

XÁC ĐỊNH CÁC NHÂN TỐ CHÍNH ẢNH HƯỞNG ĐẾN CHẤT LƯỢNG NƯỚC HỆ THỐNG THỦY LỢI BẮC NAM HÀ

Nguyễn Quang Phi

Trường Đại học Thủy lợi

Hoàng Thanh Huyền

Trung tâm Kiểm soát bệnh tật Hà Nội

Tóm tắt: Nghiên cứu đánh giá tổng hợp chất lượng nước hệ thống thủy lợi Bắc Nam Hà giai đoạn 2021–2022 dựa trên 13 thông số môi trường tại 20 điểm quan trắc, bằng cách kết hợp chỉ số WQI và phân tích đa biến PCA–FA. Kết quả cho thấy WQI dao động từ 13 đến 91, suy giảm rõ ở hạ lưu và mùa khô, nhiều điểm ở mức “ô nhiễm nặng”. PCA xác định 4 thành phần chính phản ánh ô nhiễm hữu cơ – vi sinh, dinh dưỡng, độ mặn và vật lý – lơ lửng, với tổng phương sai giải thích đạt trên 70%. Phân tích FA củng cố các nhóm tác nhân chi phối và mối liên hệ với WQI. Nghiên cứu đề xuất khung tiếp cận tích hợp WQI–PCA–FA phù hợp cho giám sát chất lượng nước theo không gian – thời gian trong các hệ thống kênh nội đồng, làm cơ sở phân vùng quản lý và kiểm soát điểm nóng ô nhiễm.

Từ khóa: Chất lượng nước, WQI, PCA, FA, phân tích đa biến, Bắc Nam Hà.

Summary: This study presents a comprehensive assessment of water quality in the Bac Nam Ha irrigation system during 2021–2022, based on 13 environmental parameters collected at 20 monitoring sites. The approach integrates the Water Quality Index (WQI) with multivariate statistical methods including Principal Component Analysis (PCA) and Factor Analysis (FA). Results show WQI values ranging from 13 to 91, with clear degradation in downstream areas and during the dry season. PCA identified four principal components representing organic–microbial pollution, nutrients, salinity, and suspended solids, explaining over 70% of the total variance. FA confirmed the dominant influencing groups and their association with WQI variation. The study proposes an integrated WQI–PCA–FA framework suitable for spatio-temporal water quality monitoring in in-field canal systems, providing a scientific basis for zoned management and pollution hotspot control.

Keywords: Water quality, WQI, PCA, FA, multivariate analysis, Bac Nam Ha.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ô nhiễm nước mặt đang là vấn đề cấp bách toàn cầu, ảnh hưởng nghiêm trọng đến an ninh nguồn nước và phát triển bền vững [1]. Tại Việt Nam, các hệ thống thủy lợi vùng đồng bằng sông Hồng, trong đó có hệ thống thủy lợi Bắc Nam Hà hiện đang chịu áp lực từ nước thải sinh hoạt chưa xử lý, phân bón, thuốc bảo

vệ thực vật, làng nghề và chăn nuôi quy mô lớn [2]. Dòng chảy thấp và tích tụ ô nhiễm theo mùa càng làm trầm trọng tình trạng này.

Chỉ số chất lượng nước (WQI – Water Quality Index) là công cụ đánh giá tổng hợp đã được áp dụng rộng rãi tại nhiều quốc gia như Mỹ, Ấn Độ, Thổ Nhĩ Kỳ, Algeria [3-5], và được chuẩn hóa tại Việt Nam theo Quyết định 1460/QĐ-TCMT (2019) [6]. Tuy nhiên, WQI chủ yếu phản ánh mức độ ô nhiễm tổng hợp tại thời điểm tính toán, chưa xác định rõ các

Ngày nhận bài: 07/8/2025

Ngày thông qua phản biện: 29/9/2025

Ngày duyệt đăng: 03/11/2025

nguyên nhân chi phối chất lượng nước, nhất là trong hệ thống chịu tác động đa nguồn và biến động mạnh theo không gian – thời gian.

Các kỹ thuật thống kê đa biến như Phân tích thành phần chính (PCA) và Phân tích nhân tố (FA) giúp rút gọn số chiều dữ liệu, nhận diện nhóm yếu tố chi phối (ô nhiễm hữu cơ, vật lý, dinh dưỡng), và hỗ trợ phân vùng quản lý [7-10]. Các phương pháp này đã được ứng dụng thành công tại nhiều lưu vực trong và ngoài nước như sông Hậu, sông Nhuệ (Việt Nam), sông Gorganroud (Iran), và sông Fuji (Nhật Bản).

Tuy nhiên, phần lớn nghiên cứu vẫn tập trung vào lưu vực sông lớn, ít chú ý đến các hệ thống kênh nội đồng đa chức năng như Bắc Nam Hà, nơi đồng thời chịu ảnh hưởng từ cấp – thoát nước và nguồn thải nội sinh. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này tích hợp WQI, PCA và FA để đánh giá chất lượng nước hệ thống thủy lợi Bắc Nam Hà (2021–2022), nhận diện nhóm nhân tố chi phối và đề xuất định hướng quản lý theo không gian – thời gian.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Khu vực nghiên cứu và dữ liệu quan trắc

Hệ thống thủy lợi Bắc Nam Hà nằm trên địa bàn tỉnh Ninh Bình, đóng vai trò quan trọng trong cấp – tiêu nước phục vụ nông nghiệp, sinh hoạt và phòng chống thiên tai. Hệ thống bao gồm mạng kênh chính – nhánh và các công trình đầu mối điều tiết từ sông Hồng, sông Đáy và các phụ lưu [2].

Nghiên cứu sử dụng bộ dữ liệu quan trắc chất lượng nước do Viện Quy hoạch Thủy lợi thực hiện trong hai năm 2021–2022 tại 20 vị trí (ký hiệu P01–P20) dọc theo các tuyến kênh cấp – tiêu chính, đại diện cho ba vùng: thượng lưu, trung lưu và hạ lưu. Các điểm quan trắc được lựa chọn dựa trên đặc điểm địa hình, hiện trạng sử dụng đất và nguồn thải. Vị trí các điểm đo được thể hiện trong Hình 1 và Bảng 1 [11-12].



