

XÂY DỰNG PHƯƠNG TRÌNH SINH TRẮC ƯỚC TÍNH SINH KHỐI VÀ CARBON CÂY CÁ THỂ PHI LAO (*Casuarina equisetifolia*) TẠI TỈNH VĨNH LONG

Nguyễn Xuân Hải¹, Vũ Đình Hương¹, Kiều Mạnh Hà¹, Nguyễn Thị Thương¹,
Nguyễn Cơ Thành¹, Nguyễn Văn Hùng¹, Trương Thanh Phi Long², Phạm Văn Đồng²

¹Trung tâm Ứng dụng Khoa học Kỹ thuật Lâm nghiệp Nam Bộ

²Chi cục Kiểm lâm và Đa dạng sinh học tỉnh Vĩnh Long

TÓM TẮT

Nghiên cứu được thực hiện nhằm xây dựng các phương trình sinh trắc ước tính sinh khối và lượng carbon lưu trữ trên mặt đất của cây cá thể Phi lao (*Casuarina equisetifolia*) tại tỉnh Vĩnh Long. Số liệu được thu thập từ 40 cây giải tích có đường kính ngang ngực ($D_{1,3}$) từ 4,9 - 33,7 cm; trong đó 34 cây được sử dụng để xây dựng các phương trình và 6 cây còn lại dùng để kiểm tra khả năng ứng dụng của các phương trình. Các phương trình sinh trắc được xây dựng bằng phần mềm Statgraphics và được đánh giá thông qua các chỉ tiêu R^2 , SEE, MAE, SSR và sai số tương đối. Kết quả cho thấy sinh khối và lượng carbon lưu trữ của cây cá thể Phi lao có mối quan hệ chặt chẽ với $D_{1,3}$. Các phương trình dạng hàm lũy thừa được xác định là tối ưu, gồm: $W_{tk} = 0,1563 * D_{1,3}^{2,53873}$ ($R^2 = 98,58\%$); $W_{thk} = 0,1009 * D_{1,3}^{2,62568}$ ($R^2 = 97,71\%$); $W_{cak} = 0,02042 * D_{1,3}^{2,47034}$ ($R^2 = 90,34\%$); $W_{lak} = 0,01697 * D_{1,3}^{2,28415}$ ($R^2 = 84,19\%$); $C_{tổng} = 0,06557 * D_{1,3}^{2,55408}$ ($R^2 = 98,57\%$). Sai số tương đối trung bình của các mô hình dao động từ 3,4 - 6,2.

Từ khóa: Carbon, Phi lao, phương trình sinh trắc, sinh khối, Vĩnh Long.

DEVELOPMENT OF ALLOMETRIC EQUATIONS FOR ESTIMATING BIOMASS AND CARBON STOCKS OF INDIVIDUAL TREES OF *Casuarina equisetifolia* IN VINH LONG PROVINCE

Nguyen Xuan Hai¹, Vu Dinh Huong¹, Kieu Manh Ha¹, Nguyen Thi Thuong¹, Nguyen Co Thanh¹,
Nguyen Van Hung¹, Truong Thanh Phi Long², Pham Van Dong²

¹Southern Center of Application for Forest Technology & Science

²Vinh Long Provincial Sub-Department of Forest Protection and Biodiversity

ABSTRACT

This study was conducted to develop allometric equations for estimating the aboveground biomass and carbon stocks of individual trees of *Casuarina equisetifolia* in Vinh Long province, Vietnam. Data were collected from 40 destructively sampled trees with diameter at breast height ($D_{1,3}$) ranging from 4.9 to 33.7 cm. Of these, 34 trees were used to develop the allometric equations, while the remaining six trees were examined for model validation. The equations were developed using Statgraphics software and evaluated based on the coefficient of determination (R^2), standard error of estimate (SEE), mean absolute error (MAE), sum of squared residuals (SSR) and relative error. The results indicated that the biomass and carbon stocks of individual trees of *Casuarina equisetifolia* were strongly correlated with $D_{1,3}$. Power-function models were identified as the optimal equations for estimating biomass and carbon stock, including: $W_{tk} = 0.1563 * D_{1,3}^{2.53873}$ ($R^2 = 98.58\%$); $W_{thk} = 0.1009 * D_{1,3}^{2.62568}$ ($R^2 = 97.71\%$); $W_{cak} = 0.02042 * D_{1,3}^{2.47034}$ ($R^2 = 90.34\%$); $W_{lak} = 0.01697 * D_{1,3}^{2.28415}$ ($R^2 = 84.19\%$); and $C_{total} = 0.06557 * D_{1,3}^{2.55408}$ ($R^2 = 98.57\%$). The mean relative error of the developed models ranged from 3.4% to 6.2%.

Keywords: Allometric equation, biomass, carbon, *Casuarina equisetifolia*, Vinh Long province.

I. MỞ ĐẦU

Biến đổi khí hậu và sự gia tăng nồng độ khí nhà kính, đặc biệt là CO₂ trong khí quyển, đang trở thành thách thức lớn đối với phát triển bền vững trên toàn cầu. Trong bối cảnh đó, rừng được xem là một trong những giải pháp tự nhiên hiệu quả nhằm hấp thụ CO₂ và lưu trữ carbon, góp phần giảm nhẹ biến đổi khí hậu (IPCC, 2006). Việc xác định chính xác sinh khối và lượng carbon lưu trữ của rừng là cơ sở quan trọng cho kiểm kê khí nhà kính, đánh giá vai trò của hệ sinh thái rừng trong chu trình carbon, quản lý tài nguyên rừng bền vững và tham gia các cơ chế giảm phát thải cũng như thị trường tín chỉ carbon (Brown, 1997; IPCC, 2006; Pearson *et al.*, 2005).

