

Algunas relaciones iónicas simples para determinar la calidad del agua subterránea en un distrito de riego en México

Jorge González Meraz

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Se plantea una metodología sencilla para predecir algunos parámetros de calidad del agua: aniones y cationes principales, y sólidos disueltos totales (SDT), a partir de otros que son de fácil determinación, como la conductividad eléctrica (CE) y el pH, en las aguas subterráneas del distrito de riego (DR) 038 Río Mayo, en Sonora. Se estableció que los parámetros CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y SDT presentaban una distribución log-normal en sus respectivas distribuciones de frecuencia, por lo que se procedió a normalizar dichas variables a través de su transformación logarítmica (base 10), para así aplicar los modelos de regresión clásicos. Los aniones no presentaron distribuciones claramente definidas, pero también fueron transformados logarítmicamente. Se generaron modelos de regresión lineal múltiple relacionados con los cationes, aniones y SDT en función del log-CE y del pH, obteniendo coeficientes de correlación superiores a 0.94, y errores residuales menores de 0.06. Finalmente, se utilizó la correlación entre los datos estimados con los modelos y los datos reales como un índice para verificar la capacidad predictiva de dichos modelos. Esta correlación fue muy baja para los aniones Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- (0.238, 0.284, 0.366, respectivamente) y muy aceptable para los cationes (>0.96) y SDT (0.99). Se concluye que las concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ (meq/L), y de SDT (mg/L) pueden ser estimadas con aceptable precisión (0.992, 0.990, 0.988 y 0.999, respectivamente), a partir de la CE y el pH. Los aniones, al no presentar distribuciones de frecuencia definidas, no pueden ser estimados usando la técnica de regresión tradicional.

Palabras clave: anión, catión, conductividad eléctrica, pH, distribución log-normal, transformación logarítmica, normalización, sesgo, análisis de regresión.

Introducción

Small (1989) afirma que las variaciones en la calidad del agua que se presentan a través de una región determinada se deben a una amplia variedad de factores edafológicos, geoquímicos y, a veces, antropogénicos. La mejor comprensión de la naturaleza y la causa de estas variaciones es muy importante para el monitoreo y manejo de dicho recurso en el ámbito regional. Estudios de carácter regional sobre calidad de agua en cuerpos receptores han demostrado que distribuciones empíricas de parámetros químicos proporcionan una considerable visión de las propiedades geoquímicas dentro de una escala regional.

El mismo autor señala que los procesos naturales clave que controlan las concentraciones de los iones principales en las cuencas de drenaje son la adquisición de solutos a lo largo de la ruta que siguen los flujos de las corrientes, lo que a su vez es controlado por la intemperización de diversos materiales minerales y

de suelos, y el intercambio iónico que se lleva a cabo en los coloides (arcillas) del suelo.

Reddy y Rao (1989) desarrollaron modelos de regresión múltiple a partir de datos obtenidos de 58 pozos de bombeo durante cinco años, y cada muestra fue analizada en 13 propiedades químicas, de las cuales una de ellas, los sólidos disueltos totales (SDT), la tomaron como aquella que reflejaba la influencia de la mayoría de los otros solutos, de modo que SDT pudo ser predicho a partir de uno o varios componentes iónicos. Esto es:

$$SDT = f[\text{Na}, \text{Ca}, \text{K}, \text{Mg}(\text{HCO}_3 + \text{CO}_3), \text{SO}_4, \text{NO}_3, F] \quad (1)$$

Los mismos autores señalan que la variable causal, en este caso SDT, debe ser verdaderamente independiente de todas las demás. Adicionalmente, los modelos que no satisfacían las pruebas estadísticas de t y F fueron considerados como débiles y desechados.

Herrera y Ortega (1996) generaron varios modelos de regresión que comprendieron 109 pozos de bombeo en el estado de Aguascalientes, México, los cuales definen varios parámetros químicos en función de la conductividad eléctrica (CE, en dS/m):

$$SDT = f(CE) \quad (2a)$$

$$[\text{Cationes}] = f(CE) \quad (2b)$$

$$RAS = f(CE) \quad (2c)$$

donde RAS es la relación de adsorción de sodio; SDT son los sólidos disueltos totales, y [] indica "concentración de", en meq/L.

En el presente trabajo el objetivo es determinar las relaciones existentes entre parámetros físico-químicos del agua de fácil y rápida obtención (CE y pH), con algunos otros que requieren de un proceso analítico más prolongado y elaborado (SDT, y aniones y cationes principales) para las aguas subterráneas del distrito de riego (DR) 038 Río Mayo, Sonora, para finalmente evaluar si estos últimos parámetros pueden ser estimados a partir de los primeros, de manera rápida y confiable.

Metodología

El área de estudio

El área de estudio se estableció en el distrito de riego 038 Río Mayo. Este distrito se localiza al sur del estado de Sonora, México, entre 26°21'/28°31' latitud norte y 108°26'/110°05' longitud oeste (ilustración 1). Esta área forma parte de una región fisiográfica conformada por una extensa planicie costera que abarca el noroeste de México. El clima es de tipo tropical semiárido. La precipitación media anual es de 388 mm, la evaporación media anual es de 2,223 mm y la temperatura media anual es de 21°C.