Hình 1: Bản đồ vị trí các điểm quan trắc chất lượng nước hệ thống thủy lợi Bắc Nam Hà

Bảng 1: Thông tin vị trí lấy mẫu nước

Vị trí điểm đo	Tọa độ X	Tọa độ Y	Ký hiệu	Vị trí điểm đo	Tọa độ X	Tọa độ Y	Ký hiệu
Cổng Như Trắc	20.564384	106.138397	P01	Cầu đường 10 với sông Sắt	20.319864	106.055494	P11
Cổng Hữu Bị	20.479886	106.180106	P02	Đập An Bài	20.527862	106.034402	P12
Cổng Cốc Thành	20.378069	106.152341	P03	Đầu kênh CG16	20.477091	106.145793	P13

Vị trí điểm đo	Tọa độ X	Tọa độ Y	Ký hiệu	Vị trí điểm đo	Tọa độ X	Tọa độ Y	Ký hiệu
Cổng sông Chanh	20.292784	106.131056	P04	Đập La Chơ	20.457764	106.114031	P14
Cổng Nhâm Trảng	20.442474	105.901979	P05	Đầu kênh S48	20.280376	106.032529	P15
Cổng Kinh Thanh	20.370663	105.934613	P06	Đập Vừa	20.527653	106.127916	P16
Cổng Cỏ Đam	20.357158	105.955255	P07	Cầu Chủ	20.526330	106.075756	P17
Cổng Vĩnh Trị	20.264080	106.046795	P08	Cầu Yên Trung	20.412010	105.975036	P18
Đầu kênh T3	20.391899	106.131327	P09	Đầu kênh C19	20.335688	106.115419	P19
Đầu kênh C9	20.357019	106.116311	P10	Đầu kênh T6	20.392223	106.065947	P20

Dữ liệu bao gồm 13 thông số môi trường: pH, DO, BOD₅, COD, TSS, NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, PO₄³⁻, Coliform, EC, độ đục và nhiệt độ, được thu thập định kỳ với 10 đợt mỗi năm, tần suất 2 lần/tháng, tập trung vào mùa khô và đầu mùa mưa. Dựa trên điều kiện khí hậu khu vực và chuỗi số liệu quan trắc, nghiên cứu phân chia thời gian thành hai mùa chính: mùa khô (tháng 1–4) và mùa mưa (tháng 5), làm cơ sở đánh giá biến động chất lượng nước theo thời gian. Việc bố trí thời gian và tần suất lấy mẫu phù hợp với đặc điểm thủy văn và khí hậu Bắc Bộ [13-14].

2.2. Phương pháp tính chỉ số chất lượng nước WQI

Chất lượng nước tại các điểm quan trắc được

đánh giá bằng chỉ số tổng hợp WQI (Water Quality Index) theo Quyết định 1460/QĐ-TCMT ngày 12/11/2019 của Tổng cục Môi trường [6], dựa trên 9 thông số: pH, DO, BOD₅, COD, TSS, NO₃⁻, PO₄³⁻, NH₄⁺ và Coliform.

Quy trình tính gồm 3 bước: (1) Xác định chỉ số thành phần (WQI_{SI}) cho từng thông số bằng nội suy tuyến tính từ nồng độ (BP_i) đến điểm chất lượng (q_i); (2) Áp dụng công thức riêng cho pH và DO (% bão hòa); Các thông số không có ngưỡng (như nhiệt độ, EC) được đánh giá qua xu hướng dao động; (3) Tổng hợp WQI_{SI} theo công thức tích hợp chuẩn hóa để tính WQI cuối cùng:

$$WQI = \frac{WQI_{pH}}{100} \left[\frac{1}{5} \sum_{a=1}^5 WQI_a \times \frac{1}{2} \sum_{b=1}^2 WQI_b \times WQI_c \right]^{1/3}$$

trong đó: WQI_a (DO, BOD₅, COD, N-NH₄⁺ và PO₄³⁻), WQI_b (TSS, độ đục), WQI_c (Coliform), WQI_{pH} (pH) là các chỉ số con.

Giá trị WQI cuối cùng được làm tròn thành số nguyên, phân loại theo thang 5 mức, từ “rất tốt” (91–100, phù hợp cấp nước sinh hoạt trực tiếp) đến “ô nhiễm rất nặng” (<10, cần khắc phục khẩn cấp), làm cơ sở nhận định tổng hợp chất lượng nước.

2.3. Phân tích thống kê đa biến

Để xác định các nhóm thông số chi phối chất lượng nước, nghiên cứu áp dụng hai kỹ thuật thống kê: Phân tích thành phần chính (PCA) và Phân tích nhân tố (FA) – các công cụ phổ biến trong nghiên cứu môi trường nhằm rút gọn dữ liệu, phát hiện cấu trúc tiềm ẩn và phân nhóm tác động [7-8]. Việc áp dụng PCA và FA được đặt trên đặc điểm của bộ dữ liệu gồm

13 thông số (đã nêu ở Mục 2.1), được chuẩn hóa theo Z-score để loại bỏ đơn vị và quy mô đo lường [15]. Phân tích được triển khai theo ba bước chính:

(1) Kiểm định điều kiện phân tích:

Để đảm bảo cơ sở thống kê cho phân tích đa biến, bộ dữ liệu được kiểm định bằng: (i) Chỉ số KMO (Kaiser–Meyer–Olkin): Đánh giá mức độ thích hợp của tập dữ liệu cho phân tích nhân tố. Giá trị KMO > 0,6 được xem là đạt yêu cầu [16]; (ii) Kiểm định Bartlett's Test of Sphericity: Xác định xem ma trận tương quan giữa các biến có đủ mạnh để cấu trúc thành nhân tố. Kết quả có ý nghĩa thống kê với p-value < 0,05 cho phép bác bỏ giả thuyết H_0 (không có tương quan giữa các biến), từ đó đủ điều kiện tiến hành PCA [17-18].

