

TỔNG QUAN VÀ ĐÁNH GIÁ CÁC PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH KHẢ NĂNG HẤP THỤ VÀ LƯU TRỮ CARBON CỦA CÂY XANH ĐÔ THỊ

Nguyễn Thị Mỹ Lệ

Khoa Kiến trúc và quy hoạch, trường Đại học Xây dựng Hà Nội

Tóm tắt

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và mục tiêu phát thải ròng bằng “0” (Net Zero), cây xanh đô thị đóng vai trò quan trọng trong hấp thụ và lưu trữ carbon. Việc đánh giá chính xác khả năng này là cơ sở cho kiểm kê khí nhà kính, quy hoạch không gian xanh và xây dựng các giải pháp giảm nhẹ biến đổi khí hậu. Nghiên cứu này tổng hợp, phân tích và đánh giá các phương pháp xác định khả năng hấp thụ và lưu trữ carbon của cây xanh đô thị, bao gồm phương pháp đo đạc trực tiếp, phương trình sinh khối, hướng dẫn IPCC, các mô hình và công nghệ chuyên dụng. Kết quả cho thấy phương pháp phương trình sinh khối kết hợp hướng dẫn IPCC hiện phù hợp nhất với điều kiện Việt Nam, trong khi các mô hình i-Tree Eco, CTCC và công nghệ viễn thám có tiềm năng ứng dụng trong nghiên cứu quy mô lớn.

Từ khóa: *Cây xanh đô thị, hấp thụ carbon; lưu trữ carbon, ước tính sinh khối.*

REVIEW AND EVALUATION OF METHODS FOR ASSESSING CARBON SEQUESTRATION AND STORAGE CAPACITY OF URBAN TREES

Abstract

In the context of climate change and the goal of achieving net-zero emissions, urban trees play an important role in carbon sequestration and storage. Accurately assessing their carbon sequestration and storage capacity provides a scientific basis for greenhouse gas inventories, urban green space planning, and the development of climate change mitigation strategies. This study reviews, analyzes, and evaluates methods for estimating the carbon sequestration and storage capacity of urban trees, including direct measurement methods, biomass-based approaches, IPCC guidelines, models, and specialized technologies. The results indicate that the biomass-based approach combined with IPCC guidelines is currently the most suitable method for Vietnam. Meanwhile, models such as i-Tree Eco and CTCC, together with remote sensing technologies, show considerable potential for large-scale applications when

urban tree databases become more comprehensive.

Keywords: *Urban trees, carbon sequestration, carbon storage, biomass estimation.*

JEL Classifications: *Q54, Q58, O44.*

1. Đặt vấn đề

Biến đổi khí hậu (BĐKH) là một trong những thách thức lớn đối với phát triển bền vững toàn cầu. Sự gia tăng nồng độ khí nhà kính, đặc biệt là CO₂, là nguyên nhân chính gây nóng lên toàn cầu và làm gia tăng các hiện tượng thời tiết cực đoan.

Trong các giải pháp giảm nhẹ BĐKH, cây xanh đô thị được xem là một giải pháp dựa vào thiên nhiên hiệu quả nhờ khả năng hấp thụ CO₂ thông qua quang hợp và lưu trữ carbon trong sinh khối và đất. Ngoài vai trò giảm phát thải khí nhà kính, cây xanh đô thị còn góp phần cải thiện vi khí hậu, giảm ô nhiễm không khí, giảm tiếng ồn và nâng cao chất lượng môi trường sống.

Để định lượng khả năng hấp thụ và lưu trữ carbon của cây xanh đô thị, nhiều phương pháp và công cụ đã được phát triển, gồm phương pháp đo trực tiếp, phương pháp xác định sinh khối và tính toán gián tiếp, hướng dẫn của IPCC, các mô hình như i-Tree Eco, CUFR Tree Carbon Calculator (CTCC), CityTree cùng các công nghệ viễn thám, LiDAR và GIS. Mỗi phương pháp có ưu điểm, hạn chế và phạm vi áp dụng riêng.

Các phương pháp này được ứng dụng trong nhiều nghiên cứu đánh giá khả năng hấp thụ và lưu trữ carbon của cây xanh đô thị như Keelong (Đài Loan) [1], Munich (Đức) [2] và Bolzano (Ý) [3]. Tại Việt Nam, các nghiên cứu mới chủ yếu tập trung vào xác định sinh khối, phương trình sinh khối hoặc đánh giá khả năng lưu trữ carbon tại một số khu vực cụ thể như Thanh Khê (Đà Nẵng) [4] và Công viên Tao Đàn (TP. Hồ Chí Minh) [5].

Tuy nhiên, đến nay vẫn chưa có nghiên cứu tổng quan một cách hệ thống các phương pháp xác định khả năng hấp thụ và lưu trữ carbon của cây xanh đô thị, đồng thời đánh giá khả năng áp dụng các phương pháp này trong điều kiện Việt Nam. Vì vậy, nghiên cứu này được thực hiện nhằm tổng quan, phân tích và đánh giá các phương pháp đang được sử dụng phổ biến trên thế giới, từ đó đề xuất định hướng lựa chọn và áp dụng phù hợp cho nghiên cứu, kiểm kê khí nhà kính và quản lý cây xanh đô thị ở Việt Nam.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Phương pháp thu thập và tổng quan tài liệu

Nghiên cứu sử dụng phương pháp tổng quan tài liệu để thu thập và hệ thống hóa các nghiên cứu liên quan đến xác định khả năng hấp thụ và lưu trữ carbon của cây xanh đô thị. Nguồn tài liệu gồm: hướng dẫn của IPCC; các mô hình và công cụ chuyên dụng như i-Tree Eco, CTCC, CityTree; cùng các nghiên cứu trong nước và quốc tế về sinh khối, hấp thụ và lưu trữ carbon. Các tài liệu được lựa chọn dựa trên tính khoa học, độ tin cậy và mức độ liên quan đến chủ đề nghiên cứu.

