 2	2.11 – 2.29	30
8	Panchromatic	0.50 – 0.68	15
9	Cirrus	1.36 – 1.38	30
10	Thermal IR 1	10.6 – 11.19	100
11	Thermal IR 2	11.5 – 12.51	100

### 3.1.2. Dữ liệu Sentinel-2

Hệ thống Sentinel-2 thuộc chương trình Copernicus gồm hai vệ tinh Sentinel-2A và Sentinel-2B, được phóng lên bằng tên lửa VEGA của châu Âu [28]. Mỗi vệ tinh nặng khoảng 1.2 tấn và hoạt động trên quỹ đạo đồng bộ mặt trời, cách nhau 180° để đảm bảo tần suất chụp ảnh cao. Độ cao quỹ đạo trung bình là 786 km với dải thu ảnh rộng 290 km. Chu kỳ quay lặp lại là 10 ngày với một vệ tinh và 5 ngày với hai vệ tinh, giúp theo dõi thay đổi bề mặt đất với ảnh đa phổ có độ phân giải cao.

Sentinel-2 sử dụng thiết bị cảm biến quang học MultiSpectral Instrument (MSI), thu thập ánh sáng phản xạ từ Trái Đất theo chế độ thụ động. MSI có 13 dải phổ với các độ phân giải không gian khác nhau gồm 4 dải 10 m, 6 dải 20 m và 3 dải 60 m (Bảng 2).

*Bảng 2. Các dải phổ của Sentinel-2*

Băng sóng Sentinel-2	Bước sóng trung tâm (nm)	Băng sóng (nm)	Độ phân giải (m)
1 – Coastal aerosol	442,7	21	60
2 – Blue	492,4	66	10
3 – Green	559,8	36	10
4 – Red	664,6	31	10
5 – Red edge	704,1	15	20
6 – Red edge	740,5	15	20
7 – Red edge	782,8	20	20
8 – NIR	832,8	106	10
9 – Water vapour	945,1	20	60
10 – SWIR Cirrus	1373,5	31	60
11 – SWIR	1613,7	91	20
12 – SWIR	2202,4	175	20

## 3.2. Các công thức tính chỉ số thực vật, trữ lượng CO<sub>2</sub> và oxy

### 3.2.1. Các chỉ số thực vật từ ảnh viễn thám

Viễn thám là một trong những công cụ hiệu quả và tiên tiến nhất hiện nay trong việc thu thập thông tin không gian và thời gian về các vùng đất ngập nước, đặc biệt trong giám sát thảm thực vật và sinh khối rừng [29,30]. Các chỉ số thực vật được trích xuất từ dữ liệu vệ tinh quang học giúp phân tích đặc điểm sinh lý và cấu trúc của thảm thực vật, từ đó hỗ trợ phân loại lớp phủ, giám sát rừng ngập mặn và ước tính sinh khối.

Chỉ số thực vật NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) phản ánh độ xanh và mật độ thực vật, với giá trị cao tương ứng với thảm thực vật phát triển tốt [31].

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Chỉ số nước NDWI (Normalized Difference Water Index) được sử dụng để xác định vùng có độ ẩm cao hoặc các khu vực có nước, rất hữu ích trong giám sát vùng đất ngập nước [32].

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad (2)$$

Chỉ số rừng ngập mặn CMRI (Coastal Mangrove Recognition Index) là một chỉ số tổng hợp, được phát triển nhằm tăng cường khả năng phân biệt rừng ngập mặn với các lớp phủ khác tại vùng ven biển [33].

$$CMRI = NDVI - NDWI \quad (3)$$

### 3.2.2. Ước lượng sinh khối và carbon

Để ước tính sinh khối trên mặt đất, hàm hồi quy tuyến tính sử dụng NDVI được áp dụng như sau:

$$GB = -179.1 + 13243.6 \times NDVI \quad (4)$$

Trong đó, AGB được tính bằng đơn vị kg/ha. Mô hình này được phát triển dựa trên dữ liệu thực nghiệm tại các khu vực rừng ngập mặn ở Đông Nam Á [34].

Từ AGB, trữ lượng carbon trên mặt đất (AGC – Aboveground Carbon Stock) được tính theo hệ số chuyển đổi. Hệ số 0.475 là tỷ lệ carbon trung bình trong sinh khối khô của cây [2].

$$AGC = AGB \times 0.475 \quad (5)$$

Lượng CO<sub>2</sub> được cây hấp thụ (ACS – Absorbed Carbon Stock) được tính thông qua tỉ lệ chuyển đổi carbon thành CO<sub>2</sub>. Trong đó, hệ số 3.67 phản ánh tỉ lệ khối lượng giữa phân tử CO<sub>2</sub> và nguyên tử C (44/12), như đề xuất trong các hướng dẫn kiểm kê khí nhà kính [2].

