

Variación espacial de la calidad del agua para uso agrícola del acuífero costero del Valle del Mayo, Sonora, México

Spatial variation of water quality for irrigation in the coastal Mayo Valley aquifer, Sonora, Mexico

Diego Armando Martínez Cruz¹, Jesús Chávez Morales¹, Angel Bustamante González², Óscar Luis Palacios Vélez¹,
Ma. De Lourdes de la Isla de Bauer¹ y Leonardo Tijerina Chávez¹

¹Postgrado de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México- Texcoco, km 36.5, Montecillo, Edo. de México, 56230, México

²Colegio de Postgraduados, Campus Puebla. Boulevard Forjadores de Puebla No. 205, Santiago Momoxpam, Municipio San Pedro Cholula, Puebla. 72760, México
e-mail: ciambiental1@gmail.com

Martínez Cruz D. A., J. Chávez Morales, A. Bustamante González, O. L. Palacios Vélez, M. L. de la Isla de Bauer y L. Tijerina Chávez. 2016. Variación espacial de la calidad del agua para uso agrícola, del acuífero costero del Valle del Mayo, Sonora, México. *Hidrobiológica* 26 (1): 109-119.

RESUMEN

En este estudio se determinaron los patrones hidroquímicos presentes en el acuífero del Valle del Mayo, en el área del Distrito de Riego Río Mayo y se identificaron los factores que influyen en su distribución espacial a fin de identificar los procesos que afectan la calidad del agua en el acuífero para uso agrícola. Se clasificó la información físico-química de 54 pozos georeferenciados, para el periodo 2005 al 2007, en el diagrama de Piper y se realizó un análisis de componentes principales (PCA). La aplicación del método hidroquímico y el (PCA), permitieron identificar los patrones hidroquímicos presentes en el acuífero y los factores que los originan. En las cercanías del Río Mayo las aguas corresponden al tipo bicarbonatadas magnésicas-cálcicas, indicando aguas con poco tiempo de residencia. En la parte norte del acuífero predominaron las muestras sulfatadas, resultado de la circulación del agua por depósitos sedimentarios evaporíticos. En el centro-sur el agua es del tipo clorurada sódica principalmente.

Palabras clave: Acuífero, agua subterránea, calidad del agua, caracterización hidroquímica, Valle del Mayo.

ABSTRACT

In this study the hydrochemical patterns of the Mayo River aquifer, in the Mayo River Irrigation District, and the factors determining the spatial distribution of the water quality for irrigation were determined. Physicochemical information, from 2005 to 2007, of 54 georeference wells was classified in the Piper diagram and principal component analysis (PCA). The use of the hydrochemical method and PCA allowed to identify the existing hydrochemical patterns and the factors that influence them. Close to Mayo riverbed waters were classified as magnesium-calcium bicarbonate, indicating short term resident time of water. North of the aquifer sulfate samples dominated, as a result of water circulation on sedimentary evaporite deposits. In the southcentral area most waters were saline-sodic.

Key words: Aquifer, groundwater, hydro-chemical characterization, Mayo Valley, water quality.

INTRODUCCIÓN

En el noroeste de México, en la cuenca hidrológica del Río Mayo, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2009), estableció que el acuífero principal y de mayor interés práctico es el del Valle del Mayo. En el área que ocupa este acuífero se ha desarrollado intensivamente la agricultura de riego, mediante la operación del Distrito de Riego Río Mayo (DR 038). En esta zona se practica la mayor explotación de agua subterránea y actualmente ya se alcanzó el relleno aluvial con las perforaciones más profundas (450 m) (PLANIMEX, 1970).

Las características geológicas del subsuelo y el comportamiento de la variación de la carga hidráulica en el tiempo, en pozos de bombeo, al igual que observaciones realizadas durante diversas pruebas de bombeo, indican que el medio hidrogeológico del área de estudio corresponde a un sistema granular y fracturado, de comportamiento hidráulicamente libre, y con características heterogéneas y anisótropas (PLANIMEX, 1970). En esta región, el agua subterránea se mueve en general desde el norte y noroeste hacia el suroeste. La profundidad a la que se encuentra el nivel freático del acuífero varía de 5 a 30 m, mientras que su espesor saturado es del orden de los 100 a 140 m de agua no-salina (CONAGUA, 2009).

El acuífero del Valle del Mayo está ubicado en la región árida del estado de Sonora. Debido a los limitados escurrimientos superficiales, es la principal fuente de agua para uso urbano e industrial y es fundamental para la producción agrícola del DR 038. La calidad del agua en el acuífero ha disminuido por problemas de salinidad debido a la sobreexplotación y a la intrusión de agua marina, así como por la contaminación con metales pesados y agroquímicos derivado de actividades antropogénicas (CONAGUA, 2003). La calidad del agua en una región agrícola es un factor importante que repercute en la sustentabilidad de esa actividad, debido a que una baja calidad en este recurso, reduce los rendimientos y causa toxicidad en los cultivos.

Estudios sobre la calidad del agua subterránea establecen que en el acuífero Valle del Mayo predomina el agua de calidad tolerable, y puede hallarse agua del tipo dulce como salada. Los mayores contenidos de sólidos disueltos totales (STD) se ubican en el centro del valle y exceden los 3,000 mg/L (INEGI, 1993). Canales-Elorduy & Robles-Contreras (1997) encontraron 4,000 mg/L en pozos exploratorios profundos y 90,000 mg/L en pozos de la línea costera, cerca de Yávaros.

La calidad del agua está regida por sus características físicas, químicas y biológicas, las cuales sirven para evaluar su aceptabilidad de acuerdo al uso que se le da. Por lo tanto, la calidad del agua está en función del uso destinado y de los parámetros que se empleen para medir tales características (Chapman, 1996). En la evaluación de calidad del agua para uso agrícola se utilizan generalmente los criterios propuestos por la FAO (Ayers & Westcott 1985).

La hidroquímica de un acuífero está determinada por procesos naturales como la precipitación, la depositación atmosférica de sales, la evapotranspiración, las interacciones agua-roca/suelo y las actividades antropogénicas. Tanto los procesos naturales como los antropogénicos

varían en tiempo y en espacio, lo cual resulta en variaciones hidroquímicas espaciales y temporales en una región (Machiwal & Jha, 2015). El acuífero del Río Mayo es afectado por factores naturales y antropogénicos, principalmente por la agricultura de irrigación y dado que es un acuífero costero, tiene también un alto riesgo de intrusión salina (CONAGUA, 2003). Además es un acuífero aluvial con zonas permeables y con niveles estáticos someros, que lo hacen vulnerable a la contaminación (Martínez- Cruz, 2015).