Reyes Quezada (1994) determinó que los suelos del DR 038 son de origen reciente, formados a partir del material aluvial mezclado derivado de rocas ígneas extrusivas (granito) y rocas metamórficas de las montañas adyacentes del este y sureste. Los aridísoles son los suelos predominantes en la región, aunque en el área del distrito predominan los entisoles (*Fluvents*). 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 de cauce del río Mayo (*Psamments*). En cuanto a

Ilustración 1. Ubicación del distrito de riego 038 Río Mayo, Sonora.



su fertilidad, estos suelos contienen un bajo porcentaje de materia orgánica y son deficientes en nitrógeno, pero presentan altos contenidos de calcio, magnesio y potasio. Uvalle y Osorio (1996) estimaron que aproximadamente 19,000 (20%) de las 97,000 ha que comprende el DR 038 están afectadas por salinidad en diversos grados, presentando mantos freáticos someros (< 1.5 m).

La Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) (1970) determinó que el Valle del Mayo se puede considerar como una sola entidad hidrogeológica. Esta entidad consta de un acuífero aluvial no confinado de gran espesor e interpuesto por capas de arcilla, aunque en algunos pozos en particular pueden encontrarse condiciones de confinamiento de extensión limitada. Más de 90% de la recuperación del acuífero se origina del agua de exceso del riego de los campos de cultivo y de la infiltración del agua proveniente del sistema de canales del distrito. No se encontró ningún otro acuífero separado más profundo en el área de estudio.

Uvalle y Osorio (1996) muestrearon 58 pozos de bombeo, nueve canales de distribución y ocho drenes abiertos en los módulos 1, 5 y 6 del DR 038 Río Mayo, los cuales se localizan en la parte baja del mismo, muy cerca del océano, y en donde se concentra 54% de los suelos salinos y 68% de los suelos salino-sódicos del distrito. Se obtuvo un total de 75 muestras para su análisis. Para verificar la confiabilidad de los análisis, los resultados de cada una de las muestras fueron evaluados bajo la siguiente condición:

$$0.95 < (\Sigma[\text{cationes}] / (\Sigma[\text{aniones}])) < 1.05 \quad (3)$$

Todas las muestras se analizaron para sólidos disueltos totales, CE, pH, cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y NH_4^+) y aniones (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- y CO_3^{2-}), donde la concentración iónica es en meq/L. No se encontraron concentraciones significativas de K^+ , NH_4^+ , CO_3^{2-} y NO_3^- en ninguna de las muestras. De las 75 muestras, sólo 31 (41%) cumplieron con la condición dada en la ecuación 3, por lo que las muestras restantes fueron eliminadas.

Aunque normalmente no se consideran los parámetros referentes a materia orgánica dentro de un análisis rutinario de agua de riego, éstos deben ser incluidos cuando las muestras de agua presenten evidencias de concentraciones importantes de materia orgánica (color, olor, sólidos suspendidos, etcétera).

Para ciertos casos, también debe considerarse al fósforo como otro elemento asociado importante en aguas subterráneas. Aunque el fósforo no es un elemento dañino en el agua potable, su presencia en el agua subterránea puede ser de considerable significación ambiental, cuando dichos flujos alimentan cuerpos de agua superficiales, donde pueden acelerar el crecimiento de algas y vegetación acuática, causando eutroficación del sistema. Debido a la fijación de fósforo en los coloides del suelo de los horizontes superficiales, su presencia en sistemas subterráneos está limitada a la existencia de minerales fosfatados de baja solubilidad, como hidroxiapatita, $\text{Ca}(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$; estrengita, $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, y varisita, $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

El modelo de regresión lineal múltiple (MRLM)

Montgomery *et al.* (1987) señalan que los parámetros de calidad de agua subterránea normalmente no tienen una distribución normal. Muchas de estas distribuciones están sesgadas a la izquierda (sesgo positivo), y otras son bimodales o sesgadas a la derecha. Sólo algunas de ellas presentan distribuciones casi normales, excepto por uno o dos valores que se salen fuera de rango. Para Webster y Oliver (1990), para las variables que no presentan una distribución normal, el análisis de datos debe realizarse, ya sea mediante técnicas no paramétricas o, bien, mediante la transformación de los mismos (logarítmica, raíz cuadrada, recíprocos, etcétera), con el fin de aproximarlos a una distribución normal.

Webster y Oliver (1990) afirman que muchas propiedades, no sólo del suelo sino de otros cuerpos naturales, como plantas y animales, distribuyen su variabilidad siguiendo aproximadamente una curva normal. Muchas otras propiedades que no se distribuyen de una manera normal pueden hacerlo a través de la transformación de sus escalas de medición. Una trans-

formación muy poderosa se obtiene al tomar los logaritmos de los valores originales. El potencial de presión del suelo, la conductividad eléctrica, la actividad microbiológica y la concentración de micronutrientes son sólo algunas de las propiedades que parecen aproximarse a una distribución log-normal.