Phi lao (*Casuarina equisetifolia*) là loài chịu hạn, chịu gió tốt và thích nghi với điều kiện đất nghèo dinh dưỡng, được sử dụng rộng rãi trong các đai rừng phòng hộ ven biển và cải tạo môi trường sinh thái. Tại tỉnh Vĩnh Long, Phi lao được trồng tập trung ở các khu vực ven biển với diện tích 522,09 ha (UBND tỉnh Vĩnh Long, 2026). Tuy nhiên, các nghiên cứu về sinh khối và khả năng lưu trữ carbon của loài cây này tại địa phương còn hạn chế, đặc biệt là các phương trình sinh trắc phục vụ ước lượng nhanh sinh khối và carbon.

Xuất phát từ thực tiễn trên, nghiên cứu này được thực hiện nhằm xây dựng các phương trình sinh trắc ước tính sinh khối và lượng carbon lưu trữ trên mặt đất của cây cá thể Phi lao tại Vĩnh Long, qua đó cung cấp cơ sở khoa học cho việc đánh giá khả năng hấp thụ CO₂, tính toán giá trị carbon rừng và phục vụ công tác quản lý, phát triển lâm nghiệp bền vững trong bối cảnh ứng phó với biến đổi khí hậu.

Bài viết giới thiệu một số kết quả nghiên cứu của đề tài "Nghiên cứu khả năng lưu trữ carbon của các loại rừng chủ yếu tại tỉnh Vĩnh Long".

II. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng và giới hạn nghiên cứu

- Đối tượng nghiên cứu là sinh khối khô và lượng carbon lưu trữ trong các bộ phận trên mặt đất, gồm thân, cành và lá của các cá thể cây tiêu chuẩn Phi lao (*Casuarina equisetifolia*) được lựa chọn từ các lâm phần trồng tại các xã Mỹ Long, Đông Hải, Long Hữu và phường Trường Long Hòa, tỉnh Vĩnh Long.

- Giới hạn nghiên cứu: Các cây tiêu chuẩn được lựa chọn là những cây có hình thái bình thường đại diện cho lâm phần có đặc điểm sinh trưởng tốt, thân thẳng và tán đều.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Phương pháp đo đếm sinh khối cây tiêu chuẩn

- Tiến hành chặt hạ và giải tích 40 cây tiêu chuẩn bảo đảm bao quát tương đối đầy đủ khoảng biến động đường kính ngang ngực (D_{1,3}) từ 4,9 đến 33,7 cm. Trong số đó, 34 cây được lựa chọn bảo đảm đại diện cho toàn bộ dải đường kính để xây dựng các phương trình. Sáu cây còn lại cũng được lựa chọn phân bố đều trên cùng dải đường kính nhưng không tham gia xây dựng phương trình, mà được sử dụng như bộ dữ liệu kiểm định độc lập nhằm đánh giá độ chính xác và khả năng ứng dụng của các phương trình.

- Tiêu chuẩn lựa chọn cây giải tích: Là những cây sinh trưởng phát triển tốt, thân thẳng, tán lá đều, không gãy ngọn, không phân cành bất định, không sâu bệnh.

- Đo đếm sinh khối cây tiêu chuẩn: Tiến hành chặt cây tiêu chuẩn, sau đó tách riêng từng bộ phận thân, cành và lá, cân tại hiện trường để xác định sinh khối tươi. Đồng thời lấy mẫu để cân sấy, xác định sinh khối khô của từng bộ phận.

+ Sinh khối thân: Thân sau khi chia thành các đoạn để cân, xác định sinh khối tươi, được lấy mẫu thốt để xác định sinh khối khô. Mỗi cây được lấy mẫu tại các vị trí gốc, giữa thân và ngọn, mỗi vị trí lấy 1 thốt có bề dày khoảng 5

cm, mẫu được cân tại hiện trường và ghi ký hiệu theo cây tiêu chuẩn.

+ Sinh khối cành: Sau khi đã tách lá, tiến hành chia cành thành các đoạn nhỏ và cân để xác định sinh khối, đồng thời lấy khoảng 0,5 kg mẫu ở một số cành đại diện, mẫu được cân để xác định khối lượng tại hiện trường và ghi ký hiệu theo cây tiêu chuẩn để phân tích xác định sinh khối khô.

+ Sinh khối lá: Thu gom toàn bộ lá và cân, sau đó trộn đều và lấy 1 mẫu khoảng 0,5 kg, mẫu được cân để xác định khối lượng tại hiện trường và ghi ký hiệu theo cây tiêu chuẩn để phân tích xác định sinh khối khô.

2.2.2. Phương pháp phân tích và xử lý số liệu

- Xác định sinh khối khô cây tiêu chuẩn:

+ Phương pháp thực hiện: Mẫu dùng để xác định sinh khối khô được xử lý theo phương pháp sấy: Các mẫu được sấy khô tại phòng thí nghiệm của Trung tâm Ứng dụng Khoa học Kỹ thuật Lâm nghiệp Nam Bộ, lá cây được sấy ở nhiệt độ 65°C, cành và thân được sấy ở nhiệt độ 105°C. Trong quá trình sấy, trọng lượng của mẫu được kiểm tra định kỳ 4 giờ một lần. Sau 3 lần kiểm tra liên tiếp, thấy trọng lượng của mẫu không thay đổi, sẽ xác định được sinh khối khô của mẫu, % trọng lượng khô so với tươi. Từ đây tính được sinh khối khô của rừng bộ phận và cây tiêu chuẩn.

+ Tổng sinh khối khô trên mặt đất của cây tiêu chuẩn được tính như sau:

$$W_{tk} = W_{thk} + W_{cak} + W_{lak} \text{ (kg/cây).}$$

Trong đó, W_{tk} là tổng sinh khối khô trên mặt đất của cây; W_{thk} , W_{cak} và W_{lak} lần lượt là sinh khối khô của thân, cành và lá.

