

Caracterización de la intrusión salina en la subcuenca Najasa, cuenca Costera Sur de Camagüey, Cuba

Characterization of saltwater intrusion in Najasa subbasin, South Coast Basin of Camagüey, Cuba

Gladis Yera Digat 1, * <https://orcid.org/0000-0003-0568-8775>

Irenis Abad Ramírez 2, <https://orcid.org/0000-0001-8757-8523>

Martha de la Caridad Suárez Acuña 2, <https://orcid.org/0000-0002-4418-5698>

1 Facultad de Construcciones. Universidad de Camagüey, Cuba.

2 Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Camagüey, Cuba.

*Autor para la correspondencia: gladis.yera@reduc.edu.cu

RESUMEN

La cuenca Costera Sur de Camagüey es un acuífero cársico abierto al mar donde se cuantifican los mayores volúmenes de agua subterránea de la provincia, pero se ha producido el deterioro de sus características de calidad debido al avance de la cuña salina, la subcuenca Najasa es la más afectada. En esta investigación se presenta la evolución hidrogeoquímica en superficie y profundidad, en la subcuenca Najasa, a partir del monitoreo sistemático de la hidrogeoquímica, mediante el uso de métodos hidroquímicos y estadísticos. Se logra cuantificar la proporción de agua de mar presente en las muestras analizadas, las reacciones que determinan su composición química y los cambios hidrogeoquímicos que provoca la intrusión salina.

Palabras clave: acuíferos cársicos costeros, estadística multivariada, hidrogeoquímica, intrusión salina, modelación hidrogeoquímica inversa

ABSTRACT

Coast Basin of Camagüey is an open karstic aquifer to the sea where is quantified the largest volumes of groundwater in the province, but there has been deterioration of their quality characteristics due to the advancement of the salt wedge, the Najasa subbasin is the most affected. This research presents the hydrogeochemical evolution in surface and depth, in the Najasa sub-basin, from the systematic monitoring of hydrogeochemistry, through the use of hydrochemical and statistical methods. It is possible to quantify the proportion of seawater present in the analyzed samples, the reactions that determine its chemical composition and the hydrogeochemical changes caused by saline intrusion.

Keywords: coastal karstic aquifers, hydrogeochemistry, saltwaterintrusion, inversehydrogeochemical modeling, multivariate statistics

Recibido: 26/1/2022

Aceptado: 28/4/2022

Introducción

Las características hidrogeoquímicas de los acuíferos costeros están influenciadas por las propiedades físicas del medio, los factores de alimentación (fundamentalmente asociado al régimen de lluvias) y la explotación a que están sometidas sus reservas. El inconveniente del uso del agua subterránea radica en la mala utilización de la misma en forma de sobre bombeo, contaminación, intrusión salina y conexión de acuíferos de características hidroquímicas distintas (González, 2003). Estos acuíferos generalmente se encuentran en estado libre, en relación hidráulica con el mar, donde se establece un equilibrio dinámico entre el agua dulce que drena al mar a través de los conductos cársicos y el agua marina que penetra en el acuífero por los mismos conductos (Fagundo et al. 1996) este proceso se conoce con el nombre de intrusión salina y afecta a muchos de los acuíferos cársicos costeros. En Cuba la intrusión salina presenta alta incidencia.

En la provincia de Camagüey el 20% del volumen del agua para el riego, la industria y el abasto a la población es aportado por acuíferos cársicos costeros. La cuenca Costera Sur de Camagüey que aporta el 82% del volumen total de agua subterránea extraída en la provincia, se encuentra afectada por la intrusión salina, la subcuenca Najasa es la más afectada. Con el objetivo de cuantificar la proporción de agua de mar y los cambios hidrogeoquímicos que provoca la intrusión salina en la superficie y en profundidad, fue seleccionado el pozo B7-N.

Caracterización del área de estudio y métodos empleados

El estudio del drenaje pluvial se asienta en la actualidad en dos ramas fundamentales; la aplicación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en nuevos condominios residenciales, y métodos tradicionales adoptando medidas estructurales y no estructurales en urbanizaciones existentes; en la actualidad ambas tendencias son combinadas con el propósito de lograr la mayor eficiencia de la infraestructura pluvial. La Hidrología Urbana es la ciencia que se encarga de estudiar los procesos de lluvia-escorrentía en estos entornos, y generalmente, la Hidráulica de Canales es la ciencia que se dedica al estudio del tránsito-hidrograma mediante estructuras de conducción-deposición.

Características de la Cuenca

La cuenca Costera Sur de Camagüey ha sido dividida por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) en cuatro subcuencas (Florida, Vertientes, Sierra Maestra y Najasa) y 16 sectores de explotación. La subcuenca Najasa ocupa un área de 410 km² que territorialmente corresponde con parte del municipio Santa Cruz del Sur (figura 1).

En la cuenca, sobre el basamento, yace la cobertura platforma del Neógeno de carácter neoautóctono del Mioceno temprano, que la componen las formaciones Arroyo Palma y Güines, que pueden alcanzar espesores entre 250 y 300m. La Formación Arroyo Palma se presenta en pequeños afloramientos de aleurolitas blancuzcas hasta amarillo cremoso, arcillas, margas muy calcáreas (sin estratificación clara) y calizas arcillosas cavernosas con distribución regular tanto en dirección vertical como horizontal. Puede estar cubierta por la Formación Güines o por depósitos del Cuaternario.

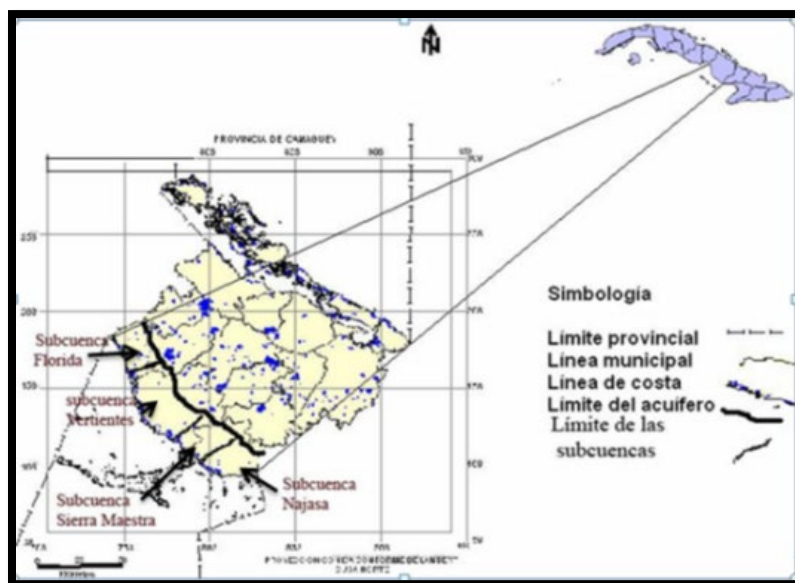


Fig. 1. – Ubicación del área de estudio.

La Formación Güines se compone de calizas fuertes, masivas, cristalinas, blancas hasta rosadas, muy cavernosas, con organismos marinos y lentes de arcillas y en la parte inferior se intercalan calizas arcillosas hasta margas, sus rocas se encuentran fuertemente recrystalizadas o dolomitizadas; generalmente yace concordante sobre la Formación Arroyo Palma y raramente sobre rocas paleogénicas. En el área el carso tiene un desarrollo diferenciado: al norte las calizas carsificadas alcanzan un espesor de 20-25m; al sur predominan las calizas arcillosas y la carsificación disminuye, hasta cerca de la línea costera donde se presenta en el perfil rocas no afectadas por el proceso de carsificación. Ambas formaciones constituyen un complejo acuífero de rocas carbonatadas que es la principal fuente de agua subterránea en el área, las rocas cuaternarias modifican el carácter del flujo subterráneo. Su alimentación está dada por las precipitaciones; la circulación es cársico fisural, a través de canales aislados entre o a través de grandes corrientes de agua.

