

# Aplicación de técnicas quimiométricas para clasificar la calidad de agua superficial de la microcuenca del río Bermúdez en Heredia, Costa Rica

Jorge Herrera Murillo<sup>1</sup>  
Susana Rodríguez Román<sup>2</sup>  
Ligia Dina Solís Torres<sup>3</sup>  
Francisco Castro Delgado<sup>4</sup>

Fecha de recepción: 28/01/2009

Fecha de aceptación: 12/04/2009

## Palabras clave

Calidad del agua, clasificación, quimiometría, río Bermúdez.

## Key words

Water quality, classification, chemometrics, Bermúdez river.

## Resumen

Este trabajo investigativo presenta la aplicación de técnicas quimiométricas seleccionadas: análisis de *cluster*, análisis

de componentes principales y análisis de factores, para clasificar la calidad del agua de los ríos y evaluar datos de contaminación. Se monitoreó 14 parámetros fisicoquímicos en 10 estaciones localizadas en la microcuenca del río Bermúdez de agosto de 2005 a febrero de 2007. Los resultados permitieron determinar la existencia de dos *clusters* naturales de sitios de monitoreo con características similares de contaminación e identificar la DQO, DBO,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y SST, como las principales variables que discriminan entre los sitios de muestreo.

1. Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Campus Omar Dengo, Apartado Postal: 86 3000 Heredia, Costa Rica. Tel (506)-2277-3292. Correo electrónico: [jherrer@una.ac.cr](mailto:jherrer@una.ac.cr).
2. Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Campus Omar Dengo, Apartado Postal: 86 3000 Heredia, Costa Rica. Tel (506)-2277-3292. Correo electrónico: [susanar@cariari.ucr.ac.cr](mailto:susanar@cariari.ucr.ac.cr).
3. Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Campus Omar Dengo, Apartado Postal: 86 3000 Heredia, Costa Rica. Tel (506)-2277-3292. Correo electrónico: [lsoli@una.ac.cr](mailto:lsoli@una.ac.cr).
4. Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Campus Omar Dengo, Apartado Postal: 86 3000 Heredia, Costa Rica. Tel (506)-2277-3292. Correo electrónico: [fcastro@una.ac.cr](mailto:fcastro@una.ac.cr).

*La calidad del agua superficial en una región es determinada tanto por factores naturales (condiciones climáticas, erosión del suelo, litología de la captación, aportes atmosféricos, etc.)*

## Abstract

This research project presents the application of several chemometrics techniques. Cluster analysis, principal components analysis and factor analysis were used to evaluate the pollution and to classify the quality of the water from the rivers.

Between August 2005 and February 2007, a total of 14 chemical and physical parameters were monitored in 10 sampling points distributed in the microbasin of the Bermúdez river. The results determined the existence of two natural clusters of sampling points with similar pollution characteristics. DQO, DBO,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  and TSS were identified as the principal variables that differentiate the sampling points.

## Introducción

La calidad del agua superficial en una región es determinada tanto por factores naturales (condiciones climáticas, erosión del suelo, litología de la captación, aportes atmosféricos, etc.) como antropogénicos (Bricker y Jones, 1995).

La clasificación de la calidad de estas aguas se basa, generalmente, en la comparación de datos de concentración de contaminantes medidos en campo contra valores límite establecidos en instrumentos legales. Los estándares de calidad para ríos y otros cuerpos de agua se definen con base en criterios sobre los posibles usos del agua. El Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales de Costa Rica define cinco clases de pureza del agua, asignando estándares para cada uno de ellos.

Sin embargo, existen otros métodos alternativos para hacer evaluaciones de calidad de aguas superficiales que identifican los patrones de agrupamientos naturales sobre la base de las similitudes encontradas entre las muestras, sin asignar clases, evitando deformar el patrón natural

de semejanzas que se pueda presentar (Kowalkowski *et al.*, 2006).

Los análisis de *cluster* y componentes principales son dos de los métodos estadísticos utilizados para realizar el reconocimiento de estos patrones en mediciones ambientales (Vega *et al.*, 1998; Helena *et al.*, 2000; Voncina *et al.*, 2002). Estas técnicas también permiten la identificación de factores o fuentes responsables de las variaciones en la calidad del agua, generando información de gran utilidad para el desarrollo de estrategias de intervención tendientes al mejoramiento de la calidad de las aguas de los ríos.

## Métodos

### Área de estudio

El área comprendida por la microcuenca se encuentra entre las coordenadas cartográficas 217 138 m–225 863 m latitud norte y 513 707 m–526 680 m longitud este de la cuadrícula Lambert Costa Rica norte, ubicadas en las hojas topográficas Barva (3346-II), Abra (3345-I) escala 1:50 000. La microcuenca está formada por dos ríos principales: Burío, con una extensión de 8 502 m y el Quebrada Seca con 7 442 m. Ambos ríos unidos continúan con un recorrido de aproximadamente 9 228 m, formando el río Bermúdez (Figura 1).