2.2. Phương pháp phân tích và phân loại

Các tài liệu được phân tích nhằm làm rõ cơ sở khoa học, nguyên lý, quy trình thực hiện, dữ liệu đầu vào và khả năng xác định lượng carbon hấp thụ, lưu trữ của từng phương pháp. Trên cơ sở đó, các phương pháp được phân loại thành bốn nhóm: phương pháp đo trực tiếp; phương pháp xác định sinh khối và tính toán gián tiếp; phương pháp sử dụng mô hình và phần mềm chuyên dụng; phương pháp ứng dụng viễn thám và GIS.

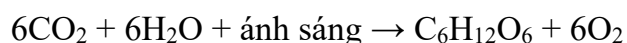
2.3. Phương pháp so sánh và đánh giá

Các phương pháp được so sánh và đánh giá theo các tiêu chí: độ chính xác, chi phí thực hiện, yêu cầu dữ liệu đầu vào, khả năng áp dụng ở các quy mô khác nhau, mức độ phù hợp với điều kiện đô thị và khả năng áp dụng tại Việt Nam. Kết quả là cơ sở để đề xuất các phương pháp phù hợp cho nghiên cứu, kiểm kê khí nhà kính và quản lý cây xanh đô thị trong bối cảnh thực hiện mục tiêu Net Zero.

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

3.1. Cơ sở khoa học của quá trình hấp thụ và lưu trữ carbon trong cây xanh đô thị

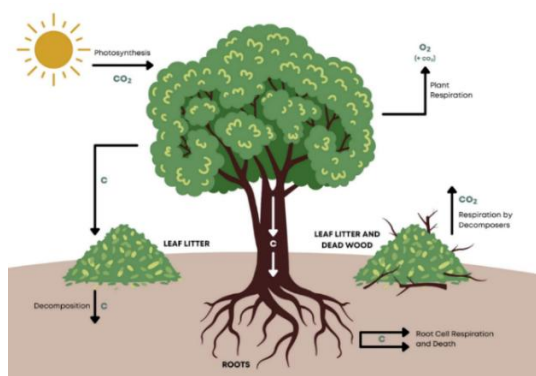
Cây xanh đô thị tham gia vào chu trình carbon thông qua việc hấp thụ CO₂ từ khí quyển, chuyển hóa thành chất hữu cơ và tích lũy carbon trong sinh khối thực vật và đất. Khả năng hấp thụ và lưu trữ carbon phụ thuộc vào loài cây, kích thước, tốc độ sinh trưởng và điều kiện môi trường. Quá trình quang hợp được biểu diễn bằng phương trình:



Carbon thường chiếm khoảng 45–50% sinh khối khô, do đó việc xác định sinh khối là cơ sở để ước tính lượng carbon lưu trữ.

Theo IPCC (2003) [6], carbon được lưu trữ trong năm bể chứa gồm: sinh khối trên mặt đất, sinh khối dưới mặt đất, thảm mục, gỗ chết và carbon hữu cơ trong đất. Với cây xanh đô thị, do ảnh hưởng của hoạt động quản lý và điều kiện bê tông hóa, lượng carbon

trong thảm mục, gỗ chết và đất thường không đáng kể. Vì vậy, sinh khối trên mặt đất (thân, cành và lá) được xem là bể chứa carbon quan trọng nhất khi đánh giá khả năng lưu trữ carbon của cây xanh đô thị.



Hình 1. Quá trình hấp thụ và lưu trữ carbon của cây xanh (Nguồn: <https://carbonstoreuk.com/publications/a-carbon-source-sink-and-store-explaining-soil-carbon>)

3.2. Các phương pháp định lượng hấp thụ CO₂ của cây xanh

Khác với lưu trữ carbon là lượng carbon tích lũy trong sinh khối cây tại một thời điểm, hấp thụ CO₂ là lượng CO₂ được cây loại bỏ khỏi khí quyển trong một khoảng thời gian nhất định, thường tính theo năm. Hiện nay, các phương pháp định lượng hấp thụ CO₂ của cây xanh đô thị có thể chia thành các nhóm chính sau:

3.2.1. Nhóm phương pháp định lượng hấp thụ CO₂ trực tiếp

a) Buồng đo trao đổi khí (Gas Exchange Chamber)

Đây là phương pháp xác định trực tiếp tốc độ hấp thụ CO₂ của lá cây thông qua việc đo sự thay đổi nồng độ CO₂ trong buồng kín gắn lên lá hoặc cành. Dữ liệu thu được phản ánh cường độ quang hợp và khả năng cố định carbon của cây.

