

Đánh giá tính tổn thương sinh thái bằng phương pháp kết hợp phân tích thứ bậc mờ (AHP-FUZZY) và thống kê không gian Moran's I tại Thành phố Hồ Chí Minh

Hà Tuấn Cường*

Phân viện Điều tra Quy hoạch rừng Nam Bộ, Việt Nam

TỪ KHÓA

AHP - Fuzzy,
mô hình PSR,
tổn thương sinh thái,
tương quan không gian,
thành phố Hồ Chí Minh.

TÓM TẮT

Với sự mở rộng của đô thị hoá, tương tác không gian sinh thái tự nhiên giữa con người và môi trường ngày càng được chú trọng, do đó, việc đánh giá định lượng tính dễ bị tổn thương sinh thái có ý nghĩa rất lớn đối với công tác bảo vệ và khôi phục hệ sinh thái ở các khu vực dễ bị tổn thương. Trong nghiên cứu này, mô hình AHP-PSR (Phân tích thứ bậc - áp lực - nhạy cảm - khả năng phục hồi) cùng với phân tích mờ Fuzzy đã được sử dụng để đánh giá mức độ dễ bị tổn thương sinh thái của thành phố Hồ Chí Minh năm 2023. Mô hình PSR được sử dụng để lựa chọn 13 tham số, AHP - Fuzzy được dùng để xác định trọng số của các tham số, và công cụ GIS được áp dụng để đánh giá mức độ dễ bị tổn thương sinh thái. Kết quả cho thấy mức độ dễ bị tổn thương sinh thái cao với diện tích 15.746,66 ha, phân bố tập trung ở các quận trung tâm, nơi có mật độ xây dựng cao; trái lại mức độ tổn thương thấp phân bố tại những nơi duy trì mảng xanh như huyện Cần Giờ và Củ Chi... với diện tích hơn 33.000 ha. Sự khác biệt giữa kết quả đánh giá độ dễ bị tổn thương sinh thái cho thấy vai trò của con người trong việc làm thay đổi môi trường tự nhiên. Con người có thể cải thiện môi trường sinh thái vốn đã dễ bị tổn thương thông qua các hoạt động tích cực.

1. Giới thiệu

Tính dễ bị tổn thương sinh thái liên quan đến nguy cơ gây thiệt hại cho môi trường tự nhiên, các yếu tố bị ảnh hưởng bao gồm hệ sinh thái, dân số, cũng như các quá trình vật lý và sinh học, mà các yếu tố này có thể bị tác động bởi các hoạt động do con người gây ra (Kaly & cộng sự, 2002) và được chi phối bởi bốn yếu tố: đặc điểm thủy văn - khí tượng, tài nguyên đất, kinh tế - xã hội và điều kiện địa hình, có thể được phân loại thành hai loại: tính dễ bị tổn thương bên trong và bên ngoài. Một khu vực được coi là tổn thương về sinh thái

nếu hệ sinh thái, các loài và các quá trình của nó dễ bị ảnh hưởng bởi những áp lực gây hại từ con người và tự nhiên, đặc biệt khi các áp lực này ở mức cao (Kaly & cộng sự, 1999).

Nhiều phương pháp được sử dụng để phân tích tính dễ bị tổn thương: một số nghiên cứu sử dụng mô hình toán học (Wilson & cộng sự, 2005); trong khi các nghiên cứu khác sử dụng quy trình phân tích thứ bậc (Analytic Hierarchy Process - AHP) (Wang & cộng sự, 2008); phương pháp đánh giá mờ (Fuzzy Evaluation Method) (Enea & Salemi, 2001); mạng neural nhân tạo (Artificial Neural Network) (Dzeroski, 2001); phương

*Tác giả liên hệ. Email: tuancuongdialyk38@gmail.com

<https://doi.org/10.61602/jdi.2026.86.09>

Ngày nộp bài: 11/3/2025; Ngày chỉnh sửa: 09/6/2025; Ngày duyệt đăng: 18/6/2025; Ngày online: 01/12/2025

ISSN (print): 1859-428X, ISSN (online): 2815-6234

pháp đánh giá tổng hợp (Goda & Mastuoka, 1986); phương pháp đánh giá xám (grey evaluation method) (Hao & Zhou, 2002);... Các phương pháp này được sử dụng để phân tích định lượng tính dễ bị tổn thương.

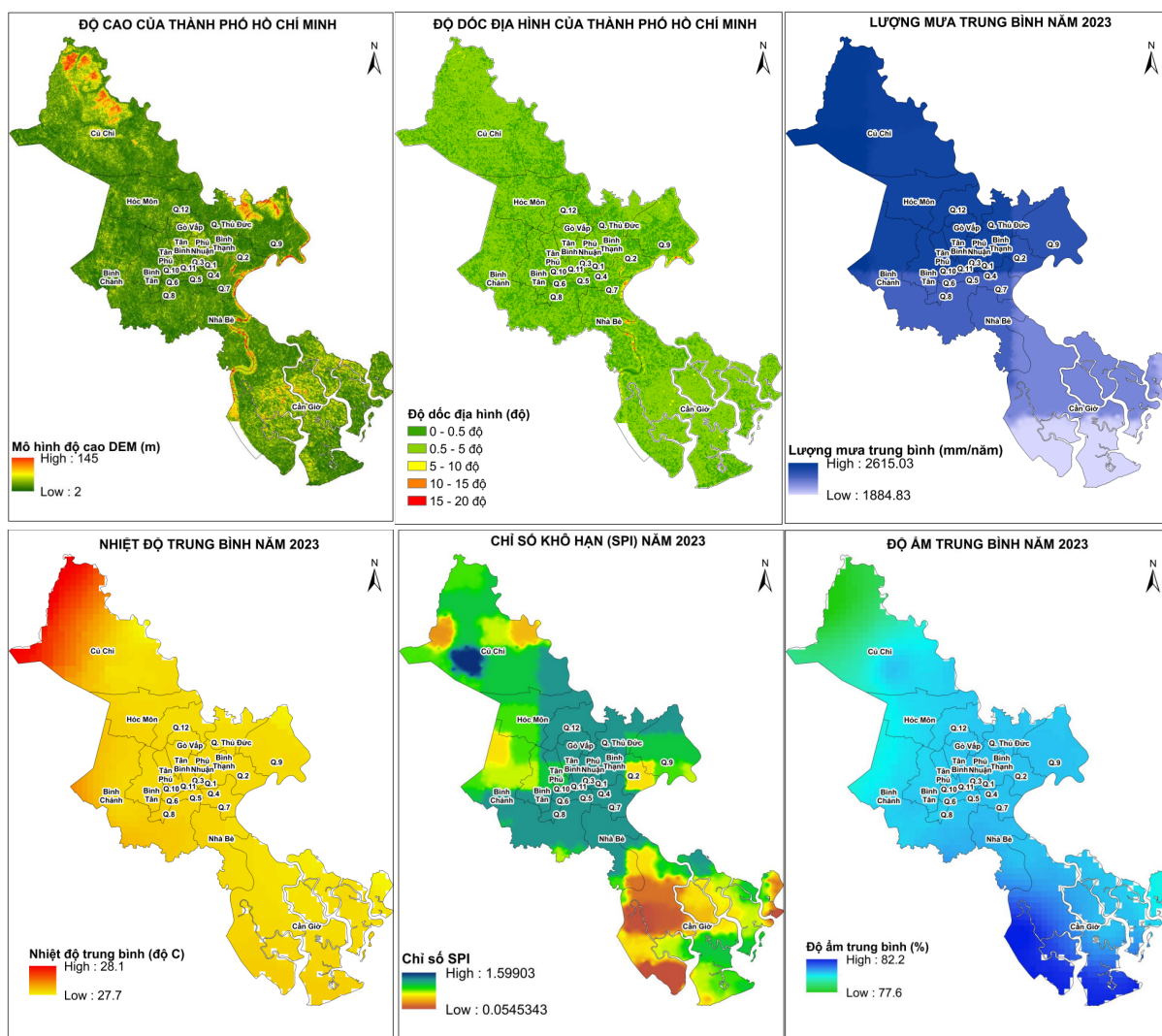
Phân tích tính dễ bị tổn thương sinh thái mang tính đa chiều nên việc xác định mối quan hệ giữa các yếu tố của tính dễ bị tổn thương là điều cần thiết trong một môi trường tổng thể (Singh, 2012). Nhằm giải quyết hai khía cạnh vấn đề của đánh giá tính dễ bị tổn thương sinh thái, đó là nguyên nhân nào đóng vai trò tác nhân chính trong yếu tố tổn thương và trực quan hoá kết quả phân tích, đánh giá bằng dữ liệu địa lý, bài viết này tiếp cận nghiên cứu tính dễ tổn thương của sinh thái bằng việc tính toán, phân tích dữ liệu viễn thám nguồn mở cùng với phương pháp nghiên cứu chính là phân tích thứ bậc mờ (AHP - Fuzzy) và GIS.

