

BỘ NÔNG NGHIỆP VÀ PTNT

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

TRƯỜNG ĐẠI HỌC LÂM NGHIỆP

PHẠM VĂN DUẤN

**NGHIÊN CỨU KỸ THUẬT
XÁC ĐỊNH TRỮ LƯỢNG RỪNG TỪ ẢNH VỆ TINH
TẠI TỈNH ĐẮK NÔNG**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ LÂM NGHIỆP

Ngành: Điều tra và quy hoạch rừng

Mã số: 9620208

HÀ NỘI, 2019

Luận án được hoàn thành tại:

Trường Đại học Lâm nghiệp – Xuân Mai – Chương Mỹ - Hà Nội.

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS. TS. Nguyễn Trọng Bình
2. TS. Nguyễn Thanh Hoàn

Phản biện 1:

.....

Phản biện 2:

.....

Phản biện 3:

.....

Luận án sẽ được bảo vệ tại Hội đồng chấm luận án cấp Trường họp tại:

.....

Vào hồi giờ, ngày.....tháng.....năm 20.....

**Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện: Thư viện Quốc gia và Thư viện trường
Đại học Lâm nghiệp**

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. Phạm Văn Duẩn, Vũ Thị Thìn (2015), *Vấn đề xác định sinh khối và trữ lượng rừng từ ảnh vệ tinh*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Lâm nghiệp số 3, năm 2015.
2. Phạm Văn Duẩn, Vũ Thị Thìn, Nguyễn Quốc Huy (2016), *Ước tính giá trị các thông số khoanh vi ảnh hưởng đối tượng phù hợp trên phần mềm eCognition: Thử nghiệm với ảnh vệ tinh SPOT-6*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Lâm nghiệp số 6, năm 2016.
3. Nguyễn Thanh Hoàn, Phạm Văn Duẩn, Lê Sỹ Doanh, Nguyễn Văn Dũng (2017), *Xác định vị trí mất rừng bằng phương pháp véc tơ thay đổi đa biến (MCVA) trên dữ liệu vệ tinh LANDSAT-8*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Lâm nghiệp số 4, năm 2017.
4. Phạm Văn Duẩn, Nguyễn Thanh Hoàn, Nguyễn Trọng Bình, Phạm Tiến Dũng (2017), *Kết hợp ảnh vệ tinh ALOS-2/PALSAR-2 và LANDSAT-8 trong xác định trữ lượng rừng tự nhiên lá rộng thường xanh tại tỉnh Đắk Nông*. Tạp chí Khoa học Lâm nghiệp số 4, năm 2017.
5. Phạm Văn Duẩn, Nguyễn Thanh Hoàn, Nguyễn Trọng Bình, Vũ Thị Thìn (2018), *Xây dựng mô hình xác định trữ lượng rừng gỗ tự nhiên lá rộng thường xanh tại tỉnh Đắk Nông bằng dữ liệu viễn thám*. Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn, kỳ 3+4, năm 2018.

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU	1
1. Sự cần thiết của luận án.....	1
2. Mục tiêu của luận án	1
3. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu của luận án	1
4. Những đóng góp mới của luận án	2
5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án	2
5.1. Ý nghĩa khoa học.....	2
5.2. Ý nghĩa thực tiễn	2
I. ĐÁNH GIÁ TỔNG QUAN VÀ ĐỊNH HƯỚNG VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU.....	2
1.1. Đánh giá tổng quan vấn đề nghiên cứu	2
1.2. Định hướng vấn đề nghiên cứu	4
II. ĐIỀU KIỆN CƠ BẢN CỦA KHU VỰC NGHIÊN CỨU VÀ ĐẶC ĐIỂM TƯ LIỆU ẢNH VỆ TINH SỬ DỤNG	4
2.1. Điều kiện cơ bản tỉnh Đắk Nông liên quan đến vấn đề nghiên cứu.....	4
2.2. Đặc điểm tư liệu ảnh vệ tinh sử dụng trong nghiên cứu	4
III. NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	5
3.1. Nội dung nghiên cứu	5
3.2. Phương pháp nghiên cứu.....	5
3.2.1. Thu thập và xử lý số liệu ngoại nghiệp	5
3.2.2. Phương pháp xử lý và trích xuất thông tin trên ảnh và phi ảnh tại vị trí OTC	5
3.2.3. Phương pháp nghiên cứu xây dựng mô hình xác định M	6
3.2.4. Kết hợp ảnh vệ tinh với ranh giới lô kiểm kê để xây dựng mô hình xác định M	6
3.2.5. Phương pháp kiểm chứng mô hình xác định M	7
IV. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN	7
4.1. Xác định trữ lượng rừng tại vị trí các OTC và thăm dò mối quan hệ giữa trữ lượng với các biến số từ ảnh và phi ảnh	7
4.1.1. Xác định trữ lượng rừng tại vị trí các OTC.....	7
4.1.2. Thăm dò mối quan hệ giữa trữ lượng rừng với các biến số từ ảnh và phi ảnh	7
4.1.3. Thăm dò mối quan hệ giữa các biến độc lập và lựa chọn biến số đầu vào để xây dựng mô hình.....	7
4.2. Xây dựng mô hình xác định M bằng hàm hồi quy đa biến	8

4.2.1. Xây dựng mô hình với ảnh LANDSAT-8.....	8
4.2.2. Xây dựng mô hình với ảnh ALOS-2/PALSAR-2	8
4.2.3. Xây dựng mô hình kết hợp ảnh LANDSAT-8 với ALOS-2/PALSAR-2	8
4.2.4. Lựa chọn, kiểm chứng các mô hình xác định M.....	9
4.3. Xây dựng mô hình xác định giữa M bằng các thuật toán phi tham số.....	9
4.4. Kết hợp ảnh vệ tinh với ranh giới lô KK để xây dựng mô hình xác định M	9
4.5. Lựa chọn, hiệu chỉnh, đánh giá các mô hình xác định M	10
4.5.1. Lựa chọn, hiệu chỉnh các mô hình xác định M	10
4.5.2. Đánh giá các mô hình xác định M.....	11
4.6. Quy trình xác định M từ ảnh vệ tinh tại tỉnh Đắk Nông	12
4.6.1. Quy trình xác định M theo mô hình 4.10	12
4.6.2. Quy trình xác định M theo mô hình 4.11	13
4.7. Thảo luận.....	15
4.7.1. Lựa chọn ảnh sử dụng để xác định trữ lượng rừng	16
4.7.2. Thu thập và tính toán trữ lượng rừng tại thực địa	17
4.7.3. Lựa chọn các biến từ ảnh vệ tinh để xây dựng mô hình xác định M	18
4.7.4. Lựa chọn thuật toán sử dụng để xác định M từ ảnh	19
4.7.5. Sai số xác định trữ lượng rừng từ ảnh vệ tinh.....	19
KẾT LUẬN, TỒN TẠI VÀ KHUYẾN NGHỊ	21
1. Kết luận	21
2. Tồn tại.....	22
3. Khuyến nghị	22

MỞ ĐẦU

1. Sự cần thiết của luận án

Bản đồ hiện trạng rừng thể hiện ranh giới trạng thái và trữ lượng rừng (M) là công cụ quan trọng trong công tác quản lý rừng, là một trong những căn cứ để xây dựng những chính sách, chiến lược và tổ chức hoạt động bảo vệ và phát triển rừng.

Trước đây, M được điều tra xác định theo trạng thái rừng, nghĩa là bản đồ trạng thái có trước và M được tính theo trạng thái. Tuy nhiên, hiện nay việc phân loại trạng thái rừng của nước ta căn cứ vào M, không có M không xác định được trạng thái rừng. Do đó, thông tin M trở nên đặc biệt quan trọng, nhất là đối với các chương trình điều tra và kiểm kê rừng đã được quy định trong Luật Lâm nghiệp. Đổi mới kỹ thuật đảm bảo xác định được M đến từng lô rừng là một yêu cầu đang được thực tiễn đặt ra.

Một trong những phương pháp khả thi hiện nay để xác định M trên phạm vi rộng trong thời gian ngắn là sử dụng ảnh viễn thám. Có 3 loại ảnh viễn thám thường được sử dụng để xác định M là: Quang học, RADAR và LIDAR. Tuy nhiên, vai trò của từng loại ảnh trong xác định M là khác nhau. Trong đó, ảnh LIDAR hiện chưa có vệ tinh thu nhận nên việc áp dụng còn hạn chế. Do đó, các nghiên cứu xác định M từ ảnh viễn thám chủ yếu sử dụng ảnh Quang học và ảnh RADAR.

Xác định M từ ảnh vệ tinh là công việc phức tạp, gồm nhiều bước công việc từ: Lựa chọn, xử lý ảnh, lựa chọn các biến trên ảnh, lựa chọn các thuật toán phù hợp mô phỏng tốt mối quan hệ giữa M với các biến trên ảnh, thu thập các số liệu thực địa để xây dựng và kiểm chứng các mô hình, xây dựng mô hình, vận dụng mô hình để xác định M đã được nghiên cứu ở nhiều nơi trên thế giới. Tuy nhiên, tại Việt Nam vấn đề này chưa được quan tâm nghiên cứu, ứng dụng một cách thỏa đáng.

Theo kết quả kiểm kê rừng năm 2014, tỉnh Đắk Nông có 253.962,3 ha rừng, đạt độ che phủ 39,0%. Ngoài giá trị kinh tế, rừng Đắk Nông đặc biệt quan trọng với chức năng phòng hộ, bảo vệ nguồn nước, chống xói mòn... Tuy nhiên, do nhiều nguyên nhân khác nhau mà hiện trạng rừng Đắk Nông trong những năm qua ở nhiều nơi bị suy giảm cả về số và chất lượng. Trước thực trạng đó, ngoài việc thắt chặt quản lý để giữ vững diện tích rừng hiện có kết hợp trồng thêm rừng trên diện tích đất quy hoạch phát triển Lâm nghiệp thì các bản đồ hiện trạng rừng trên đó M được xác định đến từng lô rừng cần phải liên tục được cập nhật theo định kỳ điều tra, kiểm kê rừng.

Từ những lý do trên, luận án ***“Nghiên cứu kỹ thuật xác định trữ lượng rừng từ ảnh vệ tinh tại tỉnh Đắk Nông”*** được thực hiện với quan điểm: nghiên cứu kỹ thuật xác định M từ ảnh vệ tinh là nghiên cứu các bước kỹ thuật và điều kiện áp dụng các bước kỹ thuật đó để từ ảnh xác định được M, gồm kỹ thuật: Lựa chọn ảnh; Xử lý ảnh; Lựa chọn các biến từ ảnh; Xác định M tại hiện trường; Lựa chọn các thuật toán để xây dựng mô hình xác định M; Đánh giá sai số của các mô hình và xác định các yếu tố chính về kỹ thuật ảnh hưởng đến độ chính xác của mô hình xác định M; Xác định M đến từng điểm ảnh; Xác định M đến từng lô rừng.

2. Mục tiêu của luận án

Nghiên cứu, lựa chọn được kỹ thuật xác định M từ ảnh vệ tinh nhằm nâng cao chất lượng công tác xây dựng bản đồ hiện trạng rừng ở Việt Nam. Cụ thể: (1) Đánh giá những nhân tố kỹ thuật ảnh hưởng đến hiệu quả xác định M từ ảnh vệ tinh; (2) Xây dựng kỹ thuật xác định M từ ảnh vệ tinh.

3. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu của luận án

Đối tượng nghiên cứu của luận án là các kiểu rừng, các loại ảnh vệ tinh được lựa chọn tại khu vực nghiên cứu với phạm vi: (1) Về thời gian: thực hiện trong giai đoạn 2013 – 2016; (2) Về kiểu rừng: thực hiện với kiểu rừng gỗ tự nhiên lá rộng thường xanh (LRTX); (3) Tư liệu ảnh: Ảnh LANDSAT-8 và ALOS-2/PALSAR-2.

4. Những đóng góp mới của luận án

- Khẳng định khả năng sử dụng ảnh vệ tinh LANDSAT-8 và ALOS-2/PALSAR-2 trong việc xác định M cho kiểu rừng gỗ tự nhiên LRTX tại tỉnh Đắk Nông.
- Lựa chọn được bộ tham số đầu vào tối ưu cho xác định M gỗ tự nhiên LRTX tại tỉnh Đắk Nông từ ảnh LANDSAT-8, ALOS-2/PALSAR-2 và sự kết hợp của 2 loại ảnh này.
- Lựa chọn được thuật toán tối ưu cho xác định M rừng gỗ tự nhiên LRTX tại tỉnh Đắk Nông từ các thuật toán đang áp dụng phổ biến hiện nay.
- Kết hợp ảnh LANDSAT-8 và ALOS-2/PALSAR-2 cho kết quả xác định M có sai số chấp nhận được, có thể áp dụng vào thực tiễn trong công tác điều tra, kiểm kê rừng theo định kỳ, cũng như hỗ trợ quản lý, theo dõi, cập nhật diễn biến rừng và xác định khả năng tích lũy cacbon của rừng.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

5.1. Ý nghĩa khoa học

Luận án là công trình nghiên cứu một cách toàn diện kỹ thuật xác định M từ ảnh vệ tinh cho đối tượng rừng gỗ tự nhiên LRTX tại tỉnh Đắk Nông: Lựa chọn ảnh; Xử lý ảnh; Lựa chọn các biến từ ảnh; Xác định M tại hiện trường; Lựa chọn các thuật toán để xây dựng mô hình; Đánh giá sai số của các mô hình và xác định các yếu tố chính về kỹ thuật ảnh hưởng đến độ chính xác của mô hình xác định M; Xác định M đến từng điểm ảnh; Xác định M đến từng lô rừng.

Thông qua kết quả luận án, khẳng định khả năng sử dụng ảnh vệ tinh LANDSAT-8 và ALOS-2/PALSAR-2 và kết hợp 2 loại ảnh này trong việc xác định M cho kiểu rừng gỗ tự nhiên LRTX tại tỉnh Đắk Nông nói riêng và những khu vực khác ở Việt Nam có điều kiện tương tự nói chung.