(2) Phân tích thành phần chính (PCA):

Phân tích thành phần chính (PCA) được thực hiện để trích xuất các thành phần có giá trị riêng (eigenvalue) > 1 theo tiêu chí Kaiser, phản ánh các nhóm biến có biến động tương đồng. Phép xoay trực giao Varimax được áp dụng nhằm đơn giản hóa cấu trúc tải trọng, làm rõ vai trò của từng biến trong từng thành phần và tăng khả năng giải thích các nhân tố [16-17].

(3) Phân tích nhân tố (FA):

Phân tích nhân tố (FA) được thực hiện sau

PCA, dựa trên các thành phần đã xoay Varimax nhằm xác định các nhóm nhân tố tiềm ẩn. Các biến có hệ số tải trọng $\geq |0,35|$ được gom vào cùng một cụm, phản ánh các loại hình tác động đặc trưng như: ô nhiễm hữu cơ – vi sinh, dinh dưỡng vô cơ, vật chất lơ lửng, hoặc nền tự nhiên. Ngưỡng tải trọng này phù hợp với quy mô dữ liệu (13 biến, 400 quan sát), đảm bảo độ tin cậy trong nhận diện các mối liên hệ thống kê [17-18].

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Hiện trạng chất lượng nước

Kết quả phân tích 13 thông số tại 20 điểm quan trắc trên hệ thống thủy lợi Bắc Nam Hà (2021–2022) cho thấy chất lượng nước suy giảm rõ theo không gian và thời gian – đặc biệt tại hạ lưu trong mùa khô. Dữ liệu thu thập từ Viện Quy hoạch Thủy lợi [11-12] đại diện cho các vùng có đặc điểm sử dụng đất và nguồn thải khác nhau (khu đô thị, làng nghề, nông nghiệp...).

Một số thông số như COD, BOD₅, NH₄⁺ và Coliform vượt QCVN 08:2023/BTNMT (Loại B) – cho thấy nguy cơ ô nhiễm hữu cơ – vi sinh nghiêm trọng, nhất là tại các điểm hạ lưu. Bảng 2 tóm tắt đặc trưng thống kê các thông số môi trường, phản ánh xu hướng gia tăng ô nhiễm rõ rệt trong năm 2022.

Bảng 2: Thống kê mô tả các thông số môi trường tại 20 điểm quan trắc (2021–2022)

Thông số	Đơn vị	Min		Max		Trung bình		Trung vị		Đánh giá theo QCVN 08:2023/BTNMT
		2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	
Nhiệt độ	°C	16,79	15,6	31,2	31,8	21,48	23,2	21,7	23,25	Không quy định
pH	–	6,01	6,48	8,12	8,49	7,14	7,5	7,14	7,45	Đạt loại A/B
EC	µS/cm	15	174	3200	4470	491,77	477,8	436	416	Không quy định
Độ đục	NTU	6,5	9,6	86	117	24,44	38,0	20,95	36,05	Không quy định
DO	mg/L	2,49	1,5	7,9	7,63	5,47	5,1	5,34	5,01	Loại B–D
COD	mg/L	2,7	13,5	45,7	51,6	24,67	31,4	24,75	31,65	Vượt loại C
BOD ₅	mg/L	4,7	9,2	31,5	36,8	15,51	22,1	15,25	21,85	Vượt loại C/D
NH ₄ ⁺	mg/L	0,05	0,07	1,53	2,11	0,5	0,5	0,45	0,4	Vượt loại B

Thông số	Đơn vị	Min		Max		Trung bình		Trung vị		Đánh giá theo QCVN 08:2023/BTNMT
		2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	
NO ₂ ⁻	mg/L	0	0,01	0,23	0,45	0,05	0,1	0,04	0,1	Không quy định
NO ₃ ⁻	mg/L	0,04	0,29	9,15	7,78	1,52	1,8	1,2	1,53	Đạt loại A
PO ₄ ³⁻	mg/L	0,02	0,01	0,42	0,72	0,17	0,1	0,17	0,12	Một số điểm vượt loại A
TSS	mg/L	10	12	78	65	31	29,2	30	28	Đạt loại B
Coliform	MPN/100mL	1700	3000	11000	11000	7085,4	7311,1	7000	7000	Vượt loại C

