



Artículo Original

Zonación hidrogeoquímica de la subcuenca Najasa, cuenca Costera Sur de Camagüey, Cuba

Hydrogeochemical zonation of the Najasa sub-basin, South Coast Basin of Camagüey, Cuba

Gladis Yera Digat¹  <https://orcid.org/0000-0003-0568-8775>, Irenis Abad Ramírez¹  <https://orcid.org/0000-0001-8757-8523>

Resumen:

Contexto: La subcuenca Najasa, cuenca Costera Sur de Camagüey, presenta notables afectaciones en la calidad del agua subterráneas provocado por el avance de la cuña salina.

Objetivo: El objetivo es caracterizar las diferentes zonas geoquímicas presente en la subcuenca.

Métodos: Se cuenta con información de 18 pozos de observación del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, en el período 1981 a 2019. Fueron usados métodos hidrogeoquímicos y técnicas estadísticas univariantes y multivariantes.

Resultados: Se precisaron las reacciones químicas que dan origen al agua muestreada, se identificaron las zonas geoquímicas, se cuantificó la proporción de agua de mar, así como los factores causales y cómo afectan la interacción agua-roca.

Conclusiones: El avance de la cuña salina queda evidenciado en estas caracterizaciones. En el perfil de un pozo, el agua puede corresponder con una misma zona geoquímica o puede evolucionar de una a otra. El avance de la cuña salina incide en la intensificación de algunas reacciones hidrogeoquímicas y el incremento de su importancia al explicar sus características, en función de un manejo más adecuado del recurso hídrico.

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

Abstract:

Background: The Najasa sub-basin, South Coastal basin of Camagüey, presents notable effects on the quality of groundwater caused by the advance of the salt wedge.

Objective: The objective is to characterize the different geochemical zones present in the sub-basin.

Methods: There is information from 18 observation wells of the National Institute of Hydraulic Resources, in the period 1981 to 2019. Hydrogeochemical methods and univariate and multivariate statistical techniques were used.

Results: It was possible to specify the chemical reactions that give rise to the sampled water, identify the geochemical zones, quantify the proportion of seawater in the sampled water, the causal factors that determine the hydrogeochemistry and how these affect the water-rock interaction.

Conclusions: The advance of the salt wedge is evidenced in these characterizations. In a well profile, the water can correspond to the same geochemical zone or can evolve from one to another. The advance of the salt wedge affects the intensification of some hydrogeochemical reactions and the increase in their importance when the characteristics are explained, to a better management of water resource.

Keywords: coastal karstic aquifers, hydrogeochemical, saline intrusion, inverse hydrogeochemical modeling.

Historial del artículo

Recibido: 7 octubre 2023

Aceptado: 12 noviembre 2023

¹Empresa de Aprovechamiento Hidráulico, Camagüey, Cuba.

Email:

irenis@eahcmg.hidro.cu

Artículo de acceso abierto bajo licencia Creative Commons Atribución NoComercial CompartirIgual (CC-BY-NC-SA) 4.0.



Citación recomendada para este artículo:

Yera Digat, G. y Abad Ramírez, I. (2023). Zonación hidrogeoquímica de la subcuenca Najasa, cuenca Costera Sur de Camagüey, Cuba. *Monteverdia*, 16 (2), 50-60. Recuperado de: <https://revistas.reduc.edu.cu/index.php/monteverdia/4590>

Introducción

El agua subterránea es un recurso natural muy valioso, no solo como parte del ciclo hidrológico, sino por su aprovechamiento e importancia para abastecimiento de poblaciones, riego y las distintas ramas de la economía. En muchos casos es más recomendable su uso, respecto a las aguas superficiales, debido a sus características de calidad, la agilidad y bajos costos económicos en la construcción de las obras de captación.

Cerca de la mitad del agua potable del mundo y un 43% del agua que se consume para riego provienen de fuentes subterráneas y son esenciales para alimentar muchos ríos, lagos, humedales y otros ecosistemas que dependen de ellas, sin embargo, en muchas regiones estas fuentes de abasto se encuentran amenazadas por la sobreexplotación y la contaminación.

A nivel mundial los sistemas acuíferos cársicos son fuentes de abasto para diversos usos en muchos países.

Estos acuíferos generalmente se encuentran en estado libre, en relación hidráulica con el mar, estableciéndose un equilibrio dinámico entre el agua dulce que drena al mar a través de los conductos cárnicos y el agua marina que penetra en el acuífero por los mismos conductos, con mayor intensidad en los períodos secos, cuando ocurre la mayor explotación del acuífero, la presión hidrostática se deprime; en el periodo lluvioso cuando es menor la explotación, la presión hidrostática es mayor y se limita la entrada de agua marina (Fagundo, Valdés y Rodríguez, 1996). En la Fig. 1 se puede observar la formación de conos de agua salada.

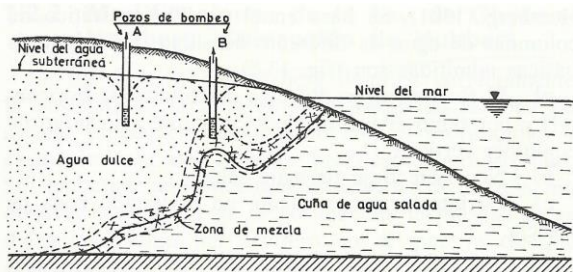


Fig. 1. (Fuente “Hidrología Subterránea”. E. Custodio, M.R. Llamas. Ediciones Omega)

La alteración de las condiciones físico-químicas y biológicas del agua subterránea provocada por la intrusión salina tiene incidencia en el equilibrio de los distintos ecosistemas, provocando en algunos casos impactos que dependen en gran medida de las características hidrogeológicas, y de los materiales geológicos y los suelos que le sobre yacen.

En Cuba los Recursos Hídricos Renovables Internos (RHRI) se han evaluado en 38 120 millones de m³ de los que se estima que 6 480 millones de m³ o el 17% sean aguas subterráneas, en 165 unidades hidrogeológicas. De estos, el potencial aprovechable se ha calculado en 24 000 millones de m³ (75% en aguas superficiales y 25% en agua subterránea) (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2015).