Esta investigación tuvo como objetivo determinar los patrones hidroquímicos presentes en el acuífero del Valle del Mayo, así como los factores que influyen en su distribución espacial, con el propósito de identificar los procesos que afectan la calidad del agua en el acuífero para su uso agrícola utilizando el diagrama de Piper y la técnica estadística de análisis de componentes principales (PCA). La información obtenida contribuirá y dará soporte a la toma de decisiones para la protección y manejo adecuado del agua del acuífero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Marco físico del área de estudio. El área de estudio fue el Distrito de Riego 038, Río Mayo, Sonora, localizado en la porción sureste del acuífero del Valle del Mayo. Dicho acuífero forma parte de la región administrativa número dos del Organismo de Cuenca del Noroeste (OCNO) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Se ubica entre los paralelos 26°45' y 27°15' LN, y los meridianos 109°30' y 110°00' LO, y abarca los municipios de Navojoa, Etchojoa y Huatabampo (Fig. 1). Sus límites son, al norte con el Distrito de Riego 041 Río Yaqui, al este con la Sierra Madre Occidental, al sur con el Estado de Sinaloa y al oeste con el Golfo de California (INEGI, 1993; Canales-Elorduy & Robles-Contreras, 1997).



Figura 1. Localización del área de estudio (Valle del río Mayo, en el Distrito de Riego 038, Sonora, México) .

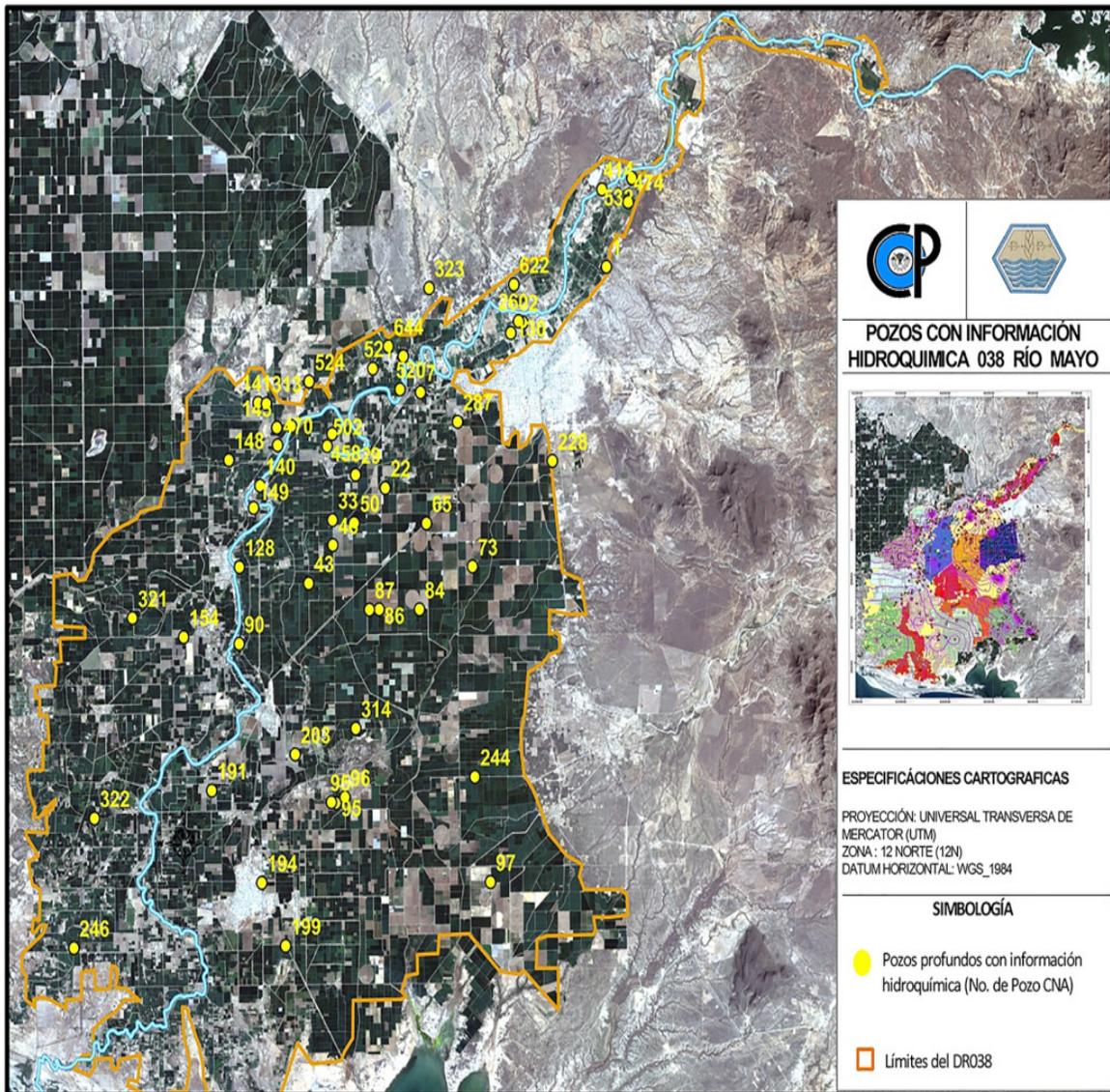


Figura 2. Pozos con información hidroquímica en la zona del Valle del Mayo, Sonora, México.

El clima predominante, por su grado de humedad, varía de muy seco a semiseco; y por su temperatura, de muy cálido a semicálido en la mayor parte del área. La temperatura media anual oscila entre 20 y 22°C, registrándose la más elevada en el oeste y en las cañadas del Río Mayo y la más baja en el este, donde el relieve es montañoso. La evaporación potencial es del orden de 2,400 mm. La precipitación media anual fluctúa de 200 a 400 mm en la parte baja de la cuenca y de 750 mm en la parte alta, localizada en la Sierra Madre Occidental (CONAGUA, 2009). Los aridosoles son los suelos predominantes en la región, aunque en el área del Distrito del Río Mayo, predominan los entisoles (fluevents). En la parte alta del Distrito se encuentran algunos inceptisoles. En general los suelos son profundos, con texturas que van de arcilla a franco arcillosa, aunque se encuentran texturas arenosas en los suelos ubicados a lo largo del cauce del río Mayo (CONAGUA, 2005).

En el área del Distrito 038 la mayor superficie se destina al uso agrícola, por lo que la vegetación nativa se ha reducido considerablemente. Los principales cultivos del ciclo otoño-invierno en el Distrito son trigo, maíz y cártamo y para el ciclo primavera-verano son algodón, maíz y cártamo. La vegetación nativa se compone de matorrales arborescentes, árboles bajos, arbustos medios y algunas cactáceas (CONAGUA, 2005).

Muestreo. Se obtuvo información hidroquímica de 54 pozos profundos a partir de información disponible en la Comisión Nacional del Agua y también del análisis de muestras tomadas en campo durante los años 2005 al 2007. La ubicación y distribución de los pozos utilizados con información hidrológica y de calidad del agua, se observan en la Figura 2. Para la recolección de las muestras, primero se bombeó el pozo durante unos minutos, para así obtener agua representativa

del acuífero. La muestra se almacenó en un recipiente de polietileno de 500 ml y se llevó al laboratorio siguiendo los procedimientos de muestreo establecidos (APHA, 1998 y Brown *et al.*, 1983).

