

CORRELACIÓN CANÓNICA ENTRE VARIABLES FÍSICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS EN HUMEDALES COSTEROS

Canonical correlation between physicochemical and microbiological variables in coastal wetlands

Juan Carlos Valdelamar-Villegas¹

Recibido: 29 /06 /2018

Aceptado: 05 /09 / 2018

Resumen

El Análisis de Correlación Canónica (ACC), es una técnica estadística multivariada de uso poco frecuente, pero de gran potencia para reducir la dimensionalidad de los datos y encontrar el mejor grupo de combinaciones lineales intra-grupales. El ACC fue aplicado a dos conjuntos de datos que incluyen variables fisicoquímicas (Alcalinidad Conductividad Fosfatos, pH, Salinidad, Temperatura, Tensoactivos y Turbidez) y otras asociadas al componente microbiológico (Coliformes totales y coliformes fecales y DBO5). El análisis de los datos indica que existen correlaciones altas y significativas (0,94; p-valor << 0.01), entre los dos conjuntos de variables analizadas, destacándose en el primer grupo la salinidad por el mayor peso de su autovalor (2,08), seguida de los tensoactivos (1,04) y los fosfatos (0,78), mientras que el segundo grupo de variables se destacaron los coliformes fecales (0,98). Se concluye

que el ACC es una técnica adecuada para relacionar algunas variables fisicoquímicas y microbiológicas en humedales costeros, permitiendo además la identificación de patrones espaciales, temporales u otras asociadas a las características hidrológicas de los ecosistemas.

Palabras clave: fisicoquímica, microbiológica, correlación canónica.

Abstract

Canonical Correlation Analysis is a multivariate statistical technique of unfrequented use, but of great power to reduce the dimensionality of the data and to find the best group of intra-group linear combinations. The ACC was applied to two sets of data that include physicochemical variables (Alkalinity Conductivity Phosphates, pH, Salinity, Temperature, Surfactants and Turbidity) and others associated with the microbiological component (total

¹Universidad de Cartagena, Magíster en Ciencias Ambientales - jvaldelamarv1@unicartagena.edu.co

*Agradecimientos: a Leydis Suarez por facilitar el acceso a los datos empleados en los análisis del presente trabajo. También al Departamento de Ciencia Tecnología e Innovación de Colombia (Colciencias), por el apoyo brindado a través del programa de formación de Doctorados Nacionales (Convocatoria 647 de 2014).

coliforms and fecal coliforms and BOD5). The analysis of the data indicates high and significant correlations (0.94; p-value \ll 0.01), between the two sets of variables analyzed, standing out in the first group the salinity by the greater weight of its auto-value (2.08), followed by surfactants (1.04) and phosphates (0.78), while the second group of variables stood out the fecal coliforms (0.98). Result showed that

CCA is an adequate technique to relate some physicochemical and microbiological variables in coastal wetlands, also allowing the identification of spatial, temporal or other patterns associated with the hydrological characteristics of the ecosystems.

Keywords: physicochemical, microbiological, canonical correlation.

Introducción

El monitoreo constante de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua es un aspecto de gran importancia para conocer la evolución de estado de la calidad ambiental de los ecosistemas acuáticos, y de esta manera identificar de forma temprana, las alteraciones que puedan presentarse al respecto, y sus posibles causas (Anchal et al., 2008; Chappel et al., 2017), lo cual resulta de gran ayuda para gestionar de manera rápida y eficiente las medidas requeridas para su recuperación (da Rocha et al., 2018).

Sin embargo, la medición permanente de las variables ambientales antes mencionadas, resulta costosa en términos económicos, de tiempo y uso de personal calificado, lo cual ha obligado a las autoridades e investigadores a optimizar el proceso de monitoreo mediante el uso de variables críticas (de mayor ponderación) para la caracterización de la calidad ambiental, identificadas mediante la implementación de métodos estadísticos fundamentados en la relación lineal del conjunto de variables analizadas (Alilou et al., 2018), o mediante el uso de métodos de análisis multivariado como, el Análisis de Componentes Principales (ACP), Análisis Factorial, Cluster y Discriminante, con los que ha sido posible realizar agrupaciones naturales entre conjuntos de variables, cuya aplicación se ha extendido a las variables fisicoquímicas y microbiológicas (Filik et al., 2008; Partyka et al., 2017; Avila et al., 2018).

Algunas investigaciones en las que se ha intentado identificar la existencia de algún grado de relación, mediante el modelo de regresión lineal simple o de asociación mediante correlación simple, entre las variables fisicoquímicas y microbiológicas, han mostrado que la relación entre la mayoría de estas variables puede ser baja y no significativa estadísticamente (Catalao et al., 2000; Kacar, 2011; Lothrop et al., 2018);

No obstante, durante los últimos años, los investigadores han recurrido a otros métodos de análisis, como la regresión lineal múltiple, con la cual se ha podido identificar de manera parcial la relación entre algunas de estas variables. Asimismo, este método tiene como limitación el hecho de que solo permite relacionar una única variable dependientes con varias independientes, lo que no ocurre con el Análisis de Correlación Canónica (ACC), el cual permite relacionar de manera simultánea, un conjunto de variables dependientes con otro conjunto de dependientes (Mazurkiewicz-Zapalowicz et al., 2012). Esto lo consigue mediante la combinación lineal de cada conjunto de variables, que posee la más alta correlación entre ellas, y de esta forma permite determinar la existencia de algún tipo de asociación entre los dos conjuntos de variables de interés (Díaz y Morales, 2016).