En la subcuenca Najasa se reportan precipitaciones muy bajas y existe una alta demanda hídrica atmosférica. El escurrimiento superficial es muy bajo, las vías pluviales generalmente se mantienen secas o con muy bajo caudal. La intensa carsificación determina un alto nivel de infiltración y un pobre desarrollo de la red hidrográfica, influenciado por la existencia de obras hidráulicas. La dirección del flujo subterráneo regional es de NE a SW. El coeficiente de filtración promedio es de 130 m/día. El agua subterránea de la subcuenca es usada para riego de cultivos de caña de azúcar y pastos y para abasto a la población. El régimen de explotación no ha sido homogéneo en el tiempo, se destacan las extracciones a través de pozos de 30-40 m de profundidad, caudales de explotación entre 50-90 L/s, aunque puede llegar hasta 250-300 L/s. Las reservas disponibles anuales alcanzan los 31,7 Hm³.

Información utilizada

Para la investigación hidroquímica de la subcuenca Najasa fue seleccionado el pozo batimétrico B7-N perteneciente al INRH, en el período de 1997 a 2015. Este pozo se encuentra en el límite oriental de la cuenca, a 15 km de la costa, con coordenadas 396,688 este y 237,398 norte, cota topográfica de 12,80 m y profundidad total de 66,4 m. Para el estudio se cuenta

con 32 muestras en la superficie del pozo, 30 muestras a 15,0 m, 20 muestras a 30,0 m y 16 a 66,4 m.

Métodos hidroquímicos

El análisis químico de las muestras fue realizado mediante los métodos estándares (APHA/AWWA/WPCF, 1980) que incluye la determinación de los macroconstituyentes (CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+), las SST (sales solubles totales), el *ph* y la conductividad eléctrica. Para valorar si el ciclo hidrológico influye notablemente en la composición química del agua subterránea en la cuenca Costera Sur de Camagüey fueron comparados los valores medios de los macroconstituyentes fundamentales del agua y las SST en los pozos, para los distintos períodos hidrológicos, se observa que al finalizar el período seco es más alto que al terminar el período húmedo, pero esta diferencia, según la prueba de suma de rangos para $\alpha = 0,01$, generalmente es no significativa, por lo que se asume que los procesos que traen consigo el incremento de los contenidos de los distintos macroconstituyentes del agua se encuentran en equilibrio dinámico con los procesos de precipitación, todas las observaciones conforman una muestra única (Yera, 2012).

En el análisis hidroquímico se emplea la clasificación propuesta por Kurlov que permite destacar el contenido de los iones más abundantes en el agua investigada. Dentro de los índices hidrogeoquímicos, se emplea el propuesto por Simpson; el ion cloruro es dominante en el agua de mar, mientras que se encuentra en pequeñas cantidades en el agua subterránea; sin embargo, el ion bicarbonato usualmente está en grandes cantidades en el agua subterránea, mientras que es difícil encontrar valores significativos en el agua de mar (Lazo y Solís, 2019). De acuerdo con los resultados obtenidos con la relación de Simpson (R) de la ecuación 1 es posible generar un indicador de calidad de agua según la clasificación que se muestra en tabla 1.

$$R = \frac{Cl^-}{HCO_3^- + CO_3^{2-}} \text{ en meq/L} \quad (1)$$

Tabla 1. Contaminación presuntiva por intrusión salina según la razón de Simpson (1)

Clasificación del agua	Valor de la razón de Simpson
Buena calidad	$\leq 0,5$
Ligeramente contaminada	0,5 – 1,3
Moderadamente contaminada	1,3 – 2,8
Muy contaminada	2,8 – 6,6
Altamente contaminada	6,6 – 15,5
Severamente contaminada	$> 15,5$

La representación gráfica de los patrones hidrogeoquímicos se realiza mediante los diagramas de Stiff (Stiff, 1951). Consiste en un sistema de ejes horizontales paralelos y un eje vertical; a la izquierda del gráfico se ubican las concentraciones de los cationes, a la derecha los aniones, expresadas en meq/L (figura 2). Estos diagramas permiten apreciar y comparar en forma rápida los diferentes tipos de aguas, es especialmente útil cuando se quieren apreciar cambios en el comportamiento de un agua en determinado tiempo, por características climáticas, hidrogeológicas o efectos antrópicos (González, 2003).

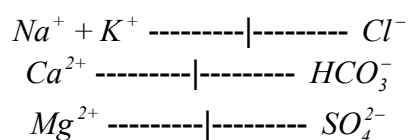


Fig. 2. – Esquema del diagrama propuesto por Stiff.

Fue utilizada la modelación hidrogeoquímica inversa, a partir del modelo de mezcla de agua, mediante el software MODELAGUA que es un sistema automatizado para la modelación hidrogeoquímica, mediante el modelo de mezcla, que permite determinar el origen de la composición química de las aguas, así como los procesos geoquímicos que originan dicha composición; posibilita el cálculo de los patrones hidrogeoquímicos y grafica tanto los datos reales como los patrones mediante diagramas de Stiff; el ion Cl^{-} fue tomado como ion conservativo (ion que no participa en ningún proceso de interacción agua-roca), lo que permite determinar el delta iónico. Si en una misma línea de flujo se toman dos muestras de agua, ambas deben poseer la misma composición química, si esto no ocurre queda evidenciado que durante la trayectoria han ocurrido procesos químicos que modificaron su composición. Esta diferencia de composición o delta iónico se utiliza para determinar los procesos geoquímicos que explican la composición química del agua, y su cuantía. En la tabla 2 se presenta la composición química de las muestras referencias utilizadas en la modelación, correspondientes al pozo L1-N que se encuentra alejado de la línea costera (agua de muy buena calidad) y agua propia del mar.

Tabla 2. Composición química de las muestras referencias (en meq/L).

Patrones	Cl^{-}	HCO_3^{-}	SO_4^{2-}	Na^{+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}
L1-N	0,75	6,00	0,10	0,55	3,91	2,59	0,10
Agua de mar	550,00	2,40	45,0	457,26	22,00	104,0	14,14

Métodos estadísticos multivariados

Se emplean técnicas estadísticas multivariantes de análisis factorial clásico en la determinación de los factores que condicionan la hidrogeoquímica en la subcuenca.

El análisis factorial clásico se basa en el reordenamiento o reducción del espacio evidencia, lo que da lugar a componentes o factores que pueden tomarse como variables causales de acuerdo a la correlación estadística existentes entre las variables observadas. La muestra sometida al análisis factorial debe cumplir las condiciones de normalidad, homocedasticidad y linealidad. Se parte de haber realizado observaciones de las variables medibles y se busca lograr un nuevo sistema de atributos, calculados a partir de los ya existentes, que satisfagan los siguientes requisitos: sean independientes entre sí; si entre todos los atributos existe alguna correlación, el número de variables del nuevo sistema debe ser menor que el que existía; el nuevo sistema de variables se obtiene a partir de una relación lineal homogénea de los atributos originales. Los factores se determinan de modo que expliquen la mayor varianza de la población, se calcula también la contribución de cada variable original a cada nuevo factor. Cada una de las nuevas variables es linealmente independiente y la varianza explicada es progresivamente menor. Se recomienda retener únicamente aquellas componentes cuya varianza (λ) sea mayor que uno, esto se basa en el hecho de que cualquier factor debe representar más variación que las variables originales estandarizadas.