Procedimientos analíticos. Los análisis fisicoquímicos fueron llevados a cabo en el laboratorio de la Dirección Técnica del Organismo de Cuenca Noroeste de la CONAGUA y en el laboratorio de Ciencias Ambientales del Posgrado en Hidrociencias del Colegio de Postgraduados. Se realizaron los procedimientos analíticos presentados en la Tabla 1. La determinación de la conductividad eléctrica y del pH se realizó en campo, con un equipo Hanna HI98130, el cual fue calibrado previamente. Después de determinar los iones principales, se realizó un balance

de cationes y aniones en términos de equivalentes químicos (Eq), para corroborar el grado de precisión de los análisis químicos (APHA, 1998), mediante la siguiente ecuación:

$$e = (\Sigma \text{ cationes} - \Sigma \text{ aniones}) / \Sigma \text{ cationes} + \Sigma \text{ aniones}) * 100.$$

Donde e= Porcentaje de error de balance iónico;

Σ cationes= Suma de cationes en (Eq), y

Σ aniones= Suma de aniones en (Eq).

Cincuenta muestras de las cincuenta y cuatro incluidas en el estudio, cumplieron con un error de balance iónico aceptable ($\leq 5\%$).

Tabla 1. Procedimientos analíticos y equipos utilizados en la determinación de parámetros de calidad de agua de pozos del acuífero del Valle del río Mayo, Sonora, México (2005-2007)

Variable	Procedimiento	Equipo(s) de análisis
pH	Método As-02, Electrométrico	Potenciómetro
CE (dS/m)	Método As-18, Electrométrico	Conductímetro
Cationes (meq L ⁻¹) [Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺]	Método AS-19	Espectrofotómetro de absorción. Atómica (ICP) y espectrofotómetro de flama
Aniones (meq L ⁻¹) [Cl ⁻ , CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ y SO ₄ ²⁻]	Método As-20, Titulación volumétrica y turbidimetría	Equipo básico de laboratorio y Automated ion analyzer (FIA)
N-NO ₃ ⁻	Método AS-08, Kjeldahl	Automated ion analyzer (FIA)

dS= Decisiemens.

Clasificación hidroquímica mediante el diagrama de Piper. Los diagramas de Piper (Piper, 1944) muestran la concentración relativa de los iones fundamentales en equivalentes químicos, cationes (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺) y aniones (Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻). Previo a la proyección de las muestras en el diagrama de Piper, éstas se agruparon en tres zonas considerando los cambios en el nivel estático (Luque, 2013) y la variación en la geología (CONAGUA, 2009), factores que influyen en la hidroquímica del acuífero. Se observó que sobre el cauce del río y la posición del centro hacia la costa, se presentan los mayores niveles estáticos. Con respecto a la geología, se reconoció una estratigrafía diferente en el noreste del acuífero con respecto al sureste del mismo. El Grupo 1, denominado cercanías del Río Mayo, agrupó a las muestras provenientes de los pozos situados a una distancia de influencia de 400m hacia ambos lados del cauce del río; los pozos situados a partir de la cota 14 m hacia el noreste, se clasificaron como parte norte (Grupo 2), y los pozos de la cota 14 m hacia el sureste se clasificaron como zona centro sur (Grupo 3). El número de pozos que correspondió a los grupos 1, 2 y 3 fueron 12, 12 y 30, respectivamente. La Figura 3 muestra la distribución espacial de tales grupos.

Correlación estadística y análisis multivariado de parámetros. Se empleó la técnica de análisis de componentes principales (PCA) para el agrupamiento estadístico hidroquímico de las muestras. Dicha técnica ha sido utilizada en varios estudios para la clasificación efectiva de muestras de agua (Raiber *et al.*, 2012; Woocay & Walton, 2008). A partir

de las variables o parámetros de calidad de agua existentes, se forman nuevas variables o componentes principales (PC), siendo los más importantes los que explican la mayor parte de la varianza en el conjunto de datos; mientras que el número de PC formados, indica el número total de posibles fuentes de variación en la calidad del acuífero (Charfi *et al.*, 2013). En la selección de los componentes principales se empleó el valor eigen el cual debe ser mayor a uno, una vez rotada la matriz por el método varimax (Kim & Mueller, 1987). En la selección de las variables de cada componente se siguieron los criterios establecidos en Liu *et al.* (2003); de esta manera sólo se asociaron aquellas variables que estuvieran correlacionadas al componente de muy fuerte y moderadamente, considerando la clasificación de coeficientes de correlación de acuerdo a los siguientes valores: muy fuerte (>0.75), moderado (0.75-0.50) y débil (0.50-0.30).

Antes de iniciar el análisis multivariado, se determinó si la distribución de los parámetros se ajustaban a la log-normal por medio de la prueba estadística de Kolmogorov-Smirnov, debido a que las pruebas requieren una distribución log normal (Shrestha & Kazama, 2007). Este test indicó que los parámetros hidroquímicos de las muestras tuvieron una distribución log-normal (p -value <0.05).

Uno de los primeros pasos al efectuar el PCA fue realizar una matriz de correlaciones, ya que esta técnica requiere que las variables tengan fuertes correlaciones entre sí (Lawrence & Upchurch, 1982). Se utilizó la correlación de rangos de Spearman para caracterizar y cuantificar