- Xác định lượng carbon lưu trữ của cây cá thể:

+ Xác định hàm lượng carbon trong sinh khối các bộ phận của cây (thân, cành và lá) bằng cách phân tích các mẫu trong phòng thí nghiệm, sử dụng phương pháp đốt trong.

+ Hàm lượng carbon trung bình của toàn cây được tính bằng công thức:

$$C_{tb} = \sum_{i=1}^n P_i \times C_i$$

Trong đó: C_{tb} : hàm lượng carbon trung bình của toàn cây (%);

P_i : tỷ lệ sinh khối của bộ phận i (%);

C_i : hàm lượng carbon của bộ phận i (%).

+ *Lượng carbon lưu trữ của từng bộ phận cây giải tích* = Sinh khối khô $\times$ hàm lượng carbon trong từng bộ phận (tỷ lệ % carbon được phân tích từ phòng thí nghiệm).

+ *Lượng carbon lưu trữ trên mặt đất của cây giải tích* = Tổng carbon trong sinh khối khô của từng bộ phận (thân, cành và lá).

- Xây dựng các phương trình sinh khối và lượng carbon lưu trữ:

Xây dựng các phương trình theo các hàm đơn biến giữa sinh khối và lượng carbon lưu trữ với nhân tố điều tra. Phương trình có dạng tổng quát là:

$$y_j = f(x_i)$$

Trong đó: y_j : Sinh khối và lượng carbon lưu trữ trong từng bộ phận thân cây gỗ;

x_i : Nhân tố điều tra rừng được sử dụng là đường kính ngang ngực ($D_{1.3}$).

Nghiên cứu sử dụng một số dạng hàm tuyến tính hoặc hàm phi tuyến tính để thăm dò và lựa chọn hàm tối ưu; các phương trình được xây dựng bằng phần mềm thống kê Statgraphics.

Tiêu chuẩn chung để lựa chọn một phương trình tối ưu là: (1) P-value của phương trình $< 0,05$, các hệ số hồi quy đều có ý nghĩa thống kê, kiểm định F (ANOVA) có ý nghĩa; (2) Hệ số xác định (R^2) lớn; (3) Các sai số chuẩn ước lượng (SEE), sai số tuyệt đối trung bình (MAE), tổng bình phương sai số (SSR) nhỏ và (4) Hàm thông dụng và dễ tính toán. Việc sử dụng đồng thời cả ba chỉ số SEE, MAE và SSR giúp đánh giá mô hình toàn diện hơn. Cụ thể, SEE cho biết độ chính xác tổng thể của mô hình; MAE cho biết

mức sai lệch tuyệt đối trung bình và có ý nghĩa trực quan đối với giá trị dự đoán; trong khi SSR đánh giá tổng sai số bình phương của toàn bộ mô hình và đặc biệt nhạy với những trường hợp có sai số dự đoán lớn.

Trong nghiên cứu này, một số phương trình tuyến tính dạng $\ln Y = a + b \times \ln X$ sẽ được chuyển trở về dạng phương trình chính tắc $Y = a \times X^b$. Trong quá trình chuyển đổi sẽ tạo ra mức độ sai số. Về mặt toán học thì hai phương trình này giống nhau nhưng khác nhau về mặt thống kê, do đó một số tác giả như Sprugel D.G. (1983), Ong J.E. và đồng tác giả (2004) và Viên Ngọc Nam và đồng tác giả (2012) đã sử dụng hệ số điều chỉnh: $CF = \exp(SEE^2/2)$ khi thực hiện phép chuyển đổi giữa hai phương trình. Trong đó: CF là hệ số điều chỉnh và SEE là sai số chuẩn ước lượng. Tuy nhiên, theo McArdle B. (1988) cho rằng nếu hệ số xác định $R^2 > 90\%$ thì khi đó không cần sử dụng hệ số chuyển đổi này. Qua đó, các phương trình có $R^2 > 90\%$ sẽ

được chuyển đổi trực tiếp, còn phương trình có $R^2 \leq 90\%$ sẽ sử dụng hệ số CF khi chuyển về dạng chính tắc.

Kiểm tra khả năng ứng dụng của các phương trình thông qua thông số sau:

$$\Delta\% = \left| \frac{Y_{tm} - Y_{lt}}{Y_{tm}} \right| \times 100$$

Trong đó: $\Delta\%$: sai số tương đối;

Y_{tm} : giá trị thực nghiệm;

Y_{lt} : giá trị lý thuyết

III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phương trình sinh khối trên mặt đất

3.1.1. Phương trình tổng sinh khối trên mặt đất cây cá thể

Kết quả xây dựng các phương trình sinh trắc ước lượng tổng sinh khối trên mặt đất của cây cá thể loài Phi lao tại Vĩnh Long được thể hiện ở bảng 1.

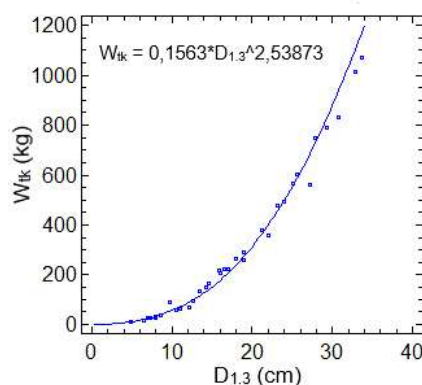
Bảng 18. Phương trình tổng sinh khối trên mặt đất cây cá thể

TT	Phương trình	R^2	SEE	MAE	SSR
1	$W_{tk} = (-2,86517 + 1,04692 \cdot D_{1,3})^2$	99,18	0,7981	0,5769	20,3811
2	$\ln(W_{tk}) = -1,85718 + 2,53873 \cdot \ln(D_{1,3})$	98,58	0,1618	0,1122	0,8374
3	$W_{tk} = (-19,0641 + 8,49522 \cdot \sqrt{D_{1,3}})^2$	97,59	1,3686	1,0939	59,9418
4	$W_{tk} = \exp(-0,16544 + 1,29578 \cdot \sqrt{D_{1,3}})$	95,91	0,2743	0,2086	2,4073
5	$W_{tk} = (5,51691 + 0,0266698 \cdot D_{1,3}^2)^2$	95,47	1,8763	1,6743	112,6530

