

CARACTERIZACIÓN DE LOS FLUJOS DE AGUA SUBTERRÁNEA A PARTIR DE SU SALINIDAD

• Juan R. Fagundo-Castillo •
Universidad de La Habana, Cuba

• Margarita M. Alconada-Magliano* •
Universidad Nacional de La Plata, Argentina
*Autor de correspondencia

• J. Joel Carrillo-Rivera •
Universidad Nacional Autónoma de México

• Patricia González-Hernández •
Universidad de La Habana, Cuba

Resumen

FAGUNDO-CASTILLO, J.R., ALCONADA-MAGLIANO, M.M., CARRILLO-RIVERA, J.J. & GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, P. Caracterización de los flujos de agua subterránea a partir de su salinidad. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. V, núm. 3, mayo-junio de 2014, pp. 63-80.

La vinculación entre elementos del paisaje puede ser explicada mediante la teoría de los sistemas de flujo de agua subterránea, que reconoce los diferentes flujos y sus zonas de descarga y recarga, que manifiestan en forma complementaria su funcionamiento hidrológico. Es esencial la caracterización de los diferentes flujos para conocer su potencialidad, salinidad y su posibilidad de uso en diferentes prácticas de manejo agropecuario y forestal; en esta definición quedan implícitas sus características de cantidad y profundidad de circulación. En ambientes donde la superficie de agua freática es poco profunda, definir los flujos constituye un procedimiento esencial al seleccionar las prácticas de manejo agropecuario y forestal que coadyuven en una situación dada, tales como excesos o déficit hídricos. Los flujos se definen a partir de la calidad del agua e indicadores ambientales. Los costos de los análisis químicos de agua son elevados y resultan difíciles de abordar en grandes áreas. Sin embargo, puede utilizarse la conductividad eléctrica (CE) para estimar la composición química del agua en un área si se conocen los principios mediante los cuales adquiere su composición y se establecen las relaciones matemáticas con los iones mayoritarios. El objetivo del presente estudio es establecer la factibilidad de utilizar los modelos hidrogeoquímicos propuestos para estimar la composición química del agua a partir de su conductividad eléctrica. Se estudió el origen del agua de pozos, freáticos y lagunas del noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, conociendo el referente geológico del sitio, y aplicando modelos hidrogeoquímicos de reconocimiento de patrones (HIDROGEOQUIM, GEOQUIM, SAMA, MODELAGUA). Se obtuvieron los patrones hidrogeoquímicos y las relaciones matemáticas entre la composición iónica y CE. El mejor ajuste se obtuvo utilizando la ecuación polinomial (parábola), que pasa por el origen de coordenadas, habiendo agrupado previamente los datos mediante el modelo de reconocimiento de patrones. Se concluye que es posible definir la composición química del agua mediante estimaciones matemáticas a partir del valor de la conductividad eléctrica, la cual, junto al pH, temperatura y otros elementos del paisaje, permiten definir tipos de flujo y manejo del suelo asociado.

Palabras clave: flujos de agua subterránea, conductividad eléctrica, calidad del agua, recarga, descarga, manejo de suelos, paisaje, superficie freática somera.

Abstract

FAGUNDO-CASTILLO, J.R., ALCONADA-MAGLIANO, M.M., CARRILLO-RIVERA, J.J. & GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, P. *Characterization of Groundwater Flows according to Salinity*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. V, No. 3, May-June, 2014, pp. 63-80.

The relationships among elements in the landscape can be explained using the theory of groundwater flow systems, which recognizes the different flows and their discharge and recharge zones, demonstrating their hydrological functioning. Characterizing the different flows is crucial to identifying their potential, salinity and possible use for different agricultural and forestry management practices. This definition implicitly includes characteristics related to quantity and depth of circulation. In environments where the water table is shallow, defining flow is key to selecting agricultural and forestry management practices that help in a given situation, such as water excess or deficit. The flows are defined according to the water quality and environmental indicators. The costs of the chemical analysis of water are high and it is difficult to analyze large areas. Nevertheless, electrical conductivity (EC) can be used to estimate the chemical composition of water in an area if the principles through which they acquire their composition are known and mathematical relationships with major ions are determined. The objective of the present study is to determine the feasibility of using the proposed hydrogeochemical models to calculate the chemical composition of water based on its electrical conductivity. Sources of water from wells, phreatometers and lagoons in northwest Buenos Aires, Argentina were studied to identify the geology of the site and apply hydrogeochemical pattern recognition models to identify patterns (HIDROGEOQUIM, GEOQUIM, SAMA, MODELAGUA). The hydrogeochemical patterns and mathematical relationships between the ionic composition and EC were obtained. The best fit was obtained using the polynomial (parabola) equation that passes through the origin of the coordinates, having previously grouped the data using the pattern recognition model. It is concluded that the chemical composition of the water can be defined with mathematical calculations based on the value of electrical conductivity, which along with pH, temperature and other elements of the landscape enable defining types of flow and related soil management.

Keywords: Groundwater flows, electrical conductivity, water quality, recharge, discharge, soil management, landscape, shallow phreatic surface.

Introducción y antecedentes

Los elementos que integran un paisaje son parte del sistema integral de funcionamiento de una región, por consecuencia presentan relaciones que los vinculan de modo tal que las acciones en uno de ellos incide en el funcionamiento general. La necesidad de estudiar los ecosistemas en forma integral es bien conocida, sin embargo con frecuencia se omite el estudio del agua subterránea debido a que se subestima su incidencia o se considera que su estudio sólo puede ser abordado por especialistas. Sin embargo, tanto los ecosistemas naturales como las prácticas agropecuarias y forestales regulan y son consecuencia de lo que ocurre en el agua subterránea en muchos ámbitos. Por ello es necesario que un grupo más amplio de profesionales incorpore el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico, esto es, entender los sistemas de flujo que inciden en un sitio, y cómo su recorrido y características físicas y químicas se vinculan en lo local y regional con las prácticas de manejo que se implementen. Esto es particularmente importante en regiones donde la superficie freática se halla poco profunda (de 1.0 a 3.5 m), sujeta a cambios por el clima y prácticas de manejo agropecuarias-forestales, tal como sucede en la región del presente estudio, denominada Noroeste (NO) de la provincia de Buenos Aires, Argentina, caracterizada por la ocurrencia cíclica de inundación y sequía que se registra desde 1576 hasta la actualidad (Moncaut, 2003).

En general, en esta región, el agua subterránea está en condiciones libres (no confinadas), donde los flujos circulan por un medio granular de espesores que pueden superar los 5 000 m que conforman una planicie que se extiende desde la cordillera andina hasta Tandil, en la vecindad de la costa atlántica (figura 1). La dirección de movimiento del agua subterránea en el plano horizontal es en general hacia la región de estudio, proveniente del oeste y norte, dada la comunicación hidráulica subterránea, con salida en el límite este

hacia el océano Atlántico, no reconociéndose aportes desde el límite sur (serranía de Tandil) (Guillermo-Hernández en Alconada, 2008). Cada componente vertical de flujo está presente de acuerdo con su característica de recarga (flujo hacia abajo) o descarga (flujo hacia arriba). La bibliografía internacional indica la utilidad de definir prácticas de manejo agropecuario y forestal que coadyuven a una situación dada de exceso o déficit hídrico y control de la salinidad, aplicando el concepto del bio-drenaje, donde la vegetación a través de la evapotranspiración incide en la superficie freática (Heuperman *et al.*, 2002; Tomar, 2007). Esto es recomendable si se conoce cómo funcionan los flujos de agua que inciden en un sitio, tipo de flujo (local, intermedio o regional) y tipo de zona dentro de éstos (recarga, tránsito o descarga), tal como explica Tóth (2000). Las zonas dentro de un flujo se complementan en su funcionamiento hidrogeológico, al igual que las prácticas de manejo, según se ubiquen en zonas de recarga, tránsito o descarga de dicho flujo (Tóth, 2000). El funcionamiento del flujo de agua subterránea, y su interacción con el agua superficial, puede ser estimado a partir de las características químicas del agua (cationes, aniones, pH, salinidad, CO₂ y temperatura), y de las relaciones entre el referente geológico, geomorfología, suelos y vegetación de la región de estudio (Tóth, 2000; Carrillo-Rivera, 2000).

En la región del presente estudio, Alconada *et al.* (2009), partiendo del concepto de bio-drenaje comentado antes (Heuperman *et al.*, 2002; Tomar, 2007), proponen incidir en las situaciones extremas de sequía-inundación mediante la implantación de especies arbóreas, principalmente en silvopastoreo, y de especies herbáceas, que contribuyan a abatir la superficie freática a profundidad, compatible con el crecimiento vegetal y/o disminuir excesos hídricos generales de un área, a partir del conocimiento del comportamiento hidrogeológico como elemento integrador de todos los elementos del paisaje, tal como lo explica la teoría de sistemas de flujo de agua subterránea de Tóth (2000).

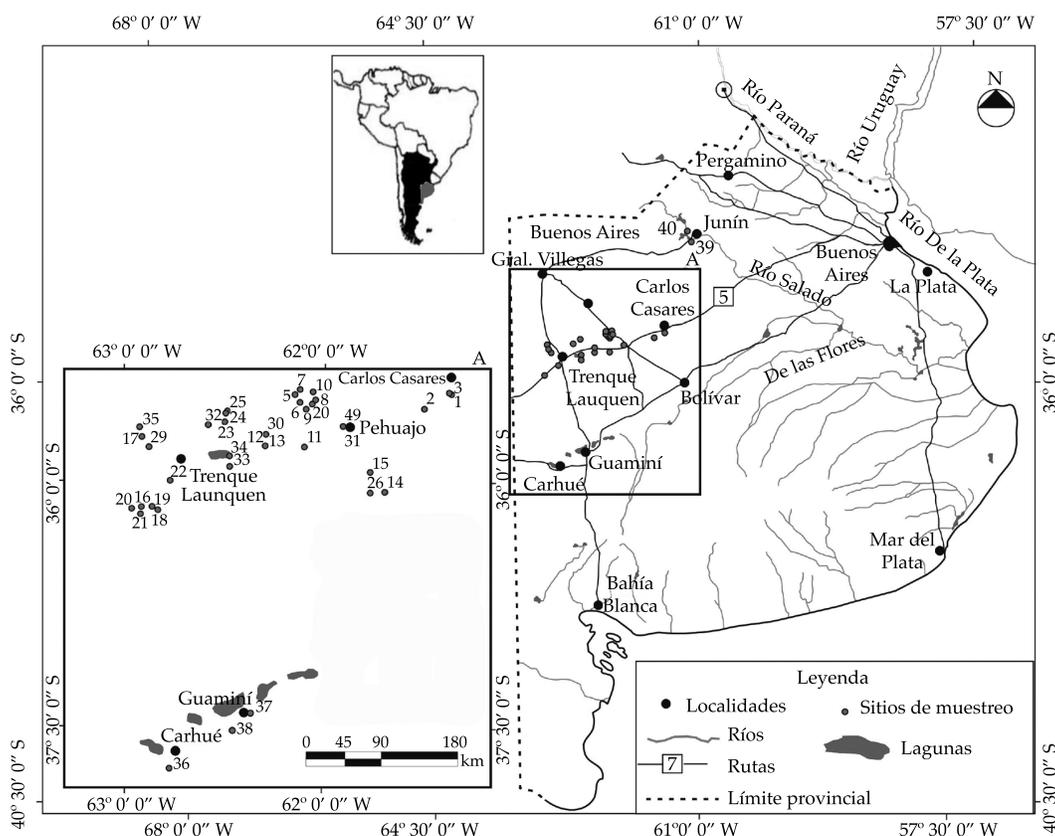


Figura 1. Localización del área de estudio y de los sitios de muestreo de agua subterránea.