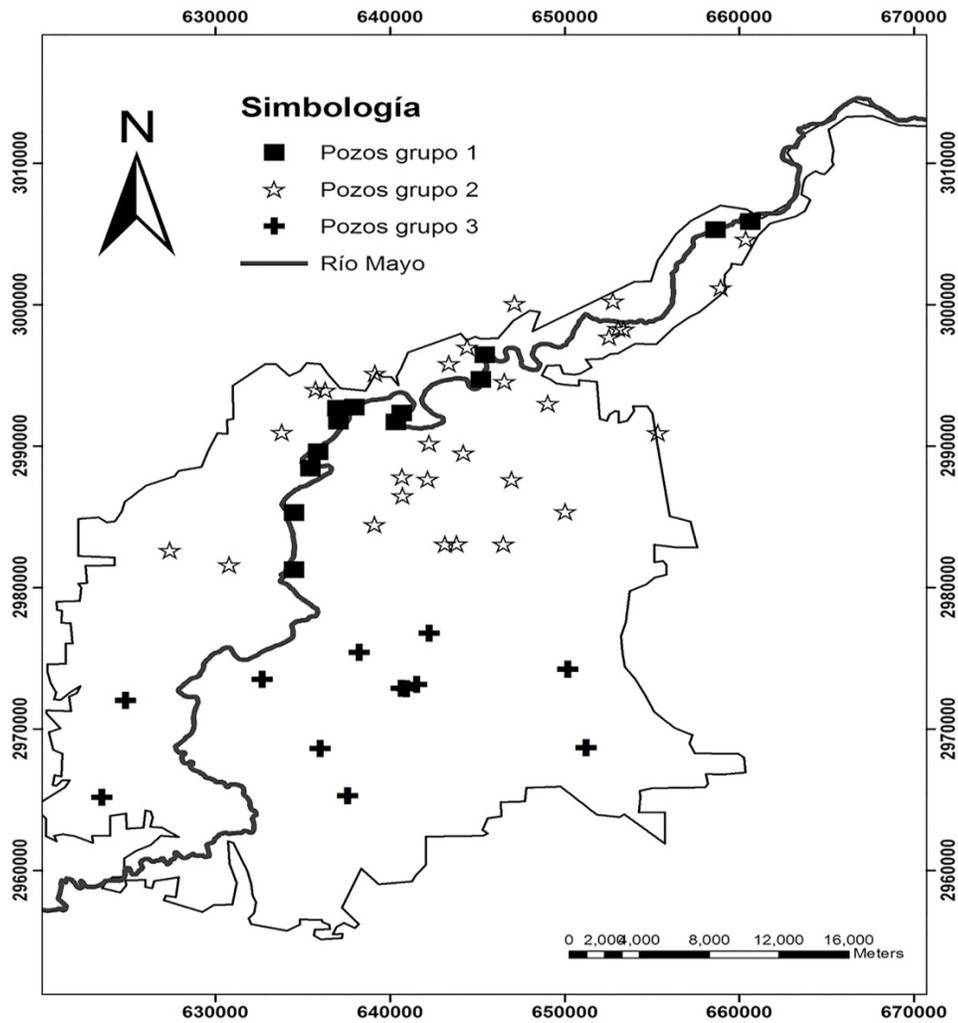


Figura 3. Distribución espacial de la clasificación por grupos de los pozos del acuífero del Valle del Mayo.

la relación entre los parámetros fisicoquímicos determinados en las muestras del acuífero. Las rutinas para determinar los estadísticos descriptivos, la distribución de las variables, la matrices de correlación, el análisis multivariado y los gráficos de PCA se corrieron en el programa estadístico R package versión 2.15.2.

Índices de salinidad. De acuerdo con Palacios-Vélez y Aceves-Navarro (1970) en la evaluación de la salinidad para su uso agrícola, los criterios de salinidad determinan el riesgo de que el uso de agua ocasione altas concentraciones de sales, con el correspondiente efecto osmótico y disminución del rendimiento de los cultivos. Por otra parte, también establecen que los criterios de sodicidad indican el riesgo de que se induzca un elevado porcentaje de sodio intercambiable (PSI), con deterioro de la estructura del suelo y una reducción severa en la tasa de infiltración del agua en el suelo. Por ello se evaluaron los niveles de salinidad mediante los sólidos disueltos totales (SDT), la relación de adsorción de sodio (RAS) y se consideraron los criterios para la interpretación de la calidad del agua para su uso agrícola de la FAO presentados por Ayers y Westcot (1985).

Variación espacial de la calidad del agua. La georeferenciación de los pozos permitió la localización espacial en el acuífero de los tipos hidroquímicos determinados en el acuífero. También permitió generar capas de isoconcentraciones para la representación de la distribución espacial de las variables. Se utilizaron métodos de interpolación determinísticos (IDW) y geoestadísticos (Krigin), mediante el software Arcmap 9.3.

RESULTADOS

La Tabla 2 presenta los estadísticos descriptivos determinados en las muestras de agua de los pozos del acuífero. Los sólidos disueltos totales y la conductividad eléctrica variaron en un rango de 164 mg/L a 5339 mg/L y 0.23 dS/m a 6.85 dS/m respectivamente. El orden de abundancia de los cationes en el acuífero fue el siguiente $Ca^{2+} > Na^{+} > Mg^{2+}$ y para aniones $SO_4^{2-} > HCO_3^{-} > Cl^{-} > CO_3^{2-} > NO_3^{-}$. Las grandes variaciones en estos parámetros son el resultado de la incorporación de sales por la irrigación y la intrusión de agua salina que afecta a ciertas áreas del acuífero.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de parámetros fisicoquímicos de muestras de agua del acuífero del Valle del Mayo, Sonora, México.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Media	D.E
pH	5.90	8.84	7.10	0.83
SDT (mg/L)	164	5339	1122.46	1142
C.E (dS/m)	0.23	6.85	2.02	2.88
Ca ²⁺ (meq/L)	0.52	29.05	6.69	5.50
Mg ²⁺ (meq/L)	0.10	18.90	4.84	4.54
Na ⁺ (meq/L)	0.75	23.51	7.20	6.78
CO ₃ ²⁻ (meq/L)	0.00**	6.25	0.65	0.90
HCO ₃ ⁻ (meq/L)	0.27	14.59	2.90	2.30
*Cl ⁻ (meq/L)	0.52	52.45	11.87	9.24
*SO ₄ ²⁻ (meq/L)	0.09	20.82	4.04	7.47
*NO ₃ ⁻ (meq/L)	0.26	23.11	3.54	8.17

*dS= Decisiemens. ** = Debajo de límite de detección.

