MÔ HÌNH CÂN BẰNG ĐỘNG PHỤC VỤ GIÁM SÁT SỰ NHẤT QUÁN CỦA DỮ LIỆU HIỆN TRẠNG VÀ DIỄN BIẾN RỪNG

Phạm Văn Điển[1,*], Nguyễn Trọng Cương[2], Phạm Đức Đạt[3], Trương Tất Đo[4]

[1] Viện Khoa học Lâm nghiệp Việt Nam

[2] Trường Đại học Lâm nghiệp

[3]Công ty Cổ phần Tư vấn năng lượng và môi trường (VNEEC)

[4] Cục Lâm nghiệp và Kiểm lâm

** Email: phamvandien100@gmail.com*

TÓM TẮT

Nghiên cứu xây dựng mô hình cân bằng động để kiểm tra sự nhất quán nội tại của dữ liệu rừng theo đơn vị không gian - thời gian. Các đại lượng được tổ chức thành biến trạng thái, dòng vào, dòng chuyển nội bộ, dòng ra và biến điều chỉnh; từ đó thiết lập cân bằng thành phần, cân bằng tổng hợp và sáu chỉ số hỗ trợ diễn giải, đối soát dữ liệu rừng. Mức độ phù hợp của mô hình được kiểm nghiệm theo ba lớp: Mức độ khép kín đại số; khả năng tái lập trạng thái cuối kỳ; phản ứng khi chèn sai lệch có kiểm soát. Kết quả xác nhận mô hình phù hợp với mục đích và yêu cầu kiểm tra nhất quán nội tại. Minh họa số liệu toàn quốc giai đoạn 2021-2025 cho thấy, tỷ lệ tồn đọng chưa thành rừng (RB) tăng từ 7,03% lên 12,61%; tỷ lệ chuyển hoá thành rừng (PE) của rừng tự nhiên và rừng trồng dao động lần lượt từ 0,8-88,8% và từ 14,7-75,0%; hệ số bù đắp diện tích rừng đủ tiêu chí (K) của rừng tự nhiên và rừng trồng dao động từ 0,86-36,92 và từ 1,00-1,68; sai lệch cân bằng dữ liệu rừng (ε) dao động trong khoảng -195.215,7 đến -70.000,0 ha; chỉ số cân bằng dữ liệu rừng (CB) đạt 98,76-99,54 và chỉ số cảnh báo dữ liệu rừng (OR) đạt 26,36-43,16%. Đóng góp của mô hình là cung cấp lớp kiểm tra nội nghiệp hỗ trợ cho việc đối chiếu, truy vết và cảnh báo, nhưng không thay thế điều tra thực địa hoặc kiểm định bằng dữ liệu tham chiếu độc lập. Mô hình cần tiếp tục được kiểm chứng bằng dữ liệu thực tế có thể truy vết ở cấp tỉnh, chủ rừng hoặc lô rừng.

Từ khóa: *Hiện trạng rừng, diễn biến rừng, mô hình cân bằng động, quản trị dữ liệu rừng, sự nhất quán dữ liệu.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Dữ liệu hiện trạng và diễn biến rừng không chỉ được dùng để xác định diện tích và tỷ lệ che phủ tại một thời điểm, mà còn là đầu vào của quy hoạch, bảo vệ và phát triển rừng, thống kê ngành, kiểm kê khí nhà kính và chi trả dịch vụ môi trường rừng. Vì vậy, chất lượng dữ liệu rừng cần được xem xét đồng thời về tính đầy đủ, nhất quán logic, nhất quán theo thời gian và khả năng truy vết. Quy định hiện hành của Việt Nam tổ chức theo dõi diễn biến rừng theo lô, lấy dữ liệu năm trước làm nền để cập nhật biến động năm sau [1-3]. FAO (2023, 2025) [4, 5] cũng nhấn mạnh sự thống nhất về khái niệm, phương pháp minh bạch và chuỗi số liệu có khả năng đối chiếu trong đánh giá tài nguyên rừng.

Về phương pháp luận, Forrester (1961) [6] mô tả trạng thái hệ thống bằng các đại lượng tích lũy và các dòng làm thay đổi trạng thái theo thời gian. Nguyên lý đầu kỳ - tăng - giảm - cuối kỳ được sử dụng trong tài khoản tài sản và tài khoản hệ sinh thái của hệ thống hạch toán kinh tế - môi trường và hệ sinh thái (SEEA EA) [7]. Trong phân tích biến động sử dụng đất, Pontius và cs (2004) [8] phân biệt biến động ròng, biến động tổng, trạng thái ổn định và hướng chuyển đổi, trong khi Aldwaik và Pontius (2012) [9] chuẩn hóa cường độ biến động theo khoảng thời gian, loại đất và chuyển đổi. Các hướng dẫn của IPCC (2003, 2006, 2019) [10-12] yêu cầu dữ liệu phải đầy đủ, minh bạch, nhất quán theo chuỗi thời gian, có kiểm soát chất lượng và tránh tính trùng hoặc bỏ sót. ISO 19157-1:2023 [13] cung cấp các nguyên tắc mô tả, đánh giá và báo cáo chất lượng dữ liệu địa lý.

Những nền tảng trên chưa trực tiếp trả lời một câu hỏi tác nghiệp trong quản trị dữ liệu rừng Việt Nam: Khi trạng thái đầu kỳ và cuối kỳ đã

được ghi nhận, các dòng trồng rừng, khoanh nuôi phục hồi, đạt tiêu chí thành rừng, giảm cấp, khai thác, mất rừng và điều chỉnh dữ liệu có giải thích được sự chênh lệch giữa hai thời điểm hay không? Ngược lại, các dòng biến động đã tổng hợp có tái lập được trạng thái cuối kỳ hay không? Đánh giá độ chính xác bản đồ bằng mẫu tham chiếu độc lập là cần thiết [14], tuy nhiên không thay thế kiểm tra khép kín số học và tính nhất quán nội tại giữa các bảng dữ liệu hiện trạng và diễn biến rừng [15].

Khoảng trống nghiên cứu là thiếu một mô hình tác nghiệp thống nhất trong việc giám sát sự nhất quán nội tại của dữ liệu hiện trạng và diễn biến rừng. Nghiên cứu này là cụ thể hóa nguyên lý cân bằng động thành cấu trúc biến, phương trình, chỉ số và quy tắc đối soát phù hợp với hệ thống dữ liệu rừng Việt Nam.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

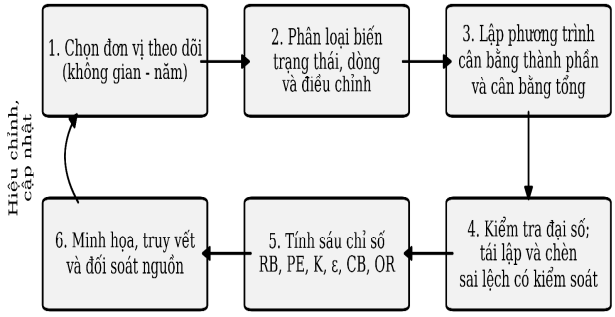
Đối tượng nghiên cứu là mô hình cân bằng động dùng để kiểm tra nội nghiệp về sự nhất quán của dữ liệu hiện trạng và diễn biến rừng. Đơn vị tính toán lý thuyết ký hiệu là u, có thể là toàn quốc, vùng, tỉnh, xã, ban quản lý rừng hoặc lô rừng; mốc thời gian ký hiệu là t. Đơn vị áp dụng số liệu minh họa là toàn quốc trong giai đoạn 2021-2025.