Luận án cung cấp cơ sở lý luận và những phương pháp nghiên cứu nhằm xác định M từ ảnh vệ tinh có thể được sử dụng để tham khảo trong nhiều nghiên cứu khác ở Đắk Nông nói riêng và Việt Nam nói chung.

5.2. Ý nghĩa thực tiễn

Ứng dụng quy trình xác định M từ ảnh vệ tinh trong luận án để xác định M cho kiểu rừng gỗ tự nhiên LRTX tại tỉnh Đắk Nông cho kết quả tương đối phù hợp với kết quả kiểm kê rừng. Đây là ý nghĩa thực tiễn quan trọng để sử dụng quy trình này tại Đắk Nông.

Hiện nay, ba công tác quan trọng trong quản lý, giám sát tài nguyên rừng mà ngành lâm nghiệp đã, đang và sẽ thực hiện là: điều tra rừng, kiểm kê rừng và cập nhật diễn biến rừng. Trong đó: (1) Điều tra rừng được thực hiện với chu kỳ 5 năm một lần; (2) Kiểm kê rừng được thực hiện với chu kỳ 10 năm một lần; (3) Cập nhật diễn biến rừng được thực hiện hàng năm. Kết quả của luận án cho phép đưa ra các giải pháp để xác định M với chi phí thấp, có thể thực hiện trên diện rộng hỗ trợ công tác điều tra rừng và kiểm kê rừng.

I. ĐÁNH GIÁ TỔNG QUAN VÀ ĐỊNH HƯỚNG VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Đánh giá tổng quan vấn đề nghiên cứu

Kết quả tìm hiểu tổng quan nhận thấy, để xác định M từ ảnh vệ tinh, các nghiên cứu thường tập trung: (1) Lựa chọn tư liệu ảnh phù hợp; (2) Xác định các biến phù hợp từ ảnh có liên hệ với M; (3) Xác định các thuật toán phù hợp để xây dựng mô hình xác định M; (4) Phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến độ chính xác xác định M.

- Lựa chọn tư liệu ảnh: căn cứ vào bước sóng, hiện nay có ba loại tư liệu ảnh viễn thám chính: Quang học, RADAR và LIDAR. Mỗi loại có điểm mạnh và điểm yếu khác nhau khi sử dụng để xác định M. Trong đó:

+ Ảnh quang học là tư liệu được sử dụng phổ biến nhất để xác định M. Thông thường các loại ảnh có độ phân giải trung bình và thấp được cung cấp miễn phí và ngược lại. Các loại ảnh quang học khác nhau đã được nhiều tác giả sử dụng để xác định M và đã đạt được những

kết quả nhất định. Nhìn chung, ảnh có độ phân giải cao tốt hơn khi ước lượng các thuộc tính cấu trúc rừng so với ảnh có độ phân giải trung bình và thấp. Tuy nhiên, ảnh độ phân giải cao có hạn chế là giá trị phổ biến động lớn do bóng của tán cây và bóng của địa hình, từ đó gây ra sai số cho mô hình xác định M. Bên cạnh đó, ảnh độ phân giải cao cần dung lượng lưu trữ dữ liệu, thời gian để xử lý ảnh và yêu cầu về cấu hình phần cứng, phần mềm cho xử lý ảnh lớn và giá thành của tư liệu ảnh cao. Với vùng nghiên cứu rộng, khả năng xử lý và chi phí để mua ảnh là các yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến quyết định lựa chọn tư liệu vệ tinh có độ phân giải cao trong nghiên cứu cũng như ứng dụng thực tiễn để xác định M.

+ Ảnh RADAR: Độ dài bước sóng quyết định cách thức mà bức xạ điện từ tương tác với đối tượng trên bề mặt vì vậy nó là thông tin quan trọng khi sử dụng ảnh RADAR để xác định M. Tư liệu RADAR có bước sóng ngắn (kênh X, C) không thể lấy thông tin sâu bên trong tán cây rừng dày đặc, trái lại tư liệu RADAR có bước sóng dài (kênh L, P) có thể lấy thông tin sâu trong vòm lá, thậm chí có thể lấy thông tin ở lớp đất phía dưới tán rừng có liên quan mật thiết đến M. Do đó, ảnh RADAR thường được xem là tốt hơn để xác định M so với ảnh quang học.

- Xác định các biến phù hợp từ ảnh có liên hệ với M: Nhiều biến từ ảnh đã được sử dụng trong mô hình ước lượng M. Tuy nhiên, không phải tất cả các biến đều hữu ích trong việc xây dựng mô hình ước lượng chỉ tiêu này. Đối với ảnh quang học, các kỹ thuật: xác định chỉ số thực vật, phân tích thành phần chính (PCA), phân tích hỗn hợp quang phổ (SMA), phân tích cấu trúc... đã được sử dụng để tạo ra các biến mới ngoài các biến về giá trị phổ thông thường. Đối với ảnh RADAR, giá trị tán xạ ngược thường được sử dụng làm biến đầu vào trong ước lượng M. Mặt khác, M bị ảnh hưởng của nhiều nhân tố như: địa hình, khí hậu... nhưng trong hầu hết các trường hợp, những nhân tố này đã bị bỏ qua bằng cách giả định rằng các khu vực có rừng là đồng nhất về các điều kiện gây nên bởi địa hình, khí hậu. Do đó, việc thêm các biến về địa hình, khí hậu... kết hợp với biến từ ảnh vệ tinh có thể cải thiện sai số xác định M, bởi vì các yếu tố địa hình, khí hậu... ảnh hưởng đến cấu trúc đứng và tăng trưởng của cây rừng.

- Xác định các thuật toán phù hợp để xây dựng mô hình xác định M: Rất nhiều thuật toán đã được phát triển cho việc ước lượng M từ ảnh, được chia thành hai loại: tham số và phi tham số. Thuật toán tham số giả định rằng mối quan hệ giữa M (biến phụ thuộc) và biến độc lập có nguồn gốc từ ảnh vệ tinh có thể được mô hình hóa bằng các hàm hồi quy tuyến tính đơn biến, đa biến hoặc hàm phi tuyến. Nhiều tác giả đã sử dụng hàm hồi quy để xác định M. Tuy nhiên, trong thực tế mối quan hệ giữa M và các biến độc lập xác định từ ảnh vệ tinh thường rất phức tạp nên nhiều khi thuật toán tham số không thể hiện tốt mối quan hệ này. Ngược lại, các thuật toán phi tham số không ấn định trước cấu trúc mô hình vì vậy nó có tính linh hoạt hơn so với phương pháp hồi quy thực nghiệm. Các thuật toán phi tham số như: K-NN, ANN, SVM, RT, RF... thường được sử dụng để xác định M từ ảnh quang học nhưng có rất ít nghiên cứu sử dụng thuật toán phi tham số để xây dựng mô hình xác định M từ ảnh RADAR. Nhằm xác định một thuật toán tối ưu, nhiều nghiên cứu đã tiến hành phân tích so sánh kết quả xác định M từ ảnh bằng các thuật toán khác nhau để xác định thuật toán thích hợp nhất. Tuy nhiên, do nhiều nguyên nhân khác nhau việc so sánh này chưa đưa ra được hiệu quả rõ rệt. Vì vậy, việc xác định ảnh hưởng của thuật toán đến hiệu quả xác định M vẫn đang bị bỏ ngỏ.

- Các yếu tố ảnh hưởng đến độ chính xác xác định M: xác định nguồn gốc gây nên sai số của xác định M từ ảnh có tầm quan trọng đặc biệt và đã được nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu. Kết quả cho thấy: (1) sai số của xác định M có thể thay đổi từ 5% đến 30%, tùy thuộc vào các hệ sinh thái rừng, đặc điểm địa hình, dữ liệu quan trắc, độ phân giải không gian của ảnh, phương pháp sử dụng... (2) Việc lựa chọn các mô hình hồi quy khác nhau để xác định M từ ảnh vệ tinh có thể cho sai số đến 20%. (3) Kích thước ô mẫu có ảnh hưởng đến độ chính xác của ước tính M, độ chính xác ước tính M tăng 10% khi kích thước của ô mẫu tăng từ 0,25 ha đến 1 ha hoặc sai số ước lượng M đã giảm tới 38% khi kích thước ô mẫu tăng từ 0,36 ha lên 1 ha. Ngoài ra, vị trí ô mẫu không ảnh hưởng nhiều đến độ chính xác của việc xác định M.

- Quy mô khu vực nghiên cứu có ảnh hưởng đến độ chính xác của ước lượng M từ ảnh

vệ tinh thông qua sự phù hợp giữa kích thước ô mẫu và độ phân giải không gian của tư liệu ảnh. Về lý thuyết, ảnh có độ phân giải không gian cao không cần ô mẫu có diện tích quá lớn, nhưng trong hệ sinh thái rừng, ô mẫu quá nhỏ sẽ mất tính đại diện và tạo ra sai số trong việc xác định M ngay tại thực địa do cấu trúc phức tạp của nó. Đa số các ô mẫu sử dụng trong điều tra rừng có kích thước từ 400-1.000 m². Các kích thước này có thể: lớn cho ảnh có độ phân giải không gian cao, dẫn đến sự biến thiên giá trị phổ lớn trên cùng một ô mẫu; Tương đối phù hợp cho ảnh vệ tinh có độ phân giải không gian trung bình, nhưng có thể không phù hợp với ảnh có độ phân giải không gian thấp. Thu thập số liệu hiện trường là công việc rất tốn kém. Do đó, ưu tiên số một là chọn một kích thước ô mẫu đại diện cho khu vực nghiên cứu với chi phí thu thập thấp nhất.

1.2. Định hướng vấn đề nghiên cứu

- Trong nghiên cứu này, trữ lượng rừng là tổng thể tích tính từ gốc đến ngọn của các cây trong lâm phần, có đơn vị là m³/ha, được ký hiệu là M.

- Trữ lượng của khu rừng có liên hệ với đặc điểm phản xạ phổ từ khu rừng đó và sự biến đổi của nó theo không gian. Vì vậy, xây dựng kỹ thuật xác định M từ ảnh vệ tinh trước hết phải là việc lựa chọn các loại ảnh và xác định các chỉ số phản ánh đặc điểm phản xạ phổ và sự biến đổi của nó theo không gian cho từng loại ảnh.

- Các loại ảnh vệ tinh khác nhau sẽ có độ phân giải phổ và độ phân giải không gian khác nhau. Vì vậy, chúng có khả năng xác định M với độ chính xác khác nhau và trên những quy mô khác nhau. Nhìn chung, độ phân giải phổ càng cao thì khả năng xác định M càng chính xác, độ phân giải không gian càng cao thì khả năng phân biệt cấu trúc bề mặt tán rừng càng tốt và độ chính xác của M càng cao.

- Xác định M từ ảnh vệ tinh là việc căn cứ vào đặc điểm phổ và sự phân bố của chúng trên ảnh theo không gian để tính ra M. Vì vậy, xây dựng kỹ thuật xác định M từ ảnh vệ tinh là việc xây dựng những công thức, lựa chọn thuật toán để tính M từ các chỉ tiêu phản xạ phổ và chỉ tiêu phản ánh sự phân bố của chúng trong không gian. Mô hình hợp lý là mô hình cho phép xác định M đến từng lô rừng với sai số thấp nhất.

- Phương pháp phân loại rừng quyết định phương pháp xác định trạng thái và M. Trước đây, M tại một khu vực thường được điều tra xác định theo trạng thái rừng. Theo đó, đầu tiên xây dựng bản đồ thể hiện trạng thái rừng, sau đó bố trí, điều tra các ô mẫu trên từng trạng thái và xác định trữ lượng trung bình cho từng trạng thái. Tất cả các lô rừng trong một trạng thái được gán trữ lượng bằng trữ lượng trung bình của trạng thái đó. Tuy nhiên, trong điều kiện hiện nay, không có M thì không xác định được trạng thái rừng. Do đó, điều kiện bản đồ trạng thái có trước và tính trữ lượng sau là không khả thi. Vì vậy, mô hình xác định M từ ảnh vệ tinh trong nghiên cứu này phải là mô hình xác định trữ lượng cho từng vị trí của kiểu rừng. Từ đó, để đánh giá sai số xác định M từ ảnh cũng phải đứng trên quan điểm chỉ biết kiểu rừng mà chưa biết trạng thái rừng.

II. ĐIỀU KIỆN CƠ BẢN CỦA KHU VỰC NGHIÊN CỨU VÀ ĐẶC ĐIỂM TƯ LIỆU ẢNH VỆ TINH SỬ DỤNG

2.1. Điều kiện cơ bản tỉnh Đắk Nông liên quan đến vấn đề nghiên cứu

Đắk Nông có diện tích tự nhiên 651.561,5 ha, có địa hình đa dạng, có sự xen kẽ giữa các núi cao hùng vĩ, hiểm trở với các cao nguyên rộng lớn. Mùa mưa từ tháng 4 đến hết tháng 10, tập trung trên 85% lượng mưa cả năm; mùa khô từ tháng 11 đến hết tháng 3 năm sau. Kiểu rừng gỗ tự nhiên LRTX là kiểu rừng chủ yếu tại tỉnh Đắk Nông, đồng thời cũng là kiểu rừng có diện tích lớn tại Việt Nam là lý do tác giả chọn kiểu rừng này làm đối tượng nghiên cứu.

2.2. Đặc điểm tư liệu ảnh vệ tinh sử dụng trong nghiên cứu

Căn cứ vào kết quả phân tích tổng quan và đặc điểm của các tư liệu ảnh, tác giả lựa chọn: 1) ảnh LANDSAT-8 – đại diện cho tư liệu vệ tinh quang học có độ phân giải trung bình; 2) ảnh ALOS-2/PALSAR-2 đại diện cho tư liệu RADAR (L) bước sóng dài để nghiên cứu xây

dựng các mô hình xác định M từ ảnh cho tỉnh Đắk Nông. Trong đó, căn cứ vào điều kiện khí hậu tại Đắk Nông và thời gian tiến hành thu thập số liệu thực địa, sử dụng 5 cảnh LANDSAT-8 chụp từ 14.11.2014 - 22.3.2015 và 6 cảnh ALOS-2/PALSAR-2 chụp từ 21.9.2014 - 25.1.2015 để thực hiện nghiên cứu.

