



**°VIII CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERIA HIDRAULICA
(Mayo del 2007, Isla de La Juventud, CUBA)**

**Geoquímica de las aguas subterráneas de la cuenca hidrogeológica m-1, cuenca norte
de Matanzas**

O. Beato¹ y J. R. Fagundo,²

1-Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.

2-Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional.

¹ E-Mail otilio@hidro.cu, Teléfono 834-65-67(trabajo); Casa 65-22-70

² E-Mail jrfag@infomed.sld.cu Teléfono casa 202-18-71

RESUMEN

Se presentan las principales regularidades geoquímicas de las aguas subterráneas que drenan depósitos carbonatados en la cuenca hidrogeológica M-1 de Matanzas. Se relaciona la composición química, así como los patrones hidrogeoquímicos y tipos de aguas con el medio geológico; se establece la evolución de la química del agua en dirección del flujo; se estudia la variación temporal del contenido de minerales disueltos.

ABSTRACT

The main geochemical regularities of the groundwater which drain limestone deposits at hidrogeological basin of M-1, Matanzas are shown. The relationships among geological environ and chemical composition of macro and micro compounds, geochemical pattern and water type are found; the chemical evolution throw the flow path are established; the stational variation of the mineral dissolved are studied; the geochemical processes which explain the chemical composition origin are determined.

VIII CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERIA HIDRAULICA

GEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA CUENCA HIDROGEOLÓGICA M-1, CUENCA NORTE DE MATANZAS

O. Beato¹ y J. R. Fagundo,²

1-Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.

2-Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional.

RESUMEN

Se presentan las principales regularidades geoquímicas de las aguas subterráneas que drenan depósitos carbonatados en la cuenca hidrogeológica M-1 de Matanzas. Se relaciona la composición química, así como los patrones hidrogeoquímicos y tipos de aguas con el medio geológico; se establece la evolución de la química del agua en dirección del flujo; se estudia la variación temporal del contenido de minerales disueltos.

ABSTRACT

The main geochemical regularities of the groundwater which drain limestone deposits at hidrogeological basin of M-1, Matanzas are shown. The relationships among geological environ and chemical composition of macro and micro compounds, geochemical pattern and water type are found; the chemical evolution throw the flow path are established; the stational variation of the mineral dissolved are studied; the geochemical processes which explain the chemical composition origin are determined.

Introducción

Las aguas subterráneas adquieren su composición química mediante un proceso complejo, donde intervienen procesos químico-físicos y factores de tipo, geológico, hidrogeológico, geomorfológico, climático, pedológico, antrópico y otros (Fagundo, 1990).

Los procesos químico-físicos están regidos por leyes termodinámicas (Fagundo, 1996). En un momento dado de su trayectoria, la composición química del agua es el resultado de interacciones más o menos prolongadas de los flujos con el medio ambiente drenado. En esas interacciones el agua actúa como un agente geológico que origina diferentes fenómenos naturales mediante procesos disolución de gases y minerales, precipitación, hidrólisis, hidratación, oxidación-reducción, mezcla de aguas, intercambio iónico y otros (Tóth, 2000). Como agente geológico, el movimiento del agua subterránea puede cambiar el medioambiente geológico y causar desastres naturales (Wu, 2003).

Entre los factores geológicos que controlan la composición química de las aguas, son determinantes: la litología, el estado de yacencia de las secuencias estratigráficas, la tectónica, el agrietamiento, y la textura y porosidad de las rocas, entre otros. La litología determina, por lo general, las facies hidroquímicas dominantes en una región determinada, es decir, el tipo de agua, mientras que el resto ejercen su influencia sobre el contenido de minerales disueltos.

Los factores hidrogeológicos están relacionados con la permeabilidad del acuífero, el tipo de flujo, su velocidad, así como la zona por donde se mueve el agua.

Los factores de tipo geomorfológico también influyen en la composición química de las aguas, en especial, el escarpe de los macizos, el tipo de vegetación, el grado de erosión de los terrenos y la naturaleza de las propias formas del relieve y el tipo de suelo.

Los factores climáticos intervienen de forma activa en la dinámica de la meteorización mecánica y química de los macizos, al permitir en el primer caso la fragmentación, traslado y acarreo de los minerales lejos del lugar de origen, así como facilitar en el segundo caso, la disolución de los minerales de las rocas. Los elementos del clima más determinantes en el modo en que las aguas adquieren su composición química son: la temperatura, humedad relativa, intensidad y duración de las precipitaciones, intensidad y duración de las radiaciones, velocidad del aire, entre otros.

Por último, se debe destacar el papel que desempeña el factor antrópico en la composición química de las aguas. La actividad del hombre causa un deterioro progresivo de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas.

La calidad del agua se refiere a su composición química expresada en términos de uso. Por lo general, la calidad del agua en las cuencas cerradas es superior a la de las cuencas superficiales. Sin embargo, debido al incremento sostenido de las extracciones, en las franjas costeras y en las cuencas abiertas, en ocasiones la calidad de este líquido experimenta una degradación progresiva como consecuencia de la sobreexplotación a que se ven sometidos nuestros acuíferos. Los requisitos para el uso del agua con fines de consumo está regido por la Norma Cubana de Agua Potable (NC. 93-02: 1985).

El presente trabajo tiene por objetivo estudiar el origen de la formación las aguas subterráneas de Cuba que drenan carbonatos (Figura 1), su evolución química a través de su trayectoria, los procesos geoquímicos que explican la composición de las mismas, así como la relación entre dicha composición y el medio geológico drenado. Este trabajo formará parte de otro más extenso que incluirá la caracterización hidrogeoquímica de flujos de diferente naturaleza que drenan otras litologías.

MATERIALES Y MÉTODOS

La constitución litológica de las diferentes formaciones geológicas fue tomada del Mapa Geológico de Cuba. Escala 1: 250 000 (Academia de Ciencias de Cuba, 1989).

Los datos hidroquímicos utilizados en el desarrollo de este trabajo corresponden a las bases de datos de la Red de Calidad de las Aguas del INRH.

Los análisis fueron realizados mediante las técnicas analíticas estándar, al igual que los contenidos de los principales constituyentes de las aguas (APHA, AWWA, WPCF, 1989).

La calidad de los datos fue chequeada mediante balance de aniones y cationes. Además, mediante el empleo del sistema informático HIDROGOQUIM (Fagundo et al, 2005), se comparó la conductividad eléctrica real y teórica, eliminándose aquellos datos de mala calidad. Mediante dicho programa de computación también se realizaron los diferentes cálculos geoquímicos .