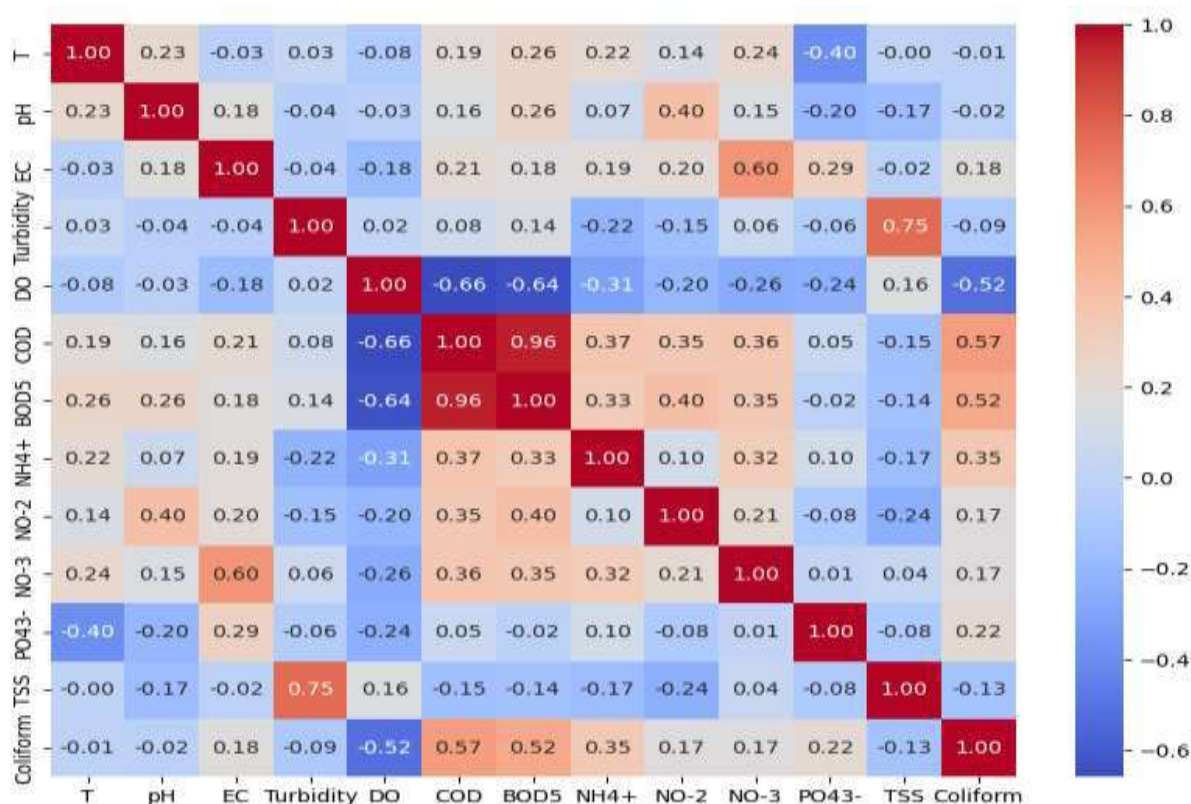
Ghi chú: Đánh giá ngưỡng dựa trên QCVN 08:2023/BTNMT: Loại A - cấp nước sinh hoạt sau xử lý đơn giản; Loại B – tưới tiêu; Loại C/D – giao thông thủy hoặc mục đích khác. Các thông số không có quy định ngưỡng được đánh giá theo xu hướng và mức độ dao động tự nhiên.

Nhìn chung, chất lượng nước năm 2022 có xu hướng suy giảm, đặc biệt tại hạ lưu. Các thông số có giá trị vượt quy chuẩn đáng kể gồm: BOD₅ tăng trung bình từ 15,5 lên 22,1 mg/L, nhiều điểm vượt loại D (15 mg/L), cho thấy ô nhiễm hữu cơ từ sinh hoạt và làng nghề gia tăng. COD tăng từ 24,7 lên 31,4 mg/L, vượt loại C, tiến sát ngưỡng loại D. NH₄⁺ duy trì trung bình 0,5 mg/L, nhưng giá trị cực đại lên tới 2,11 mg/L, vượt loại B, đặc biệt tại vùng chăn nuôi – nông nghiệp thâm canh. Coliform trung bình năm 2022 là 7311 MPN/100mL (vượt loại C), cực đại đến 11.000. DO giảm, nhiều điểm dưới 4 mg/L (mức loại B), thấp nhất 1,5 mg/L, cho thấy tình trạng yếm khí nghiêm trọng ở hạ lưu mùa khô. Các thông số

còn lại (TSS, PO₄³⁻, NO₃⁻, pH...) biến động nhẹ hoặc vượt cục bộ.

So sánh với QCVN 08:2023/BTNMT cho thấy: thượng lưu (P01-P02 như Như Trác, Hữu Bị) thường đạt loại A/B, phù hợp tưới và cấp nước sau xử lý; hạ lưu (P15-P20 như Đập Biên Hòa, Cầu Chủ) chỉ đạt loại C/D, đặc biệt xấu vào mùa khô năm 2022.

Ma trận tương quan Pearson (Hình 2) cho thấy các thông số COD, BOD₅, NH₄⁺, PO₄³⁻ và Coliform có mối tương quan cao ($r > 0,6$), phản ánh cùng nguồn phát sinh ô nhiễm. Ngược lại, DO có tương quan âm rõ rệt với các thông số này, cho thấy ảnh hưởng yếm khí.



Hình 2: Ma trận tương quan Pearson giữa các thông số

Kết quả khẳng định ảnh hưởng rõ từ nguồn thải phân tán và dòng chảy yếu, đồng thời đặt tiền đề cho phân tích PCA/FA nhằm nhận diện nhóm nhân tố chi phối và hỗ trợ đề xuất giải pháp quản lý.

3.2. Chỉ số chất lượng nước (WQI)

Chỉ số WQI được tính tại 20 điểm quan trắc trong hai năm 2021-2022 nhằm đánh giá tổng hợp chất lượng nước mặt hệ thống thủy lợi Bắc Nam Hà. Kết quả cho thấy WQI dao động từ 13 đến 91, phản ánh sự phân hóa theo không gian (thượng - trung - hạ lưu) và thời gian (mùa mưa - mùa khô).

Theo không gian, thượng lưu (P01-P02) duy trì WQI trung bình từ 75-91, tương ứng mức “tốt đến rất tốt”, đạt loại A/B theo QCVN 08:2023/BTNMT, phù hợp cho tưới tiêu và cấp nước sinh hoạt sau xử lý đơn giản. Trung lưu (P03-P10) có WQI từ 50-70,

thuộc mức trung bình (B/C), bị ảnh hưởng bởi nước thải làng nghề và nông nghiệp. Hạ lưu (P15-P20) ghi nhận WQI < 45, đặc biệt thấp vào mùa khô, phản ánh tình trạng ô nhiễm nặng, chỉ còn phù hợp cho giao thông thủy hoặc cần xử lý nghiêm ngặt trước khi sử dụng.

Theo thời gian, WQI giảm rõ trong mùa khô (tháng 1-4) do lưu lượng dòng chảy thấp và tích tụ chất ô nhiễm, trong khi mùa mưa (tháng 5) có xu hướng cải thiện nhờ hiệu ứng pha loãng. So sánh giữa hai năm cho thấy chất lượng nước năm 2022 suy giảm rõ rệt hơn năm 2021, đặc biệt tại các điểm hạ lưu.