Phương pháp có độ chính xác cao, cho phép đánh giá trực tiếp các đặc điểm sinh lý quang hợp của từng loài cây. Tuy nhiên, kết quả chỉ đại diện cho lá hoặc cành được đo và việc ngoại suy lên toàn cây hoặc quần thể cây có thể làm gia tăng sai số. Ngoài ra, chi phí thiết bị cao và thời gian khảo sát lớn. Do đó, phương pháp này chủ yếu được sử dụng trong nghiên cứu sinh lý thực vật và hiệu chỉnh các mô hình hấp thụ carbon hơn là kiểm kê carbon ở quy mô đô thị.

b) Hệ thống cảm biến CO₂

Hệ thống cảm biến CO₂ sử dụng các cảm biến hồng ngoại hoặc thiết bị phân tích khí để theo dõi liên tục sự biến động nồng độ CO₂ trong không khí ở quy mô cây, cụm

cây hoặc không gian xanh đô thị.

Ưu điểm của phương pháp là khả năng quan trắc liên tục, không phá hủy đối tượng nghiên cứu và phản ánh điều kiện thực tế của môi trường đô thị. Tuy nhiên, nồng độ CO₂ chịu ảnh hưởng của nhiều nguồn phát thải và hấp thụ khác nhau như giao thông, công nghiệp, hô hấp của thực vật và vi sinh vật đất. Vì vậy, dữ liệu cảm biến thường chỉ phản ánh biến động nồng độ CO₂ mà không thể trực tiếp xác định lượng carbon hấp thụ nếu không kết hợp với các mô hình hoặc phương pháp bổ sung.

Hiện nay, hệ thống cảm biến CO₂ thường được sử dụng kết hợp với buồng đo trao đổi khí, mô hình cân bằng carbon, i-Tree Eco hoặc các công nghệ viễn thám nhằm nâng cao độ chính xác trong đánh giá khả năng hấp thụ carbon của cây xanh đô thị.

3.2.2. Nhóm phương pháp định lượng hấp thụ CO₂ gián tiếp thông qua sinh khối cây

a) Phương pháp xác định sinh khối trực tiếp (chặt hạ và cân đo)

Đây được xem là phương pháp chuẩn để xác định sinh khối và trữ lượng carbon của cây xanh, dựa trên việc chặt hạ cây, tách các bộ phận như thân, cành, lá và rễ, xác định khối lượng tươi, sau đó sấy khô để tính sinh khối khô, từ đó tính lượng carbon lưu trữ thông qua hệ số carbon, và quy đổi sang lượng CO₂ tương đương.

Phương pháp có độ chính xác cao do sinh khối được xác định bằng đo đạc thực tế. Đây cũng là cơ sở để xây dựng các phương trình sinh khối và kiểm chứng các phương pháp gián tiếp khác. Tuy nhiên, phương pháp có tính phá hủy, chi phí cao, khó xác định toàn bộ hệ rễ và chỉ áp dụng cho số lượng mẫu hạn chế. Vì vậy, trong cây xanh đô thị, phương pháp này chủ yếu được sử dụng để xây dựng cơ sở dữ liệu sinh khối và phát triển các phương trình sinh khối đặc thù cho từng loài.

b) Phương trình sinh khối (Allometric Equations)

Phương pháp này được sử dụng phổ biến nhất hiện nay, dựa trên mối quan hệ giữa sinh khối với các chỉ tiêu hình thái dễ đo ngoài thực địa như đường kính ngang ngực (DBH), chiều cao cây (H), đường kính tán hoặc khối lượng riêng của gỗ (WD). Các phương trình thường được xây dựng từ dữ liệu chặt hạ và cân đo trực tiếp.

Dạng tổng quát của phương trình sinh khối trên mặt đất (AGB) như sau:

$$AGB = a \times DBH^b$$

Hoặc dạng mở rộng: $AGB = a \times DBH^b \times H^c$

Trong đó: + AGB (Above ground biomass): sinh khối khô trên mặt đất

- + a, b, c: các hệ số xác định từ thực nghiệm và phân tích hồi quy (phụ thuộc vào loại cây và khu vực sinh thái).
- + DBH (Diameter at Breast Height): đường kính ngang ngực (cm).
- + H (Height): chiều cao cây (m).

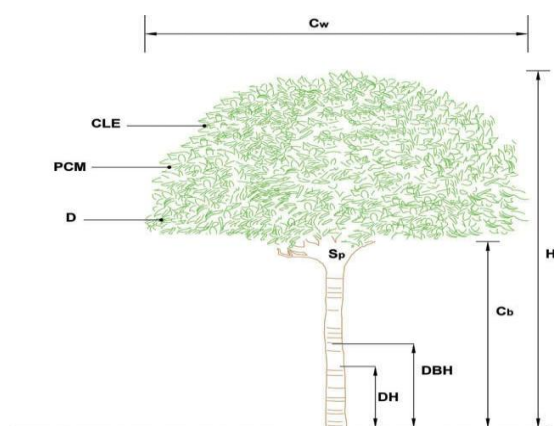
Sau khi xác định sinh khối, lượng carbon lưu trữ được tính theo hệ số carbon (CF), sau đó quy đổi sang CO₂ tương đương.

Ưu điểm của phương pháp là không phá hủy cây, chi phí thấp, dễ triển khai và có thể áp dụng cho số lượng lớn cây xanh, vì vậy được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu kiểm kê carbon và quản lý cây xanh đô thị. Tuy nhiên, độ chính xác phụ thuộc lớn vào chất lượng của phương trình. Các phương trình thường được xây dựng cho một loài hoặc một vùng sinh thái cụ thể nên có thể phát sinh sai số khi áp dụng cho khu vực khác. Ngoài ra, sinh khối dưới mặt đất thường được ước tính gián tiếp thông qua hệ số rễ/thân, làm gia tăng mức độ không chắc chắn của kết quả.