Phạm vi nghiên cứu tập trung vào diện tích rừng đủ tiêu chí tính tỷ lệ che phủ, diện tích chưa đủ tiêu chí tính tỷ lệ che phủ và các dòng làm thay đổi hoặc chuyển dịch giữa hai nhóm này. Nghiên cứu không xem xét trữ lượng, sinh khối, carbon hoặc đa dạng sinh học; cũng không đánh giá độ chính xác của số liệu điều tra ngoại nghiệp.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Cách tiếp cận nghiên cứu

Nghiên cứu kết hợp tiếp cận tồn lượng - dòng của động lực học hệ thống [6], nguyên tắc lập tài khoản đầu kỳ - tăng - giảm - cuối kỳ của SEEA EA [7], yêu cầu nhất quán chuỗi thời gian và QA/QC của IPCC [10-12] cùng khung chất lượng dữ liệu địa lý của ISO 19157-1:2023 [13]. Diện tích cuối năm không được xem là một số liệu độc lập, mà là kết quả tích lũy của trạng thái đầu năm, các dòng phát sinh, chuyển nhóm, rời khỏi hệ thống và điều chỉnh trong năm. Do đó, mô hình được sử dụng để kiểm tra mức độ giải thích và khả năng tái lập số liệu, không được dùng để mặc nhiên xác nhận dữ liệu đầu vào là đúng với thực địa (Hình 1).



Hình 1. Quá trình xây dựng, kiểm nghiệm và áp dụng mô hình

2.2.2. Xác định biến số và nhóm dữ liệu

Bảng 1. Nhóm biến số của mô hình cân bằng động

Nhóm biến số	Ký hiệu	Nội dung	Đơn vị và vai trò
Định danh	u, t	Đơn vị không gian u và năm quan sát t	mã/tên; năm
Trạng thái tổng	T, C, B	T là tổng diện tích rừng trong phạm vi theo dõi; C là diện tích đủ tiêu chí; B là diện tích chưa đủ tiêu chí nhưng vẫn thuộc phạm vi theo dõi; T = C + B	ha, biến trạng thái
Trạng thái thành phần	C^r, B^r	Diện tích rừng theo con đường tự nhiên hoặc trồng, tách theo trạng thái C và B	ha, biến trạng thái
Dòng vào	U^r	Diện tích mới được bổ sung từ ngoài phạm vi theo dõi vào trạng thái B trong năm theo con đường hình thành rừng r - tự nhiên hoặc trồng; không bao gồm diện tích đã thuộc hệ thống, kể cả diện tích rừng trồng sau khai thác được trồng lại	ha/năm
Dòng đạt tiêu chí	E^r	Diện tích chuyển từ B sang C trong năm	ha/năm, chuyển nội bộ
Dòng giảm cấp	Q^r	Diện tích chuyển từ C về B nhưng vẫn nằm trong phạm vi theo dõi. Có thể gồm rừng trồng sau khai thác tiếp tục chu kỳ trồng lại	ha/năm, chuyển nội bộ

		hoặc diện tích bị thiệt hại không còn đủ tiêu chí nhưng chưa ra khỏi hệ thống	
Dòng ra	$O^{s,r}$	Diện tích rời khỏi trạng thái s và ra khỏi phạm vi theo dõi. Không bao gồm các chuyển dịch giữa B và C trong nội bộ hệ thống	ha/năm
Điều chỉnh khác	$X^{s,r,+}$, $X^{s,r,-}$	Bổ sung hoặc giảm do cập nhật, hiệu chỉnh, thay đổi phân loại hay ranh giới; phải ghi rõ nguyên nhân	ha/năm

Ký hiệu r biểu thị con đường hình thành rừng, gồm TN (tự nhiên) và TR (trồng); ký hiệu s biểu thị trạng thái, gồm C (đủ tiêu chí tính tỷ lệ che phủ) và B (chưa đủ tiêu chí tính tỷ lệ che phủ). Tập con đường R = {TN, TR} và tập trạng thái S = {C, B}. Biến điều chỉnh X được tách thành phần dương và âm theo X+ = max (X, 0) và X- = max(-X, 0), thay cho một biến điều chỉnh thuần có thể che khuất hướng biến động. Nhóm biến số được tổng hợp tại bảng 1.

Cuối năm t-1, hệ thống có trạng thái cuối kỳ của năm t-1 và có trạng thái đầu kỳ của năm t. Trong năm t, thì U và O làm thay đổi tổng diện tích thuộc phạm vi theo dõi; E và Q chỉ chuyển diện tích giữa B và C; X phản ánh các điều chỉnh khác. Trạng thái cuối năm t trở thành trạng thái đầu kỳ của năm t+1. Vì vậy, mỗi bản ghi cuối kỳ mang tính tích lũy và được kiểm tra trong chuỗi liên hoàn, không tách rời từng năm.

2.2.3. Thu thập dữ liệu

Số liệu minh họa được tổng hợp từ các quyết định công bố hiện trạng rừng toàn quốc năm 2020-2025 [16-21]), các văn bản quy định về điều tra, kiểm kê và theo dõi diễn biến rừng được dùng để xác định khái niệm và quy tắc phân loại [1-3], Cục Thống kê (2026) [22] và số liệu tại các báo cáo chuyên ngành của Cục Lâm nghiệp (2024) [23], Cục Lâm nghiệp và Kiểm lâm (2025) và GIZ (2025) [24, 25], Bộ Nông nghiệp và Môi trường (2025) [26]. Các chỉ tiêu tổng hợp được trích từ bảng dữ liệu đã tính toán; các dòng thành phần cần cho tái lập cân bằng được đối chiếu với bảng dữ liệu nguồn. Dữ liệu được chuẩn hóa theo héc-ta, đơn vị không gian u là toàn quốc và mốc thời gian t là cuối năm.

Bộ dữ liệu sử dụng chưa tách đầy đủ dòng giảm cấp Q và các điều chỉnh X theo cùng đơn vị không gian - thời gian. Minh họa sử dụng kịch bản cơ sở Q = 0 và $X^+ = X^- = 0$. Đây là giả định tính toán đối với những dòng chưa định lượng được; chưa có căn cứ xác nhận chúng không phát sinh hoặc đã được hạch toán đầy đủ trong các tổng khác. Vì thế, các trị số PE, K và OR được diễn giải có điều kiện theo kịch bản cơ sở, chưa đại diện cho toàn bộ quá trình biến động thực tế.

Kết quả không được hiểu là một cuộc giám sát độc lập đối với các quyết định công bố hiện trạng rừng hay với các văn bản chứa đựng dữ liệu có liên quan. Các tỷ số chỉ được tính khi mẫu số dương; trường hợp mẫu số bằng 0 được ghi là không xác định.

2.2.4. Xử lý số liệu

Từ hệ biến ở bảng 1, nghiên cứu lần lượt: (i) thiết lập phương trình cân bằng cho C^r và B^r; (ii) tổng hợp các phương trình thành phần thành cân bằng tổng T=C+B, trong đó E và Q triệt tiêu vì chỉ chuyển diện tích giữa B và C; (iii) tái lập trạng thái cuối kỳ từ trạng thái đầu kỳ và các dòng phát sinh trong kỳ; (iv) tính các chỉ số tỷ lệ tồn đọng chưa thành rừng (RB), tỷ lệ chuyển hoá thành rừng (PE), hệ số bù đắp diện tích rừng đủ tiêu chí (K), sai lệch cân bằng dữ liệu rừng (ε), chỉ số cân bằng dữ liệu rừng (CB) và chỉ số cảnh báo dữ liệu rừng (OR).

Trong mô hình tổng quát, A là tổng các dòng đưa diện tích từ ngoài phạm vi theo dõi vào hệ thống và các điều chỉnh tăng; D là tổng các dòng làm diện tích rời khỏi phạm vi theo dõi và các điều chỉnh giảm. Dòng Q, kể cả trường hợp diện tích rừng trồng sau khai thác chuyển từ C về B nhưng vẫn tiếp tục được theo dõi, là dòng chuyển nội bộ nên không làm thay đổi T.