Lesch *et al.* (1992) probaron un modelo estadístico que relacionaba los promedios ponderados de mediciones instrumentales de un sensor de salinidad del suelo, los cuales se transformaron logarítmicamente junto con los datos de la elevación del terreno y con las mediciones de salinidad del suelo (CE_e), también logarítmicamente transformadas. En este análisis, los valores puntuales de salinidad que no fueron muestreados fueron predichos a partir de sus correspondientes lecturas de sensor a través del MRLM.

$$\ln \text{CE}_{z_1, z_2} = B_0 + B_1 [\ln(\text{EM}_H)] + B_2 [\ln(\text{EM}_V) - [\ln(\text{EM}_V)]] + B_3 (r) \quad (4)$$

donde CE_{z_1, z_2} representa la conductividad eléctrica del extracto de saturación para el espesor de z_1 a z_2 ; B_0 , B_1 , B_2 y B_3 son los coeficientes empíricos de regresión; EM_H y EM_V son las lecturas en las posiciones horizontal y vertical del sensor de salinidad; y r es la elevación relativa.

Lesch *et al.* (1995a) compararon el modelo estadístico del tipo de la ecuación 4 con el método geoestadístico *cokriging* (basado en promedios ponderados en las vecindades de puntos observados) para comparar resultados en cuanto a la optimización del tamaño de muestra y a la evaluación de las capacidades predictivas de las mismas. Se concluyó que los MRLM son teóricamente equivalentes y más baratos en relación con el método *cokriging* para la estimación de variables aleatorias distribuidas en el espacio, con la condición de que el error residual de los MRLM no se correlacione espacialmente.

Para el presente caso, a pesar de que se trata de una sola entidad geohidrológica, la distribución de los pozos de bombeo puede ser considerada al azar, ya que no se encontró ningún criterio técnico que haya sido tomado en consideración para su ubicación. Además, el manejo de los terrenos agrícolas sobreyacentes es extremadamente heterogéneo, por lo que la calidad de las aguas de recarga provenientes de los excesos de riego transmiten esa heterogeneidad a las aguas del acuífero subyacente. Es por esto que se considera, de manera genérica, que la calidad del agua de cada uno de los pozos analizados no está correlacionada espacialmente y, por tanto, los datos obtenidos de los pozos se pueden considerar como aleatorios.

Después de todas las consideraciones anteriores, el modelo de calibración a desarrollar propone una relación lineal entre el $\log_{10}$ de los SDT, cationes y aniones analizados, contra su correspondiente valor de pH y $\log_{10}$ de CE.

$$\log[I] = A_0 + A_1 \log [CE] + A_2 [pH] \quad (5)$$

donde $[I]$ representa la concentración catiónica o aniónica, en meq/L; A_0 , A_1 y A_2 son los coeficientes empíricos de regresión, y CE es la conductividad eléctrica, en dS/m. El pH no fue transformado, dado que por definición es ya una transformación logarítmica ($-\log[H^+]$).

Ilustración 2. Distribución de frecuencia de la conductividad eléctrica de las aguas subterráneas en el DR 038 Río Mayo, Sonora.

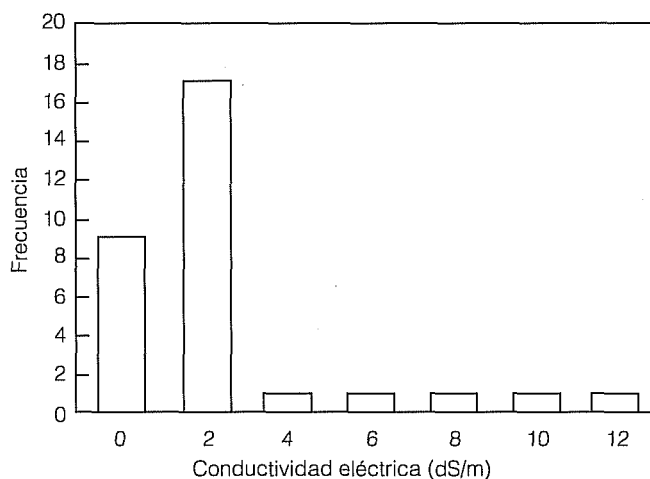
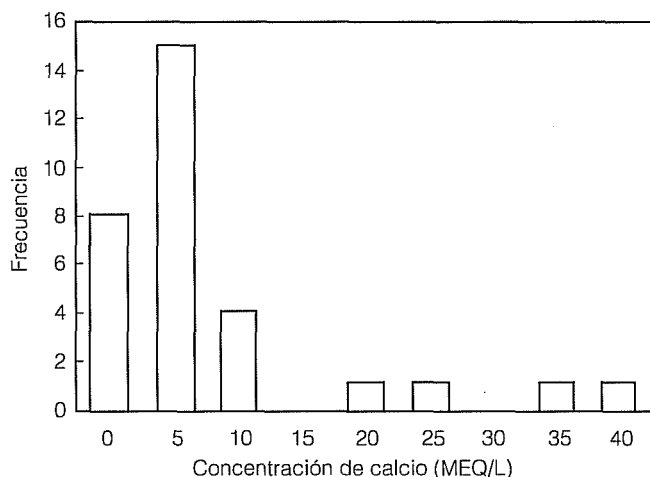


Ilustración 4. Distribución de frecuencia de la concentración de calcio de las aguas subterráneas en el DR 038 Río Mayo, Sonora.



Resultados y discusión

Se obtuvieron las distribuciones de frecuencia de los datos de conductividad eléctrica y calcio. En ambos casos se observa que los datos originales (ilustraciones 2 y 4, respectivamente) presentan una distribución log-normal, y que la transformación logarítmica (ilustraciones 3 y 5 respectivamente) normaliza los datos. Aunque no se muestra, esta misma situación sucede en los casos de magnesio, sodio y sólidos disueltos totales.