En la zona predomina el clima tropical lluvioso con estación seca. La temperatura promedio anual es de 19,9°C y las precipitaciones se desarrollan en un período que va desde mayo a diciembre, asociado directamente al desplazamiento de la zona de convergencia intertropical, que en estos meses se ubica sobre el territorio de Costa Rica (Zamora, 2004).

Tal como se muestra en la Figura 2, la mayor parte del terreno se encuentra como suelo descubierto, principalmente debajo de los 1250 msnm, donde se desarrollan actividades industriales y urbanísticas,

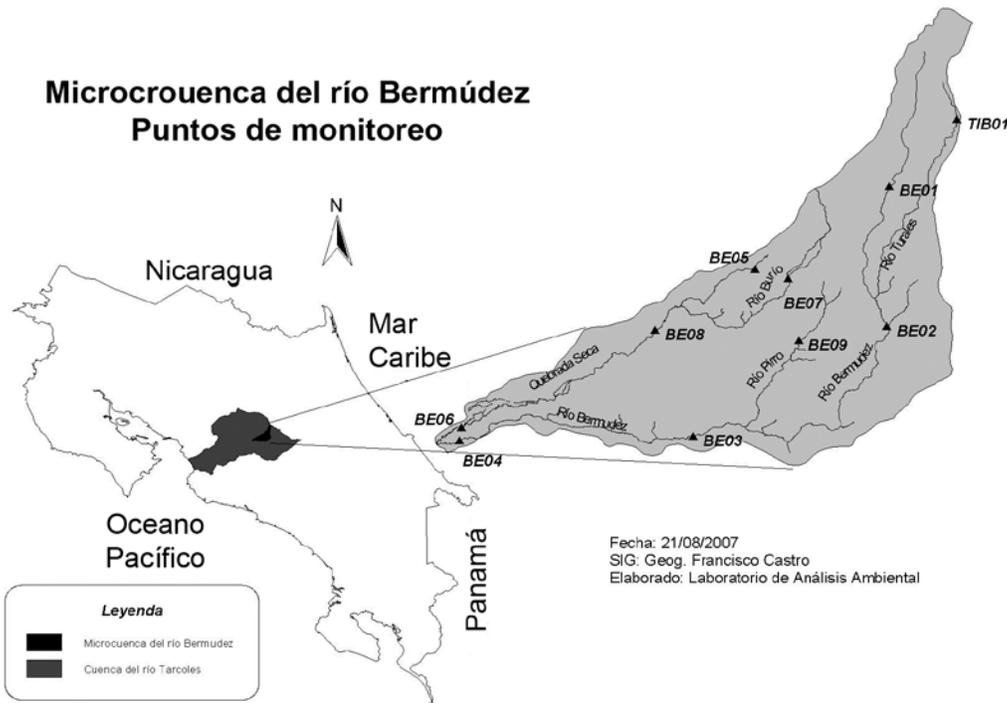


Figura 1. Ubicación de los sitios de monitoreo en la microcuenca del río Bermúdez, Heredia, Costa Rica.