Số liệu cấp quốc gia được công bố chủ yếu theo nhóm hoạt động hoặc nguyên nhân, chưa liên kết đầy đủ từng diện tích với trạng thái trước - sau và ranh giới của hệ thống. Vì vậy, trong minh họa định lượng, A và D được xác định từ các tổng tăng, giảm có trong nguồn số liệu và được sử dụng như là đầu vào tổng hợp để kiểm tra khả năng vận hành của mô hình, không được xem là kết quả phân rã đầy đủ các dòng lý thuyết. Đặc biệt, tổng giảm trong nguồn công bố có thể bao gồm diện tích khai thác rừng trồng, rừng bị thiệt hại và rừng tự nhiên bị chuyển đổi; trong đó, phần diện tích vẫn thuộc phạm vi theo dõi về bản chất có thể là Q, còn chỉ phần thực sự ra khỏi phạm vi theo dõi mới là O.

Ảnh hưởng của dữ liệu thiếu phụ thuộc vào vị trí của từng dòng trong phương trình. Q triệt tiêu khi tổng hợp cân bằng C và B, nên việc chưa biết Q không tự nó làm thay đổi cân bằng tổng nếu U và O đã được phân loại đúng. Tuy nhiên, Q ảnh hưởng đến cân bằng thành phần và các chỉ số PE, K, OR. Khi giữ các đại lượng khác cố định, bổ sung Q dương làm giảm PE và K, đồng thời làm tăng OR theo công thức đang sử dụng. Các điều chỉnh X có thể làm thay đổi kết quả theo cả hai hướng. Hiện chưa có đủ dữ liệu để lượng hóa ảnh hưởng thực tế của những dòng bị thiếu. Vì vậy, không suy rộng kết quả kịch bản cơ sở thành đánh giá đầy đủ hiện trạng và diễn biến rừng.

Mức độ phù hợp của mô hình được kiểm chứng theo ba lớp. Thứ nhất, kiểm chứng đại số nhằm xác nhận các phương trình thành phần tổng hợp đúng thành phương trình cân bằng tổng; các dòng chuyển nội bộ E và Q phải triệt tiêu và không làm thay đổi T. Lớp kiểm chứng này đánh giá tính khép kín của cấu trúc toán học, không phụ thuộc vào mức độ đầy đủ của số liệu minh họa. Thứ hai, kiểm chứng khả năng tái lập và miền giá trị được thực hiện bằng cách tái lập trạng thái cuối kỳ từ trạng thái đầu kỳ cùng A và D, sau đó đối chiếu với trạng thái cuối kỳ T. Đồng thời, nghiên cứu kiểm tra tính không âm của T, B, C và tính liên tục giữa các kỳ. Do C được tính từ T-B, quan hệ T=C+B trong minh họa là điều kiện nhất quán tính toán, không phải là một phép kiểm chứng độc lập. Thứ ba, kiểm chứng phản ứng trước sai lệch được thực hiện bằng cách lần lượt chèn một sai lệch δ = 0,1%T vào T, A và D, trong khi giữ các đại lượng còn lại không đổi. Hệ số phản ứng của ε đối với biến z được xác định:

$$S_{\varepsilon,z} = \frac{\varepsilon(z+\delta) - \varepsilon(z)}{\delta}, z \in \{T, A, D\}. \quad (1)$$

Sau mỗi lần chèn, ε và CB được tính lại. Khả năng che lấp sai lệch do tổng hợp được kiểm tra bằng hai tình huống: Cộng δ vào C và trừ cùng một lượng khối $\mathbb{B}$; hoặc chèn hai sai lệch bằng nhau, ngược dấu vào hai đơn vị không gian. Các phép thử này kiểm tra phản ứng và giới hạn chẩn đoán của mô hình, không thay thế đánh giá độ chính xác bằng dữ liệu tham chiếu độc lập [13-15]. Mô hình được xem là phù hợp với mục đích giám sát sự nhất quán nội tại khi đồng thời: Khép kín về đại số; tái lập được duy nhất trạng thái cuối kỳ trong điều kiện đầu vào xác định; phản ứng đúng quy tắc trước sai lệch được đưa vào [10-13]. Sự phù hợp này không đồng nghĩa với việc số liệu nguồn đã chính xác hoặc các dòng biến động cấp quốc gia đã được phân rã đầy đủ theo hệ biến của mô hình.

Quá trình xử lý số liệu có sự hỗ trợ của công cụ AI, các kết quả được rà soát, đối chiếu và kiểm tra bằng Microsoft Excel, R và Python cài đặt trên máy vi tính.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô hình cân bằng động dữ liệu rừng

Kết quả nghiên cứu đã xây dựng được mô hình liên kết trạng thái đầu kỳ, các dòng biến động trong kỳ và trạng thái cuối kỳ. Tổng diện tích rừng thuộc phạm vi theo dõi được xác định như sau:

$$T_{u,t} = C_{u,t} + B_{u,t};\ C_{u,t} = \sum_r C^r_{u,t};\ B_{u,t} = \sum_r B^r_{u,t} \quad (2)$$

Cân bằng của diện tích đủ tiêu chí theo từng con đường hình thành rừng được xác định:

$$C^r_{u,t} = C^r_{u,t-1} + E^r_{u,t} + X^{C,r,+}_{u,t} - Q^r_{u,t} - O^{C,r}_{u,t} - X^{C,r,-}_{u,t} \quad (3)$$

Cân bằng của diện tích chưa đủ tiêu chí thành rừng được xác định:

$$B^r_{u,t} = B^r_{u,t-1} + U^r_{u,t} + Q^r_{u,t} + X^{B,r,+}_{u,t} - E^r_{u,t} - O^{B,r}_{u,t} - X^{B,r,-}_{u,t} \quad (4)$$

Khi cộng hai phương trình trạng thái (3) và (4), các dòng E và Q triệt tiêu vì chỉ làm chuyển diện tích giữa B và C, không làm thay đổi tổng diện tích thuộc phạm vi theo dõi. Phương trình cân bằng tổng hợp diện tích rừng là:

$$T_{u,t} = T_{u,t-1} + \sum_r U^r_{u,t} + \sum_{s,r} X^{s,r,+}_{u,t} - \sum_{s,r} \left(O^{s,r}_{u,t} + X^{s,r,-}_{u,t}\right) \quad (5)$$

Đặt tổng dòng vào và điều chỉnh tăng là A, tổng dòng ra và điều chỉnh giảm là D, thu được phương trình (6); thay (6) vào (5) thu được phương trình (7):

$$A_{u,t} = \sum_r U^r_{u,t} + \sum_{s,r} X^{s,r,+}_{u,t};\ D_{u,t} = \sum_{s,r} O^{s,r}_{u,t} + \sum_{s,r} X^{s,r,-}_{u,t} \quad (6)$$

Trạng thái cuối kỳ được tái lập theo mô hình:

$$\hat{T}_{u,t} = T_{u,t-1} + A_{u,t} - D_{u,t} \quad (7)$$

Kết quả này xác nhận tính khép kín đại số của cấu trúc và xác định rõ các dòng phải triệt tiêu để tránh tính trùng. Tính động của mô hình nằm ở liên kết liên kỳ: Trạng thái cuối năm t là trạng thái đầu của năm t + 1; mô hình không phải là mô hình dự báo hoặc mô phỏng kịch bản. Kết quả kiểm nghiệm được trình bày tại mục 3.4.

3.2. Các chỉ số của mô hình

Từ các phương trình cân bằng động, nghiên cứu xây dựng sáu chỉ số phục vụ phân tích trạng thái, quá trình chuyển hóa, mức độ khép kín và cảnh báo quản trị dữ liệu rừng.