Phần lớn phương trình hiện nay được phát triển cho cây rừng, trong khi cây xanh đô thị có điều kiện sinh trưởng khác biệt về không gian sống, chế độ chăm sóc và hình thái tán cây. Do đó, sử dụng phương trình sinh khối rừng cho cây đô thị có thể dẫn đến sai số đáng kể. Nowak (1994) đề xuất hệ số 0,8 đối với cây đô thị mọc ngoài trời [7].

Tại Việt Nam, phương trình sinh khối được xem là phương pháp phù hợp và khả thi nhất hiện nay để xác định khả năng lưu trữ carbon của cây xanh đô thị. Tuy nhiên, cơ sở dữ liệu và các phương trình sinh khối dành riêng cho các loài cây đô thị phổ biến còn hạn chế. Vì vậy, việc xây dựng các phương trình đặc thù cho các loài cây như sấu, xà cừ, bàng lẵng, sao đen, giáng hương và phượng vĩ là hướng nghiên cứu cần được ưu tiên nhằm nâng cao độ chính xác trong kiểm kê carbon và quản lý cây xanh đô thị.

Nhiều nghiên cứu đã phát triển các phương trình sinh khối dành riêng cho cây xanh đô thị bằng cách bổ sung các biến như chiều rộng tán, tỷ lệ tán lá hoặc mức độ tiếp xúc ánh sáng nhằm nâng cao độ chính xác (Hình 2).



Hình 2. Các thông số cây đô thị được lấy mẫu ở Bolzano, Bắc Ý:

Sp = loài, DH = đường kính ở độ cao 1 m, DBH = đường kính ở độ cao ngang ngực (1,37 m), Cb = chiều cao gốc tán cây, Ht = chiều cao tổng thể, Cw = chiều rộng tán cây, CLE = lượng ánh sáng tán cây tiếp xúc, PCM = phần trăm tán cây bị mất, D = tán cây chết (Nguồn: A. Russo và cộng sự, 2014). [3]

3.3. Hướng dẫn của Ủy ban Liên chính phủ về BĐKH (IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change) [6], [8]

Hướng dẫn của IPCC là bộ phương pháp tiêu chuẩn quốc tế được sử dụng rộng rãi trong kiểm kê khí nhà kính và đánh giá khả năng hấp thụ, lưu trữ carbon của các hệ sinh thái, bao gồm cây xanh đô thị. Phương pháp này xác định lượng carbon lưu trữ và CO₂ hấp thụ dựa trên sinh khối cây cùng các hệ số chuyển đổi tiêu chuẩn. Trong đó, sinh khối cây bao gồm sinh khối trên mặt đất và sinh khối dưới mặt đất.

Sinh khối trên mặt đất AGB (*Above-Ground Biomass*, kg) được xác định thông qua các phương trình sinh khối dựa trên các chỉ tiêu hình thái như đường kính ngang ngực (DBH), chiều cao cây, đường kính tán. Với sinh khối dưới mặt đất BGB (*Below-Ground Biomass*, kg), do việc đào và cân đo trực tiếp hệ thống rễ gặp nhiều khó khăn, IPCC khuyến nghị sử dụng hệ số rễ/thân R (*Root-to-Shoot Ratio*) $R = 0,20 \div 0,26$. [8]:

$$BGB = AGB \times R$$

Tổng sinh khối khô của cây B (*Biomass*, kg) được xác định theo công thức:

$$B = AGB + BGB$$

Trữ lượng carbon của cây C (*Carbon Stock*, kg C/cây) được xác định từ sinh khối thông qua hệ số carbon CF (*Carbon Fraction*): $CF = 0,47$ [6]

$$C = B \times CF$$

Lượng CO₂ tương đương A_{CO_2} (kg CO₂/cây) được tính theo công thức:

$$A_{CO_2} = C \times 3,67$$

Trong đó: $44/12 = 3,67$: hệ số chuyển đổi từ carbon sang CO₂.

3.4. Nhóm mô hình và phần mềm chuyên dụng

3.4.1. i-Tree Eco [9]

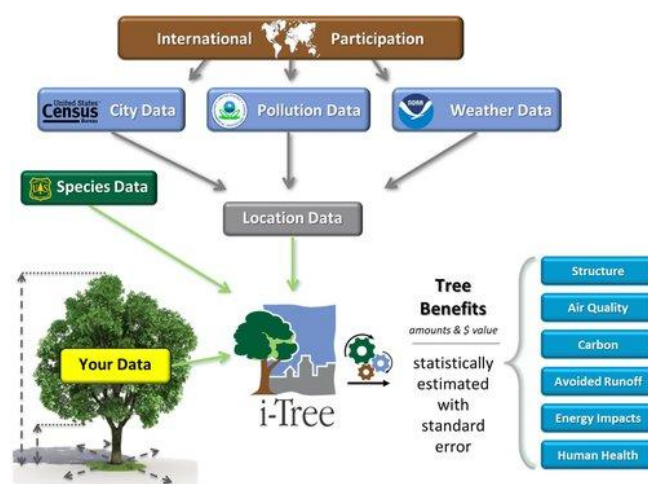
i-Tree Eco là một phần trong bộ công cụ i-Tree, là một trong những công cụ được sử dụng rộng rãi nhất hiện nay để đánh giá giá trị sinh thái của cây xanh đô thị, bao gồm lưu trữ carbon, hấp thụ CO₂, sản xuất oxy và loại bỏ các chất ô nhiễm không khí.

