

Variabilidad iónica en la red hidrográfica de Oaxaca, México: Alternativa gráfica y estadística multivariada

Ionic variability in the hydrographic network of Oaxaca, Mexico: multivariate graphic and statistical alternative

Alejandra Gabriela Vargas-Orozco^{1*}, Carlos Ramírez-Ayala¹, Héctor Manuel Ortega-Escobar¹, Edgar Iván Sánchez-Bernal²,
Elí Ramírez-Vázquez³

Recibido: 11 de agosto de 2018.

Aceptado: 24 de noviembre de 2021.

Publicado: diciembre de 2021.

RESUMEN

Antecedentes. Factores como la litología, la geomorfología, el clima y las actividades antropogénicas, causan variabilidad iónica del agua superficial, sub-superficial y subterránea. El estudio de dicha variabilidad permite conocer sus características hidroquímicas para su posterior uso o consumo. La interpretación de la variabilidad iónica se realiza mediante métodos gráficos, y en los últimos años se han integrado las estadísticas multivariadas a dichos análisis. **Objetivos.** Se desea obtener un análisis químico e identificar qué factores afectan el agua y demostrar que el complementar el diagrama de Piper con el análisis multivariado ayuda a obtener una mejor interpretación de resultados. **Métodos.** El presente trabajo se realizó en la red hidrográfica Oaxaca-Puebla, contemplando el complejo relieve y las heterogéneas condiciones de litología y clima, sobre todo en Oaxaca. Se colectaron 90 muestras en total, de las cuales tres se tomaron en salinas de Zapotitlán, Puebla y el resto en el estado de Oaxaca. Se empleó el diagrama triangular de Piper para la clasificación de las aguas y el análisis de componentes principales (ACP) para mejorar la interpretación. **Resultados.** El diagrama triangular permitió clasificar las aguas de la red hidrográfica en dos grandes grupos, bicarbonatadas cálcico-magnésicas y sulfatadas cálcicas-magnésicas, además de la separación de las aguas salinas. Por su parte, el ACP, además de mostrar los mismos grupos de aguas, permitió observar una mayor concentración de cloruro de sodio en el punto más alto de la salinera, en comparación con los otros dos que se tomaron en este sitio. Con el ACP se pudo clasificar el agua de la cuenca del río Copalita como bicarbonatada cálcica-magnésica, lo que coincide con estudios previos. **Conclusiones.** Finalmente, al complementar el diagrama triangular de Piper con el ACP, se mejoró la interpretación de la variabilidad iónica de la red hidrográfica Oaxaca-Puebla.

Palabras clave: análisis estadístico, composición química, corrientes superficiales, métodos gráficos, sales solubles.

ABSTRACT

Background. Factors such as lithology, geomorphology, climate and anthropogenic activities, cause ionic variability of surface, subsurface and underground water. The study of this variability allows to know its hydrochemical characteristics for its subsequent use. The interpretation of the ionic variability is carried out by mean of graphic methods, and multivariate statistics have been integrated into these analyses during the last few years. **Objective.** To perform a chemical analysis, to identify the factors affecting the water, and to prove that complementing the Piper diagram with a multivariate analysis helps to obtain a better interpretation of results. **Methods.** This work was carried out in the Oaxaca-Puebla hydrographic network, considering the complex relief and the heterogeneous lithological and climate conditions, especially in Oaxaca. A total of 90 samples were collected, three of which were taken in salt flats in Zapotitlán, Puebla and the rest of them in the state of Oaxaca. A Piper diagram was used for water classification, as well as the principal component analysis (PCA) to improve the interpretation of data. **Results.** The triangular diagram allowed to classify the waters of the hydrographic network into two large groups, calcium-magnesium bicarbonate, and calcium-magnesium sulfate, in addition to the separation of saline waters. The PCA, in addition to showing the same groups of waters, allowed to prove a higher concentration of sodium chloride at the highest point of

¹ Programa de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, campus Montecillo. Km 36.5, carretera México-Texcoco, Montecillo, Texcoco, Estado de México, 56230. México

² Instituto de Ecología, Universidad del Mar, campus Puerto Escondido. Carretera Vía Sola de Vega, Puerto Escondido, San Pedro Mixtepec, Juquila, Oaxaca, 71980. México

³ Programa de Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados, campus Montecillo. Km 36.5, carretera México-Texcoco, Montecillo, Texcoco Estado de México, 56230, México

*Corresponding author:

Alejandra Gabriela Vargas-Orozco: e-mail: vargas.alejandra@colpos.mx

To quote as:

Vargas-Orozco, A.G., C. Ramírez-Ayala, H.M. Ortega-Escobar, E.I. Sánchez-Bernal & E. Ramírez-Vázquez. 2021. Variabilidad iónica en la red hidrográfica de Oaxaca, México: Alternativa gráfica y estadística multivariada. *Hidrobiológica* 31 (3): 201-208.

DOI:10.24275/uam/izt/dcbshidro/2021v31n3/Vargas

the salt flat, as compared to the other two that were taken at this site. With the PCA, the water of the Copalita river basin could be classified as calcium-magnesium bicarbonate, coinciding with previous studies.

Conclusions. By complementing a Piper diagram with a PCA, the interpretation of the ionic variability of the Oaxaca-Puebla hydrographic network improved.

Keywords: chemical composition, graphical methods, soluble salts, surface currents, statistic analysis.