Các chỉ số được xây dựng từ quan hệ trạng thái và dòng trong mô hình: RB chuẩn hóa diện tích B theo tổng T; PE so sánh dòng đạt tiêu chí với nguồn diện tích B có thể chuyển hóa; K so sánh phần bổ sung và phần giảm của C; ε đo phần chênh lệch chưa được giải thích; CB chuẩn hóa |ε| theo quy mô đối chiếu; OR so sánh quy mô chuyển trạng thái nội bộ với các dòng biến động được chọn. RB, PE và K hỗ trợ mô tả trạng thái và quá trình hình thành rừng; ε và CB kiểm tra mức khép kín nội tại; OR hỗ trợ sàng lọc, không trực tiếp đo độ chính xác của dữ liệu.

3.2.1. Tỷ lệ tồn đọng chưa thành rừng

Tỷ lệ tồn đọng chưa thành rừng $RB_{u,t}$ phản ánh tỷ trọng diện tích B trong tổng diện tích thuộc phạm vi theo dõi:

$$RB_{u,t} = \frac{B_{u,t}}{T_{u,t}} \times 100 \quad (8)$$

Tỷ lệ tồn đọng theo từng con đường hình thành rừng được xác định:

$$RB^{r}_{u,t} = \frac{B^{r}_{u,t}}{T_{u,t}} \times 100, r \in \{TN, TR\} \quad (9)$$

RB càng cao thì tỷ trọng diện tích chưa đủ tiêu chí trong tổng diện tích theo dõi càng lớn. Tuy nhiên, RB cần được xem xét cùng tuổi rừng, số năm hình thành rừng và thời hạn cần thiết để diện tích chuyển từ B sang C. Vì vậy, RB là chỉ số phản ánh trạng thái quản trị rừng, không phải là điểm đánh giá chất lượng dữ liệu.

3.2.2. Tỷ lệ chuyển hóa thành rừng

Tỷ lệ chuyển hóa thành rừng $PE^{r}_{u,t}$ phản ánh phần diện tích thực tế chuyển từ B sang C trong tổng nguồn diện tích có khả năng chuyển hóa theo sổ sách trong năm:

$$PE^{r}_{u,t} = \frac{E^{r}_{u,t}}{B^{r}_{u,t-1} + U^{r}_{u,t} + Q^{r}_{u,t} + X^{B,r,+}_{u,t}} \times 100 \quad (10)$$

Mẫu số gồm diện tích tồn đầu kỳ trong B, diện tích mới được đưa vào B, diện tích giảm cấp từ C về B và phần điều chỉnh tăng của B. PE cao thể hiện quá trình chuyển hóa diễn ra nhanh. PE phụ thuộc vào cơ cấu tuổi, điều kiện sinh trưởng, thời điểm phát sinh và mức độ đầy đủ của mẫu số, nên không được diễn giải trực tiếp như một chỉ số chất lượng dữ liệu. Khi mẫu số bằng 0, PE không xác định.

3.2.3. Hệ số bù đắp diện tích rừng đủ tiêu chí

Hệ số bù đắp $K^{r}_{u,t}$ so sánh tổng diện tích được bổ sung vào C với tổng diện tích rời khỏi hoặc bị giảm khỏi nhóm này:

$$K^{r}_{u,t} = \frac{E^{r}_{u,t} + X^{C,r,+}_{u,t}}{Q^{r}_{u,t} + O^{C,r}_{u,t} + X^{C,r,-}_{u,t}} \quad (11)$$

K>1 biểu thị phần bổ sung lớn hơn phần giảm; K=1 biểu thị cân bằng; K<1 biểu thị phần bổ sung chưa bù đắp phần giảm. Khi mẫu số bằng 0, K không xác định và cần ghi rõ là không phát sinh diện tích giảm, thay vì gán một giá trị số. Giá trị K rất lớn có thể chỉ do mẫu số nhỏ.

3.2.4. Sai lệch cân bằng dữ liệu rừng

Sai lệch cân bằng dữ liệu rừng $\varepsilon_{u,t}$ được xác định bằng chênh lệch giữa trạng thái cuối kỳ dùng để đối chiếu $T_{u,t}$ và trạng thái cuối kỳ tái lập theo mô hình $\hat{T}_{u,t}$. Trong minh họa của nghiên cứu, $T_{u,t}$ là trị số tích luỹ theo công thức (5) từ các dòng thành phần U và O đã phân loại theo hệ biến của mô hình (kịch bản cơ sở X=0), không phải là số liệu công bố trực tiếp về hiện trạng rừng. Trạng thái tái lập được tính theo công thức (7), trong đó A và D được xác định từ các tổng tăng, giảm có trong nguồn số liệu (mục 2.2.4). Do T và trạng thái tái lập được xác định từ hai nguồn dòng khác nhau, ε không mặc nhiên bằng 0 mà phản ánh mức độ chưa khớp giữa các dòng thành phần và các tổng tăng, giảm trong nguồn số liệu.

$$\varepsilon_{u,t} = T_{u,t} - \hat{T}_{u,t} \quad (12)$$

Nếu ε>0, trạng thái cuối kỳ dùng để đối chiếu lớn hơn giá trị có thể giải thích từ trạng thái đầu kỳ và các dòng trong kỳ; nếu ε<0, trạng thái dùng để đối chiếu nhỏ hơn trạng thái tái lập; nếu ε=0, cân bằng tổng được khép kín. Trị tuyệt đối |ε| phản ánh quy mô diện tích chưa được giải thích, không phụ thuộc vào hướng chênh lệch.

3.2.5. Chỉ số cân bằng dữ liệu rừng

Chỉ số cân bằng $CB_{u,t}$ chuẩn hóa sai lệch cân bằng về thang điểm từ 0 đến 100:

$$CB_{u,t} = 100 \times \max\left\{0, 1 - \frac{|\varepsilon_{u,t}|}{T_{u,t-1} + A_{u,t} + D_{u,t} + \omega}\right\} \quad (13)$$

Trong đó, ω>0 là hằng số rất nhỏ để tránh mẫu số bằng 0 (có thể được gán giá trị bằng 1). CB=100 biểu thị cân bằng số học được khép kín hoàn toàn; CB giảm khi sai lệch tăng so với tổng quy mô cần đối chiếu. Hàm max bảo đảm chỉ số không nhận giá trị âm. CB là chỉ số tương đối, nên thứ tự giữa các năm có thể khác thứ tự của |ε|.

3.2.6. Chỉ số cảnh báo quản trị dữ liệu rừng

Chỉ số cảnh báo quản trị dữ liệu rừng $OR_{u,t}$ được xác định theo công thức (14). Nguyên tắc sử dụng chỉ số để sàng lọc và giới hạn ngưỡng cảnh báo được thảo luận tại mục 3.5.

$$OR_{u,t} = \frac{\sum_r (E^r_{u,t} + Q^r_{u,t})}{\sum_r (U^r_{u,t} + E^r_{u,t}) + \sum_{s,r} O^{s,r}_{u,t}} \text{ x } 100 \quad (14)$$

3.3. Minh họa với dữ liệu rừng toàn quốc giai đoạn 2021 - 2025

Bảng 2 cho thấy, tổng diện tích thuộc phạm vi theo dõi của mô hình T tăng từ 14.790.224,0 ha năm 2021 lên 15.010.254,4 ha năm 2025, tăng 220.030,4 ha, tương ứng 1,49%. Tuy nhiên, diện tích chưa đủ tiêu chí tính tỷ lệ che phủ (B, TN và TR) tăng từ 1.040.398,0 lên 1.893.087,4 ha, tăng 852.689,4 ha (82,0%), trong khi C=T - B giảm 632.659,0 ha (4,6%). Vì vậy, mức tăng của T không đồng nghĩa với việc diện tích đủ tiêu chí tăng; sự thay đổi cần được phân tích đồng thời theo trạng thái C, B và con đường hình thành rừng.