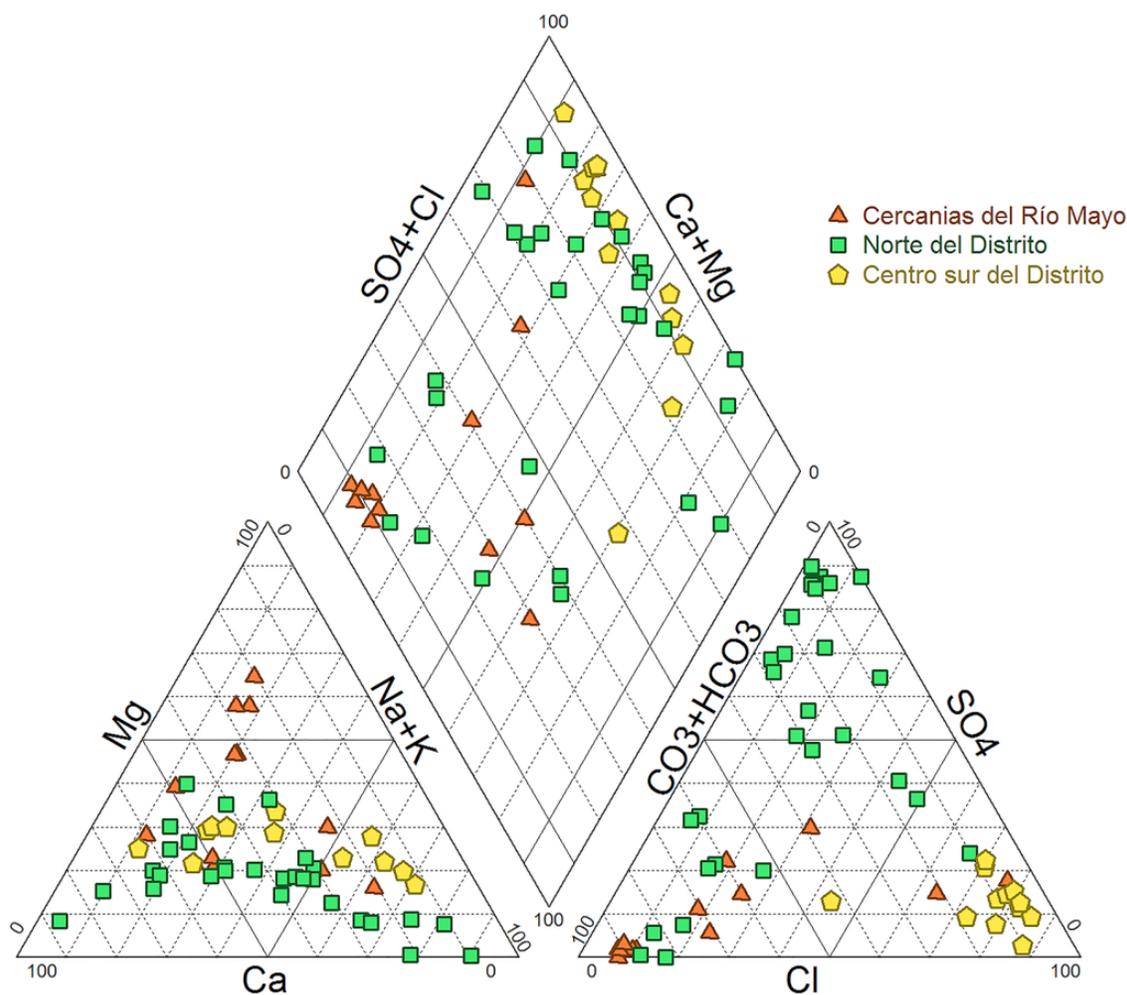


Figura 4. Clasificación hidroquímica en diagrama de Piper de los pozos del acuífero del Valle del Mayo, analizados por grupos.

Clasificación hidroquímica. De acuerdo al diagrama de Piper (Fig. 4), en los tres grupos se observó una composición iónica dominante. Las muestras cercanas al Río Mayo (Grupo 1) correspondieron en su gran mayoría a aguas bicarbonatadas magnésicas-cálcicas. En la parte norte del distrito (Grupo 2), 19 de 30 muestras se clasificaron como sulfatadas; de las cuales 7 muestras estaban asociadas al catión calcio, 4 al catión sodio y 7 a cationes mixtos. También se encontraron 9 muestras bicarbonatadas cálcicas-magnésica y dos con aniones y cationes del tipo mixto. En la parte centro-sur (Grupo 3), cinco de 12 muestras, fueron cloruradas-sódicas; las otras fueron asociaciones del anión clorurado con cationes cálcicos, magnésicos y mixtos. Aunque

hubo predominio de ciertos cationes en cada grupo encontramos otras asociaciones dentro de ellos, lo que refleja que los criterios en la formación de grupos no son exactos y que las características del acuífero, que determinan la hidroquímica del mismo, cambian aun dentro de los grupos establecidos.

Tratamiento estadístico multivariante de muestras del acuífero.

El análisis exploratorio indicó que varios parámetros están altamente correlacionados linealmente con coeficientes de Pearson de hasta 0.94 y estas relaciones son altamente significativas ($p < 0.01$) (Tabla 3). La corrección estadística entre especies iónicas de origen mineral Ca^{2+} y Mg^{2+} , indica la influencia de los procesos de interacción agua-roca.

Tabla 3. Coeficientes de correlación entre 10 parámetros determinados en el agua del acuífero Valle del Mayo, Sonora, México.

Parámetro	pH	**SDT	*Ca ²⁺	*Mg ²⁺	*Na ⁺	*CO ₃ ²⁻	*HCO ₃ ⁻	*Cl ⁻	*SO ₄ ²⁻	*NO ₃ ⁻
pH	1									
SDT	0.105	1								
Ca ²⁺	-0.132*	0.765**	1							
Mg ²⁺	0.030	0.943**	0.782**	1						
Na ⁺	0.240**	0.891**	0.477**	0.728**	1					
CO ₃ ²⁻	0.153**	0.511**	0.264**	0.528**	0.45**	1				
HCO ₃ ⁻	0.275**	0.606**	0.322**	0.651**	0.582**	0.911**	1			
Cl ⁻	0.082	0.721**	0.717**	0.631**	0.728**	0.292**	0.294	1		
SO ₄ ²⁻	0.015	0.69**	0.403**	0.726**	0.515**	0.315**	0.276**	0.081	1	
NO ₃ ⁻	-0.292**	0.123*	0.249**	0.164**	-0.034	-0.045	-0.078	-0.026	0.76**	1

*Correlación significativa a 0.05, **Correlación significativa a 0.01

Los coeficientes de correlación entre los componentes principales (PC) y las variables, el porcentaje de varianza explicada por cada componente y la comunalidad para cada parámetro, son presentados en la Tabla 4. Cinco componentes explicaron el 85.5% de la variabilidad de los datos, aunque sólo los tres primeros componentes tuvieron variables fuerte y moderadamente correlacionadas. Con base en los coeficientes de las variables incluidas en el PCA, se calcularon los coeficientes para los 54 pozos y se agruparon en los tres primeros componentes; con lo cual se obtuvo un clúster de cada conjunto de pozos relacionado con un PC (Fig. 5). También en esta figura puede verse la relación entre las variables incluidas en el (PCA) y los tres primeros componentes.

El PC1 explicó el 36% de la variabilidad de los datos y se encontró una fuerte asociación entre las variables SDT, Cl⁻, Na⁺ con coeficientes de correlación entre el componente y los parámetros de 0.774 a 0.891. En este componente se agruparon la mayoría de las muestras del Grupo 3, provenientes de pozos ubicados en el centro sur del Distrito. El componente principal 2 (PC2) contó con el 24.2 % de la varianza explicada y tuvo una fuerte asociación entre los iones NO₃⁻ y Ca²⁺+Mg²⁺. En el clúster del PC2 se agrupó gran parte de las muestras del Grupo 1. Estas muestras son las más cercanas al río Mayo, donde se presentaron los niveles más altos de NO₃⁻ (Fig. 7).

En el PC3, con el 10.8 % de la varianza explicada, se encontró una fuerte correlación entre el SO₄²⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻ y pH. Gran parte de las muestras del Grupo 2 que en su mayoría son sulfatas y con una proporción importante de muestras bicarbonatadas, se agrupó en este componente. La relación entre el pH y los carbonatos puede ser atribuida a la alcalinidad debido a la disolución de estos materiales (Sappa *et al.*, 2015). Los componentes principales PC4 y PC5 representan procesos mixtos o zonas de transición, pues no hubo parámetros fuertemente correlacionados a estos componentes.