Para la clasificación de las aguas se utilizó el método hidroquímico de Kurlov. Los patrones hidrogeoquímicos y los procesos geoquímicos que explican el origen de la composición

química de las aguas fueron determinados mediante el sistema informático MODELAGUA (Fagundo-Sierra et al, 2001), basado en modelos de reconocimiento de patrones, balance de masas y de mezcla de aguas.

Aplicando MODELAGUA, la composición química del agua fue caracterizada a través de determinadas relaciones iónicas o patrones hidrogeoquímicos propuestos por Fagundo (1998). Estos patrones consisten en relaciones estequiométricas del tipo $\text{Na} + \text{K} : \text{Mg} : \text{Cl} : \text{HCO}_3 : \text{SO}_4$. Sobre esta base se establecen 729 patrones (27×27 combinaciones numéricas formadas por números enteros entre 1 y 9).

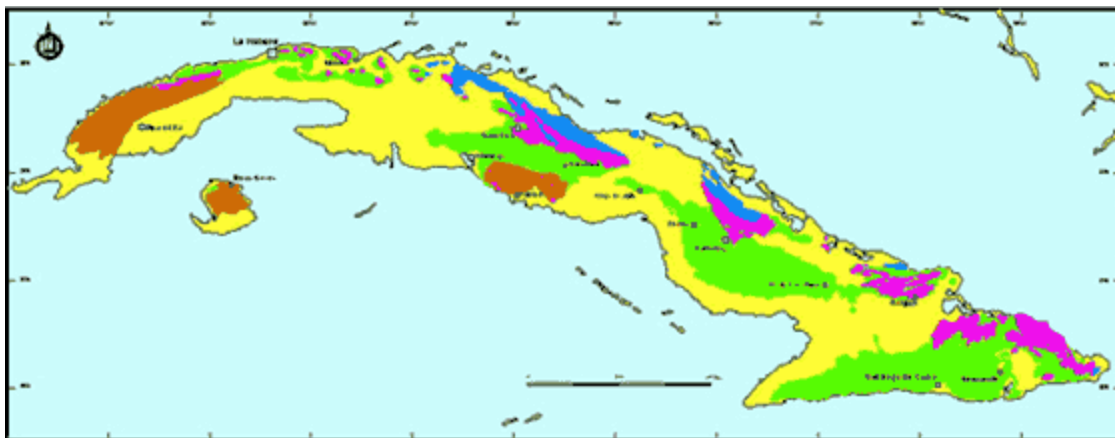
DISTRIBUCIÓN DE LOS DEPOSITOS CARBONATADOS DEL INTERVALO NEÓGENO CUATERNARIO

Depósitos del Mioceno

Estas rocas tienen un amplio desarrollo en el país, tal como se aprecia en el mapa esquemático de las rocas de Cuba (Figura 1), siendo los más frecuentes los depósitos del Mioceno inferior y medio (tabla 2), contienen las principales reservas de aguas subterráneas de Cuba (Ergerov y Luege, 1967).

En las provincias de La Habana y Matanzas se distinguen dos facies: margosa y calcárea. El espesor medio de los depósitos oscila entre 60 y 300 m, alcanzando 621 m al norte de la ciudad de Matanzas.

Figura 1. Mapa esquemático de las rocas de Cuba (cortesía de M. Iturralde Vinen).



ROCAS MARINAS (conglomerados, areniscas, margas, calizas, etc.) del Intervalo neógeno – cuaternario.



ROCAS MARINAS (calizas, dolomitas, pizarras, pedernales, yesos) del intervalo cretácico – paleógeno.



Rocas del SIAL (Esquistos, Pizarras, Mármoles, Calizas, etc) del intervalo Cretácico – Paleógeno.



Rocas ÍGNEAS (Dioritas, Granitos, Andesitas, Dacitas, Tobas, etc.) del intervalo Cretácico – Paleógeno.



Rocas del SIMA (Peridotitas, gabros, diabasas, basaltos).

Tabla 1. Composición litológica de las formaciones geológicas asociadas a los carbonatos del intervalo Neógeno - Cuaternario.

No	Edad (Símbolo)	Formación	Composición	Yacimiento
1	Neógeno ($N_1^{1,2}$)	Paso Real	Calizas, areniscas, conglomerados, margas.	Pozos de abasto público a la población.
	Neógeno ($N_1^{1,2}$)	Güines	Calizas biógenas, calizas detríticas, dolomitas	Pozos de abasto público a la población.
	Neógeno ($N_1^{1,2}$)	Cojimar	Margas, calizas arcillosas, calizas.	Pozos de abasto público a la población, M. Pocitos.
2	Neógeno ($N_1^{1,2}$)	Caobas	Calcilutitas, calizas arcillosas	Pozos de abasto público a la población.
3	Neógeno (N_1^1)	Husillo	Calizas biógenas	Pozos de abasto público a la población.
1	Neógeno (N_1)	Manga Larga	Calizas rellenas e intercaladas de margas	Zona de alimentación del yacimiento Amaro.

En la provincia de Matanzas el complejo de aguas de estratos fisurales y de estratos cársicos constituido por las calizas miocénicas está difundido entre las bahías de Broa y de Cochinos hasta las bahías de Cárdenas y de Villa Clara. Estas calizas son muy cavernosas. Los caudales de los pozos varían entre 10 y 300 l/s.

Depósitos del Cuaternario

Los depósitos carbonatados cuaternarios de Cuba, comunes a lo largo del litoral, están representados por calizas arrecifales. Estas calizas suelen ser muy cavernosas y contienen aguas salinas (acuíferos de tipo estrato cársico). Las aguas dulces pueden existir en cantidades limitadas.

La composición litológica principal de los diferentes depósitos carbonatados relacionados con las muestras estudiadas, acorde al Mapa Geológico de Cuba escala 1:250 000 (ACC; IGP; ACC de la URSS, 1985), se presenta en la tabla 1. En dicha tabla también se exponen muestras representativas de aguas subterráneas estudiadas en este trabajo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los sedimentos carbonatados del intervalo Neógeno-Cuaternario son los que se encuentran más ampliamente distribuidos por todo el país (Figura 1). Con el objetivo de caracterizar el agua que drena estos depósitos desde el punto de vista hidrogeoquímico, fue seleccionada la Cuenca M-1 de Matanzas.