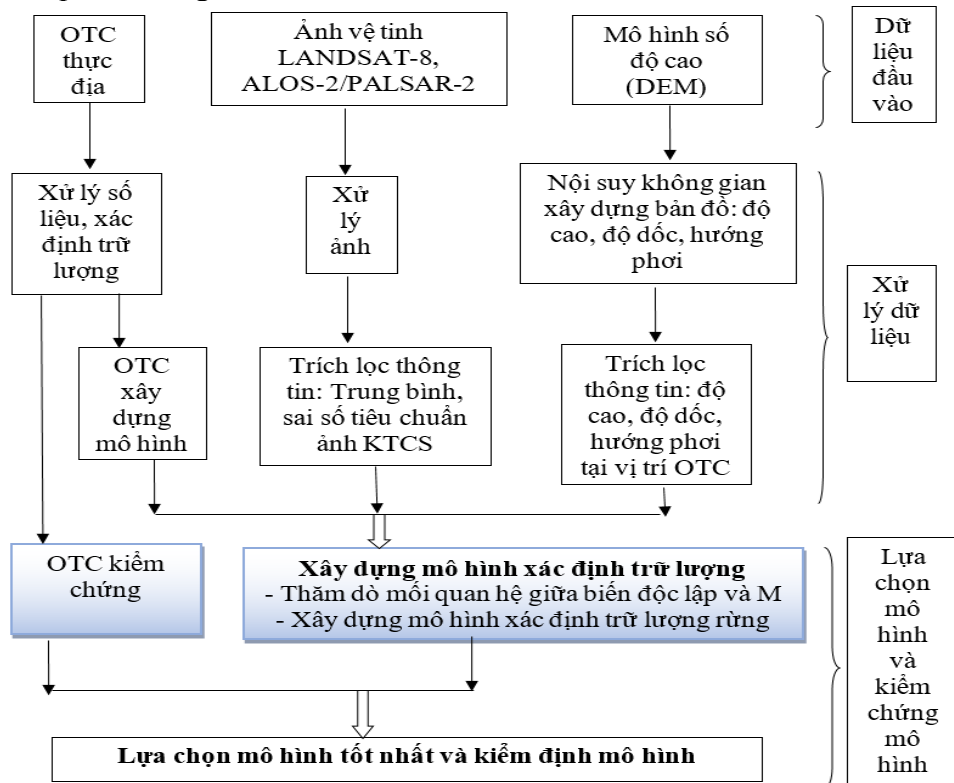
III. NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Nội dung nghiên cứu

- (1) Nghiên cứu thăm dò mối quan hệ giữa các biến từ ảnh và phi ảnh với M;
- (2) Nghiên cứu xây dựng mô hình xác định M bằng hàm hồi quy đa biến;
- (3) Nghiên cứu xây dựng mô hình xác định M bằng các thuật toán phi tham số;
- (4) Nghiên cứu kết hợp ảnh vệ tinh với ranh giới lô kiểm kê để xây dựng mô hình xác định M;
- (5) Đề xuất quy trình xác định M từ ảnh vệ tinh.

3.2. Phương pháp nghiên cứu

Toàn bộ quá trình nghiên cứu của Luận án được thể hiện tại sơ đồ hình 3.1



Hình 3.1. Sơ đồ quá trình nghiên cứu của Luận án

3.2.1. Thu thập và xử lý số liệu ngoại nghiệp

- Thu thập số liệu: tại 214 OTC rừng gỗ tự nhiên LRTX ở khu vực nghiên cứu, thời gian thu thập từ 10/2014 - 2/2015, kích thước OTC: 1.000m² (30mx33,3m).

- Xử lý số liệu: tại mỗi OTC, xác định thể tích của từng cây cá lẻ (V_i) bằng biểu thể tích 2 nhân tố lập chung toàn quốc cho rừng tự nhiên LRTX, sau đó xác định tổng thể tích các cây trong OTC (M/δ) và M tại vị trí OTC. Danh sách OTC gồm các chỉ tiêu: Vị trí OTC (x,y) và M tương ứng được sử dụng cho các nội dung nghiên cứu tiếp theo.

3.2.2. Phương pháp xử lý và trích xuất thông tin trên ảnh và phi ảnh tại vị trí OTC

- Xử lý ảnh: Ảnh LANDSAT-8: (1) chuyển đổi hệ tọa độ; (2) hiệu chỉnh ảnh hưởng của bóng địa hình; (3) trộn ảnh để tạo các kênh đa phổ có độ phân giải không gian 15m; (4) xây dựng ảnh thành phần chính và ảnh chỉ số thực vật. Ảnh ALOS-2/PALSAR-2: (1) chuyển đổi hệ tọa độ; (2) chuyển giá trị số (DN) trên ảnh về giá trị tán xạ ngược. Kết quả tạo ra 4 loại ảnh: (1) Ảnh chỉ số thực vật (ký hiệu NDVI); (2) Ảnh thành phần chính (ký hiệu PC); (3) ảnh tán xạ ngược

kênh HV (ký hiệu HV); (4) Ảnh tán xạ ngược kênh HH (ký hiệu HH).

- Trích xuất thông tin trên ảnh và phi ảnh tại vị trí OTC:

+ Thông tin ảnh: giá trị trung bình, sai tiêu chuẩn phổ của từng loại ảnh tạo ra sau khi xử lý theo kích thước cửa sổ (KTCS) lọc ảnh khác nhau.

+ Thông tin phi ảnh: giá trị độ cao, độ dốc và hướng phơi từ ASTER GDEM.

3.2.3. Phương pháp nghiên cứu xây dựng mô hình xác định M

(1) - Thăm dò mối quan hệ giữa từng biến độc lập x_i (biến trên ảnh và phi ảnh) với biến phụ thuộc y (trữ lượng rừng - M) và giữa các biến độc lập với nhau.

Thăm dò mối quan hệ giữa từng x_i với y nhằm xác lập hình thái quan hệ giữa chúng, loại bỏ những biến x_i không có quan hệ với y , được thực hiện bằng 4 dạng hàm: $Y=a+b*X$; $Y=a+b*\ln(X)$; $\ln(Y)=a+b*X$; $\ln(Y)=a+b*\ln(X)$.

Các mối quan hệ này được đánh giá thông qua kiểm định ý nghĩa của hệ số tương quan (r) bằng tiêu chuẩn t với giả thiết: H_0 không tồn tại mối quan hệ giữa x_i và y .

Sau khi chọn được các x_i có quan hệ với y (M), tiến hành thăm dò mối quan hệ giữa các x_i với nhau. Nếu hệ số tương quan giữa 2 biến độc lập ($r>0,7$) sẽ giữ lại x_i có quan hệ tốt hơn với M và loại bỏ x_i có quan hệ với M kém hơn khỏi danh sách các x_i .

(2) - Lựa chọn thuật toán sử dụng để xây dựng mô hình: Trong nghiên cứu này, sử dụng: mô hình hồi quy đa biến và các thuật toán phi tham số: K-NN, ANN, RF để xây dựng mô hình xác định M. Trong đó:

Với hàm hồi quy đa biến: mô hình xác định M được xây dựng theo 4 dạng:

$$\text{Dạng (3.1)} \quad Y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+\dots+b_px_p$$

$$\text{Dạng (3.2)} \quad Y=b_0+b_1\ln(x_1)+b_2\ln(x_2)+\dots+b_p\ln(x_p)$$

$$\text{Dạng (3.3)} \quad \ln(Y)=b_0+b_1x_1+b_2x_2+\dots+b_px_p$$

$$\text{Dạng (3.4)} \quad \ln(Y)=b_0+b_1\ln(x_1)+b_2\ln(x_2)+\dots+b_p\ln(x_p)$$

Các phương trình đa biến xây dựng phải đảm bảo các yêu cầu: (1) Phương trình tồn tại thể theo tiêu chuẩn F; Các hệ số b_i của phương trình tồn tại theo tiêu chuẩn t . Từ đó căn cứ vào sai số của các mô hình để lựa chọn phương trình tốt nhất.

Sau khi sử dụng các hàm đa biến để xây dựng mô hình xác định M và lựa chọn được mô hình hoặc các mô hình tốt nhất, sử dụng biến số đầu vào của các mô hình tốt nhất này để thử nghiệm xây dựng mô hình xác định M bằng 3 thuật toán phi tham số: k-NN; ANN; RF thông qua phần mềm Weka.

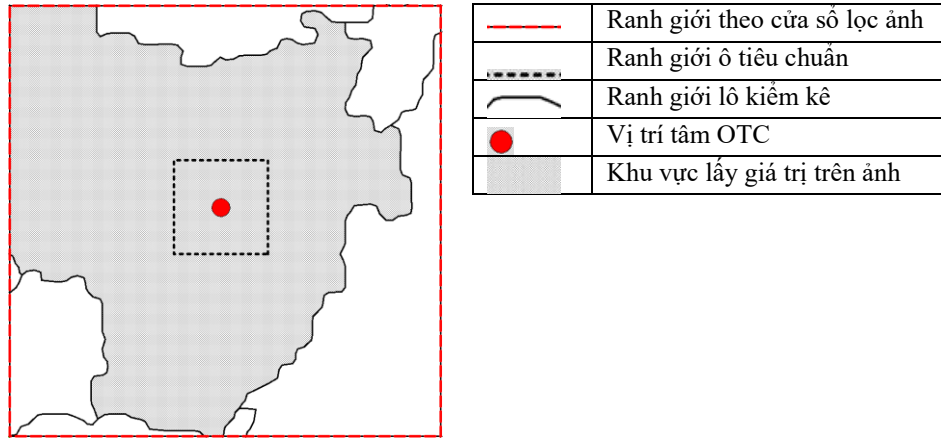
(3) Phân chia dữ liệu để xây dựng và kiểm chứng mô hình: các OTC được chia thành 2 phần: Lựa chọn ngẫu nhiên theo không gian 33% (71 OTC) sử dụng để kiểm chứng mô hình; 143 OTC còn lại được sử dụng để xây dựng mô hình xác định M.

(4) Xây dựng và đánh giá sai số của mô hình: Sử dụng 143 OTC có các số liệu: M tại vị trí OTC, các chỉ tiêu trung bình phổ, sai tiêu chuẩn phổ, điều kiện địa hình... để xây dựng mô hình xác định M bằng: mô hình hồi quy đa biến, thuật toán K-NN, ANN, RF. Mỗi mô hình được tính toán các loại sai số: tuyệt đối (MAE), tương đối (MAE%), trung bình toàn phương (RMSE), trung bình toàn phương tương đối (RMSE%).

(5) Lựa chọn mô hình tối ưu: là mô hình có 4 giá trị sai số (MAE, MAE%, RMSE, RMSE%) nhỏ nhất. Trong đó, ưu tiên lựa chọn các mô hình có RMSE% nhỏ nhất, tiếp theo đến MAE% nhỏ nhất, RMSE nhỏ nhất và MAE nhỏ nhất.

3.2.4. Kết hợp ảnh vệ tinh với ranh giới lô kiểm kê để xây dựng mô hình xác định M

Nhằm hạn chế nhược điểm của phương pháp lấy giá trị trên ảnh theo KTCS tại những vị trí biên, giảm ảnh hưởng của nhiễu điểm ảnh trên ảnh RADAR, đồng thời vẫn lấy được giá trị đặc trưng trên ảnh đến từng điểm ảnh, sau khi lựa chọn được mô hình xác định M tốt nhất với biến đầu vào được trích xuất từ ảnh theo KTCS nhất định. Tác giả coi phần lô kiểm kê trên KTCS đó là đơn vị đồng nhất. Từ đó, phương pháp trích xuất thông tin trên ảnh được thực hiện như minh họa tại hình 3.2.



Hình 3.2. Phương pháp trích xuất thông tin kết hợp ảnh lọc với lô KK

3.2.5. Phương pháp kiểm chứng mô hình xác định M

Sử dụng 33% số ô tiêu chuẩn (71 OTC) độc lập không tham gia xây dựng mô hình để kiểm chứng mô hình tối ưu. Sai số kiểm chứng các mô hình được tính toán tương tự như sai số xây dựng mô hình.

IV. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

4.1. Xác định trữ lượng rừng tại vị trí các OTC và thăm dò mối quan hệ giữa trữ lượng với các biến số từ ảnh và phi ảnh

4.1.1. Xác định trữ lượng rừng tại vị trí các OTC

Kết quả thu thập số liệu, tính toán M tại vị trí các OTC và phân chia OTC để xây dựng và kiểm chứng mô hình tổng hợp tại bảng 4.1.

Bảng 4.1. Thông tin chung về các OTC sử dụng trong nghiên cứu

Mục đích	Số OTC (n)				$M_{\min}$ m ³ /ha	$M_{\max}$ m ³ /ha	M_{TB} m ³ /ha
	Tổng	<100 m ³ /ha	100-200 m ³ /ha	>200 m ³ /ha			
Tổng	214	86	98	30	11,8	301,6	123,3
Thăm dò mối quan hệ và xây dựng mô hình	143	57	66	20	11,8	290,8	123,8
Kiểm chứng mô hình	71	29	32	10	20,6	301,6	122,5

4.1.2. Thăm dò mối quan hệ giữa trữ lượng rừng với các biến số từ ảnh và phi ảnh

Kết quả lựa chọn được 54 biến từ ảnh (33 biến từ LANDSAT-8; 21 biến từ ALOS-2/PALSAR-2) và 1 biến phi ảnh là độ dốc (DOC) có quan hệ với M. Giá trị tuyệt đối hệ số r của từng biến độc lập từ ảnh với M dao động từ 0,19 đến 0,64. Trong đó: ảnh LANDSAT-8 dao động từ 0,23 đến 0,62; ảnh ALOS-2/PALSAR-2 dao động từ 0,19 đến 0,64. Chứng tỏ, mặc dù tồn tại mối quan hệ giữa các biến từ ảnh và phi ảnh với M, song mối quan hệ này chỉ ở mức vừa phải, tương đối chặt, thậm chí một số biến số có quan hệ với M ở mức yếu.