En el cuadro 1 se presentan algunas estadísticas de los parámetros de calidad del agua en cuestión. De aquí se observa que, a partir de los valores medios, el

Ilustración 3. Distribución de frecuencia del logaritmo de la conductividad eléctrica de las aguas subterráneas en el DR 038 Río Mayo, Sonora.

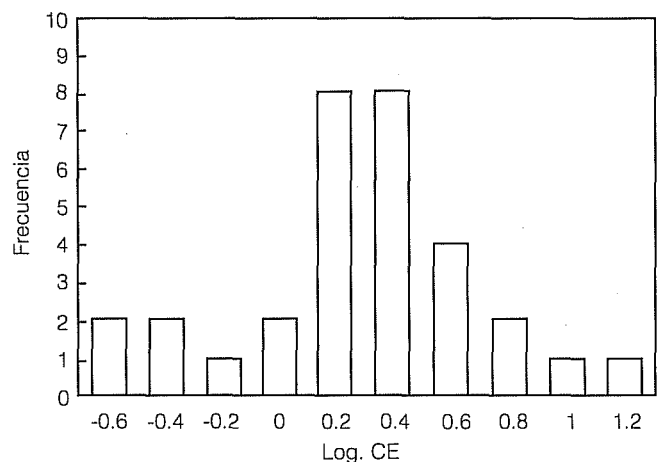
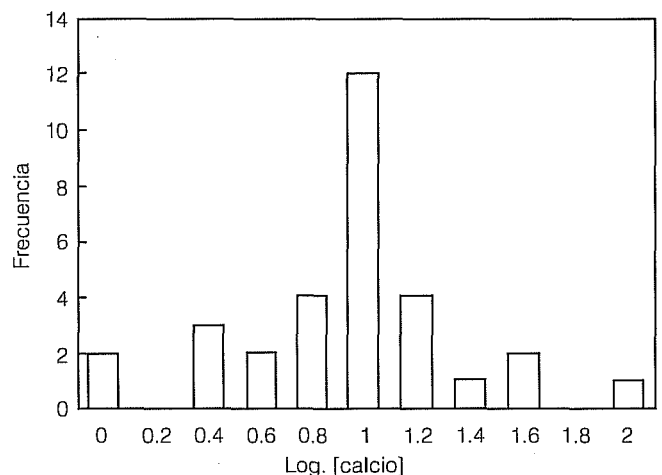


Ilustración 5. Distribución de frecuencia del logaritmo de la concentración de calcio de las aguas subterráneas en el DR 038 Río Mayo, Sonora.



Cuadro 1. Algunas estadísticas básicas de los datos de calidad de las aguas subterráneas en el DR 038 Río Mayo, Sonora.

$n = 31$	CE* (dS/m)	pH	SDT** (mg/L)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼ (meq/L)	HCO ₃ ⁻
Media	3.77	7.53	2,265.99	11.17	11.13	15.43	23.77	9.12	4.43
C.V.***	1.15	0.05	1.06	1.25	1.10	1.18	1.81	0.59	0.40
Desv. std.	4.34 (0.42)	0.40 (0.02)	2,410.32 (0.39)	13.95 (0.42)	12.21 (0.41)	18.18 (0.50)	42.96 (0.63)	5.40 (0.44)	1.78 (0.21)
Sesgo	3.12 (-0.27)	0.00 (-0.09)	2.98 (-0.30)	3.19 (0.02)	3.28 (-0.42)	2.58 (-0.38)	3.47 (0.05)	0.24 (-1.53)	0.10 (-0.91)
Curtosis	10.77 (0.38)	-0.85 (-0.81)	9.90 (0.49)	10.91 (0.34)	12.34 (0.57)	7.45 (-0.17)	12.36 (-0.59)	-0.33 (1.72)	-0.80 (0.67)

* CE – Conductividad eléctrica ** SDT – Sólidos disueltos totales *** C.V. – Coeficiente de variación.

Los números entre paréntesis indican el valor transformado logarítmicamente.

cación y el anión que tienden a predominar en estas aguas son el Na⁺ y el Cl⁻, respectivamente. Los valores de desviación estándar de los datos transformados logarítmicamente disminuyeron en al menos dos órdenes de magnitud, comparados con los valores originales, a excepción del pH, HCO₃⁻, SO₄⁼ y CE, cuyos valores de desviación estándar disminuyeron en un solo orden de magnitud después de dicha transformación.

También es notorio que los coeficientes de variación de HCO₃⁻, SO₄⁼ y Cl⁻ tienden a ser relativamente diferentes a los valores que presentan todos los demás parámetros. Este comportamiento en HCO₃⁻, SO₄⁼ y Cl⁻ se ve reflejado en sus distribuciones de frecuencia, como se observará más adelante.

El sesgo, como un indicador de la simetría de la distribución (el sesgo igual a cero implica una distribución simétrica o normal), tiende a tener valores más cercanos a cero después de transformarlos logarítmicamente, excepto para el pH, HCO₃⁻, SO₄⁼, los cuales prácticamente no cambian, o incluso se alejan del cero después de aplicar dicha transformación (cuadro 1). El sesgo confirma así la normalización de los datos transformados de CE, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y SDT.