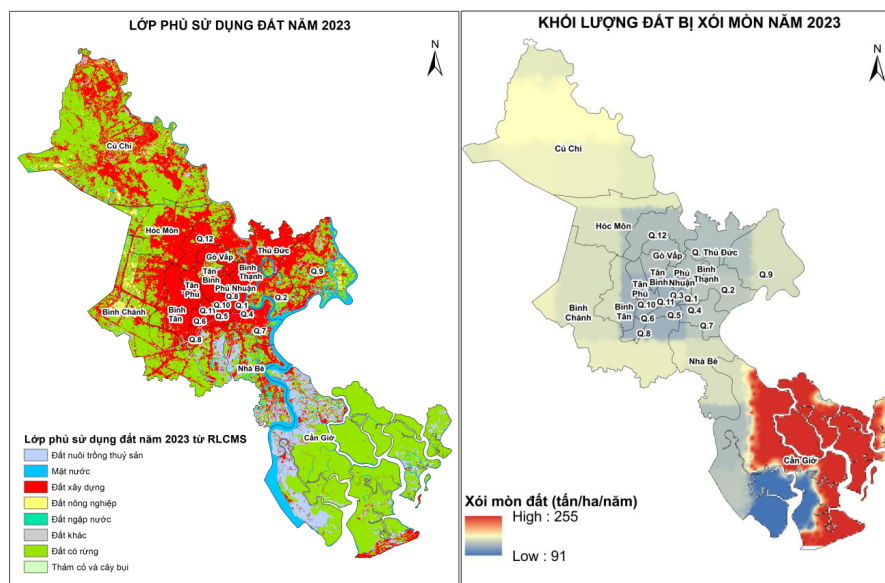
2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Dữ liệu nghiên cứu

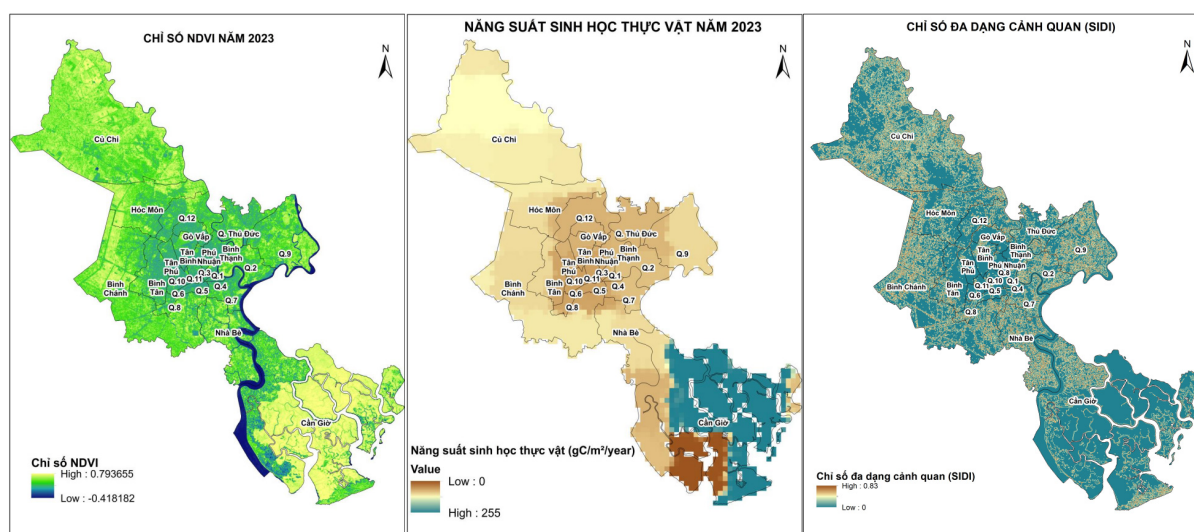
Trong nghiên cứu này, mô hình PSR (áp lực – nhạy cảm – khả năng phục hồi) được sử dụng để lựa chọn các tham số đánh giá. Mô hình PSR được đề xuất bởi Tổ chức Hợp tác và Phát triển Kinh tế (OECD) và Chương trình Môi trường Liên Hợp Quốc (UNEP) vào cuối những năm 1980 (Tong, 2000). Các yếu tố được lựa chọn trong nghiên cứu bao gồm dữ liệu viễn thám (như NDVI, NPP, chỉ số xây dựng,...), dữ liệu khí tượng (như độ ẩm, nhiệt độ,...), và dữ liệu kinh tế – xã hội (như mật độ dân số, chỉ số xây dựng), nhằm bao quát đầy đủ ba trụ cột nói trên.

- Tính nhạy cảm (sensitivity) thể hiện mức độ mà hệ sinh thái bị ảnh hưởng bởi các tác động tự nhiên và nhân tạo (Luers & cộng sự, 2003). Các yếu tố liên quan đến địa hình, khí hậu và lớp phủ thực vật có thể làm tăng khả năng bị tác động của hệ sinh thái, khiến nó dễ bị tổn thương hơn. Ví dụ như một khu vực đất có độ cao thấp, độ dốc nhỏ, thảm phủ kém phát triển có thể dễ bị xói mòn đất, ngập úng hoặc suy giảm đa dạng sinh học do sự thay đổi về sử dụng đất hoặc thời tiết.





Hình 1. Phân bố không gian các yếu tố nhạy cảm sinh thái: độ cao, độ dốc, lượng mưa trung bình, nhiệt độ trung bình, chỉ số lượng mưa chuẩn hoá SPI, độ ẩm trung bình, lớp phủ sử dụng đất và giá trị xói mòn đất



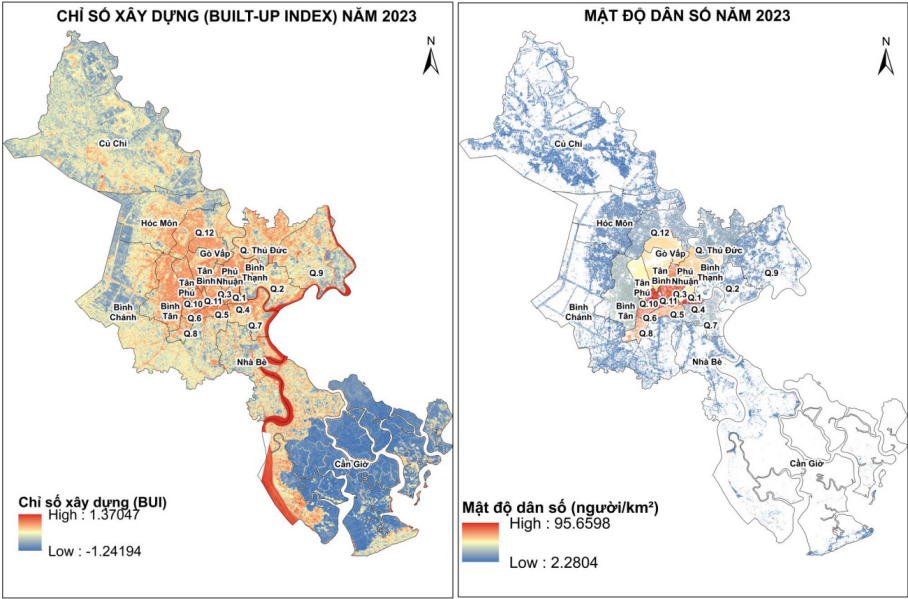
Hình 2. Phân bố không gian các yếu tố thích ứng sinh thái: chỉ số NDVI, năng suất sinh học rừng (NPP) và chỉ số đa dạng cảnh quan (SIDI)