INTRODUCCIÓN

El agua es de gran importancia para la vida y para el desarrollo de las civilizaciones. Es un recurso indispensable en la agricultura, la industria, y para uso y consumo humano. Por lo tanto, debe cumplir con cierta composición química para poder ser utilizada en alguna de las actividades mencionadas. Una vez que el agua precipita, una parte se infiltra y el resto escurre de manera superficial o subsuperficial. En cualquiera de estos procesos, el agua está en contacto con rocas o suelo, los cuales, dependiendo su naturaleza parental o el grado de meteorización, pueden aportar minerales ionizados. Otra fuente de iones puede provenir de la agricultura, la minería u otra actividad antropogénica, mediante la descarga de desechos a las corrientes superficiales. Además de los aspectos litológicos, tanto el clima como la orografía, condicionan de manera significativa la variabilidad físico-química del agua, siendo más evidente en las regiones kársticas (Avilés *et al.*, 2003).

México cuenta con 13 regiones hidrológicas, 8 forman parte del estado de Oaxaca, de las cuales fluyen 5 de los principales ríos de México: Tehuantepec, Papaloapan, Grande, Usumacinta-Grijalva, Coatzacoalcos y Verde (CNA, 2012). Oaxaca es la entidad, con el relieve territorial más complejo de todo el país, con una notable transformación neotectónica y heterogeneidad litoestructural de sus terrenos tectono-estratigráficos (Hernández *et al.*, 2008). Por lo tanto, la influencia marina y la orografía del estado, son factores determinantes de su precipitación y temperatura. Existen zonas con precipitaciones anuales que alcanzan los 4,500 mm, como en la región del Papaloapan, y en zonas donde la precipitación promedio es de 400 mm, como es el caso de la Mixteca, Cañada y Valles Centrales. De igual manera, las temperaturas promedio presentan variaciones de entre 8 °C y más de 26 °C, por ejemplo, en zonas de la Costa, Papaloapan e Istmo en donde se tienen las temperaturas más altas, que llegan hasta 31 °C entre abril y mayo (SEMAEDSO, 2018). La heterogeneidad de estos factores físicos, pueden condicionar la variabilidad de la red hidrológica, haciendo más compleja la clasificación y su posterior interpretación. Ante esta situación, es necesaria la búsqueda de herramientas prácticas y confiables que permitan reducir o agrupar las variables que más se diferencien. En general, las investigaciones, sobre clasificación química del agua, emplean el método gráfico, el análisis estadístico o ambos.

El diagrama triangular de Piper es una de las herramientas ampliamente utilizadas para la interpretación de la composición química de aguas subterráneas (Ahamed *et al.*, 2016), subterráneas contaminadas (Biglari *et al.*, 2015), ríos principales y tributarios, así como ríos contaminados (Chadha, 1999).

Por otra parte, diversos investigadores prefieren utilizar los métodos estadísticos multivariados debido a que permiten trabajar con

un número grande de variables, clasificándolas y formando grupos en común, de esta forma se puede comprender mejor una realidad compleja (Peña, 2002).

De los métodos estadísticos, el Análisis de Componentes Principales, se ha empleado para evaluar procesos de clarificación de agua (Vásquez *et al.*, 2016), para medir los efectos antropogénicos en la calidad hidroquímica (Dong *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2015), para la caracterización fisicoquímica y la variabilidad iónica (Anderson *et al.*, 2001; Tahvanainen *et al.*, 2002; Gajbhiye *et al.*, 2015), agrupamiento homogéneo (Güler *et al.*, 2002), inclusive para evaluar la calidad química del agua subterránea (Belkhiri *et al.*, 2011; Subba *et al.*, 2020).

Para conocer la variabilidad iónica del agua Avilés *et al.* (2003), analizaron estadísticamente estos datos por medio del diagrama triangular y el análisis de componentes principales. Mientras tanto, Shelton *et al.* (2018), utilizaron el diagrama triangular de Piper para la clasificación de aguas con datos recolectados desde 1944 y demostraron que el uso y la implementación de métodos estadísticos mejora la percepción y la interpretación de los resultados, comparando la información gráficamente. Ese mismo año Faitouri *et al.* (2018), emplearon el diagrama triangular de Piper, el análisis de conglomerados, el análisis de componentes principales y el análisis factorial, en su trabajo de investigación.

Los objetivos principales de este estudio son: (1) analizar la composición química de las aguas superficiales, (2) identificar qué factores afectan la composición química del agua en la red hidrográfica Oaxaca-Puebla y (3) demostrar que el complementar el diagrama de Piper con el análisis multivariado ayuda a obtener una mejor interpretación de resultados.

A partir de lo anterior, en la presente investigación se utilizó el diagrama triangular de Piper y el análisis de componentes principales para analizar la variabilidad iónica de 90 muestras de agua, colectadas en la red hidrográfica Oaxaca-Puebla.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la red hidrográfica Oaxaca-Puebla, iniciando en una salinera en Zapotitlán, Puebla y posteriormente se abarcaron la mayoría de las regiones hidrológicas de Oaxaca. En Zapotitlán el tipo de suelo es generalmente de yeso y caliza con un alto contenido de sales. Mientras que el estado de Oaxaca, el cual se encuentra enclavado en la provincia hidrogeológica Sierra Madre del Sur (Fig. 1), presenta áreas montañosas compuestas de rocas metamórficas y paleozoicas, rocas sedimentarias del Mesozoico y rocas volcánicas del Mesozoico y Cenozoico, cubiertas en las altiplanicies por suelos residuales y en las costas por material granular (Velázquez & Ordaz, 1992).

Se colectaron en total 90 muestras de agua, de las cuales tres fueron colectadas en la salinera de Zapotitlán, a diferentes altitudes y el resto fueron tomadas en la red hidrográfica de Oaxaca, contemplando ríos, manantiales, lagos, presas y mar (Fig. 2). El procedimiento para la toma de muestra se realizó con base en lo establecido por el Clesceri *et al.* (1998), la determinación de la temperatura fue en campo con un termómetro digital (Diá 1.5 mm, LVás 3-1/2) y se corroboró con un termómetro de alcohol. Los análisis físico-químicos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Ciencias Ambientales del programa de Hidrociencias, en el Colegio de Postgraduados (Tabla 1).