Ghi chú: W_{tk} : tổng sinh khối khô trên mặt đất của cây; $D_{1,3}$: đường kính ngang ngực

Kết quả phân tích thống kê cho thấy cả năm phương trình đều có ý nghĩa thống kê cao với giá trị xác suất kiểm định P-value $< 0,001$ và xác suất kiểm định các tham số hồi quy (P_a và P_b) đều $< 0,001$. Điều này chứng tỏ giữa tổng sinh khối khô trên mặt đất với nhân tố điều tra $D_{1,3}$ tồn tại mối quan hệ tương quan chặt chẽ. Tuy nhiên, mức độ phù hợp giữa các phương trình có sự khác biệt rõ rệt khi đánh giá thông qua các chỉ tiêu thống kê như R^2 , SEE, MAE và SSR. Các chỉ tiêu thống kê trong bảng 1 cho thấy phương trình số 2: $\ln(W_{tk}) = -1,85718 + 2,53873 \times \ln(D_{1,3})$ được xác định là phương trình tối ưu để ước lượng tổng sinh khối trên mặt đất cây Phi lao tại Vĩnh Long. Phương trình

này có thể viết tương đương dưới dạng hàm lũy thừa: $W_{tk} = 0,1563 \times D_{1,3}^{2,53873}$. Đây là phương trình có hệ số xác định rất cao ($R^2 = 98,58\%$), cho thấy biến đường kính thân cây giải thích được gần như toàn bộ biến động của tổng sinh khối khô trên mặt đất của cây cá thể. Đồng thời, phương trình cũng có giá trị sai số chuẩn ước lượng (SEE = 0,1618), sai số tuyệt đối trung bình (MAE = 0,1122) và tổng bình phương sai số (SSR = 0,8374) thấp nhất trong tất cả các phương trình khảo nghiệm. Điều này chứng tỏ sai lệch giữa giá trị tổng sinh khối khô trên mặt đất thực đo và giá trị dự báo từ phương trình là nhỏ nhất, phản ánh độ chính xác và tính ổn định cao hơn so với các phương trình còn lại.



Hình 1. Đồ thị tương quan tổng sinh khối trên mặt đất (W_{tk}) với đường kính ($D_{1,3}$)

3.1.2. Phương trình sinh khối của thân cây

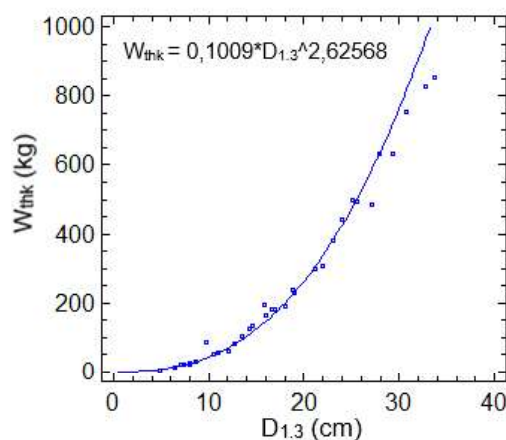
Bảng 2. Phương trình sinh khối của thân cây

TT	Phương trình	R^2	SEE	MAE	SSR
1	$W_{thk} = (-2,6747 + 0,959417 * D_{1,3})^2$	99,15	0,7465	0,5112	17,8308
2	$W_{thk} = (-17,5514 + 7,793 * \sqrt{D_{1,3}})^2$	97,75	1,2115	1,0332	46,9682
3	$\ln(W_{thk}) = -2,29305 + 2,62568 * \ln(D_{1,3})$	97,71	0,2133	0,1287	1,4554
4	$W_{thk} = (5,01978 + 0,0244057 * D_{1,3}^2)^2$	95,16	1,7769	1,5229	101,0320
5	$W_{thk} = \exp(-0,511896 + 1,3324 * \sqrt{D_{1,3}})$	93,96	0,3460	0,2305	3,8316

Ghi chú: W_{thk} : sinh khối khô của thân cây; $D_{1,3}$: đường kính ngang ngực

Trong các phương trình khảo nghiệm tại bảng 2, phương trình số 3: $\ln(W_{thk}) = -2,29305 + 2,62568 * \ln(D_{1,3})$. Có thể viết tương đương dưới dạng hàm lũy thừa: $W_{thk} = 0,1009 * D_{1,3}^{2,62568}$ là phương trình được lựa chọn vì đảm bảo sự cân bằng tốt nhất giữa yêu cầu về mặt thống kê

và độ chính xác dự báo. Phương trình này có hệ số xác định cao ($R^2 = 97,71\%$). Đồng thời, có giá trị sai số chuẩn ước lượng ($SEE = 0,2133$), sai số tuyệt đối trung bình ($MAE = 0,1287$) và tổng bình phương sai số ($SSR = 1,4554$) thấp nhất trong tất cả các phương trình khảo nghiệm.



Hình 2. Đồ thị tương quan sinh khối thân (W_{thk}) với đường kính ($D_{1,3}$)

3.1.3. Phương trình sinh khối của cành cây

Đối với sinh khối cành, mô hình hàm lũy thừa tiếp tục cho kết quả tốt nhất. Các chỉ tiêu thống kê trong bảng 3 cho thấy phương trình số 1: $\ln(W_{cak}) = -3,89108 + 2,47034 \cdot \ln(D_{1,3})$.