$$ASC = AGC \times 3.67 \quad (6)$$

### 3.2.3. Ước tính lượng oxy sinh ra

Quá trình quang hợp không chỉ hấp thụ CO<sub>2</sub> mà còn giải phóng O<sub>2</sub>. Mỗi đơn vị carbon tích lũy ròng (net carbon sequestration) trong cây dẫn đến một lượng oxy tương ứng được sinh ra. Lượng oxy sinh ra hàng năm được tính theo công thức:

$$O_2 = C \times 2.67 \quad (7)$$

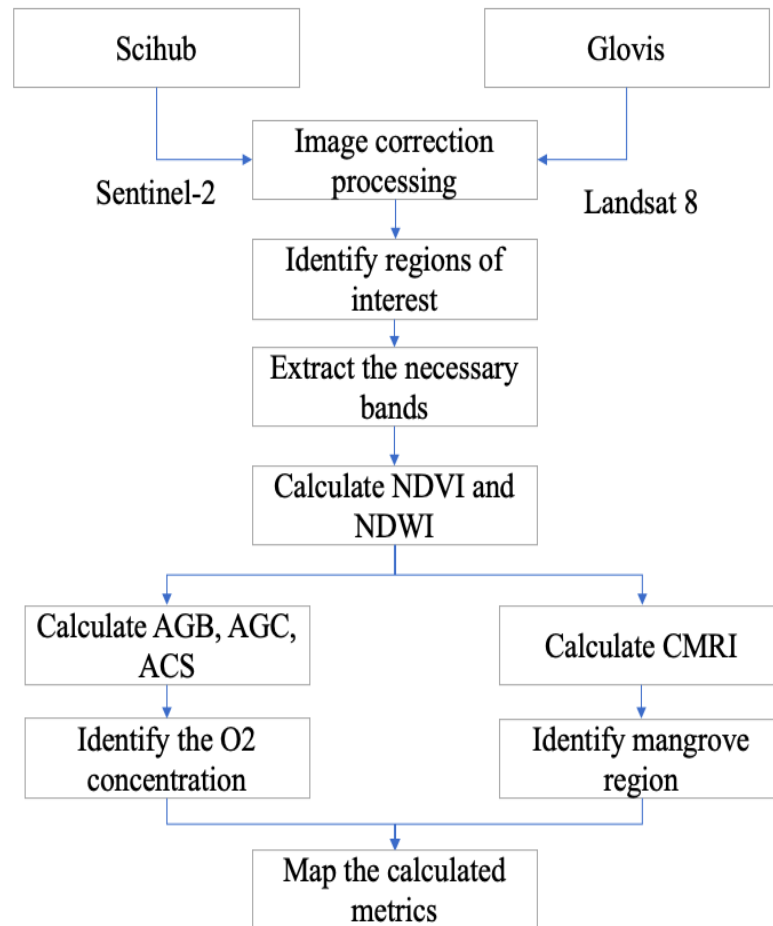
C là lượng carbon tích lũy, và 2.67 là hệ số khối lượng phân tử giữa oxy (O<sub>2</sub>) và carbon, với giả định rằng toàn bộ CO<sub>2</sub> cố định qua quang hợp sẽ sinh ra O<sub>2</sub> theo tỉ lệ 32/12 [35].

## 4. Mô hình chức năng

### 4.1. Sơ đồ tổng quan

Mô hình thí nghiệm được xây dựng dựa trên quy trình chính thể hiện trong Hình 1, bao gồm sáu bước cơ bản. Đầu tiên, dữ liệu vệ tinh được thu thập từ các nguồn Sentinel-2 và Landsat 8. Tiếp theo, vùng nghiên cứu (Region of Interest - ROI) được xác định nhằm giới hạn phạm vi phân tích. Bước thứ ba liên quan đến việc tính toán các chỉ số cần thiết để xác định các vùng bị ngập lụt. Sau đó, các chỉ số phục vụ cho việc ước lượng sinh khối rừng trên mặt đất, trữ lượng carbon và khả năng hấp thụ carbon được tính toán. Tiếp

theo, trữ lượng oxy (O<sub>2</sub>) dựa trên các chỉ số sinh khối và carbon cũng được xác định. Cuối cùng, các bản đồ mô tả vùng đất ngập nước, trữ lượng CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> cùng với biểu đồ phân bố được tạo ra để trực quan hóa kết quả nghiên cứu.



Hình 1. Các bước cơ bản của mô hình thí nghiệm.