En el análisis factorial clásico debe realizarse la rotación de los ejes para lograr la máxima variabilidad de los factores, mejorar la interpretación de la matriz factorial y reducir el nivel de ambigüedades; el nuevo sistema de ejes factoriales, que se corresponde con una matriz

factorial de estructura simple, deberá presentar carga lo más cercana posible a uno o a cero, respectivamente. Si las nuevas variables van a estar no correlacionadas debe realizarse una rotación ortogonal, la más popular es la llamada Varimax que persigue los siguientes objetivos: simplificar las columnas de la matriz factorial, alcanzar la máxima simplificación posible de las columnas de la matriz factorial y maximizar la suma de las varianzas de las cargas requeridas de la matriz de factores.

Caracterización de la intrusión salina en la subcuenca Najasa

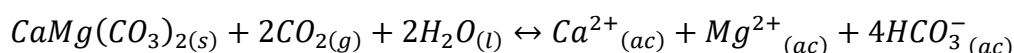
Comportamiento de los niveles hidrostáticos en los pozos

En el pozo no se reportan niveles por debajo del nivel medio del mar, las cotas de agua oscilan entre 2,53m y 5,04m, cota media de 3,86m, desviación estándar de 0,70m y coeficiente de variación de 18,1%.

Reacciones que determinan la hidrogeoquímica

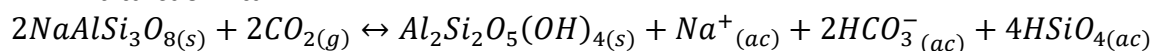
La modelación hidrogeoquímica inversa permitió precisar que la composición del agua monitoreada en el pozo está determinada por las siguientes reacciones químicas:

- Dolomita (disolución)



- Calcita (disolución) $CaCO_{3(s)} + CO_{2(g)} + H_2O_{(l)} \leftrightarrow Ca^{2+}_{(ac)} + 2HCO_3^{-}_{(ac)}$

- Albita-caolinita



- Sulfato (reducción) $2CH_2O_{(ac)} + SO_4^{2-}_{(ac)} \leftrightarrow H_2S_{(ac)} + 2HCO_3^{-}_{(ac)}$

- $K^+ - Ca^{2+}$ (intercambio) $\frac{1}{2} Ca^{2+}_{(ac)} + KR_{(s)} \leftrightarrow K^+_{(ac)} + \frac{1}{2} CaR_{2(s)}$

- $CO_2 - HCO_3^-$ $CO_{2(g)} + H_2O_{(l)} \leftrightarrow H_2CO_{3(ac)}$

La modelación hidrogeoquímica inversa también permitió cuantificar la magnitud de las reacciones y la proporción de agua de mar en el agua del pozo, para el manejo estadístico de la información se decide usar un sistema de variables: $X_1 \rightarrow$ % de agua de mar en la mezcla, $X_2 \rightarrow$ dolomita (disolución), $X_3 \rightarrow$ calcita (disolución), $X_4 \rightarrow$ albita-caolinita, $X_5 \rightarrow$ reducción del sulfato, $X_6 \rightarrow K^+ - Ca^{2+}$ (intercambio) y $X_7 \rightarrow CO_2 - HCO_3^-$.

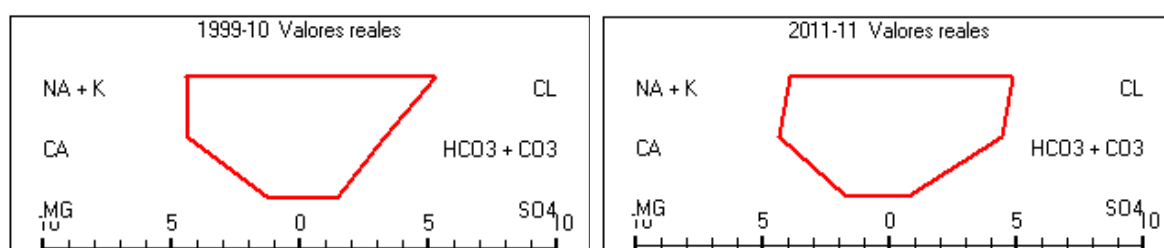
Caracterización hidrogeoquímica de las muestras en la superficie del pozo

En la superficie del pozo el contenido de sales solubles totales (SST) sobrepasa la concentración máxima deseable (CMD) de 500mg/L, y en algunos momentos llega a sobrepasar la concentración máxima admisible (CMA) de 1 000 mg/L, por lo que el agua puede ser dulce o salobre. El contenido del ion Cl^- como media sobrepasa la CMD de 200 mg/L, aunque varias muestras sobrepasan la CMA de 250 mg/L. Según la relación de Simpson (ecuación 1), el agua se encuentra moderadamente o ligeramente contaminada por agua de mar (tabla3).

Tabla 3. Estadísticos fundamentales de la composición del agua en la superficie del pozo.

Estadístico	HCO_3^- meq/L	Cl^- meq/L	SO_4^{2-} meq/L	Ca^{2+} meq/L	Mg^{2+} meq/L	Na^+ meq/L	K^+ meq/L	SST meq/L	R
Promedio	5,78	6,74	1,03	5,14	2,69	5,87	0,08	921,01	1,345
Desv. Est.	1,66	2,35	0,49	1,55	1,58	1,83	0,09	179,92	0,919
Coef. Var.	28,68	34,84	47,76	30,12	58,83	31,22	109,76	0,19	0,683
Mínimo	2,2	2,99	0	1,6	0,32	3,04	0	547,12	0,421
Máximo	8,8	11,26	2,1	7,4	7,58	9,2	0,3	1220,5	5,118

El agua más frecuentes es del tipo $Cl^- > HCO_3^- - Na^+ > Ca^{2+}$ aunque en ocasiones puede ser $HCO_3^- > Cl^- - Ca^{2+} > Na^+$. Los gráficos de Stiff manifiestan el predominio de los iones Na^+ y Cl^- (figura 3), asociados a la mezcla con agua de mar. Como resultado de la modelación hidrogeoquímica inversa de las muestras se pudo comprobar que en la superficie del pozo la proporción de agua de mar varía entre 0,4 y 1,9%, la media alcanza 1,1%.

**Fig. 3.** — Gráficos de Stiff, muestras fin de período húmedo 1999 y fin de período seco 2011.

El análisis de los deltas iónicos destaca, generalmente, valores positivos de ΔCa^{2+} (media de 0,453mmol/L), ΔNa^+ (media de 0,374mmol/L), y ΔSO_4^{2-} (media de 0,213mmol/L), asociados a incrementos de estos iones en el agua en relación a las concentraciones teóricas, y valores negativos de ΔHCO_3^- (media de -0,279mmol/L), ΔK^+ (media de -0,170mmol/L) y ΔMg^{2+} (media de -0,506mmol/L), que se vincula a la disminución de las concentración de estos iones. La correlación de Pearson entre los delta iónicos, para una probabilidad del 95% (tabla 4) destaca alto nivel de correlación entre siete pares de variables: ΔSO_4^{2-} , ΔNa^+ con el porcentaje de agua de mar; ΔCa^{2+} y ΔMg^{2+} con ΔHCO_3^- ; ΔNa^+ con ΔSO_4^{2-} ; ΔCa^{2+} y ΔNa^+ con ΔMg^{2+} .