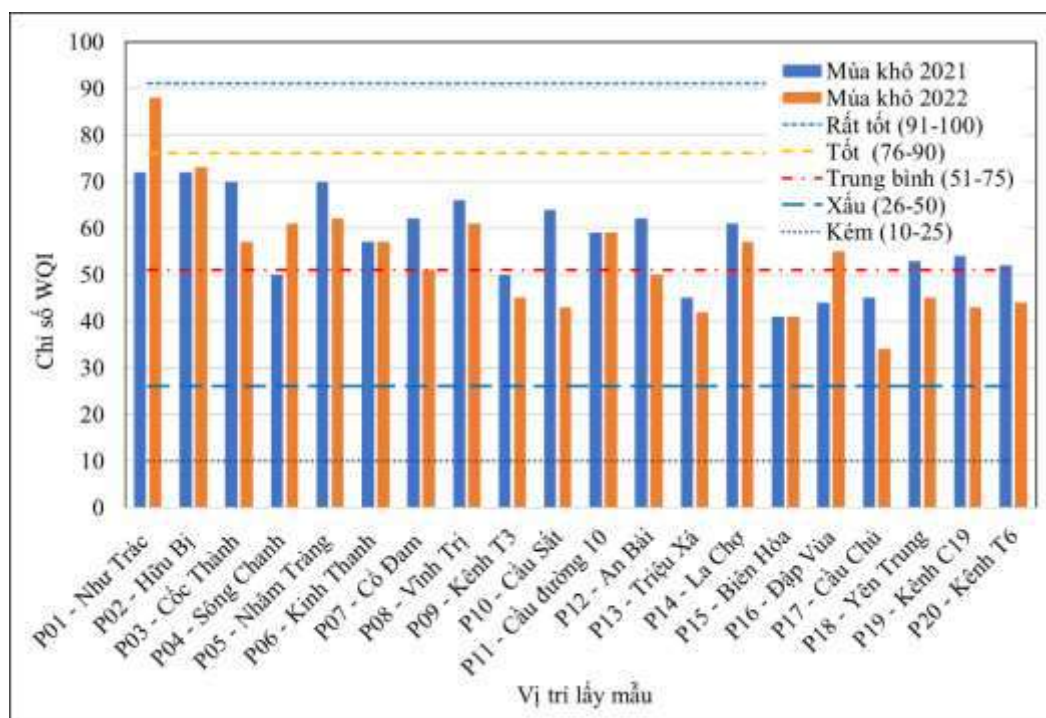
Bảng 3 tóm tắt phân vùng chất lượng nước theo WQI trung bình; Bảng 4 và Hình 2 thể hiện chi tiết sự biến động theo mùa tại từng điểm quan trắc.

Bảng 3: Phân vùng chất lượng nước theo chỉ số WQI (2021–2022)

Khu vực	Mã điểm	WQI trung bình	Phân loại QCVN	Nhận định quản lý
Thượng lưu	P01–P02	75-91	A/B	Tốt, ưu tiên duy trì
Trung lưu	P03–P10	50-70	B/C	Cần kiểm soát phân bón, nước thải làng nghề
Hạ lưu	P15–P20	< 45	C/D	Ô nhiễm nặng, cần xử lý trước khi sử dụng

Bảng 4: Chỉ số WQI tại 20 điểm quan trắc theo mùa (2021-2022)

Điểm	Điểm quan trắc	WQI _{mưa 2021}	WQI _{khô 2021}	WQI _{mưa 2022}	WQI _{khô 2022}
P01	Cổng Như Trác	91	72	75	88
P02	Cổng Hữu Bị	88	72	69	73
P03	Cổng Cốc Thành	82	70	56	57
P04	Cổng sông Chanh	53	50	51	61
P05	Cổng Nhâm Tràng	59	70	56	62
P06	Cổng Kinh Thanh	53	57	59	57
P07	Cổng Cổ Đàm	58	62	47	51
P08	Cổng Vĩnh Trị	51	66	54	61
P09	Đầu kênh T3	51	50	50	45
P10	Đầu kênh C9	51	64	50	43
P11	Cầu đường 10 với sông Sắt	58	59	56	59
P12	Đập An Bài	57	62	47	50
P13	Đầu kênh CG16	45	45	45	42
P14	Đập La Chợ	59	61	58	57
P15	Đầu kênh S48	47	41	39	41
P16	Đập Vùa	45	44	51	55
P17	Cầu Chủ	49	45	45	34
P18	Cầu Yên Trung	61	53	53	45
P19	Đầu kênh C19	51	54	48	43
P20	Đầu kênh T6	54	52	47	44



Hình 2: So sánh chỉ số WQI mùa khô tại 20 điểm quan trắc (2021-2022)

Một số điểm điển hình cho ô nhiễm nặng như P15 (Biên Hòa) và P17 (Cầu Chủ) chỉ đạt WQI chỉ đạt 13-15 trong mùa khô năm 2022, đồng thời ghi nhận COD > 40 mg/L, BOD₅ > 8 mg/L, và Coliform > 10.000 MPN/100mL, đều vượt ngưỡng QCVN loại C/D. Ngược lại, P01-P02 (Như Trác, Hữu Bị) duy trì WQI > 75 trong cả hai mùa và hai năm, phản ánh vùng nước có chất lượng ổn định.

Những số liệu trên cho thấy WQI không chỉ phản ánh chính xác mức độ ô nhiễm tổng hợp, mà còn có mối liên hệ rõ rệt với các thông số ô nhiễm hữu cơ - vi sinh. Do đó, việc phân vùng chất lượng nước theo WQI là công cụ hiệu quả để xác định các điểm nóng ô nhiễm và ưu tiên kiểm soát, đồng thời tạo cơ sở khoa học cho phân tích PCA và FA trong mục tiếp theo nhằm nhận diện nguyên nhân và nhóm tác động chính.

3.3. Kết quả phân tích thống kê đa biến PCA và FA

3.3.1. Kết quả kiểm định điều kiện áp dụng PCA

Trước khi thực hiện PCA, dữ liệu được chuẩn hóa và kiểm định sự phù hợp bằng hai tiêu chí:

- Chỉ số KMO đạt 0,786, thuộc mức ‘khá’ theo phân loại của Kaiser (1974), cho thấy các thông số (COD, BOD₅, TSS...) có mức tương quan đủ mạnh để thực hiện phân tích nhân tố, đảm bảo độ tin cậy của PCA/FA [16].