4.1.3. Thăm dò mối quan hệ giữa các biến độc lập và lựa chọn biến số đầu vào để xây dựng mô hình

Kết quả thăm dò mối quan hệ giữa các biến độc lập cho thấy: Giữa NDVI và PC1 trên ảnh LANDSAT-8; giữa HH và HV trên ảnh ALOS-2/PALSAR-2 tại từng KTCS lọc ảnh luôn tồn tại mối quan hệ rất chặt chẽ. Giữa kênh HV, HH của ảnh ALOS-2/PALSAR-2 với các kênh của ảnh LANDSAT-8 không tồn tại mối quan hệ chặt. Từ đó, biến số đầu vào để xây dựng mô hình được lựa chọn như sau:

- Ảnh LANDSAT-8: PC1, PC2, DOC; NDVI, PC2, DOC.
- Ảnh ALOS-2/PALSAR-2: HH, DOC; HV, DOC.

- Kết hợp ảnh ALOS-2/PALSAR-2 và LANDSAT-8: NDVI, PC2, HV, DOC; NDVI, PC2, HH, DOC; PC1, PC2, HV, DOC; PC1, PC2, HH, DOC.

4.2. Xây dựng mô hình xác định M bằng hàm hồi quy đa biến

4.2.1. Xây dựng mô hình với ảnh LANDSAT-8

Kết quả đã xây dựng 88 mô hình xác định M với 2 trường hợp biến số đầu vào: (1) PC1, PC2, DOC; (2) NDVI, PC2, DOC theo 11 KTCS lọc ảnh và 4 dạng hàm hồi quy đa biến (Dạng 3.1 đến dạng 3.4). Các phương trình, các hệ số của phương trình đều tồn tại về mặt thống kê. Chứng tỏ, có thể sử dụng ảnh LANDSAT-8 để xây dựng các mô hình xác định M cho đối tượng rừng gỗ tự nhiên LRTX tại khu vực nghiên cứu.

Tại KTCS 1x1, sai số của các mô hình lớn nhất. Khi KTCS lọc tăng từ 3x3 đến 21x21, sai số của các mô hình giảm. Trong đó, sai số giảm mạnh khi KTCS lọc tăng từ 3x3 đến 11x11, khi KTCS lọc ảnh từ 13x13 trở đi, sai số của các mô hình giảm không đáng kể.

Dạng phương trình khác nhau có ảnh hưởng đến sai số tương đối của mô hình. Dạng phương trình (3.3) và (3.4) có ưu điểm hơn so với hai dạng phương trình (3.1) và (3.2).

Sai số của mô hình tốt nhất lựa chọn được khi biến đầu vào là PC1, PC2, DOC nhỏ hơn so với mô hình tốt nhất lựa chọn được khi biến đầu vào là NDVI, PC2, DOC.

Sử dụng ảnh LANDSAT-8 để xây dựng các mô hình xác định M cho kiểu rừng gỗ tự nhiên LRTX tại Đắc Nông cho sai số: MAE: 38÷43 m³/ha; MAE%: 35%÷41%; RMSE: 53÷56 m³/ha; RMSE%: 51%÷62%. Từ đó, lựa chọn 2 mô hình:

$$M = \text{EXP}(0,0001 * \text{NDVI}_{13\text{TB}} - 0,3569) \quad (4.1)$$

Sai số: MAE=41 m³/ha; MAE%=39%; RMSE=55 m³/ha; RMSE%=57%.

$$M = \text{EXP}[4,82644 * \text{Ln}(\text{NDVI}_{13\text{TB}}) - 47,498] \quad (4.2)$$

Sai số: MAE=41 m³/ha; MAE%=39%; RMSE=56 m³/ha; RMSE%=56%.

để xác định M từ ảnh LANDSAT-8 cho kiểu rừng gỗ tự nhiên LRTX tại Đắc Nông.

4.2.2. Xây dựng mô hình với ảnh ALOS-2/PALSAR-2

Với ảnh ALOS-2/PALSAR-2, đã xây dựng 88 mô hình xác định M với 2 trường hợp biến số đầu vào: (1) HV, DOC; (2) HH, DOC theo 11 KTCS lọc ảnh và 4 dạng hàm hồi quy đa biến. Kết quả cho thấy: các phương trình, các hệ số của phương trình đều tồn tại về mặt thống kê. Chứng tỏ, có thể sử dụng ảnh ALOS-2/PALSAR-2 để xây dựng các mô hình xác định M cho đối tượng rừng gỗ tự nhiên LRTX tại tỉnh Đắc Nông.

Dạng phương trình (3.3) và (3.4) tốt hơn so với hai dạng phương trình (3.1) và (3.2) khi sử dụng để xây dựng các mô hình xác định M từ ảnh ALOS-2/PALSAR-2 tại khu vực nghiên cứu.

Xét trong cùng một KTCS lọc ảnh và dạng phương trình, sai số xác định M khi biến đầu vào là giá trị HV, DOC luôn nhỏ hơn so với biến đầu vào là giá trị HH, DOC.

Sai số của các mô hình xác định M từ ảnh ALOS-2/PALSAR-2 đạt được: MAE: 35÷41 m³/ha; MAE%: 37%÷45%; RMSE: 46÷54 m³/ha; RMSE%: 59%÷77%. Từ đó, lựa chọn 2 mô hình:

$$M = \text{EXP}(0,000241 * \text{HV}_{21\text{TB}} + 0,019589 * \text{DOC} - 4,535) \quad (4.3)$$

Sai số: MAE=35 m³/ha; MAE%=37%; RMSE=46 m³/ha; RMSE%=59%.

$$M = \text{EXP}[8,629208 * \text{Ln}(\text{HV}_{21\text{TB}}) + 0,129567 * \text{Ln}(\text{DOC}) - 86,457] \quad (4.4)$$

Sai số: MAE=35 m³/ha; MAE%=37%; RMSE=46 m³/ha; RMSE%=59%.

để xác định M từ ảnh ALOS-2/PALSAR-2 cho kiểu rừng gỗ tự nhiên LRTX tại Đắc Nông.

4.2.3. Xây dựng mô hình kết hợp ảnh LANDSAT-8 với ALOS-2/PALSAR-2

Kết hợp ALOS-2/PALSAR-2 với LANDSAT-8, đã xây dựng 176 mô hình xác định M, kết quả cho thấy: tất cả 176 phương trình, các hệ số của từng phương trình đều tồn tại về mặt thống kê. Hai dạng phương trình (3.3) và (3.4) tốt hơn so với hai dạng phương trình (3.1) và (3.2) khi sử dụng để xây dựng các mô hình xác định M tại khu vực.

Các mô hình xác định M tối ưu đã lựa chọn được ứng với từng trường hợp biến đầu vào khi kết hợp 2 loại ảnh LANDSAT-8 và ALOS-2/PALSAR-2 có: MAE: 28-32 m³/ha; MAE%: 27-32%; RMSE: 38-42 m³/ha và RMSE%: 39-46%. Trong đó, 2 mô hình tốt nhất là mô hình (4.5) và (4.6).

$$M = \text{EXP}(0,00020 * HV13_{TB} + 0,00094 * PC1_{13TB} - 9,0454) \quad (4.5)$$

Sai số: MAE=28 m³/ha; MAE%=27%; RMSE=38 m³/ha; RMSE%=39%.

$$M = \text{EXP}[7,33400 * \text{Ln}(HV11_{TB}) + 6,00097 * \text{Ln}(PC1_{11TB}) - 125,44] \quad (4.6)$$

Sai số: MAE=29 m³/ha; MAE%=27%; RMSE=39 m³/ha; RMSE%=39%.

4.2.4. Lựa chọn, kiểm chứng các mô hình xác định M

Mô hình tối ưu xây dựng bằng cách kết hợp 2 loại ảnh với nhau đều có các loại sai số nhỏ hơn so với mô hình tối ưu xây dựng cho từng loại ảnh. Từ đó, hai mô hình có phương trình chính tắc (4.5) và (4.6) là hai mô hình tốt nhất để xác định M cho đối tượng rừng gỗ tự nhiên LRTX tại tỉnh Đắk Nông.

Sử dụng hai mô hình có phương trình chính tắc (4.5) và (4.6) để xác định M tại vị trí các OTC độc lập không tham gia xây dựng mô hình (71 OTC) và tính toán các sai số kiểm chứng của mô hình, kết quả sai số xác định M đến từng điểm ảnh của 2 mô hình khi kiểm chứng đạt được: MAE: 25 m³/ha; MAE%: 29%; RMSE: 32 m³/ha; RMSE%: 47% (4.5) và 48% (4.6). Trong đó, mô hình (4.5) đơn giản hơn (4.6), có: chênh lệch giữa MAE%, RMSE% của mô hình và kiểm chứng lần lượt là: $\Delta_{MAE\%}=2\%$; $\Delta_{RMSE\%}=9\%$.

4.3. Xây dựng mô hình xác định giữa M bằng các thuật toán phi tham số

Sử dụng các biến số của phương trình chính tắc (4.5) và (4.6) làm biến đầu vào xây dựng 6 mô hình xác định M bằng các thuật toán phi tham số, kết quả xây dựng, kiểm chứng các mô hình so sánh với phương trình tối ưu xây dựng bằng hàm hồi quy đa biến cho thấy: Tuy chênh lệch về sai số giữa các mô hình cùng biến số đầu vào nhưng khác nhau về thuật toán áp dụng không lớn, nhưng các mô hình xây dựng bằng hàm hồi quy đa biến hoặc thuật toán ANN luôn có sai số tương tự nhau và thấp hơn so với các mô hình xây dựng bằng 2 thuật toán K-NN và RF. Do đó, khi sử dụng ảnh LANDSAT-8 và ALOS-2/PALSAR-2 để xác định M cho kiểu rừng gỗ tự nhiên LRTX tại tỉnh Đắk Nông nên sử dụng hàm hồi quy đa biến hoặc thuật toán ANN.

4.4. Kết hợp ảnh vệ tinh với ranh giới lô KK để xây dựng mô hình xác định M

Căn cứ vào 4 loại sai số: mô hình xây dựng bằng hàm hồi quy đa biến cho các loại sai số thấp nhất, tiếp theo đến mô hình xây dựng bằng thuật toán ANN, mô hình xây dựng bằng thuật toán RF, mô hình xây dựng bằng thuật toán K-NN cho các loại sai số lớn nhất. Trong đó:

- Mô hình xây dựng bằng hàm hồi quy đa biến có sai số: MAE = 25 m³/ha; MAE%=25%; RMSE = 33 m³/ha; RMSE%=35%. Sai số kiểm chứng mô hình: MAE = 21 m³/ha; MAE%=24%; RMSE = 29 m³/ha; RMSE%=41%. Chênh lệch giữa MAE%, RMSE% của mô hình và kiểm chứng lần lượt là: $\Delta_{MAE\%}=1\%$ và $\Delta_{RMSE\%}=6\%$.

- Mô hình xây dựng bằng thuật toán ANN có sai số: MAE = 25 m³/ha; MAE%=26%; RMSE = 33 m³/ha; RMSE%=39%. Sai số kiểm chứng mô hình là: MAE = 20 m³/ha; MAE%=23%; RMSE = 26 m³/ha; RMSE%=38%. Chênh lệch giữa MAE%, RMSE% của mô hình và kiểm chứng lần lượt là: $\Delta_{MAE\%}=3\%$ và $\Delta_{RMSE\%}=1\%$.

Mô hình tối ưu được lựa chọn trong trường hợp này là mô hình:

$$M = \text{EXP}(0,00022 * HV(K)_{TB} + 0,00096 * PC1(K)_{TB} + 0,02024 * DOC(K)_{TB} - 10,191) \quad (4.7)$$

Với cùng điều kiện, khi sử dụng phương pháp trích xuất thông tin theo KTCS, mô hình xác định M tốt nhất (mô hình 4.5), cho sai số kiểm chứng: RMSE=32 m³/ha; MAE=25 m³/ha; MAE%=29%; RMSE%=48% đều lớn hơn so với sai số của mô hình xác định M tốt nhất khi kết hợp ảnh với ranh giới lô kiểm kê (mô hình 4.7). Chứng tỏ, sử dụng đơn vị tính toán đồng nhất là lô kiểm kê rừng trên KTCS ảnh 13x13 đã làm tăng độ chính xác của mô hình xác định M rừng gỗ tự nhiên LRTX tại khu vực nghiên cứu.

4.5. Lựa chọn, hiệu chỉnh, đánh giá các mô hình xác định M

4.5.1. Lựa chọn, hiệu chỉnh các mô hình xác định M

Nghiên cứu đã xây dựng các mô hình xác định M cho đối tượng rừng gỗ tự nhiên LRTX tại tỉnh Đắk Nông từ từng loại ảnh LANDSAT-8, ALOS-2/PALSAR-2 và kết hợp hai loại ảnh theo 2 phương pháp trích xuất giá trị từ ảnh: (1) KTCS; (2) Kích thước là phần giao giữa KTCS ảnh với ranh giới lô KK. Hai mô hình xác định M tốt nhất tương ứng với 2 phương pháp lọc ảnh là mô hình có phương trình chính tắc (4.5) và (4.7).

Mặc dù các mô hình lựa chọn được đã đáp ứng các tiêu chí về mặt thống kê và có hệ số tương quan cao nhất, sai số thấp nhất. Nhưng do mối quan hệ giữa M với các chỉ tiêu trên ảnh và phi ảnh phức tạp nên các hàm toán học thông thường có thể không mô phỏng đúng mối quan hệ này trên cả khoảng trữ lượng của kiểu rừng mà chỉ đúng trên từng khoảng trữ lượng nhất định.