Como representativas de este tipo de aguas, se ha escogido en este trabajo para su estudio, el acuífero desarrollado en la cuenca hidrogeológica M-1, perteneciente a la Cuenca Norte de Matanzas.

Cuenca hidrogeológica M-1 de Matanzas

En la tabla 2 se presentan los resultados del procesamiento de los datos hidroquímicos de las fuentes de abasto de la cuenca hidrogeológica M-1, perteneciente a la cuenca Norte de Matanzas.

En general se aprecian tres tipo de aguas: bicarbonatadas cálcicas, bicarbonatadas cálcicas magnésicas y aguas de composición mixta (fundamentalmente de tipo bicarbonatos cloruradas o cloruradas bicarbonatadas cálcico sódicas o sódico cálcicas). Las dos primeras asociadas a calizas (RC-1, RC-5, RC-6, RC-7, RC-8, RC-18, RC-25, RC-27, RC-29, RC-38, RC-39, RC-47) y calizas dolomitizadas respectivamente (RC-3, RC-13, RC-21), y las últimas a mezclas de aguas dulce con agua de mar (RC-2, RC-9, RC-11, RC-12, RC-23, RC-26), como resultado de la intrusión marina en el acuífero. Los patrones hidrogeoquímicos correspondientes a cada tipo de agua se muestra en la tabla 18. En forma gráfica, pueden apreciarse una selección de dichos patrones en las figuras 2 a -2 c.

Tabla 2. Composición química de las fuentes de abasto de la Cuenca Hidrogeológica M-1, perteneciente a la Cuenca Norte de Matanzas. Valores medios en mg/l.

No	Muestra	N	T	pH	CO2	TSS	HCO3	Cl	SO4	Ca	Mg	Na+K	Tipo de agua	CV _{TSS}
1	RC-1	27	25.0	7.35	21.3	455	302.4	23.7	12.2	94.8	8.3	13.7	HCO3-Ca	7.1
2	RC-2	41	25.0	7.24	30.9	852	320.2	236.7	40.2	97.2	29.0	128.6	Cl>HCO3-Na>Ca	16.7
3	RC-3	33	25.0	7.29	26.0	439	295.5	20.8	11.8	83.9	13.9	13.5	HCO3-Ca>Mg	13.8
4	RC-5	34	25.0	7.22	30.3	437	294.9	20.8	10.6	86.7	10.6	13.8	HCO3-Ca	8.0
5	RC-6	30	25.0	7.26	27.2	443	296.9	23.8	10.7	84.8	13.8	13.3	HCO3-Ca	6.4
6	RC-7	52	25.0	7.32	24.0	422	285.9	19.9	8.3	88.8	7.4	12.1	HCO3-Ca	9.0
7	RC-8	22	25.0	7.42	18.3	449	301.8	22.4	11.6	88.6	10.9	13.5	HCO3-Ca	11.0
8	RC-9	38	25.0	7.38	17.8	537	249.2	115.2	20.0	63.7	26.9	62.4	HCO3>Cl-Ca>Mg>Na	23.3
9	RC-11	6	25.0	7.41	19.5	648	293.4	143.5	31.7	82.6	30.7	65.9	HCO3>Cl-Ca>Na>Mg	23.4
10	RC-12	20	25.0	7.37	33.9	877	544.2	66.1	68.2	59.6	77.8	62.5	HCO3-Ca>Mg>Na	13.9
11	RC-13	25	25.0	7.38	22.8	468	324.0	26.5	9.5	61.3	33.5	14.3	HCO3-Ca>Mg	9.7
12	RC-16	26	25.0	7.29	24.6	715	319.2	153.7	31.6	95.8	26.9	87.8	HCO3>Cl-Ca>Na>Mg	8.9
13	RC-18	32	25.0	7.27	23.8	418	278.6	21.3	12.7	80.0	11.8	13.1	HCO3-Ca	5.8
14	RC-19	17	25.0	7.34	26.5	610	352.7	69.1	30.1	68.9	32.1	56.2	HCO3>Cl-Ca>Mg>Na	11.1
15	RC-21	14	25.0	7.59	10.7	444	281.7	33.2	17.1	71.0	21.4	19.7	HCO3-Ca>Mg	6.0
16	RC-23	18	25.0	7.46	14.7	723	305.3	168.2	37.7	67.5	33.4	110.5	HCO3>Cl-Na>Ca>Mg	10.3
17	RC-25	17	25.0	7.23	27.7	439	297.5	18.9	10.2	95.3	6.3	10.7	HCO3-Ca	5.2
18	RC-26	18	25.0	7.31	24.3	875	337.9	225.5	56.0	68.4	42.4	147.3	Cl>HCO3-Na>>MgCa	24.1
19	RC-27	12	25.0	7.21	23.2	366	240.3	23.5	6.3	25.2	18.1	11.0	HCO3-Ca>Mg	9.8
20	RC-29	25	25.0	7.31	23.2	443	292.6	23.8	13.8	86.1	12.0	14.8	HCO3-Ca	12.8
21	RC-38	29	25.0	7.24	28.6	421	286.8	20.5	5.3	84.3	12.9	11.1	HCO3-Ca	6.7
22	RC-39	11	25.0	7.37	19.6	522	298.4	69.9	14.6	96.2	14.4	28.5	HCO3>Cl-Ca	4.2
23	RC-47	21	25.0	7.49	17.4	548	292.1	90.5	11.9	93.0	15.9	44.2	HCO3>Cl-Ca	28.1

Con el objetivo de interpretar la evolución de la composición química en términos de tipos de agua y patrones hidrogeoquímicos, las aguas fueron agrupadas en tres grupos de acuerdo al contenido relativo de Ca^{2+} y Mg^{2+} y procesadas mediante un sistema de reconocimiento de patrones (Vinardell et al, 1995). Los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Patrones hidrogeoquímicos medios correspondientes a los diferentes grupos de agua.