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones el presente trabajo tuvo como propósito, determinar el grado de asociación entre dos conjuntos de variables fisicoquímicas y microbiológicas, de amplio uso para las caracterizadoras de la calidad ambiental de los ecosistemas acuáticos costeros, mediante la aplicación del Análisis de Correlación Canónica.

Método

Los aspectos contemplados en la metodología del presente estudio se describen a continuación:

Obtención de la información

Los datos empleados en el presente análisis, así como la metodología empleada para la medición de cada una de las variables analizadas, se pueden consultar en Beltrán y Suarez (2010), quienes realizaron una caracterización de la calidad ambiental del agua en seis humedales internos de Cartagena de Indias (norte de Colombia, 10° 26' de latitud norte y 75° 33' de longitud oeste), durante tres campañas de muestreo realizadas en el año 2007 (Figura 1).



Figura 1. Área de estudio y parámetros analizados por Beltrán y Suarez (2010).

Fuente: Beltrán y Suarez (2010).

En cada uno de los ecosistemas seleccionados, se midieron las variables fisicoquímicas: pH, temperatura (°C), Conductividad (mS/cm), Salinidad, Sólidos totales (mg/L), fosfatos (mg/L), alcalinidad (mg/L) y turbidez (NTU), tensoactivos (mg/L), mientras que en la medición de variables microbiológicas los autores incluyeron la concentración (NMP/100 mL) de coliformes totales (CT) y fecales (CF); y como indicador de la tasa de oxidación de la materia orgánica por parte de los microorganismos, midieron la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) (mg/L).

Procesamiento y análisis de la información

Para analizar el comportamiento espacio-temporal de las variables fisicoquímicas y microbiológicas en conjunto, se realizó un análisis de Correlación Canónica (ACC), cuya ecuación general (Ecuación 1), denota el grado de dependencia lineal de las variables de interés (Badii et al., 2007).

$$R = R_{yy}^{-1}R_{yx}R_{xx}^{-1}R_{xy} \quad (1)$$

Donde R_{yy}^{-1} y R_{xx}^{-1} , corresponden a las correlaciones internas para los conjuntos de variables dependientes (y) e independientes (x) respectivamente, y R_{yx} y R_{xy} , resentan las correlaciones entre x e y. Además, se calculan los autovalores, a partir de la ecuación 2.

$$\lambda_i = r_{ci}^2 \quad (2)$$

Donde r_{ci} , es el valor de la correlación canónica para cada par de variables.

El cálculo de la correlación canónica, requiere el valor de dos grupos de coeficientes canónicos, uno para combinar las variables dependientes (Ecuación 3), y otro para las independientes (Ecuación 4).

$$B_y = (R_{yy}^{-1/2})' \hat{B}_y \quad (3)$$

$$B_x = R_{xx}^{-1/2} R_{xy} B_y^* \quad (4)$$

Dónde: B_y = matriz normalizada de autovalores; R = matriz de correlaciones.

El ACC, está diseñado para identificar asociaciones entre dos conjuntos de variables. Esto lo hace encontrando combinaciones lineales de las variables en los dos conjuntos que exhiban correlaciones fuertes. El par de combinaciones lineales con la correlación más fuerte, forman el primer conjunto de variables canónicas. El segundo conjunto de variables canónicas es el par de combinaciones lineales que muestran la siguiente correlación más fuerte entre todas las combinaciones que no están correlacionadas con el primer conjunto. Frecuentemente, un número pequeño de pares puede ser usado para cuantificar la relación que existe entre los dos conjuntos (Basu y Mandal, 2010).

Para la ejecución del ACC y posterior obtención de su modelo, inicialmente se organizaron los datos, en hojas de cálculo del programa computacional Excel de Microsoft, y posteriormente se analizaron teniendo en cuenta la conformación de dos grupos; de estas, de acuerdo con su naturaleza. El primer grupo, al que se le denominó "fisicoquímicas", estuvo conformado por aquellas variables frecuentemente utilizadas para evaluar la calidad ambiental del agua, tales como el pH, temperatura, conductividad, sólidos totales, turbidez, salinidad, fosfatos, tensoactivos y alcalinidad.

Mientras que el segundo grupo al cual se le denominó “microbiológicas”, estuvo compuesto por los coliformes totales, coliformes fecales y la demanda bioquímica de oxígeno, ambas de gran aplicación durante la evaluación de la calidad microbiológica y del proceso de oxidación de la materia orgánica, mediado por los microorganismos del agua (Jouanneau et al., 2014).