En los acuíferos cubanos la intrusión salina presenta alta incidencia debido a que gran parte de los acuíferos desarrollados en regiones cárnicas costeras se encuentran en estado libre, en relación hidráulica con el mar. En la provincia de Camagüey aproximadamente el 20% del volumen de agua cuantificada es aportada por acuíferos cárnicos costeros.

La cuenca Costera Sur de Camagüey aporta el 82% del volumen total de agua subterránea extraída en la

provincia, pero estos recursos se ven amenazados por el avance de la cuña salina como resultado de la sobreexplotación, diseño inadecuado de las obras de captación y la ocurrencia de períodos secos prolongados, entre otros factores.

Dentro de la cuenca, la subcuenca Najasa es la más afectada por los procesos de intrusión salina, por lo que se plantea como hipótesis de investigación que si se realiza una adecuada zonación hidrogeoquímica se podrá diagnosticar el avance de la cuña salina y los cambios que esta provoca en la interacción agua-roca. Se propone como objetivo fundamental caracterizar las diferentes zonas geoquímicas presente en la subcuenca Najasa, Cuenca Costera Sur de Camagüey, mediante el empleo de métodos hidroquímicos y estadísticos.

Materiales y métodos

Área de estudio

En consideración a sus grandes dimensiones, el Instituto Nacional de Recursos Hidráulico (INRH) ha dividido la cuenca Costera Sur de Camagüey en cuatro subcuencas (Florida, Vertientes, Sierra Maestra y Najasa). La subcuenca Najasa ubicada en el límite oriental de la Cuenca, con un área de 410 km², ocupa parte del municipio Santa Cruz del Sur (Fig. 2)

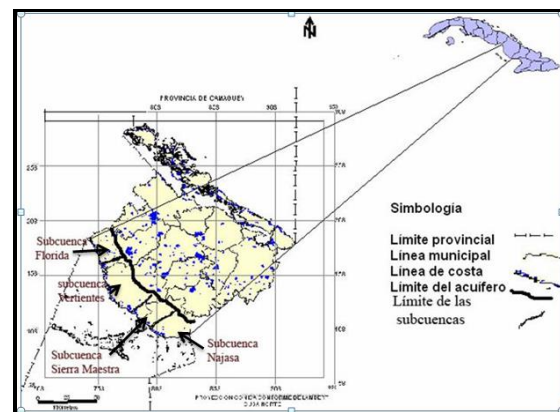


Fig. 2. Ubicación del área de estudio.

Condiciones geológicas y estructurales

Sobre el basamento yace discordante la cobertura platformica del Neógeno de carácter neoaútctono del Mioceno temprano, que la componen las formaciones Arroyo Palma y Güines que pueden alcanzar espesores entre 250 y 300 m. La primera de estas formaciones se manifiesta en pequeños afloramientos de aleurolitas blancuzcas hasta amarillo cremoso, arcillas, margas muy calcáreas 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 (Yera, Abad y Suárez, 2022).

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 recristalizadas o dolomitizadas; generalmente yace concordante sobre la Formación Arroyo Palma y raramente sobre rocas paleogénicas (Yera, Abad y Suárez, 2022).

Información básica y métodos utilizados

En la presente investigación se cuenta con información de 18 pozos de observación pertenecientes a la red de monitoreo del INRH, en el período de 1981 a octubre de 2019, con frecuencia de observación semestral o anual. En la Tabla 1. aparece para cada uno de los pozos de observación, coordenadas geográficas, cota topográfica y número de muestras analizadas en la superficie de los pozos, al terminar los distintos períodos hidrológicos (794 muestras).

Tabla 1. Ubicación de los pozos y número de muestras recogidas.

Pozo	Coordenadas		CT	No de muestras	
	Este	Norte		Fin seco	Fin húmedo
611	390,39	240,50	36,58	17	12
8595	378158	233311	6,03	27	19
L1-N	374526,86	244455,63	18,05	25	17
L3-N	379417,98	245732,39	24,05	29	8
B5-N	377492,58	238016,14	11,2	35	23
B6-N	371399,96	240052,61	7,83	35	26
220	381324	237658	9,90	24	11
616	395206	237923	12,74	19	18
761	383779,98	237452,65	11,1	31	17
6734	382194	240537	15,2	33	10
C2-N	386,45	248,95	24,73	14	7
613	392206,99	237896,17	11,96	35	29
L2-N	386297,47	238403,12	11,00	36	21
B3-N	391136,25	235852,03	7,45	35	26
B4-N	386749,98	233852,68	3,65	36	30
B7-N	396688,34	237398,29	12,80	25	20
B10-N	397,60	233,04	60,0	8	8
B8-N	393,415	232,917	45,70	18	10

Fueron analizados los niveles hidrostáticos y la composición química del agua en la superficie de los 18 pozos y en profundidad en siete pozos batométricos. El análisis químico de las muestras por los métodos

estándares (Baird, Eaton & Rice, 2017) permitió cuantificar el contenido 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. Al no existir diferencias significativas entre los valores medios de las variables hidrogeoquímicas al terminar los diferentes períodos hidrogeológicos, se conformó una muestra única en cada pozo (Yera, Miguel y Fagundo, 2010).

En el análisis hidroquímico de las muestras fueron empleados el método de clasificación propuesto por Kurlov y el índice hidrogeoquímico de Simpson, mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{Cl^-}{HCO_3^- + CO_3^{2-}}$$

En la Tabla 2, se observa la escala de valores, que constituyen un indicador de la calidad del agua.

Tabla 2. Contaminación presuntiva por intrusión salina según la razón de Simpson.