Grupo	Patrón	Expresión del patrón Na:Ca:Mg-Cl:HCO ₃ :SO ₄	Tipo de agua	Relación Cl/HCO ₃
Grupo I	PH 2	181-181	HCO ₃ -Ca	0.13
	PH 3	172-181	HCO ₃ -Ca	0.18
	PH 4	361-361	HCO ₃ >Cl-Ca>Na	0.44
	PH 5	361-361	HCO ₃ >Cl-Ca>Na	0.61
	PH 6	451-451	HCO ₃ >Cl-Ca>Na>Mg	0.95
	PH 7	541-541	Cl>HCO ₃ -Ca>Na	1.46
	PH 8	451-631	Cl>HCO ₃ -Na>Ca	2.04
Grupo II	PH 2	163-181	HCO ₃ -Ca>Mg	0.13
	PH 3	253-271	HCO ₃ -Ca>Mg	0.24
	PH 4	343-361	HCO ₃ >Cl-Ca>Mg>Na	0.44
	PH 5	343-451	HCO ₃ >Cl-Ca>Na>Mg	0.72
	PH 6	442-451	HCO ₃ >Cl-Ca>Na>Mg	0.95
	PH 7	532-541	Cl>HCO ₃ -Na>Ca>Mg	1.42
	PH 8	532-631	Cl>HCO ₃ -Na>Ca	2.33
Grupo III	PH 3	235-271	HCO ₃ -Mg>Ca	0.24
	PH 4	325-262	HCO ₃ -Mg>Ca>Na	0.35

El sistema de reconocimiento de patrones BATOMET (vinardell et al, 1995) crea los diferentes patrones sobre la base de las relaciones iónicas $r\left(\frac{Cl}{HCO_3}\right)$, expresadas en meq/l (Fagundo, 1996). Mediante este sistema informático los datos hidroquímicos correspondientes a cada patrón quedan agrupados según el incremento de esa relación iónica, indicativa del aumento progresivo de salinidad (Tabla 3).

El Grupo I está integrado por aquellas aguas que poseen en su composición el más bajo contenido de magnesio. En el se agruparon las fuentes de abasto: RC-2, RC-5, RC-6, RC-7, RC-8, RC-18, RC-25, RC-29, RC-39 y RC-47. La litología predominante en esta en esta parte del acuífero es la caliza relativamente pura y la facies originada por los procesos de interacción agua-roca en la zona alejada de mar es de tipo bicarbonatada cálcica (patrón hidrogeoquímico 181-181), evolucionando en su interacción con el agua de mar de la siguiente manera:

HCO₃-Ca → HCO₃>Cl-Ca>Na → HCO₃>Cl-Ca>Na>Mg → Cl>HCO₃-Ca>Na → Cl>HCO₃-Na>Ca.

El Grupo II lo forman las aguas que drenan calizas dolomitizadas, siendo la facies de menor salinidad la bicarbonatada cálcica magnesiana de patrón 163-181. Las fuentes de abasto en este caso son: RC-3, RC-9, RC-11, RC-19, RC-21, RC-23, RC-26 y RC-27. El camino de evolución en este caso es:

HCO₃-Ca>Mg → HCO₃>Cl-Ca>Mg>Na → HCO₃>Cl-Ca>Na>Mg → HCO₃>Cl-Ca>Na>Mg → Cl>HCO₃-Na>Ca.

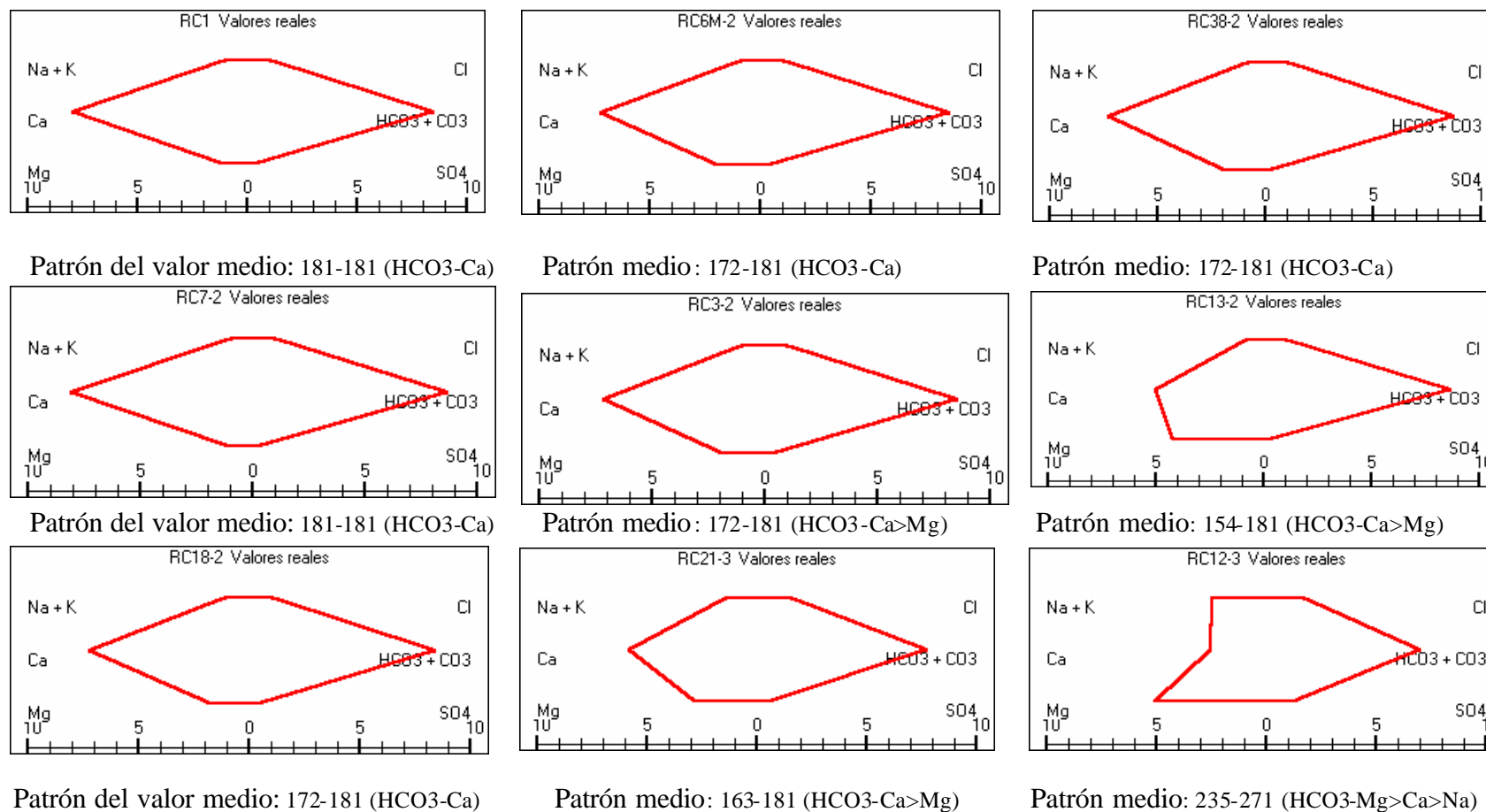


Figura 1 a. Patrones hidrogeoquímicos de las aguas subterráneas que drenan carbonatos del Neógeno. Cuenca M-1, Matanzas.