i-Tree Eco sử dụng các phương trình sinh khối kết hợp với dữ liệu điều tra thực địa như loài cây, đường kính thân (DBH), chiều cao, kích thước tán và tình trạng sinh trưởng để xác định sinh khối, lượng carbon lưu trữ. Lượng carbon hấp thụ hằng năm được ước tính dựa trên sự gia tăng sinh khối theo thời gian. Đối với cây xanh đô thị, mô hình áp dụng hệ số hiệu chỉnh nhằm phản ánh sự khác biệt về sinh trưởng giữa cây đô thị và cây rừng (Nowak, 1994). [7]

Nghiên cứu tại Bolzano (Ý) trên 475 cây đô thị cho thấy lượng carbon lưu trữ đạt 134,89 Mg, khả năng hấp thụ carbon/năm đạt 5,82 Mg [3]. Tại Việt Nam, nghiên cứu ở Thanh Khê (Đà Nẵng) ước tính hệ thống cây xanh lưu trữ khoảng 994,5 tấn carbon. [4]

i-Tree Eco có khả năng đánh giá nhanh số lượng lớn cây xanh với quy trình chuẩn hóa và chi phí thấp hơn đáng kể so với đo đạc trực tiếp, kết quả đầu ra đa dạng; tuy nhiên, độ chính xác phụ thuộc vào chất lượng dữ liệu đầu vào và mức độ phù hợp của cơ sở dữ liệu loài cây. Phần lớn các phương trình sinh khối trong i-Tree Eco được xây dựng từ dữ liệu vùng Bắc Mỹ nên có thể sai số khi áp dụng cho các loài cây nhiệt đới.

Tại Việt Nam, việc thiếu dữ liệu sinh khối và thông số sinh trưởng đặc thù cho các loài cây đô thị là rào cản lớn đối với việc ứng dụng rộng rãi mô hình này. Tuy vậy, cùng với sự hoàn thiện cơ sở dữ liệu cây xanh đô thị, i-Tree Eco được đánh giá có tiềm năng ứng dụng cao trong nghiên cứu và quản lý carbon cây xanh đô thị.



Hình 3. Mô hình phân tích của i-Tree (Nguồn: www.itreetools.org)

3.4.2. CUFR Tree Carbon Calculator (CTCC) [10]

CTCC là công cụ được phát triển bởi Cục Lâm nghiệp Hoa Kỳ, nhằm ước tính lượng carbon lưu trữ, khả năng hấp thụ CO₂ hằng năm và lợi ích tiết kiệm năng lượng của cây xanh đô thị. CTCC sử dụng các phương trình sinh khối kết hợp với dữ liệu đầu vào như loài cây, đường kính ngang ngực (DBH), độ tuổi và vùng khí hậu. Ngoài việc đánh giá hiện trạng, mô hình còn sử dụng dữ liệu tăng trưởng để dự báo khả năng hấp thụ carbon của cây trong tương lai.

CTCC đơn giản, dễ sử dụng và yêu cầu ít dữ liệu đầu vào hơn i-Tree Eco, phù hợp với các nghiên cứu sơ bộ, đánh giá nhanh. Tuy nhiên, CTCC được xây dựng chủ yếu dựa trên dữ liệu cây xanh Bắc Mỹ nên độ chính xác có thể giảm khi áp dụng cho cây nhiệt đới hoặc điều kiện sinh trưởng khác biệt. Ngoài ra, khả năng đánh giá các dịch vụ hệ sinh thái và mức độ tùy chỉnh cơ sở dữ liệu còn hạn chế hơn so với i-Tree Eco.

Tại Việt Nam, CTCC có thể được sử dụng để ước tính nhanh lượng carbon lưu trữ, tuy nhiên, để nâng cao độ tin cậy, cần hiệu chỉnh các phương trình sinh khối và thông số tăng trưởng cho các loài cây đô thị phổ biến trước khi áp dụng trên diện rộng.

Nghiên cứu tại Bolzano (Ý) [3] trên 475 cây đô thị cho thấy lượng carbon lưu trữ ước tính theo i-Tree Eco, CTCC và phương trình sinh khối lần lượt là 134,89 Mg, 140,15 Mg và 179,14 Mg. Sau khi áp dụng hệ số hiệu chỉnh 0,8 cho cây đô thị [7], kết quả từ phương trình sinh khối giảm xuống còn 143,3 Mg và tiệm cận với CTCC.

3.4.3. CityTrees

CityTrees là nhóm mô hình mô phỏng cây xanh đô thị được phát triển nhằm đánh giá sinh trưởng cây và các dịch vụ hệ sinh thái trong môi trường đô thị. Mô hình mô

phòng sự tương tác giữa chu trình carbon, nước và các điều kiện môi trường, từ đó xác định sinh khối, lượng carbon lưu trữ và khả năng hấp thụ carbon của cây theo thời gian.

Dữ liệu đầu vào của mô hình bao gồm các thông số cây xanh (loài cây, đường kính thân, chiều cao, kích thước tán) cùng các yếu tố môi trường như khí hậu và điều kiện đất. Kết quả đầu ra có thể bao gồm sinh khối cây, lượng carbon lưu trữ, lượng carbon hấp thụ hằng năm và dự báo tích lũy carbon trong tương lai.