Si bien es frecuente para un área —al menos en pequeñas escalas— disponer de información relativa al referente geológico, suelos y vegetación, la caracterización del agua en general es poco estudiada o se lo hace para identificar su uso potencial para consumo humano o actividad agropecuaria. Esto puede tener diferentes causas, por un lado, en general, se desconoce la utilidad de estudiar el agua subterránea con fines de manejo agropecuario-forestal, y cuando su utilidad se reconoce, se plantea la frecuente inviabilidad técnica y económica de efectuar un número grande de análisis de agua que caracterice áreas involucradas en respuestas generalmente dinámicas, cuyos cambios requieren ser registrados, como los excesos hídricos, sequías y procesos degradativos edáficos asociados. Los procedimientos de análisis físico-químicos

del agua resultan relativamente costosos y con frecuencia toman un tiempo largo, por lo cual se requieren métodos sencillos y a bajo costo, que puedan efectivamente contribuir en la toma de decisiones relativas al manejo del paisaje.

Fagundo (1985, 1990), y Fagundo y Rodríguez (1991, 1992) estudiaron los procesos de interacción agua-roca (calizas y dolomías) en el laboratorio (sistemas abierto y cerrado) y en el campo, con el objetivo de simular el proceso natural de adquisición de la composición química de un agua que circula por terrenos carbonatados. Estos autores, en Cuba, encontraron que la concentración de los iones relacionados con el sistema de equilibrio $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$, así como el pH, la conductividad eléctrica (CE), las concentraciones de HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , CaCO_3 y los sólidos totales disueltos (STD), aumentan siguiendo

una función exponencial propia de una cinética de primer grado (ecuación (1)) hasta alcanzar las condiciones de equilibrio químico. La CE dependerá en cada momento de la concentración de los iones HCO_3^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} disueltos en el proceso cinético y , en menor medida, de los iones adquiridos de la atmósfera (Fagundo *et al.*, 1992, 2004). La velocidad de disolución de un mineral depende de su composición en la roca, así como de la temperatura y contenido de CO_2 del agua de circulación:

$$C_t = C_{eq} \left(1 - e^{-kt^n}\right) \text{ (sistemas abierto y cerrado respecto al } CO_2) \quad (1)$$

Donde C_t es la concentración iónica (HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+}) en el tiempo t ; y C_{eq} es la concentración iónica en el equilibrio químico; k es la constante cinética (velocidad), y n es el coeficiente experimental que toma valores entre 0 y 1. Debido a que las magnitudes de k para un mismo valor de t son del mismo orden para todos los iones y la CE , las correlaciones entre C_t y CE son de tipo lineal.

Miller *et al.* (1988) encuentran que la conductividad eléctrica teórica, CE_t (ecuación (2)) es aproximadamente igual a la suma del producto de la concentración de cada ión disuelto (C_i) en el sistema, por la conductividad específica equivalente de cada ión a dilución infinita (S_i), y por la fracción de iones libres que aportan a la conductividad eléctrica (α), dependiendo, a su vez, de un exponente empírico f que varía con la concentración iónica y tipo de agua:

$$CE_t = \sum_{i=1}^n (\alpha_i C_i S_i)^f \quad (2)$$

A partir de estos estudios e información de campo de diferentes áreas de Cuba, Fagundo *et al.* (1992, 2005, 2006) y Álvarez *et al.* (1993), desarrollaron modelos hidrogeoquímicos que definen las correlaciones entre las variables hidroquímicas medidas y las estimadas, así como las relaciones matemáticas entre dichas variables y la conductividad eléctrica.

Sin embargo, en cada área de estudio deben establecerse las relaciones mencionadas, para lo cual se requieren conocer los procesos mediante los cuales el agua adquiere su composición química, ya que de ello depende el tipo de modelo matemático de correlación a emplear.

Las características físico-químicas del agua son el resultado de un proceso complejo que surge de la interacción del agua con las unidades geológicas del medio por donde ésta circula (adquisición y escape de gases, disolución-precipitación de minerales, hidrólisis, oxidación-reducción, intercambio iónico, efecto de ión común, efecto salino, efecto de mezcla de agua, como las más importantes). Si bien intervienen también factores de tipo geomorfológico, edafológico, climático y microbiológico en un mismo sitio, el efecto de estos factores se hace constante y , en consecuencia, resulta suficiente conocer la composición mineralógica del sustrato geológico por donde el agua circula y la caracterización físico-química de dicha agua para establecer las relaciones mencionadas (Fagundo, 1990).

El objetivo del presente estudio es establecer la factibilidad de utilizar los modelos hidrogeoquímicos propuestos en la estimación de la composición química del agua a partir de su conductividad eléctrica, a modo de disponer de un método de monitoreo de la calidad del agua de bajo costo y plantear la utilidad de relacionar dicha calidad de agua con otros elementos del paisaje, a fin de definir intervenciones paisajísticas más acordes con las componentes ambientales imperantes.

Caracterización del área de estudio y muestreo

El estudio se centra en la región denominada Noroeste Bonaerense o Pampa Arenosa (PA), que cubre unas 5 500 000 ha, integrando la Llanura Pampeana Argentina, en el sector de Medanos Longitudinales, principalmente en los partidos (regiones político administrativas en que se divide la provincia de Buenos

Aires) de Pehuajó y Trenque Lauquen, y en menor medida, en partidos vecinos que hidrogeológicamente se vinculan (Carlos Casares, Nueve de Julio, Guaminí, Carhué y Junín) (figura 1).

La PA se caracteriza por una geomorfología dominada por médanos longitudinales y parabólicos, con lagunas en los intermédanos, que ocupan aproximadamente 20 000 ha, con características y distribución vinculadas con el clima, relieve, litología y estructura geológica (Dangavs, 2005). La superficie freática se encuentra entre 1.1 y 3.5 m de profundidad, y está sujeta a las alternantes sequía e inundación características de la región, que determinan la superficie inundada y dimensión de las lagunas. La región se halla por debajo de los 100 msnm, y está limitada al N-NE por el río Salado, con el cual fue unido en forma artificial por canales (PMI, 1999), y al S por el sistema hidrológico de las lagunas Las Encadenadas (figura 1). Geológicamente, se caracteriza por presentar un basamento de rocas cristalinas precámbricas que afloran en partes altas al S del área de estudio (sistemas de Tandilia y Ventania, con elevaciones entre los 500 y 1 100 msnm), y quedando progresivamente enterrado hacia el N por sedimentos más jóvenes, de entre 2 y 6 km de espesor (Etchichury *et al.*, 1988; PMI, 1999; Zárate y Rabanesse, 2005).

Se muestreó agua de freáticos y pozos entre 20 y 40 m de profundidad, y lagunas; se incluyeron zonas de recarga, tránsito y descarga de flujos de agua subterránea locales e intermedios, definidos en Alconada (2008), según criterios de Tóth (2000).

Materiales y métodos

Mediciones físico-químicas de campo en agua

En el campo, se midió pH, temperatura (pHmetro modelo HI-8424-HANNA), conductividad eléctrica (CE) (conductímetro modelo ORISON 524), y alcalinidad total (HCO_3^- y CO_3^{2-}). Los iones mayoritarios: HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ ; CaCO_3 se analizaron mediante

ICP-MS (espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo) (APHA, AWWA, WEF, 1989, en Alconada, 2008).

Modelación hidrogeoquímica y procesamiento de información

El sistema informático *MODELAGUA* (Fagundo-Sierra *et al.*, 2001), basado en modelos de reconocimiento de patrones hidrogeoquímicos, balance de masas y de mezcla de aguas, fue usado para explicar los procesos geoquímicos que dieron origen a la composición química de las aguas. Esto se estableció sobre la base de la constitución litológica presentada en el cuadro 1 (adaptada de PMI, 1999, y González, 2005). Así, los minerales considerados como principales responsables de la composición del agua fueron los siguientes: halita (cloruro de sodio), yeso, calcita, cuarzo, plagioclasa (albita y anortita), feldespato-K, biotita y arcilla. Los procesos geoquímicos que causan el intemperismo de estos materiales están contemplados en el algoritmo del sistema informático *MODELAGUA*. El número de datos consignados en los cuadros resulta de agrupar las muestras por patrón hidrogeoquímico, a partir de un número mayor de datos, reuniendo así las muestras que presentan características comunes y, de este modo, posibilitan un mejor ajuste de las ecuaciones, que si se utilizaran de forma directa todos los datos juntos.

Las variables hidroquímicas fueron procesadas por diversos sistemas informáticos que se complementan entre sí: *HIDROGEOQUIM*, *GEOQUIM* y *SAMA*. Estos modelos efectúan cálculos, relaciones entre variables, validación de datos, definen patrones hidrogeoquímicos, clasifican las aguas y calculan los coeficientes iónicos (pendiente de las ecuaciones (3), (4) y (5)), que estiman la concentración iónica de cada una de las variables a partir de la CE.