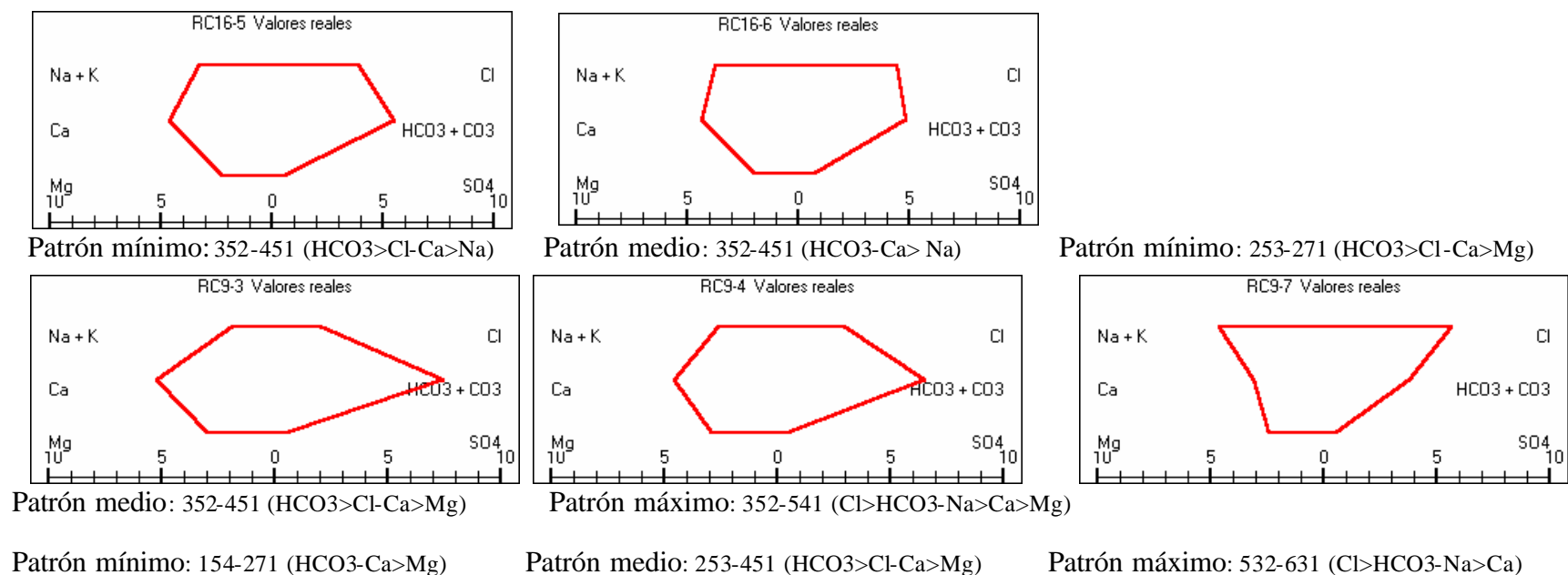


Figura 1 b-1. Patrones hidrogeoquímicos de las aguas subterráneas que drenan carbonatos del Neógeno. Cuenca M-1, Matanzas (acuífero con intrusión marina).

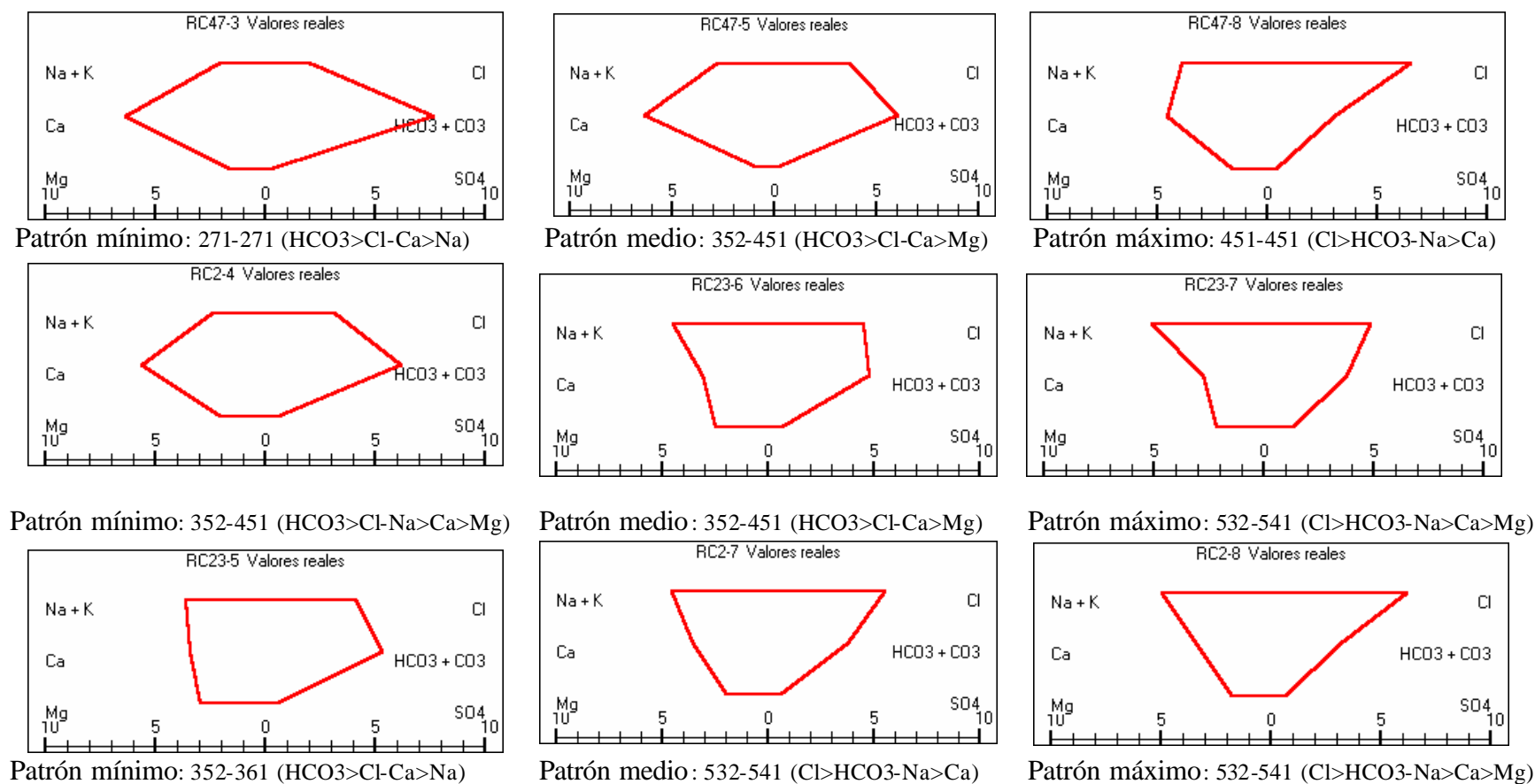
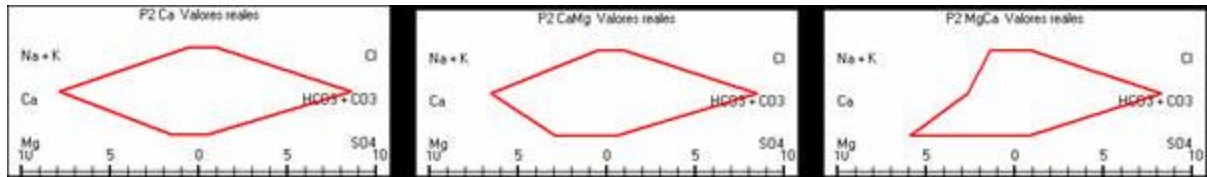