- Khả năng phục hồi (resilience) đề cập đến khả năng tự điều chỉnh và phục hồi của hệ sinh thái khi các tác động bên trong và bên ngoài không vượt quá giới hạn (Qiao & cộng sự, 2008). Khả năng phục hồi có mối quan hệ nghịch với tính dễ bị tổn thương sinh thái; khi khả năng phục hồi cao, mức độ tổn thương giảm. Trong nghiên cứu, các yếu tố liên quan đến lớp phủ thực vật (NDVI), năng suất sinh học rừng (NPP), chỉ số đa dạng cảnh quan (SIDI) được xem là chỉ báo cho năng lực phục hồi sinh thái.

- Áp lực sinh thái (pressure) được dùng để đánh giá tác động của các hoạt động con người và sự phát triển

kinh tế lên hệ sinh thái địa phương (Zhang & cộng sự, 2017a; Zhang & cộng sự, 2017b). Tại Thành phố Hồ Chí Minh (TP.HCM), các áp lực chính lên môi trường tự nhiên đến từ quá trình đô thị hóa nhanh, gia tăng dân số, chuyển đổi sử dụng đất, và biến đổi khí hậu.

Các chỉ số được chia thành hai nhóm chỉ số thuận (dương) và chỉ số nghịch (âm) theo mối quan hệ giữa tính dễ bị tổn thương sinh thái và yếu tố đánh giá (Zhao & cộng sự, 2018). Đối với các chỉ số thuận, giá trị chỉ số càng lớn thì mức độ dễ bị tổn thương sinh thái càng cao. Ngược lại, đối với các chỉ số nghịch, giá trị chỉ số càng lớn thì mức độ dễ bị tổn thương sinh thái càng



Hình 3. Phân bố không gian về chỉ số xây dựng (BUI) và mật độ dân số năm 2023

Bảng 1. Hệ thống các chỉ tiêu đánh giá tính tổn thương sinh thái tại khu vực nghiên cứu

Chi số	Chi số đánh giá	Quan hệ	Định dạng	Nguồn
Nhạy cảm sinh thái (S)	Độ cao địa hình (S1)	Thuận	Raster	SRTM - USGS
	Độ dốc (S2)	Thuận		
	Nhiệt độ trung bình năm 2023 (S3)	Nghịch		NOAA data
	Lượng mưa trung bình năm 2023 (S4)	Nghịch		CHRS Data Portal
	Chỉ số lượng mưa chuẩn hoá năm 2023 (S5)	Nghịch		CHIRPS data
	Độ ẩm không khí năm 2023 (S6)	Nghịch		FLDAS data
	Mức độ xói mòn (S7)	Thuận		ESDAC data
	Thảm phủ sử dụng đất (LULC) năm 2023 (S8)	Thuận		RLCMS data
Khả năng phục hồi sinh thái (R)	Năng suất sinh học thực vật (NPP) (R1)	Nghịch	Raster	NEO - NASA
	Chỉ số đa dạng cảnh quan SIDI (R2)	Nghịch		Tính từ LULC
	Chỉ số thực vật NDVI (R3)	Nghịch		Landsat 9
Áp lực sinh thái (P)	Mật độ dân số (P1)	Thuận	Raster	WorldPop data
	Chỉ số xây dựng BUI năm 2023 (P2)	Thuận	Raster	Landsat 9

Ghi chú: “Positive” (Thuận); “Negative” (Nghịch).

thấp. Các chỉ số được chuẩn hóa bằng phương pháp chuẩn hóa cực đại - cực tiểu và các giá trị chỉ số nằm trong khoảng từ 0 đến 1 (Li R & cộng sự, 2020).

Trong đó: x' là giá trị chuẩn hóa của chỉ số i ; x_i là giá trị quan sát của chỉ số i ;

Chỉ số dương:
$$x' = \frac{X_i - X_{i_{\min}}}{X_{i_{\max}} - X_{i_{\min}}} \quad (1)$$

Chỉ số âm:
$$x' = \frac{X_{i_{\max}} - X_i}{X_{i_{\max}} - X_{i_{\min}}} \quad (2)$$

$x_{i_{\max}}$ và $x_{i_{\min}}$ lần lượt là giá trị lớn nhất và nhỏ nhất của chỉ số i .

Tất cả các chỉ số đều được xử lý trước bằng ArcGIS

10.8, tọa độ ở múi chiếu WGS UTM múi 48 thuộc Bắc bán cầu. Sau đó, các chỉ số được lấy mẫu lại thành dữ liệu raster có độ phân giải 1 km × 1 km để đảm bảo tính nhất quán không gian.

2.2. Phân tích thứ bậc mờ (AHP - Fuzzy) xác định trọng số các tiêu chí

Phương pháp phân tích thứ bậc mờ (AHP - fuzzy) được áp dụng nhằm xác định trọng số và thứ tự ưu tiên của các yếu tố tham gia vào quá trình ra quyết định (Zimmermann, 2001). Phương pháp này được thực hiện trên phần mềm Excel, kết hợp giữa lý thuyết mờ và quy trình phân tích thứ bậc (AHP) do Saaty đề xuất. Tuy

nhien, AHP truyền thống giả định rằng người ra quyết định có thể đưa ra đánh giá chính xác tuyệt đối, điều này không phải lúc nào cũng khả thi trong thực tế. Để khắc phục nhược điểm này, phương pháp AHP mờ (AHP - fuzzy) ra đời bằng cách kết hợp AHP với lý thuyết tập mờ (Zadeh, 1965), giúp mô hình hóa sự không rõ ràng và chủ quan trong đánh giá của con người. Các bước thực hiện quy trình AHP - fuzzy như sau:

- Bước 1 - Lựa chọn các tiêu chí: Ma trận so sánh cặp được xây dựng dựa trên đánh giá của 10 chuyên gia có chuyên môn trong lĩnh vực sinh thái cảnh quan, GIS, và biến đổi môi trường đô thị, phát triển bền vững. Các chuyên gia được lựa chọn dựa trên các tiêu chí: (1) có kinh nghiệm nghiên cứu lĩnh vực liên quan; (2) đồng ý tham gia đánh giá theo quy trình chuyên gia Delphi. Việc sử dụng ý kiến chuyên gia giúp đảm bảo tính khách quan, nhất quán và khoa học trong quá trình gán trọng số cho các tiêu chí. Tập hợp tiêu chí thu được từ phương pháp Delphi đóng vai trò là đầu vào cho các bước tiếp theo của mô hình phân tích định lượng, đặc biệt là khi kết hợp với phương pháp phân tích thứ bậc mờ (AHP - fuzzy) để tính toán trọng số tiêu chí và xây dựng bản đồ tổn thương sinh thái.

- Bước 2 - So sánh cặp bằng số mờ tam giác (TFN): Thay vì sử dụng giá trị số cụ thể như AHP truyền thống, Fuzzy AHP sử dụng hàm số mờ tam giác (Triangular Fuzzy Numbers - TFNs) để biểu diễn đánh giá mơ hồ. Việc chuyển đổi từ số rõ ràng sang TFN mờ được thực hiện trong bảng 2 (Chang, 1996; Satty T.L, 1980). Mỗi giá trị trong ma trận AHP được thay bằng ba số lần lượt là l, m và u, tương ứng với giá trị thấp, trung bình và cao. Hàm số TFN được ký hiệu là E = (l, m, u).