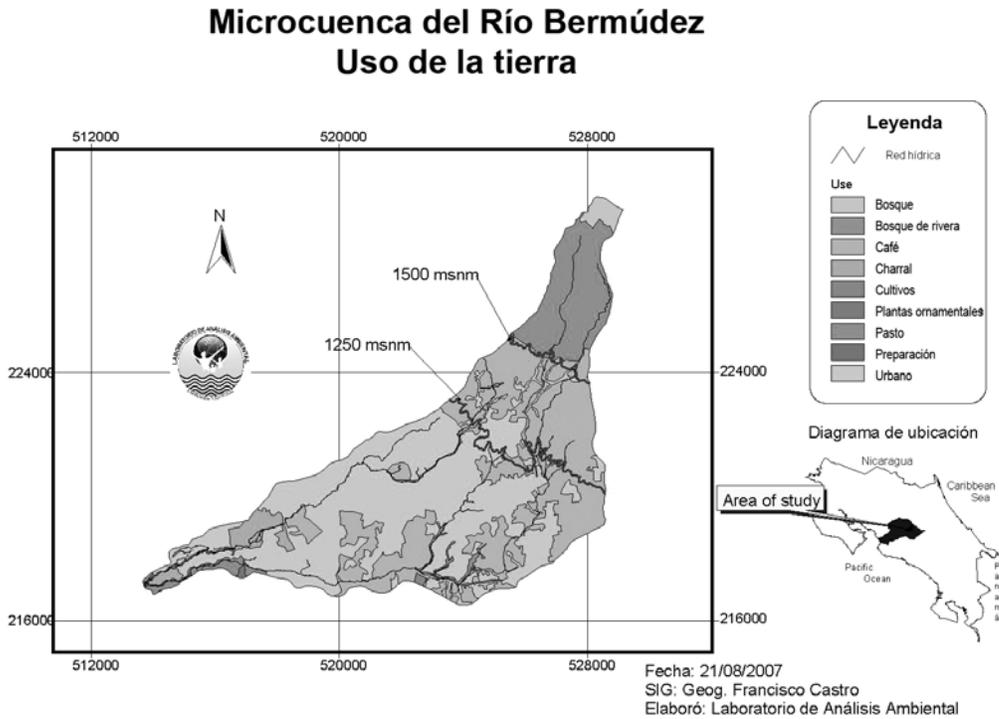


Figura 2. Distribución del uso del suelo en la microcuenca del río Bermúdez, Heredia, Costa Rica.

por arriba de los 1250 msnm el terreno está dedicado a los cultivos y actividades ganaderas. Los bosques primarios se presentan en muy baja proporción, solamente arriba de los 1500 msnm.

### Sitios de monitoreo

En el presente estudio se seleccionó un total de diez sitios de monitoreo, los cuales se describen en el Cuadro 1.

### Muestreo y análisis químico

En cada uno de los sitios de muestreo, se colectó muestras compuestas formadas por submuestras obtenidas durante un lapso de 8 horas, para lograr un total de 3 litros de agua. Se realizó cinco campañas de muestreo en las siguientes fechas: 22 al 28 de agosto de 2005, 25 al 27 de abril de 2006, 31 de mayo al 08 de junio de 2006, 01 al 06 de agosto 2006 y 19 al 23 de febrero de 2007.

A las muestras colectadas se les analizó un total de 14 parámetros fisicoquímicos: temperatura, oxígeno disuelto, pH, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, turbiedad, cloruro, sulfato, nitrato, sodio, potasio, fósforo total. La metodología empleada

para cada uno de ellos se muestra en el Cuadro 2. El control de calidad sobre las mediciones analíticas se aseguró mediante distintas herramientas, tales como análisis de muestras enriquecidas y duplicados.

Los resultados de la evaluación de estos parámetros se pueden observar en el Cuadro 3.

### Tratamiento de los datos y métodos estadísticos multivariados

#### Análisis de cluster

Esta herramienta se utiliza para agrupar objetos (sitios de monitoreo) en clases (*clusters*), sobre la base de las similitudes entre los miembros de una misma clase y las disimilitudes entre los diferentes grupos. Los resultados de este tipo de análisis ayudan en la interpretación de los datos e indican patrones de comportamiento. En el agrupamiento hierarchial, los *clusters* se forman secuencialmente iniciando con los pares de objetos más similares para luego formar *clusters* más grandes paso a paso (Einax *et al.*, 1998).

El análisis se construyó sobre el set de datos normalizados por medio del método de Ward, usando las distancias euclidianas cuadradas como medida de la similitud.

Cuadro 1. Ubicación de los sitios de monitoreo en la microcuenca del río Bermúdez.

Código asignado al sitio de monitoreo	Coordenadas Geográficas		Distrito	Cantón
	Longitud	Latitud		
BE-001	84°05'13"W	10°02'17"N	Ángeles	San Rafael
BE-002	84°05'16"W	10°00'05"N	San Pablo	San Pablo
BE-003	84°08'19"W	9°58'2"N	Ulloa	Heredia
BE-004	84°12'01"W	9°58'18"N	San Rafael	Alajuela
BE-005	84°07'21"W	10°00'59"N	Santa Lucía	Barva
BE-006	84°11'59"W	9°58'30"N	San Antonio	Belén
BE-007	84°06'50"W	10°00'50"N	San Josecito	San Rafael
BE-008	84°08'55"W	10°00'02"N	Mercedes	Heredia
BE-009	84°05'39"W	9°59'52"N	Heredia	Heredia
TIB-001	84°04'19"W	10°03'19"N	Concepción	San Rafael