La validación del modelo propuesto del ACC, se realizó a partir de la selección aleatoria de una muestra comprendida por el 30% de los datos originales, con los que se practicó nuevamente este análisis. Posteriormente se compararon los resultados del autovalor, correlación canónica y Lambda de Wilks, mediante la prueba U de Mann-Whitney a un nivel de significancia $p < 0,05$.

La totalidad de los análisis se realizó con el paquete estadístico Statgraphics Centurion XV. Los valores de la Correlación Canónica fueron clasificados en cuatro categorías, de acuerdo a Chen et al. (2018): Alta ($> 0,75$); moderada (0,50-0,75); baja (0,25-0,50) y débil ($< 0,25$). Los resultados del ACC sirvieron como base para identificar patrones espaciales, temporales y de la tipología hidrodinámica del sistema (lenticos: lagunas y ciénagas; loticos: caños), de acuerdo con el criterio de Roldan y Ramírez (2008).

Resultados

Comportamiento espacio temporal de las variables fisicoquímicas y microbiológicas

El comportamiento espacio temporal del promedio de las variables fisicoquímicas y microbiológicas analizadas, se resumen en la Tabla 1. En esta se observa que el pH más bajo fue de 7,53 en el caño Juan Angola (CJA) durante la segunda campaña, mientras que el más alto (8,20), se presentó en la Laguna de San Lázaro (LS), durante la tercera campaña de muestreo. Para el caso de la temperatura los valores medios, mínimo (29,85 °C) y máximo (31,50°C) se presentaron en la Ciénaga Las Quintas, (CQ). Por su parte la conductividad y salinidad presentaron un descenso progresivo en todos los sitios de muestreo durante el transcurso de las campañas, presentándose el mayor valor de conductividad (53,45 mS/cm), en la LS y el de salinidad (35,63 ppm), en el Caño de Bazurto (CB).

Los fosfatos se caracterizaron por su baja variabilidad temporal, presentándose el mayor promedio de estos (0,24 mg/L), en el CJA, durante la tercera campaña, mientras que el menor valor promedio (0,03 mg/L), se dio en el CB y la Bahía de Cartagena (BHC), durante la primera y tercera campaña. Respecto a la alcalinidad, esta mostró un gradiente de distribución creciente de sus valores medios en casi todos los sitios, en la medida que se efectuaron las campañas de muestreo, presentándose el mayor promedio en la LC (171,82 mg/L) y el menor en la BHC (56,80 mg/L).

El anterior comportamiento fue similar al presentado por los sólidos totales, ocurriendo su mayor promedio 40134 (mg/L), durante la tercera campaña de muestreo, en la CQ, mientras que el menor promedio 26250 (mg/L), se presentó en el CJA, durante la primera campaña, mientras que la turbidez presentó gran variación entre las estaciones y las campañas de muestreo; ocurriendo su mayor promedio (107 NTU) en la estación CB durante la segunda campaña, mientras que el menor (13,0 NTU), ocurrió durante la tercera campaña en la BHC.

Los tensoactivos mostraron un comportamiento variable entre estaciones y campañas de muestreo, siendo mayor el promedio (0,19 mg/L), durante la segunda campaña, en la CQ, mientras que el menor promedio (0,02 mg/L) se presentó en la LS, durante la tercera. En lo que respecta a las variables microbiológicas, se evidenció una alta variabilidad de la DBO5 con respecto a las estaciones y campañas de muestreo, presentando el mayor promedio (13,98 mg/L) en el CJA, durante la primera campaña; mientras que el menor promedio (2,94 mg/L) se dio en la BHC, a diferencia de esta variable, los coliformes totales y fecales presentaron mayor promedio, durante la segunda campaña de muestreo, con 6500 NMP y 22100 NMP respectivamente.

Correlación Canónica entre las variables fisicoquímicas y microbiológicas

El análisis de correlación Canónica mostró que entre las variables Fisicoquímicas y las Microbiológicas existían dos grupos de correlaciones altas y significativas, sin embargo el primer grupo de estas correlaciones, se caracterizó por el que presentó mayor correlación y mayor peso del Autovalor (0,94 y 0,89 respectivamente), gozando además de mayor significancia estadística (p -valor $\ll 0,01$), como se muestra en la Tabla 2.