Tabla 4. Matriz de correlación de Pearson de los deltas iónicos de las muestras en la superficie del pozo.

	%	ΔHCO_3^-	ΔSO_4^{2-}	ΔNa^+	ΔCa^{2+}	ΔMg^{2+}	ΔK^+
%	1,0	-0,1791 0,3268	-0,4024 0,0224	-0,3739 0,0350	-0,0602 0,7434	0,0559 0,7611	-0,1639 0,3699
ΔHCO_3^-		1,0	0,1839 0,3137	0,2917 0,1052	0,5039 0,0033	0,4059 0,0212	0,3033 0,0915
ΔSO_4^{2-}			1,0	0,4927 0,0042	0,3111 0,0831	-0,2055 0,2591	0,2194 0,2276
ΔNa^+				1,0	0,2245 0,2168	-0,3224 0,0719	0,3023 0,0926
ΔCa^{2+}					1,0	-0,4161 0,0178	0,0138 0,9402
ΔMg^{2+}						1,0	0,0391 0,8316

Factores que determinan la hidrogeoquímica

La matriz de Pearson muestra las correlaciones entre cada par de variables, el rango de estos coeficientes de correlación varía entre -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las

variables, también se presenta en cada bloque el valor-P, que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas, valores-P por debajo de 0,05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0%, en este caso cuatro pares de variables presentan correlaciones significativas (tabla 5). El análisis factorial permitió extraer dos factores con valores propios mayores que 1,0 (2,163 y 1,150), que explican el 88,1% de la variabilidad en los datos. Los factores rotados tienen las ecuaciones: $Y_1 = 0,833 * X_2 - 0,946 * X_3$, explica el 57,52%; $Y_2 = 0,674 * X_1 - 0,647 * X_4 + 0,652 * X_5$, explica el 30,58%.

Tabla 5. Matriz de correlación de Pearson de las variables observadas en la superficie.

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
X_1	1,0	0,0682 0,7155	-0,0746 0,6900	-0,4207 0,0184	0,4215 0,0182	-0,3069 0,0931	-0,1132 0,5442
X_2		1,0	-0,8360 0,0000	-0,3203 0,0789	0,2050 0,2686	0,0604 0,7467	0,0758 0,6855
X_3			1,0	0,3399 0,0614	-0,3168 0,0824	0,0332 0,8592	-0,1834 0,3234
X_4				1,0	-0,4940 0,0047	0,2812 0,1255	-0,3375 0,0633
X_5					1,0	-0,2324 0,2084	-0,1192 0,5232
X_6						1,0	0,1553 0,4043

Primer factor

El factor destaca la relación lineal inversa moderadamente fuerte entre la disolución de la dolomita (X_2) y la disolución de la calcita (X_3), nivel de confianza del 95,0%, explica el 69,89% de la variabilidad y tiene la ecuación $X_2 = -0,043 - 0,489 * X_3$ (figura 4). Este factor revela como predominante en la superficie del pozo el proceso de dolomitización, presente en los acuíferos afectados por la intrusión marina, como resultado de la reacción entre el carbonato de calcio presente en forma dispersa o del propio material carbonatado de la matriz rocosa y el exceso de magnesio procedente del mar, lo que trae consigo la formación de dolomita, cuestión que según algunos autores incrementa la permeabilidad en los acuíferos.

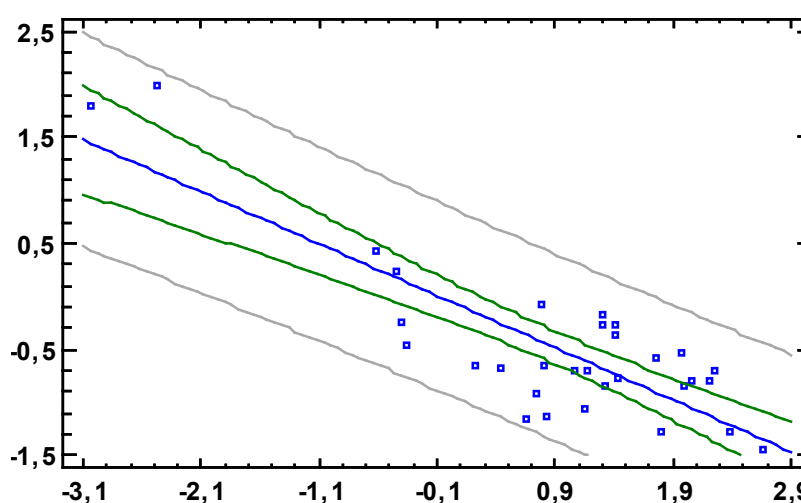


Fig. 4. – Relación lineal entre la disolución de calcita (eje x) y disolución de la dolomita (eje y)

Segundo factor

Se destaca en este factor la relación lineal relativamente débil, con un nivel de confianza del 95,0%, entre las variables: transformación albíta-caolinita (X_4) y el % de agua de mar (X_1) tiene la forma $X_4 = 0,748095 - 0,540657 * X_1$ y explica 17,70% de la variabilidad en X_4 ; reducción del sulfato (X_5) y el % de agua de mar (X_1) tiene la forma $X_5 = -0,483 + 0,255 * X_1$ y explica 17,76% de la variabilidad en X_5 . Este factor expresa la acción moderada del proceso de mezcla de aguas con la reducción de sulfato (favorecidos por la presencia de materia orgánica) y reacción inversa de transformación albíta-caolinita.

Caracterización hidrogeoquímica de las muestras a 15m de profundidad

El agua a 15m de profundidad muestra notable afectación en su calidad, determinado por el proceso de mezcla agua dulce-agua salada. El contenido de SST en el agua como media sobrepasa la CMA por lo que mayormente es salobre. La concentración del ion Cl^- como media se aproxima a 330mg/L, aunque en muestras aisladas sobrepasa 1 500mg/L. Según la relación de Simpson el agua presenta moderada o ligera contaminación por agua de mar (tabla 6).

Tabla 6. Estadísticos fundamentales de la composición del agua a 15m de profundidad.

Estadístico	HCO_3^- meq/L	Cl^- meq/L	SO_4^{2-} meq/L	Ca^{2+} meq/L	Mg^{2+} meq/L	Na^+ meq/L	K^+ meq/L	SST meq/L	R
Promedio	5,26	9,28	1,17	5,01	3,11	7,96	0,17	1043,49	1,98
Desv. Est.	1,73	8,74	0,60	1,85	2,39	6,85	0,30	537,37	1,85
Coef. Var.	0,33	0,94	0,51	0,37	0,77	0,86	1,76	0,51	0,94
Mínimo	1,70	2,99	0,13	1,20	0,60	3,50	0,00	463,3	0,41
Máximo	7,52	43,25	3,40	7,35	11,13	36,00	1,15	3097,78	8,74

Los tipos de agua más frecuentes son $Cl^- > HCO_3^- - Na^+ > Ca^{2+}$ y $HCO_3^- > Cl^- - Ca^{2+} > Na^+$. Los gráficos de Stiff manifiestan el predominio de los iones Na^+ y Cl^- (figura 5). Como resultado de la modelación hidrogeoquímica inversa se pudo comprobar que a 15m de profundidad la proporción de agua de mar varía entre 0,4 y 7,7% y tiene como media 1,56%.