Clasificación del agua	Valor (meq/L)
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	$> 15,5$

El software MODELAGUA (Fagundo, González, Fagundo-Sierra, Suárez y Milián, 2006), permitió la modelación hidrogeoquímica inversa. De este modo se puede determinar el origen de la composición química de las aguas y los procesos geoquímicos que la causan. El software grafica estos resultados mediante diagramas de Stiff (Fagundo y González, 2005; Shot, Beard, Hissink, Silverbauer & Griffioen, 2022; Hounsinou, 2023). El ión Cl^- fue tomado como ión conservativo. Como muestras de referencia, se seleccionó el agua del pozo L1-N, suficientemente alejado de la línea costera y agua colectada directamente del mar (Tabla 3).

Tabla 3. Composición química de las muestras referencias (en meq/L).

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

Dentro de las técnicas estadísticas multivariantes se empleó el análisis factorial clásico en la determinación

de los factores que condicionan la hidrogeoquímica en la subcuenca. Esta técnica, basada en el reordenamiento o reducción del espacio evidencia, obteniéndose factores o variables causales a partir de una relación lineal homogénea de los atributos originales, permitió explicar de modo suficiente la mayor varianza de la población. Se recomienda retener las componentes cuya varianza (λ) sea mayor que uno. Sí las nuevas variables van a estar no correlacionadas debe realizarse una rotación ortogonal Varimax

Resultados y discusión

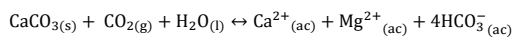
Comportamiento de los niveles hidrostáticos

En la subcuenca Najasa los pozos generalmente reportan niveles hidrostáticos por encima del nivel medio del mar, los niveles máximos están asociados, generalmente, a períodos lluviosos (años 1981 y 1988). Para muchos pozos el período crítico en el descenso de los niveles se reporta en los períodos secos entre 2015 y 2019. La amplitud de variación de los niveles va desde poco más de dos metros hasta más de 15 m.

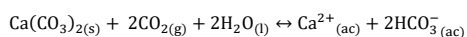
Reacciones que determinan la hidrogeoquímica

En las zonas de mezcla agua dulce-agua de mar se ponen en contacto dos fases químico-físicas muy diferentes en cuanto a su composición química, mineralización, densidad, pH, temperatura y contenido de gases. Se pudo precisar que la composición del agua monitoreada en el pozo está determinada por las siguientes reacciones químicas:

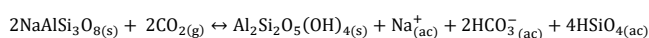
dolomita (disolución)



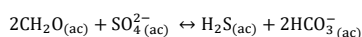
calcita (disolución)



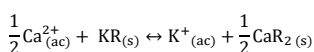
albita-caolinita



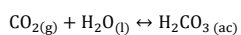
sulfato (reducción)



$\text{K}^+ - \text{Ca}^{2+}$ (intercambio)



$\text{CO}_2 - \text{HCO}_3^-$



Con la aplicación de la modelación hidrogeoquímica inversa, de conjunto con las técnicas estadísticas, fue

posible cuantificar las reacciones químicas que dan origen al agua muestreada, la proporción de agua de mar presente en el agua y los factores causales que determinan la hidrogeoquímica en la subcuenca. A las variables analizadas estadísticamente, se le asignó un símbolo, tal como se relaciona a continuación: $X_1 \rightarrow$ % 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, $X_6 \rightarrow \text{K}^+ - \text{Ca}^{2+}$ (intercambio) y $X_7 \rightarrow \text{CO}_2 - \text{HCO}_3^-$.

En la subcuenca Najasa se presentan, bien diferenciable, las tres zonas geoquímicas propuestas por Fagundo, Valdés y Rodríguez (1996) que serán descritas detalladamente a continuación.

Zonación hidrogeoquímica en el perfil

Zona en que prevalece agua del tipo $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ en equilibrio con la calcita

Se corresponde con áreas alejadas de la costa y con poca explotación del agua subterránea. En esta zona se encuentran los pozos L1-N, L3-N B5-N y B4-N, donde más del 90% de las muestras tomadas en la superficie del pozo presentan composición química normal, propia del acuífero carbonatado, sin contaminación por agua de mar (Fig. 3). El agua generalmente es de tipo $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$. Presenta relación de Simpson media entre 0,19 y 0,39. El contenido medio de SST mayormente no sobrepasa la concentración máxima deseable (CMD) de 500mg/L, aunque en ocasiones sobrepasa 700mg/L. El contenido medio del ión Cl^- es inferior a 100 mg/L.

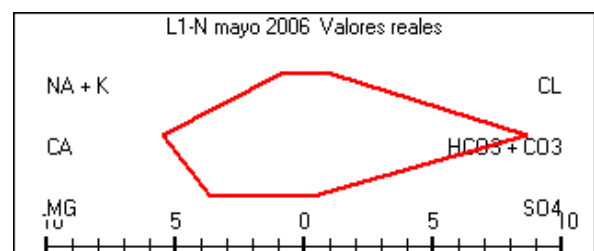


Fig. 3. Gráfico de Stiff, muestras fin de períodos seco 2006 del pozo L1-N.

En relación a las características hidrogeoquímicas en la profundidad de los pozos se debe señalar que las muestras tomadas en el pozo B5-N a 84 m de profundidad mantienen características similares a la reportada en la superficie del pozo. En el pozo B4-N a 51,6 m de profundidad el comportamiento es diferente, se manifiesta la segunda zona geoquímica.

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 ocupa la mayor área dentro de la subcuenca, donde ocurren grandes cambios en cada una de las variables hidrogeoquímicas. Ocupa el áreas central de la subcuenca y se manifiesta en la superficie de los pozos L2-N, 761, C2-N, B1-N, 6734, 220, B3-N, 611, 8595, 616 y B7-N donde se presentan valores medios de SST entre 500 mg/L y 1 000 mg/L aunque muestras aisladas sobrepasan estos valores. El contenido del ión Cl^- en algunos pozos es muy bajos, inferior a 100 mg/L (L2-N, 761, So4-N, C2-N, B1-N y 6734) en los demás pozos es mayor pero no se sobrepasa la concentración máxima admisible (CMA) de 250mg/L. La relación de Simpson muestra agua ligeramente contaminada por agua de mar en proporción que varía entre 0,1 y 0,9%. El agua mayormente es $HCO_3^- > Cl^- - Ca^{2+} > Mg^{2+}$.