CityTrees có khả năng mô phỏng sinh trưởng và tích lũy carbon của cây xanh trong dài hạn, đồng thời có thể tích hợp với dữ liệu viễn thám và GIS để đánh giá ở quy mô lớn. Tuy nhiên, độ chính xác của mô hình phụ thuộc vào dữ liệu đầu vào, các tham số sinh trưởng và mức độ hiệu chỉnh cho từng loài. Khi áp dụng tại Việt Nam, cần xây dựng cơ sở dữ liệu sinh trưởng và sinh khối phù hợp với các loài cây đô thị địa phương.

3.5. Ứng dụng công nghệ viễn thám và GIS

3.5.1. Viễn thám

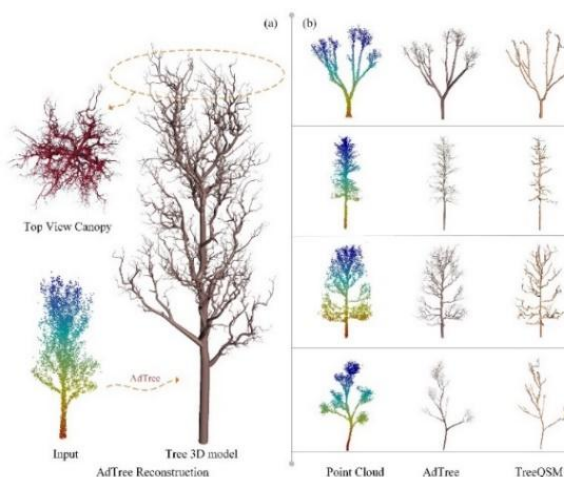
Viễn thám là công nghệ thu nhận thông tin bề mặt Trái Đất thông qua các cảm biến gắn trên vệ tinh, máy bay hoặc thiết bị bay không người lái (UAV). Trong nghiên cứu cây xanh đô thị, dữ liệu viễn thám được sử dụng để xác định độ che phủ cây xanh, đặc điểm tán cây và xây dựng các mô hình ước tính sinh khối, carbon trên diện rộng.

Ưu điểm của phương pháp là khả năng khảo sát nhanh trên phạm vi lớn, cập nhật thường xuyên và chi phí thấp hơn điều tra thực địa. Tuy nhiên, viễn thám chủ yếu phản ánh đặc điểm bề mặt tán cây, khó xác định trực tiếp chiều cao cây và sinh khối dưới mặt đất, đồng thời chịu ảnh hưởng của điều kiện khí quyển và hiện tượng bão hòa tín hiệu ở khu vực có mật độ cây cao. Do đó, viễn thám thường được sử dụng kết hợp với điều tra thực địa, phương trình sinh khối, GIS hoặc công nghệ LiDAR nhằm nâng cao độ chính xác trong đánh giá carbon cây xanh đô thị.

3.5.2. LiDAR

LiDAR (Light Detection and Ranging) là công nghệ viễn thám chủ động sử dụng tia laser để xây dựng mô hình không gian ba chiều của cây xanh và địa hình. Dữ liệu LiDAR được biểu diễn dưới dạng đám mây điểm, cho phép xác định chính xác chiều cao cây, kích thước tán, mật độ tán lá và cấu trúc không gian của cây. Từ các thông số cấu trúc thu được, LiDAR thường được kết hợp với phương trình sinh khối hoặc các thuật toán để ước tính sinh khối và lượng carbon lưu trữ.

Ưu điểm nổi bật của LiDAR là khả năng mô tả cấu trúc ba chiều của cây xanh và phân biệt cây với công trình xây dựng trong môi trường đô thị. Tuy nhiên, chi phí thu thập và xử lý dữ liệu còn tương đối cao, đồng thời đòi hỏi chuyên môn kỹ thuật và phần mềm chuyên dụng. Vì vậy, LiDAR hiện chủ yếu được sử dụng trong các nghiên cứu khoa học và các dự án kiểm kê cây xanh quy mô lớn.



Hình 4. Minh họa quá trình tái tạo cấu trúc cây từ dữ liệu đám mây điểm LiDAR

(a) Đám mây điểm ba chiều của cây sau khi quét laser; (b) Mô hình cấu trúc định lượng QSM mô phỏng hình học thân và cành cây. (Nguồn: H.Xu và cộng sự, 2025)[11]

3.5.3. GIS và xây dựng bản đồ lưu trữ carbon

Hệ thống thông tin địa lý (GIS) không trực tiếp xác định lượng carbon của cây xanh mà đóng vai trò tích hợp, quản lý và phân tích dữ liệu không gian. GIS cho phép kết hợp dữ liệu điều tra cây xanh, ảnh viễn thám, LiDAR và các phương trình sinh khối để xây dựng bản đồ phân bố sinh khối, carbon lưu trữ và khả năng hấp thụ CO₂.