**Cuadro 2.** Metodología analítica empleada en la determinación de los parámetros de calidad de agua.

Variable	Unidades	Métodos Analíticos
Temperatura	°C	Termómetro de mercurio (Method 2550 Standard Methods)
pH	Unidades de pH	Electrométrico (Method 4500-H <sup>+</sup> B Standard Methods)
Demanda química de oxígeno	mg O <sub>2</sub> /l	Espectrofotométrico (Method 5220 D Standard Methods)
Demanda bioquímica de oxígeno	mg O <sub>2</sub> /l	Respirométrico (Method 5210 D Standard Methods)
Sólidos edimentables	ml/l	Volumétrico (Method 2540 Standard Methods)
Sólidos suspendidos totales	mg/l	Gravimétrico (Method 2540 D Standard Methods)
Cloruro	mg/l	Cromatografía de intercambio iónico (Method 4110B Standard Methods)
Sulfato	mg/l	Cromatografía de intercambio iónico (Method 4110B Standard Methods)
Nitrato	mg/l	Cromatografía de intercambio iónico (Method 4110B Standard Methods)
Sodio	mg/l	Fotómetro de llama (Method 3500-Na B Standard Methods)
Potasio	mg/l	Fotómetro de llama (Method 3500-K B Standard Methods)
Oxígeno Disuelto	mg/l	Electrodo de membrana (Method 4500-O G Standard Methods)
Turbiedad	NTU	Nefelométrico (Method 2130 B Standard Methods)
Fósforo Total	mg/l	Espectrofotométrico (Method 4500-P C Standard Methods)

La significancia del *cluster* se determinó usando el criterio de 0,66 D<sub>máx</sub> (Marengo *et al.*, 1995).

El análisis de *cluster* se aplicó a los datos de calidad de agua del río con el fin de encontrar los patrones de semejanzas entre los sitios de monitoreo (variabilidad espacial) a lo largo de la microcuenca, generando un dendrograma, donde la distancia de enlace se reporta como Denl/ D<sub>máx</sub>, la cual representa el cociente entre la distancia de enlace para un caso

particular dividido entre la distancia máxima multiplicada por 100 como una forma de estandarizar las distancias de enlace representadas en el eje y del dendrograma.

#### **Análisis de componentes principales y factores**

Estos dos métodos son utilizados como una ayuda para encontrar e interpretar relaciones casuales y complejas entre variables de un mismo set de datos (Einax *et al.*, 1998).

**Cuadro 3.** Rango, media y desviación estándar de los diferentes parámetros de calidad de aguas evaluados en los sitios de monitoreo ubicados a lo largo de la microcuenca del río Bermúdez.

Parámetro	BE-01	BE-02	BE-03	BE-04	BE-05	BE-06	BE-07	BE-08	BE-09	TIB-01
pH (unidades de pH)	Rango Media Desviación estándar 7,66-7,83 7,76 0,08	7,53-7,68 7,62 0,06	7,43-7,94 7,71 0,20	7,26-7,93 7,63 0,28	5,79-7,58 6,97 0,80	7,34-8,01 7,73 0,33	7,41-7,96 7,64 0,23	7,51-8,11 7,89 0,26	7,23-7,66 7,45 0,66	6,92-7,76 7,39 0,41
DOO (mg O <sub>2</sub> /l)	Rango Media Desviación estándar 10-120 49 47,8	16-42 32,2 11,3	16-103 45,2 34,0	47-194 116 62,2	32-1019 399 470	50-157 113 47,6	32-267 108 108,5	29-120 70 40,7	44-84 61 17	28-204 74 86,7
DBO (mg O <sub>2</sub> /l)	Rango Media Desviación estándar 10-18 14 4,1	10-12 11 1,2	10-29 17 7,8	12-85 40 35	10-207 59 98	10-20 16 4,2	22-106 45 40,7	10-22 17,8 5,3	22-44 33,2 9,4	10-24 13,5 7,0
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	Rango Media Desviación estándar 2,0-7,0 3,6 2,4	2,7-9,0 5,0 2,8	7-29 16,0 8,8	4-36 21,5 13,2	3,2-21 9,4 7,9	12-43 23 14,2	2,0-53,0 15,1 25,3	6,1-23,0 16,3 7,6	14,0-21,0 18,2 3,4	0,8-3,0 1,95 0,9
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	Rango Media Desviación estándar 1,2-2,8 2,0 0,9	3,2-12,7 6,8 4,1	10,4-46 26,4 13,7	9,4-26,1 21,9 8,3	6,3-50 28 22,7	12,1-52,0 24,2 18,9	1,7-23,0 8,0 10,0	1,0-46,0 20,3 19,5	19,5-24,0 22,8 2,2	0,9-2,8 1,65 0,8
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	Rango Media Desviación estándar 0,9-3,0 1,70 0,90	0,8-4,6 2,6 1,8	1,2-49 13,9 20,3	0,6-13,4 6,55 5,8	0,7-8,0 2,75 3,5	0,7-16 12,0 7,5	0,5-6,5 2,7 2,8	0,8-3,0 2,0 0,9	0,5-1,4 0,9 0,4	0,3-1,0 0,70 0,30
Na (mg/l)	Rango Media Desviación estándar 2,2-4,4 2,88 1,02	3,1-15 6,95 5,4	6-25 15,5 7,8	10-64 27,8 24,7	6-13 9,7 2,9	7,0-27,0 14,9 8,5	2,7-15,0 6,0 6,0	10,3-23,0 14,6 5,8	15-21 18,2 2,5	0,6-1,9 1,05 0,60
K (mg/l)	Rango Media Desviación estándar 2,0-2,5 2,15 0,24	2,9-5,9 4,1 1,3	3,7-9 6,45 2,3	7,9-11,6 9,2 1,7	1,7-4,6 3,7 1,4	5,4-7,10 6,10 0,7	2,1-4,2 2,85 0,95	3,4-9,2 6,0 2,5	6,0-8,7 7,1 1,2	0,4-1,20 0,80 0,34
P total (mg/l)	Rango Media Desviación estándar 0,2-3,0 1,5 1,2	0,9-2,0 1,50 0,45	1,0-3,0 2,2 0,8	1,6-4,0 2,75 0,99	0,7-4,0 2,60 1,4	0,2-4,0 2,4 1,6	0,8-2,0 1,63 0,58	1,9-3,3 2,4 0,65	2,0-3,6 2,8 0,66	0,2-1,0 0,68 0,35
Turbiedad (UNT)	Rango Media Desviación estándar 1,02-7,4 3,20 3,0	2,2-32,2 10,2 14,6	2,6-21,9 8,48 7,87	1,1-32,8 10,5 15,1	0,62-46,6 12,6 22,7	0,52-2,70 1,47 0,92	1,64-25,8 10,4 10,9	0,87-7,90 4,6 3,09	1,13-14,2 5,2 6,1	0,18-1,80 0,66 0,76
SST (mg/l)	Rango Media Desviación estándar 5,2-28,7 19,2 10,0	0,6-69,6 22,1 32,2	8,0-16,2 13,0 3,3	7,7-138,4 68,4 61,4	1,6-245,7 78,0 113,7	2,7-10,2 5,40 3,5	9,4-681,3 196,0 325,1	5,0-65,0 25,2 27,1	3,5-27,7 18,2 10,3	1,3-45,6 15,5 20,4
Sólidos Sediment (ml/l)	Rango Media Desviación estándar 0,1-0,8 0,3 0,35	0,1-0,15 0,11 0,03	0,1-0,3 0,15 0,09	0,4-5,5 2,70 2,45	0,10-2,0 0,70 0,90	0,10-0,20 0,15 0,08	0,10-1,50 0,48 0,68	0,10-0,30 0,25 0,10	0,10-0,25 0,15 0,08	0,1-0,2 0,15 0,04