- Bước 3 - Tính giá trị tổng hợp mờ (Synthetic Extent): Dựa theo phương pháp của Chang (1996), giá trị tổng hợp mờ Si của tiêu chí i được tính bằng:

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^n M_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij}} \quad (3)$$

Trong đó: Mij là giá trị mờ của so sánh giữa tiêu chí i và j

- Bước 4 - Tính độ khả năng và vector ưu tiên: Độ khả năng V (Si ≥ Sj) thể hiện xác suất mà Si lớn hơn hoặc bằng Sj. Từ đó xây dựng ma trận so sánh để xác định độ ưu tiên.

$$V(S_i \geq S_j) = \begin{cases} 1, & \text{nếu } m_i > m_j \\ 0, & \text{nếu } l_i > u_j \\ \frac{l_i - u_j}{(m_i - u_j) - (m_j - l_j)}, & \text{trong trường hợp còn lại} \end{cases} \quad (4)$$

- Bước 5 - Giải mờ (defuzzification): Sử dụng phương pháp trung tâm trọng số (Center of Gravity - COG) để chuyển các giá trị mờ về dạng số thực:

$$W = \frac{l + m + u}{3} \quad (5)$$

- Bước 6 - Chuẩn hóa và kiểm tra nhất quán

Để đánh giá tính hợp lý trọng số giữa các chỉ số, Saaty đề xuất sử dụng tỷ số nhất quán (Consistency Ratio - CR). Nếu CR > 0,1 (tức là 10%), thì các đánh giá có thể không nhất quán để tin cậy. Tuy nhiên, nếu tỷ lệ nhất quán (CR) < 0,1, có thể suy ra rằng ma trận của nghiên cứu hoàn toàn nhất quán.

Chỉ số nhất quán (CR) được tính theo công thức (Das & cộng sự, 2023):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

Chỉ số nhất quán (CI - Consistency Index) đo lường mức độ lệch hướng nhất quán:

Bảng 2. Thang đo và mô tả dựa trên AHP và AHP - fuzzy

Định nghĩa	Cường độ quan trọng - AHP	F-AHP	Thang đo mờ nghịch đảo
Tầm quan trọng bằng nhau	1	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Tầm quan trọng trung bình của yếu tố này so với yếu tố kia	3	(2, 3, 4)	(1/4, 1/3, 1/2)
Tầm quan trọng thiết yếu hoặc mạnh mẽ của yếu tố này so với yếu tố kia	5	(4, 5, 6)	(1/6, 1/5, 1/4)
Tầm quan trọng rất mạnh	7	(6, 7, 8)	(1/8, 1/7, 1/6)
Tầm quan trọng cực kỳ	9	(8, 9, 10)	(1/10, 1/9, 1/8)
Giá trị trung gian giữa các mức đánh giá liền kề	2	(1, 2, 3)	(1/3, 1/2, 1)
	4	(3, 4, 5)	(1/5, 1/4, 1/3)
	6	(5, 6, 7)	(1/7, 1/6, 1/5)
	8	(8, 9, 10)	(1/10, 1/9, 1/8)

Bảng 3. Phân loại chỉ số ngẫu nhiên RI

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
RI	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,54	1,56

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

Trong đó: $\lambda_{\max}$ là giá trị trung bình của vector nhất quán; n là số tiêu chí.

RI (Random Consistency Index) là chỉ số ngẫu nhiên và phụ thuộc vào số tiêu chí được so sánh (được thể hiện qua bảng 3).

2.3. Chỉ số tổn thương sinh thái (EVI)

Sau khi xác định các mức đánh giá và trọng số của các tham số, các lớp bản đồ tham số tham gia được chồng lớp trong môi trường làm việc của ArcGIS. Tiếp đó, chỉ số EVI được tính toán theo công thức (5) và thành lập bản đồ để đánh giá mức độ dễ tổn thương sinh thái.

$$EVI = \sum_{i=1}^{13} w_i \times r_i \quad (5)$$

Trong đó: w_i là trọng số của tham số i ; r_i là mức đánh giá của tham số i .

2.4. Phân tích tự tương quan không gian của dữ liệu nguy cơ tổn thương sinh thái

Trong nghiên cứu này, tự tương quan không gian được thực hiện nhằm đánh giá mức độ liên kết giữa giá trị của một thuộc tính với các thuộc tính lân cận trong không gian (Kumari & cộng sự, 2019). Để xác định sự tương quan về mặt không gian của chỉ số dễ tổn thương sinh thái (EVI), nghiên cứu này sử dụng phương pháp thống kê không gian Moran's I. Chỉ số Moran được sử dụng để đánh giá mức độ phân cụm của một biến theo các quy mô khác nhau. Thống kê không gian này được thực hiện trong phần mềm ArcGIS 10.8 để đánh giá sự phân bố không gian và mức độ phân cụm của EVI vào năm 2023 tại TP.HCM. Đồng thời, chỉ số liên kết không gian cục bộ (LISA) được áp dụng để tính toán giá trị Moran's I tại từng đơn vị không gian, qua đó làm rõ các mối quan hệ không gian mang tính địa phương.

Bảng 4. Phân cụm liên kết không gian (LISA)

Nhóm phân cụm	Mô tả
High – high (HH)	Khu vực có EVI cao và các khu vực lân cận cũng có EVI cao.
High – low (HL)	Khu vực có EVI cao nhưng các vùng lân cận có giá trị thấp.
Low – high (LH)	Khu vực có EVI thấp nhưng xung quanh lại có giá trị cao.
Low – low (LL)	Khu vực có EVI thấp và các vùng xung quanh cũng có giá trị thấp.
Không có ý nghĩa	Không có quan hệ không gian đáng kể giữa khu vực và vùng lân cận.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Tương quan giữa các chỉ số sinh thái – địa lý tại khu vực nghiên cứu

Để đánh giá mối quan hệ giữa các yếu tố tự nhiên và yếu tố con người trong khu vực nghiên cứu, nghiên cứu tiến hành phân tích tương quan Pearson giữa 12 lớp raster bao gồm các chỉ số địa hình, khí hậu, thực vật, sinh học và phát triển đô thị (không đưa vào lớp thảm phủ bề mặt đất vì không có thang giá trị 0 – 1). Kết quả được thể hiện qua bản đồ heatmap tương quan (hình 4), làm nổi bật các mối liên hệ mạnh mẽ cả theo chiều dương và chiều âm. Một số mối tương quan dương đáng chú ý bao gồm:

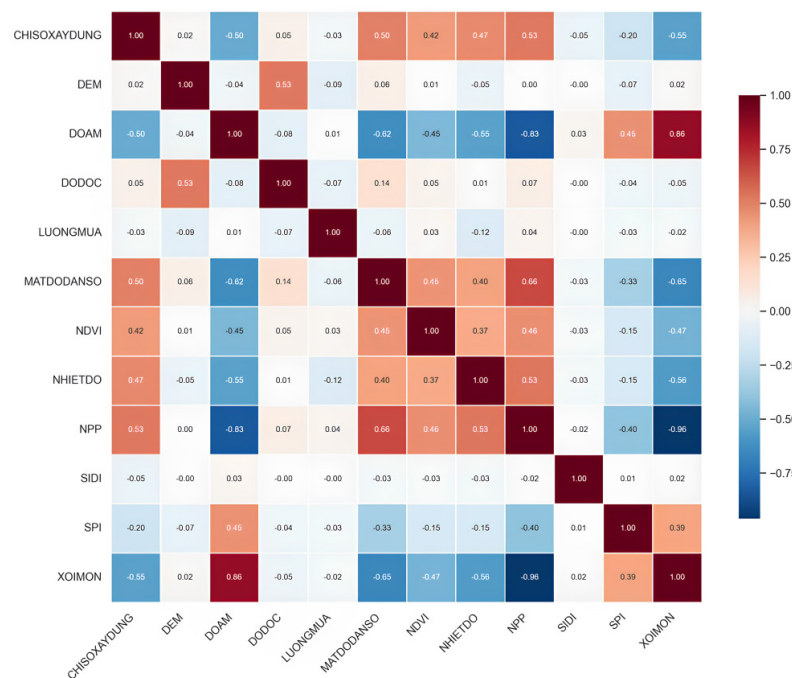
- Mối tương quan rất cao giữa chỉ số xây dựng và mật độ dân số ($r = 0,80$) phản ánh rõ đặc trưng không gian đô thị của TP.HCM. Các khu vực có mức độ bê tông hóa, hạ tầng dày đặc cũng chính là nơi tập trung dân cư đông như các quận trung tâm và một số khu vực đô thị mới như quận 7, thành phố Thủ Đức.