Salinidad del agua. Los SDT es un parámetro que engloba en cierta medida la calidad del agua. Se encontró que el 45% de los pozos muestreados tienen una calidad aceptable para consumo humano, considerando la NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 1995). En el caso de la calidad para uso agrícola el 33 % de los pozos son aceptables, de acuerdo con los criterios para riego agrícola de la FAO presentados por Ayers & Westcot (1985). Interpolando los valores de SDT en el área del acuífero, para observar su comportamiento espacial, se encontró que a partir de la cota 13 m hacia el norte, la calidad mejoró, y que partir de este nivel hacia la costa las concentraciones sobrepasan los 1,500 mg/L, llegando incluso a concentraciones de 5,000 mg/L en las partes cercanas a la costa (Fig. 8).

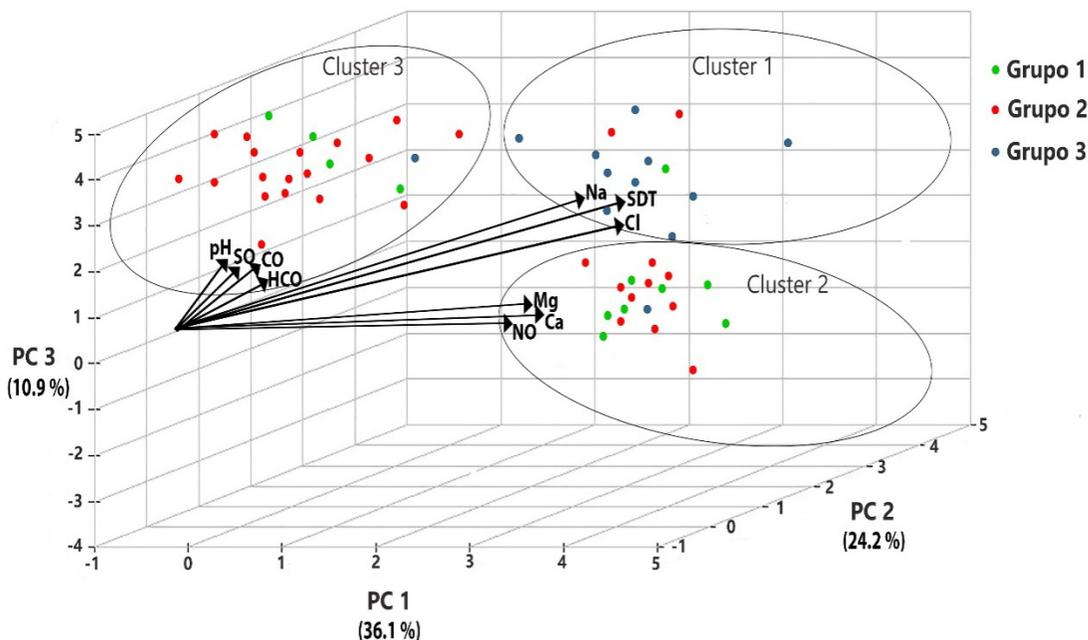


Figura 5. Relación entre los coeficientes de las variables y muestras del análisis PCA para los tres primeros componentes.

Tabla 4. Coeficientes de correlación del análisis de componentes principales para los parámetros determinado en el agua del acuífero Valle del Mayo, Sonora, México.

Parámetro	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	Comunalidades
pH	-0.029	0.014	0.845	0.054	0.119	0.959
SDT	0.891	0.498	0.382	0.353	-0.026	0.927
Ca ²⁺	3.810	0.683	-1.191	-0.079	-0.052	0.919
Mg ²⁺	1.751	0.971	0.025	0.011	0.046	0.612
Na ⁺	0.774	0.392	0.371	0.192	-0.003	0.859
CO ₃ ²⁻	0.482	0.090	0.782	-0.185	-0.079	0.815
HCO ₃ ⁻	0.409	0.184	0.594	-0.039	-0.036	0.799
Cl ⁻	0.854	-0.085	-0.028	0.286	-0.189	0.645
SO ₄ ²⁻	-0.064	0.411	0.659	0.027	0.137	0.974
NO ₃ ⁻	1.154	0.802	-0.474	-0.069	0.170	0.730
Valores eigen	4.962	3.847	1.539	1.825	1.096	
% de varianza explicada	36.071	24.196	10.894	7.827	6.46	
% de varianza acumulada	36.071	60.267	71.161	78.988	85.448	

Un coeficiente en negro y subrayado indica que el parámetro está muy fuertemente (>0.75) o moderadamente correlacionado (0.75-0.50) al componente.

En el Grupo 1, 10 de 12 muestras tuvieron un RAS menor a 3 y un rango de conductividad de 400 a 2,000 mg/L de SDT, que se corresponde con un grado de restricción ligero a moderado con respecto a la infiltración y salinidad. Las muestras en el norte del Distrito, al igual que el grupo anterior, tuvieron un grado de restricción ligero a moderado

con respecto a la infiltración, pero ningún riesgo en caso de la salinidad. Por el contrario, el caso de las muestras de agua del Grupo 2, 9 de 12 fueron clasificadas con fuerte restricción en su uso agrícola por problemas de infiltración y salinidad.