Mediante el sistema *HIDROGEOQUIM* (Fagundo *et al.*, 2005) se efectuaron los cálculos que permitieron validar la calidad de los datos, clasificar las aguas por patrón

Cuadro 1. Composición mineralógica de la PA (adaptada de PMI, 1999, y González, 2005).

| Formación | Edad | Litología (salinidad del agua) | Mineralogía reportada o inferida |
|------------------------------|------------------|--|--|
| Médano invasor | Holoceno | Arena fina a limosa, limo arcilloso con ceniza volcánica (STD, 500 - 2 000 mg/l) | Cuarzo, plagioclasa, feldespato-K, calcita, arcilla, mineral portador de magnesio (auguita, hipersteno y hornblenda), halita |
| Pampeano | Pleistoceno | Limo arenoso, limo arcilloso y calcáreo, arcilla yesífera, loess (STD, 1 000 - 30 000 mg/l) | Cuarzo, plagioclasa, feldespato-K, calcita, arcilla, mineral portador de magnesio (auguita, hipersteno y hornblenda), halita |
| Araucano | Plio-Pleistoceno | Arenisca arcillosa, cemento calcáreo y yeso abundante (STD > 5 000 mg/l) | Yeso, cuarzo, plagioclasa, feldespato-K, calcita, mineral arcilloso (caolinita), halita |
| Arenas Puelches | Plio-Pleistoceno | Arena fina a mediana en matriz arcillosa algo de mica (STD, 2 000 - 10 000 mg/l) | Cuarzo, plagioclasa, feldespato-K, moscovita, halita, yeso |
| Paraná (Superior e Inferior) | Mioceno Superior | Arcilla verde a azulada, arena con calcáreos (STD 2 000 - 10 000 a > 100 000 mg/l) | Cuarzo, plagioclasa, feldespato-K, calcita, mineral arcilloso (caolinita), halita |
| Olivos | Mioceno Inferior | Arenisca, arcilla rojiza, yeso y anhidrita (STD, 6 000 - 60 000 mg/l) | Halita, plagioclasas, feldespato, calcedonia, yeso, anhidrita, mineral arcilloso (caolinita) |
| Las Chilcas | Paleoceno | Limolita y arcilla marinas (STD elevados) | Limonita, mineral arcilloso (caolinita), cuarzo, halita, yeso |
| G. Belgrano | Cretácico | Arenisca consolidada y limonita arenosa, arenisca arcillosa, calcárea y yesífera (STD > 50 000 mg/l) | Cuarzo, limonita, mineral arcilloso (caolinita), plagioclasa, feldespato-K, calcita, halita, yeso |
| Basamento hidrogeológico | Paleozoico | Cuarcita y caliza | Cuarzo, calcita |
| | Precámbrico | Granito y gneiss (STD muy altos) | Cuarzo, halita, yeso |

hidrogeoquímico y tipo de agua, según el método de Kurlov (Fagundo, 1998). Los patrones hidrogeoquímicos consisten en relaciones estequiométricas del tipo $\text{Na}^+ + \text{K}^+$: Ca^{+2} : Mg^{+2} y de Cl^- : HCO_3^- : SO_4^{2-} , asignándose números enteros entre 0 y 8, resultando en una combinación numérica para aniones y cationes. Así, por ejemplo, el patrón 361-316 representa la composición aproximada: 30% de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, 60% de Ca^{+2} , 10% de Mg^{+2} , 30% de Cl^- , 10% de HCO_3^- y 60% de SO_4^{2-} , patrón que correspondería con un agua de tipo sulfatada clorurada cálcica sódica; en la denominación sólo se consideran los iones con más de un 20% de meq.l^{-1} (Fagundo, 1998).

Las representaciones gráficas se realizaron con el diagrama de Piper-Hill (Appelo y Postma, 1993), agrupando las aguas en tipos fundamentales, y por los diagramas de Stiff

(1951), con la finalidad de establecer similitud y diferencia entre grupos de agua, según patrones hidrogeoquímicos.

Mediante el sistema *GEOQUIM* (Álvarez *et al.*, 1993), se determinaron las matrices de correlación de las variables hidroquímicas, y las ecuaciones de correlación estimadas mediante el modelo de la línea recta con ordenada al origen diferente de cero:

$$C_i = a_0 + a_1 \dots CE \quad (3)$$

Con el sistema *SAMA* (Álvarez *et al.*, 1990, 1993), se determinaron las ecuaciones de dependencia matemática entre la concentración iónica y la conductividad eléctrica, según un modelo de regresión polinómica de primer grado (ecuación de la línea recta, (4)) y segundo grado (ecuación de la parábola, (5)), que pasa

por el origen de coordenadas, así como la indicada en *GEOQUIM* (ecuación (3)):

$$C_i = a_1 \cdot CE \quad (4)$$

$$C_i = a_1 \cdot (CE) + a_2 \cdot (CE)^2 \quad (5)$$

Donde C_i es la concentración de i iones; a_1 y a_2 son coeficientes de las ecuaciones polinómicas, y CE es el valor de conductividad eléctrica de la muestra.

La selección de la ecuación que mejor estimó la concentración iónica teórica de cada variable hidroquímica a partir de la CE se realizó a partir del índice de similitud (IS), el cual compara los patrones hidrogeoquímicos y establece la similitud entre los datos reales y los estimados por dicha modelación, mediante las expresiones:

$$IS = \sum_{i=1}^n (R_1 R_2) \quad (6), \text{ donde:}$$

$$R_1 = \frac{C_{ir}}{C_{im}} \quad (7)$$

$$R_2 = \frac{C_{ir}}{\sum_{i=1}^n C_{ir}} \quad (8)$$

Donde IS es el índice de similitud; C_{ir} la concentración iónica real, y C_{im} es la concentración iónica obtenida por modelación.

En estadística clásica, lo más típico y común es utilizar el coeficiente de correlación (r) o el coeficiente de estimación (r^2). Sin embargo, estas estadísticas dan buenos resultados cuando se dispone de una cantidad de datos apreciables y cuando los mismos están dispuestos de forma tal que tengan una cierta linealidad. Cuando se dispone de menos datos o los puntos están concentrados, la magnitud IS da mejores resultados.

Procesamiento estadístico

Las relaciones funcionales entre las variables hidroquímicas y la pertinencia de los procesos

de interacción agua-roca seleccionados se establecieron mediante análisis de regresión y correlación lineal. Las correlaciones matemáticas entre los valores de STD y CE con los iones Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ y K^+ permiten confirmar lo obtenido en el *MODELAGUA*, en relación con los procesos geoquímicos que explican el origen de la composición química del agua.

La significancia de la correlación entre variables hidroquímicas se analizó mediante la t de Student para un nivel de probabilidad P : 0.005 y P : 0.05.

Manejo de datos y obtención de la calidad del agua

A modo de síntesis, se indican los pasos para definir la calidad del agua, y a partir de ésta y otras variables del paisaje, el funcionamiento hidrológico de un área y su propuesta de manejo acorde con el mismo:

1. Se establecen los procesos geoquímicos que dieron origen a la composición química de las aguas utilizando el *MODELAGUA*, a partir del referente geológico del sitio y muestreando manifestaciones de agua representativas del área.
2. Se calculan los coeficientes iónicos (pendientes de las ecuaciones de los diferentes modelos *HIDROGEOQUIM*, *GEOQUIM* y *SAMA*) que estiman la concentración iónica de cada una de las variables a partir de la CE , seleccionando la ecuación que presente el mejor índice de similitud (ajuste entre datos reales y estimados) para las condiciones del sitio.
3. Se efectúan mediciones en campo de CE , pH , temperatura, y adicionalmente, potencial redox (Eh), oxígeno disuelto y alcalinidad.
4. Se registran en el sitio elementos del paisaje: patrones de vegetación, tipo de suelo, degradaciones edáficas, posición topográfica, geomorfología y relieve general.

5. Se define la jerarquía de los flujos de agua y zonas (de recarga, tránsito o descarga) dentro de éstos, basado en la comparación de variables físico-químicas del área, tipo de suelo y posición topográfica, principalmente en estudios locales; así como geomorfología y relieve general en estudios regionales.
6. Efectuar el análisis técnico-productivo y socioeconómico de las prácticas de manejo factibles de realizar. Sobre este punto, se destaca que en la zona de estudio se realizó un exhaustivo análisis y recomendaciones en Alconada (2008) y Alconada *et al.* (2009).

Notar que en la definición de componentes de recarga y descarga de sistemas de flujo de diferente jerarquía es necesario contar con mediciones de piezometría a diferente profundidad para evaluar las componentes de movimiento del agua en el plano vertical (recarga y descarga). Debido a que se carece de esta información, en el presente trabajo se establece solamente la diferente jerarquía de los flujos identificados por su distintiva calidad físico-química del agua y temperatura. Las condiciones de recarga o descarga se identifican por la profundidad a la superficie freática (somera en la descarga, profunda en la recarga) y por las condiciones de pH alcalino en la descarga, ácido en la recarga.

Resultados y discusión

Mediante el *MODELAGUA* se determinó que en los procesos de interacción agua-roca que originan la composición química de las aguas superficial y subterránea de la región de estudio prevalecen la precipitación de calcita y el intercambio catiónico entre Ca y Na (se incrementa el Ca a expensas del Na), y en menor medida se definieron procesos de disolución de halita, yeso, biotita, albita, anortita y K-feldespato. La concentración en la cual se produce la precipitación de calcita es variable, pudiendo ocurrir con valores de *STD* superiores de 1 300 a 1 500 mg.l⁻¹, mientras que el intercambio catiónico sucede

en concentraciones superiores de 7 500 a 12 000 mg.l⁻¹, según el sitio. En el caso de las lagunas, se encontró que se origina una precipitación alta de halita, calcita, cuarzo, arcilla, y ocasionalmente, dolomita. El análisis detallado de lo obtenido por *MODELAGUA* puede consultarse en Alconada (2008) y Alconada *et al.* (2011).

En el cuadro 2 se presentan las principales propiedades físico-químicas del agua estudiada en la provincia de Buenos Aires y se indica la jerarquía del flujo y zona de descarga, tránsito o recarga identificada para estos flujos, conforme a la teoría de los sistemas de flujo de Tóth (2000) (Alconada, 2008). Es de enfatizar que este cuadro es resultado de integrar patrones y facies hidrogeoquímicas, e incorpora variables físicas del agua como pH y temperatura, así como químicas. En efecto, Tóth (2000) indica que la relación entre aniones sugiere el tiempo de residencia del agua y, en consecuencia, puede tomarse como referente del tipo de flujo. Se identificaron zonas de recarga, tránsito o descarga, usando criterios adicionales de geomorfología y posición del nivel freático, enmarcando el tipo de flujo identificado.

La figura 2 presenta la distribución de los datos hidroquímicos en el diagrama de Piper-Hill (Appelo y Postma, 1993), lo cual sugiere que las muestras de agua se agrupan en varios grupos que se orientan siguiendo una tendencia al incremento del contenido de Cl⁻ y Na⁺. Con base en el patrón hidrogeoquímico y tipo de agua, según criterio de Kurlov (Fagundo *et al.*, 1996), obtenidos por el modelo *HIDROGEOQUIM* (Fagundo *et al.*, 2005), se establecieron cuatro grupos principales de agua. En la figura 3 se presentan los diagramas de Stiff (1951) de los patrones hidrogeoquímicos promedio. Las representaciones de muestras individuales se presentan en Alconada (2008).