Số liệu thực nghiệm cho thấy: M có quan hệ đồng biến với: $HV13_{TB}$, $PC1_{13TB}$ (mô hình 4.5) và $HV(K)_{TB}$, $PC1(K)_{TB}$ (mô hình 4.7). Nhằm sử dụng hết giá trị của các biến số đầu vào của mô hình, tương ứng với: mô hình (4.5) tác giả sử dụng biến $\sqrt{HV13_{TB} * PC1_{13TB}}$, mô hình (4.7) tác giả sử dụng biến $\sqrt{HV(K)_{TB} * PC1(K)_{TB}}$ để xây dựng 2 mô hình phụ.

$$M = \text{EXP}[(\sqrt{HV13_{TB} * PC1_{13TB}} - 12391)/731,94] \quad (4.8)$$

Mô hình có: MAE = 39 m³/ha; MAE% = 34%; RMSE = 56 m³/ha và RMSE% = 48% đều lớn hơn so với các giá trị tương ứng của mô hình (4.5).

$$M = \text{EXP}[(\sqrt{HV(K)_{TB} * PC1(K)_{TB}} - 12452)/728,91] \quad (4.9)$$

Sai số mô hình: MAE = 36 m³/ha; MAE% = 31%; RMSE = 53 m³/ha và RMSE% = 43% lớn hơn so với các giá trị tương ứng của mô hình (4.7).

Mặc dù hai mô hình (4.8) và (4.9) đều có các loại sai số lớn hơn so với hai mô hình tương ứng (4.5) và (4.7) khi tính chung cho cả kiểu rừng, nhưng kết quả:

- Trong khoảng trữ lượng thực tế (M_{TT}) nhỏ hơn 200 m³/ha giữa trữ của mô hình (4.8) và (4.9) với M_{TT} trung bình chênh lệch nhau thấp hơn đáng kể so với khoảng chênh lệch này ở mô hình (4.5) và (4.7).

- Trong khoảng $M_{TT} > 200$ m³/ha: trữ lượng tính toán từ mô hình (4.5) và mô hình (4.7) đều nhỏ hơn M_{TT} trung bình. Trong khi đó, trữ lượng tính toán từ mô hình (4.8) và mô hình (4.9) có xu hướng lớn hơn M_{TT} trung bình.

Để hạn chế mức chênh giữa M_{TT} và M của mô hình trung bình theo khoảng M_{TT} , bằng kết quả thực nghiệm, tác giả đề xuất mô hình xác định M rừng gỗ tự nhiên LRTX tại tỉnh Đắk Nông như sau:

- Mô hình xác định M theo KTCS lọc ảnh là mô hình kết hợp giữa hai phương trình chính tắc: (4.5) và (4.8) với nguyên tắc kết hợp:

$$M = \begin{cases} M_{LT(4.8)} & \text{Trong điều kiện } M_{LT(4.5)} \leq 200 \text{ m}^3/\text{ha} \\ M_{LT(4.5)} & M_{LT(4.5)} > 200 \text{ m}^3/\text{ha} \end{cases} \quad (4.10)$$

Trong đó: $M_{LT(4.5)}$, $M_{LT(4.8)}$ là trữ lượng lý thuyết tương ứng tính theo các phương trình chính tắc (4.5) và (4.8).

- Mô hình xác định M theo KTCS lọc ảnh giao với lô kiểm kê là mô hình kết hợp giữa hai phương trình chính tắc (4.7) và (4.9) với nguyên tắc kết hợp:

$$M = \begin{cases} M_{LT(4.9)} & \text{Trong điều kiện } M_{LT(4.7)} \leq 200 \text{ m}^3/\text{ha} \\ M_{LT(4.7)} & M_{LT(4.7)}: 200 \div 250 \text{ m}^3/\text{ha} \\ \frac{(M_{LT(4.7)} + M_{LT(4.9)})}{2} & M_{LT(4.7)} > 250 \text{ m}^3/\text{ha} \end{cases} \quad (4.11)$$

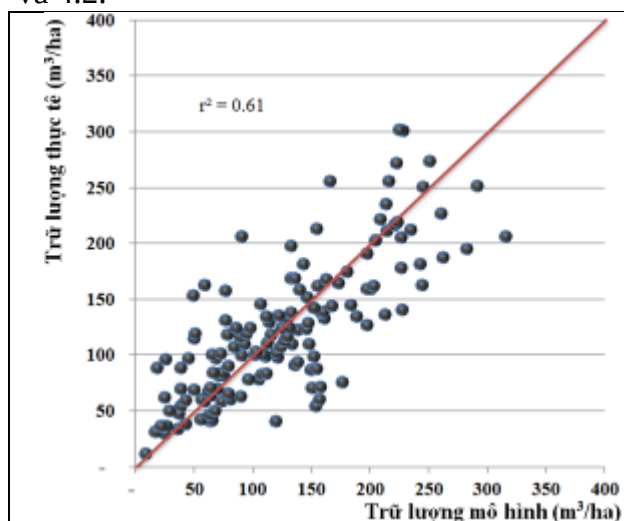
Trong đó: $M_{LT}(4.7)$, $M_{LT}(4.9)$ là trữ lượng lý thuyết tương ứng tính theo các phương trình chính tắc (4.7) và (4.9)

Kết quả xác định sai số của các mô hình xác định trữ lượng (4.10) và (4.11) được thể hiện tại bảng 4.2.

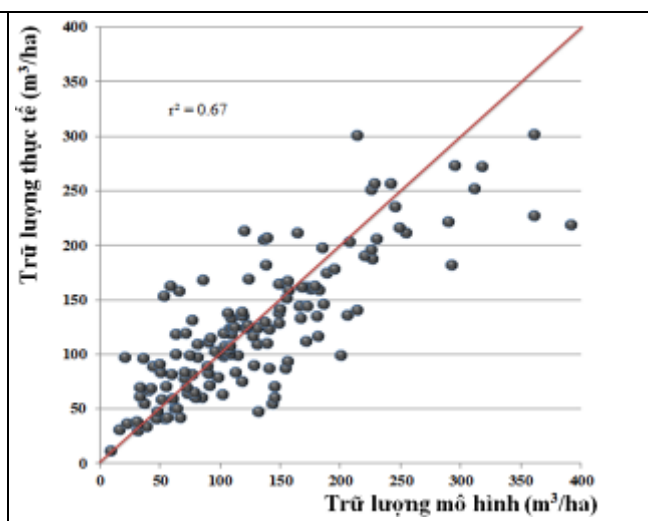
Bảng 4.2. Kết quả xác định sai số của các mô hình xác định M (4.10) và (4.11)

Tên mô hình	Loại sai số	Kiểu/ Trạng thái rừng	Sai số					
			MAE	MAE%	RMSE	% RMSE	MAE _{Max}	MAE% _{Max}
(4.20)	Mô hình	Kiểu rừng	33	31	43	44	116	192
		Nghèo	29	44	40	61	100	192
		Trung bình	33	23	43	29	104	68
		Giàu	40	17	54	23	116	56
	Kiểm chứng	Kiểu rừng	35	35	44	49	137	201
		Nghèo	26	44	31	61	68	201
		Trung bình	44	32	54	43	137	136
		Giàu	34	15	41	19	68	33
(4.21)	Mô hình	Kiểu rừng	32	29	44	41	172	181
		Nghèo	27	40	37	55	102	181
		Trung bình	28	20	39	27	111	65
		Giàu	55	24	69	30	172	79
	Kiểm chứng	Kiểu rừng	30	29	43	43	168	161
		Nghèo	24	40	32	55	94	161
		Trung bình	31	23	42	33	122	122
		Giàu	44	18	65	26	168	66

Mối quan hệ giữa: (1) M_{TT} tại các ô mẫu và trữ lượng lý thuyết của mô hình 4.10; (2) M_{TT} tại các ô mẫu và trữ lượng lý thuyết của mô hình 4.11 được thể hiện tương ứng tại hình 4.1 và 4.2.



Hình 4.1. Mối quan hệ giữa M_{TT} tại các ô mẫu và trữ lượng của mô hình (4.10)



Hình 4.2. Mối quan hệ giữa M_{TT} tại các ô mẫu và trữ lượng của mô hình (4.11)

4.5.2. Đánh giá các mô hình xác định M

Để đánh giá các mô hình (4.10) và (4.11), tác giả phân M_{TT} và trữ lượng tính toán từ mô hình tại vị trí các OTC sử dụng để xây dựng và kiểm chứng mô hình vào một trong ba trạng thái rừng căn cứ vào M_{TT} (Rừng nghèo ($M_{TT} \leq 100$ m³/ha); Rừng trung bình (M_{TT} : 100÷200 m³/ha);

Rừng giàu ($M_{TT} > 200 \text{ m}^3/\text{ha}$)). Trong mỗi trạng thái rừng: (1) tính phần trăm số điểm có sai số tuyệt đối (MAE): $<20 \text{ m}^3/\text{ha}$; $<40 \text{ m}^3/\text{ha}$; $<60 \text{ m}^3/\text{ha}$; $<80 \text{ m}^3/\text{ha}$ và $\geq 80 \text{ m}^3/\text{ha}$; (2) tính phần trăm số điểm có sai số tương đối (MAE%): $<20\%$; $<40\%$; $<60\%$; $<80\%$ và $\geq 80\%$. Kết quả thể hiện tại bảng 4.3 và 4.4.

4.5.2.1. Mô hình (4.10) – Mô hình 1

Bảng 4.3. Phần trăm số điểm của mô hình và kiểm chứng mô hình (4.10) theo ngưỡng giá trị sai số tuyệt đối và tương đối

Phân theo	Kiểu/ Trạng thái rừng	Phần trăm số điểm kiểm chứng theo ngưỡng giá trị sai số (đơn vị tính: %)									
		Ngưỡng giá trị sai số tuyệt đối (m^3/ha)					Ngưỡng giá trị sai số tương đối (%)				
		<20	<40	<60	<80	≥ 80	<20	<40	<60	<80	≥ 80
Mô hình	Kiểu rừng	44	71	80	90	<u>10</u>	43	75	91	96	<u>4</u>
	Nghèo	54	74	82	91	<u>9</u>	26	61	82	89	<u>11</u>
	Trung bình	39	71	80	91	<u>9</u>	48	82	95	100	0
	Giàu	30	60	75	85	<u>15</u>	70	90	100	100	0
Kiểm chứng	Kiểu rừng	34	65	85	93	<u>7</u>	42	72	83	92	<u>8</u>
	Nghèo	45	72	97	100	0	34	59	79	86	<u>14</u>
	Trung bình	22	59	75	84	<u>16</u>	41	75	81	94	<u>6</u>
	Giàu	40	60	80	100	0	70	100	100	100	0

4.5.2.2. Mô hình (4.11) – Mô hình 2

Bảng 4.4. Phần trăm số điểm của mô hình và kiểm chứng mô hình (4.11) theo ngưỡng giá trị sai số tuyệt đối và tương đối

Phân theo	Kiểu/ Trạng thái rừng	Phần trăm số điểm kiểm chứng theo ngưỡng giá trị sai số (đơn vị tính: %)									
		Ngưỡng giá trị sai số tuyệt đối (m^3/ha)					Ngưỡng giá trị sai số tương đối (%)				
		<20	<40	<60	<80	≥ 80	<20	<40	<60	<80	≥ 80
Mô hình	Kiểu rừng	47	72	84	91	<u>9</u>	50	76	90	97	<u>3</u>
	Nghèo	53	77	86	93	<u>7</u>	32	65	81	91	<u>9</u>
	Trung bình	52	77	88	92	<u>8</u>	67	82	95	100	0
	Giàu	15	40	65	80	<u>20</u>	50	85	95	100	0
Kiểm chứng	Kiểu rừng	46	72	86	94	<u>6</u>	52	76	89	92	<u>8</u>
	Nghèo	55	83	93	97	<u>3</u>	38	66	79	83	<u>17</u>
	Trung bình	41	66	84	94	<u>6</u>	63	81	97	97	<u>3</u>
	Giàu	40	60	70	90	<u>10</u>	60	90	90	100	0

4.6. Quy trình xác định M từ ảnh vệ tinh tại tỉnh Đắk Nông

4.6.1. Quy trình xác định M theo mô hình 4.10

Quy trình xác định M theo mô hình 4.10 minh họa tại hình 4.3. Cụ thể:

(1) - Dữ liệu ảnh đầu vào thực hiện quy trình: Ảnh LANDSAT-8; Ảnh ALOS-2/PALSAR-2 đã nắn chỉnh hình học về lưới chiếu bản đồ, hệ tọa độ UTM; Ranh giới các lô rừng gỗ tự nhiên LRTX tại tỉnh Đắk Nông; Mô hình số độ cao SRTM DEM.

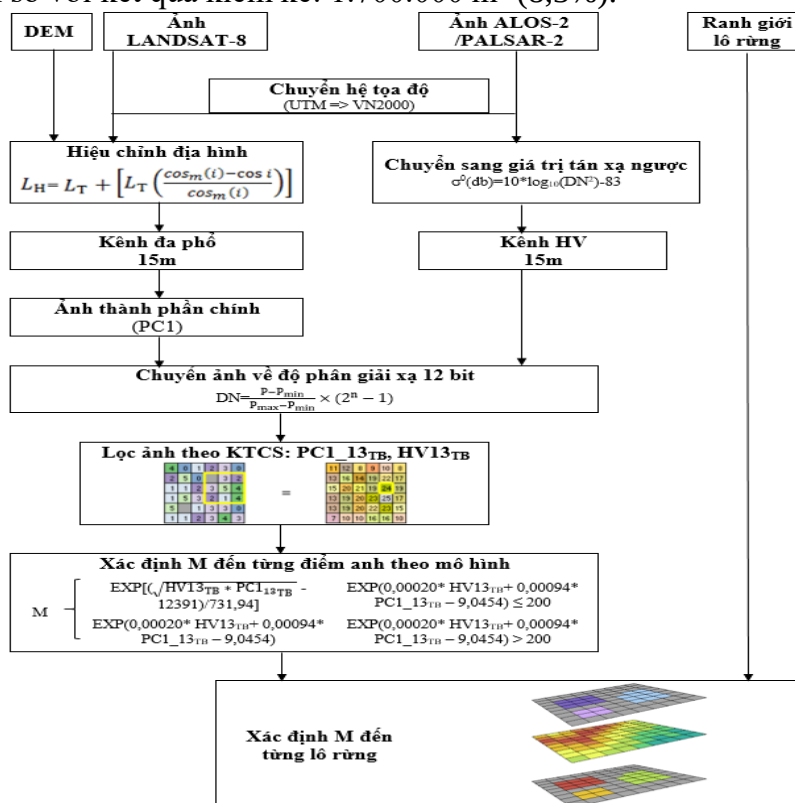
(2) - Xử lý dữ liệu: Chuyển các kênh (từ 1 đến 8) ảnh LANDSAT-8; kênh HV ảnh ALOS-2/PALSAR-2 từ hệ UTM sang hệ VN2000; Hiệu chỉnh ảnh hưởng của địa hình trên ảnh LANDSAT-8; Tạo kênh đa phổ ảnh LANDSAT-8 độ phân giải không gian 15m; Tạo ảnh thành phần chính cho từng cảnh ảnh LANDSAT-8 từ các kênh đa phổ độ phân giải không gian 15m; Chuyển kênh HV về độ phân giải không gian 15m bằng phương pháp nội suy Bi-linear; Chuyển kênh thành phần chính PC1 trên ảnh LANDSAT-8, kênh HV trên ảnh ALOS-2/PALSAR-2 về cùng độ phân giải xạ 12 bit bằng phương pháp nội suy Bi-linear.