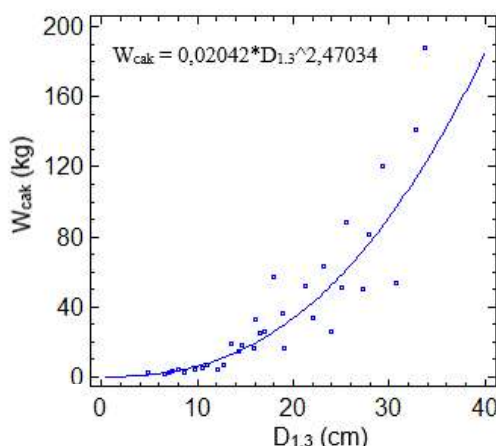
Có thể viết tương đương dưới dạng hàm lũy thừa: $W_{cak} = 0,02042 \cdot D_{1,3}^{2,47034}$ được xác định là phương trình tối ưu để ước lượng sinh khối của cành cây Phi lao tại Vĩnh Long. Phương trình này có hệ số xác định cao nhất ($R^2 = 90,34\%$).

Bảng 3. Phương trình sinh khối của cành cây

TT	Phương trình	R^2	SEE	MAE	SSR
1	$\ln(W_{cak}) = -3,89108 + 2,47034 \cdot \ln(D_{1,3})$	90,34	0,4283	0,3471	5,8706
2	$W_{cak} = \exp(0,184979 + 0,153915 \cdot D_{1,3})$	87,65	0,4844	0,3821	7,5081
3	$W_{cak} = (-1,25 + 0,368072 \cdot D_{1,3})^2$	87,16	1,1841	0,8666	44,8695
4	$W_{cak} = (1,63758 + 0,00953685 \cdot D_{1,3}^2)^2$	86,79	1,2010	0,8927	46,1580
5	$W_{cak} = (-6,83931 + 2,96062 \cdot \sqrt{D_{1,3}})^2$	84,27	1,3107	0,9969	54,9753

Ghi chú: W_{cak} : sinh khối khô của cành cây; $D_{1,3}$: đường kính ngang ngực

Đồng thời, phương trình có giá trị sai số chuẩn ước lượng (SEE = 0,4283), sai số tuyệt đối trung bình (MAE = 0,3471) và tổng bình phương sai số (SSR = 5,8706) thấp nhất trong tất cả các phương trình khảo nghiệm.



Hình 3. Đồ thị tương quan sinh khối cành (W_{cak}) với đường kính ($D_{1,3}$)

3.1.4. Phương trình sinh khối của lá cây

Sinh khối lá có mức độ biến động lớn nhất trong các bộ phận trên mặt đất của cây, nên các

phương trình sinh trắc ước lượng sinh khối lá có hệ số xác định thấp hơn ($R^2 = 83,58 - 87,32\%$) (bảng 4).

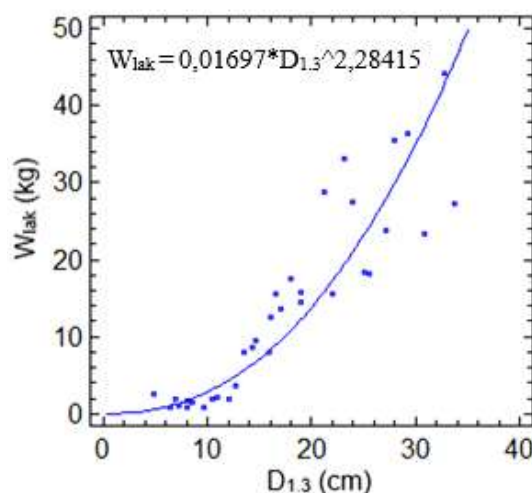
Bảng 4. Phương trình sinh khối của lá cây

TT	Phương trình	R^2	SEE	MAE	SSR
1	$W_{lak} = (-3,34531 + 1,64093 \cdot \sqrt{D_{1,3}})^2$	87,32	0,6407	0,5164	13,1354
2	$W_{lak} = (-0,16733 + 0,19941 \cdot D_{1,3})^2$	86,30	0,6661	0,5506	14,1985
3	$W_{lak} = (-5,24738 + 3,12714 \cdot \ln(D_{1,3}))^2$	84,92	0,6989	0,5376	15,6289
4	$\ln(W_{lak}) = -4,21417 + 2,28415 \cdot \ln(D_{1,3})$	84,19	0,5248	0,4001	8,8132
5	$W_{lak} = \exp(-2,73991 + 1,17763 \cdot \sqrt{D_{1,3}})$	83,58	0,5349	0,4401	9,1552

Ghi chú: W_{lak} : sinh khối khô của lá cây; $D_{1,3}$: đường kính ngang ngực

Trong năm phương trình khảo nghiệm tại bảng 4 thì phương trình số 4: $\ln(W_{\text{lak}}) = -4,21417 + 2,28415 \cdot \ln(D_{1,3})$ được xác định là phương trình tối ưu để ước lượng sinh khối của lá cây Phi lao tại Vĩnh Long. Đây là phương trình có các chỉ tiêu đánh giá sai số của mô hình thấp nhất (SEE

= 0,5248; MAE = 0,4001 và SSR = 8,8132). Phương trình số 4 có hệ số xác định (R^2) là 84,19% sau khi sử dụng hệ số chuyển đổi CF để hiệu chỉnh phương trình về dạng chính tắc (hàm lũy thừa) là: $W_{\text{lak}} = 0,01697 \cdot D_{1,3}^{2,28415}$.