Las características químicas por grupo de agua de acuerdo con el arreglo de Piper, Stiff, y el valor de *STD* y Patrón Hidrogeoquímico (PH) se pueden resumir a continuación:

- Grupo 1, una muestra en un freatómetro de Pehuajó es bicarbonatada clorurada

Cuadro 2. Propiedades físico-químicas del agua de freáticos (F), pozos (P) y lagunas (L). Composición de iones en me.l⁻¹; CaCO₃ y STD en mg l⁻¹; pH; T °C; CE en µS/m; grupos (G); Flujo (F); intermedio (I) y local (L); zonas (Z); recarga (R), tránsito (T), descarga (D).

| Núm. | M | pH | T | CE | STD | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Na ⁺ | K ⁺ | Mg ²⁺ | Ca ²⁺ | CaCO ₃ | G | F | Z |
|------|---|------|-------|-------|-------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|---|---|---|
| 1 | P | 8.18 | 17.2 | 1060 | 895 | 8.98 | 1.37 | 0.67 | 9.74 | 0.35 | 0.99 | 0.80 | 90 | 2 | L | R |
| 2 | P | 7.04 | 16.4 | 1884 | 1571 | 14.11 | 3.66 | 2.60 | 14.57 | 0.99 | 2.81 | 2.42 | 261 | 2 | L | D |
| 3 | P | 7.01 | 16.3 | 3500 | 2303 | 8.98 | 21.52 | 5.50 | 31.00 | 1.51 | 11.17 | 7.55 | 936 | 3 | L | D |
| 4 | P | 6.98 | 18.3 | 18300 | 10528 | 8.12 | 124.39 | 37.80 | 145.00 | 5.08 | 10.13 | 7.70 | 892 | 4 | I | D |
| 5 | P | 7.03 | 19.1 | 5150 | 3100 | 8.98 | 28.21 | 9.67 | 43.0 | 1.04 | 3.15 | 1.05 | 210 | 4 | I | T |
| 6 | F | 7.65 | 27.0 | 4750 | 3210 | 14.11 | 29.31 | 5.52 | 39.10 | 0.99 | 6.28 | 1.60 | 394 | 3 | I | T |
| 7 | F | 7.36 | 27.0 | 1510 | 1024 | 2.14 | 12.45 | 1.67 | 14.37 | 0.49 | 0.73 | 0.70 | 72 | 4 | I | T |
| 8 | F | 7.21 | 19.0 | 3000 | 1892 | 2.99 | 23.66 | 4.00 | 25.00 | 1.24 | 2.00 | 1.60 | 180 | 4 | I | D |
| 9 | F | 7.25 | 19.5 | 845 | 576 | 2.14 | 4.62 | 1.56 | 6.65 | 0.90 | 0.25 | 0.81 | 53 | 3 | L | T |
| 10 | F | 6.98 | 17.7 | 182 | 141 | 1.34 | 0.32 | 0.14 | 0.74 | 0.20 | 0.24 | 0.59 | 42 | 1 | L | R |
| 11 | F | 6.92 | 16.8 | 8010 | 5124 | 7.27 | 70.08 | 6.00 | 73.91 | 1.51 | 5.00 | 5.50 | 525 | 4 | I | T |
| 12 | P | 7.92 | 23.50 | 9350 | 6279 | 22.66 | 64.23 | 10.52 | 85.22 | 1.23 | 5.55 | 2.00 | 378 | 3 | I | T |
| 13 | P | 8.29 | 21.70 | 3420 | 2539 | 14.11 | 15.04 | 6.04 | 30.80 | 0.69 | 4.09 | 1.20 | 265 | 3 | I | T |
| 14 | P | 7.70 | 18.50 | 3660 | 2958 | 20.95 | 11.69 | 7.23 | 35.43 | 0.67 | 4.82 | 1.00 | 291 | 2 | L | D |
| 15 | P | 8.11 | 22.30 | 3200 | 2772 | 21.80 | 8.25 | 6.02 | 33.70 | 1.19 | 2.31 | 0.54 | 142 | 2 | I | D |
| 16 | F | 6.69 | 18.10 | 6510 | 3971 | 12.40 | 38.31 | 10.85 | 50.85 | 1.36 | 5.54 | 2.33 | 394 | 3 | I | D |
| 17 | F | 7.44 | 17.80 | 500 | 402 | 4.20 | 0.78 | 0.18 | 1.79 | 0.32 | 1.36 | 1.70 | 135 | 2 | L | R |
| 18 | P | 8.12 | 18.20 | 3010 | 1928 | 4.70 | 16.99 | 7.23 | 25.78 | 0.36 | 3.55 | 2.05 | 280 | 4 | I | T |
| 19 | P | 7.60 | 18.60 | 646 | 530 | 5.56 | 0.70 | 0.44 | 3.49 | 0.18 | 1.72 | 1.86 | 179 | 2 | L | R |
| 20 | P | 7.60 | 18.20 | 4860 | 3897 | 26.08 | 18.08 | 8.04 | 51.74 | 0.58 | 3.76 | 1.05 | 240 | 2 | I | T |
| 21 | P | 8.04 | 18.10 | 1015 | 684 | 3.75 | 5.25 | 0.92 | 8.90 | 0.20 | 0.50 | 0.30 | 40 | 3 | L | T |
| 22 | P | 7.23 | 19.10 | 38680 | 22798 | 9.83 | 295.77 | 76.96 | 292.61 | 3.87 | 64.00 | 18.50 | 4125 | 4 | I | D |
| 23 | P | 7.58 | 19.10 | 11850 | 7514 | 5.56 | 90.99 | 27.92 | 90.00 | 1.79 | 23.30 | 9.50 | 1640 | 4 | I | T |
| 24 | P | 7.63 | 18.60 | 2100 | 1417 | 3.85 | 12.37 | 5.46 | 16.52 | 0.44 | 3.89 | 1.90 | 289 | 4 | L | T |
| 25 | F | 7.90 | 18.60 | 868 | 705 | 6.71 | 1.95 | 0.85 | 3.96 | 0.71 | 1.85 | 2.76 | 232 | 2 | L | R |
| 26 | P | 8.25 | 17.80 | 4180 | 2717 | 10.69 | 23.13 | 6.94 | 35.84 | 1.17 | 2.20 | 0.76 | 148 | 3 | L | D |
| 27 | L | 9.02 | 25.20 | 4190 | 2663 | 2.99 | 28.73 | 10.94 | 35.17 | 0.89 | 4.18 | 2.10 | 314 | 4 | I | D |
| 28 | L | 9.87 | 21.00 | 10420 | 7296 | 8.12 | 74.65 | 34.79 | 97.83 | 2.02 | 10.08 | 1.55 | 582 | 4 | I | D |
| 29 | L | 6.69 | 17.80 | 8950 | 5077 | 1.28 | 63.10 | 19.29 | 67.80 | 1.49 | 11.08 | 4.30 | 769 | 4 | I | D |
| 30 | L | 9.02 | 20.00 | 36400 | 22240 | 4.70 | 329.01 | 36.25 | 330.12 | 6.59 | 39.17 | 11.50 | 2534 | 4 | I | D |
| 31 | L | 7.31 | 21.00 | 8610 | 5478 | 5.56 | 60.56 | 22.29 | 73.48 | 1.44 | 11.08 | 2.00 | 654 | 4 | I | D |
| 32 | L | 6.83 | 18.60 | 19800 | 14133 | 2.14 | 165.92 | 63.75 | 185.22 | 1.64 | 29.08 | 19.00 | 2404 | 4 | I | D |
| 33 | L | 8.31 | 23.00 | 22900 | 16531 | 9.83 | 190.42 | 65.00 | 237.83 | 4.72 | 27.25 | 3.50 | 1538 | 4 | I | D |
| 34 | L | 8.25 | 23.00 | 18100 | 12653 | 6.41 | 138.59 | 61.25 | 170.00 | 3.49 | 20.25 | 5.65 | 1295 | 4 | I | D |
| 35 | L | 7.60 | 25.50 | 10410 | 7593 | 8.12 | 55.49 | 51.04 | 103.04 | 2.01 | 12.92 | 3.70 | 831 | 4 | I | D |
| 36 | L | 9.53 | 21.40 | 75600 | 63322 | 22.66 | 692.96 | 293.75 | 1000.02 | 8.72 | 9.92 | 0.75 | 533 | 4 | I | D |
| 37 | L | 9.02 | 21.40 | 9370 | 6884 | 20.09 | 57.46 | 26.04 | 95.10 | 2.06 | 7.63 | 0.60 | 412 | 4 | I | D |
| 38 | L | 9.07 | 23.00 | 18510 | 11840 | 20.95 | 127.32 | 35.83 | 182.57 | 3.46 | 4.68 | 0.90 | 279 | 4 | I | D |
| 39 | L | 9.20 | 17.20 | 9370 | 6333 | 12.40 | 49.01 | 31.88 | 90.22 | 4.26 | 4.53 | 0.66 | 260 | 4 | I | D |
| 40 | L | 8.09 | 17.20 | 5240 | 3512 | 9.83 | 26.70 | 14.75 | 48.26 | 2.31 | 3.25 | 0.87 | 206 | 4 | I | D |

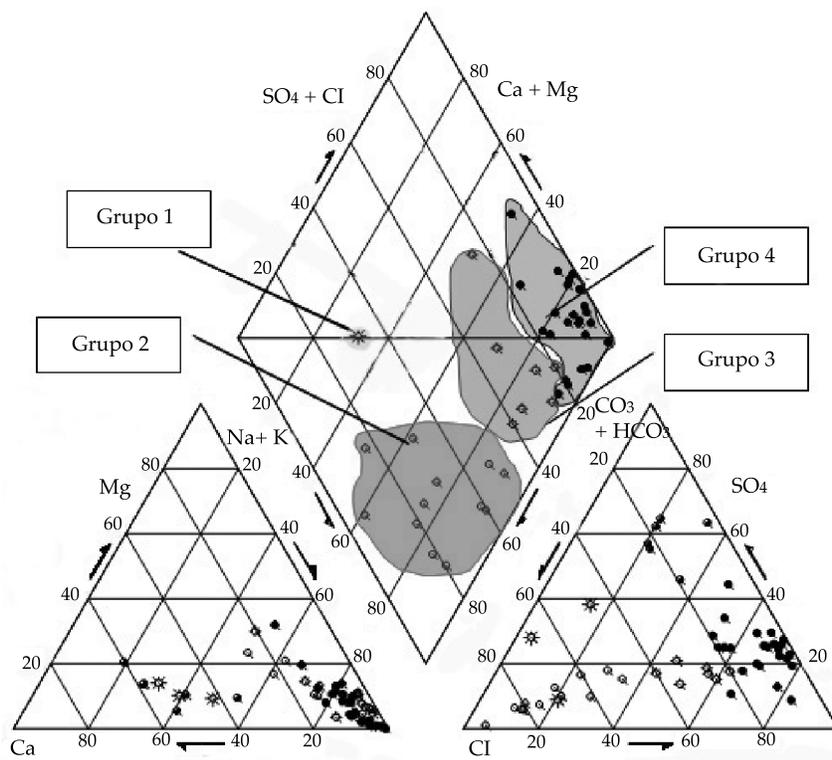


Figura 2. Distribución de los datos hidroquímicos en el diagrama de Piper-Hill (Appelo y Postma, 1993).