Figura 1 b-2. Patrones hidrogeoquímicos de las aguas subterráneas que drenan carbonatos del Neógeno. Cuenca M-1, Matanzas (acuífero con intrusión marina).

El Grupo III esta formado por las aguas que poseen mayor contenido de magnesio en su composición, como resultado de interactuar aparentemente con serpentinitas. La facies menos salina es de tipo bicarbonatada magnesiana cálcica, con patrón hidrogeoquímico 235-271. Las fuentes de abasto en este caso son: RC-12 y RC-13. Sus aguas evolucionan según el siguiente camino:



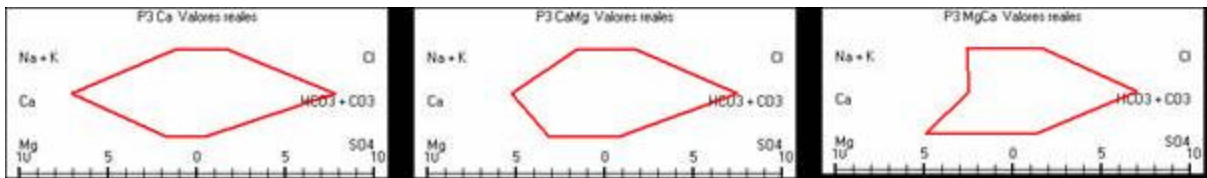
En la figura 3 se muestra, en forma gráfica la evolución los patrones hidrogeoquímicos de los tres grupos de agua de la cuenca hidrogeológica M-I (Cuenca Norte de Matanzas) con la salinidad.



PH: 181-181

PH: 163-181

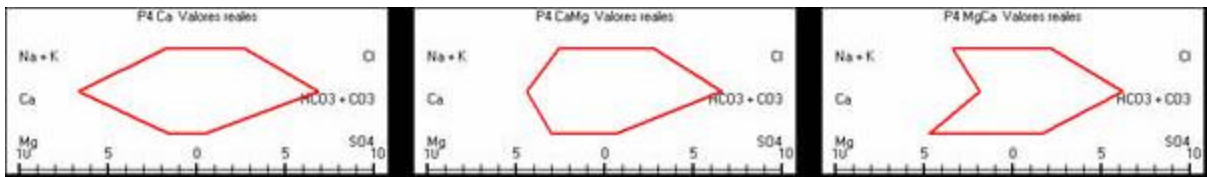
PH: 136-181



PH: 172-181

PH: 253-271

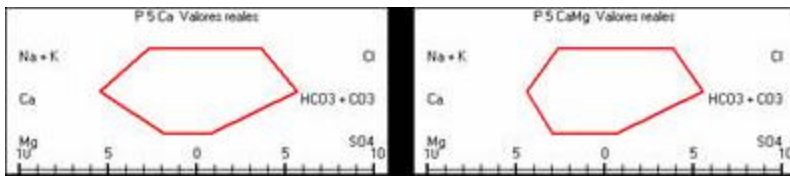
PH: -271



PH: 271-271

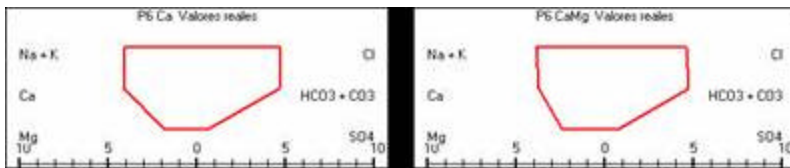
PH: 353-361

P H: 325-361



PH: 352-361

PH: 253-451



PH: 451-541

PH: 342-451

Figura 3. Evolución de los patrones hidrogeoquímicos con el incremento de la salinidad debida a la intrusión marina en el acuífero. Cuenca M-1, Mmatanzas.

El análisis recorrelación y regresión lineal de las aguas de la cuenca M-1 se muestra en las tablas 4 a – 4 c y las figuras 4 a –4 c respectivamente.

Tabla 4 a. Matriz de correlación de variables. Aguas subterráneas que drenan carbonatos de origen sedimentario del Mioceno. Cuenca M-5 (Matanzas). Aguas del grupo I, que evolucionan según: $\text{HCO}_3\text{-Ca} \Rightarrow \text{Cl} > \text{HCO}_3\text{-Na} > \text{Ca}$.