So với diện tích rừng công bố cùng năm [17-21], T cao hơn từ 38.701,4 ha (năm 2025) đến 118.015,7 ha (năm 2024), tương ứng 0,26-0,79% (Bảng 2), mặc dù hai chuỗi có cùng trạng thái đầu kỳ năm 2020 là 14.677.215 ha [16]. Đây là một phát hiện đáng chú ý của minh hoạ: Chuỗi trạng thái tích luỹ từ các dòng thành phần theo phạm vi theo dõi của mô hình chưa trùng khớp với chuỗi diện tích rừng công bố. Nguyên nhân có thể đến từ khác biệt về phạm vi theo dõi, cách loại và thời điểm ghi nhận các dòng biến động, cần được truy vết và đối soát. Việc lượng hoá được độ vênh này theo từng năm thể hiện đúng chức năng kiểm tra nội nghiệp của mô hình; kết quả không nhằm thay thế hoặc điều chỉnh số liệu công bố hiện trạng rừng.

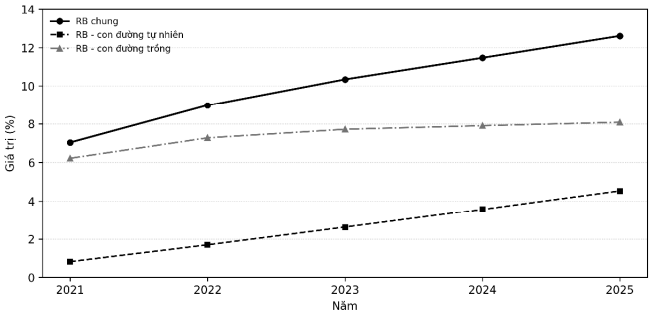
Bảng 2. Kết quả tính toán các chỉ số của mô hình cân bằng động trên phạm vi toàn quốc giai đoạn 2021-2025 (kịch bản cơ sở X=0, Q=0)

Chỉ tiêu	Năm 2021	Năm 2022	Năm 2023	Năm 2024	Năm 2025
T (ha) - tính toán theo mô hình	14.790.224,0	14.863.839,1	14.920.832,7	14.992.317,7	15.010.254,4
Diện tích rừng công bố (ha)	14.745.201,0	14.790.075,0	14.860.309,0	14.874.302,0	14.971.553,0
Chênh lệch T so với công bố (ha)	45.023,0	73.764,1	60.523,7	118.015,7	38.701,4
C = T - B (ha) (tính toán theo mô hình)	13.749.826,0	13.530.668,0	13.377.783,0	13.272.775,0	13.117.167,0
B-TN (ha) - tính toán theo mô hình	120.910,0	251.950,0	391.470,0	534.834,0	680.154,0
B-TR (ha) - tính toán theo mô hình	919.488,0	1.081.221,1	1.151.579,7	1.184.708,7	1.212.933,4
RB chung (%)	7,03	8,97	10,34	11,47	12,61
RB-TN (%)	0,82	1,70	2,62	3,57	4,53
RB-TR (%)	6,22	7,27	7,72	7,90	8,08
PE-TN (%)	88,8	15,0	1,1	0,8	8,0
PE-TR (%)	75,0	19,1	15,5	14,7	17,5
K-TN	36,92	6,68	1,23	0,86	13,25
K-TR	1,68	1,20	1,04	1,00	1,22
|ε| (ha)	70.000,0	121.523,0	130.064,1	124.523,7	195.215,7
CB	99,54	99,21	99,16	99,20	98,76
OR (%)	43,16	32,03	27,34	26,36	33,34

Ghi chú: TN: Con đường tự nhiên; TR: Con đường trồng. T là tổng diện tích thuộc phạm vi theo dõi, được tích luỹ theo công thức (5) từ trạng thái năm trước và các dòng thành phần U, O đã phân loại theo hệ biến của mô hình với trạng thái đầu kỳ năm 2020 lấy theo số liệu công bố [16]. T là trạng thái cuối kỳ dùng để đối chiếu, khác với trạng thái tái lập tính theo công thức (7) từ các tổng A, D có trong nguồn số liệu (Bảng 3). Vì vậy, |ε| phản ánh mức chưa khớp giữa hai nguồn dòng. B = B-TN + B-TR là diện tích chưa đủ tiêu chí thành rừng; C = T - B là diện tích đủ tiêu chí tính toán theo mô

hình. Các trị số tính toán theo mô hình không được hiểu là số liệu công bố trực tiếp về hiện trạng rừng. Các chỉ số PE, K, OR được tính theo kịch bản cơ sở X=0, Q=0.

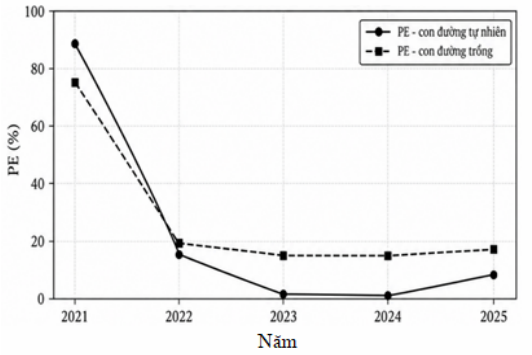
Nguồn: Tổng hợp và tính toán từ các dữ liệu công bố [16-26] và các văn bản quy định [1-3]. Diện tích rừng công bố lấy theo kết quả công bố hiện trạng [17-21]; chênh lệch T so với công bố bằng T trừ diện tích rừng công bố cùng năm, khác với sai lệch cân bằng dữ liệu rừng (ε) ở bảng 2 và 3.



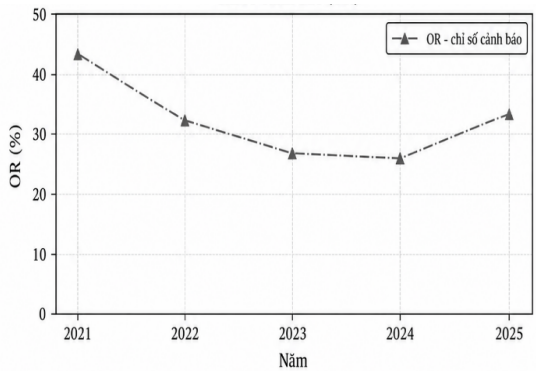
Hình 2. Tỷ lệ tồn đọng chưa thành rừng giai đoạn 2021-2025

Tỷ lệ tồn đọng chưa thành rừng tăng theo cả hai con đường hình thành. RB chung tăng liên tục từ 7,03-12,61%; RB-TN tăng từ 0,82-4,53% và RB-TR tăng từ 6,22-8,08% (Hình 2). Kết quả cho thấy phần diện tích chưa đủ tiêu chí tăng nhanh hơn tổng diện tích thuộc phạm vi theo dõi, đặc biệt theo con đường tự nhiên.

PE-TN giảm mạnh từ 88,8% năm 2021 xuống 0,8% năm 2024, sau đó tăng lên 8,0% năm 2025; PE-TR giảm từ 75,0% xuống 14,7-17,5% vào cuối giai đoạn. Các biến động này cho thấy tỷ lệ chuyển hóa nhạy với quy mô nguồn B, cơ cấu tuổi và thời điểm diện tích đủ điều kiện chuyển sang C. PE không phải tỷ lệ sai lệch dữ liệu; vì vậy, cần truy vết theo lô rừng - năm trước khi kết luận về hiệu quả trồng hoặc phục hồi rừng (Hình 3a).