## 4.2. Các chức năng chính và giải thuật

### 4.1.2. Các chức năng chính

Trong bước đầu tiên của quy trình, dữ liệu viễn thám được thu thập từ hai nguồn chính là ảnh vệ tinh Sentinel-2 và Landsat 8. Ảnh Sentinel-2 bao gồm 13 băng phổ với độ phân giải không gian dao động từ 10m đến 60m, trong đó dữ liệu cấp độ Level-2A đã được hiệu chỉnh khí quyển sẵn, bao gồm các hiệu chỉnh liên quan đến tán xạ khí quyển, hấp thụ hơi nước, oxy và aerosol. Song song đó, ảnh Landsat 8 được sử dụng là dữ liệu đa phổ cấp độ 2, có độ phân giải 30m và đã được hiệu chỉnh phản xạ bề mặt, thích hợp cho các phân tích theo chuỗi thời gian dài hạn. Cả hai nguồn dữ liệu đều được chuyển đổi sang hệ tọa độ MGRS (Military Grid Reference System). Đây là một hệ thống tọa độ dựa trên UTM giúp chuẩn hóa không gian và chia bề mặt Trái Đất thành các ô lưới chuẩn.

Trong các nghiên cứu viễn thám, việc xác định vùng nghiên cứu (ROI) là bước quan trọng nhằm khoanh vùng khu vực cần phân tích và loại bỏ các vùng không liên quan, qua đó giảm thiểu nhiễu, tiết kiệm tài nguyên tính toán và tăng độ chính xác của kết quả. ROI có thể được xác định bằng nhiều hình dạng hình học khác nhau như hình chữ nhật, hình tròn, đa giác hoặc thậm chí là từng điểm ảnh đơn lẻ, tùy thuộc vào mục đích nghiên cứu và tính chất dữ liệu.



Dữ liệu đầu vào là ảnh vệ tinh đã được hiệu chỉnh và chuẩn hóa. Người dùng hoặc hệ thống có thể tương tác để xác định vùng quan tâm trên ảnh bằng công cụ cắt hoặc mặt nạ (mask) nhằm chỉ giữ lại khu vực cần thiết cho phân tích tiếp theo.

Xác định vùng đất ngập nước và rừng ngập mặn là một bước quan trọng trong quy trình phân tích ảnh viễn thám nhằm phục vụ giám sát và quản lý hệ sinh thái ven biển. Trong nghiên cứu này, các chỉ số thực vật phổ biến như NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDWI (Normalized Difference Water Index) và CMRI (Coastal Mangrove Recognition Index) được sử dụng để phân loại chính xác vùng rừng ngập mặn, rừng thường và vùng nước. Ảnh vệ tinh Sentinel-2 cung cấp dữ liệu ở độ phân giải cao với các băng phổ 8 (NIR), 4 (RED) và 3 (GREEN); trong khi đó, ảnh Landsat 8 sử dụng các băng tương ứng là 5 (NIR), 4 (RED) và 3 (GREEN). Các chỉ số được tính toán như sau:  $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$ ,  $NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR)$ , và  $CMRI = NDVI - NDWI$ . Dựa trên giá trị CMRI, các khu vực được phân loại theo ngưỡng:  $CMRI > 0.47$  là rừng ngập mặn; từ  $-0.25$  đến  $0.47$  là rừng thường (không có cây mắm); và  $\leq -0.25$  là vùng nước. Kết quả cho phép xây dựng bản đồ phân loại vùng đất ngập nước một cách trực quan, từ đó phục vụ các phân tích sinh khối và đánh giá vai trò của rừng ngập mặn trong hấp thụ carbon và phát thải oxy. Phương pháp này giúp nâng cao độ chính xác trong giám sát rừng ngập mặn bằng công nghệ viễn thám.

Xác định chỉ số sinh khối và trữ lượng carbon là một bước quan trọng nhằm lượng hóa tiềm năng hấp thụ carbon và đóng góp của rừng ngập mặn vào cân bằng sinh thái. Trong nghiên cứu này, chỉ số NDVI được sử dụng để ước tính sinh khối trên mặt đất của từng pixel trong vùng rừng ngập mặn, từ đó tính tiếp trữ lượng carbon trên mặt đất (AGC) và lượng CO<sub>2</sub> hấp thụ (ACS). Các hệ số chuyển đổi sinh khối thành carbon và CO<sub>2</sub> được tham khảo từ các nghiên cứu trước, nhằm đảm bảo tính khoa học và nhất quán trong phương pháp tính toán. Kết quả phân tích được trình bày dưới dạng bản đồ không gian, thể hiện sự phân bố AGB, AGC và ACS theo từng khu vực. Đây là cơ sở dữ liệu quan trọng giúp đánh giá vai trò của rừng ngập mặn trong việc hấp thụ khí nhà kính, đồng thời hỗ trợ lập kế hoạch quản lý và bảo tồn hiệu quả.