(3) - Lọc ảnh, xác định M đến từng điểm ảnh: Lọc giữ nguyên độ phân giải không gian kênh thành phần chính PC1 trên ảnh LANDSAT-8, kênh HV trên ảnh ALOS-2/PALSAR-2 với KTCS lọc 13x13; Xác định M đến từng điểm ảnh theo công thức (4.12)

$$M = \begin{cases} \text{EXP}[(\sqrt{HV13_{TB}} * PC1_{13_{TB}}} - 12391)/731,94] & \text{EXP}(0,00020 * HV13_{TB} + 0,00094 * PC1_{13_{TB}} - 9,0454) \leq 200 \\ \text{EXP}(0,00020 * HV13_{TB} + 0,00094 * PC1_{13_{TB}} - 9,0454) & \text{EXP}(0,00020 * HV13_{TB} + 0,00094 * PC1_{13_{TB}} - 9,0454) > 200 \end{cases} \quad (4.12)$$

(4) - Xác định M đến từng lô rừng: Chồng xếp lớp ranh giới lô rừng nên trên ảnh đã xác định M đến từng điểm ảnh và xác định M cho từng lô rừng.

(5) - Vận dụng quy trình xác định trữ lượng rừng: Tổng trữ lượng rừng gỗ tự nhiên LRTX tỉnh Đắk Nông tính theo mô hình (4.10) là: 18.839.453 m³ (18.800.000 m³). Theo kết quả kiểm kê rừng (KKR) tại cùng thời điểm, tổng trữ lượng của kiểu rừng là: 20.500.000 m³. So sánh kết quả xác định M theo mô hình và theo kết quả KKR cho thấy: Tổng trữ lượng tính theo mô hình thấp hơn so với kết quả kiểm kê: 1.700.000 m³ (8,3%).



Hình 4.3. Sơ đồ quy trình xác định M theo mô hình 4.10

4.6.2. Quy trình xác định M theo mô hình 4.11

Quy trình xác định M theo mô hình 4.11 minh họa tại hình 4.4. Cụ thể:

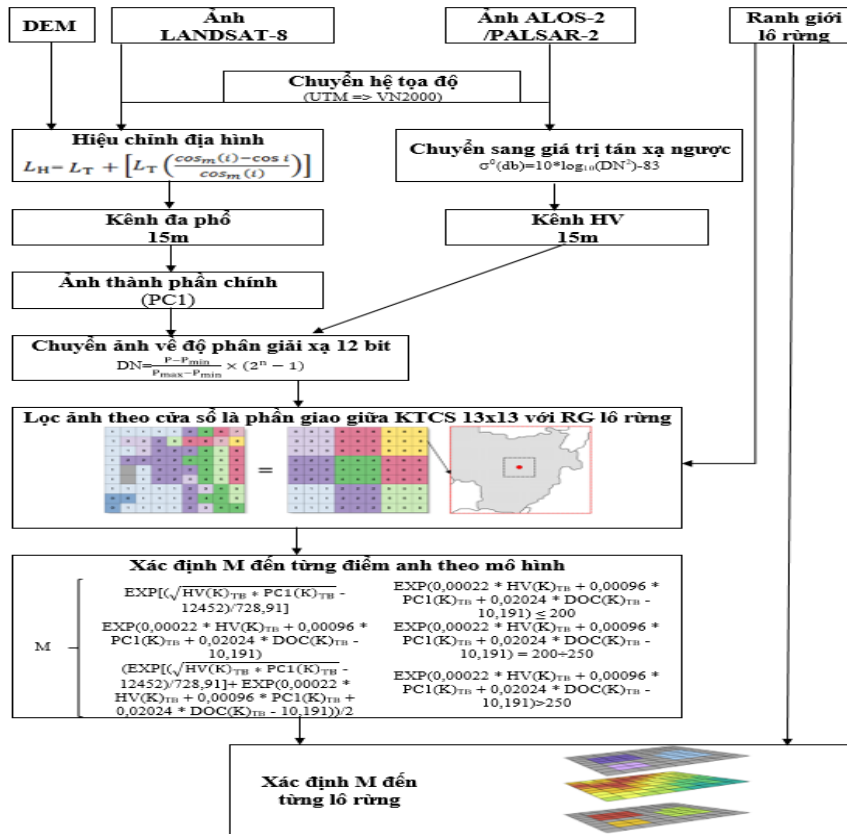
(1) - Yêu cầu dữ liệu đầu vào thực hiện quy trình: tương tự yêu cầu dữ liệu đầu vào thực hiện quy trình xác định M theo mô hình 4.10.

(2) - Xử lý dữ liệu: tương tự như với mô hình 4.10.

(3) - Lọc ảnh, xác định M đến từng điểm ảnh: Đánh số thứ tự các lô rừng từ 1 đến n (n là tổng số lô rừng) và chuyển lớp lô từ dạng vector sang dạng raster với thuộc tính là trường thứ tự, độ phân giải không gian 15m (gọi là lớp Ras1); Tạo lớp lưới dạng vùng phủ trùm đối tượng nghiên cứu, kích thước lưới 195m và đánh số thứ tự cho các ô lưới từ n+1 đến m (m-n-1 là tổng số ô lưới) và chuyển lớp ô lưới từ dạng vector sang dạng raster với thuộc tính là trường thứ tự, độ phân giải không gian 15m (gọi là lớp Ras2); Nhân hai lớp vector Ras1 và Ras2 với nhau, tạo ra lớp raster mới (gọi là Ras); Lọc giữ nguyên độ phân giải kênh thành phần chính PC1 trên ảnh LANDSAT-8, kênh HV trên ảnh ALOS-2/PALSAR-2 theo lớp Ras; Xác định M đến từng điểm ảnh theo công thức (4.13)

$$M = \begin{cases} \text{EXP}[(\sqrt{HV(K)_{TB} * PC1(K)_{TB}} - 12452)/728,91] & \text{EXP}(0,00022 * HV(K)_{TB} + 0,00096 * PC1(K)_{TB} + 0,02024 * DOC(K)_{TB} - 10,191) \leq 200 \\ \text{EXP}(0,00022 * HV(K)_{TB} + 0,00096 * PC1(K)_{TB} + 0,02024 * DOC(K)_{TB} - 10,191) & \text{EXP}(0,00022 * HV(K)_{TB} + 0,00096 * PC1(K)_{TB} + 0,02024 * DOC(K)_{TB} - 10,191) = 200 \div 250 \\ (\text{EXP}[(\sqrt{HV(K)_{TB} * PC1(K)_{TB}} - 12452)/728,91] + \text{EXP}(0,00022 * HV(K)_{TB} + 0,00096 * PC1(K)_{TB} + 0,02024 * DOC(K)_{TB} - 10,191))/2 & \text{EXP}(0,00022 * HV(K)_{TB} + 0,00096 * PC1(K)_{TB} + 0,02024 * DOC(K)_{TB} - 10,191) > 250 \end{cases} \quad (4.13)$$

(4) - Xác định M đến từng lô rừng: Chồng xếp lớp ranh giới lô rừng lên trên ảnh đã xác định M đến từng điểm ảnh và xác định M cho từng lô rừng tương tự như xác định M đến từng lô rừng theo mô hình 4.10.



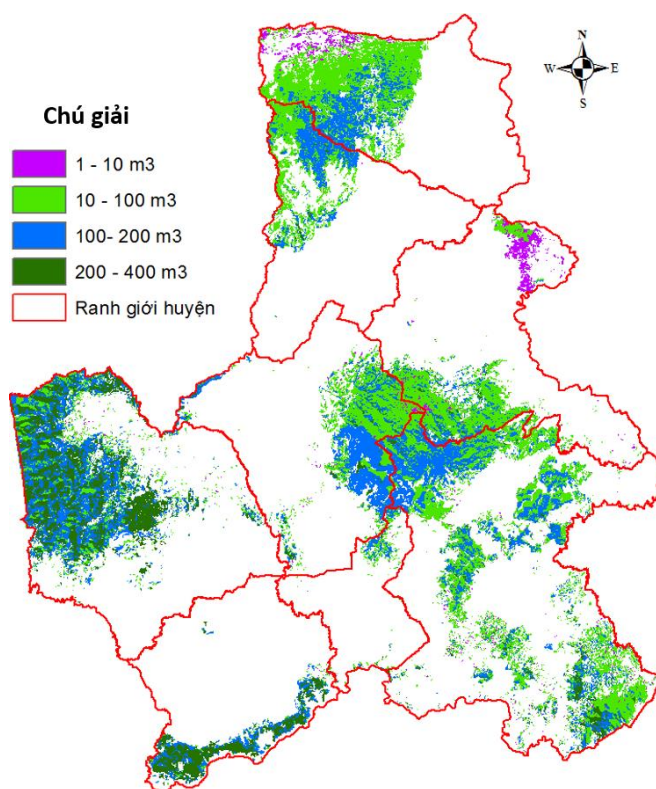
Hình 4.4. Sơ đồ quy trình xác định M theo mô hình 4.11

(5) Vận dụng quy trình xác định M: Tổng M rừng gỗ tự nhiên LRTX tỉnh Đắk Nông tính theo mô hình (4.11) là: 19.899.336 m³ (19.900.000 m³). So sánh kết quả xác định M theo mô hình và theo kết quả kiểm kê rừng cho thấy: Tổng M tính theo mô hình thấp hơn so với kết quả kiểm kê: 600.000 m³ (tương đương 2,9%). Như vậy:

+ Khi vận dụng mô hình (4.11) để xác định M cho kiểu rừng gỗ tự nhiên LRTX tại khu vực, tổng M tính theo mô hình sai khác nhỏ hơn 3% so với tổng trữ lượng KKR;

+ Giữa tổng M tính theo mô hình (4.10) và (4.11) thì tổng M theo mô hình (4.21) sát so với kết quả KKR hơn. Điều đó chứng tỏ, sử dụng mô hình (4.11) để xác định M cho kiểu rừng gỗ tự nhiên LRTX tại Đắk Nông tốt hơn so với mô hình (4.10).

Bản đồ phân bố M rừng gỗ tự nhiên LRTX xây dựng theo mô hình 4.11 đến từng lô rừng tại tỉnh Đắk Nông thể hiện tại hình 4.5.



Hình 4.5. Ảnh phân bố M rừng gỗ tự nhiên LRTX xây dựng theo mô hình 4.11 đến từng lô rừng tại tỉnh Đắk Nông

4.7. Thảo luận

Nghiên cứu kỹ thuật xác định M từ ảnh vệ tinh là nghiên cứu: (1) Kỹ thuật lựa chọn ảnh vệ tinh sử dụng để xác định M: căn cứ vào bản chất của ảnh phù hợp với các điều kiện cụ thể tại khu vực nghiên cứu; (2) Kỹ thuật xử lý ảnh: yêu cầu mức xử lý của ảnh do nhà sản xuất cung cấp và các bước xử lý cần thiết của người dùng: hiệu chỉnh địa hình, chuyển đổi giá trị phổ, lọc ảnh...trước khi sử dụng để xác định M; (3) Kỹ thuật lựa chọn các biên từ ảnh giữa vào kinh nghiệm kết hợp với kiểm chứng tại khu vực cụ thể; (4) Kỹ thuật xác định M tại hiện trường trên các OTC; (5) Kỹ thuật lựa chọn các thuật toán để xây dựng mô hình xác định M giữa vào kinh nghiệm kết hợp với kiểm chứng tại khu vực cụ thể; (6) Kỹ thuật đánh giá sai số của các mô hình

và xác định các yếu tố chính về kỹ thuật ảnh hưởng đến độ chính xác của mô hình xác định M trong mối quan hệ giữa yêu cầu độ chính xác cần đạt được với điều kiện cụ thể về tài chính, phương pháp và trang thiết bị xử lý ảnh theo khu vực nghiên cứu; (7) Kỹ thuật xác định M đến từng điểm ảnh; (8) Kỹ thuật xác định M đến từng lô rừng. Từ đó, căn cứ vào kết quả nghiên cứu, trong điều kiện cụ thể tại Việt Nam nói chung và tỉnh Đắk Nông nói riêng, luận án tập trung thảo luận các vấn đề sau:

4.7.1. Lựa chọn ảnh sử dụng để xác định trữ lượng rừng

Có nhiều cách phân loại ảnh viễn thám, căn cứ vào chiều dài bước sóng, chia thành: ảnh quang học, ảnh RADAR và ảnh LIDAR. Trong đó: dữ liệu quang học được sử dụng rộng rãi nhất để xác định trữ lượng rừng, tiếp theo đến ảnh RADAR và cuối cùng là ảnh LIDAR. Điều này có vẻ trái ngược với bản chất dữ liệu của chúng, vì: LIDAR là nguồn tư liệu cung cấp thông tin tương đối đầy đủ về một khu rừng; Ảnh RADAR chỉ có khả năng cung cấp một số thông tin so với ảnh LIDAR; Ảnh Quang học chỉ có được các thông tin trên đỉnh của tán cây, gần như không có thông tin ba chiều về các đối tượng trên mặt đất. Do đó, các quyết định sử dụng loại tư liệu nào hiện nay thường xem xét đến tính khả dụng của tư liệu, chi phí và mức độ phức tạp của phân tích hơn là hệ thống nào sẽ cung cấp thông tin toàn diện nhất về một khu rừng.