El aporte más importante del análisis de componentes principales es la cuantificación de la significancia de las variables que explican los patrones en las propiedades inherentes de objetos individuales. Sobre la base de un set de datos, se calculan nuevas variables ortogonales como resultado de la combinación lineal de los parámetros originales. De esta forma, toda la información sobre los parámetros que se encuentra en el conjunto de datos originales se transforma a un espacio reducido y se puede explicar a partir de un set de factores calculados llamados componentes principales. Los componentes principales identificados contabilizan la varianza máxima explicable de los datos originales en orden descendiente (Marengo *et al.*, 1995).

El análisis de factores es una herramienta muy útil para extraer información latente de un set de datos, como las relaciones entre variables que no se pueden deducir directamente. La matriz de datos originales se descompone en el producto de una matriz de factores esperados y una matriz de factores medidos más una matriz residual. En general, por la aplicación del criterio

de valores de Eigen, el número de factores extraídos es menor que el número de factores medidos. Después de la rotación de los factores de la matriz esperada, los factores pueden ser interpretados como fuentes comunes (Johnson y Wichern, 1992).

## Resultados y discusión

### Similitud espacial y agrupamiento de sitios de monitoreo

La Figura 3 muestra el dendrograma resultante al aplicar el análisis de *cluster* con el fin de detectar patrones de similitud entre los sitios de monitoreo. Al analizar el dendrograma, se puede observar que los sitios de monitoreo se dividen en dos grupos. El *cluster* I está formado por los sitios BE-01, BE-02, BE-03, BE-04, TIB-01 y corresponde a los sitios menos contaminados. El *cluster* II incluye los sitios BE-06, BE-07, BE-08 y BE-09 ubicados sobre el río Quebrada Seca, uno de los principales tributarios del río Bermúdez, el cual atraviesa importantes centros de población como San Joaquín de Flores y Belén, donde recibe importantes