Hình 4. Đồ thị tương quan sinh khối của lá cây (W_{lak}) với đường kính ($D_{1,3}$)

3.2. Phương trình tổng lượng carbon lưu trữ trên mặt đất cây cá thể

Kết quả phân tích hàm lượng carbon trong các bộ phận (thân, cành, lá) của 40 cây tiêu chuẩn cho thấy, hàm lượng carbon trung bình của toàn cây là $43,9 \pm 1,0\%$, dao động từ 41,7 - 46,2%. Lá là bộ phận có hàm lượng carbon trung bình cao nhất ($44,5 \pm 1,4\%$), tiếp theo là cành ($44,4 \pm$

1,4%) và thân ($43,8 \pm 1,0\%$). Tổng lượng carbon lưu trữ trên mặt đất của cây giải tích được tính bằng tổng trữ lượng carbon của từng bộ phận (thân, cành và lá). Kết quả xây dựng các phương trình ước tính tổng lượng carbon lưu trữ trên mặt đất của cây cá thể Phi lao tại Vĩnh Long được trình bày ở bảng 5.

Bảng 5. Phương trình tổng lượng carbon lưu trữ trên mặt đất của cây cá thể

TT	Phương trình	R^2	SEE	MAE	SSR
1	$C_{\text{tổng}} = (-1,97032 + 0,698457 \cdot D_{1,3})^2$	99,09	0,5626	0,4156	10,1290
2	$\ln(C_{\text{tổng}}) = -2,72464 + 2,55408 \cdot \ln(D_{1,3})$	98,57	0,1632	0,1120	0,8522
3	$C_{\text{tổng}} = (-12,7698 + 5,66572 \cdot \sqrt{D_{1,3}})^2$	97,43	0,9432	0,7479	28,4656
4	$C_{\text{tổng}} = \exp(-1,0232 + 1,30374 \cdot \sqrt{D_{1,3}})$	95,92	0,2756	0,2152	2,4298
5	$C_{\text{tổng}} = \exp(6,56239 - 30,9035/D_{1,3})$	93,92	0,3363	0,2523	3,6201

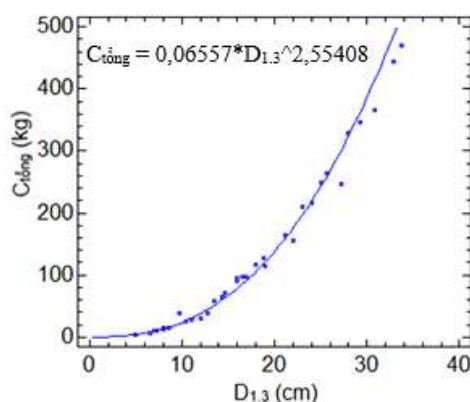
Ghi chú: $C_{\text{tổng}}$: tổng lượng carbon lưu trữ trên mặt đất của cây cá thể; $D_{1,3}$: đường kính ngang ngực

Căn cứ vào các tiêu chí lựa chọn phương trình là đảm bảo về mặt thống kê và có các chỉ tiêu đánh giá sai số của mô hình thấp nhất. Do đó, phương

trình số 2: $\ln(C_{\text{tổng}}) = -2,72464 + 2,55408 \cdot \ln(D_{1,3})$ Có thể viết tương đương dưới dạng hàm lũy thừa: $C_{\text{tổng}} = 0,06557 \cdot D_{1,3}^{2,55408}$ là phương trình

được chọn để ước tính tổng lượng carbon lưu trữ trên mặt đất của cây cá thể Phi lao tại Vĩnh Long. Phương trình này có hệ số xác định cao ($R^2 = 98,57\%$). Đồng thời, có giá trị sai số

chuẩn ước lượng ($SEE = 0,1632$), sai số tuyệt đối trung bình ($MAE = 0,1120$) và tổng bình phương sai số ($SSR = 0,8522$) thấp nhất trong tất cả các phương trình khảo nghiệm.



Hình 5. Đồ thị tương quan tổng lượng carbon lưu trữ trên mặt đất của cây cá thể ($C_{\text{tổng}}$) với đường kính ($D_{1,3}$)

3.3. Kiểm tra sai số tương đối của các phương trình sinh khối và carbon

Chỉ số sai số tương đối ($\Delta\%$) được tính toán từ số liệu của 6 cây giải tích không tham gia vào xây dựng phương trình. Kết quả như bảng 6 sau:

Bảng 6. Kiểm tra sai số tương đối của các phương trình

Mô hình ước lượng	Dạng phương trình	Sai số tương đối $\Delta\%$		
		Nhỏ nhất	Lớn nhất	Trung bình
Tổng sinh khối trên mặt đất	$W_{\text{tk}} = 0,1563 \cdot D_{1,3}^2,53873$	0,6	9,7	3,5
Sinh khối của thân cây	$W_{\text{thk}} = 0,1009 \cdot D_{1,3}^2,62568$	1,7	6,6	4,3
Sinh khối của cành cây	$W_{\text{cak}} = 0,02042 \cdot D_{1,3}^2,47034$	2,7	9,8	6,2
Sinh khối của lá cây	$W_{\text{lak}} = 0,01697 \cdot D_{1,3}^2,28415$	0,4	8,4	4,7
Tổng trữ lượng Carbon trên mặt đất	$C_{\text{tổng}} = 0,06557 \cdot D_{1,3}^2,55408$	0,9	7,8	3,4

Kết quả kiểm định cho thấy sai số tương đối trung bình dao động từ 3,4 - 6,2%, thấp hơn đáng kể so với ngưỡng chấp nhận thông thường trong nghiên cứu sinh khối rừng là 10% (Viên Ngọc Nam *et al.*, 2012). Do vậy, các phương trình này đều có thể sử dụng để ước tính sinh khối và lượng carbon lưu trữ trên mặt đất của cây cá thể Phi lao tại Vĩnh Long.