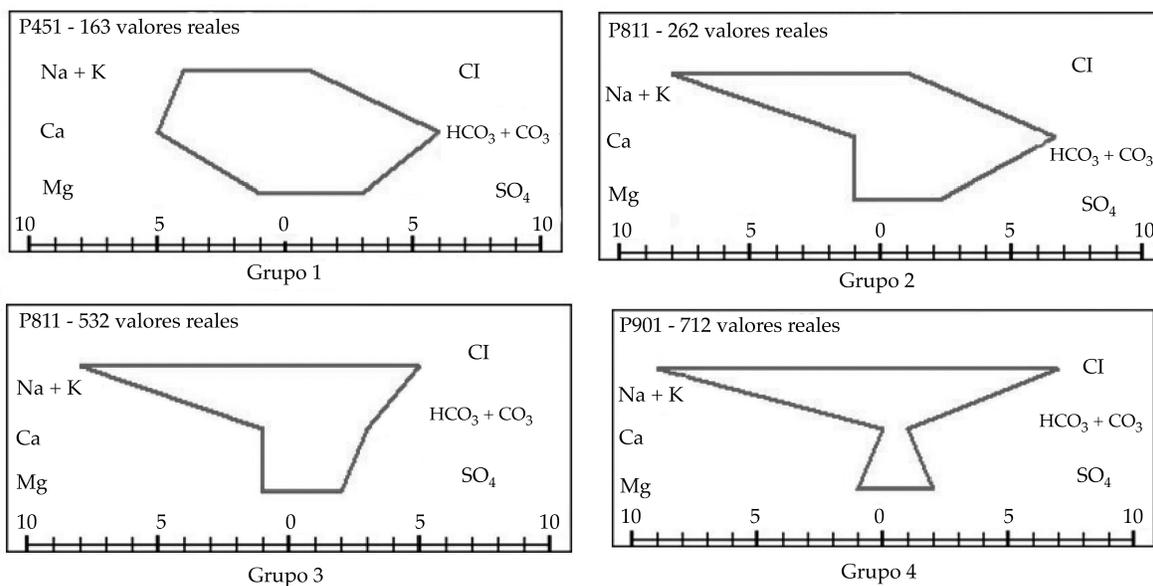


Figura 3. Patrones hidrogeoquímicos promedio de las aguas estudiadas ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$: Ca^{+2} : Mg^{+2} - Cl^- : HCO_3^- : SO_4^{-2}).

cálcica-sódica ($\text{HCO}_3 > \text{Cl-Ca} > \text{Na}$); *STD* de 141 mg.l^{-1} ; *CE* de 182 $\mu\text{S.m}^{-1}$, y un patrón hidrogeoquímico 451-163.

- Grupo 2, ocho muestras (seis pozos, dos freáticos) es bicarbonatada y bicarbonatada clorurada sódica ($\text{HCO}_3\text{-Na}$ y $\text{HCO}_3 > \text{Cl-Na}$, respectivamente); *STD* entre 530 y 3 897 mg.l^{-1} ; *CE* entre 500 y 4 860 $\mu\text{S.m}^{-1}$, y un patrón hidrogeoquímico 811-361.
- Grupo 3, ocho muestras (cinco pozos y tres freáticos) es clorurada bicarbonatada, principalmente sódica ($\text{Cl} > \text{HCO}_3\text{-Na}$); *STD* entre 531 y 4 201 mg.l^{-1} ; *CE* entre 268 y 6 510 $\mu\text{S.m}^{-1}$, y un patrón hidrogeoquímico 811-631.
- Grupo 4, 23 muestras (5 pozos, 3 freáticos y 15 lagunas) es clorurada y clorurada sulfatada sódica ($\text{Cl} > \text{SO}_4\text{-Na}$); *STD* entre 930 y 67 356 $\mu\text{S.m}^{-1}$; *CE* entre 1 510 y 75 600 $\mu\text{S.m}^{-1}$, y patrón hidrogeoquímico 811-712.

En los pozos y freáticos se describen aguas pertenecientes a los cuatro grupos, que se corresponden con diferentes flujos y tipo de zona, mientras que todas las lagunas pertenecen al grupo 4, con predominio de Cl^- y Na^+ , siendo zonas de descarga de agua subterránea de flujos intermedios (cuadro 2).

Un resultado de la clasificación realizada por grupos de agua implica que dos o más muestras pueden ser de diferente manifestación (*i.e.*, pozo o freático) y pertenecer a un mismo flujo, y por lo tanto ser la misma fuente potencial para un manejo agropecuario o forestal particular. En casos, esta clasificación permitirá establecer el riesgo hidrogeológico, al proponer una práctica de manejo en una zona que hidrogeológicamente se haya vinculada con otra. En este sentido, el que sean manifestaciones del mismo tipo no determina que el agua extraída de éstas sea necesariamente de igual origen.

Estimación de la composición química del agua a partir de la conductividad eléctrica

Tal como se comentó en la introducción, si bien el agua natural adquiere su composición

química por un complejo proceso donde intervienen diferentes factores, en un área con cierta homogeneidad, muchos de estos factores se hacen constantes, y la composición química relativa varía dentro de determinado tipo de agua y patrón hidrogeoquímico, modificándose sólo por la precipitación, ya que en el agua superficial durante periodos lluviosos, la mineralización es menor que en periodos secos.

Freatímetros

Al procesar el total de datos correspondientes a los freáticos muestreados aplicando los tres modelos de correlación matemática calculados por *SAMA* y *GEOQUIM* (línea recta con ordenada al origen diferente de cero (ecuación (3)), línea recta que pasa por el origen de coordenadas (ecuación (4)), parábola que pasa por el origen de coordenadas (ecuación (5))), las ecuaciones que resultan presentan *IS* medios, entre datos reales y estimados muy bajos, inferiores al 60% de similitud. Mejores resultados se obtienen si los datos son procesados luego de agruparlos por tipos de agua, aun cuando el número de datos es muy pequeño.

En el cuadro 3 se exponen las ecuaciones ajustadas con los datos de las muestras de los freáticos de Buenos Aires para cada grupo de agua, mediante los tres modelos de correlación matemática calculados por *SAMA* y *GEOQUIM*. Mediante este tipo de procesamiento, la similitud media varía entre 70 y 90%. En la figura 4 se presentan, a modo de ejemplo, los patrones reales y estimados de dos muestras de los grupos 1 y 2, provenientes de freáticos. Se aprecia un alto índice de similitud (*IS*) en las muestras individuales, así como el que resulta de considerar todas las muestras (*IS* medio 0.89). Esta alta relación se aprecia también en la figura 5, con una correlación entre valores reales y estimados próxima a 1.

Cuadro 3. Freatímetros de Buenos Aires. Concentración iónica (Ci) ajustada por las ecuaciones de la línea recta con intercepción diferente de cero (3), línea recta origen de coordenadas (4), y parábola con origen de coordenadas (5). Índice de similitud (IS).

| Aguas de los grupos 1 y 2 (N = 3) | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|--------------------------------|--|
| Ci | $Ci = a_1 (CE) (4)^*$ | $Ci = a_0 + a_1 (CE) (3)^{**}$ | $Ci = a_1 (CE) + A2 (CE)^2 (5)^*$ |
| HCO ₃ ⁻ | $y = 0.00791x$ | $y = 0.1029 + 0.0078x$ | $y = 0.0088502x - 1.2421 * 10 - 6x^2$ |
| Cl ⁻ | $y = 0.00183x$ | $y = -0.0727 + 0.0019x$ | $y = 0.0013921x + 5.7231 * 10 - 7x^2$ |
| SO ₄ ²⁻ | $y = 0.00082x$ | $y = -0.1446 + 0.0010x$ | $y = -0.0000570x + 1.1654 * 10 - 6x^2$ |
| Ca ²⁺ | $y = 0.00326x$ | $y = 0.0926 - 0.0031x$ | $y = 0.003755x - 6.4986 * 10 - 7x^2$ |
| Mg ²⁺ | $y = 0.00205x$ | $y = -0.1899 + 0.0023x$ | $y = 0.0014480x + 7.9794 * 10 - 7x^2$ |
| Na ⁺ +K ⁺ | $y = 0.00492x$ | $y = -0.0300 + 0.0053$ | $y = 0.004919x + 5.0777 * 10 - 7x^2$ |
| IS | 0.948 | 0.933 | 0.941 |
| Aguas del grupo 3 (N = 3) | | | |
| Ci | $Ci = a1 (CE)$ | $Ci = a_0 + a_1 (CE)$ | $Ci = a_1 (CE) + A2 (CE)^2$ |
| HCO ₃ ⁻ | $y = 0.002278x$ | $y = 1.4017 + 0.0020x$ | $y = 0.004988x - 4.4838 * 10 - 7x^2$ |
| Cl ⁻ | $y = 0.005978x$ | $y = -1.1680 + 0.0060x$ | $y = 0.06489x - 8.7366 * 10 - 8x^2$ |
| SO ₄ ²⁻ | $y = 0.001495x$ | $y = -0.2210 + 0.0015x$ | $y = 0.000411x + 1.8554 * 10 - 7x^2$ |
| Ca ²⁺ | $y = 0.000357x$ | $y = 0.5416 + 0.0003x$ | $y = 0.000506x - 2.5517 - 8x^2$ |
| Mg ²⁺ | $y = 0.001007x$ | $y = -0.1536 + 0.0010x$ | $y = 0.001892x - 1.5151 * 10 - 7x^2$ |
| Na ⁺ +K ⁺ | $y = 0.008174x$ | $y = 1.1723 + 0.0080x$ | $y = 0.009426x - 2.1415 * 10 - 7x^2$ |
| IS | 0.909 | 0.900 | 0.909 |
| Aguas del grupo 4 (N = 3) | | | |
| Ci | $Ci = a1 (CE)$ | $Ci = a_0 + a_1 (CE)$ | $Ci = a_1 (CE) + A2 (CE)^2$ |
| HCO ₃ ⁻ | $y = 0.000934x$ | $y = 0.8118 + 0.0008x$ | $y = 0.001197x - 3.6441 * 10 - 8x^2$ |
| Cl ⁻ | $y = 0.008631x$ | $y = -2.9550 + 0.0096x$ | $y = 0.007599x + 1.4301 * 10 - 7x^2$ |
| SO ₄ ²⁻ | $y = 0.000830x$ | $y = 2.3489 + 0.0007x$ | $y = 0.001534x - 9.7619 * 10 - 8x^2$ |
| Ca ²⁺ | $y = 0.000662x$ | $y = -4.3398 + 0.0026x$ | $y = 0.00043x + 3.1745 * 10 - 8x^2$ |
| Mg ²⁺ | $y = 0.000625x$ | $y = -5.3495 + 0.0031x$ | $y = 0.00019x + 8.0430 * 10 - 10x^2$ |
| Na ⁺ +K ⁺ | $y = 0.009252x$ | $y = 12.0331 + 0.0042x$ | $y = 0.00888x + 5.1209 * 10 - 8x^2$ |
| IS | 0.934 | 0.812 | 0.871 |

*SAMA, **GEOQUIM. CE: conductividad eléctrica uS/m.