Para los casos de los bicarbonatos (ilustraciones 6 y 7) y sulfatos (ilustraciones 8 y 9), las distribuciones de sus respectivas frecuencias, aunque no aparecen bien definidas, son muy similares entre sí. En el caso de los cloruros (ilustraciones 10 y 11) no se observa

Ilustración 6. Distribución de frecuencia de la concentración de bicarbonatos de las aguas subterráneas en el DR 038 Río Mayo, Sonora.

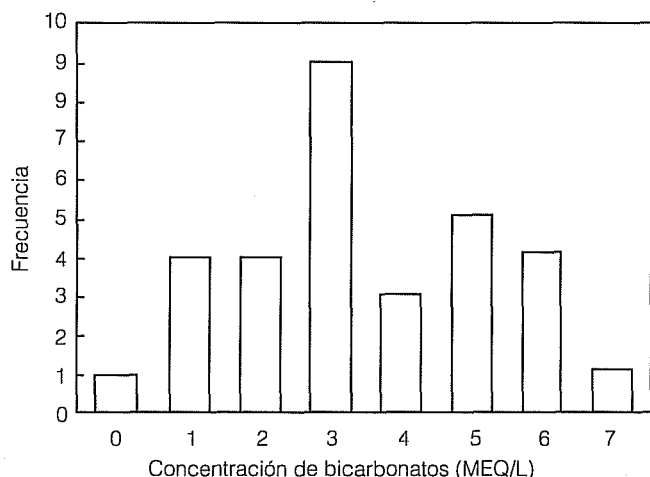


Ilustración 7. Distribución de frecuencia del logaritmo de la concentración de bicarbonatos de las aguas subterráneas en el DR 038 Río Mayo, Sonora.

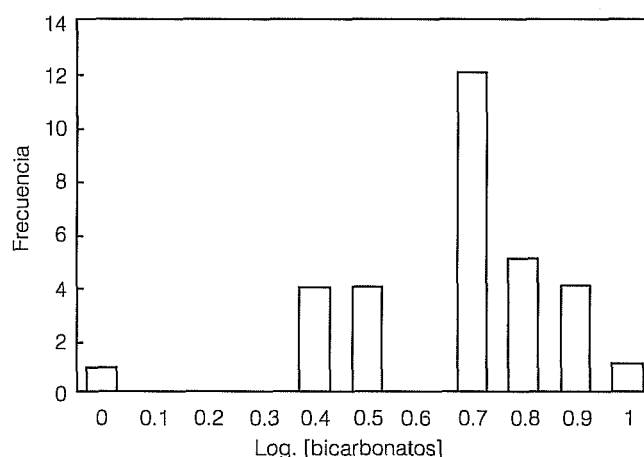


Ilustración 8. Distribución de frecuencia de la concentración de sulfatos de las aguas subterráneas en el DR 038 Río Mayo, Sonora.

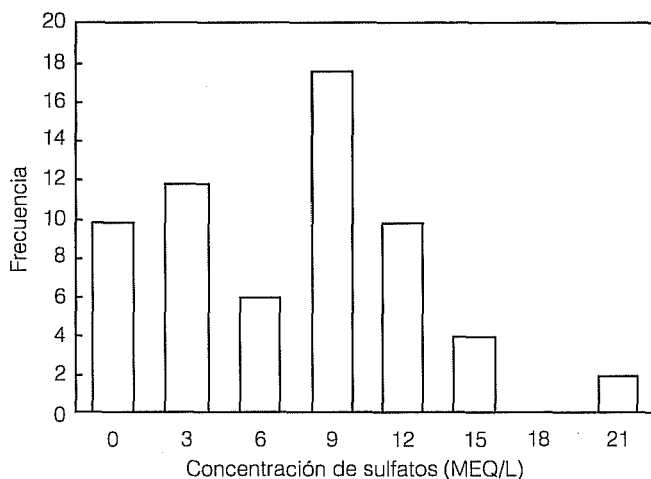


Ilustración 10. Distribución de frecuencia de la concentración de cloruros de las aguas subterráneas en el DR 038 Río Mayo, Sonora.

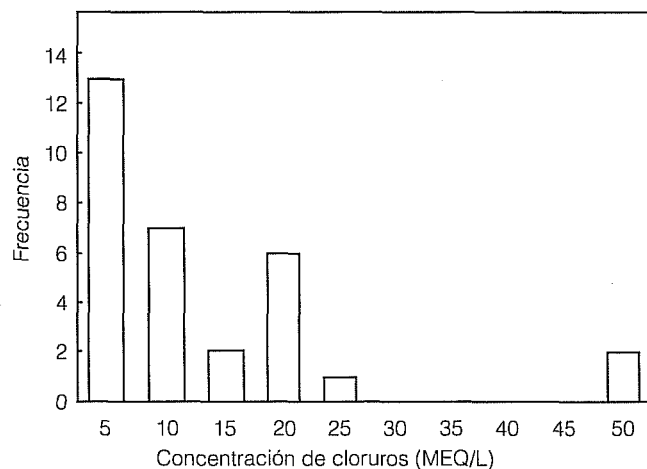


Ilustración 9. Distribución de frecuencia del logaritmo de la concentración de sulfatos de las aguas subterráneas en el DR 038 Río Mayo, Sonora.