- Mối liên hệ giữa mật độ dân số và năng suất sinh học sơ cấp (NPP) với hệ số tương quan khá cao ($r = 0,66$), điều này có thể phản ánh tác động vùng ven đô. Thay vì đại diện cho khu vực trung tâm, mối quan hệ này nhiều khả năng đến từ các khu vực ven đô, nơi dân số tăng nhưng vẫn còn hoạt động nông nghiệp, trồng rừng, diện tích mảng xanh còn tương đối lớn hoặc kênh rạch xen kẽ. Do đó, những vùng này vừa có giá NPP cao, vừa có xu hướng đô thị hóa và gia tăng dân cư, dẫn đến mối tương quan dương giữa hai yếu tố.

- Tương tự, chỉ số xây dựng cũng có mối tương quan dương với NPP ($r = 0,53$), phản ánh các vùng chuyển đổi đất đai từ nông nghiệp sang đô thị, nơi quá trình xây dựng diễn ra nhưng chưa làm mất hoàn toàn thảm thực vật.

- Mối liên hệ giữa độ ẩm đất và xói mòn ($r = 0,86$) cũng đặc biệt đáng chú ý, diễn ra tại các vùng có độ ẩm cao như Nhà Bè, Cần Giò, hoặc các khu đất thấp ven sông, nơi có nguy cơ cao bị xói mòn đất. Điều này có thể diễn ra khi lượng nước dư thừa, đặc biệt trong điều kiện mất lớp phủ thực vật, sẽ dẫn đến hiện tượng rửa trôi bề mặt. Đây là một cảnh báo quan trọng về sự suy giảm chức năng sinh thái tại các vùng đất ngập hoặc bị khai thác không hợp lý.

Ngược lại, một số mối tương quan âm rất mạnh cho thấy mối quan hệ ngược chiều đáng chú ý. Đặc biệt, NPP và xói mòn có tương quan âm mạnh ($r = -0,96$), phản ánh rằng những khu vực bị xói mòn nghiêm trọng thường có mức năng suất sinh học thấp, nhiều khả năng do đất nghèo dinh dưỡng, thực vật không thể phát triển. Một mối quan với hệ số tương quan cao được ghi nhận giữa độ ẩm và NPP ($r = -0,83$), cho thấy vùng đất quá ẩm có thể không thuận lợi cho năng suất sinh học, có thể do ngập úng kéo dài hoặc cấu trúc đất không phù hợp.



Hình 4. Biểu đồ heatmap tương quan giữa các yếu tố bằng hệ số Pearson

Bảng 5. Ma trận trọng số AHP – Fuzzy cho các tiêu chí đánh giá tổn thương sinh thái

Chi số	Chi số đánh giá	Ma trận AHP - Fuzzy								Trọng số
		A	B	C	D	E	F	G	H	
Nhạy cảm sinh thái (S)	Độ cao (A)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(, ,)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(, ,)	(, ,)	0,04
	Độ dốc (B)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(, ,)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(, ,)	(, ,)	0,03
	Nhiệt độ (C)	(4, 5, 6)	(4, 5, 6)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(3, 4, 5)	0,15
	Lượng mưa (D)	(4, 5, 6)	(4, 5, 6)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(, ,)	(, ,)	0,29
	Chỉ số SPI (E)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	0,10
	Độ ẩm (F)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	0,16
	Xói mòn (G)	(6, 7, 8)	(6, 7, 8)	(, ,)	(2, 3, 4)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	0,16
	LULC (H)	(2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(, ,)	(4, 5, 6)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	0,07
Khả năng phục hồi sinh thái (R)	Chỉ số NPP (A)	(1, 1, 1)	(4, 5, 6)	(, ,)						0,28
	Chỉ số SIDI (B)	(, ,)	(1, 1, 1)	(, ,)			0,07			
	Chỉ số NDVI (C)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 1, 1)			0,64			
Áp lực sinh thái (P)	Mật độ dân số (A)	(1, 1, 1)	(4, 5, 6)							0,83
	Chỉ số xây dựng BUI (B)	(, ,)	(1, 1, 1)			0,17				
Kiểm tra tính nhất quán (CI)	Nhạy cảm sinh thái					0	0,1			
	Khả năng phục hồi sinh thái					0,056	0,1			
	Áp lực sinh thái					0	0,1			

Tổng thể, phân tích heatmap cho thấy rõ sự tương tác phức tạp giữa các yếu tố sinh thái và nhân sinh trong không gian địa lý. Những mối quan hệ nổi bật này không chỉ cung cấp cơ sở cho việc hiểu rõ cơ chế biến đổi môi trường, mà còn là tiền đề quan trọng để tích hợp dữ liệu đa chiều trong quản lý tài nguyên, quy hoạch phát triển bền vững và phân tích rủi ro môi trường.

3.2. Kết quả tính toán chỉ số tổn thương sinh thái (EVI)

3.2.1. Giá trị trọng số từng thành phần dựa trên AHP - Fuzzy

Để xác định trọng số của các yếu tố, ba ma trận AHP được tạo ra bằng cách so sánh từng cặp hai yếu

tổ dựa trên mức độ quan trọng tương đối của chúng đối với một chỉ số cấp cao hơn. Trọng số của các chỉ số khác nhau được tính toán bằng phần mềm Excel, dựa trên phương pháp AHP – Fuzzy, kết quả cuối cùng thể hiện ở bảng 5.

3.2.2. Tính dễ bị tổn thương sinh thái

Kết quả phân tích AHP - Fuzzy cho thấy rằng, yếu tố lượng mưa trong nhóm nhạy cảm sinh thái, chỉ số NDVI trong nhóm khả năng phục hồi và mật độ dân số trong nhóm áp lực sinh thái là ba trọng số ảnh hưởng nhất đến tính tổn thương sinh tại TP.HCM (tính vào năm 2023). Hệ số nhất quán CI đều $\leq 0,1$ cho thấy kết quả nghiên cứu hoàn toàn tin cậy trong phân đoán và xây dựng bản đồ. Phương trình EVI sau khi tính toán ma trận trọng số như sau:

$$EVI = (DEM \times 0,04) + (\text{Độ dốc} \times 0,03) + (\text{Nhiệt độ} \times 0,15) + (\text{Lượng mưa} \times 0,29) + (LULC \times 0,04) + (\text{Chỉ số SPI} \times 0,1) + (\text{Độ ẩm} \times 0,16) + (\text{Xói mòn} \times 0,16) + (\text{Chỉ số NPP} \times 0,28) + (\text{Chỉ số SIDI} \times 0,07) + (\text{Chỉ số NDVI} \times 0,64) + (\text{Mật độ dân số} \times 0,83) + (\text{Chỉ số BUI} \times 0,17)$$