3.5. Thảo luận

Kết quả nghiên cứu cho thấy đường kính ngang ngực ($D_{1,3}$) là nhân tố giải thích rất tốt sự biến

động của sinh khối khô và lượng carbon lưu trữ của cây Phi lao (*Casuarina equisetifolia*) tại Vĩnh Long. Tất cả các phương trình được lựa chọn đều có ý nghĩa thống kê rất cao ($P\text{-value} < 0,001$), với hệ số xác định (R^2) dao động từ 84,19% đến 98,58%. Đặc biệt, các phương trình hàm lũy thừa có dạng tổng quát $Y = aD^b$ đều cho kết quả tốt nhất đối với các chỉ tiêu nghiên cứu. Đây là dạng phương trình được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu sinh khối và carbon rừng trên thế giới do phản ánh đúng quy luật tăng trưởng hình học của cây rừng, khi sinh

khối gia tăng theo lũy thừa của đường kính thân cây (Parresol, 1999; Chave *et al.*, 2014).

Đối với tổng sinh khối khô trên mặt đất, phương trình: $W_{tk} = 0,1563 \cdot D_{1,3}^2 \cdot 2,53873$ đạt hệ số xác định rất cao ($R^2 = 98,58\%$) và có các chỉ tiêu sai số thấp nhất (SEE = 0,1618; MAE = 0,1122; SSR = 0,8374). Kết quả này phù hợp với cơ sở sinh học của quá trình sinh trưởng cây gỗ. Theo lý thuyết sinh trưởng cây rừng, đường kính thân phản ánh trực tiếp diện tích tiết diện ngang và khả năng tích lũy vật chất hữu cơ của cây, do đó thường là biến độc lập có sức giải thích lớn nhất đối với sinh khối (Avery, Burkhardt, 2015). Hệ số lũy thừa 2,53873 của phương trình nằm trong khoảng phổ biến từ 2,0 - 3,0 được ghi nhận trong nhiều nghiên cứu sinh khối đối với các loài cây rừng nhiệt đới và cận nhiệt đới (Ketterings *et al.*, 2001; Chave *et al.*, 2014). Kết quả nghiên cứu này tương đồng với nghiên cứu của Ketterings tại Indonesia khi xây dựng phương trình sinh khối cho nhiều loài cây nhiệt đới với dạng tổng quát $B = aD^b$, trong đó hệ số b dao động từ 2,3 - 2,8 (Ketterings *et al.*, 2001). Tương tự, nghiên cứu của Chave đối với hơn 4.000 cây thuộc các hệ sinh thái nhiệt đới trên toàn cầu cũng cho thấy sinh khối trên mặt đất có mối quan hệ rất chặt với đường kính thân và thường được mô tả bằng hàm lũy thừa với hệ số b xấp xỉ 2,5 (Chave *et al.*, 2014). So sánh với các nghiên cứu về Phi lao trên thế giới cho thấy dạng hàm lũy thừa được lựa chọn trong nghiên cứu này hoàn toàn phù hợp với xu hướng chung. Nghiên cứu của Wang và đồng tác giả (2019) tại vùng ven biển Quảng Đông (Trung Quốc) đối với rừng Phi lao cho thấy các mô hình dạng $B = aD^b$ đạt R^2 từ 94 - 99%. Tương tự, Midgley và đồng tác giả (2010) khi tổng hợp dữ liệu sinh khối của nhiều loài cây thuộc họ Casuarinaceae cũng ghi nhận các mô hình lũy thừa dựa trên $D_{1,3}$ luôn cho độ chính xác cao nhất. Tại Việt Nam, nghiên cứu của Phan Văn Thường (2018)

cũng đã xác lập các phương trình tổng sinh khối cho loài Phi lao tại Tuy Phong, tỉnh Bình Thuận là dạng hàm lũy thừa $W_{tk} = 0,2967 \cdot D_{1,3}^2 \cdot 2,2217$ với $R^2 = 99\%$. Điều này khẳng định rằng, mặc dù điều kiện lập địa tại Vĩnh Long có những đặc thù riêng của vùng ven biển Đồng bằng sông Cửu Long, nhưng quy luật tích lũy sinh khối của loài Phi lao ở đây vẫn tuân theo quy luật sinh trưởng chung của loài.

Đối với sinh khối thân, phương trình: $W_{thk} = 0,1009 \cdot D_{1,3}^2 \cdot 2,62568$ cho $R^2 = 97,71\%$. Hệ số lũy thừa lớn hơn so với phương trình tổng sinh khối phản ánh thực tế rằng khi cây Phi lao tăng đường kính, phần lớn vật chất hữu cơ được ưu tiên phân bổ vào thân cây nhằm nâng cao khả năng chống chịu gió và duy trì cấu trúc cơ học của cây. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với đặc điểm sinh học của Phi lao, một loài cây phòng hộ ven biển thường sinh trưởng trong điều kiện gió mạnh và đất cát nghèo dinh dưỡng. Nhiều nghiên cứu tại Trung Quốc, Ấn Độ và Australia cũng ghi nhận tỷ trọng sinh khối thân thường chiếm từ 60 - 80% tổng sinh khối trên mặt đất của Phi lao trưởng thành (Midgley *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2019).

Đối với sinh khối của cành và lá, hệ số xác định thấp hơn so với sinh khối thân ($R^2 = 90,34\%$ đối với cành và 84,19% đối với lá). Đây là kết quả thường gặp trong nghiên cứu sinh khối cây rừng. Nguyên nhân là sự phát triển của tán lá và hệ thống cành chịu ảnh hưởng mạnh bởi mật độ lâm phần, điều kiện lập địa, chế độ ánh sáng và các tác động ngoại cảnh hơn là chỉ phụ thuộc vào đường kính thân cây (Pretzsch, 2009). Do đó, mặc dù $D_{1,3}$ vẫn là biến giải thích chính nhưng khả năng dự báo đối với sinh khối cành và lá thường thấp hơn so với sinh khối thân. Kết quả tương tự cũng được ghi nhận ở các nghiên cứu trên các loài Thông ba lá và Đước đôi tại Việt Nam, khi R^2 của các phương trình sinh khối lá đều ở mức $< 90\%$ (Đỗ Thị Thu Lê, 2010; Viên Ngọc Nam *et al.*, 2012).