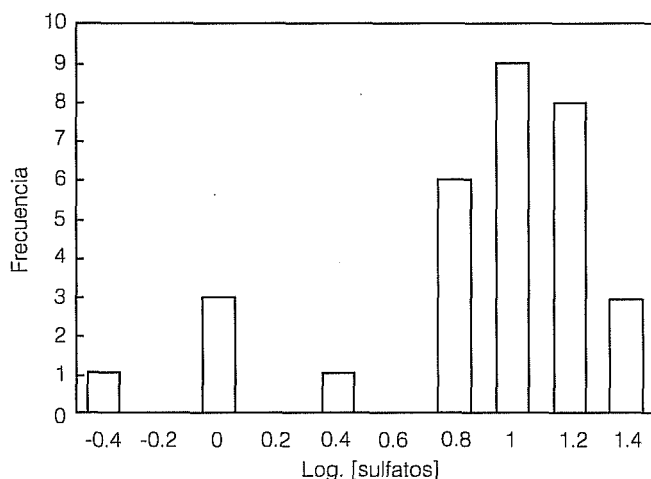
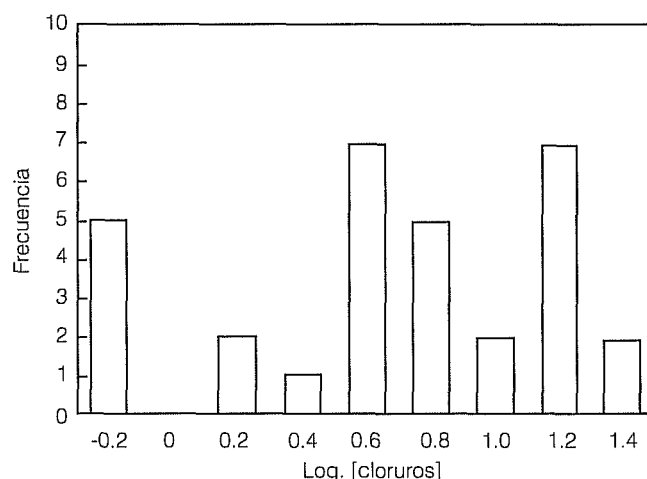


Ilustración 11. Distribución de frecuencia del logaritmo de la concentración de cloruros de las aguas subterráneas en el DR 038 Río Mayo, Sonora.



una distribución bien definida, aun después de la transformación de los datos. Las transformaciones logarítmicas en estos tres casos no generaron una normalización clara de las frecuencias y, de hecho, las correspondientes a bicarbonatos y sulfatos tienden a ser del tipo log-normal. Más aún, el sesgo de los datos no transformados de sulfatos y bicarbonatos están más cercanos a cero que sus respectivos valores transformados (cuadro 1).

De acuerdo con la ecuación 5, se generaron modelos de regresión individuales para cada anión y catión (cuadro 2), y SDT. Se decidió utilizar la transformación logarítmica aun para los casos de los aniones (HCO_3^- ,

SO_4^{2-} y Cl^-), ya que sus coeficientes de correlación resultaron mayores que aquéllos obtenidos con los datos no transformados, de modo que todos los aniones y cationes en cuestión fueron transformados logarítmicamente.

Como se observa en el cuadro 2, los modelos obtenidos para los sulfatos, bicarbonatos y cloruros dieron por resultado los menores coeficientes de correlación (0.945, 0.963 y 0.981, respectivamente), y los mayores valores del cuadrado medio del error o CME (0.099, 0.032 y 0.052, respectivamente). Por otro lado, los SDT y los cationes exhibieron coeficientes de correlación relativamente más altos (desde 0.988 a 0.999), y CME re-

Cuadro 2. Ecuaciones de regresión múltiple para cada componente iónico de las aguas subterráneas del DR 038 Río Mayo, Sonora.

ión	<i>a</i>	<i>b</i>	Constante	<i>R</i> del modelo	CME*	<i>R</i> de correlación de datos **
Ca ²⁺	0.994 (0.053)	0.061 (0.061)	—	0.992	0.014	0.981
Mg ²⁺	0.968 (0.060)	0.065 (0.005)	—	0.990	0.020	0.962
Na ⁺	1.149 (0.072)	0.066 (0.005)	—	0.988	0.029	0.975
Cl ⁻	1.442 (0.097)	0.051 (0.007)	—	0.981	0.052	0.238
HCO ₃ ⁻	0.278 (0.076)	0.066 (0.006)	—	0.963	0.032	0.366
SO ₄ ⁻	0.779 (0.135)	0.069 (0.010)	—	0.945	0.099	0.284
SDT	0.942 (0.008)	—	2.822 (0.004)	0.999	0.000	0.999

* CME – Cuadrado medio del error.

** Se refiere a la correlación entre los datos estimados y los datos originales.

Los números entre paréntesis indican el error medio del coeficiente.

lativamente más bajos (desde 0.000 a 0.029). En particular, se observa una estrecha relación entre CE y SDT, cuya correlación fue la más alta, y con el menor error asociado.

La última columna del cuadro 2 muestra las correlaciones obtenidas entre los datos estimados con los modelos de regresión, y los datos originales de cada uno de los parámetros; en otras palabras, estas correlaciones representan un indicador de la capacidad predictiva de los modelos generados.