Hình 3a. Tỷ lệ chuyển hóa thành rừng (PE, %) giai đoạn 2021-2025



Hình 3b. Chỉ số cảnh báo dữ liệu rừng (OR, %) giai đoạn 2021-2025

K-TN biến động từ 0,86-36,92; các giá trị lớn chủ yếu xuất hiện khi mẫu số nhỏ nên không thể diễn giải như một điểm chất lượng. Riêng năm 2024, K-TN = 0,86 cho thấy phần bổ sung vào C theo con đường tự nhiên chưa bù được phần giảm trong năm đó. K-TR dao động 1,00-1,68 và phần lớn gần 1, cho thấy dòng bổ sung vào C theo con đường trồng nhìn chung bù được phần rời khỏi hoặc giảm khỏi nhóm này.

|ε| dao động 70.000,0-195.215,7 ha; CB đạt 98,76-99,54, cao nhất ở năm 2021 và thấp nhất ở năm 2025. OR giảm từ 43,16% năm 2021 xuống 26,36% năm 2024, sau đó tăng lên 33,34% năm 2025 (Hình 3a và 3b).

Kết quả minh họa xác nhận các chỉ số đo có xu thế biến đổi khác nhau. Vì vậy, không thể dùng riêng một chỉ số để kết luận về trạng thái rừng hoặc chất lượng dữ liệu; cần báo cáo đồng thời RB, PE, K, ε, CB, OR và kết quả cân bằng thành phần.

3.4. Mức độ phù hợp của mô hình cân bằng dữ liệu rừng

Ở lớp thứ nhất, khi cộng phương trình cân bằng của C^r và B^r theo r, các dòng E^r và Q^r xuất hiện với dấu ngược nhau và triệt tiêu từng cặp. Vì vậy, phương trình thành phần đúng với phương trình cân bằng tổng hợp. Thay định nghĩa A và D vào phương trình tổng, thu được đúng phương trình tái lập trạng thái cuối kỳ. Không phát sinh số hạng dư về đại số, nên mô hình đạt tiêu chí khép kín cấu trúc.

Ở lớp thứ hai, từ các dòng dữ liệu hiện có, A dao động 408.000,0-468.400,0 ha và D dao động 224.991,0-255.247,6 ha. Mô hình xác định duy nhất trạng thái cuối kỳ tái lập cho từng năm; kết quả được trình bày tại bảng 3.

Bảng 3. Kết quả tái lập trạng thái cuối kỳ và chỉ số cân bằng dữ liệu rừng

Năm	A (ha)	D (ha)	$\hat{T}$ (ha)	T (ha)	ε (ha)	CB
2021	408.000,0	224.991,0	14.860.224,0	14.790.224,0	-70.000,0	99,54
2022	431.900,0	236.761,9	14.985.362,1	14.863.839,1	-121.523,0	99,21
2023	432.300,0	245.242,3	15.050.896,8	14.920.832,7	-130.064,1	99,16
2024	442.500,0	246.491,3	15.116.841,4	14.992.317,7	-124.523,7	99,20
2025	468.400,0	255.247,6	15.205.470,1	15.010.254,4	-195.215,7	98,76

Ghi chú: Các chỉ số PE, K, ε, CB và OR được diễn giải có điều kiện theo kịch bản cơ sở $Q=0$, $X^{+}=X^{-}=0$.

Bảng 3 cho thấy, T là trạng thái cuối kỳ tính toán theo mô hình được tích luỹ theo công thức (5), cùng trị số với hàng T ở bảng 2, không phải là trị số được trích trực tiếp từ quyết định công bố hiện trạng rừng; $\hat{T}$ là trạng thái được tái lập theo công thức (7) từ T_{t-1} cùng tổng tăng A và tổng giảm D có trong nguồn số liệu của năm t. Với chuỗi trạng thái T đang sử dụng làm căn cứ đối chiếu, ε âm trong cả 5 năm cho thấy mức tăng ròng A-D lớn hơn mức biến động T_t-T_{t-1}, nghĩa là các dòng dữ liệu thực tế chưa khớp với chuỗi trạng thái tính toán. Kết quả này đặt ra yêu cầu cần rà soát tính đầy đủ, thời điểm ghi nhận, phạm vi thống kê và cách phân loại, tổng hợp các thành phần của A và D, đặc biệt là khả năng ghi trùng, bỏ sót hoặc chưa phân biệt rõ chuyển dịch nội bộ với dòng vào, ra khỏi hệ thống.

Kiểm tra miền giá trị cho thấy cả 5 năm đều thỏa mãn $T = C + B$ và $B = B^{TN} + B^{TR}$, sai số làm tròn bằng 0; các biến trạng thái T, B, C và các tổng dòng A, D đều không âm. Quan hệ $C = \Sigma C^{r}$ chưa thể kiểm tra độc lập do dữ liệu chưa tách C theo hai con đường tự nhiên và trồng. Trị số ε mang dấu âm trong toàn bộ chuỗi và |ε| dao động 70.000,0-195.215,7 ha, cho thấy các dòng quan sát chưa giải thích đầy đủ trạng thái cuối kỳ; đây là kết quả kiểm tra dữ liệu, không phải là sai số cấu trúc của mô hình.

Ở lớp thứ ba, mức chèn δ = 0,1%T tương ứng 14.790,2-15.010,3ha. Kết quả cho $S_{\varepsilon,T}$=1, $S_{\varepsilon,A}$=-1 và $S_{\varepsilon,D}$ =1; tức ε phản ứng tuyến tính một-một và đúng hướng với sai lệch được đưa vào. Khi chèn sai lệch dương, CB tăng 0,0955-0,0966 điểm phần trăm nếu chèn vào T, giảm 0,0942-0,0961 điểm phần trăm nếu chèn vào A, và tăng 0,0966-0,0970 điểm phần trăm nếu chèn vào D. Trường hợp cộng δ vào C và trừ cùng một lượng khỏi B làm ε tổng không đổi, nhưng cân bằng thành phần xuất hiện độ vênh; hai sai lệch bằng nhau, ngược dấu ở hai đơn vị cũng có thể triệt tiêu khi tổng hợp.

Ba lớp kiểm tra cho thấy cấu trúc cân bằng khép kín về đại số, trạng thái cuối kỳ được tính duy nhất khi các đầu vào đã xác định và sai lệch cân bằng phản ứng đúng quy tắc khi chèn sai lệch có kiểm soát. Đây là bằng chứng về tính nhất quán về cấu trúc và khả năng vận hành của mô hình. Nghiên cứu chưa kiểm chứng thực tế độc lập ở cấp tỉnh, chủ rừng hoặc lô rừng, nên chưa đủ căn cứ khẳng định độ chính xác của dữ liệu hoặc hiệu quả phát hiện sai sót khi áp dụng rộng rãi.

3.5. Thảo luận

Kết quả xây dựng mô hình phù hợp với nguyên lý tồn lượng - dòng của Forrester (1961) [6] và cấu trúc tài khoản đầu kỳ - tăng - giảm - cuối kỳ của SEEA EA [7]. Việc phân biệt biến động ròng với tổng các dòng tăng, giảm và chuyển đổi cũng tương thích với kết quả nghiên cứu của Pontius và cs (2024) [8]; Aldwaik và Pontius (2012) [9]. Đóng góp cụ thể của nghiên cứu là tách U, E, Q, O và X theo vai trò quản trị, nhờ đó chuyển dịch nội bộ không bị đồng nhất với dòng làm thay đổi tổng diện tích và nguy cơ tính trùng được kiểm soát ngay trong cấu trúc của mô hình.