Xác định trữ lượng oxy (O<sub>2</sub>) là bước tiếp theo trong chuỗi phân tích nhằm đánh giá vai trò sinh thái của rừng ngập mặn trong việc cung cấp khí oxy, là một sản phẩm của quá trình quang hợp. Dựa trên giá trị trữ lượng carbon tích lũy (AGC) đã tính từ bước trước, lượng oxy được ước tính bằng cách nhân AGC với hệ số chuyển đổi phù hợp, phản ánh tỉ lệ giữa khối lượng nguyên tử oxy và carbon. Việc này cho phép xác định lượng oxy ròng được tạo ra do tích lũy carbon trong cây, sau khi trừ đi lượng oxy tiêu thụ do hô hấp. Kết quả được biểu diễn dưới dạng bản đồ trữ lượng oxy (O<sub>2</sub>), qua đó giúp trực quan hóa sự phân bố không gian của oxy trong hệ sinh thái rừng ngập mặn tại khu vực nghiên cứu. Đây là một chỉ số có ý nghĩa quan trọng trong việc đánh giá đóng góp của rừng ngập mặn đối với chất lượng không khí và cân bằng khí hậu.

Sau khi tính toán các chỉ số sinh thái quan trọng như CMRI (Chỉ số phản xạ tổ hợp), AGB (sinh khối trên mặt đất), CO<sub>2</sub> hấp thụ và O<sub>2</sub> sinh ra, bước tiếp theo là trực quan hóa kết quả nhằm hỗ trợ phân tích và ra quyết định. Cụ thể, các chỉ số này được chuyển đổi thành bản đồ màu thể hiện không gian phân bố theo vùng nghiên cứu thông qua phần mềm GIS. Đồng thời, biểu đồ phân phối (histogram) của từng chỉ số cũng được xây dựng nhằm minh họa sự biến động về mặt số lượng và tần suất. Việc hiển thị dữ liệu dưới dạng bản đồ và biểu đồ không chỉ giúp xác định các khu vực có giá trị sinh thái cao mà còn hỗ trợ theo dõi xu hướng biến đổi theo thời gian hoặc không gian. Kết quả đầu ra bao gồm các bản đồ chuyên đề và biểu đồ mô tả phân bố các chỉ số, là cơ sở để phân tích chi tiết hơn về tình trạng và tiềm năng sinh thái của rừng ngập mặn.

#### 4.2.2. Thuật toán

### Thuật toán: Estimate AGB Carbon Oxygen

Đầu vào (Input):

- Ảnh vệ tinh (Landsat 8, Sentinel-2)

Vùng nghiên cứu (ROI)

Đầu ra (Output):

- Bản đồ vùng rừng ngập mặn

- Bản đồ và dữ liệu: AGB, AGC, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>

- Biểu đồ và thống kê theo khu vực

Các bước:

1. Tải ảnh vệ tinh (Landsat 8 hoặc Sentinel-2) cho vùng ROI

2. Hiệu chỉnh ảnh:

- Thực hiện hiệu chỉnh khí quyển

- Chuẩn hóa các dải phổ cần thiết (NIR, RED, GREEN)

3. Cắt ảnh theo vùng nghiên cứu (ROI)

4. Tính toán các chỉ số thực vật: NDVI, NDWI, CMRI

5. Phân loại vùng rừng ngập mặn:

- Áp dụng ngưỡng phù hợp lên NDVI, NDWI, CMRI

- Tạo mặt nạ (mask) rừng ngập mặn

6. Tính sinh khối (AGB)

7. Tính trữ lượng carbon (AGC)

8. Tính lượng CO<sub>2</sub> hấp thụ (ASC)

9. Tính lượng oxy sinh ra (O<sub>2</sub>)

10. Trực quan hóa kết quả:

- Tạo bản đồ phân bố AGB, AGC, ASC, O<sub>2</sub>

- Tạo biểu đồ thống kê theo vùng

## 5. Thử nghiệm

### 5.1. Dữ liệu sử dụng (Data used)

Khu vực nghiên cứu nằm tại tỉnh Cà Mau, tọa độ địa lý trải dài từ vĩ độ 8°34' đến 9°33' Bắc và kinh độ 104°43' đến 105°25' Đông. Cà Mau có đặc điểm địa lý độc đáo với ba mặt giáp biển, sở hữu đường bờ biển dài 107 km phía Đông và 147 km phía Tây. Hệ thống sông ngòi, kênh rạch dày đặc cùng vùng rừng ngập mặn rộng lớn đã tạo nên một hệ sinh thái ven biển phong phú và có giá trị sinh thái cao. Rừng ngập mặn Cà Mau được ghi nhận là khu rừng ngập mặn lớn thứ hai trên thế giới, chỉ sau rừng Amazon ở Nam Mỹ. Hệ thực vật tại đây rất đa dạng, với nhiều loài đặc trưng như *Avicennia germinans*, mắm, chà là,... trong đó loài mắm chiếm ưu thế về diện tích và phân bố rộng khắp.

Dữ liệu viễn thám được sử dụng trong nghiên cứu là ảnh vệ tinh Sentinel-2, thu thập trong năm 2023. Cụ thể, ảnh được cung cấp bởi vệ tinh Sentinel-2A với cảm biến MSI ở cấp độ xử lý 2A (L2A), thuộc baseline xử lý N0509 và ô lưới T48PYV. Các thông số chi tiết của dữ liệu được trình bày tại Bảng 3.