Phương trình ước tính lượng carbon lưu trữ trên mặt đất của cây cá thể có cùng xu thế biến động với phương trình sinh khối tổng. Điều này hoàn toàn phù hợp vì lượng carbon lưu trữ của cây được tính từ sinh khối khô thông qua hệ số chuyển đổi carbon được tính từ việc phân tích hàm lượng carbon trong mẫu giải tích tại phòng thí nghiệm.

Về khả năng ứng dụng thực tiễn, kết quả kiểm tra độc lập bằng 6 cây giải tích không tham gia xây dựng mô hình cho thấy sai số tương đối trung bình của các phương trình chỉ dao động từ 3,4 - 6,2%. Giá trị này thấp hơn nhiều so với ngưỡng sai số 10% thường được chấp nhận trong nghiên cứu sinh khối và carbon rừng (Brown, 1997; Pearson *et al.*, 2005; Viên Ngọc Nam *et al.*, 2012). Điều này chứng tỏ, các phương trình đã xây dựng có tính ổn định cao và có khả năng dự báo tốt trong phạm vi kích thước cây khảo sát. Theo tiêu chuẩn đánh giá mô hình sinh khối của Pearson và đồng tác giả (2005), các phương trình có sai số dưới 10%

được xem là đủ độ tin cậy để áp dụng trong kiểm kê tài nguyên rừng và đánh giá carbon ở quy mô lâm phần.

IV. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng được bộ phương trình sinh trắc để ước lượng sinh khối và lượng carbon lưu trữ trên mặt đất của cây cá thể Phi lao (*Casuarina equisetifolia*) tại Vĩnh Long, trong phạm vi đường kính ngang ngực ($D_{1,3}$) từ 4,9 đến 33,7 cm. Tất cả các phương trình được lựa chọn đều có ý nghĩa thống kê rất cao ($P\text{-value} < 0,001$), hệ số xác định (R^2) từ 84,19% đến 98,58%. Đồng thời, các phương trình này đều có sai số chuẩn ước lượng (SEE), sai số tuyệt đối trung bình (MAE) và tổng bình phương sai số (SSR) thấp, bảo đảm độ tin cậy trong dự báo. Kết quả kiểm định độc lập bằng 6 cây giải tích không tham gia xây dựng phương trình cho thấy sai số tương đối trung bình của các phương trình ở mức thấp, dao động từ 3,4 - 6,2%.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Avery, T. E., Burkhardt, H. E., 2015. Forest Measurements (6th ed.). Waveland Press.
2. Brown, S., 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A Primer. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
3. Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Vieilledent, G., 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177 - 3190.
4. Đỗ Thị Thu Lê, 2010. Nghiên cứu khả năng hấp thụ CO_2 trên mặt đất của rừng Thông ba lá (*Pinus kesiya* Royle ex Goudon) tự nhiên tại huyện Lạc Dương, tỉnh Lâm Đồng. Luận văn thạc sĩ Sinh thái học. Trường Đại học Sư phạm thành phố Hồ Chí Minh.
5. IPCC, 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories: Volume 4 - Agriculture, forestry and other land use. Institute for Global Environmental Strategies.
6. Ketterings, Q. M., Coe, R., van Noordwijk, M., Ambagau, Y., Palm, C. A., 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 146(1 - 3), 199 - 209. DOI: 10.1016/S0378 - 1127(00)00460 - 6
7. McArdle B., 1988. The structural relationship: Regression in biology. *Canadian Journal of Zoology*, 66: 2329 - 2339. DOI: 10.1139/z88 - 348
8. Midgley, S. J., Turnbull, J. W., Johnston, R. D., Pinyopusarerk, K., 2010. Domestication and Use of Australian Trees. CSIRO Publishing.

9. Ong J. E., Gong W.K. and Wong C.H., 2004. Allometry and partitioning of the mangrove, *Rhizophora apiculata*. *Forest Ecology and Management*, 188: 395 - 408. DOI: 10.1016/j.foreco.2003.08.002
10. Phan Văn Thường, 2018. Định lượng hấp thụ CO₂ của rừng Phi lao (*Casuarina equisetifolia* Forst) tại khu vực rừng phòng hộ Tuy Phong, tỉnh Bình Thuận. Luận văn thạc sĩ Khoa Nông nghiệp. Trường Đại học Nông Lâm thành phố Hồ Chí Minh.
11. Parresol, B. R., 1999. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. *Forest Science*, 45(4), 573 - 593. DOI: 10.1093/forestscience/45.4.573
12. Pearson, T., Walker, S., Brown, S., 2005. Sourcebook for land use, land-use change and forestry projects. Winrock International.
13. Pretzsch, H., 2009. *Forest Dynamics, Growth and Yield*. Springer.
14. Sprugel, D.G., 1983. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology* 64, 209 - 210.
15. Ủy ban Nhân dân tỉnh Vĩnh Long, 2026. Quyết định số 1916/QĐ-UBND ngày 30/3/2026 về Công bố hiện trạng rừng tỉnh Vĩnh Long năm 2025.
16. Viên Ngọc Nam, Nguyễn Thị Hà, Trần Quốc Khải, 2012. Phương trình sinh khối và carbon các bộ phận của loài Đước đôi (*Rhizophora apiculata* Blume) ở tỉnh Cà Mau. *Tạp chí Rừng và Môi trường*, số 48, ISSN: 1859 - 1248.
17. Wang, F., Lu, Q., Chen, Q., Wang, Y., 2019. Biomass allocation and allometric equations for *Casuarina equisetifolia* plantations in coastal South China. *Journal of Tropical Forest Science*, 31(2), 210 - 220.

Email tác giả liên hệ: nguyenhaivfu@gmail.com

Ngày nhận bài: 25/06/2026

Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 11/07/2026; 21/07/2026

Ngày duyệt đăng: 14/08/2026