Việc lựa chọn 2 loại tư liệu: LANDSAT-8 và ALOS-2/PALSAR-2 là tối ưu trên cả 2 khía cạnh: (1) Nghiên cứu; (2) Ứng dụng thực tiễn trong điều kiện của nước ta.

- Xét trên khía cạnh nghiên cứu: LANDSAT-8 là ảnh vệ tinh quang học có độ phân giải không gian trung bình, được cung cấp miễn phí mang thông tin về tán rừng; ALOS-2/PALSAR-2 là ảnh RADAR kênh L về mặt lý thuyết có thể mang thông tin về cành và thân cây để nghiên cứu xây dựng các mô hình xác định M cho tỉnh Đắk Nông. Do đó, việc lựa chọn hai loại tư liệu ảnh này là căn cứ vào bản chất dữ liệu của chúng có thể cung cấp các thông tin hữu ích phục vụ cho việc xác định M.

- Xét trên khía cạnh ứng dụng: LANDSAT-8 và thế hệ tiếp theo là LANDSAT-9 (dự kiến đưa vào hoạt động từ 2020) sẽ cung cấp lâu dài nguồn ảnh vệ tinh quang học, độ phân giải không gian trung bình. Ảnh ALOS-2/PALSAR-2 chụp được trong mọi điều kiện thời tiết, nên hoàn toàn có thể cung cấp ảnh ở bất kỳ vị trí nào tại nước ta theo thời gian. Đặc biệt, gần đây tư liệu ALOS-2/PALSAR-2 được tạo bằng cách ghép các dải ảnh liên tục trong một năm ở độ phân giải 25m cung cấp miễn phí đến người sử dụng với độ trễ của dữ liệu khoảng 1 năm tạo ra cơ hội để sử dụng loại tư liệu này vào xác định M. Do đó, luôn có sẵn nguồn ảnh sử dụng để xây dựng mô hình. Đây là điều kiện tiên quyết để mở rộng nghiên cứu này tại các địa phương, kiểu rừng khác nhằm hoàn thiện quy trình và xây dựng nên các mô hình, chương trình cho phép xác định M rừng tại nước ta.

Trên ảnh LANDSAT-8 thường có mây và bóng mây, nếu sử dụng để xác định M sẽ ảnh hưởng đến kết quả. Nguyên nhân là do các giá trị trên ảnh tại những khu vực có mây và bóng mây không phản ánh đúng đối tượng trên mặt đất. Việc xác định M không yêu cầu ảnh phải cập

nhật liên tục như đối với giám sát rừng. Vì vậy, tùy theo thời gian cần xác định M một số giải pháp để hạn chế ảnh hưởng của mây và bóng mây như sau:

- Chọn các ảnh ít bị mây che phủ, sau đó loại bỏ những khu vực có mây trước khi sử dụng để xác định M: Theo kết quả theo dõi nhiều năm của tác giả, hàng năm luôn chọn được các cảnh ảnh LANDSAT-8 có độ che phủ mây nhỏ ($<5\%$) tại Đắk Nông nhưng các cảnh ảnh này chỉ chụp được trong mùa khô. Tác giả thống kê cho cảnh ảnh có mã hiệu 124_052 (cảnh ảnh LANDSAT-8 chính tại tỉnh Đắk Nông) trong giai đoạn 2014-2018, cho thấy: một năm thu nhận trung bình 19 cảnh ảnh, nhưng chỉ có trung bình 2 ảnh có độ phủ mây dưới 5% đạt tỷ lệ gần 13%. Như vậy, số ảnh có tỷ lệ mây ($<5\%$) nhỏ hơn nhiều so với tổng số ảnh thu được.

- Sử dụng nhiều ảnh trong một khoảng thời gian: do các đám mây trên ảnh không cố định, dẫn đến ở các cảnh ảnh khác nhau thì vị trí bị mây che phủ khác nhau. Từ đó có thể lựa chọn những khu vực không có mây trên các cảnh ảnh khác nhau để tạo ra ảnh không có mây.

Sau khi lựa chọn được ảnh LANDSAT-8, căn cứ vào thời gian để chọn ảnh ALOS-2/PALSAR-2 phù hợp sao cho 2 loại tư liệu này đều được chụp trong một khoảng thời gian nhất định. Mục đích của việc lựa chọn này nhằm giảm thiểu ảnh hưởng của yếu tố mùa vụ, sự chênh lệch về thời gian thu nhận giữa 2 loại ảnh, sự chênh lệch giữa thời gian thu ảnh với thời gian thu thập số liệu tại hiện trường... làm ảnh hưởng tới kết quả xác định M.

4.7.2. Thu thập và tính toán trữ lượng rừng tại thực địa

Số liệu về M xác định thông qua các OTC tại thực địa là căn cứ rất quan trọng để xây dựng nên các mô hình cho phép xác định M từ ảnh. Một số phương pháp thu thập số liệu hiện trường để xác định M có thể kể đến: (1) Chặt hạ và đo đếm trực tiếp; (2) Xác định M thông qua các thông tin đo đạc không cần tác động vào đối tượng rừng; (3) Sử dụng các mô hình hoặc số liệu có sẵn, kết hợp với số liệu điều tra hiện tại để xác định M.

Luận án sử dụng phương pháp thứ ba để xác định M tại hiện trường. Sau khi thiết lập được các OTC, đo đếm đường kính, chiều cao các cây trong OTC theo phương pháp thứ hai. Sử dụng biểu thức tích 2 nhân tố lập chung toàn quốc cho rừng tự nhiên LRTX – tổ hình dạng 3 (Lập theo phương pháp thứ nhất) để xác định thể tích của từng cây cá lẻ, sau đó xác định tổng thể tích của các cây trong OTC và M tại vị trí các OTC. Như vậy, việc thu thập và tính toán M tại thực địa mang tính khả thi và đảm bảo độ tin cậy nhất có thể trong điều kiện đóng cửa rừng tự nhiên hiện nay để thực hiện các nội dung nghiên cứu.

Việc điều tra để có thông tin trữ lượng trên các ô mẫu thường tốn nhiều thời gian, công sức và kinh phí. Điều kiện này được xem là khó khăn nhất đối với việc xây dựng mô hình xác định M từ ảnh trong tương lai. Tuy nhiên, hiện nay nếu xem xét trong cơ sở dữ liệu về điều tra rừng tại nước ta nhận thấy: có một số lượng lớn các OTC về rừng đã được điều tra bởi nhiều đề tài, dự án khác nhau, chúng được phân bố ở hầu khắp các khu vực có rừng, được điều tra ở nhiều thời điểm khác nhau. Chỉ tính riêng 2 dự án: tổng điều tra kiểm kê rừng toàn quốc giai đoạn 2013 – 2016; Đánh giá, giám sát tài nguyên rừng quốc gia, giai đoạn 2016 -2020 đã điều tra chi tiết hàng chục nghìn OTC bao gồm cả OTC định vị và OTC tạm thời. Đây là nguồn tư liệu quý để nghiên cứu, xây

dựng cũng như hiệu chỉnh, đánh giá độ chính xác của các mô hình xác định M. Vì vậy, để tiết kiệm thời gian, kinh phí, công sức... cần nghiên cứu phương pháp sử dụng số liệu điều tra tại các OTC đã có để xây dựng mô hình xác định M. Việc nghiên cứu này cần hướng vào tạo dựng "ngân hàng" các OTC điều tra M ở mặt đất và công nghệ khai thác chúng trong xây dựng mô hình xác định M với các cảnh ảnh bất kỳ của những tư liệu ảnh khác nhau. Quan trọng nhất là phải xác định được M tại vị trí các OTC ở các thời điểm khác nhau. Giải pháp cho vấn đề này như sau:

- Kế thừa, xây dựng hệ thống cơ sở dữ liệu các OTC đã điều tra trên mặt đất của các chương trình, dự án trọng điểm mà quan trọng nhất là 2 dự án: Tổng điều tra kiểm kê rừng toàn quốc giai đoạn 2013 – 2016; Đánh giá, giám sát tài nguyên rừng quốc gia, giai đoạn 2016 -2020.

- Phát triển thuật toán, phần mềm tự động phát hiện biến động rừng tại vị trí OTC theo thời gian bằng ảnh vệ tinh: LANDSAT-8, SENTINEL-1, SENTINEL-2... Nếu phát hiện tại vị trí OTC có biến động bất thường (biến động do các nguyên nhân khác không phải do tăng trưởng rừng) thì loại bỏ OTC ra khỏi thư viện mẫu.

- Xây dựng các hàm tăng trưởng theo kiểu rừng, vùng địa lý để áp dụng xác định trữ lượng theo thời gian cho các OTC còn lại trong thư viện mẫu.

4.7.3. Lựa chọn các biến từ ảnh vệ tinh để xây dựng mô hình xác định M

Trong luận án, đầu tiên tác giả sử dụng kiến thức chuyên môn và kinh nghiệm trong lĩnh vực nghiên cứu để xác định sơ bộ các biến số đầu vào từ ảnh và phi ảnh sử dụng để xây dựng mô hình xác định M cho từng loại ảnh, sau đó sử dụng phương pháp phân tích hồi quy từng bước để loại bỏ các biến không có mối quan hệ, giữ lại các biến số có mối quan hệ với M thông qua hệ số tương quan r. Kết quả nghiên cứu với kiểu rừng gỗ tự nhiên LRTX tại Đắc Nông cho thấy:

- Từ 6 biến số trên ảnh LANDSAT-8 đưa vào thử nghiệm, lựa chọn được 3 biến số là giá trị trung bình kênh: NDVI, PC1, PC2 theo KTCS lọc ảnh có mối quan hệ với M;

- Từ 4 biến số trên ảnh ALOS-2/PALSAR-2 đưa vào thử nghiệm, lựa chọn được 2 biến là giá trị trung bình kênh tán xạ ngược: HH, HV theo KTCS lọc ảnh có mối quan hệ với M;

- Từ 3 biến số phi ảnh đưa vào thử nghiệm, lựa chọn được 1 biến số là độ dốc (DOC) có mối quan hệ với M.

Chỉ các biến số thực sự có mối quan hệ với M mới được sử dụng để xây dựng mô hình xác định M. Về nguyên tắc, tại mỗi KTCS lọc ảnh có thể đưa tất cả các biến trên ảnh và phi ảnh có mối quan hệ với M vào xây dựng mô hình xác định M. Tuy nhiên, nếu giữa các biến có mối quan hệ với nhau thì kết quả xây dựng được các mô hình có tính ổn định không cao. Do đó, tác giả tiến hành thăm dò mối quan hệ giữa các biến độc lập sử dụng để xây dựng mô hình xác định M ứng với từng KTCS. Kết quả là giữa 2 kênh ảnh: PC1 và NDVI trên ảnh LANDSAT-8; HH và HV trên ảnh ALOS-2/PALSAR-2 luôn có mối quan hệ với nhau rất chặt chẽ. Do đó, tác giả đã lựa chọn các biến số đầu vào để xây dựng mô hình đối với từng loại ảnh và kết hợp 2 loại ảnh:

- Ảnh LANDSAT-8: các mô hình được xây dựng với 2 trường hợp biến đầu vào: (1) PC1, PC2, DOC; (2) NDVI, PC2, DOC theo các KTCS lọc ảnh khác nhau.

- Ảnh ALOS-2/PALSAR-2: các mô hình được xây dựng với 2 trường hợp biến đầu vào: (1) HH, DOC; (2) HV, DOC theo các KTCS lọc ảnh khác nhau.

- Kết hợp ảnh ALOS-2/PALSAR-2 và LANDSAT-8: các mô hình được xây dựng với 4 trường hợp biến đầu vào: (1) NDVI, PC2, HV, DOC; (2) NDVI, PC2, HH, DOC; (3) PC1, PC2, HV, DOC; (4) PC1, PC2, HH, DOC theo các KTCS lọc ảnh khác nhau.

Như vậy, kết quả nghiên cứu đã xác định được các biến số trên ảnh và phi ảnh tồn tại mối quan hệ với M. Từ đó khẳng định có khả năng sử dụng từng loại ảnh vệ tinh LANDSAT-8 và ALOS-2/PALSAR-2 hoặc kết hợp chúng với nhau trong việc xác định M cho kiểu rừng gỗ tự nhiên LRTX tại tỉnh Đắk Nông.

4.7.4. Lựa chọn thuật toán sử dụng để xác định M từ ảnh

Rất nhiều thuật toán đã được phát triển cho việc xác định M từ ảnh, chúng có thể được chia thành hai nhóm: tham số và phi tham số. Trong đó, thuật toán tham số thường sử dụng các dạng phương trình tương đối quen thuộc nên được nhiều nghiên cứu sử dụng. Các thuật toán phi tham số thường gây khó hiểu cho người sử dụng về cách thức làm việc nên ít được sử dụng hơn. Tuy nhiên, nếu cần xây dựng các mô hình tự động xác định M trên diện rộng thì việc áp dụng các thuật toán phi tham số sẽ có lợi thế hơn vì chúng có thể tự động thiết lập mô hình xác định M căn cứ vào M tại thực địa và ảnh đầu vào, trong khi đó nếu sử dụng thuật toán tham số cần xây dựng lại mô hình.