Pozos

Aplicando los tres métodos de ajuste matemático indicados, en ecuaciones (3), (4), y (5), con todos los datos hidroquímicos, se obtienen índices de similitud de 80 y 94% para los datos reales y los estimados, respetivamente. Al igual que en las aguas de los freáticos, el IS mejora cuando se ajusta por grupo de agua (cuadro 2), especialmente mediante el modelo de la parábola (IS medio entre 0.90 y 0.94), tal como se aprecia en el cuadro 4. En la figura 6 se presentan a modo de ejemplo los patrones reales y estimados de dos muestras del

grupo 4, provenientes de pozos, con valores extremos en STD. Al igual que lo señalado en freáticos, se aprecia un índice de similitud muy alto en dichas muestras, y en el IS medio de todas las muestras (IS 0.9). Igualmente, el coeficiente de correlación entre valores reales y estimados en pozos resultó relativamente alto (figura 7).

Lagunas

El agua de todas las lagunas corresponde al grupo 4, por lo que constituye un grupo homogéneo, con diagramas de Stiff semejantes

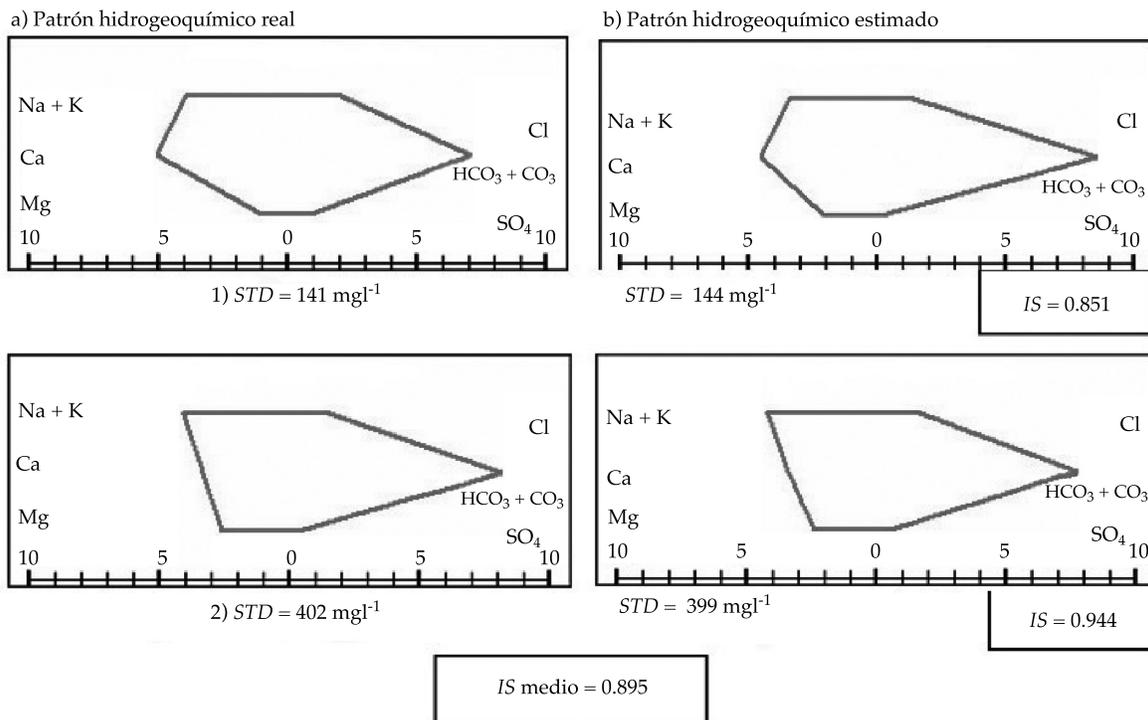


Figura 4. Comparación entre patrones hidrogeoquímicos y STD de valores reales a) y estimados b) por modelación hidrogeoquímica (modelo $y = a_1x + a_2x^2$). Muestras 1) núm. 10 y 2) núm. 17 (freatímetros, grupos 1 y 2, respectivamente). Índice de similitud (IS).

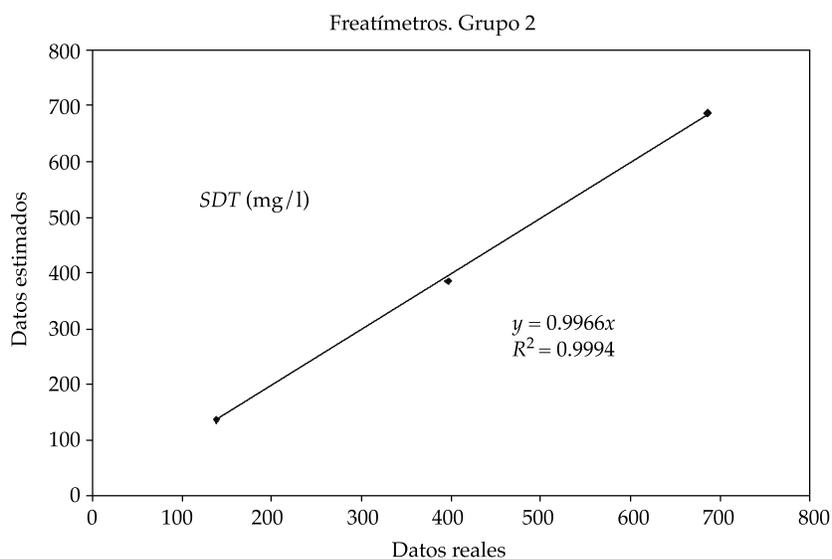


Figura 5. Relación entre valores reales y estimados por modelación matemática. Freatímetros, grupo 2.

Cuadro 4. Pozos de Buenos Aires. Concentración iónica (C_i) ajustada por las ecuaciones de la línea recta con intercepción diferente de cero (ecuación (3)), línea recta origen de coordenadas (ecuación (4)), y parábola con origen de coordenadas (ecuación (5)). Índice de similitud (IS) con muestras agrupadas por tipo de agua.

| Aguas del grupo 2 (N = 6) | | | |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| C_i | $C_i = a1$ (CE) (4) * | $C_i = a0 + a1$ (CE) (3) ** | $C_i = a1$ (CE) + A2 (CE)2 (5) * |
| HCO ₃ ⁻ | $y = 0.00598x$ | $y = 3.9216 + 0.0048x$ | $y = 0.008895x - 7.4612 * 10^{-7}x^2$ |
| Cl ⁻ | $y = 0.00317x$ | $y = -3.1264 + 0.0041x$ | $y = 0.000756x + 6.1756 * 10^{-7}x^2$ |
| SO ₄ ²⁻ | $y = 0.00173x$ | $y = -1.0024 + 0.0020x$ | $y = 0.001461x + 6.9267 * 10^{-8}x^2$ |
| Ca ²⁺ | $y = 0.00033x$ | $y = 1.5399 - 0.0001x$ | $y = 0.001236x - 2.3244 * 10^{-7}x^2$ |
| Mg ²⁺ | $y = 0.00097x$ | $y = 1.0271 + 0.0007x$ | $y = 0.001654x - 1.7498 * 10^{-7}x^2$ |
| Na ⁺ +K ⁺ | $y = 0.01032x$ | $y = -3.5705 + 0.0114x$ | $y = 0.00814x + 5.5879 * 10^{-7}x^2$ |
| IS | 0.824 | 0.910 | 0.922 |
| Aguas del grupo 3 (N = 5) | | | |
| C_i | $C_i = a1$ (CE) | $C_i = a0 + a1$ (CE) | $C_i = a1$ (CE) + A2 (CE)2 |
| HCO ₃ ⁻ | $y = 0.00254x$ | $y = 2.5008 + 0.0021x$ | $y = 0.003074x - 7.5711 * 10^{-8}x^2$ |
| Cl ⁻ | $y = 0.00623x$ | $y = -5.7638 + 0.0072x$ | $y = 0.004270x + 2.7615 * 10^{-7}x^2$ |
| SO ₄ ²⁻ | $y = 0.00139x$ | $y = 1.6923 + 0.0011x$ | $y = 0.002155x - 1.0716 * 10^{-7}x^2$ |
| Ca ²⁺ | $y = 0.00021x$ | $y = 0.0945 + 0.0002x$ | $y = 0.000227x - 1.0671 * 10^{-9}x^2$ |
| Mg ²⁺ | $y = 0.00063x$ | $y = 0.4454 - 0.0006x$ | $y = 0.000776x - 2.0243 * 10^{-8}x^2$ |
| Na ⁺ +K ⁺ | $y = 0.00908x$ | $y = -0.7786 + 0.0092x$ | $y = 0.008693x + 5.4919 * 10^{-8}x^2$ |
| IS | 0.898 | 0.883 | 0.918 |
| Aguas del grupo 4 (N = 5) | | | |
| C_i | $C_i = a1$ (CE) | $C_i = a0 + a1$ (CE) | $C_i = a1$ (CE) + A2 (CE)2 |
| HCO ₃ ⁻ | $y = 0.00035x$ | $y = 5.2474 + 0.0001x$ | $y = 0.00848x - 1.5648 * 10^{-8}x^2$ |
| Cl ⁻ | $y = 0.00747x$ | $y = -6.4551 + 0.0077x$ | $y = 0.00666x + 2.5261 * 10^{-8}x^2$ |
| SO ₄ ²⁻ | $y = 0.00204x$ | $y = 2.2961 + 0.0019x$ | $y = 0.00230x - 8.1702 * 10^{-9}x^2$ |
| Ca ²⁺ | $y = 0.00049x$ | $y = 0.8168 + 0.0005x$ | $y = 0.00055x - 1.5839 * 10^{-9}x^2$ |
| Mg ²⁺ | $y = 0.001456x$ | $y = -3.7100 - 0.0016x$ | $y = 0.00064x + 2.5504 * 10^{-8}x^2$ |
| Na ⁺ +K ⁺ | $y = 0.00761x$ | $y = 3.4689 + 0.0075x$ | $y = 0.00759x + 5.6518 * 10^{-10}x^2$ |
| IS | 0.855 | 0.889 | 0.869 |

* SAMA, **GEOQUIM. CE: conductividad eléctrica $\mu S/m$.

a los presentados en la figura 5 en pozos, también del grupo 4. Igualmente, el ajuste por IS entre valores reales y estimados fue muy alto (IS , 0.9), al igual que la correlación (r , 0.9). En el cuadro 5 se exponen las ecuaciones ajustadas con los datos de las muestras de las lagunas mediante los tres modelos de correlación matemática mencionados (SAMA y GEOQUIM) y los IS medios.