Por su parte, el análisis de los coeficientes obtenidos para cada grupo de variables, mostró, en el caso de las Fisicoquímicas, que la salinidad, los tensoactivos y los fosfatos, fueron las variables representativas dentro de su conjunto, debido a su mayor grado de correlación canónica, con valores 2,08, 1,04 y 0,78 respectivamente (Tabla 3); mientras que, en el conjunto de las variables Microbiológicas, los coliformes fecales fue la variable representativa con un valor de correlación igual 0,97

En el dispersograma de la Figura 2A, se aprecia la relación canónica de tipo directa que existe entre los conjuntos de variables fisicoquímicas, y microbiológicas. Al realizar el esto mismo, por sitios de muestreo, se aprecia la existencia de un patrón de distribución espacial con respecto a los valores de los dos conjuntos de variables analizadas, entre estos sitios, especialmente el CJA, quien se caracterizó por presentar los mayores valores, seguido de la LC, la LS, el CB, y la BHC. Ésta situación indica que el Caño Juan Angola, es el humedal que presenta los mayores valores de salinidad, tensoactivos, fosfatos y temperatura, que Probablemente propiciaron los mayores valores de Coliformes fecales y DBO5 en éste sitio, con respecto a los demás. También es destacable el hecho de que la CQ, presenta tanto valores altos como bajos (Figura 2B), denotando una alta variación de las variables analizadas este sitio con respecto a los demás.

Tabla 1. Promedio de las variables fisicoquímicas y microbiológicas, analizadas en los humedales internos de la ciudad de Cartagena de Indias, durante las campañas de muestreo desarrolladas en los meses de: marzo: 1, Abril: 2 y Mayo: 3. En los ecosistemas: BHC: Bahía de Cartagena; CB: Caño de Bazarito; CJA: Caño Juan Angola; CQ: Ciénaga de las Quintas; LC: Laguna del Cabrero y LS: Laguna del Cabrero y LS: Laguna de San Lázaro. Modificado de Beltrán y Suarez (2010).

| Campana | Sitio | pH | Temperatura (oC) | Conductividad (mS/Cm) | Salinidad | Fosfatos (mg/L) | Alcalinidad (mg/L) | Sólidos Totales (mg/L) | Turbidez (NTU) | Tensoactivos (mg/L) | DBOs (mg/L) | Coliformes Totales (NMP/100ml) | Coliformes Fecales (NMP/100mL) |
|----------|-------|------|------------------|-----------------------|-----------|-----------------|--------------------|------------------------|----------------|---------------------|-------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | BHC | 7,84 | 30 | 52,7 | 35,63 | 4,55 | 0,03 | 56,8 | 26855,33 | 23,67 | 0,08 | 960 | 960 |
| 1 | CB | 7,79 | 30 | 52,95 | 35,65 | 9,75 | 0,07 | 58,3 | 27031 | 47 | 0,13 | 930 | 12115 |
| 1 | CJA | 7,75 | 30,05 | 52,35 | 34,75 | 13,98 | 0,04 | 59,7 | 26250 | 33,75 | 0,11 | 4240 | 4065 |
| 1 | CQ | 7,69 | 29,97 | 51,97 | 35,57 | 12,09 | 0,06 | 60,1 | 27564,67 | 65,67 | 0,16 | 600 | 6000 |
| 1 | LC | 7,83 | 30,43 | 53,2 | 35,07 | 13,2 | 0,03 | 62,13 | 26660,67 | 30,33 | 0,05 | 596,67 | 596,67 |
| 1 | LS | 7,9 | 30,55 | 53,45 | 35,25 | 11 | 0,07 | 61,55 | 27197 | 28 | 0,05 | 840 | 840 |
| 2 | BHC | 7,69 | 30,3 | 41,51 | 26,47 | 4,55 | 0,11 | 128,42 | 31622,67 | 88,67 | 0,07 | 2270 | 4546,67 |
| 2 | CB | 7,87 | 29,95 | 41,95 | 26,85 | 6,03 | 0,19 | 135,49 | 32736 | 107 | 0,09 | 615 | 1215 |
| 2 | CJA | 7,53 | 30,9 | 43,6 | 27,9 | 10,88 | 0,12 | 145,6 | 35046,5 | 84,5 | 0,1 | 2666,67 | 21575 |
| 2 | CQ | 7,79 | 29,85 | 41,5 | 26,74 | 6,86 | 0,12 | 150,41 | 32698,67 | 104 | 0,19 | 6950 | 22100 |
| 2 | LC | 7,96 | 30,8 | 41,47 | 26,43 | 7,64 | 0,19 | 136,47 | 32942,67 | 69,33 | | 946,67 | 1986,67 |
| 2 | LS | 7,69 | 30,95 | 41,74 | 25,55 | 10,81 | 0,03 | 102,78 | 31590 | 51,5 | 0,05 | 2265 | 2265 |
| 3 | BHC | 8,04 | 30,07 | 38,7 | 24,7 | 2,94 | 0,09 | 143,38 | 39345,33 | 13 | 0,02 | 132 | 562 |
| 3 | CB | 8,1 | 31,15 | 38,6 | 24,8 | 4,35 | 0,24 | 156,62 | 39630 | 33 | 0,03 | 4795 | 4830 |
| 3 | CJA | 7,87 | 30,68 | 40,18 | 24,55 | 12,51 | 0,08 | 153,53 | 38468,5 | 93 | 0,04 | 2515 | 7425 |
| 3 | CQ | 7,99 | 31,5 | 38,97 | 25 | 6,63 | 0,16 | 171,44 | 40134 | 64 | 0,02 | 846,67 | 930 |
| 3 | LC | 8,17 | 30,83 | 36,97 | 23,57 | 9,17 | 0,09 | 171,82 | 38012,67 | 74 | 0,03 | 696,67 | 1410 |
| 3 | LS | 8,2 | 30,8 | 38,25 | 24,5 | 6,68 | | 161,9 | 39288 | 40 | 0,02 | 1145 | 3380 |
| Promedio | | 7,87 | 30,49 | 44,45 | 28,83 | 8,53 | 0,10 | 117,58 | 32948,54 | 58,36 | 0,07 | 1889,46 | 5377,89 |
| DE | | 0,18 | 0,49 | 6,27 | 4,83 | 3,40 | 0,06 | 44,88 | 5203,09 | 29,14 | 0,05 | 1810,81 | 6681,23 |