Trong luận án, sau khi đã lựa chọn được các biến số trên ảnh và phi ảnh có mối quan hệ với M, tác giả đã sử dụng 4 thuật toán khác nhau để xây dựng các mô hình xác định M. Trong đó, hàm hồi quy đa biến được sử dụng để xây dựng và xác định các mô hình tốt nhất cho từng loại ảnh và kết hợp 2 loại ảnh với nhau. Sau đó, sử dụng các biến số đầu vào của những mô hình này để xây dựng mô hình xác định M bằng 3 thuật toán: ANN, RF, K-NN. Kết quả cho thấy, với cùng điều kiện đầu vào, khi sử dụng các thuật toán khác nhau, mô hình xác định M cho sai số khác nhau. Xu hướng chung là các mô hình xây dựng bằng hàm hồi quy đa biến có sai số thấp nhất và gần tương tự với mô hình xây dựng bằng thuật toán ANN, tiếp theo đến mô hình xây dựng bằng thuật toán RF, mô hình xây dựng bằng thuật toán K-NN có sai số cao nhất.

Như vậy, bước đầu khẳng định: thuật toán khác nhau ảnh hưởng đến độ chính xác của mô hình xác định M. Từ đó, luận án lựa chọn được thuật toán tối ưu cho xác định M rừng gỗ tự nhiên LRTX tại tỉnh Đắk Nông là sử dụng hàm hồi quy đa biến và thuật toán ANN từ các thuật toán đang áp dụng phổ biến hiện nay.

4.7.5. Sai số xác định trữ lượng rừng từ ảnh vệ tinh

4.7.5.1. Sai số xác định M từ ảnh LANDSAT-8

Khi sử dụng ảnh LANDSAT-8 để xây dựng mô hình xác định M, sai số của mô hình xác định M tốt nhất nằm trong ngưỡng sai số so với kết quả của một số nghiên cứu trên thế giới cùng sử dụng tư liệu ảnh LANDSAT.

Tại Việt Nam chưa thấy công trình nào công bố về vấn đề xác định M từ ảnh LANDSAT-8 nói riêng hoặc LANDSAT nói chung, song so với các nghiên cứu về xác định M từ ảnh vệ tinh quang học khác, sai số xác định M cho từng điểm ảnh của nghiên cứu này nằm trong giới hạn sai số của các công trình đã công bố.

Tư liệu ảnh LANDSAT-8 luôn có sẵn, được cung cấp miễn phí nhưng do sai số còn cao nên

các kỹ thuật và mô hình trong nghiên cứu này chỉ nên áp dụng để xác định nhanh trữ lượng trung bình cho các khu rừng tự nhiên LRTX khác với các đặc tính tương tự.

4.7.5.2. Sai số xác định M từ ảnh ALOS-2/PALSAR-2

Khi sử dụng ảnh ALOS-2/PALSAR-2 để xây dựng mô hình xác định M, sai số của các mô hình: MAE: 35-41 m³/ha; MAE%: 37-45%; RMSE: 46-54 m³/ha; RMSE%: 59-77%. Trong đó, mô hình tốt nhất có: MAE_{MH}=35 m³/ha; MAE_{MH}(%)=37%; RMSE_{MH}=46 m³/ha; RMSE_{MH}(%)=59%.

Giá trị RMSE_{MH}(%) tốt nhất đạt 59% nằm trong phạm vi sai số của các nghiên cứu trên thế giới trên tư liệu ảnh RADAR band L.

Sai số tuyệt đối, sai số trung bình toàn phương của các mô hình tối ưu sử dụng ảnh ALOS-2/PALSAR-2 đều nhỏ hơn so với các mô hình tối ưu sử dụng ảnh LANDSAT-8. Chứng tỏ, việc sử dụng ảnh ALOS-2/PALSAR-2 để xác định M cho kiểu rừng gỗ tự nhiên LRTX tại khu vực nghiên cứu tốt hơn so với sử dụng ảnh LANDSAT-8.

Tuy sai số xác định M từ ảnh ALOS-2/PALSAR-2 thấp hơn so với ảnh LANDSAT-8, nhưng các giá trị sai số này vẫn còn cao khi xác định M cho một điểm ảnh cụ thể. Do đó, tương tự như với ảnh LANDSAT-8, các kỹ thuật và mô hình trong nghiên cứu này với ảnh ALOS-2/PALSAR-2 có thể được nhân rộng để xác định trữ lượng tổng thể cho từng kiểu rừng tại các khu rừng tự nhiên LRTX khác với đặc tính tương tự.

4.7.5.3. Sai số xác định M kết hợp ảnh LANDSAT-8 và ảnh ALOS-2/PALSAR-2

Kết hợp ảnh LANDSAT-8 với ALOS-2/PALSAR-2 để xây dựng mô hình xác định M, các mô hình tốt nhất cho sai số: MAE từ 28-32 m³/ha; MAE% từ 27-32%; RMSE từ 38-42 m³/ha và RMSE% từ 39-46%. Trong đó, sai số của mô hình tốt nhất (4.21): MAE_{MH}=32 m³/ha; MAE_{MH}(%)=29%; RMSE_{MH}=44 m³/ha; RMSE_{MH}(%)=41%. Các giá trị sai số này đều nhỏ hơn khi chỉ sử dụng một loại ảnh. Chứng tỏ, việc kết hợp 2 loại ảnh để xây dựng mô hình xác định M rừng gỗ tự nhiên LRTX tại khu vực nghiên cứu tốt hơn so với sử dụng từng loại ảnh.

Khi kết hợp 2 loại ảnh với ranh giới lô kiểm kê để xây dựng mô hình xác định M, mô hình tốt nhất cho sai số: MAE_{MH}=25 m³/ha; MAE_{MH}(%)=25%; RMSE_{MH}=33 m³/ha; RMSE_{MH}(%)=35%. Các giá trị sai số này đều nhỏ hơn khi chỉ sử dụng hai loại ảnh mà không kết hợp với ranh giới lô kiểm kê. Về bản chất, sự kết hợp giữa lô kiểm kê, ảnh ALOS-2/PALSAR-2, ảnh LANDSAT-8 chính là sự kết hợp của 3 loại tư liệu ảnh: (1) Ảnh quang học có độ phân giải cao sử dụng để khoanh vi lô (ranh giới lô kiểm kê tại khu vực nghiên cứu được khoanh vi từ ảnh SPOT-6); (2) ảnh RADAR band L (ALOS-2/PALSAR-2) và (3) ảnh quang học độ phân giải trung bình (LANDSAT-8) để xây dựng mô hình xác định M. Chứng tỏ, việc sử dụng ảnh quang học có độ phân giải cao để khoanh vi khu vực thành các lô có trạng thái tương đối đồng nhất. Sau đó, sử dụng lớp khoanh vi này để trích xuất giá trị phổ trên ảnh quang học có độ phân giải trung bình và trên ảnh RADAR band L làm biến đầu vào để xây dựng các mô hình xác định M có thể là giải pháp hiệu quả để giảm sai số của các mô hình. Vì ảnh vệ tinh quang học có độ phân giải cao bị hạn chế là giá trị phổ biến động lớn do bóng của tán cây và bóng của địa hình nên gây ra sai số cho mô hình tính toán M. Tuy nhiên, tư liệu ảnh này được đánh giá là tốt hơn so với ảnh RADAR và ảnh quang học có độ phân giải trung bình trong việc khoanh vi các đối tượng có trạng thái tương đối đồng nhất. Do đó, sự kết hợp này đã kết hợp được các ưu điểm, loại bỏ được những hạn chế của từng loại ảnh, dẫn đến hiệu quả xác định M tăng lên.

Trong điều kiện cụ thể tại tỉnh Đắk Nông, căn cứ vào bản đồ kết quả KKR và kết quả cập nhật diễn biến rừng, luôn có bản đồ ranh giới kiểu rừng (rừng gỗ tự nhiên LRTX) nhưng không có bản đồ ranh giới các trạng thái rừng. Nguyên nhân là do kiểu rừng không thay đổi theo thời gian, nhưng trạng thái rừng phụ thuộc vào M nên luôn thay đổi theo thời gian, không có thông số về M sẽ không biết được trạng thái rừng. Do đó, nếu sử dụng phương pháp truyền thống (phân tầng và nhân) để xác định M sẽ phải gán trữ lượng trung bình các OTC ($M_{TB}=123,8 \text{ m}^3/\text{ha}$) cho tất cả các vị trí trong kiểu rừng. Trong trường hợp này, sai số xác định trữ lượng trung bình đến từng điểm ảnh khi kiểm chứng đạt đến: $MAE_{KC}=48,3 \text{ m}^3/\text{ha}$; $MAE_{KC}(\%)=58,7\%$; $RMSE_{KC}=59,9 \text{ m}^3/\text{ha}$; $RMSE_{KC}(\%)=97,7\%$. Vì vậy, việc sử dụng ảnh vệ tinh để xác định M theo phương pháp nghiên cứu đã cải thiện đáng kể sai số so với phương pháp thường áp dụng trước đây.

Mặc dù chưa có nghiên cứu nào kết hợp: ALOS-2/PALSAR-2 và LANDSAT-8 để xác định M, nhưng so với các nghiên cứu trên các loại ảnh tương tự: sai số xác định M trong nghiên cứu này nằm trong phạm vi của các nghiên cứu đã công bố.

Kết hợp ảnh LANDSAT-8 và ALOS-2/PALSAR-2 cho kết quả xác định M có sai số chấp nhận được để áp dụng vào thực tiễn trong công tác điều tra và kiểm kê rừng.

KẾT LUẬN, TỒN TẠI VÀ KHUYẾN NGHỊ

1. Kết luận

Căn cứ vào kết quả đạt được, luận án rút ra các kết luận sau:

1) Nghiên cứu kỹ thuật xác định M từ ảnh vệ tinh gồm một loạt các bước công việc: Kỹ thuật lựa chọn ảnh; Kỹ thuật xử lý ảnh; Kỹ thuật lựa chọn các biến từ ảnh có quan hệ với M; Kỹ thuật xác định M tại hiện trường; Kỹ thuật lựa chọn các thuật toán để xây dựng mô hình xác định M; Kỹ thuật đánh giá sai số của các mô hình và xác định các yếu tố ảnh hưởng đến độ chính xác của mô hình xác định M; Kỹ thuật xác định M đến từng điểm ảnh; Kỹ thuật xác định M đến từng lô rừng.

2) Xác định được các biến số trên ảnh (LANDSAT-8; ALOS-2/PALSAR-2) và phi ảnh tồn tại mối quan hệ với M, từ đó khẳng định khả năng sử dụng từng loại hoặc kết hợp hai loại ảnh trong việc xác định M cho kiểu rừng gỗ tự nhiên LRTX tại Đắk Nông.

3) Lựa chọn được mô hình tối ưu sử dụng: từng loại ảnh (LANDSAT-8; ALOS-2/PALSAR-2), kết hợp 2 loại ảnh, kết hợp 2 loại ảnh với ranh giới lô rừng để xác định M bằng hàm hồi quy đa biến.

4) Với thuật toán phi tham số, mô hình xác định M xây dựng bằng thuật toán ANN cho sai số thấp nhất, tiếp theo đến mô hình xây dựng bằng thuật toán RF, mô hình xây dựng bằng thuật toán K-NN cho các loại sai số lớn nhất.

5) Lựa chọn được thuật toán tối ưu cho xác định M rừng gỗ tự nhiên LRTX tại tỉnh Đắk Nông là sử dụng hàm hồi quy đa biến và thuật toán ANN từ các thuật toán phổ biến đang áp dụng.

6) Kết hợp 2 loại ảnh LANDSAT-8 và ALOS-2/PALSAR-2 để xây dựng mô hình xác định M rừng gỗ tự nhiên LRTX tại Đắk Nông tốt hơn so với sử dụng từng loại ảnh.

7) Kết hợp 2 loại ảnh với ranh giới lô kiểm kê xây dựng được mô hình xác định M tốt nhất so với chỉ kết hợp hai loại ảnh hoặc chỉ sử dụng từng loại ảnh.

8) Xây dựng được 2 quy trình: i) Xác định M theo mô hình tối ưu kết hợp 2 loại ảnh; ii) Xác định M theo mô hình tối ưu kết hợp 2 loại ảnh với ranh giới lô kiểm kê xác định trữ lượng rừng gỗ tự nhiên LRTX từ ảnh vệ tinh tại Đắk Nông.

9) Sai số của mô hình tốt nhất sử dụng để xác định trữ lượng rừng gỗ tự nhiên LRTX tại tỉnh Đắk Nông từ từng loại và kết hợp 2 loại ảnh với nhau đạt được:

- Với ảnh LANDSAT-8: MAE=38 m³/ha; MAE(%)=35%; RMSE=53 m³/ha RMSE(%)=51%.

- Với ảnh ALOS-2/PALSAR-2: MAE=35 m³/ha; MAE(%)=37%; RMSE=46 m³/ha; RMSE_{MH}(%)=59%.

- Kết hợp 2 loại ảnh: MAE=33 m³/ha; MAE(%)=31%; RMSE=43 m³/ha; RMSE(%)=44%.

- Kết hợp 2 loại ảnh với ranh giới lô kiểm kê: MAE=32 m³/ha; MAE(%)=29%; RMSE=44 m³/ha; RMSE(%)=41%.

Sai số này nằm trong ngưỡng sai số so với kết quả của các nghiên cứu trên thế giới cùng sử dụng tư liệu ảnh tương tự.

2. Tồn tại

Mặc dù đã giải quyết trọn vẹn các nội dung và đáp ứng mục tiêu nghiên cứu đặt ra, Luận án còn một số tồn tại:

- Các cảnh ảnh ALOS-2/PALSAR-2 đều được chụp trong mùa khô tại khu vực (từ 9/2014 - 1/2015) nhưng sự khác nhau về thời gian, yếu tố góc chụp chưa được nghiên cứu, xử lý trong Luận án.

- Diện tích OTC chỉ sử dụng một loại là 1.000m² có thể vẫn chưa đủ lớn, dẫn đến những sai số nhất định khi xác định M từ ảnh, nhất là đối với ảnh LANDSAT-8.

3. Khuyến nghị

Mở rộng nghiên cứu xây dựng mô hình xác định M với các kích thước ô mẫu khác nhau để lựa chọn kích thước ô mẫu thực địa tối ưu để xây dựng mô hình xác định M cho từng loại ảnh.

Mở rộng nghiên cứu cho cùng kiểu rừng ở những khu vực khác, cho các kiểu rừng khác để hoàn thiện phương pháp xác định M từ ảnh tại nước ta.