De la columna de datos citada en el párrafo anterior, es muy notorio que los modelos generados para sulfatos, bicarbonatos y cloruros presentan bajas capacidades predictivas (las correlaciones entre datos estimados y reales son de 0.284, 0.366 y 0.238, respectivamente). Estos resultados confirman lo que se había observado en el análisis estadístico de los datos, es decir, al no lograrse una distribución normal con la transformación de datos, la aplicación de la estadística clásica en ellos no se considera válida y, por ende, no se producen los resultados predictivos esperados, a pesar que los coeficientes de correlación de sus respectivos modelos de regresión fueron todos mayores a 0.94.

En la misma columna se tiene que los modelos de calcio, sodio, magnesio y SDT presentan capacidades predictivas relativamente más altas ($R > 0.960$), en especial el SDT ($R = 0.999$), es decir, la normalización obtenida a través de la transformación logarítmica de los datos confirmó la validez de aplicar la estadística de regresión clásica para obtener modelos capaces de dar resultados confiables. De tal manera se confirma que la

distribución natural de estos cuatro parámetros en las aguas subterráneas del Valle del Mayo es log-normal.

El comportamiento diferente de los tres aniones en relación con los demás parámetros analizados debe ser considerado individualmente. Los bicarbonatos dependen fuertemente del pH del medio, formando parte del sistema CO₂-H₂O del suelo. Los aportes de CO₂ proveniente de la alta actividad biológica que se presenta en el suelo debido a la agricultura provocan que las concentraciones en equilibrio de los componentes de dicho sistema (H₂CO₃, HCO₃⁻ y CO₃⁼) varíen considerablemente en el espacio y en el tiempo.

Para el caso de los sulfatos, hay tres posibles causas que pudieron haber provocado un desbalance del sistema. La primera es que la adición de ácido sulfúrico (H₂SO₄), como mejorador de suelos, es una práctica muy común entre los agricultores de la región, en especial en la zona de estudio (módulos 1, 5 y 6). La segunda es que en gran parte de esta área el suelo presenta naturalmente concreciones de yeso (Ca₂SO₄), normalmente a una profundidad de 1.5 m o más, y cuyo origen se debe al alto contenido de este material en los sedimentos aluviales a partir de los cuales se formaron los suelos de este valle. Estos aportes adicionales de sulfatos al sistema natural muy probablemente propician una dinámica diferente de este anión dentro del sistema, y su consecuente dependencia espacial y temporal. Finalmente, las fluctuaciones del manto freático generan condiciones de óxido-reducción diferentes, según las condiciones de saturación que se presentan en las diferentes épocas del año.

Durante las temporadas de riego, cuando los mantos freáticos se elevan considerablemente, los sulfatos son reducidos, por ejemplo, a ácido sulfhídrico (H_2S).

Por otra parte, es posible que por la cercanía de esta zona a la costa exista un aporte adicional de cloruros desde acuíferos muy profundos, y por la gran movilidad de este anión probablemente se forme en poco tiempo un gradiente de concentración, lo cual generará una dependencia espacial en su propia concentración.

La concentración aniónica para cloruros, bicarbonatos y sulfatos en este acuífero debe ser, entonces, estimada a partir de otras aproximaciones, como pueden ser las soluciones analíticas o numéricas de ecuaciones de tipo determinísticas o bien, estocásticas.

Aparentemente, los cationes (Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) tienen a tener una distribución menos dependiente del espacio o del tiempo, ya que su concentración en el suelo (y en el agua subyacente) depende de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo mismo, la que a su vez depende fundamentalmente del tipo de arcilla, siendo ésta una característica muy variable, sobre todo en estos suelos de origen aluvial. La normalización de los datos de estos tres cationes mediante su transformación logarítmica obedece al origen azaroso de los materiales geológicos, lo cual hizo entonces posible la estimación de ellos a partir de la estadística de regresión clásica, a partir de su CE y pH correspondientes, lo cual representa un gran ahorro en tiempo y dinero.

Cabe mencionar que los modelos empíricos obtenidos son válidos desde el punto de vista práctico, pero sólo para el caso muy particular del DR 038 Río Mayo, Sonora. Estos modelos deben seguir validándose con lecturas diferidas en el tiempo para establecer la concordancia de datos.

Conclusiones

1. La concentración normal del calcio, magnesio, sodio (meq/L), la conductividad eléctrica (dS/m) y los sólidos disueltos totales (mg/L) en las aguas de pozo en el DR 038 Río Mayo, Sonora, presentan una distribución de frecuencia log-normal. El pH (potencial hidrógeno) presenta una distribución de frecuencia normal.

2. Las concentraciones normales de calcio, magnesio y sodio (meq/L), en aguas de pozo en el DR 038 Río Mayo, pueden ser estimadas a partir de su conductividad eléctrica (dS/m) y pH ($R = 0.992, 0.990, 0.988$, respectivamente), con el consecuente ahorro en análisis de laboratorio. Algunos otros parámetros de salini-

dad pueden ser entonces estimados, como la relación de adsorción de sodio (RAS), el peligro por magnesio (PM) y el por ciento de sodio posible (PSP).