DE: Desviación estándar

Tabla 2.
Correlaciones Canónicas.

| | Número | Autovalor | Correlación Canónica | Lambda De Wilks | Chi-Cuadrado | G.L. | P-Valor |
|-------------------------------|--------|-----------|----------------------|-----------------|--------------|------|---------|
| Datos totales | 1 | 0,888 | 0,942 | 0,024 | 87,667 | 27 | 0,000 |
| | 2 | 0,678 | 0,823 | 0,214 | 36,175 | 16 | 0,003 |
| | 3 | 0,334 | 0,578 | 0,666 | 9,553 | 7 | 0,215 |
| Muestra (30%) | 1 | 0,993 | 0,996 | 0,0002 | 61,544 | 27 | 0,0002 |
| | 2 | 0,918 | 0,958 | 0,039 | 24,329 | 16 | 0,0826 |
| | 3 | 0,525 | 0,724 | 0,475 | 5,581 | 7 | 0,5894 |
| U Mann-Whitney-p-valor | | 0,400 | 0,400 | 0,700 | | | |

Números en negrilla indican correlación significativa, con p-valor < 0.05.

Al analizar los puntos resultantes del análisis, teniendo en cuenta las campañas de muestreo (Figura 2C), se observa que durante la primera campaña se presentaron los mayores valores, seguidos de las campañas tres y dos. Por su parte, el análisis planteado para analizar la distribución de los autovalores, de acuerdo a las características hidrodinámica de los sistemas, mostró que los mayores valores de las variables analizadas se presentan en los sistemas loticos y los menores en los lenticos (Figura 2D).

Por este lado con respecto a la validación del modelo obtenido, los resultados de ésta se presentan en la Tabla 2, donde se observa que no hubo diferencias significativas (U de Mann-Whitney: $p > 0,05$), entre los parámetros calculados para el autovalor, la correlación canónica y el estadístico Lambda de Wilks, a partir de los resultados originales y la muestra del 30% de los datos originales seleccionado aleatoriamente.

Discusión

De acuerdo con la legislación Colombiana que regía durante el periodo en que fue realizado el estudio de Beltrán y Suarez (2010) (Decreto 1594 de 1984), los valores de pH, se encontraron dentro de lo admisible por la norma tanto para la destinación de contacto primario y secundario, así como para preservación de fauna y flora.

La variación de la salinidad en los cuerpos de agua cercanos a la Bahía Interna de Cartagena (Laguna San Lázaro y Ciénaga de Las Quintas), indica que en estos humedales existe un proceso continuo de renovación de la misma, sin embargo, el comportamiento de los sólidos totales y la turbidez, sugiere que a estos humedales también ingresa

material alóctono, insoluble en suspensión, coloides y microorganismos, procedentes de los residuos dispuestos inadecuadamente en sus laderas, así como del lavado y la erosión de los suelos circundantes (Tirado et al., 2010).

Esta situación impacta negativamente estos cuerpos de agua, debido a que reduce la zona fótica, y con ello la fotosíntesis de los productores primarios, lo que disminuye la oferta de oxígeno. Adicionalmente bajo esta situación, la demanda de oxígeno aumenta por parte de microorganismos como las bacterias y protozoarios, que oxidan rápidamente la materia orgánica disuelta en el agua (Hu et al. 2017); situación esta, que se evidenció principalmente en ecosistemas como el Caño Juan Angola, el cual presentó altos valores de DBO5 (6,02-18,84 mg/L), que excedieron el límite establecido en la normatividad colombiana (5 mg/L). La explicación a este comportamiento se debe a que durante la época del estudio, este sitio funcionaba como receptor de las descargas de emergencia de aguas residuales de la estación del Oro, perteneciente a la empresa Aguas de Cartagena S.A ESP.

Al igual que los resultados anteriores, la concentración de los coliformes totales y fecales, indicó que el agua de los ecosistemas analizados presentaba calidad inadecuada para fines recreativos (Decreto 1594 de 1984), cuya casusa se relaciona directamente con el vertimiento de aguas residuales.