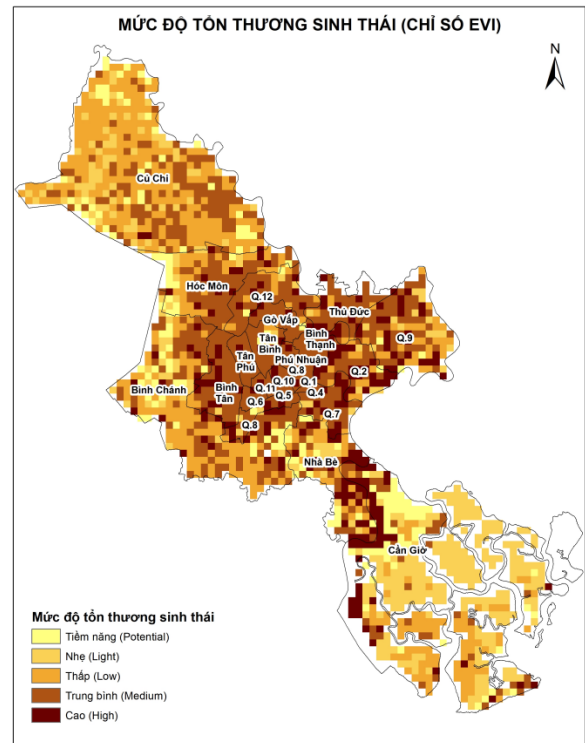
Tiếp đến, nghiên cứu sử dụng phương pháp tối ưu hóa Jenks, còn được gọi là phương pháp phân loại theo điểm gãy tự nhiên Jenks (Jenks Natural Breaks) để thành lập bản đồ tính tổn thương sinh thái. Kết quả bản đồ phân vùng nguy cơ tổn thương sinh thái tại TP.HCM như sau: Chỉ số dễ bị tổn thương sinh thái (EVI) cho thấy giá trị thấp ở khu vực phía Đông Nam (tương ứng với huyện Cần Giờ) và huyện Củ Chi; giá trị cao ở khu vực các quận nội thành với thành phố Thủ Đức tại TP.HCM. Theo kết quả thống kê, diện tích không gian các cấp độ tổn thương sinh thái như sau:

Bảng 6. Diện tích thống kê các cấp tổn thương sinh thái

STT	Cấp độ	Diện tích (ha)
1	Tiềm năng	33.234,12
2	Nhẹ	37.581,21
3	Thấp	35.364,24
4	Trung bình	45.552,6
5	Cao	15.747,66

Trong nghiên cứu này, mức độ dễ bị tổn thương sinh thái cao được cho là những khu vực có mật độ đô xây dựng và dân số cao, dẫn đến thảm phủ thực vật thấp và tác động gián tiếp lẫn trực tiếp các quá trình tương tác giữa bề mặt đất với khí quyển, khiến cho những năm gần đây, hiện tượng đảo nhiệt tại các quận nội thành cũng như những khu vực có tỷ lệ đất xây dựng cao gia tăng với những đợt nắng nóng kéo dài. Trái lại, nơi có thảm phủ rừng cao như diện tích rừng trồng tại Củ Chi, rừng ngập mặn Cần Giờ có mức độ

tổn thương thấp. Sự phát triển của thảm thực vật đóng vai trò thực hiện các chức năng hệ sinh thái như bảo vệ nước và đất, duy trì đa dạng sinh học, điều hoà khí hậu... Các yếu tố khí hậu, là những yếu tố môi trường cơ bản ảnh hưởng đến động thái của thảm thực vật.

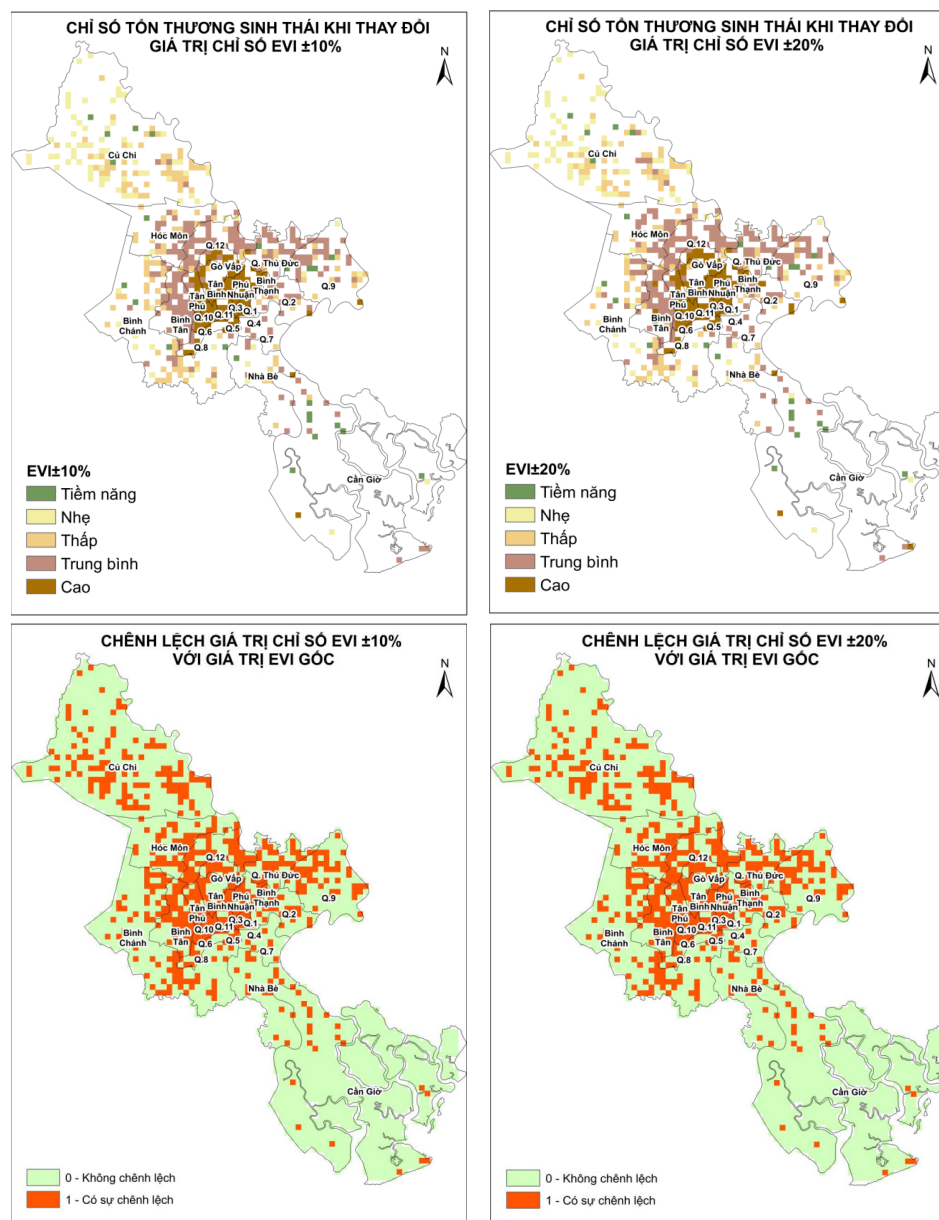


Hình 5. Kết quả tính toán chỉ số tổn thương sinh thái từ các thành phần gán trọng số

3.2.3. Phân tích độ nhạy để kiểm định mức độ ổn định của mô hình

Phân tích độ nhạy là bước quan trọng để kiểm tra mức độ ổn định và tin cậy của mô hình đánh giá, đặc biệt là trong trường hợp các trọng số tiêu chí được xác định dựa trên đánh giá chuyên gia, có thể mang yếu tố chủ quan. Phân tích độ nhạy được thực hiện theo đề xuất của Saaty (1980) và các nghiên cứu ứng dụng gần đây (Karamouz & cộng sự, 2011; Das & cộng sự, 2023), bằng cách hiệu chỉnh $\pm 10\%$ trọng số của các tiêu chí chính trong từng nhóm. Phương pháp này còn được gọi là phân tích độ nhạy trọng số tiêu chí (weight perturbation). Đây là làm nhiều hoặc điều chỉnh trọng số tiêu chí trong một phạm vi nhất định để đánh giá mức độ ảnh hưởng đến kết quả ra quyết định, việc làm nhiều trọng số không chỉ liên quan đến giá trị trung tâm mà còn ảnh hưởng đến biên dưới và biên trên của các số mờ.