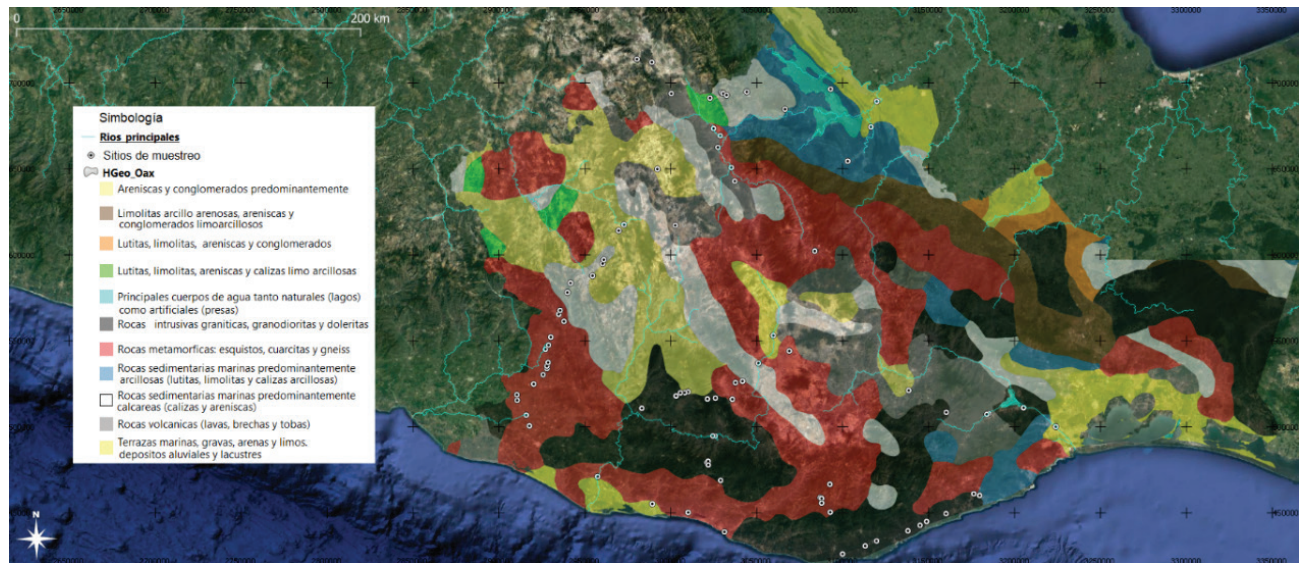


Figura 1. Tipos de rocas, conforme las provincias hidrogeológicas del estado de Oaxaca. Fuente: elaboración propia con datos de SIG/CONABIO, 2018.

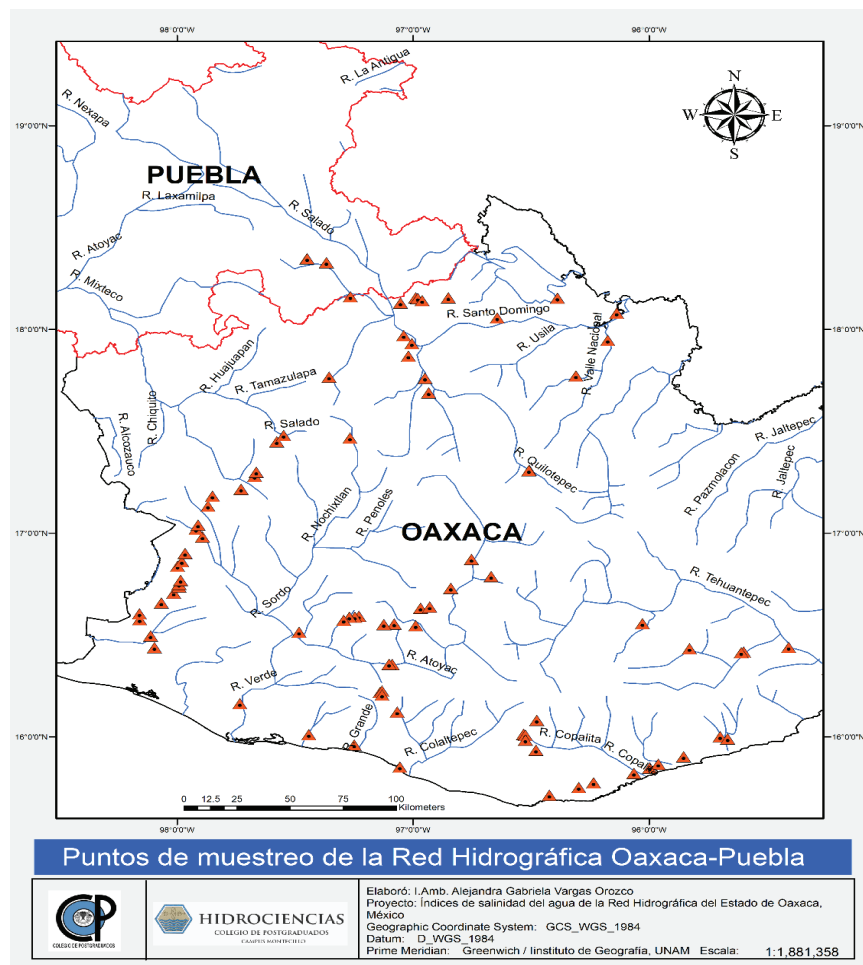


Figura 2. Puntos de muestreo de la red hidrográfica Oaxaca-Puebla. Fuente: elaboración propia. Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, 2018.