El análisis particularizado de los datos posee ciertos inconvenientes, entre estos la comprensión integral de los fenómenos estudiados, ya que desconoce aquellos efectos que se pueden derivar de la sinergia entre variables, así como la identificación de “variables críticas” (Alilou et al., 2018), que pueden servir como descriptores de procesos que ocurren en los sistemas naturales, y a partir de las cuales se pueden generar estrategias de análisis como la construcción de indicadores de calidad ecológica y ambiental, lo cual puede lograrse adecuadamente mediante el uso de técnicas de análisis multivariados como la correlación canónica (Ramírez et al., 1997; Yuvaraj et al., 2018).

El uso de la ACC puede ser complejo cuando existen datos de muy alta dimensión ($m > n$) sin embargo, una de las principales ventajas de este análisis, es que se fundamenta en uso de una matriz de covarianza fácilmente computable, en lugar de la gran cantidad de datos (Shen et al., 2014); además, la representación gráfica de este tipo de análisis, usualmente en dispersogramas de dos dimensiones resulta menos complejo que en el de otras técnicas de análisis multivariado (Khalil et al. 2011), permitiendo identificar, como el presente trabajo patrones de tipo espacial (sitio), temporales (campana), o de otros factores diferenciadores de los datos, como ocurrió en el presente análisis con la tipología hidrodinámica del sistema.

Así que las bondades del ACC han sido evidenciadas en el presente estudio, mediante el cálculo del coeficiente de correlación producto-momento (Díaz y Morales, 2016), que permitió identificar el aporte de cada variable dentro de su respectivo conjunto (variable canónica), destacándose en este sentido la salinidad, por ocupar el primer

lugar; condición que puede ser explicada por los cambios que usualmente experimenta esa variable en los ecosistemas costeros, debido a la incidencia de la estacionalidad climática; sobre todo por la precipitación, que al hacerse mínima facilita el incremento de la temperatura y salinidad del agua, debido al desbalance entre la tasa de reposición del agua y la tasa de pérdida por evapotranspiración (Cloern et al., 2017); además este mismo fenómeno influye de manera directa en el incremento de la concentración de otras variables, como los tensoactivos y los fosfatos, así como en la concentración de coliformes totales y la DBO₅, (de mayor peso en el segundo grupo de variables canónicas) (Gavio et al., 2010).

Los resultados hasta ahora encontrados permiten afirmar que el ACC, ha sido método de análisis eficaz para identificar el grado de relación entre los dos conjuntos de variables analizadas, lo cual se suma a la gama de aplicaciones que previamente han sido reportadas para este método (Khaki et al. 2018; Chen et al. 2018), denotando una vez mas la importancia del ACC como técnica estadística exitosa para la reducir la dimensionalidad de los datos, y con ello obtener mejores resultados en cuanto a la identificación de relaciones difícilmente observables mediante el uso de técnicas de análisis univariado (Liu et al., 2018).

Tabla 3.

Coefficientes de Correlación Canónica del primer y segundo grupo de variables.

Primer grupo: **Fisicoquímicas**

| | Conjunto 1 | Conjunto 2 | Conjunto 3 |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|
| Alcalinidad | -0,496 | -0,788 | 1,750 |
| Conductividad | -2,513 | -1,837 | 4,194 |
| Fosfatos | 0,783 | 0,970 | -0,624 |
| pH | -0,370 | 0,176 | 0,661 |
| Salinidad | 2,084 | 1,965 | -4,013 |
| Sólidos totales | 0,153 | -0,469 | -2,110 |
| Temperatura | 0,450 | 0,160 | 0,159 |
| Tensoactivos | 1,037 | -0,298 | -0,182 |
| Turbidez | -0,664 | -0,258 | 0,386 |
| Segundo grupo: Microbiológicas | | | |
| Coliformes Fecales | 0,966 | -0,601 | 0,870 |
| Coliformes Totales | -0,019 | 0,558 | -1,327 |
| DBO ₅ | 0,129 | 0,877 | 0,480 |