Bảng 3. Dữ liệu Sentinel-2 được sử dụng cho mô hình thực nghiệm.

ID	Image codes	Date	Spatial resolution (m)	Remarks
1	S2A_MSIL2A_20230311T031521	11/03/2023	10, 20, 60	T48PVQ
2	S2A_MSIL2A_20230828T031521	28/08/2023	10, 20, 60	T48PVQ

Dữ liệu được thu thập trong năm 2023, sử dụng cảm biến OLI (Operational Land Imager) và TIRS (Thermal Infrared Sensor). Dữ liệu đã được tiền xử lý để hiệu chỉnh độ phản xạ và nhiệt độ bề mặt (Surface Reflectance và Surface Temperature), thuộc loại Tier 1 – nhóm dữ liệu có chất lượng cao nhất, đã được hiệu chỉnh địa hình và đảm bảo độ chính xác cao về mặt hình học. Chi tiết dữ liệu được trình bày tại Bảng 4.

Bảng 4. Dữ liệu Landsat 8 được sử dụng cho mô hình thực nghiệm.

ID	Image codes	Correction level	Date of collection	Collection number	Tier
1	LC08_L2TP_126054_20230206_20230209_02_T1	L2P	06/02/2023	2	T1
2	LC08_L1TP_126054_20230326_20230404_02_T1		26/03/2023		

### 5.2. Công cụ sử dụng (Tool used)

Hệ thống vệ tinh Sentinel-2 và Landsat 8 là hai nguồn dữ liệu viễn thám phổ biến, cung cấp ảnh đa phổ có độ phân giải cao, đã được hiệu chỉnh khí quyển để đảm bảo tính chính xác cho các phân tích sinh thái và môi trường [36,37]. Dữ liệu từ các vệ tinh này đặc biệt phù hợp cho việc nghiên cứu rừng ngập mặn nhờ khả năng quan sát liên tục trên diện rộng và ở nhiều dải phổ khác nhau, bao gồm cả dải hồng ngoại gần rất quan trọng để đánh giá tình trạng thảm thực vật.

Trong quá trình xử lý và phân tích dữ liệu, các phần mềm chuyên dụng về hệ thống thông tin địa lý (GIS) như QGIS hoặc ArcGIS được sử dụng để cắt lớp vùng nghiên cứu (Region of Interest – ROI), cũng như để tính toán các chỉ số thực vật phổ biến như NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDWI (Normalized Difference Water Index), và CMRI (Coastal Mangrove Recognition Index). Các chỉ số này sau đó được tích hợp vào các mô hình ước tính sinh khối trên mặt đất (AGB – Above Ground Biomass), trữ lượng carbon (AGC – Above Ground Carbon), và lượng oxy được tạo ra (O<sub>2</sub>), nhằm đánh giá vai trò sinh thái và hấp thụ CO<sub>2</sub> của rừng ngập mặn.

Các công thức tính toán được sử dụng trong nghiên cứu đều dựa trên các công trình khoa học đã được công bố trước đó, điển hình như các nghiên cứu [31] về NDVI, [32] về NDWI, và các mô hình ước lượng sinh khối rừng [19] và các tác giả khác phát triển. Những công thức này giúp chuẩn hóa phương pháp luận và đảm bảo tính so sánh với các nghiên cứu trong và ngoài nước.

### 5.3. Đánh giá (Evaluating)

Trong nghiên cứu này, chỉ số CMRI được sử dụng để phân loại vùng rừng ngập mặn dựa trên ảnh Sentinel-2A với độ phân giải 10m x 10m. Cụ thể, các ngưỡng phân loại được xác định như sau: CMRI > 0.47 đại diện cho vùng rừng ngập mặn, -0.25 < CMRI ≤ 0.47 là khu vực rừng không có loài mắm, và CMRI ≤ -0.25 tương ứng với vùng nước. Kết quả đánh giá độ chính xác tổng thể của bản đồ CMRI năm 2023 cho thấy chỉ số CMRI là công cụ phù hợp và hiệu quả trong việc giám sát sự thay đổi và phân bố rừng ngập mặn tại khu vực Cà Mau.

### 5.4. Chia dữ liệu (Data splitting)

Vùng nghiên cứu (ROI) được xác định dưới dạng hình chữ nhật, dựa trên tọa độ x, y trên ảnh vệ tinh. Trước khi cắt vùng ROI, ảnh có phạm vi tọa độ từ xmin = 399,960 đến

$x_{max} = 509,760$  và  $y_{min} = 890,220$  đến  $y_{max} = 1,000,020$ . Sau khi thực hiện cắt vùng ROI, phạm vi tọa độ được điều chỉnh lại thành  $x_{min} = 465,000$ ,  $x_{max} = 509,760$  và  $y_{min} = 945,000$ ,  $y_{max} = 1,000,020$ , giúp tập trung phân tích vào khu vực nghiên cứu cụ thể hơn.