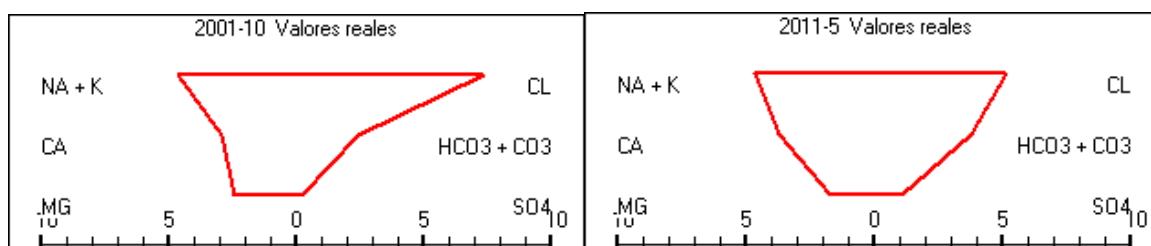


Fig. 5. — Gráficos de Stiff, muestras fin de período húmedo 2001 y fin de período seco 2011.

Al analizar los deltas iónicos se debe destacar valores positivos de ΔCa^{2+} (media de 0,455mmol/L), ΔNa^+ (media de 0,325mmol/L) y ΔSO_4^{2-} (media de 0,184mmol/L) y valores negativos de ΔHCO_3^- (media de -0,576mmol/L), ΔK^+ (media de -0,150mmol/L) y ΔMg^{2+} (media de -0,521mmol/L), que se vincula a la disminución de la concentración de estos iones. Las correlaciones entre los deltas iónicos (tabla 7) destacan la variación sincrónica entre seis pares de variables: ΔNa^+ y ΔSO_4^{2-} , ΔMg^{2+} y ΔSO_4^{2-} , ΔHCO_3^- y ΔCa^{2+} , % de agua de mar con ΔNa^+ y ΔSO_4^{2-} .

Tabla 7. Matriz de correlación de Pearson de los deltas iónicos de las muestras a 15m de profundidad.

	%	ΔHCO_3^-	ΔSO_4^{2-}	ΔNa^+	ΔCa^{2+}	ΔMg^{2+}	ΔK^+
%	1,0	0,0023 0,9907	-0,5971 0,0008	-0,4342 0,0210	-0,1619 0,4105	0,2029 0,3005	0,3076 0,1113
ΔHCO_3^-		1,0	0,1366 0,4884	0,2907 0,1334	0,6388 0,0003	0,2278 0,2437	0,0749 0,7050
ΔSO_4^{2-}			1,0	0,6916 0,0000	0,3205 0,0964	-0,4210 0,0257	0,0231 0,9070
ΔNa^+				1,0	0,3467 0,0707	-0,3694 0,0530	0,0705 0,7215
ΔCa^{2+}					1,0	-0,5077 0,0058	-0,0260 0,8954
ΔMg^{2+}						1,0	-0,0701 0,7230

Factores que determinan la hidrogeoquímica

Las correlaciones de Pearson destacan que nueve pares de variables presentan correlaciones significativas para una probabilidad del 95 % (tabla 8). El análisis factorial permitió extraer un factor rotado, solo un valor propio es mayor o igual que 1,0 (2,431), que tiene la ecuación $Y_1 = 0,515 * X_1 + 0,662 * X_2 - 0,706 * X_3 - 0,767 * X_4 + 0,763 * X_5$ y explica 66,90% de la variabilidad en los datos originales. Cuando se presenta intrusión salina relativamente baja (alrededor del 2%) se favorecen procesos hidrogeoquímicos inversos de reducción de los sulfatos, la transformación albita-caolinita y en menor medida la disolución de la dolomita y la precipitación de la calcita.

Tabla 8. Matriz de correlación de Pearson de las variables observadas a 15m de profundidad.

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
X_1	1,0	0,2238 0,2431	-0,2119 0,2698	-0,4318 0,0193	0,5928 0,0007	0,3049 0,1077	0,1403 0,4678
X_2		1,0	-0,8355 0,0000	-0,3725 0,0466	0,4233 0,0047	-0,0718 0,7115	0,0203 0,9169
X_3			1,0	0,4254 0,0214	-0,4268 0,0210	0,0729 0,7069	-0,2064 0,2827
X_4				1,0	-0,6942 0,0000	0,0748 0,6997	-0,4779 0,0087
X_5					1,0	-0,0260 0,8934	-0,0348 0,8577
X_6						1,0	0,0748 0,6999

En este factor se resalta la relación lineal moderadamente fuerte, con un nivel de confianza del 95,0%, entre dos pares de variables: la disolución de la dolomita (X_2) y la disolución de la calcita (X_3) que tiene la ecuación $X_2 = -0,139 - 0,424 * X_3$ y explica el 69,81% de la variabilidad en X_2 (figura6); la transformación albita-caolinita (X_4) y la reducción del sulfato (X_5) que tiene la ecuación $X_4 = -0,095 - 1,397 * X_5$ y explica el 48,18% de la variabilidad en X_4 (figura7). Entre las demás variables la relación lineal es débil o no significativa.

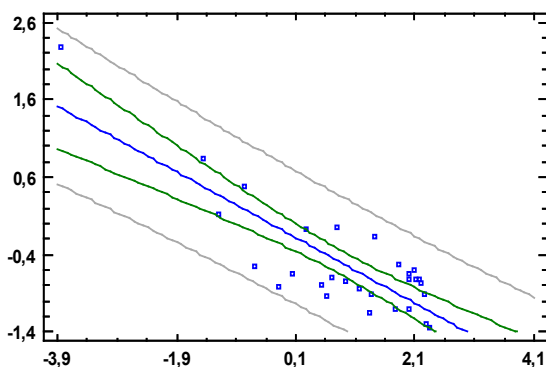


Fig. 6. – Relación lineal entre disolución de la calcita (eje x) y disolución de la dolomita (eje y).

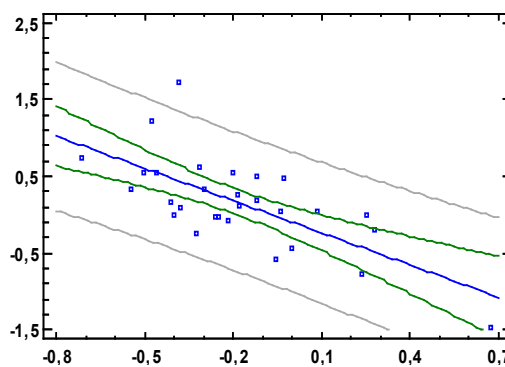


Fig. 7. – Relación lineal entre reducción del sulfato (eje x) y transformación albita caolinita (eje y).

Caracterización hidrogeoquímica de las muestras a 30m de profundidad

El agua presente es de muy mala calidad, el contenido medio de SST está próximo a 3 400mg/L y en ocasiones sobrepasa los 6 000 mg/L, a partir del año 2010 comienza su descenso. El contenido del ion Cl^- es muy alto, como media supera los 1 650 mg/L, aunque por momentos alcanza los 3 000 mg/L. La relación de Simpson muestra agua altamente contaminada por agua de mar, que puede rebasar el valor de 15,5 considerada como severamente contaminada (tabla 9).

Tabla 9. Estadísticos fundamentales de la composición del agua a 30m de profundidad.