3. La concentración salina en términos de mg/L (sólidos disueltos totales) también puede ser estimada ($R = 0.999$) a partir de la conductividad eléctrica (dS/m).

4. Las concentraciones normales de cloruros, bicarbonatos y sulfatos (meq/L) en aguas de pozo del DR 038 Río Mayo no presentan una distribución de frecuencia definida, por lo que sus concentraciones no pueden ser estimadas a través de técnicas estadísticas clásicas.

Recibido: 23/09/98

Aprobado: 25/11/99

Agradecimientos

Se agradece al doctor Jaime Uvalle Bueno y a la química Rosario Osorio Alatorre por la aportación de los datos de análisis de las muestras de agua subterránea de los módulos 1, 5 y 6 del distrito de riego 038 Río Mayo, Sonora, utilizados en el presente estudio. Los datos fueron tomados del estudio titulado: *Dictamen técnico sobre el origen de la salinidad y el funcionamiento de los pozos de bombeo en los módulos 1, 5 y 6, del distrito de riego 038 Río Mayo, Sonora*.

Referencias

- Herrera García, F. y M. Ortega Escobar, *Composición iónica de las aguas subterráneas del estado de Aguascalientes*, reporte final del problema especial HID-670, Área de Manejo de Aguas y Suelos Salinos, Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Montecillo, 1996.
- Lesch, S.M., J.D. Rhoades, J. Lund y D.L. Corwin, "Mapping soil salinity using calibrated electromagnetic measurements", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, núm. 56, Estados Unidos, 1992, pp. 540-548.
- Lesch, S.M., D.J. Strauss y J. D. Rhoades, "Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques, 1. Statistical prediction models: A comparison of multiple linear regression and cokriging", *Water Resources Research*, vol. 31, núm. 2, Estados Unidos, 1995a, 373-386.
- Montgomery, R.H., J.C. Loftis y J. Harris, "Statistical characteristics of ground-water quality variables", *Groundwater*, vol. 25, núm. 2, Estados Unidos, 1987, pp. 176-184.
- Reddy, K.S.V.B. y M.P. Rao, "Factor analysis and multiple linear regression modelling", S. Ragone (editor), *Regional Characterization of Water Quality*, proceedings of the symposium held during the Third Scientific Assembly of the International Association of Hydrological Sciences (IAHS) at Baltimore, IAHS núm. 182, Oxfordshire, 1989, pp. 31-42.

- Reyes Quezada, C., *Estudio agrológico semidetallado del distrito de riego 038 Río Mayo*, Comisión Nacional del Agua, México, 1994.
- Small, M.J., "Regional distributions of water quality derived of spatial random processes", S. Ragone (editor), *Regional Characterization of Water Quality*, proceedings of the symposium held during the Third Scientific Assembly of the International Association of Hydrological Sciences (IAHS) at Baltimore, IAHS núm. 182, Oxfordshire, 1989, pp. 3-10.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos, *Estudio geohidrológico de los acuíferos en el Valle del Río Mayo, Sonora*, vol. 1, reporte final, México, 1970, 125 pp.
- Uvalle Bueno, J.J. y R. Osorio Alatorre, *Dictamen técnico sobre la salinidad y el funcionamiento de pozos de bombeo en los módulos 1, 5 y 6*, distrito de riego 038 Río Mayo, Sonora, México, 1996.
- Webster, R. y M A. Oliver, *Statistical methods in soil and land resource survey*, Oxford University Press, Nueva York, 1990.

Abstract

González Meraz, J., "Some simple ionic relations to determine groundwater quality in an irrigation district in Mexico", *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*, vol. XV, num. 3, pp. 117-125, September-December, 2000.

A simple methodology is presented to predict some groundwater parameters, major anions and cations, and total dissolved solids (TDS), from some others that can be easily determined, like pH and electrical conductivity (EC), within the area of the irrigation district (ID) 038, Río Mayo, Sonora, Mexico. Multiple linear models were used to determine such relationships. The first step was to determine the frequency distribution of all parameters. It was found that EC, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ and TDS exhibited a log-normal distribution. These distributions were normalized through the logarithmic (base 10) transformation of the data, so classical regression statistics could be applied. The anions did not present well-defined frequency distributions, however they were also log-transformed. All models expressed all anions, cations, and TDS as a function of log-EC and pH. In all cases, correlation coefficients were higher than 0.94, and all residual errors were lower than 0.06. As a final step, correlations between estimated and ground-truth data were assessed in order to verify the predictive capability of the regression models. These correlations were very low for all anions, Cl^- , SO_4^{2-} and HCO_3^- ($R = 0.238, 0.284, 0.366$, respectively), but resulted relatively higher for all cations ($R > 0.960$) and TDS ($R = 0.999$). It was concluded that the concentration of Ca^{2+} , Mg^{2+} and Na^+ (meq/L), and TDS (mg/L) can be estimated from just EC (dS/m) and pH within acceptable confidence levels ($R = 0.992, 0.990, 0.988$ and 0.999 , respectively). The non-defined frequency distribution of the anions did not allow the regression analysis to be applied as a predictive tool.

Key words: anion, cation, electrical conductivity, pH, log-normal distribution, normalization, skewness, regression analysis.

Dirección institucional del autor:

Jorge González Meraz

Correo electrónico: jgmeraz@tlaloc.imta.mx

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México