- Kiểm định Bartlett's Test cho $p < 0,001$, bác bỏ giả thuyết ma trận tương quan là ma trận đơn vị, xác nhận dữ liệu phù hợp cho phân tích PCA/FA [17].

3.3.2. Kết quả phân tích thành phần chính PCA

Phân tích thành phần chính (PCA) được áp dụng trên tập dữ liệu gồm 13 thông số môi trường nhằm rút gọn chiều dữ liệu và nhận diện các nhóm biến chi phối. Bảng 5 trình bày giá trị riêng và tỷ lệ phương sai lũy tích của các thành phần chính trong hai năm nghiên cứu.

Bảng 5: Giá trị riêng và phương sai lũy tích của các thành phần chính năm 2021-2022

Thành phần	Giá trị riêng		Tỷ lệ phương sai (%)		Tổng lũy tích của tỷ lệ phương sai (%)	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022
PC1	4,53	3,669	34,74	28,06	34,74	28,06
PC2	1,93	2,303	14,80	17,62	49,54	45,68
PC3	1,53	1,733	11,73	13,26	61,27	58,93
PC4	1,42	1,547	10,89	11,83	72,16	70,77
PC5	0,87	0,827	6,67	6,33	78,83	77,09
PC6	0,77	0,702	5,90	5,37	84,74	82,46
PC7	0,58	0,601	4,45	4,60	89,19	87,06
PC8	0,49	0,483	3,76	3,69	92,94	90,75
PC9	0,39	0,457	2,99	3,50	95,94	94,25
PC10	0,22	0,347	1,69	2,65	97,62	96,90
PC11	0,16	0,328	1,23	2,51	98,85	99,41
PC12	0,12	0,057	0,92	0,44	99,77	99,85
PC13	0,03	0,020	0,23	0,15	100	100

Cả hai năm đều xác định được 4 thành phần chính (PC1-PC4) với giá trị riêng > 1 , phù hợp tiêu chí Kaiser [16], giải thích hơn 70% tổng phương sai.

- PC1 là nhân tố chi phối chính, mặc dù tỷ trọng giảm từ 34,74% (2021) xuống 28,06% (2022), chủ yếu gắn với nhóm thông số ô nhiễm hữu cơ – vi sinh như COD, BOD₅, Coliform.

- PC2 tăng tỷ trọng từ 14,80% lên 17,62%, phản ánh xu hướng gia tăng ảnh hưởng của nhóm thông số vật lý – lơ lửng (TSS, độ đục), có thể liên quan đến thay đổi thủy văn hoặc lượng mưa.

Cơ cấu thành phần tương đối ổn định giữa hai năm, gợi ý tính lặp lại theo không gian – thời gian của các nhóm tác động môi trường. Sự biến động tỷ trọng giữa PC1 và PC2 là dấu hiệu cho thấy sự thay đổi về nguồn gốc hoặc mức độ ô nhiễm, nhất là tại các điểm hạ lưu mùa khô.

Kết quả PCA là cơ sở để tiếp tục phân tích

nhân tố (FA), nhằm gom nhóm các biến có tải trọng cao vào từng nhân tố đại diện, hỗ trợ phân vùng chất lượng nước và đề xuất giải pháp kiểm soát ô nhiễm.

3.3.3. Kết quả phân tích nhân tố (FA)

Nhằm nhận diện sâu hơn các nhóm yếu tố chi phối chất lượng nước, nghiên cứu áp dụng phân tích nhân tố (FA) trên 13 thông số môi trường, kế thừa từ kết quả PCA. Phương pháp xoay Varimax được sử dụng, giữ lại 4 thành phần chính (PC1-PC4) với tổng phương sai lũy tích đều vượt ngưỡng 70% cho cả hai năm khảo sát.

Kết quả ma trận tải trọng (Bảng 6) cho thấy các thông số có tải trọng $|\geq 0,35|$ phản ánh mối liên hệ đáng kể với từng thành phần nhân tố. Cấu trúc FA tương đối ổn định giữa hai năm, tuy nhiên một số thông số như pH, nhiệt độ, PO₄³⁻ và NH₄⁺ có sự dịch chuyển giữa các thành phần, phản ánh ảnh hưởng của yếu tố mùa vụ, thủy văn và hoạt động bề mặt.

Bảng 6: Ma trận tải trọng các thông số vào 4 thành phần chính năm 2021-2022

Thông số	PC1		PC2		PC3		PC4	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
COD	-0,418	-0,424	0,070	0,288	-0,115	0,017	-0,102	-0,166
BOD ₅	-0,415	-0,426	0,129	0,278	-0,088	-0,005	-0,133	-0,179
DO	0,387	0,318	0,016	-0,219	0,241	-0,122	-0,021	0,210
NH ₄ ⁺	-0,287	-0,285	0,211	-0,061	0,091	0,179	-0,410	0,098
Coliform	-0,345	-0,330	-0,047	0,175	-0,245	0,207	-0,037	-0,122
TSS	0,158	0,193	0,532	0,521	-0,278	-0,166	0,268	0,210
Độ đục	0,117	0,245	0,576	0,534	-0,315	-0,063	0,198	0,168
NO ₃ ⁻	-0,268	-0,244	0,264	0,127	0,379	-0,288	0,253	0,476
NO ₂ ⁻	-0,159	-0,266	-0,111	-0,223	0,371	-0,039	0,200	0,110
pH	0,089	-0,232	0,234	-0,358	0,366	-0,065	0,033	0,257
Nhiệt độ	-0,030	-0,196	0,368	-0,048	0,199	-0,604	-0,554	-0,003
EC	-0,259	-0,166	0,137	0,021	0,388	0,124	0,415	0,660
PO ₄ ³⁻	-0,299	0,027	-0,161	0,059	-0,266	0,640	0,326	0,243

Dựa trên kết quả Bảng 6, bốn nhóm nhân tố chính được xác định như sau:

- PC1 – Ô nhiễm hữu cơ – vi sinh (nước thải sinh hoạt): Gồm COD, BOD₅, DO. Trong đó, COD và BOD₅ có tải trọng âm cao, đối nghịch với DO có tải trọng dương, phản ánh tác động từ nguồn thải hữu cơ, sinh hoạt và làng nghề – điển hình tại các điểm như Biên Hòa, Cầu Chu có WQI thấp và DO suy giảm mạnh.