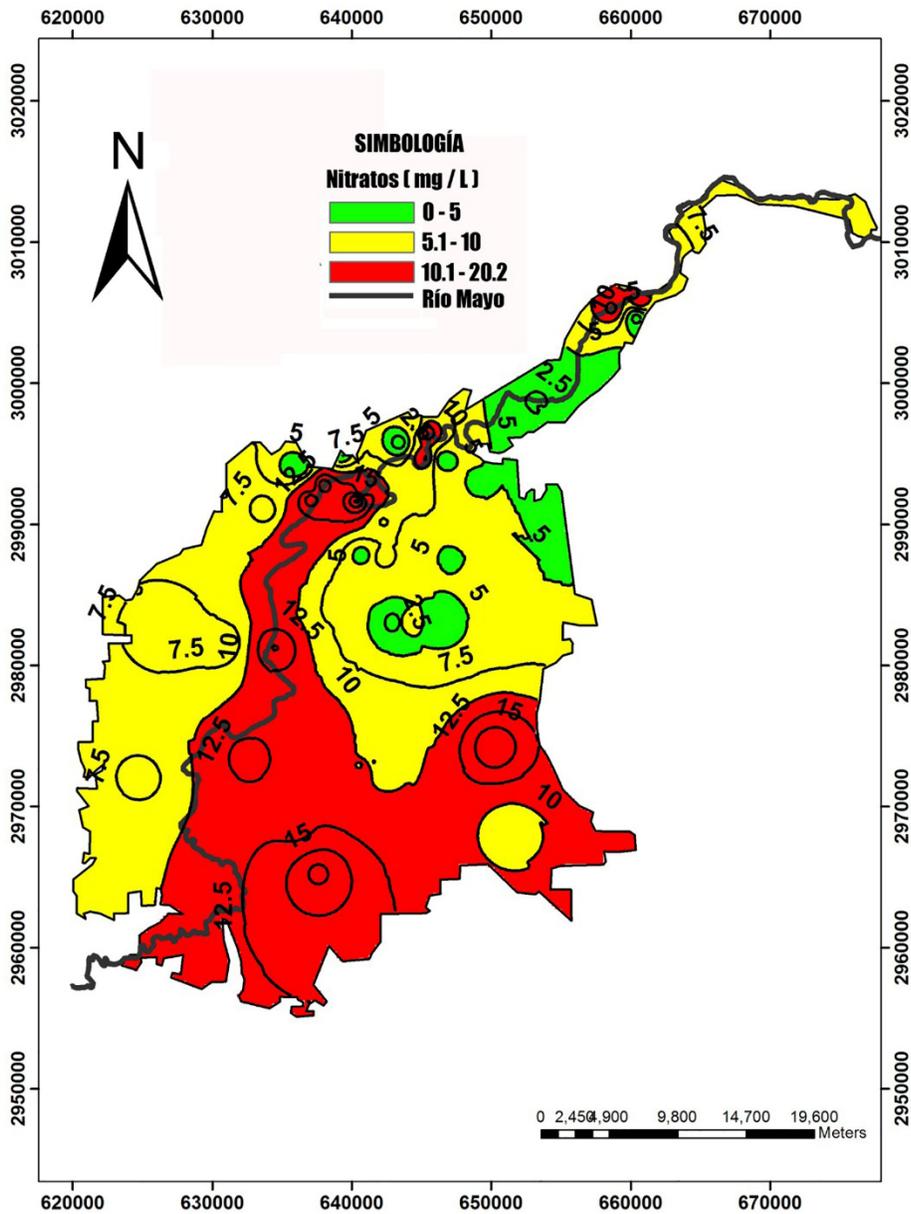


Figura 6. Isolinneas de concentración de nitrato en el acuífero Valle del Mayo.

DISCUSIÓN

La agrupación de muestras por medio de diagramas de Piper y el uso del PCA, permitió identificar las variaciones espaciales en la hidroquímica del acuífero del Valle del Mayo, las cuales obedecen en gran parte a la geología, la recarga natural en el acuífero, la actividad agrícola en la superficie y la intrusión de agua salina en el subsuelo. En la zona cercana al Río Mayo (Grupo 1), con los niveles estáticos más someros (Luque, 2013), se encontró en su mayoría aguas del tipo bicarbonatadas cálcicas - magnésicas y bicarbonatadas- sódicas, que indican un menor grado de mineralización, porque la infiltración marina es reciente (Suma *et al.*, 2015). En esta zona (Grupo 1) el poco tiempo de

residencia del agua y la presencia de niveles estáticos someros indican mayor vulnerabilidad a la contaminación. Esto facilita la incorporación de nitratos producto de la actividad agrícola en esta parte del acuífero. El PCA confirmó que la mayor parte de los pozos del Grupo 1 se caracterizan por tener niveles altos de nitratos. También se puede apreciar en el mapa de isoconcentraciones de NO_3^- , que las zonas del grupo 1 presentan mayores contenidos de NO_3^- .

La presencia de varias muestras sulfatadas en la parte norte del Distrito (Grupo 2), se debe a la circulación de esta agua por depósitos sedimentarios evaporíticos, los cuales ocurren en esta parte del acuífero (CONAGUA 2009). Aunque otra posible fuente podría ser la aplicación

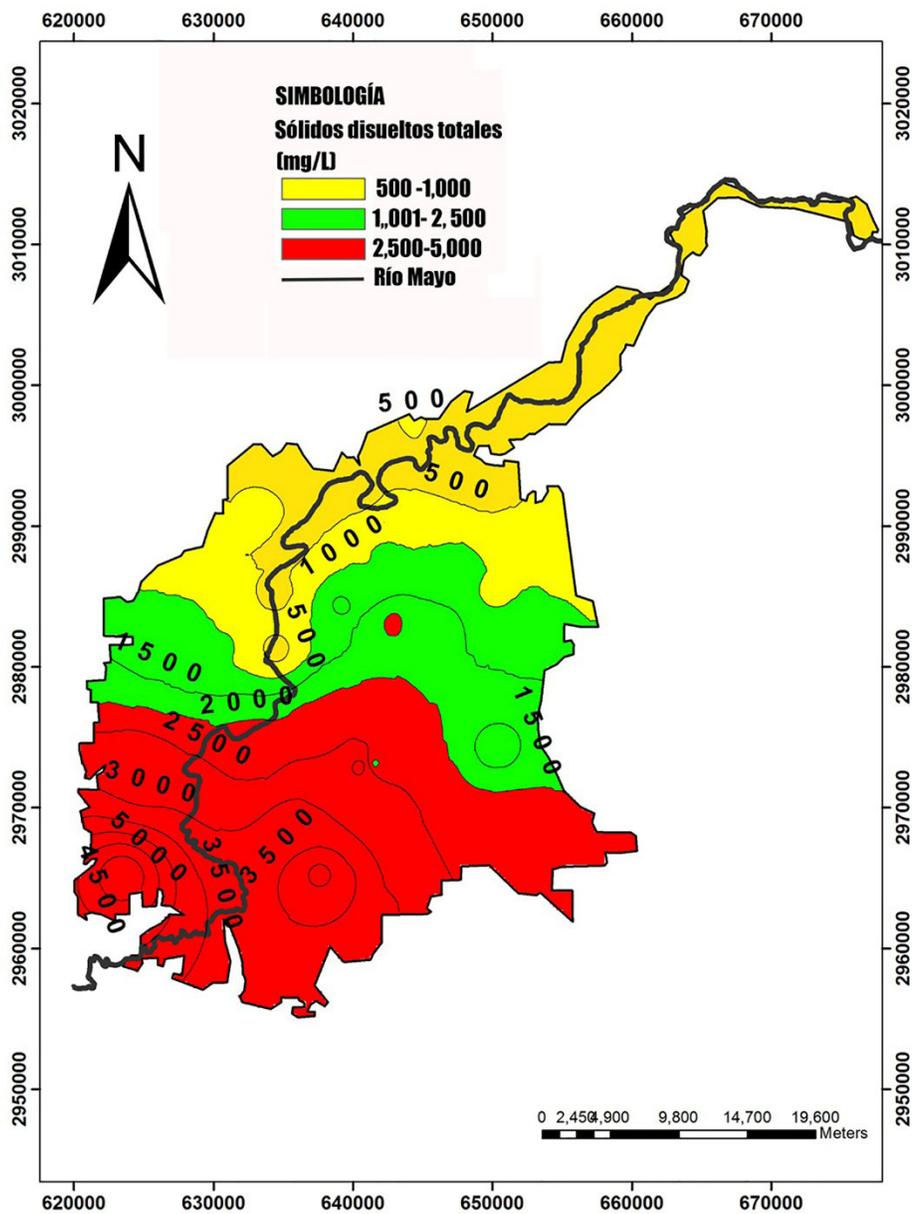


Figura 7. Isolinias de concentración de sólidos disueltos totales (SDT) en el acuífero Valle del Mayo.

de fertilizantes sulfatados en la región, esto último parece ser menos probable, porque se usan bajas dosis de fertilizantes sulfatados en el DR 038 (CONAGUA, 2005) y de acuerdo con Mudarra y Andreo (2011), el sulfato tiene fuerte absorción en la zona no saturada. Debido a esto, es poco común que ocurra una contaminación por este compuesto, salvo que existan fracturas o macroporos en el suelo. El caso de las 9 muestras bicarbonatadas de la zona norte (Grupo 2), provenientes de pozos cercanos a la zona del Grupo 1, refleja que en esta parte de la zona norte hay una región de transición entre distintos tipos hidroquímicos.