Tabla 1. Metodología de las determinaciones empleadas para el análisis de muestras de aguas obtenidas en la red hidrográfica Oaxaca-Puebla.

Determinación	Método	Referencia
pH	Potenciómetro marca Hanna	Baird <i>et al.</i> (2017)
C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Conductímetro	Baird <i>et al.</i> (2017)
Cationes		
Na^+ , K^+	Flamometría con flamómetro 648 IL $\lambda=589$ nm, utilizando solución estándar 140 meq/L para Na^+ y 5 meq/L para K^+	Baird <i>et al.</i> (2017)
Ca^{2+} + Mg^{2+}	Volumétrico, titulación con EDTA 0.01 N	Baird <i>et al.</i> (2017); American Society for Testing and Materials (ASTM), 2003
Ca^{2+}	Volumétrico, con EDTA 0.01N	Baird <i>et al.</i> (2017); ASTM, 2003
Aniones		
CO_3^{2-} , HCO_3^-	Volumétrico, titulación con H_2SO_4 , 0.01, 0.5 N	Baird <i>et al.</i> (2017); ASTM, 2002
Cl^-	Volumétrico, titulación con AgNO_3 , 0.4545, 0.01 N	Baird <i>et al.</i> (2017)
SO_4^{2-}	Turbidimetría, espectrofotómetro Perkin 35 $\lambda=420$ nm	Baird <i>et al.</i> (2017)

Para la clasificación hidroquímica se construyó el diagrama triangular de Piper utilizando el software QualiGraf 2014 de libre acceso. Para complementar la información que arrojó el diagrama triangular, se realizó el análisis de componentes principales (PCA), utilizando el software R-studio versión 1.2.5033, de licencia libre. Dicha técnica se ha utilizado en varios estudios para la clasificación efectiva de muestras de agua. El objetivo de estas herramientas fue complementarlas para mejorar la caracterización química de las aguas, en función a su variabilidad iónica.

RESULTADOS

En la Figura 2 se observa el diagrama triangular de Piper, de acuerdo con este, los resultados de las 90 muestras de agua se dividieron en dos grupos dominantes, debido a que estas características predominaron en la mayoría de las muestras. En el grupo nombrado Flujo, la mayoría de las muestras corresponden a aguas bicarbonatadas magnésicas-cálcicas, con una fuerte asociación al catión magnesio, con lo que respecta a los aniones, estas se asocian al carbonato y bicarbonato. El segundo grupo fue nombrado Recarga, el cual corresponde a aguas sulfatadas o cloradas cálcicas-magnésicas con una fuerte asociación al catión magnesio, en cuanto a los aniones, la asociación es fuerte con los sulfatos y cloruros.

El análisis de componentes principales (ACP) se realizó de manera paralela al diagrama de Piper, partiendo que las variables hidroquímicas presentaban correlación (Fig. 3). Con el ACP, se redujo la dimensión de las 8 variables en tres componentes principales incorrelacionados, el CP1, CP2 y CP3, que representaron el 87 % de la variación de los datos (Tabla 2).

Al comparar gráficamente el CP1 vs CP2, se observa la agrupación de las aguas sulfatadas cálcicas o magnésicas (Fig. 5, Tabla 3), mientras que en la comparación de CP1 vs CP3 se evidencia el grupo de las bicarbonatadas cálcicas o magnésicas (Fig. 6) de las estaciones de muestreo en ríos, lagunas, manantiales y presas.

Además con el ACP fue evidente la variabilidad iónica del agua registrada en el mar Zicatela, Oaxaca (sitio 25) y en la salinera de Zapotitlán de Salinas, Puebla (sitios 1, 2 y 3). Cuyo contenido de cloruro de sodio y bicarbonatos de sodio, calcio y magnesio, superaron a los observados en las demás estaciones de muestreo, de la red hidrográfica, formando el grupo reducido de aguas cloradas sódicas (Fig. 6).