Estadístico	HCO_3^- meq/L	Cl^- meq/L	SO_4^{2-} meq/L	Ca^{2+} meq/L	Mg^{2+} meq/L	Na^+ meq/L	K^+ meq/L	SST meq/L	R
Promedio	5,38	45,85	4,38	7,63	7,91	40,71	0,55	3435,3	8,226
Desv. Est.	1,52	29,9	3,63	2,71	4,55	27,53	0,74	2023,6	4,799
Coef. Var.	0,28	0,65	0,83	0,35	0,57	0,68	1,36	0,59	0,583
Mínimo	1,28	5,97	0,00	0,95	0,72	3,48	0,00	503,00	1,435
Máximo	7,07	110,0	14	11,37	19,5	97,60	2,20	7755,9	18,33

El tipo de agua más frecuente es $Cl^- - Na^+$, a partir del año 2010 el agua pasa a ser del tipo $Cl^- > HCO_3^- - Na^+ > Ca^{2+}$. Los gráficos de Stiff manifiestan el predominio de los iones Na^+ y Cl^- (figura 8) asociados al incremento del proceso de mezcla de aguas, hecho que fue corroborado por la modelación hidrogeoquímica inversa de las muestras, se pudo comprobar que a 30m de profundidad la proporción de agua de mar varía entre 1,0 y 19,9% y tiene como media 8,21%.

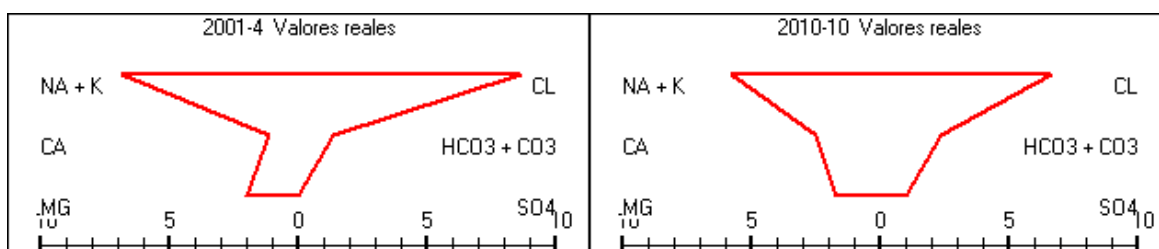


Fig. 8. – Gráficos de Stiff, muestras fin de período húmedo 2001 y fin de período seco 2010.

Los deltas iónicos destacan valores positivos de ΔNa^+ (media de 2,869mmol/L) y ΔCa^{2+} (media de 1,259 mmol/L), valores negativos de ΔMg^{2+} (media de -1,564 mmol/L) y ΔK^+ (media de -0,735mmol/L). Las correlaciones de Pearson entre los deltas iónicos (tabla

10) destacan la variación sincrónica entre cuatro pares de variables: ΔNa^+ y ΔSO_4^{2-} , ΔCa^{2+} y ΔHCO_3^- , ΔMg^{2+} y ΔNa^+ , ΔMg^{2+} y % de agua de mar en el agua.

Tabla 10. Matriz de correlación de Pearson de los deltas iónicos de las muestras a 30m de profundidad.

	%	ΔHCO_3^-	ΔSO_4^{2-}	ΔNa^+	ΔCa^{2+}	ΔMg^{2+}	ΔK^+
%	1,0	0,3591 0,1434	0,1871 0,4572	0,4488 0,0617	0,3564 0,1466	-0,5750 0,0125	-0,3106 0,2097
ΔHCO_3^-		1,0	0,2976 0,2303	0,1806 0,4734	0,5947 0,0092	-0,0265 0,9168	0,0090 0,9717
ΔSO_4^{2-}			1,0	0,6668 0,0025	0,4280 0,0764	-0,1077 0,6705	0,0246 0,9228
ΔNa^+				1,0	0,2510 0,3151	-0,5349 0,0222	-0,4646 0,0521
ΔCa^{2+}					1,0	-0,1831 0,4670	-0,2588 0,2998
ΔMg^{2+}						1,0	0,1789 0,4775

Factores que determinan la hidrogeoquímica

La matriz de correlación de Pearson destaca correlaciones significativas entre 10 pares de variables, con un nivel de confianza del 95,0% (tabla 11). El análisis factorial permitió extraer dos factores con valores propios mayores a 1,0 (3,421 y 1,140), que explican el 89,17% de la variabilidad de los datos y tiene las ecuaciones siguientes: $Y_1 = -0,790 * X_4 + 0,605 * X_6$, explica el 66,88%; $Y_2 = 0,686 * X_1 - 0,855 * X_2 + 0,855 * X_3$, explica el 22,29%. Estos factores permiten identificar que a 30m de profundidad los fenómenos hidrogeoquímicos predominantes son los procesos inversos de reducción de los sulfatos e intercambio iónico $K^+ - Ca^{2+}$, y que el incremento del porcentaje de agua de mar trae consigo la disolución de cantidades adicionales de calcita y la intensificación del proceso de dolomitización.

Tabla 11. Matriz de correlación de Pearson de las variables observadas a 30m de profundidad.

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
X_1	1,0	-0,6351 0,0026	0,6441 0,0022	0,5248 0,0175	-0,2073 0,3804	-0,3857 0,0930	-0,3074 0,1873
X_2		1,0	-0,7842 0,0000	-0,5817 0,0071	0,1013 0,6709	0,2818 0,2287	0,2826 0,2273
X_3			1,0	0,4922 0,0275	-0,2826 0,2274	-0,2355 0,3175	-0,2913 0,2127
X_4				1,0	-0,6400 0,0024	-0,5145 0,0203	-0,7972 0,0000
X_5					1,0	-0,0198 0,9339	0,3403 0,1421
X_6						1,0	0,7345 0,0002

Primer factor

En el factor se combina de forma lineal moderadamente fuerte las variables transformación albita-caolinita (X_4) y el intercambio $K^+ - Ca^{2+}$ (X_6), nivel de confianza de 95,0%, explica 26,47% de la variabilidad y tiene la ecuación $X_6 = -0,549 - 0,119 * X_4$ (figura9).

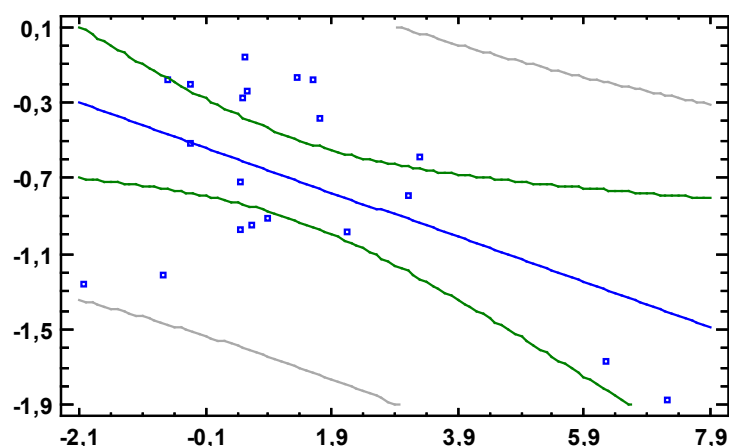


Fig. 9. – Relación lineal entre transformación albita-caolinita (eje x) y el intercambio (eje y)

Segundo factor

En el factor se combinan de forma lineal moderadamente fuerte dos pares de variables, con un nivel de confianza del 95,0%. La relación lineal inversa entre la disolución de la dolomita (X_2) y el % de agua de mar (X_1) explica 40,33% de la variabilidad en X_2 y tiene la forma $X_2 = -0,577 - 0,113 * X_1$ (figura 10). La disolución de la calcita (X_3) y el % de agua de mar (X_1), guardan una relación lineal directa que tiene la ecuación $X_3 = 0,760 + 0,184 * X_1$ y explica 41,49% de la variabilidad en X_3 (figura 11).