Las muestras del Grupo 3, las cuales provienen de pozos ubicados en la línea costera, que es la zona de descarga del acuífero, tuvieron composición cloruro sódica en 6 de 12 muestras y las restantes tuvieron asociaciones del ion cloruro con los cationes calcio, magnesio y mixtos. De acuerdo al PCA estas muestras se caracterizaron por estar correlacionados con mayores niveles de SDT. Este tipo de agua indicó que en esta zona existe salinización del acuífero generada por la intrusión de agua de mar al subsuelo y seguramente también por la incorporación de las sales de la irrigación.

AGRADECIMIENTOS

A la dirección técnica del Organismo de Cuenca Noreste de la Comisión Nacional del Agua por la información proporcionada. DAMC agradece al CONACyT por la beca otorgada para realizar sus estudios de doctorado.

REFERENCIAS

- APHA, A. 1998. WPCF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 20th ed. American Public Health Association, Washington DC.
- AYERS, R. & D. WESTCOT. 1985. *Water quality for agriculture. FAO Irrigation and drainage paper 29 Rev. 1*. Food and Agricultural Organization. Rome. 176 p.
- BROWN, E., SKOUGSTAD, M. & M. FISHMEN. 1983. *Method for collection and analyzing of water samples for dissolved minerals and gasses*. US Govt. Printing Office, Washington DC, USA, 75.
- CANALES-ELORDUY, A. G. & F. ROBLES-CONTRERAS. 1997. *Acuífero del valle del Mayo: Universidad de Sonora*, I Seminario de Acuíferos Costeros de Sonora, Hermosillo, p. 90–92 (resumen).
- CHAPMAN, D. V. (Ed.). 1996. *Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. World Health Organization. London, England. 609 p.
- CHARFI, S., K. ZOUARI, S. FEKI & E. MAMI. 2013. Study of variation in groundwater quality in a coastal aquifer in north-eastern Tunisia using multivariate factor analysis. *Quaternary International* 302: 199–209.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2003. *Programa Nacional Hidráulico 2001–2006*.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2005. *Plan director para la modernización integral del Distrito de Riego 038 Río mayo, Sonora*. Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola. Gerencia de Distritos y Unidades de Riego.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2009. *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea. Acuífero (2642) Valle del Mayo, Estado de Sonora*. Gerencia de Aguas Subterráneas, Subdirección General Técnica.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 1993. *Estudio hidrológico del Estado de Sonora: México, D.F.*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Secretaría de Programación y Presupuesto, 81 p.
- KIM, J.-O. & C. W. MUELLER. 1987. *Introduction to factor analysis: what it is and how to do it. Quantitative applications in the social sciences series*. Sage University Press, Newbury Park. 81 p.
- LAWRENCE, F. W. & S. B. UPCHURCH. 1982. Identification of recharge areas using geochemical factor analysis. *Groundwater* 20 (6): 680–687.
- LIU, C.-W., K.-H. LIN & Y.-M. KUO. 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): 77–89.
- LUQUE, R. I. 2013. *Estudio de la evolución temporal y espacial del nivel estático del acuífero valle del Mayo para el periodo 1997–2011*. Tesis de Maestría Tecnológica en Hidrociencias. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Texcoco, Edo. de Méx. 108 p.
- MACHIWAL, D. & M. K. JHA. 2015. Identifying sources of groundwater contamination in a hard-rock aquifer system using multivariate statistical analyses and GIS-based geostatistical modeling techniques. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. doi:10.1016/j.ejrh.2014.11.005.
- MARTÍNEZ-CRUZ, D. A. 2015. *Impacto ambiental de la agricultura de riego en la calidad del suelo y los recursos hídricos en el Distrito de Riego 038 Río Mayo Navojoa, Sonora México*. Tesis de Doctorado en Ciencias en Hidrociencias. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Texcoco, Edo de Méx. 212 p.
- MUDARRA, M. & B. ANDREO. 2011. Relative importance of the saturated and the unsaturated zones in the hydrogeological functioning of karst aquifers: The case of Alta Cadena (Southern Spain). *Journal of hydrology* 397 (3): 263–280.
- PALACIOS-VÉLEZ, O. L. & E. ACEVES-NAVARRO. 1970. *Instructivo para el muestreo, registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego agrícola*. Colegio de Posgraduados, Chapingo, Estado de México. México.
- PIPER, A. M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union* 25: 914–928.
- PLANIMEX (Ingenieros Consultores S. A. de C. V.). 1970. *Estudio Geohidrológico de los acuíferos en el Valle del Mayo Ingenieros Consultores S. A.* Secretaría de Recursos Hidráulicos. México, D.F., México.
- RAIBER, M., P. A. WHITE, C. J. DAUGHNEY, C. TSCHRITTER, P. DAVIDSON & S. E. BAINBRIDGE. 2012. Three-dimensional geological modelling and multivariate statistical analysis of water chemistry data to analyse and visualise aquifer structure and groundwater composition in the Wairau Plain, Marlborough District, New Zealand. *Journal of Hydrology* 436: 13–34.
- SAPPA, G., ERGUL, S., FERRANTI, F., SWEYA, L. N., & LUCIANI, G. 2015. Effects of seasonal change and seawater intrusion on water quality for drinking and irrigation purposes, in coastal aquifers of Dar es Salaam, Tanzania. *Journal of African Earth Sciences* 105: 64–84.
- SSA (Secretaría de Salud). 1995. *NOM–127–SSA1–1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Diario Oficial de la Federación. Noviembre 30. 6 p.
- SHRESTHA, S. & F. KAZAMA. 2007. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan. *Environmental Modelling & Software* 22 (4): 464–475.
- SUMA, C. S., SRINIVASAMOORTHY, K., SARAVANAN, K., FAIZALKHAN, A., PRAKASH, R., & GOPINATH, S. 2015. Geochemical Modeling of Groundwater in Chinnar River Basin: A Source Identification Perspective. *Aquatic Procedia* 4: 986–992.
- WOOCCAY, A. & J. WALTON. 2008. Multivariate analyses of water chemistry: surface and ground water interactions. *Groundwater* 46 (3): 437–449.

Recibido: 08 de octubre de 2014.

Aceptado: 06 de marzo de 2016.