Las áreas más próximas a la costa han estado moderadamente afectadas por la intrusión marina, reflejado en observaciones realizadas en la superficie de los pozos 613 y B6-N, con proporción de agua de mar que generalmente varía entre 1,5 y 3%, aunque en ocasiones la cuña salina retrocede y se observan valores más bajos, próximos a 0,5%. El contenido de SST en el agua excede los 1 000 mg/L y el contenido del ión Cl^- es mayor de 300 mg/L. El agua es del tipo $Cl^- > HCO_3^- - Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ o $Cl^- > HCO_3^- - Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$.

Con el objetivo de caracterizar los procesos hidrogeoquímicos que ocurren en la superficie y en profundidad en esta zona, se ejemplifica con los pozos B6-N y B7-N,

Caso de estudio 1: pozo B6-N

En el pozo se realizó el análisis hidrogeoquímico en la superficie y a 92,5 m de profundidad en el periodo de 1985 al 2019. Para ello fueron seleccionadas 35 muestras en cada una de estas profundidades.

Caracterización hidrogeoquímica de las muestras en la superficie del pozo B6-N

En la superficie del pozo el contenido medio de SST sobrepasa los 1 000 mg/L, por lo que el agua generalmente es salobre. El contenido del ión Cl^- como media excede los 300 mg/L, según la relación R,

el agua se encuentra moderadamente o ligeramente contaminada por agua de mar (Tabla 4). El agua más frecuente es $Cl^- > HCO_3^- - Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$.

Tabla 4. Estadísticos fundamentales de la composición del agua en la superficie del pozo B6-N.

Estadístico	Todos los valores se expresan en meq/L								
	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SST	R
Promedio	5,59	920	1,11	4,25	4,52	7,17	0,12	1037,34	1,70
Desviación estándar	1,10	3,62	0,60	0,94	1,41	3,07	0,09	214,77	0,74
Mínimo	7,92	16,13	2,40	5,20	8,42	13,90	0,30	1383,08	3,13
Máximo	2,64	0,99	0,00	1,60	2,40	0,30	0,00	560,00	0,15

La matriz de Pearson destaca tres valores-P por debajo de 0,05, lo que indica correlaciones significativas, nivel de confianza del 95,0%, entre tres pares de variables (Tabla 5). El análisis factorial permitió extraer cuatro factores con valores propios mayores que 1,0 (2,13, 1,67, 1,51 y 1,09), explican el 91,2 % de la variabilidad en los datos. Los factores rotados tienen las ecuaciones: $Y_1 = -0,98 * X_2 + 0,97 * X_3$, explica 30,4 %; $Y_2 = -0,91 * X_1 + 0,91 * X_6$, explica el 23,8 %; $Y_3 = -0,89 * X_4 + 0,90 * X_7$, explica 21,5 %, $Y_4 = 0,98 * X_5$, explica 15,5 %.

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	0,0811 0,6431	-0,1831 0,2925	-0,0935 0,5932	-0,0954 0,5856	-0,6627 0,0000	0,1060 0,5446
X ₂		1,0	-0,9260 0,0000	-0,1224 0,4835	-0,0505 0,7734	-0,0678 0,6989	-0,1475 0,3979
X ₃			1,0	0,0761 0,6639	-0,0074 0,9665	0,1714 0,3249	0,1889 0,2771
X ₄				1,0	-0,1940 0,2642	-0,0134 0,9390	-0,6205 0,0001
X ₅					1,0	-0,1443 0,4082	-0,0636 0,7166
X ₆						1,0	0,1583 0,3639

El primer factor destaca la relación lineal relativamente fuerte, nivel de confianza del 95,0%, entre la disolución de la dolomita (X₂) y la disolución de la calcita(X₃), tiene la ecuación $X_2 = 0,02 - 0,56 * X_3$ (Fig. 4).

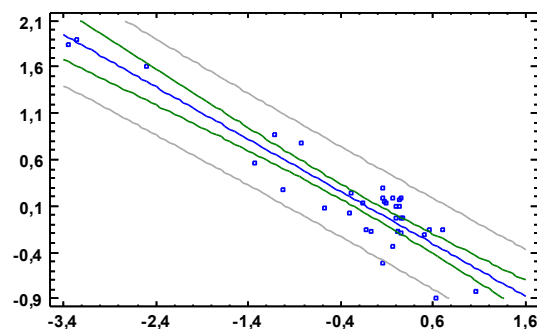


Fig. 4. Relación lineal entre la disolución de calcita y disolución de la dolomita

Esta relación explica el 85,7 % de la variabilidad, lo que revela como predominante la dolomitización, propio de la intrusión marina, resultado de la reacción entre el carbonato de calcio presente en forma dispersa o como material rocoso carbonatado y el exceso de magnesio procedente del mar, lo que trae consigo la formación de dolomita.

El segundo factor muestra una relación lineal moderadamente fuerte, nivel de confianza del 95,0%, entre el intercambio $K^+ - Ca^{2+}$ (X_6) y el % de agua de mar (X_1) (Fig. 5) que tiene la forma $X_6 = 0,019 - 0,14 * X_1$ y explica 43,9 % de la variabilidad en X_6 .

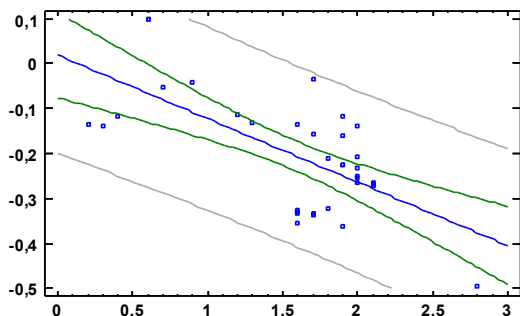


Fig. 5. Relación lineal entre el % de agua de mar y el intercambio $K^+ - Ca^{2+}$.