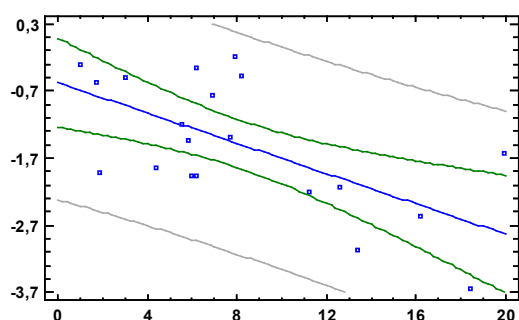


Fig. 10. – Relación lineal entre % de agua de mar (eje x) y la disolución de la dolomita (eje y).

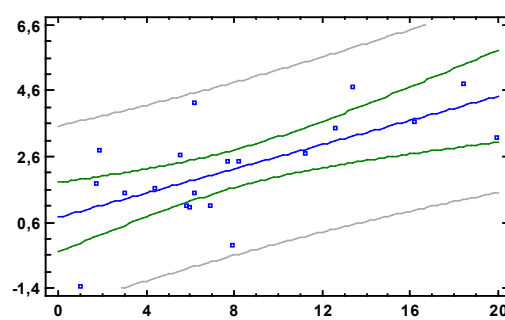


Fig. 11. – Relación lineal entre % de agua de mar (eje x) y la disolución de la calcita (eje y).

Caracterización hidrogeoquímica de las muestras a 66,4m de profundidad

En el agua el valor medio de SST se aproxima a 5000 mg/L, aunque puede alcanzar los 8000mg/L, en el año 2010 comienza un descenso considerable cuando apenas sobrepasa CMA. El contenido del ion Cl^- es muy alto, hasta 5 000 mg/L, la media alcanza 2 460 mg/L. La relación de Simpson muestra valores por encima de 15,5, por lo que la contaminación es severa, a partir del año 2010 desciende esta relación y el agua llega a altamente contaminada (tabla 12).

Tabla 12. Estadísticos fundamentales de la composición del agua a 66,4m de profundidad.

Estadístico	HCO_3^- meq/L	Cl^- meq/L	SO_4^{2-} meq/L	Ca^{2+} meq/L	Mg^{2+} meq/L	Na^+ meq/L	K^+ meq/L	SST meq/L	R
Promedio	5,85	72,94	4,09	8,94	11,54	60,76	0,71	4981,2	13,12
Desv. Est.	1,5	47,36	3,99	2,69	6,38	39,98	0,87	2805,0	9,01
Coef. Var.	0,26	0,65	0,97	0,3	0,55	0,66	1,23	0,56	0,69
Mínimo	2,5	7,606	0,4	4,2	2,85	6,48	0,00	1112,7	1,02
Máximo	8,5	150	14,5	12,3	22,15	130,20	2,6	9887,9	28,00

El tipo de agua más frecuentemente es $Cl^- - Na^+$, a partir del año 2010 el agua pasa a ser de tipo $Cl^- > HCO_3^- - Na^+ > Ca^{2+}$. Los gráficos de Stiff manifiestan el predominio de los iones

Na^+ y Cl^- (figura 12) en virtud del incremento del proceso de mezcla de aguas, hecho que fue corroborado por la modelación hidrogeoquímica inversa de las muestras; se pudo comprobar que a 66,4m de profundidad la proporción de agua de mar varía entre 1,2 y 27,2%, la media es de 13,14%.

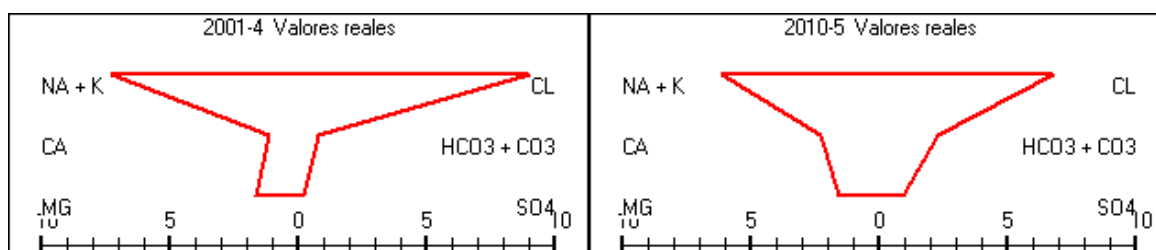


Fig. 12. — Gráficos de Stiff, muestras fin de período seco 2001 y fin de período seco 2010.

En los delta iónicos se destacan los valores positivos de ΔCa^{2+} (media de 1,395mmol/L) y valores negativos de ΔMg^{2+} (media de -2,284mmol/L), ΔK^+ (media de -1,303mmol/L), ΔSO_4^{2-} (media de -1,043mmol/L) y valores muy variables de ΔNa^+ . La correlación de Pearson (tabla 13) denota una relación lineal moderadamente fuerte entre cuatro pares de variables: SO_4^{2-} y ΔK^+ , ΔMg^{2+} y ΔK^+ , % de agua de mar con ΔMg^{2+} y ΔK^+ .

Tabla 13. Matriz de correlación de Pearson de los deltas iónicos de las muestras a 66,4m de profundidad.

	%	ΔHCO_3^-	ΔSO_4^{2-}	ΔNa^+	ΔCa^{2+}	ΔMg^{2+}	ΔK^+
%	1,0	0,1412 0,5845	-0,4176 0,1058	0,1353 0,6003	0,2353 0,3621	-0,8118 0,0017	-0,6765 0,0088
ΔHCO_3^-		1,0	0,1588 0,5385	0,2676 0,2999	0,2118 0,4121	0,1265 0,6243	0,1118 0,6651
ΔSO_4^{2-}			1,0	0,3706 0,1512	0,1676 0,5161	0,1324 0,6082	0,7206 0,0053
ΔNa^+				1,0	-0,0500 0,8464	-0,2029 0,4319	0,0618 0,8109
ΔCa^{2+}					1,0	-0,0882 0,7325	0,0735 0,7758
ΔMg^{2+}						1,0	0,5412 0,0361

Factores que determinan la hidrogeoquímica

La matriz de correlación de Pearson con un nivel de confianza de 95,0%, destaca ocho pares de variables (tabla 14). En la determinación de factores causales de la composición química del agua, dos factores rotados poseen valores propios mayores o iguales que 1,0 (3,166 y 1,971) que en conjunto explican el 87,82% de la variabilidad en los datos: $Y_1 = 0,841 * X_1 - 0,942 * X_2 + 0,756 * X_3 - 0,713 * X_6$, explica el 54,13%; $Y_2 = 1,151 * X_4$, explica el 33,70%.

En el fondo del pozo (a la profundidad de 66,4m) los procesos hidrogeoquímicos están determinados en primera instancia por el porcentaje de agua de mar presente en la mezcla de aguas, intensificando los procesos de dolomitización, disolución de la calcita y el intercambio iónico inverso $K^+ - Ca^{2+}$; en menor medida se resalta la reducción de los sulfatos vinculado a procesos microbiológicos.

Tabla 14. Matriz de correlación de Pearson de las variables observadas a 66,4m de profundidad.