DISCUSIÓN

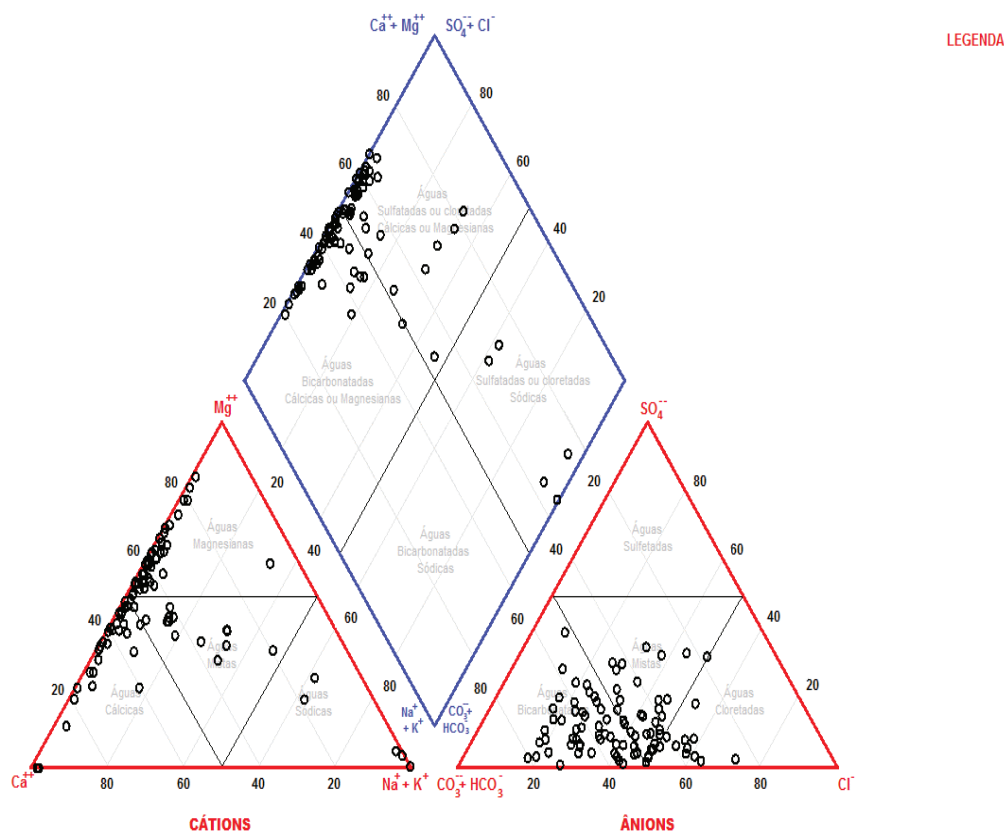
El diagrama triangular de Piper, permitió clasificar las aguas de la red hidrográfica Oaxaca-Puebla en dos grandes grupos: aguas sulfatadas o cloradas cálcicas o magnésicas y en bicarbonatadas cálcicas o magnésicas. El contenido de Calcio y Magnesio, contenido en más del 50 % de las muestras, se atribuye al origen geológico de la provincia Sierra Madre del Sur. Tal como lo observaron recientemente, Camacho *et al.* (2020), en donde aproximadamente el 72 % de las aguas estudiadas en la misma red hidrográfica, fueron bicarbonatadas magnésicas-cálcicas. Los cationes Ca y Mg, provienen de la intemperización de las calizas y dolomías del Cretácico, material geológico del cual están conformadas las montañas de la Sierra Madre del Sur (Velázquez & Ordaz, 1992).

Debido que el diagrama de Piper, no permitió identificar los sitios correspondientes a cada grupo, se complementó con el ACP. Con este análisis estadístico, fue posible observar los dos grandes grupos, mostrados en el diagrama triangular, y además fue posible observar a detalle el comportamiento de la variabilidad iónica por sitio y por cuenca.

En la estación de Zapotitlán de Salinas, Puebla, el agua colectada en el manantial más alto (sitio 1), presentó mayor concentración de clo-

Tabla 2. Eigen-valores de cada Componente Principal (CP).

CP	Eigen-valor(SD)	Proporción de la varianza	Proporción acumulada
1	2.25	0.51	0.51
2	1.55	0.24	0.76
3	1.07	0.11	0.87
4	0.89	0.08	0.95
5	0.63	0.04	0.99
6	0.23	0.01	1.00
7	0.14	0.00	1.00
8	0.03	0.00	1.00
9	0.02	0.00	1.00
10	0.01	0.00	1.00



ruro de sodio en comparación a los de la parte media y baja, los cuales además del cloruro de sodio acumularon bicarbonatos de calcio o magnesio. Estos resultados coinciden con lo observado por Mancilla *et al.* (2014), quienes atribuyeron esta característica salina a las evaporitas marinas sepultadas y a sedimentos salinos carbonatados originados durante las explosiones volcánicas que levantaron la zona de Zapotitlán durante el Terciario. Además, mencionan que las aguas salinas de Zapotitlán deben su origen al paso de aguas pluviales a través de las rocas calizas sedimentarias.

Por otra parte, el agua de Zicatela (sitio 25) presentó concentraciones altas de sulfatos, cloruro de sodio, calcio y magnesio (Fig. 5). Camacho *et al.* (2020) clasificaron el agua de Zicatela como sulfático sódica clorada, confirmando que el resultado obtenido con el ACP es correcto.

Se analizaron 10 sitios de muestreo que se encuentran dentro de la cuenca del río Copalita, y los resultados del ACP coincidieron con lo observado por Sánchez *et al.* (2014), quienes clasificaron las aguas de esta cuenca en bicarbonatadas cálcicas magnésicas. Dichos autores indican que estas aguas en su paso por las rocas metamórficas de la Sierra Madre del Sur, se cargan de iones en el orden $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ y $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ tal como se pudo observar en el ACP particular, para las aguas colectadas en la zona de influencia del río Copalita (sitios 74 a 84, Fig. 7).

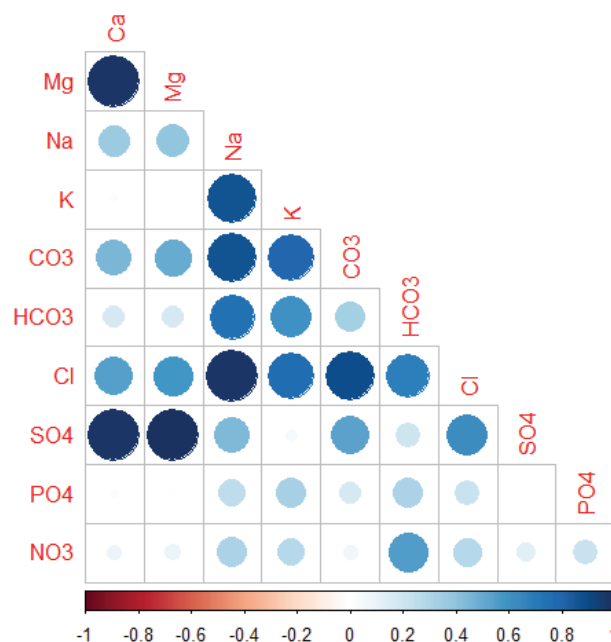


Figura 4. Correlograma de los iones analizados en aguas de la red hidrográfica Oaxaca-Puebla, 2017.