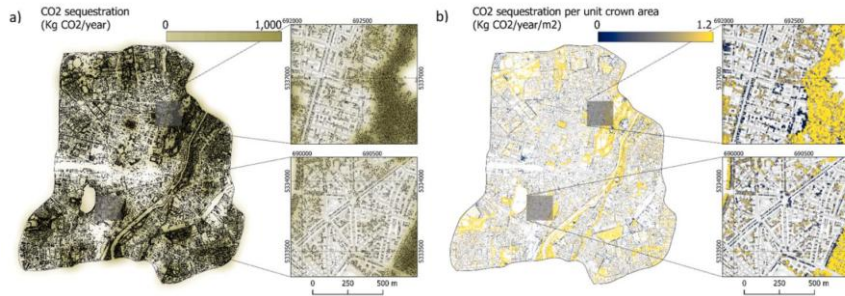
Ưu điểm của GIS là khả năng quản lý dữ liệu không gian quy mô lớn và trực quan hóa kết quả dưới dạng bản đồ, hỗ trợ hiệu quả cho kiểm kê khí nhà kính, quy hoạch không gian xanh và quản lý cây xanh đô thị. Tuy nhiên, độ chính xác của kết quả phụ thuộc trực tiếp vào chất lượng dữ liệu đầu vào và cơ sở dữ liệu cây xanh.

Đối với Việt Nam, việc kết hợp GIS với dữ liệu điều tra hiện trường, ảnh UAV, ảnh vệ tinh và LiDAR được xem là hướng tiếp cận có tiềm năng lớn trong xây dựng cơ sở dữ liệu cây xanh và bản đồ carbon đô thị phục vụ mục tiêu Net Zero.

García de Leon và cộng sự (2026) [2] đã kết hợp GIS, CityTree và viễn thám để xây dựng bản đồ phân bố khả năng hấp thụ CO₂ của cây xanh đô thị tại Munich (Đức):

García de León và cộng sự (2026) [2] đã sử dụng mô hình CityTrees kết hợp viễn

thám, GIS để xây dựng bản đồ phân bố khả năng hấp thụ CO₂ của hơn 160.000 cây xanh đô thị tại Munich (Đức) (Hình 5).



Hình 5. Phân bố không gian các dịch vụ hệ sinh thái của cây xanh đô thị ở Munich

(a) mật độ lưu trữ CO₂ (b) lượng CO₂ lưu trữ theo diện tích tán cây

(Nguồn: García de Leon và cộng sự (2026) [2])

3.6. So sánh và đánh giá các phương pháp

Mỗi phương pháp xác định khả năng hấp thụ và lưu trữ carbon của cây xanh đô thị có nguyên lý, độ chính xác, chi phí và phạm vi ứng dụng khác nhau.

Bảng 1. So sánh tổng hợp các phương pháp xác định khả năng hấp thụ CO₂ và lưu trữ carbon của cây xanh đô thị

Phương pháp		Độ chính xác	Quy mô áp dụng	Chi phí	Ưu điểm chính	Hạn chế chính
Đo trực tiếp	Buồng đo trao đổi khí	Rất cao	Lá, cành, cây đơn lẻ	Rất cao	Đo trực tiếp tốc độ hấp thụ CO ₂	Khó áp dụng quy mô lớn
	Hệ thống cảm biến CO ₂	Trung bình	Cây, cụm cây	Trung bình–cao	Quan trắc liên tục theo thời gian thực	Khó tách riêng CO ₂ hấp thụ
Sinh khối và tính toán gián tiếp	Chặt hạ, cân đo trực tiếp	Rất cao	Cây mẫu	Rất cao	PP chuẩn xác định sinh khối	Phá hủy cây, chi phí lớn
	Phương trình sinh khối	Cao	Cây đơn lẻ, toàn đô thị	Thấp	Không phá hủy, dễ triển khai	Phụ thuộc PT sinh khối
	Hướng dẫn IPCC	Trung bình –cao	Đô thị, vùng, quốc gia	Thấp	Chuẩn quốc tế cho kiểm kê KNK	Phụ thuộc dữ liệu sinh khối
Mô hình và phần mềm	i-Tree Eco	Cao	Quận, thành phố	Trung bình	Đánh giá carbon, nhiều dịch vụ HST	Cần cơ sở dữ liệu chi tiết
	CTCC	Trung bình –cao	Cây đơn lẻ, khu nhỏ	Thấp	Tính toán nhanh, dễ sử dụng	Ít chức năng hơn i-Tree Eco
	CityTrees	Trung bình	Dự án/ khu nghiên cứu	Thấp	Đánh giá nhanh carbon	Phụ thuộc dữ liệu tích hợp
	Viễn thám quang học	Trung bình	Thành phố, vùng đô thị	Thấp – trung bình	Bao phủ diện tích lớn	Không xđ trực tiếp sinh khối
	LiDAR	Cao – rất cao	Thành phố, khu vực lớn	Cao	Xác định cấu trúc 3D của cây	Chi phí và kỹ thuật cao

Viễn thám và GIS	GIS và bản đồ carbon	Phụ thuộc dữ liệu đầu vào	Mọi quy mô	Trung bình	Quản lý và trực quan hóa dữ liệu không gian	Không phải PP xác định carbon độc lập
-------------------------	----------------------	---------------------------	------------	------------	---	---------------------------------------

Kết quả tổng hợp cho thấy, các phương pháp đo trực tiếp như buồng đo trao đổi khí và hệ thống cảm biến CO₂ có độ chính xác cao nhưng khó áp dụng cho kiểm kê cây xanh đô thị do chi phí lớn và phạm vi khảo sát hạn chế.

Nhóm phương pháp xác định sinh khối và tính toán gián tiếp hiện được sử dụng phổ biến nhất. Trong đó, phương pháp chặt hạ và cân đo trực tiếp là cơ sở xây dựng các phương trình sinh khối nhưng không phù hợp với cây xanh đô thị do tính chất phá hủy. Phương trình sinh khối kết hợp với hướng dẫn IPCC cho phép đánh giá carbon với chi phí thấp, độ tin cậy cao và khả năng áp dụng trên diện rộng.