- PC2 – Tác động vật lý – thủy lực: Gồm TSS, độ đục, pH và nhiệt độ, là nhóm phản ánh ảnh hưởng của xói mòn, dòng chảy yếu, đô thị hóa và biến động nhiệt – pH tại các khu vực như Liêm Tuyền. Tương tự nhóm “vật lý – lư

lũng” trong các nghiên cứu sông ngòi đô thị hóa ở Trung Quốc [19].

- PC3 – Dư lượng nông nghiệp và khoáng hóa tổng hợp: Gồm NO₃⁻, NO₂⁻, pH, EC, nhiệt độ, PO₄³⁻. Đây là nhóm nhân tố thể hiện ảnh hưởng từ phân bón vô cơ, chất khoáng trong đất và điều kiện địa hóa, nổi bật trong mùa khô, khi quá trình hòa tan và tích tụ tăng cường.

- PC4 – Tích lũy dinh dưỡng – nền thủy văn: Gồm NH₄⁺, nhiệt độ, NO₃⁻, EC. Tổ hợp này phản ánh tác động của dòng chảy thấp, tích lũy nitơ và ion khoáng tại vùng hạ lưu, đặc biệt rõ rệt trong điều kiện khô hạn kéo dài như năm 2022.

Bảng 7: Diễn giải các nhân tố chính chi phối chất lượng nước theo FA

Nhân tố	Thông số tải cao	Diễn giải đặc trưng
PC1	COD, BOD ₅ , DO	Ô nhiễm hữu cơ – vi sinh từ sinh hoạt, làng nghề, chăn nuôi
PC2	TSS, độ đục, pH, nhiệt độ	Tác động vật lý – thủy lực: xói mòn, dòng chảy yếu, điều kiện bề mặt
PC3	NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , pH, EC, nhiệt độ, PO ₄ ³⁻	Dư lượng nông nghiệp và khoáng hóa từ phân bón, tích tụ hóa chất trong mùa khô
PC4	NH ₄ ⁺ , nhiệt độ, NO ₃ ⁻ , EC	Tích lũy dinh dưỡng – nền thủy văn, ảnh hưởng của dòng chảy yếu và ô nhiễm nitơ

Các nhân tố từ FA có mối tương quan rõ rệt với chỉ số WQI. Trong đó, PC1 và PC2 chiếm tỷ trọng phương sai lớn và tương ứng với các điểm ô nhiễm nặng như Biên Hòa, Cầu Chủ, Liêm Tuyền. PC3 và PC4 phản ánh các yếu tố nền và biến động theo mùa, như quá trình khoáng hóa, dinh dưỡng tích tụ – thường tăng cao trong mùa khô hoặc thời kỳ dòng chảy thấp.

So với các nghiên cứu tại sông Hậu [9], sông Nhuệ [10], hay sông Gorganroud (Iran) [8], hệ Bắc Nam Hà thể hiện mức độ biến động thành phần FA rõ rệt hơn, do mạng kênh dày đặc, thiếu xử lý tập trung và kiểm soát liên tỉnh.

Nghiên cứu này kế thừa phương pháp từ Bình Thuận [21], Klang River (Malaysia) [22], đồng thời mở rộng bằng cách liên kết PCA – FA – WQI theo cả không gian và thời gian, giúp xác định các nhóm nhân tố chi phối và vùng ưu tiên kiểm soát chất lượng nước.

Từ đó cho thấy: chất lượng nước Bắc Nam Hà bị chi phối bởi nhiều nhóm nguyên nhân kết hợp, với sự tương tác mạnh giữa yếu tố dòng chảy, nguồn thải và điều kiện thủy văn, nhấn mạnh sự cần thiết của giải pháp phân vùng quản lý theo nhóm tác động.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu đã đánh giá chất lượng nước mặt hệ thống thủy lợi Bắc Nam Hà giai đoạn 2021–2022 bằng phương pháp tích hợp chỉ số WQI và phân tích thống kê đa biến (PCA, FA). Kết quả cho thấy chất lượng nước có sự phân hóa rõ theo không gian – thời gian: thượng lưu (P01–P02) duy trì mức “tốt đến rất

tốt” ($WQI > 75$), trong khi hạ lưu (P15–P20), đặc biệt trong mùa khô năm 2022, rơi vào mức “ô nhiễm nặng đến rất nặng” ($WQI < 45$).

Các thông số COD, BOD₅, NH₄⁺ và Coliform vượt ngưỡng quy chuẩn tại nhiều điểm, phản ánh rõ tác động từ nước thải sinh hoạt, làng nghề và nông nghiệp. Phân tích PCA xác định 4 nhóm nhân tố chính (PC1–PC4), giải thích hơn 70% phương sai, trong đó PC1 (ô nhiễm hữu cơ – vi sinh) và PC2 (vật chất lơ lửng) có ảnh hưởng lớn đến WQI tại các điểm ô nhiễm nặng như Biên Hòa (P15) và Cầu Chủ (P17).

Cách tiếp cận tích hợp WQI–PCA–FA đã cho thấy hiệu quả trong nhận diện nguyên nhân ô nhiễm và phân vùng chất lượng nước – là cơ sở khoa học hữu ích cho công tác giám sát và quản lý hệ thống thủy lợi.