Los mejores ajustes se obtienen con el modelo polinomial de segundo grado (0.90 de IS medio entre los datos reales y los obtenidos por modelación).

Si bien existe un ajuste adecuado por todos los procedimientos utilizados para estimar

las concentraciones iónicas a partir de la CE , en el caso de pozos y lagunas se obtuvieron mejores resultados utilizando la ecuación del polinomio de segundo grado (parábola) y, en segundo término, la línea recta con ordenada al origen diferente de cero.

Fagundo *et al.* (1993a, 1996) encontraron que en Cuba, la composición química del agua de diferentes sitios, agrupada por la litología común, en el modelo de la línea recta que pasa por el origen de coordenadas, resultó satisfactorio (IS , 0.880 y 0.930). Sin embargo, Fagundo *et al.* (1993b) y Vinardell *et al.* (1999) encuentran que cuando existe mezcla de aguas, como sucede en pozos de extracción en

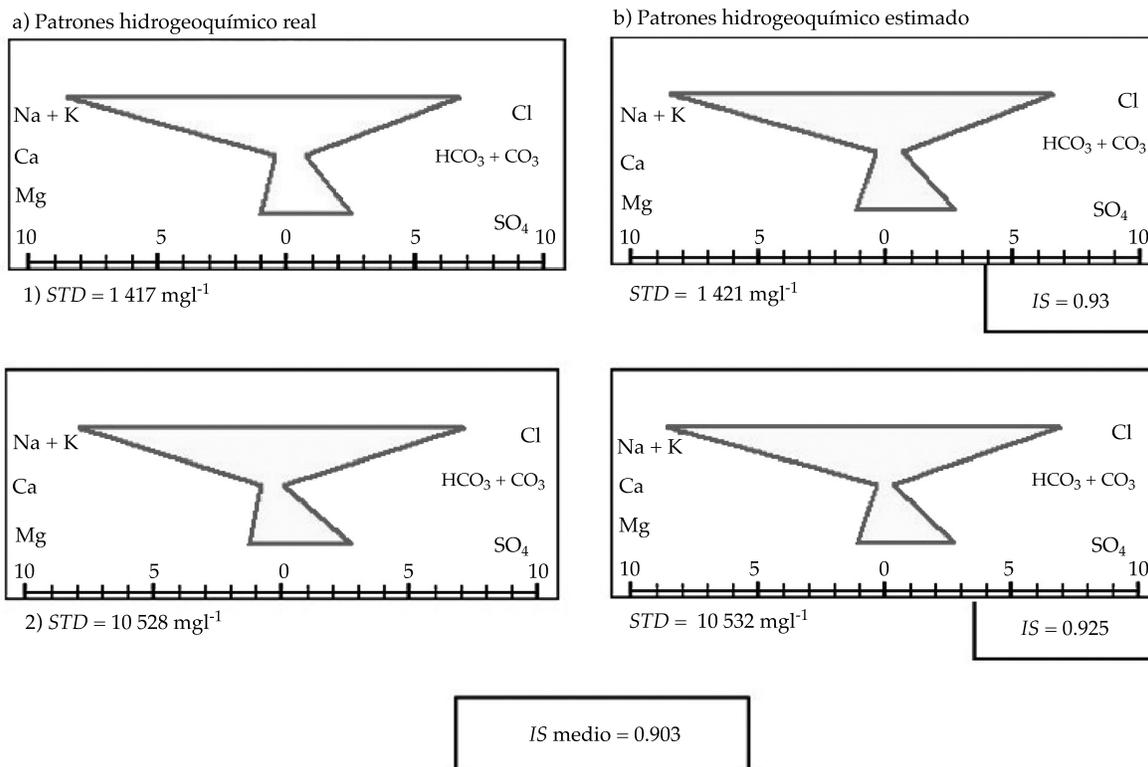


Figura 6. Comparación entre patrones hidrogeoquímicos y STD de datos reales a) y estimados b) por modelación hidrogeoquímica (modelo $y = a_1x + a_2x^2$). Muestras: 1) núm. 24 y 2) núm. 4 (pozos, grupo 4). Índice de similitud (IS).

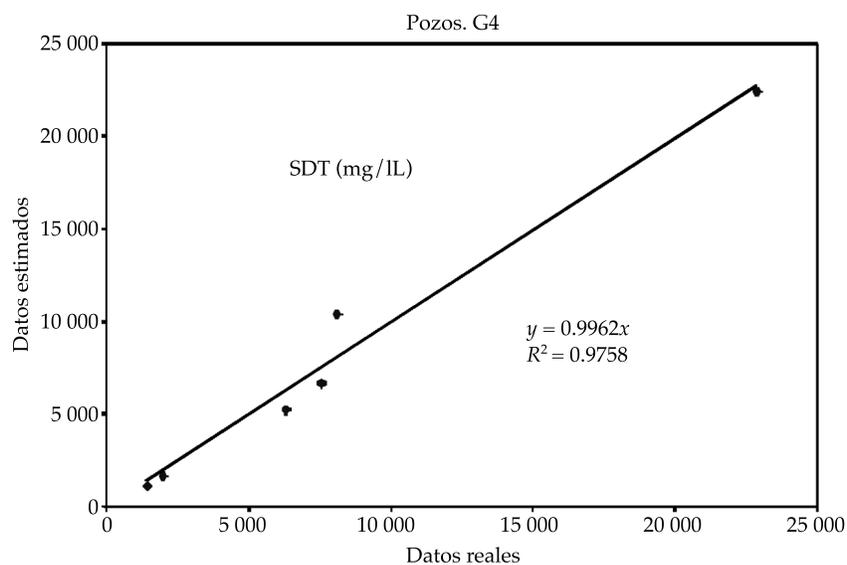


Figura 7. Relación entre valores reales y estimados por modelación matemática de STD; Pozos, grupo 4.

Cuadro 5. Agua de lagunas. Concentración iónica (C_i) ajustada por las ecuaciones de la línea recta con intercepción diferente de cero (ecuación (3)), línea recta origen de coordenadas (ecuación (4)), y parábola con origen de coordenadas (ecuación (5)). Índice de similitud (IS).

| C_i | $C_i = a1 (CE) (4) *$ | $C_i = a0 + a1 (CE) (3) **$ | $C_i = a1 (CE) + A2 (CE)^2 (5) *$ |
|--------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| HCO_3^- | $y = 0.00033x$ | $y = 3.3192 + 0.0002x$ | $y = 0.00049x - 2.5599 * 10^{-9}x^2$ |
| Cl^- | $y = 0.00881x$ | $y = -27.0151 + 0.0095x$ | $y = 0.00712x + 2.7357 * 10^{-8}x^2$ |
| SO_4^{2-} | $y = 0.003721x$ | $y = -8.9577 + 0.0039x$ | $y = 0.00299x + 1.1822 * 10^{-8}x^2$ |
| Ca^{2+} | $y = 0.000001x$ | $y = 4.6755 - 0.00003x$ | $y = 0.00051x - 6.5428 * 10^{-9}x^2$ |
| Mg^{2+} | $y = 0.000378x$ | $y = 13.2306 + 0.0005x$ | $y = 0.00150x - 1.7989 * 10^{-8}x^2$ |
| $Na^+ + K^+$ | $y = 0.01243x$ | $y = -49.4665 + 0.0137x$ | $y = 0.00872x + 5.9621 * 10^{-8}x^2$ |
| IS | 0.764 | 0.839 | 0.910 |

*SAMA, **GEOQUIM. CE: conductividad eléctrica uS/m.

acuíferos costeros por efecto de intrusión de agua salada, los mejores resultados se obtienen aplicando el modelo polinomial de segundo grado, agrupando previamente las muestras mediante el método de reconocimiento de patrones ante un número elevado de patrones hidrogeoquímicos. Lo señalado por estos autores es coincidente con lo obtenido en el presente estudio, ya que las muestras tuvieron una gran variabilidad en sus propiedades físico-químicas según la manifestación, tipo de flujo y zona de recarga o descarga dentro de éstos.

Es posible disponer de un procedimiento que permite estimar la concentración iónica a partir de la CE , considerando los principios de Tóth (2000) relativos al funcionamiento del agua subterránea, y definir las zonas que mejor se adapten para un manejo agropecuario-forestal determinado, tal como proponen Heuperman *et al.* (2002), Tomar (2007) y Alconada *et al.* (2009), en forma sencilla y a bajo costo. Esto resulta de gran importancia en ambientes sujetos a la alternancia de sequía e inundación, y donde la superficie freática es poco profunda, tal como se produce en el área del presente estudio. En coincidencia con Miller *et al.* (1988), en este estudio se correlacionó satisfactoriamente la CE teórica y la medida en el campo, partiendo de conocer la litología del sitio y aplicando los programas propuestos.

Debido a que en el presente estudio no se contó con datos muestreados de manera

sistemática (al menos mensualmente durante uno o dos años), no fue posible evaluar el efecto del ciclo hidrológico (precipitación-sequía) sobre la composición química del agua en las diferentes manifestaciones y lagunas. Se recomienda que esto sea abordado en futuros estudios, para determinar con más precisión los modelos de correlación matemática aquí obtenidos.