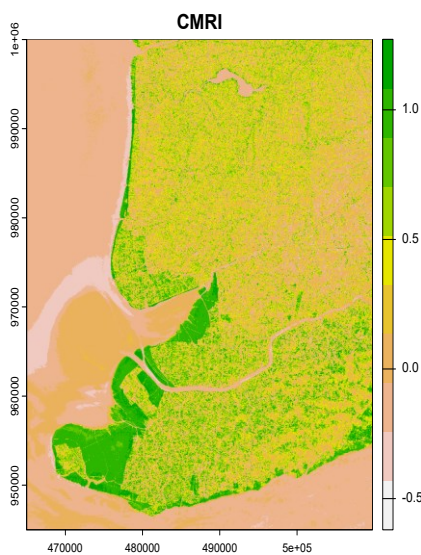
Hình 2. Ảnh trước khi xác định vùng nghiên cứu (ROI)



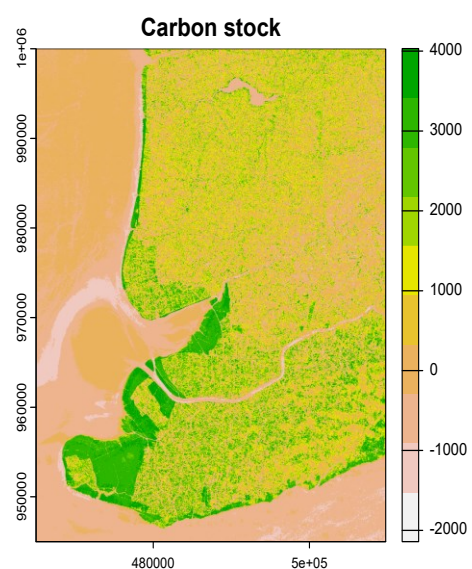
Hình 3. Ảnh sau khi xác định vùng nghiên cứu (ROI)

### 5.5. Kịch bản 1: Ứng dụng thực tiễn trong giám sát rừng ngập mặn

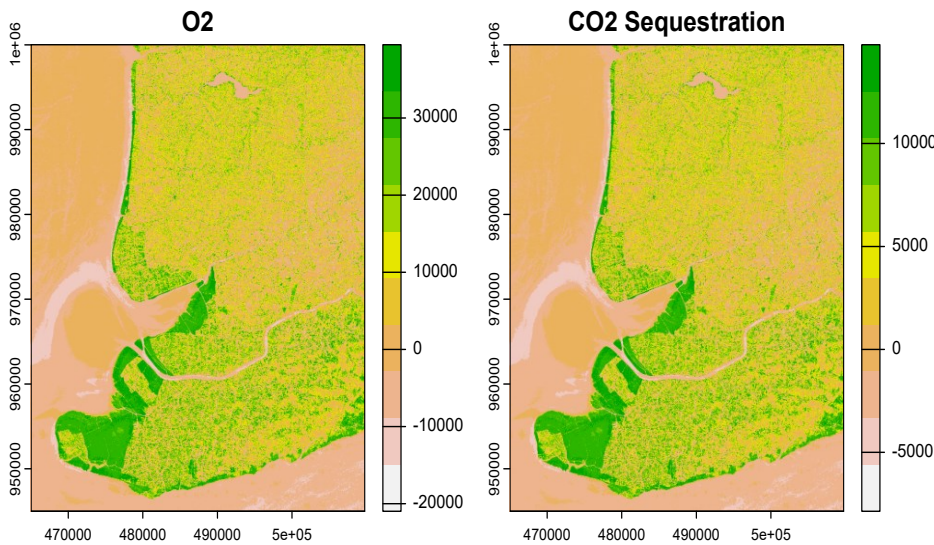
Mục tiêu giám sát hiện trạng rừng ngập mặn dọc theo bờ biển Cà Mau nhằm xác định chính xác vị trí và diện tích của các khu rừng này. Kết quả giám sát sẽ hỗ trợ các cơ quan quản lý trong việc lập kế hoạch bảo tồn và phát triển rừng ngập mặn, góp phần bảo vệ đa dạng sinh học cũng như tăng cường khả năng ứng phó với biến đổi khí hậu.



Hình 4. Bản đồ phân vùng rừng ngập mặn (CMRI)



Hình 5. Bản đồ trữ lượng carbon



Hình 6. Bản đồ lưu trữ CO<sub>2</sub> và O<sub>2</sub>

### 5.6. Kịch bản 2: Ứng dụng tính toán dự trữ carbon và oxy

Việc ước lượng sinh khối rừng, trữ lượng carbon, khả năng hấp thụ carbon và trữ lượng oxy được thực hiện dựa trên các chỉ số thu thập từ ảnh vệ tinh. Kết quả này giúp đánh giá chính xác vai trò của rừng ngập mặn trong quá trình hấp thụ khí CO<sub>2</sub> và sản xuất O<sub>2</sub>, từ đó đóng góp quan trọng vào các kế hoạch giảm phát thải khí nhà kính và tăng cường khả năng thích ứng với biến đổi khí hậu.