Khi phạm vi hệ thống được xác định thống nhất và các dòng được phân loại đầy đủ, không trùng lặp, phương trình cân bằng biểu diễn nhất quán quan hệ giữa đầu kỳ, biến động và cuối kỳ. Giá trị ε khác 0 không tự thân bác bỏ cấu trúc cân bằng; nó cho biết chuỗi trạng thái và các dòng được đưa vào tính toán chưa khớp nhau. Nguyên nhân có thể thuộc dữ liệu nguồn, phạm vi thống kê hoặc cách ánh xạ số liệu vào mô hình và cần được truy vết. Khả năng nhận diện phần chênh lệch này tạo giá trị kiểm tra nội nghiệp, đồng thời

chỉ ra yêu cầu hoàn thiện dữ liệu phục vụ quản trị rừng. Kết quả này cũng bổ sung lớp kiểm tra nhất quán nội tại theo tinh thần QA/QC của IPCC và ISO [10-13], nhưng không thay thế việc đánh giá độ chính xác ngoài thực địa bằng dữ liệu tham chiếu độc lập [14-15].

T tăng 1,49% nhưng B tăng 82,0% và C giảm 4,6% cho thấy, biến động tổng diện tích không phản ánh đầy đủ sự thay đổi trạng thái. RB tăng từ 7,03-12,61%, trong đó B-TN tăng nhanh hơn B-TR. Tuy nhiên, RB không tự thân biểu thị tốt hoặc xấu nếu chưa xét tuổi rừng, chu kỳ sinh trưởng, thời điểm đưa diện tích vào B và quy tắc phân loại. Do đó, kết quả phải được phân rã theo lô rừng - năm và con đường hình thành [1-5].

PE và K mô tả quá trình chuyển hóa và bù đắp, không phải là chỉ số chất lượng dữ liệu. PE giảm mạnh sau năm 2021 có thể bắt nguồn từ thay đổi quy mô nguồn, cơ cấu tuổi hoặc thời điểm đủ tiêu chí; K-TN rất lớn ở một số năm chủ yếu do mẫu số nhỏ. Vì vậy, PE và K phải được đọc cùng quy mô tuyệt đối, điều kiện tính và hồ sơ lâm sinh; không nên quy định ngưỡng cứng khi chưa hiệu chỉnh theo phân bố thực nghiệm.

Các chỉ số ε, CB và OR cung cấp ba thông tin bổ sung cho nhau. ε chỉ hướng và |ε| cho biết quy mô chưa được giải thích; CB chuẩn hóa mức khép kín theo quy mô đối chiếu; OR sàng lọc mức nổi trội của chuyển trạng thái nội bộ. Chuỗi giai đoạn 2021-2025 cho thấy, CB cao vẫn có thể đi kèm sai lệch tuyệt đối đáng kể, còn OR tăng trở lại trong năm 2025 là tín hiệu cần ưu tiên rà soát chứ không phải là bằng chứng trực tiếp về sai sót.

Nghiên cứu chưa xác lập ngưỡng cảnh báo định lượng cho CB và OR. Trước mắt, các chỉ số được dùng để sàng lọc trong những nhóm có cùng phạm vi theo dõi, tiêu chí và kỳ thống kê; ưu tiên đối soát khi |ε| lớn, CB giảm hoặc OR biến động bất thường so với chuỗi và các đơn vị tương đồng. Thứ tự ưu tiên phải được xem xét cùng quy mô tuyệt đối và hồ sơ nguồn. Ngưỡng thực hành chỉ nên xác lập sau khi đối chiếu phân bố thực nghiệm với các trường hợp đã được xác minh; CB hoặc OR riêng lẻ chưa đủ căn cứ kết luận dữ liệu có sai sót.

Phân tích độ nhạy xác nhận $|S_{\varepsilon,\Sigma}| = 1$, nghĩa là mô hình không khuếch đại hoặc làm suy giảm sai lệch được đưa vào. Phản ứng của CB còn phụ thuộc vào mẫu số chuẩn hóa và hướng làm thay đổi |ε|. Đáng chú ý, nếu ε có tổng bằng 0 hoặc CB = 100 thì chưa đủ để khẳng định toàn bộ dữ liệu đúng, vì sai lệch thành phần hoặc sai lệch giữa các đơn vị có thể bù trừ. Vì vậy, cân bằng tổng phải được kết hợp với cân bằng thành phần và đối chiếu đa cấp. Việc kiểm tra độ tin cậy của dữ liệu thực địa cũng là một hoạt động riêng và cần thiết.

Số liệu tổng hợp ở quy mô toàn quốc có thể che khuất sai lệch bù trừ giữa tỉnh, xã, chủ quản lý rừng hoặc lô rừng. Mô hình nên được vận hành đồng thời từ dưới lên và từ trên xuống: Dữ liệu vi mô giải thích sự hình thành của chỉ tiêu vĩ mô, còn kết quả vĩ mô giúp nhận diện đơn vị vi mô nếu có bất thường. Điều kiện áp dụng mô hình là thống nhất khái niệm, tiêu chí phân loại, ranh giới, hệ quy chiếu, hệ tọa độ, tham số chiếu, đơn vị diện tích và thời điểm chốt số liệu [1-3, 13].

Mô hình được đề xuất áp dụng theo năm, đồng thời kiểm tra bổ sung khi có đợt cập nhật lớn hoặc điều chỉnh ranh giới. Trước hết, đơn vị sử dụng thống nhất phạm vi theo dõi, tiêu chí phân loại và thời điểm chốt số liệu; lập bộ dữ liệu đầu kỳ, cuối kỳ và các dòng U, E, Q, O, X theo lô rừng hoặc đơn vị quản lý, có mã nguồn và nguyên nhân biến động. Tiếp theo, cần kiểm tra tính đầy đủ, sự trùng lặp và miền giá trị; tính cân bằng thành phần, cân bằng tổng và các chỉ số, sau đó tổng hợp lên các cấp cần báo cáo. Những trường hợp được sàng lọc phải được truy vết từ bảng tổng hợp về bản ghi và hồ sơ lô rừng, đối chiếu bản đồ, hồ sơ biến động và kiểm tra thực địa khi cần. Sau xác minh, đơn vị quản lý dữ liệu cập nhật bản ghi, lưu căn cứ điều chỉnh và tính lại kết quả. Chủ rừng, đơn vị kiểm lâm và cơ quan tổng hợp dữ liệu lâm nghiệp cần sử dụng kết quả theo nhiệm vụ được giao để đối soát, hoàn thiện dữ liệu và báo cáo.

Nghiên cứu còn có các giới hạn về dữ liệu. X, Q và C theo từng con đường chưa được công bố đầy đủ; A và D của một số năm mới là các tổng tăng, giảm, chưa được phân tích riêng theo hệ biến của mô hình. Bộ số liệu mới được kiểm chứng về cấu trúc, khả năng vận hành và độ nhạy, chưa được đối chiếu toàn bộ bằng mẫu tham chiếu độc lập. Hướng tiếp theo là chuẩn hóa bản ghi lô rừng - năm, tự động hóa quy tắc kiểm tra,

hiệu chỉnh ngưỡng cảnh báo theo phân bố thực nghiệm và kiểm nghiệm bằng thiết kế mẫu tham chiếu độc lập [14, 15].

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng được mô hình cân bằng động phục vụ giám sát sự nhất quán nội tại của dữ liệu hiện trạng và diễn biến rừng. Mô hình phân biệt biến trạng thái, dòng vào, dòng chuyển nội bộ, dòng ra và điều chỉnh khác; thiết lập cân bằng thành phần, cân bằng tổng hợp, trạng thái cuối kỳ tái lập và đề xuất sáu chỉ số RB, PE, K, ε, CB và OR. Các phép kiểm tra xác nhận tính khép kín về đại số, khả năng tính toán trạng thái cuối kỳ và phản ứng đúng quy tắc trước sai lệch có kiểm soát. Kết quả hỗ trợ cho việc sử dụng mô hình như một công cụ kiểm tra tính nhất quán nội tại; việc áp dụng rộng rãi cần tiếp tục được kiểm chứng bằng dữ liệu thực tế có thể truy vết ở các cấp quản lý.