El tercer factor destaca la relación lineal moderadamente fuerte, nivel de confianza del 95,0%, entre $CO_2 - HCO_3^-$ (X_7) y la transformación albita-caolinita (X_4) tiene la forma $X_4 = -0,15 - 0,45 * X_7$ y explica 38,5 % de la variabilidad en X_7 (Fig. 6). El cuarto factor está determinado por la reducción del sulfato.

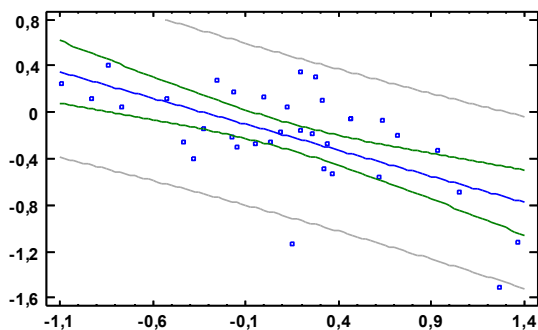


Fig. 6. Relación lineal entre $CO_2 - HCO_3^-$ y transformación albita-caolinita.

Caracterización hidrogeoquímica de las muestras a 92,5 m de profundidad del pozo B6-N

El contenido de SST sobrepasa los 1 200 mg/L, por lo que el agua es salobre. El ión Cl^- como media sobrepasa los 450 mg/L, según el valor R, el agua se

encuentra moderadamente o ligeramente contaminada por agua de mar (Tabla 6). El agua más frecuente es del tipo $Cl^- > HCO_3^- - Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ o $Cl^- > HCO_3^- - Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$.

Tabla 6. Estadísticos fundamentales de la composición del agua a 92,5m de profundidad en el pozo B6-N.

Estadístico	Todos los valores se expresan en meq/L								
	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SST	R
Promedio	5,46	12,74	1,34	4,25	4,77	10,61	0,11	1244,4	1,88
Desviación estándar	0,98	2,79	0,85	1,11	1,32	2,89	0,08	172,2	0,95
Mínimo	6,80	19,07	5,20	5,60	8,17	16,80	0,30	1503,2	4,43
Máximo	3,20	0,90	0,00	0,80	1,00	0,30	0,00	567,00	0,15

La matriz de Pearson destaca tres valores-P por debajo de 0,05, lo que indica correlaciones significativas, nivel de confianza del 95,0%, entre tres pares de variables (Tabla 7).

Tabla 7. Matriz de correlación de Pearson de las variables observadas a 92,5 m en el pozo B6-N.

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
X ₁	1,0	-0,2134 0,2185	0,0422 0,8099	-0,0299 0,8645	0,1712 0,3254	-0,4682 0,0046	0,1589 0,3618
X ₂		1,0	-0,7499 0,0000	-0,4682 0,0046	-0,2129 0,2194	0,2630 0,1269	0,1490 0,3929
X ₃			1,0	0,0931 0,5948	0,0645 0,7126	-0,0424 0,8090	-0,1593 0,3606
X ₄				1,0	-0,1986 0,2527	-0,2441 0,1577	-0,4740 0,0040
X ₅					1,0	0,0645 0,7127	-0,2284 0,1869
X ₆						1,0	0,0447 0,7987

El análisis factorial permitió extraer cuatro factores con valores propios mayores que 1,0 (2,23, 1,47, 1,27 y 1,08), que explican el 86,4% de la variabilidad en los datos. Los factores rotados tienen las ecuaciones: $Y_1 = -0,89 * X_2 + 0,95 * X_3$, explica el 31,8 %; $Y_2 = -0,82 * X_4 + 0,86 * X_7$ explica el 21,0 %; $Y_3 = 0,85 * X_1 - 0,85 * X_6$, explica 18,2 %; $Y_4 = 0,96 * X_5$, explica 15,4 %. El agua presente a esta profundidad muestra un comportamiento similar al observado en la superficie del pozo, solo se debe señalar que la relación entre el intercambio $K^+ - Ca^{2+}$ (X_6) y el % de agua de mar (X_1) pierde importancia a la hora de explicar los fenómenos hidrogeoquímicos que ocurren en el agua.

Caso de estudio 2: pozo B7-N hasta 15 m

En el pozo se pudo determinar la presencia de la segunda zona geoquímica hasta la profundidad de 15 m, a mayor profundidad se presenta la tercera zona. En el estudio del agua en la superficie del pozo se contó con 32 muestras y a 15,0 m de profundidad con 30 muestras.

Caracterización hidrogeoquímica de las muestras en la superficie del pozo B7-N

El contenido medio de las SST se encuentra muy próximo a la CMA, y en ocasiones la llega a sobrepasar, por lo que el agua generalmente es salobre. El contenido medio del ión Cl^- (239,2 mg/L) se encuentra muy próximo a la CMA, aunque en algunos momentos apenas sobrepasa la CMD. Se manifiesta el predominio de los iones Na^+ y Cl^- . El tipo de agua más frecuente es $Cl^- > HCO_3^- - Na^+ > Ca^{2+}$. Se pudo comprobar que la proporción de agua de mar varía entre 0,4 y 1,9%, la media alcanza 1,1%. Según la relación R el agua se encuentra moderadamente o ligeramente contaminada por agua de mar (Tabla 8).

Tabla 8. Estadísticos fundamentales del agua en la superficie del pozo B7-N.

Estadístico	Todos los valores se expresan en meq/L								
	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SST	R
Promedio	5,78	6,74	1,03	5,14	2,69	5,87	0,08	921,01	1,345
Desviación estándar	1,66	2,35	0,49	1,55	1,83	0,09	0,08	179,92	0,919
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

En la determinación de los factores que determinan la hidrogeoquímica en la superficie del pozo se debe señalar que la matriz de Pearson muestra las correlaciones significativas, a un nivel de confianza del 95,0%, entre cuatro pares de variables (Tabla 9). El análisis factorial clásico 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 9. Matriz de correlación de Pearson de las variables observadas en la superficie en el pozo B7-N.