Tabla 3. Peso de cada variable en el ACP, cuyo eigen-valor >1.0.

	CP1	CP2	CP3
Ca ⁺²	0.298*	0.453***	-0.124
Mg ⁺²	0.309*	0.447***	-0.107
Na ⁺¹	0.407***	-0.208	0.143
K ⁺¹	0.302*	-0.413	0.269*
CO ₃ ⁻²	0.379**	-0.056	0.411***
HCO ₃ ⁻¹	0.292*	-0.292	-0.347
Cl ⁻¹	0.431***	-0.079	0.117
(SO ₄) ⁻²	0.326*	0.424***	-0.094
P-PO ₄	0.116	-0.257	-0.288
N-NO ₃	0.157	-0.203	-0.697

CP1, CP2, CP3: Componentes principales 1,2 y 3, respectivamente.

* Eigen-valores cercanos a 0.3

** Eigen-valores entre 0.35 y 0.39

*** Eigen-valores mayores a 0.4

Finalmente, al analizar los N-NO₃ y los P-PO₄ aunque no presentaron mayor concentración respecto al resto de los iones, se incluyeron en el análisis químico por su relación con la eutrofización, sobre todo en cuerpos de agua estancada. Las concentraciones están relacionadas con las actividades antropogénicas como la agricultura y la industria. Y mediante lixiviación o descarga, alcanzaron las corrientes superficiales de la red hidrográfica, incluso en el agua de mar en Zicatela (Pérez *et al.*, 2019).

El uso de los diagramas de Piper y ACP en este estudio permitió lograr las mismas agrupaciones generales, tal como lo han observado otros investigadores (Tahvanainen *et al.*, 2002; Betancourt *et al.*, 2012; Ahamed *et al.*, 2016; Shelton *et al.*, 2018), agregando que el ACP, permite análisis de mayor profundidad, como lo realizado por Faitouri *et al.* 2018, quienes de manera gráfica identificaron los tipos de aguas de acuerdo a los iones principales (aniones y cationes), mientras que el análisis de componentes principales les permitió identificar las fuentes de donde provenían estas sales. Por lo tanto, se puede concluir que al complementar las herramientas gráficas con estadísticas multivariadas, se mejora la interpretación de la variabilidad iónica en el agua.

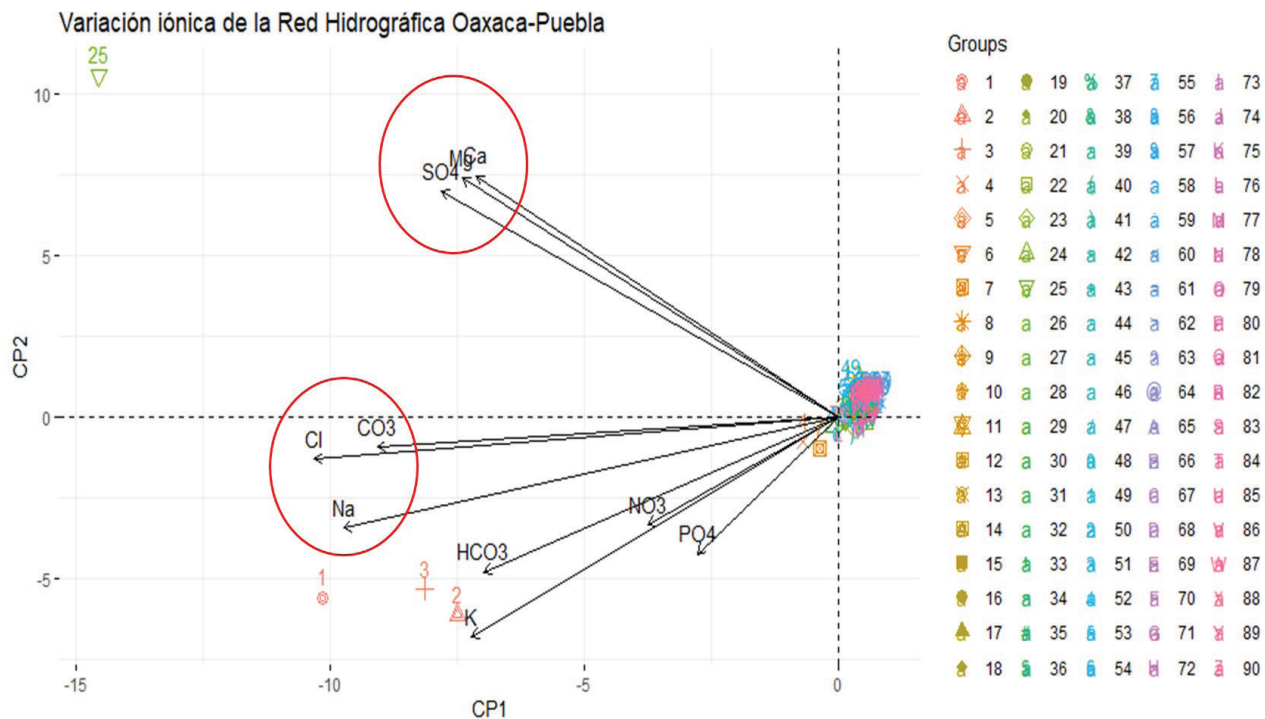


Figura 5. Diagrama biplot del ACP para la variación iónica de la red hidrográfica Oaxaca-Puebla. Fuente: elaboración propia. Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, 2017.