N=366	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	TSS
HCO_3^-	1	0.30	0.29	0.50	0.42	0.32	0.51
Cl^-		1	0.78	0.39	0.77	0.97	0.97
SO_4^{2-}			1	0.29	0.66	0.79	0.81
Ca^{2+}				1	0.03	0.32	0.48
Mg^{2+}					1	0.74	0.78
Na^+						1	0.96
TSS							1
CE							
CaCO_3							

Tabla 4 b. Matriz de correlación de variables. Aguas subterráneas que drenan carbonatos de origen sedimentario del Mioceno. Cuenca M-5 (Matanzas). Aguas del grupo II, que evolucionan según: $\text{HCO}_3\text{-Ca} > \text{Mg} \Rightarrow \text{Cl} > \text{HCO}_3\text{-Na} > \text{Ca}$.

N=199	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	TSS
HCO_3^-	1	0.13	0.22	0.35	0.43	0.24	0.50
Cl^-		1	0.59	0.14	0.46	0.96	0.91
SO_4^{2-}			1	0.08	0.39	0.65	0.70
Ca^{2+}				1	-0.37	0.11	0.27
Mg^{2+}					1	0.47	0.54
Na^+						1	0.93
TSS							1
CE							
CaCO_3							

Tabla 4 c. Matriz de correlación de variables. Aguas subterráneas que drenan carbonatos de origen sedimentario del Mioceno. Cuenca M-5 (Matanzas). Aguas del grupo III, que evolucionan según: $\text{HCO}_3\text{-Mg} > \text{Ca} \Rightarrow \text{HCO}_3\text{-Mg} > \text{Na}$.

N=20	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	TSS
HCO ₃ ⁻	1	0.22	0.22	0.22	0.75	0.52	0.69
Cl ⁻		1	1.00	0.28	0.16	0.80	0.85
SO ₄ ²⁻			1	0.29	0.16	0.80	0.85
Ca ²⁺				1	-0.22	0.07	0.34
Mg ²⁺					1	0.34	0.50
Na ⁺						1	0.88
TSS							1
CE							
CaCO ₃							

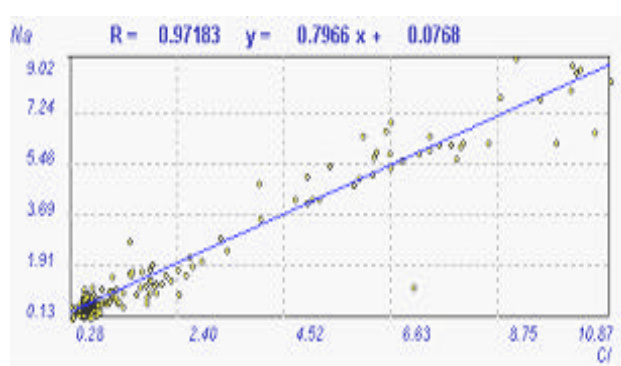
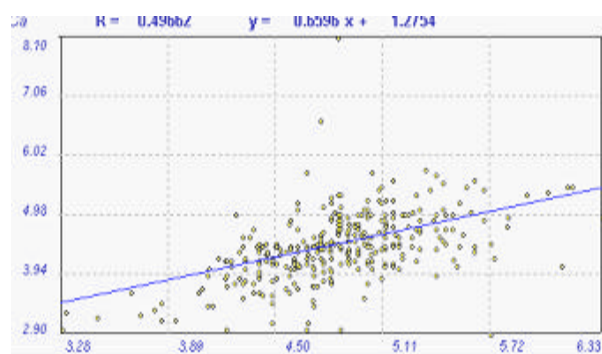


Figura 4 a. Líneas de regresión lineal Ca-HCO₃ (izquierda) y Na-Cl (derecha). Cuenca M-5 (Matanzas). Aguas que evolucionan según: HCO₃-Ca ⇒ Cl>HCO₃-Na>Ca (Grupo I).

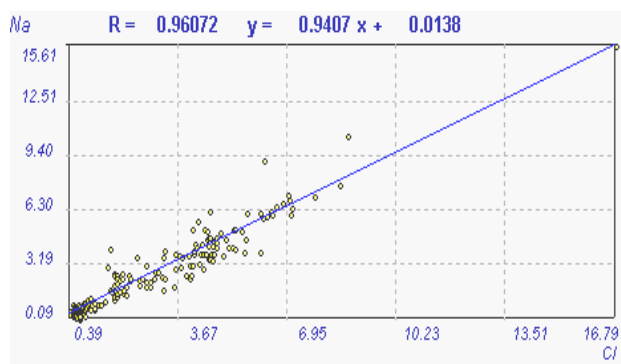
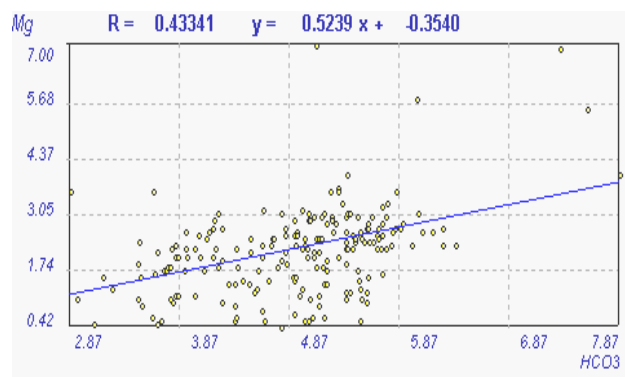


Figura 4 b. Líneas de regresión lineal Mg-HCO₃ (izquierda) y Na-Cl (derecha). Cuenca M-5 (Matanzas). Aguas que evolucionan según: HCO₃-Ca>Mg ⇒ Cl>HCO₃-Na>Ca (Grupo II).