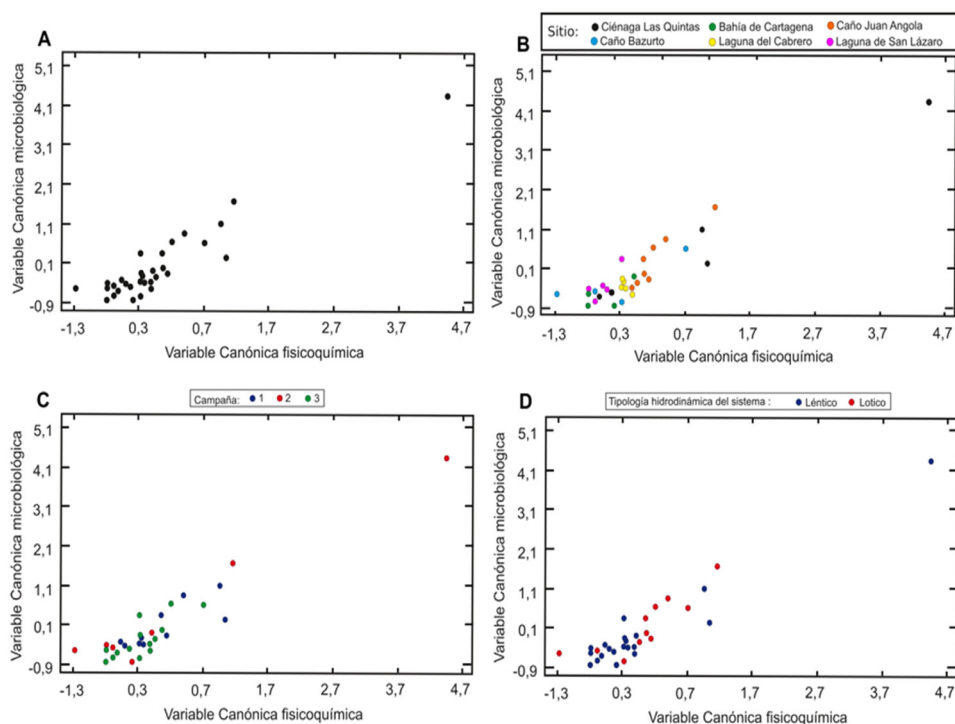


Figura 2. Dispersograma de la Correlación Canónica, entre las variables Físicoquímicas y Microbiológicas (A), para los sitios de muestreo (B), mes de campaña de muestreo (1: Marzo; 2: Abril, y 3: Mayo) (C) y la tipología hidrodinámica del sistema (D).

Conclusiones

La aplicación del Análisis de Correlación Canónica, permitió maximizar la correlación entre las variables fisicoquímicas y microbiológicas, frecuentemente utilizadas para la caracterización de la calidad ambiental de los humedales internos de Cartagena de Indias, identificándose además a la salinidad, los tensoactivos, fosfatos y coliformes fecales, como las variables representativas de estos ecosistemas, sugiriendo su inclusión durante los próximos programas de monitoreo de calidad ambiental que se pretendan desarrollar en este tipo de humedales. Seguramente el desarrollo de un mayor número de estudios de este tipo en estos ecosistemas ayudará a afianzar algunas de estas variables como representativas del resto, pudiéndose requerir solo la medición de mismas, al momento de determinar la calidad ambiental de estos humedales, lo que sin duda permitirá reducir los costos operacionales que usualmente se tienen con los actuales programas de monitoreo de la calidad ambiental de las aguas.

Además de las anteriores consideraciones, el ACC, ha sido útil para identificar fácilmente patrones de distribución espacio-temporal y otros relacionados con la tipología hidrodinámica de los ecosistemas, lo cual permitirá entender muchos fenómenos ecológicos y ambientales que se llevan a cabo en humedales de este tipo, sirviendo además como información de base, para la adecuada gestión ambiental por parte de las autoridades locales.

Referencias

- Alilou H., Moghaddam A., Hamidreza N., Dawei K., Michaela H. (2018). *A cost-effective and efficient framework to determine water quality monitoring network locations*. Science of The Total Environment, 624:283-293. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.121>.
- Anchal S., Kamal D., Piyush S., Shivesh P. (2008). *Assessment of bacterial indicators and physicochemical parameters to investigate pollution status of Gangetic river system of Uttarakhand (India)*. Ecological Indicators, 8(5): 709-717.
- Avila R., Horn B., Moriarty E., Hodson R., a Moltchanova E. (2018). *Evaluating statistical model performance in water quality prediction*. Journal of Environmental Management, 206: 910-919.
- Badii, M., J. Castillo, K. Cortez, A. Wong & P. Villalpando. (2007). *Análisis de correlación canónica (ACC) e investigación científica*. Innovaciones de Negocios, 4(2): 405 - 422 disponible en (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479717311258>)
- Basu A. y A. Mandal. (2010). *Canonical Correlation*. International Encyclopedia of Education (Third Edition), Editors-in-Chief: Penelope Peterson, Eva Baker and Barry McGaw, Oxford, p:52-57.
- Beltrán A. y Suárez L. (2010). *Diagnóstico ambiental de los cuerpos internos de agua de la ciudad de Cartagena de Indias*. Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco- Cardique. Cartagena, Colombia. Diposnible en: www.eumed.net/libros/2010b/691/.
- Catalao Dionisio Lidia Po, G Rheinheimer, Juan J Borrego. (2000). *Microbiological Pollution of Ria Formosa (South of Portugal)*. Marine Pollution Bulletin, 40(2): 186-193.
- Chappel N., Jones T., Tych W. (2017). *Sampling frequency for water quality variables in streams: Systems analysis to quantify minimum monitoring rates*. Water Research, 123: 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.06.047>.