	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

El primer factor subraya la relación lineal inversa moderadamente fuerte entre la disolución de la dolomita (X₂) y la de la calcita (X₃), nivel de confianza

del 95,0%, que explica el 69,9% de la variabilidad de los datos, según la ecuación $X_2 = -0,043 - 0,489 * X_3$, que revela el proceso de dolomitización como predominante en la superficie del pozo.

El segundo factor destaca la relación lineal relativamente débil, a un nivel de confianza del 95,0%, entre las variables transformación albita-caolinita (X₄) y el % de agua de mar (X₁) dada por la expresión $X_4 = 0,748 - 0,541 * X_1$ que explica el 17,7% de la variabilidad en X₄. También resalta la relación entre la reducción del sulfato (X₅) y el % de agua de mar (X₁) que tiene la forma $X_5 = -0,483 + 0,255 * X_1$ y explica 17,8% de la variabilidad en X₅. Este factor expresa la acción moderada de la mezcla de aguas con la reducción de sulfato, favorecido por la presencia de materia orgánica, y el inverso de transformación albita-calolinita.

Caracterización hidrogeoquímica de las muestras a 15 m de profundidad del pozo B7-N

A esta profundidad el agua muestra una notable afectación en su calidad, determinado por el proceso de mezcla agua dulce-agua salada. El contenido de SST como media sobrepasa la CMA. La concentración del ión Cl^- como media (329,6 mg/L) sobrepasa ampliamente la CMA. Según la relación de R el agua presenta moderada o ligera contaminación por agua de mar (Tabla 10).

Tabla 10. Estadísticos fundamentales de la composición del agua a 15m de profundidad del pozo B7-N.

Estadístico	Todos los valores se expresan en meq/L								
	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SST	R
Promedio	5,26	9,28	1,17	5,01	3,11	7,96	0,17	1043,49	1,98
Desviación estándar	1,73	8,74	0,60	1,85	2,39	6,85	0,30	537,37	1,85
Mínimo	1,70	2,99	0,13	1,20	0,60	3,50	0	463,3	0,41
Máximo	7,52	43,25	3,40	7,35	11,13	36,00	1,15	3097,78	8,74

El tipo de agua más frecuentes es $Cl^- > HCO_3^- - Na^+ > Ca^{2+}$, dado el predominio de los iones Na^+ y Cl^- , similar a lo observado en la superficie del pozo. La proporción de agua de mar varía entre 0,4 y 7,7% y tiene como media 1,56%. Las correlaciones de Pearson destacan valores-P por debajo de 0,05, por lo que nueve pares de variables presentan correlaciones significativas, nivel de confianza de 95,0%, Tabla 11.

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 66,9% de la variabilidad en los datos originales.

Cuando se presenta de intrusión salina relativamente baja se favorecen algunos procesos hidrogeoquímicos: la reacción inversa de la reducción de los sulfatos, la transformación albíta-caolinita y en menor medida la disolución de la dolomita y la precipitación de la calcita.

Tabla 11. Matriz de correlación de Pearson de las variables observadas a 15 m en el pozo B7-N.

	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 (X₂) y la disolución de la calcita (X₃) que tiene la ecuación $X_2 = -0,139 - 0,424 * X_3$ y explica el 69,81% de la variabilidad en X₂; la transformación albíta-caolinita (X₄) y la reducción del sulfato (X₅) que tiene la ecuación $X_4 = -0,095 - 1,397 * X_5$ y explica el 48,18% de la variabilidad en X₄.

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

En las áreas más próximas al límite costero donde se encuentran ubicados los pozos B8-N y B10-N que manifiestan en todo el perfil la tercera zona geoquímica. El pozo B10-N presenta el mayor valor medio de SST reportado en la superficie en toda la subcuenca, cerca de 3 300mg/L; en la profundidad se incrementa considerablemente y puede sobrepasar los 6 000 mg/L. Para caracterizar la tercera zona geoquímica, se ha tomado como referencia el análisis del agua en el perfil del pozo B7-N a 30 m y 66,4 m de profundidad.

Caso de estudio 3: pozo B7-N a 30 m y a 66,4 m

Para el estudio se cuenta con muestras tomadas en el pozo B7-N a dos profundidades (20 muestras a 30,0 m y 16 muestras a 66,4 m).

Caracterización hidrogeoquímica de las muestras a 30 m de profundidad del pozo B7-N

El agua es de muy mala calidad, el contenido medio de SST sobrepasa los 3 400 mg/L, en ocasiones excede los 6 000 mg/L; a partir del año 2010 mejora su calidad dada la reducción de las extracciones en este período. El contenido del ión Cl⁻ es muy alto, como media supera 1 650 mg/L, la relación R muestra agua altamente o severamente contaminada por agua de mar (Tabla 12). Se manifiestan el predominio de los iones Na⁺ y Cl⁻ asociados al incremento del proceso de mezcla de agua, hecho que fue corroborado por la modelación hidrogeoquímica inversa. La proporción de agua de mar varía entre 1,0 y 19,9% y tiene como media 8,21%. El tipo de agua más frecuente es Cl⁻ - Na⁺, a partir del año 2010 pasa a ser Cl⁻ > HCO₃⁻ - Na⁺ > Ca²⁺.

Tabla 12. Estadísticos fundamentales de la composición del agua a 30 m de profundidad del pozo B7-N.

Estadístico	Todos los valores se expresan en meq/L									
	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SST	R	
Promedio	5,38	45,85	4,38	7,63	7,91	40,71	0,55	3435,3	8,226	
Desviación estándar	1,52	29,9	5,63	2,71	4,55	27,53	0,74	2023,6	4,799	
Mínimo	1,28	5,97	0	0,95	0,72	3,48	0	503,00	1,435	
Máximo	7,07	110,0	14,0	11,37	19,5	97,60	2,20	7755,9	18,33	

La matriz de correlaciones de Pearson destaca correlaciones significativas entre 10 pares de variables, con un nivel de confianza del 95,0% (Tabla 13). El análisis factorial permitió extraer dos factores con valores propios mayores a 1,0 (3,421 y 1,140), que explican el 89,2% de la variabilidad de los datos: $Y_1 = -0,790 * X_4 + 0,605 * X_6$, explica el 66,9%; $Y_2 = 0,686 * X_1 - 0,855 * X_2 + 0,855 * X_3$, explica el 22,3%.