Từ các kết quả nghiên cứu, nhóm tác giả đề xuất một số kiến nghị cụ thể như sau: (i) Tăng cường quan trắc định kỳ mùa khô, tập trung các thông số ô nhiễm hữu cơ – vi sinh (COD, BOD₅, NH₄⁺, Coliform), đặc biệt tại các điểm hạ lưu có nguy cơ cao như Biên Hòa (P15), Cầu Chủ (P17); (ii) Thí điểm lắp đặt trạm quan trắc tự động tại 1–2 vị trí nhạy cảm (ví dụ P15 hoặc P17), sử dụng cảm biến theo dõi pH, EC, DO và nhiệt độ, nhằm theo dõi liên tục và kiểm chứng hiệu quả trước khi nhân rộng; và (iii) Ứng dụng khung phân tích tích hợp WQI–PCA–FA kết hợp hệ thống GIS để xây dựng bản đồ phân vùng chất lượng nước theo không gian – thời gian, làm công cụ hỗ trợ quản lý, quy hoạch và kiểm soát ô nhiễm trong các hệ thống kênh nội đồng vùng đồng bằng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] United Nations Environment Programme (UNEP). (2016). A Snapshot of the World's Water Quality: Towards a Global Assessment. Nairobi, Kenya.
- [2] Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn. (2011). Quyết định số 1296/QĐ-BNN-TCTL ngày 07/6/2011 về việc phê duyệt Quy hoạch hệ thống thủy lợi Bắc Nam Hà. Hà Nội, Việt Nam.

- [3] Manna, A., & Biswas, D. (2023). Assessment of drinking water quality using water quality index: A review. *Water Conservation Science and Engineering*, 8(6), Article 6. <https://doi.org/10.1007/s41101-023-00185-0>
- [4] Guenouche, F. Z., Mesbahi-Salhi, A., Zegait, R., Chouia, S., Kimour, M. T., & Bouslama, Z. (2024). Assessing water quality in North-East Algeria: A comprehensive study using water quality index (WQI) and PCA. *Water Practice and Technology*, 19(4), 1232–1248. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.073>
- [5] Walsh, P., & Wheeler, W. (2012). *Water quality index aggregation and cost benefit analysis* (Working Paper No. 12-05). U.S. Environmental Protection Agency.
- [6] Tổng cục Môi trường. (2019). Quyết định số 1460/QĐ-TCMT ngày 12/11/2019 về Hướng dẫn kỹ thuật tính toán và công bố chỉ số chất lượng nước mặt (WQI). Hà Nội, Việt Nam.
- [7] Shrestha, S., & Kazama, F. (2007). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji River, Japan. *Environmental Modelling & Software*, 22(4), 464–475. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.02.001>
- [8] Zeinalzadeh, K., & Rezaei, E. (2017). Determining spatial and temporal changes of surface water quality using principal component analysis. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.07.002>
- [9] Thanh Nguyen, G. (2020). Evaluating Current Water Quality Monitoring System on Hau River, Mekong Delta, Vietnam Using Multivariate Statistical Techniques. *Applied Environmental Research*, 42(1), 14–25. <https://doi.org/10.35762/AER.2020.42.1.2>
- [10] Nguyen Huu Hue & Nguyen Huu Thanh. (2020). *Assessment of surface water quality by using multivariate statistical analysis techniques: A case study of Nhue River, Vietnam. International Journal of Environmental Science and Development*, 11(10), 488–492. <https://doi.org/10.18178/ijesd.2020.11.10.1295>
- [11] Viện Quy hoạch Thủy lợi. (2021). Báo cáo Giám sát, dự báo chất lượng nước trong hệ thống công trình thủy lợi Bắc Nam Hà phục vụ lấy nước sản xuất nông nghiệp năm 2021. Hà Nội, Việt Nam.
- [12] Viện Quy hoạch Thủy lợi. (2022). Báo cáo Giám sát, dự báo chất lượng nước trong hệ thống công trình thủy lợi Bắc Nam Hà phục vụ lấy nước sản xuất nông nghiệp năm 2022. Hà Nội, Việt Nam.
- [13] Tổng cục Khí tượng Thủy văn. (2005). *Atlas khí hậu Việt Nam*. Hà Nội: Nhà xuất bản Bản đồ.
- [14] Nguyễn Văn Liễn (Chủ biên). (2001). *Khí hậu Việt Nam*. Hà Nội: NXB Khoa học và Kỹ thuật.
- [15] Helsel, D. R., Hirsch, R. M., Ryberg, K. R., Archfield, S. A., & Gilroy, E. J. (2020). *Statistical methods in water resources* (USGS Techniques and Methods, book 4, chap. A3). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/tm4A3>
- [16] Kaiser, H. F. (1974). An index of factorial simplicity. *Psychometrika*, 39(1), 31–36. <https://doi.org/10.1007/BF02291575>
- [17] Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2010). *Multivariate Data Analysis: A Global Perspective*. 7th Edition. Pearson.

- [18] Liu, C. W., Lin, K. H., & Kuo, Y. M. (2003). Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. *Science of the Total Environment*, 313(1-3), 77–89. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00683-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00683-6)
- [19] Liu, J., Zhang, D., Tang, Q., Xu, H., Huang, S., Shang, D., & Liu, R. (2021). *Water quality assessment and source identification of the Shuangji River (China) using multivariate statistical methods*. *PLoS ONE*, 16(1), e0245525. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245525>
- [20] Pany, R., Rath, A., & Swain, P. C. (2023). *Water quality assessment for River Mahanadi of Odisha, India using statistical techniques and Artificial Neural Networks*. *Journal of Cleaner Production*, 417, 137713. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137713>
- [21] Le, T. (2025). *Evaluation of the surface water system using statistical method (PCA, FA and ANOVA): A case study of Binh Thuan province, Vietnam*. *VNUHCM Journal of Earth Science and Environment*, 9(1), 1086–1100. <https://doi.org/10.32508/stdjsee.v9i1.800>
- [22] Taylor, G. (2023). *Principal Component Analysis Approach in Klang River Water Quality Index Modelling*. *Environment and Ecology Research*, 11(1), 112–121. <https://doi.org/10.13189/EER.2023.110112>