Các mô hình và phần mềm như i-Tree Eco, CTCC và CityTrees giúp tự động hóa quá trình tính toán và hỗ trợ đánh giá ở quy mô lớn. Trong số đó, i-Tree Eco được sử dụng rộng rãi nhất nhờ khả năng đánh giá đồng thời carbon và nhiều dịch vụ hệ sinh thái khác của cây xanh đô thị.

Nhóm công nghệ viễn thám, LiDAR và GIS có ưu thế trong đánh giá trên phạm vi rộng và xây dựng bản đồ carbon đô thị. Đặc biệt, LiDAR cho độ chính xác cao nhờ khả năng mô tả cấu trúc ba chiều của cây xanh, trong khi GIS đóng vai trò tích hợp và quản lý dữ liệu không gian phục vụ quy hoạch và quản lý đô thị.

Với điều kiện Việt Nam hiện nay, phương pháp phù hợp nhất là kết hợp phương trình sinh khối với hướng dẫn IPCC do chi phí thấp, dễ triển khai và đáp ứng yêu cầu kiểm kê khí nhà kính. Trong tương lai, việc tích hợp các mô hình như i-Tree Eco với công nghệ LiDAR, viễn thám và GIS sẽ là hướng phát triển quan trọng nhằm xây dựng cơ sở dữ liệu cây xanh và bản đồ carbon đô thị phục vụ mục tiêu Net Zero.

4. Kết luận

Trong bối cảnh BĐKH và mục tiêu Net Zero, việc xác định chính xác khả năng hấp thụ và lưu trữ carbon của cây xanh đô thị có ý nghĩa quan trọng đối với kiểm kê khí nhà kính, quy hoạch không gian xanh và giảm nhẹ BĐKH. Các phương pháp đánh giá hiện nay có ưu điểm và hạn chế riêng, phù hợp với từng mục tiêu và quy mô ứng dụng khác nhau.

Với Việt Nam, sử dụng phương trình sinh khối kết hợp hướng dẫn của IPCC là hướng tiếp cận phù hợp do có cơ sở khoa học, chi phí hợp lý và khả năng triển khai cao.

Tuy nhiên, cần xây dựng các phương trình sinh khối đặc thù cho các loài cây đô thị phổ biến và hoàn thiện cơ sở dữ liệu về sinh trưởng, sinh khối và hàm lượng carbon.

Trong tương lai, việc tích hợp dữ liệu thực địa với các mô hình như i-Tree Eco, CTCC cùng công nghệ LiDAR, viễn thám và GIS sẽ góp phần nâng cao độ chính xác trong đánh giá carbon cây xanh đô thị, phục vụ kiểm kê khí nhà kính, quản lý không gian xanh và phát triển đô thị bền vững hướng tới mục tiêu Net Zero.

Tài liệu tham khảo

1. Y. C. Chen, "Evaluation of Greenhouse Gas Emissions and Energy Recovery from Planting Street Trees," *Journal of Waste Management and Disposal*, vol. 2, article 202, 2019.
2. A. S. García de León, T. Rötzer, T. Leichtle, S. Pauleit, J. Friesen, K. Martin, T. Ullmann, and H. Taubenböck, "Beyond public inventories: Remote sensing-based assessment of urban tree ecosystem services," *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 119, Art. no. 129382, May 2026.
3. Escobedo, F. J., Russo, A., Timilsina, N., Schmitt, A. O., Varela, S., and Zerbe, S., "Assessing urban tree carbon storage and sequestration in Bolzano, Italy," *Int. J. Biodivers. Sci. Ecosyst. Serv. Manage.*, vol. 10, no. 1, pp. 54-70, 2014.
4. Trần Ngọc Sơn, Hà Minh Hiếu, Võ Văn Minh, và Hoàng Văn Chương, "Đánh giá cấu trúc, lợi ích và giá trị của cây xanh tại một số tuyến đường giao thông thuộc quận Thanh Khê, TP. Đà Nẵng bằng mô hình I-Tree Eco," *Tap chí Môi trường, Chuyên đề Tiếng Việt*, vol. 4, 2022.
5. Viên, Ngọc Nam và Huỳnh Thái Thảo, "Nghiên cứu hấp thụ CO₂ của thực vật thân gỗ tại công viên Tao Đàn, thành phố Hồ Chí Minh," *Jan.* 2013.
6. IPCC, *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Hayama, Japan: IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, 2003.
7. D. J. Nowak, "Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago's urban forest," in *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*, E. G. McPherson, D. J. Nowak, and R. A. Rowntree, Eds. Radnor, PA, USA: USDA Forest Service, General Technical Report NE-186, 1994.

8. *IPCC, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019.*
9. *i-Tree Tools. (2021). User Guide and Application Manual. U.S. Forest Service.*
10. *CUFR Tree Carbon Calculator: CTCC_Help_National. Urban Forest Research - CUFR.*
11. *H. Xu, Y. Huai, X. Nie, Q. Meng, X. Zhao, X. Pei, and H. Lu, "Diff-Tree: A Diffusion Model for Diversified Tree Point Cloud Generation with High Realism," Remote Sensing, vol. 17, no. 5, Art. no. 923, 2025, doi: 10.3390/rs17050923).*