- Chen, N., Mo, Q., Kuo, Y.-M., Su, Y., y Zhong, Y. (2018). *Hydrochemical controls on reservoir nutrient and phytoplankton dynamics under storms*. Science of The Total Environment, 619–620, 301–310. DOI: 10.1002/Ino.10537.
- Cloern J., Jassby A., Schraga T., Nejad E., Matin C. (2017). *Ecosystem variability along estuarine salinity gradient: Examples from long-term study of San Francisco Bay*. Limn.Oceanogr, 62:272-291.
- da Rocha, M.P., Dourado, P.L.R., Cardoso, C.A.L. et al. *Environ Monit Assess*, (2018) 190: 61. DOI:10.1007/s10661-017-6440-2.
- Díaz L. y Morales M. (2016). *Análisis estadístico de datos multivariados. 2ª ed.* Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.635p. ISBN: 978-958-761-325-4.
- Filik Iscen, C., Emiroglu, Ö., Ilhan, S. et al. (2008). *Application of multivariate statistical techniques in the assessment of Surface water quality in Ulubat Lake, Turkey*. Environ Monit Assess, 144: 269. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9989-3>.
- Gavio B., Palmer-Cantillo S., Mancera J. (2010). *Historical analysis (2000–2005) of the coastal water quality in San Andrés Island, SeaFlower Biosphere Reserve, Caribbean Colombia*. *Marine Pollution Bulletin*. 60(7):1018-1030. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2010.01.025.
- Hu X., Li Q., Huang W., ChenB., Cai W., Rabalais N., Turner R. (2017). *Effects of eutrophication and benthic respiration on water column carbonate chemistry in a traditional hypoxic zone in the Northern Gulf of Mexico*. *Marine Chemistry*. 194:33-42. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2017.04.004>.
- Jounnaeau S., Recoules L., Durand M., Boukabache A., Picot V., Primault Y., Lakel A., Sengelin M., Barillon A., Thouand G. 2014. *Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review*. Water research, 49:62-82. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.066>.
- Kacar A. (2011). *Analysis of spatial and temporal variation in the levels of microbial fecal indicators in the major rivers flowing into the Aegean Sea, Turkey*. Ecological Indicators, 11(5): 1360–1365.
- Khaki, M., Forootan, E., Kuhn, M., Awange, J., Papa, F., & Shum, C. K. (2018). *A study of Bangladesh's sub-surface water storages using satellite products and data assimilation scheme*. Science of The Total Environment, 625: 963–977. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.289>.

- Khalil B., Ouarda T., St-Hilaire A. (2011). *Estimation of water quality characteristics at ungauged sites using artificial neural networks and canonical correlation analysis*. Journal of Hydrology, 405: 277-287. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.05.024.
- Liu, W., Yang, X., Tao, D., Cheng, J., & Tang, Y. (2018). *Multiview dimension reduction via Hessian multiset canonical correlations*. Information Fusion, 41: 119–128. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.inffus.2017.09.001>.
- Lothrop N., Bright K., Sexton J., Pearce-Walker J., Reynolds J., Verhougstraete M. (2018). *Optimal strategies for monitoring irrigation water quality*. Agricultural Water Management, 199: 86-92. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.018>.
- Mazurkiewicz-Zapałowicz K., Silicki, A., Gregorczyk, A. et al. 2012. *Ocean and Hydrol* 41(4): 8-16.
- Partyka M., Bond R., Chase J., Atwill E. (2017). *Monitoring bacterial indicators of water quality in a tidally influenced delta: A Sisyphean pursuit*. Science of The Total Environment, 578(): 346-356. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.179>.
- Rheinheimer, Juan J Borrego. (2000). *Microbiological Pollution of Ria Formosa (South of Portugal)*. Marine Pollution Bulletin, 40(2): 186–193.
- Ramírez A., Restrepo R., Viñas G. (1997). *Cuatro índices de contaminación para la caracterización de aguas continentales. Formulación y aplicación*. Ciencia, Tecnología y Futuro. 1(3): 135-153.
- Roldan P. Gabriel y Ramírez R. John J. (2008). *Fundamentos de Limnología Neotropical*. 2ª edición. Ed. Universidad de Antioquia. 440p.
- Shen, C., Sun, M., Tang, M., & Priebe, C. E. (2014). *Generalized canonical correlation analysis for classification*. Journal of Multivariate Analysis, 130: 310–322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmva.2014.05.011>.
- Tirado O., Manjarrez G., Díaz C. (2011). *Caracterización ambiental de la ciénaga de La Quinta localizada en Cartagena de Indias, Colombia, 2009-2010*. Actualidad & Divulgación científica. 14(2): 131-139.
- Yuvaraj P., Satheeswaran T., Damotharan P., Karthikeyan V., Kumar D. Dharani G., Balasubramanian T., Kirubakaran R. (2018). *Evaluation of the environmental quality of Parangipettai, Southeast Coast of India, by using multivariate and geospatial tool*. Marine Pollution Bulletin. 131(Part A): 239-247. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.022>.



Pabellón Nacional de la Republica de Colombia.