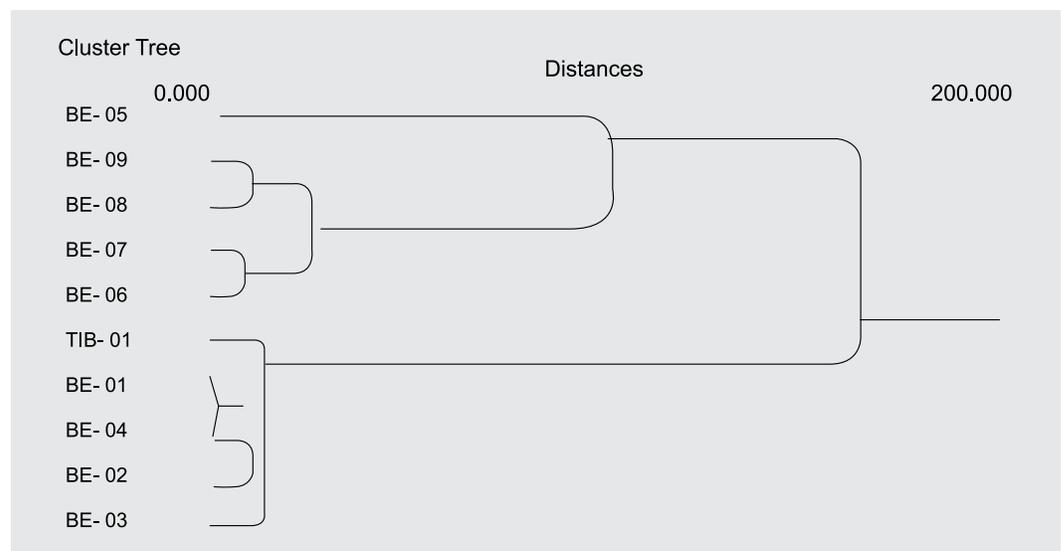


Figura 3. Dendrograma obtenido a partir del análisis de *clúster* aplicado a los resultados del monitoreo de parámetros químicos en la microcuenca del río Bermúdez.

descargas de aguas residuales, tanto domésticas como industriales.

Tomando como base los valores de Eigen mayores a uno, el análisis de componentes principales muestra tres componentes que explican cerca del 96% de la varianza

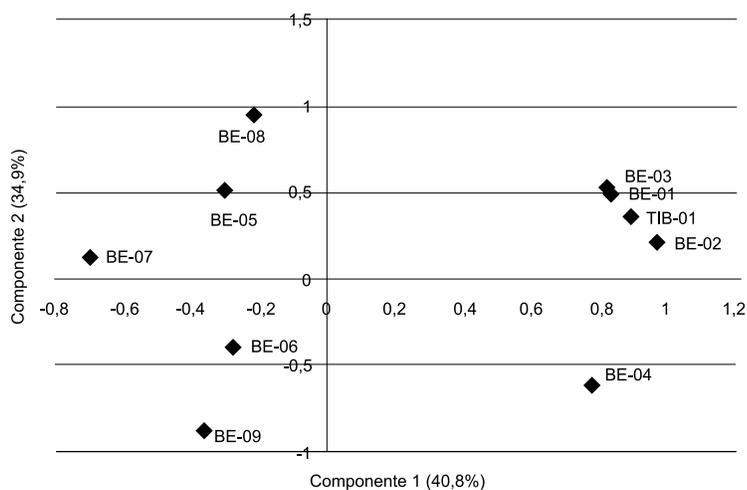


Figura 4. Representación gráfica de los componentes resultantes para el análisis de componentes principales aplicados a los resultados del monitoreo en la microcuenca del río Bermúdez.

total. De acuerdo con el criterio de Eigen, solamente los componentes con valores de Eigen mayores a uno se consideran significativos. Este criterio se basa en el hecho de que los promedios de los valores de Eigen de los datos autoescalados es justamente uno (Kowalkowski *et al.*, 2006). Es importante mencionar que este análisis facilita la interpretación de los resultados de los diez sitios de monitoreo para los 14 parámetros fisicoquímicos medidos, mediante una reducción del espacio en tres componentes principales. La Figura 4 muestra la gráfica generada para los dos primeros componentes principales, mostrando una clara diferenciación entre los sitios de monitoreo, los cuales se pueden agrupar en un patrón similar al generado por el análisis de *cluster*.