Trong nghiên cứu này, độ nhạy được kiểm tra bằng cách hiệu chỉnh trọng số $\pm 10\%$ và $\pm 20\%$ đối với 03 tiêu chí có trọng số cao nhất trong mỗi nhóm chính: Nhóm nhạy cảm sinh thái: lượng mưa (S4); nhóm khả năng phục hồi: chỉ số NDVI (R3); nhóm áp lực sinh



Hình 6. Sự khác biệt giữa chỉ số EVI khi thay đổi trọng số $\pm 10\%$ và 20%

thái: mật độ dân số (P1). Để đánh sự thay đổi giữa EVI hiệu chỉnh trọng số với EVI gốc theo tỷ lệ phần trăm, phương pháp mã hóa nhị phân (binary classification) được áp dụng để đơn giản hóa việc phân loại: nếu có sự chênh lệch thì được gán giá trị là 1, ngược lại là 0 (không chênh lệch):

Kết quả so sánh giữa bản đồ EVI gốc và bản đồ sau khi thay đổi $\pm 10\%$ và 20% trọng số cho thấy đều có tổng diện tích vùng có thay đổi cấp độ tổn thương là 0,039 km² (tương đương 3,91 ha), chiếm khoảng 7,8% trên tổng diện tích vùng nghiên cứu ($\sim 0,5$ km²). Mức thay đổi này rất nhỏ, cho thấy mô hình đánh giá tổn thương sinh thái bằng Fuzzy AHP có độ ổn định cao, không bị ảnh hưởng đáng kể bởi biến động nhỏ trong trọng số tiêu chí đầu vào.

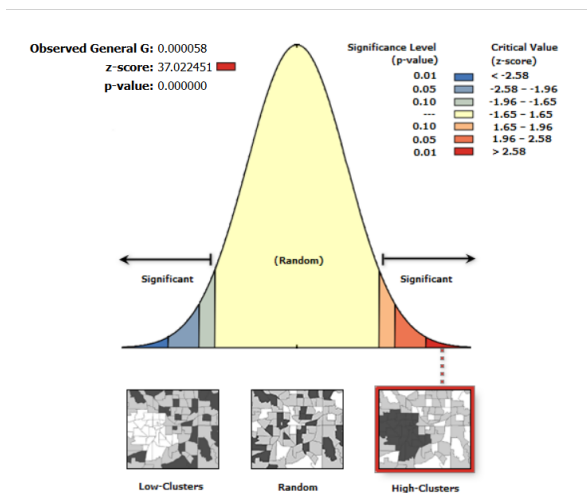
3.2.4. Phân tích tương quan không gian các vùng tổn thương sinh thái

Từ bản đồ LISA (hình 7), có thể thấy các khu vực có mức độ dễ bị tổn thương cao chủ yếu tập trung ở các quận nội thành và thành phố mới Thủ Đức với sự hình thành các cụm Hot Spot (99% mức tin cậy), thể hiện sự tập trung cao các giá trị tổn thương.

Trong khi đó, các khu vực có mức độ dễ bị tổn thương thấp tập trung những khu vực hoạt động nông nghiệp và diện tích rừng lớn với độ dễ bị tổn thương tiềm ẩn và nhẹ, thể hiện qua các cụm Cold Spot, tiêu biểu tại Củ Chi, Nhà Bè, Cần Giờ, Hóc Môn.

Kết quả phân tích chỉ số Getis-Ord Gi* cho thấy giá trị Observed General G đạt 0,000058, với z-score

là 37,021 và p-value bằng 0. Giá trị Z-score rất cao, vượt ngưỡng $\pm 2,58$, tương ứng với mức ý nghĩa thống kê 99%, chứng tỏ không gian phân bố các giá trị không phải ngẫu nhiên mà có xu hướng tập trung đáng kể các giá trị cao gần nhau.



Hình 7. Kết quả kiểm định thống kê không gian toàn cục

Phân bố kết quả z-score hoàn toàn lệch về phía bên phải của đường cong chuẩn, đại diện cho vùng có ý nghĩa thống kê cao nhất ($p < 0,01$). Đồng nghĩa rằng, tính tồn thương sinh thái không chỉ xuất hiện đơn lẻ mà có tính phân cụm trong không gian rõ rệt.

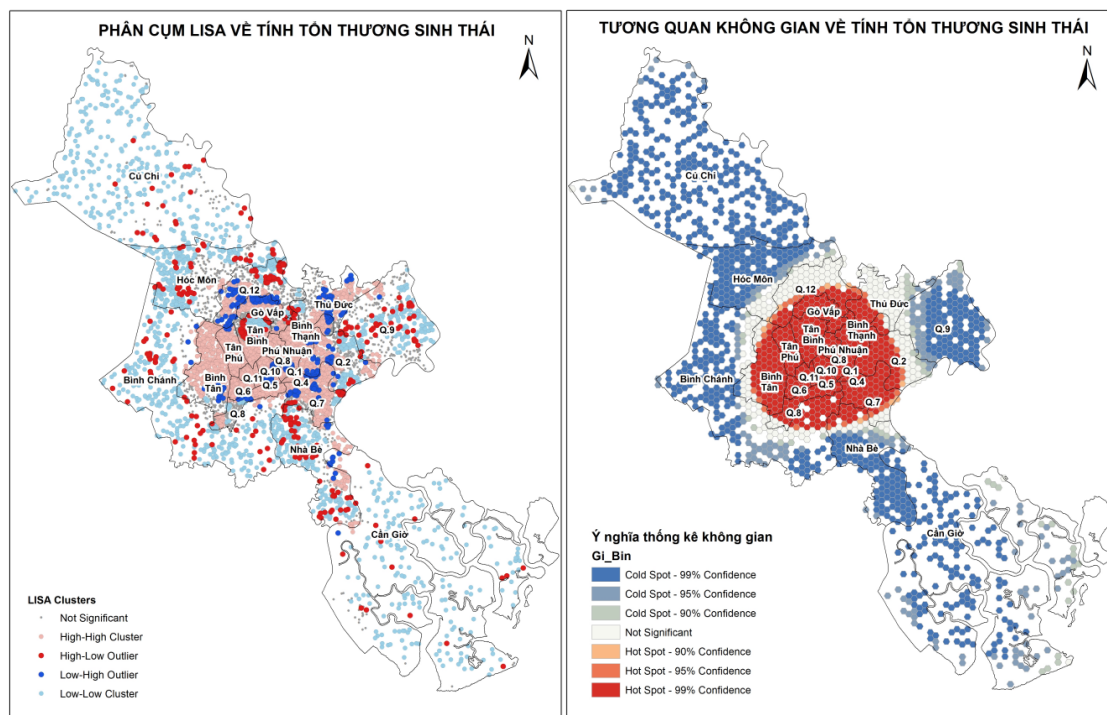
Tuy nhiên, để làm rõ hơn về bản chất không gian của các cụm này và giải thích vì sao một số khu vực lại có giá trị cao/thấp hơn so với lân cận, bản đồ phân cụm LISA đã được sử dụng để bóc tách mối quan hệ cục bộ giữa các đơn vị không gian:

- Cụm High - High (H - H) chủ yếu trùng với vùng Hot Spot trong Moran's I, cho thấy đây là các khu vực vừa có giá trị tồn thương cao, vừa nằm trong vùng lân cận có giá trị cao, tiêu biểu tại các quận trung tâm, đặc trưng chủ yếu là ít hoặc không có cây xanh, diện tích bề mặt không thấm lớn đến từ bê tông hoá, nhựa đường...

- Cụm Low - Low (L - L) phân bố tập trung ở Củ Chi, Cần Giờ, Nhà Bè, cũng trùng khớp với các vùng Cold Spot từ Moran's I, thể hiện sự đồng nhất về giá trị thấp của tồn thương sinh thái trong không gian liên kề.