Tabla 13. Matriz de correlación de Pearson de las variables a 30 m de profundidad en el pozo B7-N.

	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	-0,7973 0,0000
X ₅					1,0	-0,0198 0,9339	0,3403 0,1421
X ₆						1,0	0,7345 0,0002

Estos factores permiten identificar que a esta profundidad los fenómenos hidrogeoquímicos predominantes son los procesos inversos de reducción de los sulfatos e intercambio iónico K⁺ - Ca²⁺, 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.

En el primer factor se combina de forma lineal moderadamente fuerte las variables transformación albita-caolinita (X_4) y el intercambio $K^+ - Ca^{2+}$ (X_6), a nivel de confianza de 95,0%, explica 26,47% de la variabilidad y tiene la expresión $X_6 = -0,549 - 0,119 * X_4$ (Fig. 7).

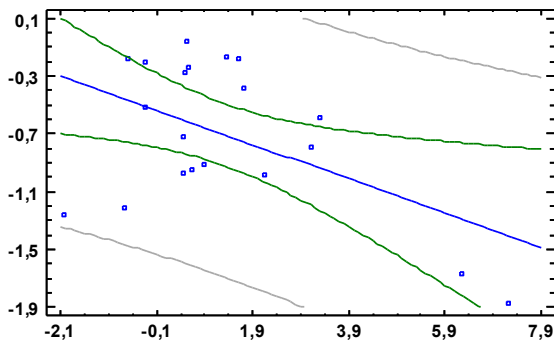


Fig. 7. Relación lineal entre transformación albita-caolinita y el intercambio

En el segundo 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 40,3% de la variabilidad en X_2 y tiene la forma $X_2 = -0,577 - 0,113 * X_1$ (Fig. 8).

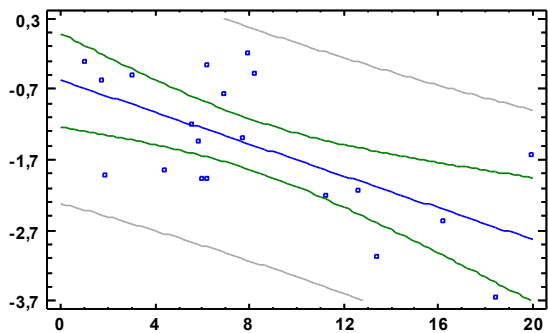


Fig. 8. Relación lineal entre % de agua de mar y la disolución de la dolomita.

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 41,5% de la variabilidad en X_3 (Fig. 9).

Caracterización hidrogeoquímica de las muestras a 66,4 m de profundidad del pozo B7-N

En el agua el valor medio de SST se acerca a los 5 000mg/L, aunque puede alcanzar en observaciones

aisladas cerca de 10 000mg/L. El contenido del ión Cl^- es muy alto, en observaciones aisladas puede sobrepasar los 5 000 mg/L, la media excede los 2 460 mg/L.

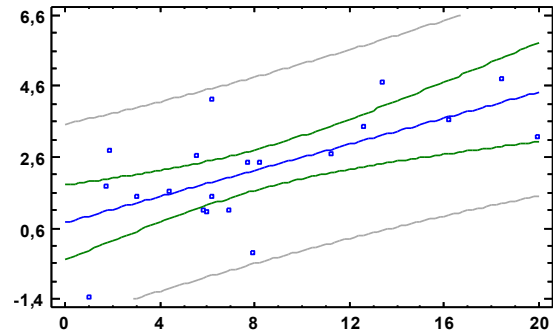


Fig. 9. Relación lineal entre % de agua de mar y la disolución de la calcita.

La relación R muestra valores por encima de 15,5, por lo que la contaminación es severa, a partir del año 2010 descendiendo esta relación y el agua llega a altamente contaminada (Tabla 14).

Tabla 14. Estadísticos fundamentales de la composición del agua a 66,4 m de profundidad del pozo B7-N.

Estadístico	Todos los valores se expresan en meq/L								
	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SST	R
Promedio	5,85	72,94	4,09	8,94	11,54	60,76	0,71	4981,2	13,12
Desviación estándar	1,5	47,36	3,99	2,69	6,38	39,98	0,87	2805,0	9,01
Mínimo	2,5	7,606	0,4	4,2	2,85	6,48	0	1112,7	1,02
Máximo	8,5	150,0	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^- (Fig. 10) en virtud del incremento del proceso de mezcla de aguas, hecho que fue corroborado por la modelación hidrogeoquímica inversa; se pudo comprobar que la proporción de agua de mar varía entre 1,2 y 27,2%, la media es de 13,1%.

La matriz de las correlaciones de Pearson donde valor-P por debajo de 0,05 indica correlaciones significativas, con un nivel de confianza de 95,0%, entre ocho pares de variables (Tabla 15). En la determinación de factores causales de la composición del agua, dos factores rotados poseen valores propios mayores o iguales que 1,0 (3,166 y 1,971) y explican el 87,8% de la variabilidad en los datos:

$$Y_1 = 0,841 * X_1 - 0,942 * X_2 + 0,756 * X_3 - 0,713 * X_6, \text{ explica el } 54,1\%;$$

$$Y_2 = 1,151 * X_4, \text{ explica el } 33,7\%.$$

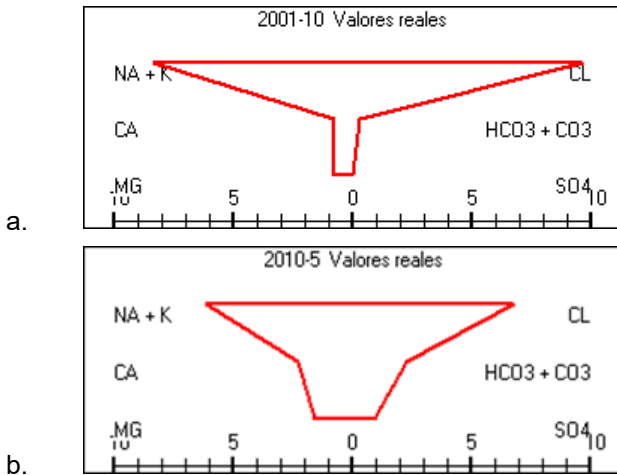


Fig. 10. Gráficos de Stiff, a. muestra fin de período húmedo 2001 y b. muestra fin de período seco 2010.