### 5.7. Kịch bản 3: Dự báo và phân tích phân bố không gian

Các chỉ số đo được từ ảnh vệ tinh được sử dụng để phân tích quy luật phân bố oxy và carbon dioxide trong rừng ngập mặn, phục vụ cho nghiên cứu không gian điểm (*spatial point pattern*). Trên cơ sở đó, nghiên cứu hướng tới việc dự báo sự thay đổi của rừng ngập mặn theo chuỗi thời gian khi có thêm dữ liệu liên tục, giúp nâng cao hiệu quả quản lý và bảo tồn hệ sinh thái này.

### 5.8. Thảo luận

Công nghệ viễn thám đã chứng minh là công cụ hiệu quả trong việc quan sát bao phủ đất ven biển và rừng ngập mặn, cho phép phân biệt rõ ràng giữa vùng rừng ngập mặn, rừng thường và vùng nước. Mặc dù các kết quả tính toán trữ lượng sinh khối, carbon và oxy chưa được áp dụng trên chuỗi thời gian dài để đánh giá sự biến động, nhưng chúng đã cung cấp một cái nhìn tương đối chính xác về phân bố không gian và tiềm năng hấp thụ khí nhà kính của rừng ngập mặn tại Cà Mau. Tuy nhiên, do thiếu dữ liệu liên tục và các khảo nghiệm thực địa để kiểm chứng, kết quả hiện tại chủ yếu mang tính trực quan và chỉ mang tính tham khảo dựa trên các bản đồ địa phương hiện có. Việc sử dụng dữ liệu vệ tinh miễn phí như Landsat 8 và Sentinel-2 giúp tiết kiệm chi phí nghiên cứu, nhưng vẫn còn tồn tại những hạn chế về tính liên tục và độ chính xác cao hơn. Nghiên cứu trong tương lai sẽ dựa trên các kết quả hiện có để phân tích mô hình phân bố không gian và phát triển các dự báo chính xác hơn về sự thay đổi của rừng ngập mặn, từ đó góp phần hỗ trợ công tác quản lý và bảo tồn bền vững.

## 6. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng thành công bản đồ phân bố rừng ngập mặn dọc bờ biển Cà Mau với độ chính xác cao, dựa trên chỉ số CMRI từ ảnh vệ tinh Sentinel-2A. Kết quả ước tính cho thấy phạm vi sinh khối rừng dao động từ -4000 đến 8000, trữ lượng carbon từ -2000 đến 4000, khả năng hấp thụ carbon từ -5000 đến 10000, và trữ lượng oxy từ -20000

đến 30000. Vùng rừng ngập mặn chủ yếu được xác định tập trung ven biển, đặc biệt là phía Tây mũi Cà Mau, phản ánh đúng thực trạng sinh thái của khu vực. Ngoài ra, bản đồ và biểu đồ phân bố các chỉ số sinh thái này đã giúp trực quan hóa rõ nét các đặc tính sinh thái quan trọng của rừng ngập mặn, hỗ trợ hiệu quả cho việc quản lý và bảo tồn.

Các hướng nghiên cứu tiếp theo bao gồm: áp dụng phân tích chuỗi thời gian nhằm đánh giá biến đổi rừng ngập mặn qua các năm, tiến hành khảo nghiệm thực địa để kiểm chứng kết quả viễn thám và nâng cao độ chính xác của mô hình; nghiên cứu mô hình phân bố không gian chi tiết hơn của khí CO<sub>2</sub> và O<sub>2</sub> trong hệ sinh thái rừng ngập mặn; phát triển các công cụ tự động hóa giúp giám sát nhanh chóng và hiệu quả hơn diện tích cũng như chất lượng sinh thái của rừng ngập mặn; đồng thời mở rộng phạm vi nghiên cứu sang các vùng ven biển khác để xây dựng bản đồ phân bố toàn diện cho khu vực Đồng bằng sông Cửu Long.

### Lời cảm ơn:

Chúng tôi xin chân thành cảm ơn nhóm nghiên cứu CTU-AIMED thuộc Trường Đại học Cần Thơ đã hỗ trợ nhiệt tình trong quá trình thực hiện nghiên cứu, đã tư vấn chuyên môn và hỗ trợ kỹ thuật liên quan đến xử lý ảnh viễn thám và mô hình hóa không gian.

### Cam kết của các tác giả

Tất cả các tác giả có tên trong bài báo cam kết sự đồng thuận và không có xung đột lợi ích trong công bố khoa học tại bài báo này.