- Các điểm ngoại lai (Outliers) như cụm High - Low (H - L) ở rìa quận 12, Bình Tân, và cụm Low - High (L - H) ở ven quận 2, Nhà Bè là bằng chứng cho thấy có một số khu vực không tuân theo xu thế chung. Khu vực có giá trị tồn thương cao nhưng nằm giữa vùng giá trị thấp (hoặc ngược lại). Điều này có thể phản ánh sự tồn tại của các yếu tố nội bộ như: đô thị hóa cục bộ, thay đổi sử dụng đất, hoặc hoạt động kinh tế khác

Việc kết hợp Moran's I với phân cụm LISA không chỉ giúp xác định sự tồn tại của tự tương quan không gian mà còn giải thích được sự không đồng đều trong phân bố tính tồn thương sinh thái. Các cụm LISA làm rõ tính hợp lý của bản đồ Moran bằng cách xác định chính xác các khu vực có tương quan cục bộ mạnh và các ngoại lệ không gian, từ đó giúp đề xuất giải pháp



Hình 8. Phân cụm và tập trung không gian của tính tồn thương sinh thái

quản lý sinh thái hiệu quả hơn tại các vùng ven hoặc ngoại vi đô thị đang bị biến đổi mạnh.

4. Kết luận

Để đánh giá độ dễ bị tổn thương của hệ sinh thái tại TP.HCM vào năm 2023, mô hình áp lực – nhạy cảm – khả năng phục hồi sinh thái, kết hợp với phân tích thứ bậc mờ (AHP – Fuzzy) từ 13 chỉ số đã lựa chọn. Chỉ số tính dễ bị tổn thương sinh thái (EVI) cho thấy các giá trị thấp phân bố ở các huyện ngoại thành, nơi có diện tích thảm thực vật tương đối lớn như huyện Cần Giờ, huyện Củ Chi và giá trị cao ở tập trung toàn bộ các quận trung tâm với tốc độ đô thị cao, thiếu đi mảng xanh trong phân bố không gian. Kết quả này phù hợp với các xu hướng được xác nhận bởi phân tích tương quan: mật độ dân số, chỉ số xây dựng và các yếu tố sinh học có mối liên hệ chặt chẽ, phản ánh rõ đặc trưng vùng đô thị trung tâm – ven đô. Phân tích độ nhạy và tương quan cho thấy mô hình có độ ổn định tốt, phản ánh chính xác tác động của các yếu tố như lượng mưa, chỉ số NDVI và mật độ dân số. Điều này khẳng định tính tin cậy và khả năng ứng dụng của mô hình trong các bối cảnh đô thị tương tự.

Nghiên cứu cung cấp bằng chứng khoa học giúp định hướng chính sách bảo vệ môi trường đô thị theo hướng ưu tiên kiểm soát áp lực nhân sinh, bảo tồn thảm phủ và củng cố khả năng phục hồi sinh thái. Kết quả có thể hỗ trợ các nhà quản lý trong việc xác định vùng ưu tiên can thiệp và hoạch định quy hoạch đô thị bền vững hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Chang, D.-Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95, 649–655.
- Das, S., Sarkar, S., & Kanungo, D. P. (2023). GIS-based landslide susceptibility zonation mapping using the AHP method in parts of Kalimpong region of Darjeeling Himalaya. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(4), 234.
- Dzeroski, S. (2001). Applications of symbolic machine learning to ecological modelling. *Ecological Modelling*, 146(1–3), 263–273.
- Enea, M., & Salemi, G. (2001). Fuzzy approach to the environmental impact evaluation. *Ecological Modelling*, 136(2–3), 131–147.
- Goda, T., & Mastuoka, Y. (1986). Synthesis and analysis of a comprehensive lake model - with the evaluation of diversity of ecosystem. *Ecological Modelling*, 31, 11–32.
- Hao, Y., & Zhou, H. C. H. (2002). A grey assessment model of regional env. quality and its application. *Environmental Engineering*, 20(4), 66–68.
- Kaly, U., Craig, P., & Howarth, R. (2002). *Towards managing environmental vulnerability in small island developing states (SIDS)*. South Pacific Applied Geoscience Commission.
- Kaly, U., Briguglio, L., McLeod, H., Schmall, S., Pratt, C. & Pal, R. (1999). *Environmental Vulnerability Index (EVI) to summarise national environmental vulnerability profiles*. South Pacific Applied Geoscience Commission (SOPAC) 275.
- Karamouz, M., Zahraie, B., Moridi, A., & Kerachian, R. (2011). *Multi-Criteria Decision Making in Water Resources Management: The Fuzzy Logic Approach*. CRC Press.
- Kumari, M., Sarma, K., & Sharma, R. (2019). Using Moran's I and GIS to study the spatial pattern of land surface temperature in relation to land use/cover around a thermal power plant in Singrauli district. *Journal of Landscape Ecology*, 16(1), 17.
- Li, R., Han, R., Yu, Q., Qi, S., & Guo, L. (2020). Spatial heterogeneous of env. vulnerability in arid and semi-arid area: A case of the Ningxia Hui Autonomous Region, China. *Sustainability*, 12, 4401.
- Luers, A. L., Lobell, D. B., Sklar, L. S., Addams, C. L., & Matson, P. A. (2003). A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. *Global Environmental Change*, 13(4), 255–267.
- Qiao, Q., Gao, J., Wang, W., Tian, M., & Lv, S. (2008). Method and application of ecological fragility assessment. *Research of Environment Sciences*, 21(5).
- Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
- Singh, C. (2012). *Env. vulnerability assessment of eco-development zone of Great Himalayan NP, Himachal Pr., India*. Master's thesis, University of Twente. Netherlands.
- Tong, C. (2000). Review on environmental indicator research. *Research of Environment Sciences*, 13(4).
- Wang, X. D., Zhong, X. H., Liu, S. Z., Liu, J. G., Wang, Z. Y., & Li, M. H. (2008). Regional assessment of environmental vulnerability in the Tibetan Plateau: Development and application of a new method. *Journal of Arid environments*, 72(10), 1929–1939.
- Wilson, K., Newton, A., Echeverria, C., Weston, C., & Burgman, M. (2005). A vulnerability analysis of the temperate forests of South-central Chile. *Biological Conservation*, 122(1), 9–21.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338–353.
- Zhang, F., Liu, X., Zhang, J., Wu, R., Ma, Q., & Chen, Y. (2017a). Ecological vulnerability assessment based on multi-sources data and SD model in Yinma River Basin, China. *Ecological Modelling*, 349, 41–50.
- Zhang, X., Wang, L., Fu, X., Li, H., & Xu, C. (2017b). Ecological vulnerability assessment based on PSSR in Yellow River Delta. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1106–1111.
- Zhao, J., Ji, G., Tian, Y., Chen, Y., & Wang, Z. (2018). Environmental vulnerability assessment for mainland China based on entropy method. *Ecological Indicators*, 91, 410–422.
- Zimmermann, H.-J. (2001). *Fuzzy set theory and its applications (4th ed.)*. Springer.

Assessment of Ecological Vulnerability Using a Combined Fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP-FUZZY) and Moran's I Spatial Statistics in Ho Chi Minh City

Ha Tuan Cuong

Southern Sub-Institute of Forest Inventory and Planning, Vietnam

Abstract

With the expansion of urbanization, the spatial ecological interaction between humans and the natural environment has received increasing attention. Therefore, quantitatively assessing ecological vulnerability plays a crucial role in the protection and restoration of ecosystems in sensitive areas. In this study, the AHP–PSR (Analytic Hierarchy Process - Pressure - State - Response) model combined with fuzzy logic analysis was applied to evaluate the ecological vulnerability of Ho Chi Minh City in 2023. The PSR framework was used to select 13 indicators, AHP–Fuzzy was employed to determine the weight of each factor, and GIS was applied to spatially assess ecological vulnerability. The results show that areas with high ecological vulnerability, covering approximately 15,746.66 hectare, are concentrated in central districts with high construction density. In contrast, low vulnerability areas, with more than 33,000 hectares, are mainly distributed in greener suburban areas such as Can Gio and Cu Chi. The contrast in ecological vulnerability levels highlights the role of human activities in altering the natural environment. Notably, humans can improve already vulnerable ecosystems through positive and proactive environmental actions.

Keywords: AHP-Fuzzy, PSR Model, Ecological Vulnerability, Spatial Correlation, Ho Chi Minh city.