Minh họa số liệu rừng toàn quốc giai đoạn 2021-2025 cho thấy T tăng 1,49%, nhưng B tăng 82,0% và C giảm 4,6%; RB tăng từ 7,03-12,61%; |ε| dao động 70.000,0-195.215,7 ha; CB đạt 98,76-99,54 và OR đạt 26,36-43,16%. Năm 2025 có RB và |ε| lớn nhất, CB thấp nhất và OR tăng trở lại, nên cần ưu tiên đối soát. Mô hình nên được áp dụng ở các cấp không gian - thời gian lựa chọn trên nền dữ liệu được chuẩn hóa và kết hợp với hồ sơ nguồn, kiểm tra thực địa và dựa trên dữ liệu tham chiếu độc lập.

Trong phạm vi nghiên cứu và với cơ sở dữ liệu hiện có, mô hình có giá trị kiểm tra sự nhất quán nội tại, giúp phát hiện và lượng hoá độ vênh, qua đó định hướng truy vết, đối soát và hoàn thiện dữ liệu phục vụ quản trị rừng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2018). *Thông tư số 33/2018/TT-BNNPTNT ngày 16/11/2018 quy định về điều tra, kiểm kê và theo dõi diễn biến rừng*.

[2]. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2023). *Thông tư số 16/2023/TT-BNNPTNT ngày 15/12/2023 sửa đổi, bổ sung một số điều của Thông tư số 33/2018/TT-BNNPTNT*.

[3]. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2024). *Văn bản hợp nhất số 10/VBHN-BNNPTNT ngày 25/01/2024: Thông tư quy định về điều tra, kiểm kê và theo dõi diễn biến rừng*.

[4]. FAO (2023). *Terms and Definitions: FRA 2025*, Forest Resources Assessment Working Paper 194. Rome, Italy: FAO - DOI: 10.4060/cc4691en.

[5]. FAO (2025). *Global Forest Resources Assessment 2025*. Rome, Italy. DOI: 10.4060/cd6709en.

[6]. J. W. Forrester (1961). *Industrial Dynamics*. Cambridge, MA, USA: MIT Press.

[7]. United Nations, European Union, FAO, IMF, OECD and World Bank (2024). *System of Environmental-Economic Accounting-Ecosystem Accounting*. New York, NY, USA: United Nations. DOI: 10.5089/9789212591834.069.

[8]. R. G. Pontius J r., E. Shusas and M. McEachern (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *101*(2-3), 251-268. DOI: 10.1016/j.agee.2003.09.008.

[9]. S. Z. Aldwaik and R. G. Pontius Jr. (2012). Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition. *Landscape and urban planning*, *106*(1), 103-114. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2012.02.010.

[10]. J. Penman *et al*., Eds. (2003). *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*. Hayama, Japan: IGES for IPCC.

[11]. H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe, Eds.(2006). *IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories, 4: Agriculture, Forestry and other land use*. Hayama, Japan: IGES for IPCC.

[12]. IPCC (2019). *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National greenhouse gas inventories, 4: Agriculture, Forestry and other land use*. Geneva, Switzerland: IPCC.

[13]. *Geographic Information-Data Quality-Part 1: General Requirements*, ISO 19157-1:2023.

[14]. P. Olofsson, G. M. Foody, M. Herold, S. V. Stehman, C. E. Woodcock and M. A. Wulder (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, *48*, 42-57. DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.015.

[15]. S. V. Stehman, G. M. Food (2019). Key issues in rigorous accuracy assessment of land cover products, *Remote Sensing of Environment*, *231*(10):111199. DOI: 10.1016/j. rse.2019.05.018.

[16]. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2021). *Quyết định số 1558/QĐ-BNN-TCLN ngày*

13/4/2021 công bố hiện trạng rừng toàn quốc năm 2020.

[17]. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2022). *Quyết định số 2860/QĐ-BNN-TCLN ngày 27/7/2022 công bố hiện trạng rừng toàn quốc năm 2021.*

[18]. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2023). *Quyết định số 2357/QĐ-BNN-KL ngày 14/6/2023 công bố hiện trạng rừng toàn quốc năm 2022.*

[19]. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2024). *Quyết định số 816/QĐ-BNN-KL ngày 20/3/2024 công bố hiện trạng rừng toàn quốc năm 2023.*

[20]. Bộ Nông nghiệp và Môi trường (2025). *Quyết định số 561/QĐ-BNNMT ngày 31/3/2025 công bố hiện trạng rừng toàn quốc năm 2024.*

[21]. Bộ Nông nghiệp và Môi trường (2026). *Quyết định số 1106/QĐ-BNNMT ngày 31/3/2026 công bố hiện trạng rừng toàn quốc năm 2025.*

[22]. Cục Thống kê (2026). *Niên giám thống kê 2025*. Nxb Kinh tế - Tài chính, Hà Nội.

[23]. Cục Lâm nghiệp (2024). Báo cáo đánh giá kết quả 3 năm (2021-2023) thực hiện Chiến lược phát triển lâm nghiệp Việt Nam giai đoạn 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050.

[24]. Cục Lâm nghiệp và Kiểm lâm (2025) *GIZ,. Báo cáo tóm tắt kết quả hoạt động của ngành lâm nghiệp năm 2023. Hà Nội.*

[25]. Cục Lâm nghiệp và Kiểm lâm (2025). *GIZ, Báo cáo tóm tắt kết quả hoạt động của ngành lâm nghiệp năm 2024. Hà Nội.*

[26]. Bộ Nông nghiệp và Môi trường (2025). *Báo cáo kết quả thực hiện chương trình phát triển lâm nghiệp bền vững giai đoạn 2021 - 2025.*

A DYNAMIC-BALANCE MODEL FOR MONITORING THE INTERNAL CONSISTENCY OF FOREST STATUS AND CHANGE DATA

Pham Van Dien[1], Nguyen Trong Cuong[2], Pham Duc Dat[3], Truong Tat Do[4]

[1] *Vietnam Academy of Forest Sciences*

[2] *Vietnam National University of Forestry*

[3] *Energy and Environment Consultancy Joint Stock Company*

[4] *Department of Forestry and Forest Protection*

Abstract

This study develops a dynamic balance model to assess the internal consistency of forest data for each spatio-temporal unit. The quantities are organized into state variables, inflows, internal transfer flows, outflows and adjustment variables, forming the basis for component and aggregate balance equations and six indicators to support the interpretation and reconciliation of forest data. Model suitability is evaluated at three levels: Algebraic closure; the ability to reproduce end-of-period states; and the responses to deliberately introduced, controlled discrepancies. The results confirm that the model meets the objectives and requirements of internal consistency assessment. An illustration using national data for 2021-2025 shows that the backlog ratio of areas not yet meeting forest criteria (RB) increased from 7.03% to 12.61%; the rate of transition to forest status (PE) ranged from 0.8% to 88.8% for natural forests and from 14.7% to 75.0% for planted forests; the area compensation coefficient for forests meeting the applicable criteria (K) ranged from 0.86 to 36.92 for natural forests and from 1.00 to 1.68 for planted forests; the forest data balance discrepancy (ε) ranged from -195,215.7 to -70,000.0 ha; the forest data balance index (CB) ranged from 98.76 to 99.54; and the forest data warning index (OR) ranged from 26.36% to 43.16%. The model contributes a desk-based verification layer that supports cross-checking, data tracing and warnings, but does not replace field surveys or validation against independent reference data. Further validation using traceable empirical data at the provincial, forest owner, or forest parcel level is needed.

Keywords: *Forest status, forest changes, dynamic balance model, forest data governance, data consistency.*

Ngày nhận bài: 8/6/2026

Ngày chuyển phản biện: 25/6/2026

Ngày thông qua phản biện: 18/8/2026

Ngày duyệt đăng: 15/9/2026