La matriz de correlación, presentada en el Cuadro 4, muestra una alta interdependencia entre algunas variables particulares, tal es el caso de la alta correlación existente entre la DBO y DQO, SSed y DQO, Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, etc. La redundancia de la información obtenida

Cuadro 4. Coeficientes de correlación de Spearman obtenidos para los parámetros fisicoquímicos medidos en la microcuenca del río Bermúdez, Heredia, Costa Rica.

	pH	Turbiedad	SSed	SST	DQO	DBO	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	P tot
pH	1,000											
Turbiedad	-0,539	1,000										
SSed	-0,636	0,576	1,000									
SST	<b>-0,770</b>	<b>0,758</b>	<b>0,903</b>	1,000								
DQO	<b>-0,879</b>	0,418	<b>0,867</b>	<b>0,830</b>	1,000							
DBO	<b>-0,736</b>	0,523	<b>0,918</b>	<b>0,784</b>	<b>0,906</b>	1,000						
Cl <sup>-</sup>	-0,200	0,394	0,503	0,309	0,345	0,669	1,000					
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-0,430	0,576	0,685	0,515	0,539	<b>0,827</b>	<b>0,903</b>	1,000				
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,018	0,212	0,321	0,115	0,164	0,486	<b>0,903</b>	0,685	1,000			
Na <sup>+</sup>	-0,212	0,467	0,479	0,333	0,309	0,632	<b>0,988</b>	<b>0,891</b>	<b>0,879</b>	1,000		
K <sup>+</sup>	0,042	0,394	0,200	0,127	0,006	0,328	<b>0,855</b>	0,624	<b>0,915</b>	<b>0,891</b>	1,000	
P tot	-0,401	0,596	0,693	0,547	0,505	<b>0,784</b>	<b>0,863</b>	<b>0,960</b>	0,620	<b>0,881</b>	0,626	1,000

Los valores en negrilla representan correlaciones significativas con un nivel de confianza del 99%.

en esta matriz hace necesaria la aplicación de un análisis de factores para reducir la dimensionalidad del set de datos. Aplicando el criterio de los valores de Eigen, el análisis de factores con rotación varimax generó como resultado dos factores, los cuales explican aproximadamente el 94,2% de la varianza total. El factor 1, con el mayor poder de agrupamiento, está altamente correlacionado con los siguientes parámetros: pH, turbiedad, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, DQO, DBO, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> y P. Este describe el factor químico de la contaminación. Las principales fuentes de Cl<sup>-</sup> y P total son las aguas residuales domésticas, mientras que para el SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> la principal contribución proviene de aguas de escorrentía de campos agrícolas.

El segundo factor correlacionado con el Cl<sup>-</sup>, pH, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> y SST representa un factor fisicoquímico generado por la disolución en el agua de río de minerales y sólidos arrastrados a los cuerpos de agua por los fenómenos de erosión presentes en la microcuenca.

Cuadro 5. Componentes obtenidos al aplicar el análisis de PCA a los datos recolectados en la microcuenca del río Bermúdez.

Variable	PC 1	PC2
pH	-0,634	0,690
Turbiedad	0,874	0,079
Sólidos sedimentables	0,795	-0,546
Sólidos suspendidos totales	0,803	-0,590
DQO	0,802	-0,588
DBO	0,864	-0,492
Cloruro	0,755	0,628
Sulfato	0,959	0,222
Nitrato	0,433	0,866
Sodio	0,782	0,619
Potasio	0,655	0,733
Fósforo total	0,949	0,157
Valor de Eigen	7,452	3,857
Porcentaje de varianza explicada	62,1	32,1

El análisis de factores con rotación varimax puede ser utilizado también para determinar si las fuentes responsables de los resultados de cada parámetro medido son las mismas en los distintos sitios de monitoreo. El Cuadro 6 muestra los resultados obtenidos, de donde se puede inferir varios criterios:

- i) Fenómenos regionales son los responsables de los niveles de sodio en los sitios de monitoreo, ya que las fuentes que determinan la concentración de ese parámetro tienen una misma naturaleza para casi la totalidad de las estaciones.
- ii) Los principales parámetros que permiten discriminar entre los sitios de monitoreo son: DQO, DBO, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> y SST.
- iii) Para el caso del Cl<sup>-</sup> los sitios BE-01, BE-02, BE-03, BE-07 y BE-08 presentan una fuerte interdependencia, la cual puede ser explicada por el hecho de que todos ellos se encuentran en zonas con cultivo de café, como uso predominante del suelo.
- iv) Tanto para el análisis de DBO como DQO se presenta una diferenciación entre las fuentes que determinan estos parámetros en sitios de monitoreo ubicados en áreas urbanas, respecto a aquellos localizados en otros tipos de uso de suelo.

## Conclusiones

El análisis quimiométrico confirma la clasificación de los resultados de medición de las variables que determinan la calidad del agua superficial en la microcuenca del río Bermúdez, medidas durante los años 2005- 2007. Utilizando el análisis de *cluster*, los diez puntos de muestreo pueden ser agrupados en dos categorías: *cluster* I (baja contaminación) y *cluster* II (alta contaminación). Dicha clasificación fue confirmada por el análisis de componentes principales.

**Cuadro 6.** Resultados del primer factor del análisis de componentes principales al analizar la naturaleza de las fuentes por parámetro y sitio de monitoreo en la microcuenca del río Bermúdez.