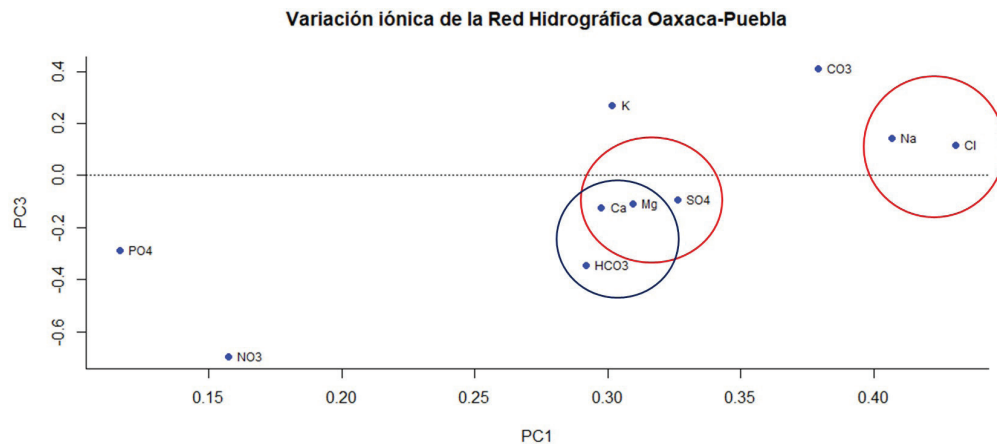


Figura 6. Peso de variables de CP1 vs CP3. Fuente: elaboración propia. Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, 2018.

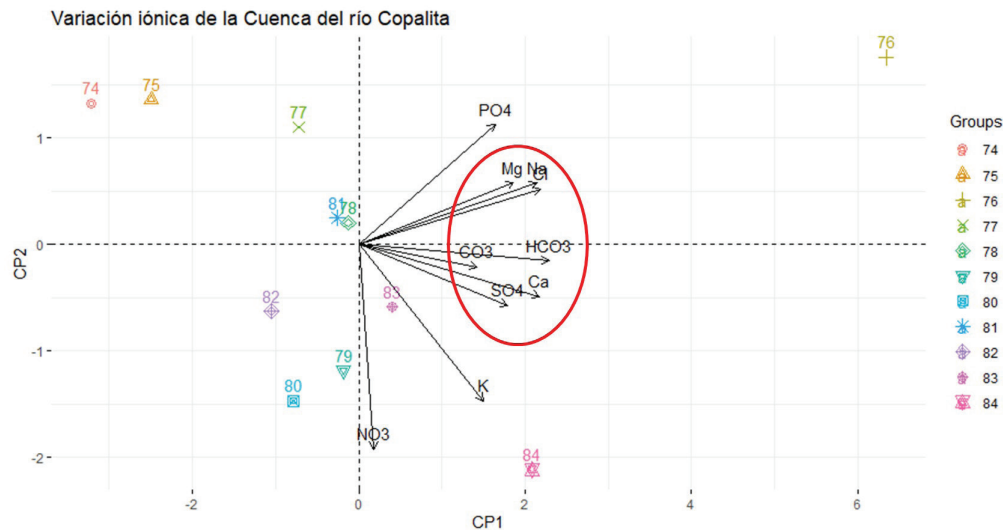


Figura 7. Diagrama biplot del ACP para la variación iónica en la cuenca río Copalita. Fuente: elaboración propia. Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, 2018.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), agradecemos al Colegio de Postgraduados por haberse mostrado en las mejores disposiciones ante cada requisito que se le solicitara, al laboratorio de Ciencias Ambientales del área de Hidrociencias por la ayuda que brindó durante todo el período de estudio y análisis.

REFERENCIAS

- AHAMED, A.J., K. LOGANATHAN, S. ANANTHAKRISHNAN, J.K.C. AHMED, M.A. ASHARF. 2016. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification and evaluation of groundwater in Alathur Block, Perambalur District, India. *Applied Ecology and Environmental Research* 15(3):105-116. DOI:10.15666/aeer/1503_105116
- ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS). 2002. *Standard Test Method for Alkalinity in Brackish Water, Seawater, and Brines/ Designation: D3875-03*. ASTM International, West Conshohocken, PA: United States. 4 p.
- ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS). 2003. *Standard Test Methods for Calcium and Magnesium in Water/ Designation: D511-03*. ASTM International, West Conshohocken, PA: United States. 9 p.
- ANDERSON, N.J., R. HARRIMAN, D.B. RYVES & S.T. PATRICK. 2001. Dominant factors controlling variability in the ionic composition of West Greenland lakes. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 33(4):418-425. DOI:10.1080/15230430.2001.12003450