Conclusiones

Se logró establecer el objetivo del presente estudio de utilizar los modelos hidrogeoquímicos propuestos para estimar la composición química del agua a partir de su conductividad eléctrica. En efecto, la composición química del agua, concentración de iones, puede ser definida mediante estimaciones matemáticas a partir del valor de la conductividad eléctrica. Los mejores ajustes en el Noroeste Bonaerense se logran procesando datos hidroquímicos por grupos de agua mediante el método de reconocimiento de patrones y utilizando el modelo matemático del polinomio de segundo grado (parábola que pasa por el origen de coordenadas). Este procedimiento posibilita plantear la selección de prácticas de manejo a partir de la definición del tipo de flujo de agua subterránea, efectuando mediciones de campo sencillas y de bajo costo, como CE , temperatura, pH, y considerando además otros elementos del paisaje, como suelo, geomorfología, y vegetación;

información que permite tener un conocimiento sobre el sistema de flujo muestreado y su zona de recarga, descarga o tránsito correspondiente.

Recibido: 29/11/2011

Aceptado: 23/08/2013

Referencias

- ALCONADA-MAGLIANO, M.M. *Procesos de inundación en el sector de Médanos Longitudinales del Noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Su relación con vegetación, suelo, agua, y clima. Opciones de desarrollo.* Tesis de Doctorado en Geografía. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, 2008, 598 pp. y anexos.
- ALCONADA-MAGLIANO, M.M., BUSSONI, A., ROSA, R. y CARRILLO-RIVERA, J.J. El bio-drenaje para el control del exceso hídrico en Pampa Arenosa, Buenos Aires, Argentina. *Investigaciones Geográficas, Boletín.* Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 68, 2009, pp. 50-72.
- ALCONADA-MAGLIANO, M.M., FAGUNDO-CASTILLO, J.R., CARRILLO-RIVERA, J.J., and HERNÁNDEZ, P.G. Origin of Flooding Water through Hydrogeochemical Identification, the Buenos Aires Plain, Argentina. *Environmental Earth Sciences.* Vol. 64, No. 1, 2011, pp. 57-71.
- ÁLVAREZ, E., VINARDEL, I., FAGUNDO, J.R., REGUERA, E. y CARDOSO M.E. Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales. II- Sistema Automatizado para el Monitoreo de las Aguas. *Voluntad Hidráulica.* Núm. 83, 1990, pp. 15-25.
- ÁLVAREZ, E., VINARDELL, I., FAGUNDO, J.R. y RODRÍGUEZ, J.E. Sistemas para el procesamiento de datos hidroquímicos: SAPHIQ, GEOQUIM, SAMA y BATOMET. En *Libro de Comunicaciones I Taller sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas.* Castellón, España: Editorial Universidad Jaume I, 1993, pp. 189-194.
- APPELO, C.A.J. and POSTMA, D. *Geochemistry, Groundwater and Pollution.* Rotterdam: Ed. Balkema, 1993, 536 pp.
- APHA, AWWA, WEF. *Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater.* Vol. 17. Washington, DC: American Public Health Association (APHA), the American Water Works Association (AWWA), and the Water Environment Federation (WEF), 1989.
- CARRILLO-RIVERA, J.J. Application of the Groundwater-Balance Equation to Indicate Interbasin and Vertical Flow in Two Semi-Arid Drainage Basins. *Hydrogeology Journal.* Vol. VIII, No. 5, 2000, pp. 503-520.
- DANGAVS, N. *Los ambientes acuáticos de la provincia de Buenos Aires.* XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata, Capítulo XIII, 2005, pp. 219-236.
- ETCHICHURY, M.C., TOFALO O.R. y FORZINETTI, M.E. Composición psamítica de sedimentos actuales de la provincia de Buenos Aires y su significado tectónico. *Actas Seg. Tour. Geológico Bonaerense, Bahía Blanca,* 1988, pp. 419-428.
- FAGUNDO, J.R. Caracterización de acuíferos mediante relaciones entre contenidos iónicos y parámetros químico-físicos. *CENIC Ciencias Químicas.* Vol. XVI, núm. 2, 1985, pp. 321-325. http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/1990_Fagundo_Hydrogeological.pdf.
- FAGUNDO, J.R. Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales. Efecto de los factores geológicos, hidrogeológicos y ambientales. *Hidrogeología.* Vol. 5. Granada, 1990, pp. 33-46.
- FAGUNDO, J.R. Patrones hidrogeoquímicos y relaciones matemáticas en aguas naturales. *Ingeniería Hidráulica.* Vol. XIX, núm. 2, 1998, pp. 62-78.
- FAGUNDO, J.R. y RODRÍGUEZ, J. Hydrogeochemical Pattern and Mathematical Correlations in Karst at the Examples of Cuba. *Proc. Int. Conference Environmental Changes in Karst Areas, Italy,* No. 13, 1991, pp. 361-369.
- FAGUNDO, J.R. and RODRÍGUEZ, J. Hydrogeochemical Pattern and Mathematical Correlations in Karst at the Examples of Cuba. *Newsletter Geology, Climate and Karst Formation.* Guilin, China: Inst. of Karst Geology, 1992, pp. 41-45.
- FAGUNDO, J.R., ÁLVAREZ, E., BENÍTEZ, G., FERRERA, V. y VEGA, J. *Simulación química y matemática de la disolución de rocas carbonatadas por las aguas naturales.* Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, CUBAIDIS, La Habana, 1992, Vol. 1, pp. 152-157.
- FAGUNDO, J.R., RODRÍGUEZ, J.E., PAJÓN, J.M., FRANCO, E., BENÍTEZ, G., RODRÍGUEZ, A.C., GÜERÓN, J. y ABELLÓ, I. Caracterización hidroquímica de las aguas del Pan de Guajaibón y otras áreas cársicas cercanas a la Sierra del Rosario. En *Libro de Comunicaciones. I Taller sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas.* Castellón, España: Ed. Univ. Jaume I, 1993a, pp. 43-53.
- FAGUNDO, J.R., RODRÍGUEZ-BENÍTEZ, G., MORERA, W., FERNÁNDEZ, C. y VEGA J. Caracterización hidroquímica y control de la calidad de las aguas del curso de la cuenca Zapata. En *Libro de Comunicaciones. I Taller sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas.* Castellón, España: Ed. Univ. Jaume I, 1993b, pp. 73-81.
- FAGUNDO, J.R., VALDÉS, J.J. y RODRÍGUEZ, J.E. *Hidroquímica del Karst.* Granada: Univ. Granada, 1996, pp. 304.
- FAGUNDO, J.R., GONZÁLEZ, P., RODRÍGUEZ, M., SUÁREZ, M. y MELIÁN C. Aplicaciones de la Cinética en la Hidrogeología y el Medio Ambiente. *Contribución a la Educación y la Protección Ambiental.* Núm. 5, 2004, pp. 80-89.
- FAGUNDO, J.R., GONZÁLEZ, P., SUÁREZ-MUÑOZ, M., FAGUNDO-SIERRA, J., MELIÁN, C. y ÁLVAREZ E.

- HIDROGEOQUIM. *Contribución a la Educación y Protección Ambiental*. Núm. 6, 2005, pp. 58-67.
- FAGUNDO, J.R., GONZÁLEZ, P., FAGUNDO-SIERRA, J., ÁLVAREZ, E., SUÁREZ, M., and MELIÁN, C. Application of hidrogeochemical modeling to characterization and water quality control of coastal karst aquifer. In: (ed) S. Demuth, A. Gustard, E. Planos, F. Scatena, E. Servat. *Climate Variability and Change Hydrological impacts*. Netherlands: International Association of Hydrological Sciences Publication, 2006, pp. 596-600.
- FAGUNDO-SIERRA, J., FAGUNDO, J.R., GONZÁLEZ, P. y SUÁREZ, M. Modelación de las aguas naturales. *Contribución a la Educación y la Protección Ambiental*. Vol. VII, núm. 2, 2001, pp. 1-8.
- GONZÁLEZ, N. *Los ambientes hidrogeológicos de la provincia de Buenos Aires*. XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata, Capítulo XXII, 2005, pp. 359-374.
- HEUPERMAN, A.F., KAPOOR, A.S., and DENECKE, H.W. *Biodrainage. Principles, experiences and applications*. International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage, Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO, 2002, 79 pp.
- MILLER, R.L., BRADFORD, W.L., and PETERS, N.E. Specific Conductance: Theoretical Considerations and Application to Analytical Quantity Control. *U.S. Geological Survey Water-Supply*. No. 2311, 1988, pp. 1-21.
- MONCAUT, C.A. Inundaciones y sequías tienen raíces añejas en la pampa bonaerense (1576-2001). En Maiola, O., Gabellone, N. y Hernández, M. (editores). *Inundaciones en la región pampeana*. La Plata, Argentina: Universidad Nacional de La Plata, 2003, pp. 27-48.
- PMI. Informe Plan Maestro Integral Cuenca del Río del Salado. Informe tirada reducida. Ministerio de Economía de la Provincia de Buenos Aires-Halcrow-Banco Mundial, 1999, La Plata, Buenos Aires, Argentina, 1300 pp.
- STIFF, H.A. The Interpretation of Chemical Water Analysis by Means of Pattern. *Petroleum Technology*. No. 3, 1951, pp. 15-17.
- TÓTH, J. Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero*. Instituto Geológico Geominero. Vol. III, núm. 4, 2000, pp. 9-25.
- TOMAR, O.S. Bio-Drainage: Performance of Various Tree Species as Effective Bio-Drain Material. In: Ambast, S.K., Gupta, S.K., and Singh, Gurbachan (editors). *Agricultural Land Drainage: Reclamation of Waterlogged Saline Lands*. Karnal, India: Central Soil Salinity Research Institute, 2007, pp. 213-221.
- VINARDELL, I., TILLÁN, G., FAGUNDO, J.R. y ONTIVERO, E. Un método para la clasificación e identificación de las aguas mediante patrones hidrogeoquímicos. *Revista Ciencias Químicas*. Vol. XXXI, núm.1, 1999, pp. 14-20.
- ZÁRATE, M. y RABANESSE, J. *Geomorfología la provincia de Buenos Aires*. XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata, 2005, capítulo VIII, pp. 119-138.

Dirección institucional de los autores

Dr. Juan R. Fagundo-Castillo
Dra. Patricia González-Hernández

Facultad de Química
Universidad de La Habana
Zapata s/n entre G y Carlito Aguirre,
Municipio Plaza de la Revolución
Provincia La Habana, CUBA
Teléfono: +53 (7) 2021 871
juanrfag@infomed.sld.cu
patricia@instec.cu

Dra. Margarita M. Alconada-Magliano

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales
Universidad Nacional de La Plata
y CISAUA (Ministerio de Asuntos Agrarios)
Calle 3, núm. 584 (1900) La Plata, ARGENTINA
margaalconada@yahoo.com.ar
Teléfono: +54 (221) 4229 923

Dr. J. Joel Carrillo-Rivera

Departamento de Geografía Física
Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Coyoacán
04510 México, D.F., México
Teléfono: +52 (55) 5623 0222, extensión 45467
joeljcr@igg.unam.mx