### Tài liệu tham khảo

- [1] Grace, J. Carbon Cycle. In S. A. Levin (Ed.), *Encyclopedia of Biodiversity* (2nd ed., Vol. 1, pp. 674–684). Academic Press, 2013.
- [2] IPCC. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japan, 2006.
- [3] Shokoufeh Salimi; Suhad A. N. Almuktar; Miklas Scholz. Impact of climate change on wetland ecosystems: A critical review of experimental wetlands. *Journal of Environmental Management* 286, 112160-112175, 2021.
- [4] Pan, Y., et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993, 2011.
- [5] Bindu, G., et al. Carbon stocks assessment of mangroves using remote sensing and GIS. *Egypt Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 23, 1–9, 2020.
- [6] Vườn quốc gia Cà Mau, <https://vuonqgmcm.camau.gov.vn> (ngày truy cập cuối: 28/09/2025)
- [7] Alisa, L.G. (2015). The Challenges of Remote Monitoring of Wetlands. *Remote Sensing*, 7(8), 10938-10950, 2015.
- [8] Meng, G., et al. A Review of Wetland Remote Sensing. *Sensors*, 17(4), 777, 2017.
- [9] Kaplan, G., & Avdan, U. Monthly Analysis of Wetlands Dynamics Using Remote Sensing Data. *Int. Journal Geo-Information*, 7(10), 411, 2018.
- [10] Ansa, S., et al. Leveraging machine learning and remote sensing to monitor long-term spatial-temporal wetland changes. *Applied Geography*, 151, 102868, 2023.
- [11] Bo-cai, G. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257–266, 1996.
- [12] Huete, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309, 1988.
- [13] Reichle, D.E. Dynamic properties of the global carbon cycle. In *The Global Carbon Cycle and Climate Change* (2nd ed.), Elsevier, 2023
- [14] Michael, S., & Malcolm, W.J.D. Aboveground Forest Biomass Estimation Combining L- and P-Band SAR. *Remote Sensing*, 10(7), 1151, 2018.
- [15] Ghosh, S.M., & Behera, M.D. Aboveground biomass estimation using multi-sensor data synergy and machine learning algorithms. *Applied Geography*, 98, 29–40, 2018.
- [16] Avitabile, V., Herold, M., Heuvelink, G. B. M., et al. An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets. *Global Change Biology*, 22(4), 1406–1420, 2016.



- [17] IPCC. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2019.
- [18] Brown, S. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution*, 116(3), 363–372, 2002.
- [19] Lu, D. The Potential and Challenges of Remote Sensing-Based Biomass Estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 27(7), 1297–1328, 2006.
- [20] Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 289–298, 2003.
- [21] Le Toan, T., Quegan, S., Davidson, M. W. J., et al. The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote Sensing of Environment*, 115(11), 2850–2860, 2011.
- [22] Imhoff, M. L. Radar backscatter and biomass saturation: Ramifications for global biomass inventory. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2), 511–518, 1995.
- [23] Lucas, R., et al. The development of a forest biomass retrieval algorithm using L-band SAR and model inversion. *Remote Sensing of Environment*, 114(6), 1387–1402, 2010.
- [24] Asner, G. P., Kellner, J. R., Kennedy-Bowdoin, T., et al. High-resolution mapping of forest carbon stocks in the Colombian Amazon. *Biogeosciences*, 9(7), 2683–2696, 2012.
- [25] Dubayah, R. O., et al. The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of Remote Sensing*, 1, 100002, 2020.
- [26] Saatchi, S. S., et al. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(24), 9899–9904, 2011.
- [27] Landsat 8. <https://www.usgs.gov/> (ngày truy cập cuối 28/09/2025)
- [28] Sentinel - 2 Level-2A. <https://sentinel2.copernicus.eu/> (ngày truy cập 28/09/2025)
- [29] Giri, C., Zhu, Z., & Tieszen, L. L. Mangrove forest distributions and dynamics (1975–2005) of the tsunami-affected region of Asia. *Journal of Biogeography*, 34(3), 519–528, 2007
- [30] Thenkabail, P. S., Lyon, J. G., & Huete, A. (Eds.). *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*. CRC Press, 2011.
- [31] Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150, 1979.
- [32] Gao, B. C. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266, 1996.
- [33] Nguyen, H. T., Le, Q. T., & Vo, Q. T. A novel coastal mangrove recognition index (CMRI) using Sentinel-2 imagery: Case study in Vietnam. *Remote Sensing Letters*, 11(4), 345–354, 2020.
- [34] Rahman, M. M., Ahmed, M., Ismail, H., et al. Estimating above-ground biomass in mangrove ecosystems: A comparison of multiple regression and machine learning algorithms. *International Journal of Remote Sensing*, 34(22), 7885–7906, 2013.
- [35] Makundi, W. R., & Sathaye, J. A. GHG mitigation potential and cost in tropical forestry—Relative role for agroforestry. *Environment, Development and Sustainability*, 6(1), 235–260, 2004.
- [36] Drusch, M., et al. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36, 2012.
- [37] Roy, D. P., et al. Landsat-8: Science and Product Vision for Terrestrial Global Change Research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154–172, 2014.