A la profundidad de 66,4 m 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 15. Matriz de correlación de Pearson de las variables observadas a 66,4m de profundidad en el pozo B7-N.

	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

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 49,9% 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 45,9% de la variabilidad en X_3 (Fig. 11); la relación entre el intercambio $K^+ - Ca^{2+}$ (X_6) y % de agua de mar (X_1), explica 51,5% de la variabilidad en X_6 y tiene la ecuación $X_6 = -0,027 - 0,092 * X_1$ (Fig. 12).

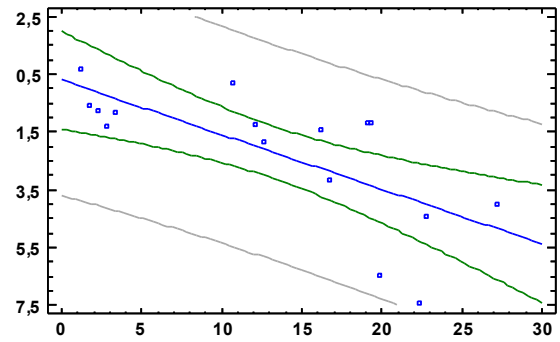


Fig. 11. Relación lineal entre % de agua de mar y la disolución de la dolomita

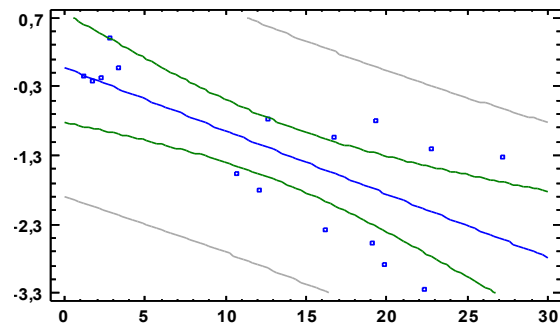


Fig. 12. Relación lineal entre % de agua de mar y el intercambio $K^+ - Ca^{2+}$.

El segundo factor destaca la transformación albita-caolinita (X_4) que explica el 33,7% de la variabilidad de las variables originales.

Conclusiones

La subcuenca Najasa se encuentra afectada por los procesos de intrusión marina, en ella se presentan tres zonas geoquímicas bien diferenciadas. En la superficie de los pozos la 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 ocupa la mayor área de la subcuenca, la parte central; en la cercanía de la zona costera se presenta la zona en que prevalece agua del tipo $Cl^- - Na^+$, las cuales se encuentran sobresaturadas en relación con la calcita, en ellas el agua de muy mala calidad, que se encontrase altamente o severamente contaminada por agua de mar. En el perfil del pozo el agua puede corresponder con una misma zona geoquímica o puede evolucionar de una zona geoquímica a otra. El avance de la cuña salina que trae aparejado el incremento de la proporción de agua de mar en la mezcla de aguas, incide en la intensificación de algunas reacciones hidrogeoquímicas y el incremento de su importancia al

explicar sus características, en función de un manejo más adecuado del recurso hídrico.

Financiamiento de la investigación

La investigación se realizó bajo los auspicios de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Camagüey, Cuba.

Contribución de los autores

Yera Digat: diseño de la investigación, recopilación de información, interpretación de los datos, análisis de los resultados, redacción y revisión final del manuscrito.

Abad Ramírez: recopilación de información, interpretación de los datos, redacción y revisión final del manuscrito.

Conflictos de intereses

No se manifiestan conflictos de intereses.

Referencias

Baird, R. B., Eaton, A. D. & Rice, E. W. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water. 23rd Edition*. Washington DC: American Public Health Association.

Custodio, E. y Llamas, M. R (1996). *Hidrogeología Subterránea, Segunda Edición*, España: Omega, S.A.

Fagundo, J. y González, P. (2005). *Hidrogeoquímica*. La Habana: Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional.

Fagundo, J., González, P., Fagundo-Sierra, J., Suárez, M., y Milián, C. (2006). Metodología para el control automatizado de la calidad de las aguas en acuíferos, cuencas y yacimientos de aguas minerales y minero medicinales. En: J. Fagundo (comp.). *Contribución al conocimiento geológico, hidrogeológico, ambiental y del termalismo en la Sierra del Rosario*. La Habana: Productos y Servicios Geográficos (GEOTECH).

Fagundo, J., Váldez, J., y Rodríguez, J. (1996). *Hidroquímica del Karst*. Granada, España: Editorial Grupo de Investigación Recursos Hídricos y Geología Ambiental.

Hounsinou, S. P. (2023). Presentation and use of a new diagram to determine the facies and the origins of water: The 3rd Parfait-Hounsinou diagram. *Heliyon*, 9(1), e17688. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17688>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). *AQUASTAT Perfil de Países- Cuba*. Roma: Autor.

Shot, P., Beard, J., Hissink, R., Silverbauer, M. & Griffioen, J. (2022). Adapting classical water quality diagrams for ecohydrological and policy applications. *Journal of Hydrology X*, 17(1), 100137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2022.100137>

Yera Digat, G., Abad Ramírez, I. y Suárez Acuña, M. C. (2022). Caracterización de la intrusión salina en la subcuenca Najasa, cuenca Costera Sur de Camagüey, Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 48(3), 34-50.

Yera, G., Miguel, C., y Fagundo, J. (2010). Métodos estadísticos en el estudio hidrogeoquímico del sistema acuífero Costera Sur de Camagüey, Cuba. *Minería y Geología*, 26 (1), 45-75.