Sitio de muestreo	DQO	SST	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	pH	DBO	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Turbiedad	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>
BE-01	<b>0,995</b>	0,253	<b>0,950</b>	<b>0,985</b>	<b>0,660</b>	<b>0,976</b>	0,324	<b>0,996</b>	<b>0,827</b>	-0,552
BE-02	0,271	<b>0,987</b>	0,270	0,382	<b>-0,721</b>	<b>0,991</b>	<b>0,651</b>	<b>0,968</b>	<b>0,940</b>	0,061
BE-03	<b>0,989</b>	<b>0,626</b>	0,067	-0,132	0,035	<b>0,667</b>	0,150	<b>0,989</b>	<b>0,993</b>	0,179
BE-04	0,111	<b>0,680</b>	<b>0,975</b>	<b>0,922</b>	<b>0,942</b>	<b>0,918</b>	<b>0,935</b>	-0,549	0,374	-0,366
BE-05	0,185	<b>0,995</b>	0,216	<b>0,837</b>	<b>0,982</b>	<b>-0,739</b>	<b>-0,703</b>	-0,027	-0,090	-0,430
BE-06	-0,152	0,111	<b>0,884</b>	<b>0,990</b>	0,083	<b>0,852</b>	<b>0,634</b>	<b>0,966</b>	-0,053	<b>-0,998</b>
BE-07	-0,348	-0,157	0,088	<b>0,737</b>	<b>0,972</b>	<b>0,974</b>	<b>0,944</b>	0,279	<b>0,888</b>	0,085
BE-08	<b>0,781</b>	0,231	0,395	0,469	-0,028	<b>0,882</b>	<b>0,809</b>	<b>0,832</b>	<b>0,729</b>	0,132
BE-09	0,037	0,250	<b>0,970</b>	-0,117	0,215	0,011	-0,119	-0,144	0,112	<b>0,958</b>
TIB-01	<b>0,998</b>	<b>0,997</b>	0,777	0,296	-0,431	<b>0,993</b>	<b>0,998</b>	<b>0,971</b>	0,209	<b>-0,910</b>

Dos varifactores obtenidos del análisis de factores indican que los parámetros responsables de las variaciones en la calidad del agua son predominantemente químicos (DQO, DBO, P total, etc.) y fisicoquímicos (minerales).

Se determinó que, para el caso del sodio, las fuentes que determinan los niveles encontrados, en los sitios de muestreo, son de naturaleza regional y no local, como en el caso del cloruro, DBO y DQO, entre otros.

Los resultados muestran que el análisis quimiométrico es una herramienta eficiente para la clasificación de cuerpos de agua superficial, proporcionando información rápida sobre la calidad de agua para el desarrollo de redes de monitoreo.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección de Protección al Ambiente Humano del Ministerio de Salud de Costa Rica por la colaboración en el transporte a los sitios

de monitoreo durante toda la campaña de muestreo.

### Bibliografía

- Bricker, O.P., Jones, B.F. 1995. Main factors affecting the composition of natural waters. In: Salbu, B., Sateinnes, E. (Eds), Trace Elements in Natural Waters. CRC Press, Boca Raton, FL, pp 1-5.
- Einax, J.W., Truckenbrodt, D., Kampe, O. 1998. River Pollution data interpreted by means of chemometric methods. *Microchem. J.* 58, 315-324.
- Helena, B., Pardo, R., Vega, M., Barrado, E., Fernandez, J.M., Fernandez, L. 2000. Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial (Pisuerga river, Spain) by principal component analysis. *Water Research* 34, 807-816.
- Johnson, R.A., Wichern, D.W. Applied Multivariate Statistical Analysis, 3<sup>rd</sup> ed., Prentice-Hall International, Englewood Cliffs, New Jersey, USA p. 642.
- Kowalkowski, T., Zbytnieswski, R., Szpejna, J., Buszewski, B. 2006. Application of chemometrics in river water classification. *Water Research* 40, 744-752.

- Marengo, E., Gennaro, M.C., Giacosa, D.; Abrigo, C.; Saini, G. 1995. How chemometrics can helpfully assist in evaluating environmental data Lagoon water. *Anal. Chim. Acta* 317, 53-63.
- Vega, M., Pardo, R., Barrado, E., Deban, L. 1998. Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis. *Water Research* 32, 3581-3592.
- Voncina, D.B., Dobcnik, D., Novic, M., Zupan, J. 2002. Chemometric characterization of the quality of river water. *Analytica Chimica Acta* 462, 87-100.
- Zamora, R. 2004. Diagnóstico físico-natural y características del uso de la tierra de la microcuenca del río Burío y su tributario Quebrada Seca. Heredia, Costa Rica. Tesis de maestría publicada. Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar, Escuela de Ciencias Geográficas, UNA. p. 13.