- AVILÉS, A., M. NOVIČ, V. CLAVERO & F.X. NIELL. 2003. Variabilidad iónica en el complejo fluvial formado por los ríos Pivka, Unica y Ljubljanka (Eslovenia). *Limnetica* 22(1-2):155-164. DOI:10.23818/limn.22.10
- BAIRD, R.B., A.D. EATON & E.W. RICE. 2017. *Standard methods for examination of water and wastewater*. 23rd ed. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation. Washington, D.C. USA. 1545 p.
- BELKHRI, L., A. BOUDOUKHA & L. MOUNI. 2011. A multivariate statistical analysis of groundwater chemistry data. *International Journal of Environmental Research* 5(2):537-544.
- BETANCOURT, C., R. SUÁREZ, R.E. CONCEPCIÓN & H. HERRERA. 2012. Tendencia de los componentes mayoritarios del agua de cuatro embalses en el Centro-Sur Cubano, durante un período de veinte años. *Gestión Ambiental* 23:51-65.
- BIGLARI, H., A. CHAVOSHANI, N. JAVAN, A. M. HOSSEIN. 2015. Geochemical study of groundwater conditions with special emphasis on fluoride concentration, Iran. *Desalination and Water Treatment* 57(47):22392-22399. DOI:10.1080/19443994.2015.1133324
- CAMACHO, B.A., H.M.E. ORTEGA, E.I.B. SÁNCHEZ & Á.C. CAN. 2020. Indicadores de calidad físico química de las aguas residuales del estado de Oaxaca, México. *Terra Latinoamericana* 38(2):361-375. DOI:10.28940/terra.v38i2.610
- CHADHA, D.K. 1999. A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data. *Hydrogeology Journal* 7(5):431-439. DOI:10.1007/s100400050216
- CLESCERI, L.S., A.E. GREENBERG & A.D. EATON (eds.). 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th ed. American Health Association (APHA). Washington, D. C. Folio variado
- CNA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA). 2012. Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa V Pacífico Sur. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. 155 p.
- DONG, J.D., Y.Y. ZHANG, Y.S. WANG, M.L. WU, S. ZHANG & C.H. CAI. 2010. Chemometry use in the evaluation of the Sanya Bay water quality. *Brazilian Journal of Oceanography* 58(4):339-352. DOI:10.1590/S1679-87592010000400008
- FAITOURI, M.A., F. SALLOUM & M.A. MUFTAH. 2018. Determination of water type in Benghazi Plain aquifers by chemical and statistical methods. Available online at: https://www.researchgate.net/publication/333321627_Determination_of_water_type_in_Benghazi_Plain_aquifers_by_chemical_and_statistical_methods (downloaded December 15, 2020)
- GAJBHIYE, S., S.K. SHARMA & M.K. AWASTHI. 2015. Application of principal components analysis for interpretation and grouping of water quality parameters. *International Journal of Hybrid Information Technology* 8(4):89-96. DOI:10.14257/ijhit.2015.8.4.11
- GÜLER, C., G.D. THYNE, E.J. MCCRAY & A.K. TURNER. 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal* 10(4):455-474. DOI:10.1007/s10040-002-0196-6
- HERNÁNDEZ, S.J.R., M.A.P. ORTIZ & M.M.E. FIGUEROA. 2008. Análisis morfoestructural del estado de Oaxaca, México: un enfoque de clasificación tipológica del relieve. *Investigaciones Geográficas* 68:7-24.
- MANCILLA, O.R.V., A.L.O. BAUTISTA, H.M.E. ORTEGA, E.I.B. SÁNCHEZ, A.C. CAN, R.D.G. GUEVARA & Y.M.M. ORTEGA. 2014. Hidrogeoquímica de salinas Zapotitlán y los lagos-cráter Alchichica y Atexcac, Puebla. *IDESIA* 32(1):55-69. DOI:10.4067/S0718-34292014000100007
- PEÑA, D. 2002. *Análisis de datos multivariantes*. McGraw-Hill Interamericana de España, Madrid. 539 p.
- PÉREZ, D.J.P., H.M.E. ORTEGA, C.A. RAMÍREZ, H.F. MAGDALENO, E.I.B. SÁNCHEZ, A.C. CAN & O.R.V. MANCILLA. 2019. Concentración de nitrato, fosfato, boro y cloruro en el agua del río Lerma. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 6(16):175-182. DOI:10.19136/era.a6n16.1829
- SÁNCHEZ, B.E.I., O.G. SANDOVAL, M.A.E. CAMACHO, F.M. VALDEZ & A.L. RODRÍGUEZ. 2014. Calidad hidrogeoquímica de las aguas del río Copalita, Oaxaca, México. *Revista Internacional de Ciencia y Sociedad* 1(2):27-41.
- SEMAEDES (SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE, ENERGÍAS Y DESARROLLO SUSTENTABLE). 2018. Programa Estatal de Cambio Climático de Oaxaca 2016-2022. Gobierno Constitucional del Estado de Oaxaca. 370 p.
- SHELTON, J.L., A.M. ENGLE, A. BUCCIANI & M.S. BLONDES. 2018. The isometric log-ratio (irl)-ion plot: A proposed alternative to the Piper diagram. *Journal of Geochemical Exploration* 190:130-141. DOI:10.1016/j.gexplo.2018.03.003
- SUBBA, R.N., B. SUNITHA, N. ADIMALLA & M. CHAUDHARY. 2020. Quality criteria for groundwater use from a rural part of Wanaparthy District, Telangana State, India, through ionic spatial distribution (ISD), entropy water quality index (EWQI) and principal component analysis (PCA). *Environmental Geochemistry and Health* 40:1405-1435. DOI:10.1007/s10653-019-00393-5
- TAHVANAINEN, T., T. SALLANTAU, R. HEIKILÄ & T. TOLONEN. 2002. Spatial variation of mire surface water chemistry and vegetation in Northeastern Finland. *Annales Botanici Fennici* 39:235-251.
- VÁSQUEZ, M., G. RAMÍREZ & T. GARCÍA. 2016. Un índice de capacidad multivariante basado en la probabilidad de no conformidad, una aplicación al monitoreo de calidad de un ciclo de agua clarificada. *Revista Ingeniería UC* 23(3):319-326.
- VELÁZQUEZ, A.L. & A.A. ORDAZ. 1992. Provincias hidrogeológicas de México. *Tecnología y Ciencias del agua*. Disponible en línea en: <http://revistatyc.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/691> (consultado el 26 enero 2021).
- WU, Z.Z., Z.W. CHE, Y.S. WANG, J.D. DONG & M.L. WU. 2015. Identification of Surface water quality along the coast of Sanya, South China sea. *PLoS ONE* 10(4):e0123515. DOI:10.1371/journal.pone.0123515