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
X_1	1,0	-0,7066 0,0022	0,6774 0,0039	-0,0008 0,9976	0,5424 0,0300	-0,7177 0,0017	0,3138 0,2365
X_2		1,0	-0,8679 0,0000	-0,2967 0,2645	-0,3725 0,1553	0,6283 0,0091	-0,3290 0,2135
X_3			1,0	0,2883 0,2788	0,1056 0,6972	-0,3580 0,1733	0,2560 0,3386
X_4				1,0	-0,4492 0,0809	-0,0028 0,9918	-0,6421 0,0073
X_5					1,0	-0,7929 0,0002	0,3067 0,2480
X_6						1,0	-0,1076 0,6915

Primer factor

En el primer factor se manifiesta la relación lineal moderadamente fuerte entre tres pares de variables, con un nivel de confianza del 95,0%: la disolución de la dolomita (X_2) y el % de agua de mar (X_1) ajustan según $X_2 = 0,291 - 0,189 * X_1$, explica 49,93% de la variabilidad en X_2 ; la relación entre la disolución de la calcita (X_3) y el % de agua de mar (X_1) tiene la ecuación $X_3 = 0,703 + 0,167 * X_1$, explica 45,88% de la variabilidad en X_3 (figura 13); la relación entre el intercambio $K^+ - Ca^{2+}$ (X_6) y % de agua de mar (X_1), explica 51,51% de la variabilidad en X_6 y tiene la ecuación $X_6 = -0,027 - 0,092 * X_1$ (figura 14).

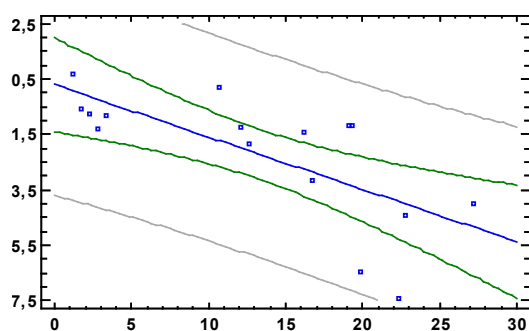


Fig. 13. – Relación lineal entre % de agua de mar (eje x) y la disolución de la dolomita (eje y).

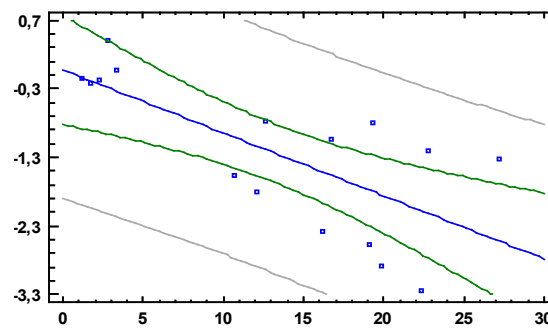


Fig. 14. – Relación lineal entre % de agua de mar (eje x) y el intercambio $K^+ - Ca^{2+}$ (eje y).

Segundo factor

El segundo factor destaca la transformación albita-caolinita (X_4) que explica el 33,70% de la variabilidad de las variables originales.

Proceso de intrusión salina

Según Fagundo y colaboradores (1996) en los acuíferos cársicos costeros pueden distinguirse tres zonas geoquímicas bien diferenciadas, en perfil del pozo se pudo identificar dos de las zonas geoquímicas propuestas, no se presenta la zona en que prevalece agua del tipo $HCO_3^- - Ca^{2+}$ en equilibrio con la calcita.

Zona en que prevalece agua del tipo $Cl^- - Na^+$, las cuales se encuentran sobresaturadas en relación con la calcita

Esta zona se manifiesta en las mayores profundidades monitoreadas (66,4m y 30m) que coincide con las mayores profundidades de extracción del agua subterránea en la subcuenca, en ella el agua es de muy mala calidad, asociado a la sobre explotación a que fue sometida hasta principios del siglo 21 y el avance de la cuña salina, después decreció la explotación y a partir del año 2010 el agua mejoró sus características de calidad.

A la profundidad de 66,4m los dos factores que determina la hidrogeoquímica están relacionados con el proceso de intrusión salina. En la medida que se incrementa la proporción de agua de mar crece la disolución de la calcita y la precipitación de la dolomita. La reacción de intercambio inverso albíta-caolinita, que puede ser explicado porque el Ca^{2+} absorbido por la fase sólida es cedida a la solución a cambio del Na^+ disuelto, sucede cuando avanza la cuña salina. Se presentan valores muy bajos de la relación Na^+/Cl^- , en mg/L, con media de 0,543.

A la profundidad de 30m el primer factor está determinado por la reacción de intercambio albíta-caolinita y el intercambio inverso $K^+ - Ca^{2+}$. El segundo factor expresa como la proporción de agua de mar incide en la disolución de la calcita y la precipitación de la dolomita. Ambos factores están relacionados con la intrusión marina.

Zona de mezcla donde el agua generalmente es del tipo $HCO_3^- > Cl^- - Ca^{2+} > Na^+$, $Cl^- > HCO_3^- - Na^+ > Ca^{2+}$ o de facies intermedias y la cual se puede encontrar insaturadas respecto a la calcita

Esta zona se presenta en las menores profundidades de monitoreo (15m y en la superficie del pozo), el agua muestra mejores índices de calidad que la zona anterior, pero generalmente sobrepasa los contenidos máximos deseables o admisibles y manifiesta ligera o moderada contaminación por agua de mar. A la profundidad de 15m se evidencia que el proceso de mezcla da lugar a un factor causal único que relaciona el incremento del porcentaje de agua de mar con procesos hidrogeoquímicos inversos de reducción de los sulfatos, la transformación albíta-caolinita y en menor medida la disolución de la dolomita y la precipitación de la calcita.

En la superficie del pozo el agua es dulce o salobre, en ocasiones supera las CMA de SST y Cl^- y se encuentra ligera o moderada contaminación por agua de mar. El análisis factorial destaca dos factores causales, el primero resalta los procesos hidrogeoquímicos vinculados con el medio geológico por donde circula el agua subterránea y el segundo muestra la relación relativamente débil entre el porcentaje de agua de mar con la reacción inversa de transformación albíta-caolinita y la reducción del sulfato, por lo que, a pesar de existir mezcla de agua, se revela un predominio del medio geológico en la determinación de los procesos hidrogeoquímicos.

Conclusiones

En la subcuenca Najasa el agua se encuentra afectada por la intrusión marina, en el perfil estudiado se presentan dos zonas geoquímicas diferentes, el agua a las mayores profundidades se encuentra severa o altamente contaminada, vinculada a la sobreexplotación en el área, al reducirse la explotación, decrece la magnitud de la intrusión. En la medida que se aproxima a la superficie del pozo, el agua se encuentra menos afectada por la intrusión marina y comienza a manifestarse el predomina del medio geológico en los procesos hidrogeoquímicos.

Referencias

1. APHA/AWWA/WPCF. (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water. 22nd Edition. ISBN 9780875530130. Washington DC: American Public Health Association.

- 2.Fagundo J., Váldez J. y Rodríguez J. (1996). Hidroquímica del Karst. Editorial Grupo de Investigación Recursos Hídricos y Geología Ambiental. ISBN 84-921345-8-X. Granada, España.
- 3.González P. (2003). Tesis Doctoral "Contribución al conocimiento hidrogeoquímico de acuíferos cársticos costeros con intrusión marina. Sector Güira-Quivicán, Cuenca Sur de La Habana". Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana, Cuba.
- 4.Lazo A. y Solís Y. (2019.). Interpretación de calidad de agua para casos con potencial intrusión salina. Tecnología en Marcha, Vol 32 Especial. 82-96. ISBN 2215-3241-0379-3982. Costa Rica.
- 5.Stiff H. (1951). The interpretation of chemical water analysis by means of pattern, Jour. Petroleum Technology, 3(10), 15-17.
- 6.Yera G. (2012). Tesis Doctoral Hidrogeoquímica de la Cuenca Costera Sur de Camagüey, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana, Cuba.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.