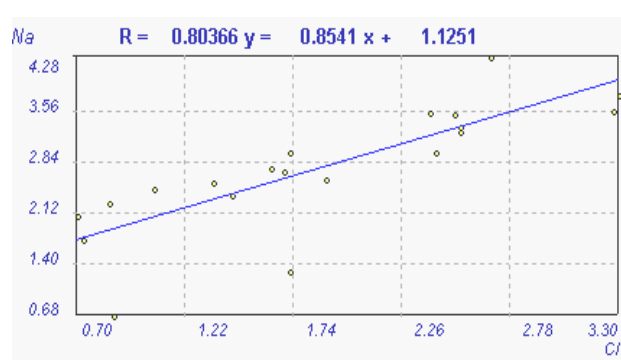
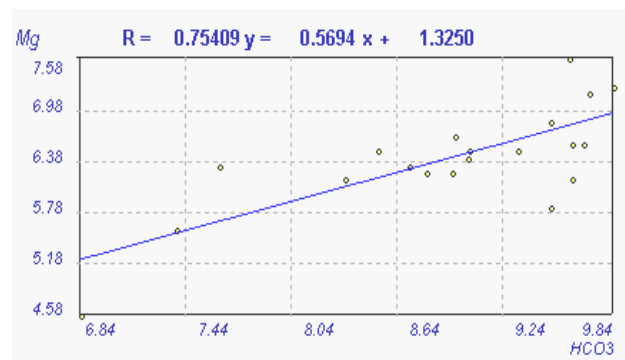


Figura 4 c. Líneas de regresión lineal Mg-HCO₃ (izquierda) y Na-Cl (derecha). Cuenca M-5 (Matanzas). Aguas que evolucionan según: HCO₃-Mg>Ca ⇒ HCO₃-Mg>Na (Grupo III).

Las aguas del Grupo I presentan buenas correlaciones entre HCO₃⁻ y Ca²⁺, aunque estas son mejores entre Na⁺ y Cl (Tabla 4 a, figura 4 a), lo cual indica el control de la mezcla agua dulce – agua de mar en la composición química de las aguas de este grupo. Las aguas del Grupo II presentan buenas correlaciones entre HCO₃⁻ y MgCa²⁺, pero estas son también mejores entre Na⁺ y Cl (Tabla 4 b, figura 4 b). Resultados análogos a est último se obtienen mediante el análisis de correlación y regresión lineal de las aguas del Grupo III (Tabla 4 c, figura 4 c).

Origen de la composición química del agua

Los procesos geoquímicas que explican el origen de la composición química de las fuentes de abasto de la cuenca hidrogeológica M-1 de Matanzas, y las masas transferidas (en mg/l) en esos procesos se muestras en la tabla 5.

Tabla 5. Transferencia de masas (mg/l) originada por disolución o reacción química (+) o por precipitación o consumo (-) en los procesos geoquímicos que tienen lugar mediante procesos de interacción lluvia - roca con carbonatos sedimentarios del Neógeno y de mezcla con agua de mar. Fuentes de abasto de la cuenca M-1, Matanzas y transferencia de masas en mg/l.

No	Muestra	R1 %	R2%	Halita	Calcita	Dolomita	Serpentinita	Pirita	Ca-Na (Ca)	CO2
1	RC-1	100.0	0	29.8	195.5	57.0	0.0	7.5	1.2	115.3
3	RC-3	100.0	0	25.2	149.0	99.4	0.0	7.2	0.5	114.8
4	RC-6	100.0	0	29.8	174.5	48.8	0.0	20.1	1.3	130.5
5	RC-7	100.0	0	23.5	190.5	42.3	0.0	16.8	0.9	114.4
6	RC-8	100.0	0	27.5	186.5	48.8	0.0	7.2	0.9	119.7
9	RC-12	100.0	0	100.0	184.5	0.0	304.3	41.4	-8.0	334.2
10	RC-13	100.0	0	34.5	5.5	247.5	0.0	6.0	1.8	124.3
12	RC-18	100.0	0	25.7	146.5	83.7	0.0	8.1	0.8	109.3
14	RC-21	100.0	0	45.6	82.0	156.4	0.0	10.8	1.3	92.6
16	RC-25	100.0	0	2.3	206.0	41.4	0.0	6.3	1.1	121.4
17	RC-27	100.0	0	29.2	76.0	131.6	0.0	3.9	2.3	89.3
2	RC-2	98.9	1.1	0.0	-36.0	55.6	0.0	3.8	0.1	35.6
7	RC-9	99.5	0.5	0.0	-36.0	55.6	0.0	0.0	0.4	-6.3
8	RC-11	99.4	0.6	0.0	-131.6	122.9	0.0	5.4	5.6	14.1
11	RC-16	99.3	0.7	0.0	-38.5	81.7	0.0	3.9	-2.1	16.5
13	RC-19	99.7	0.3	0.0	-112.9	160.4	0.0	8.3	-8.6	37.1
15	RC-23	99.2	0.8	0.0	-94.7	116.3	0.0	5.7	-9.1	4.8
20	RC-39	99.2	0.8	11.5	-44.1	39.0	0.0	0.0	4.6	18.9
21	RC-47	99.7	0.3	6.0	-41.5	37.2	0.0	0.0	2.5	12.1

R1: Agua dulce de referencia (RC-25), R2: agua de mar; Ca-Na (Ca): Intercambio iónico (+ ganancia de calcio, - pérdida de calcio)

De los resultados que aparecen en la tabla 5, se deduce que las fuentes estudiadas en la cuenca M-1 presentan buena calidad. Sólo algunas fuentes poseen ligera intrusión marina (0.3 – 1.1 % de salinidad). En las aguas donde no hay ninguna intrusión, los principales procesos geoquímicas que originan su composición son: disolución de halita, calcita y dolomita. En menor proporción se produce también oxidación de pirita e intercambio

iónico. En las aguas que presentan ligera intrusión marina prevalecen los procesos de precipitación de calcita y disolución de dolomita. En una de las fuentes (RC-12) el intemperismo origina disolución de serpentinita en lugar de disolución de dolomita.

CONCLUSIONES

Las principales facies hidroquímicas presentes en las aguas subterráneas que drenan carbonatos sedimentarios miocénicos de la cuenca hidrogeológica M-1, en la Cuenca Norte de Matanzas son fundamentalmente: bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas magnésicas y excepcionalmente, bicarbonatadas magnésicas cálcicas. En determinados sectores en que el acuífero tiene contacto hidráulico con el mar, las aguas adquieren un contenido mayor de cloruro que el debido al simple proceso de interacción agua – roca.

Teniendo en cuenta su composición, estas aguas pueden ser agrupadas en tres grupos acorde a su contenido relativo de calcio y magnesio. Las facies hidroquímicas de dichas aguas siguen el siguiente camino de evolución:

Grupo I: $\text{HCO}_3\text{-Ca} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca>Na} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca>Na>Mg} \rightarrow \text{Cl>HCO}_3\text{-Ca>Na} \rightarrow \text{Cl>HCO}_3\text{-Na>Ca}$.

Grupo II: $\text{HCO}_3\text{-Ca>Mg} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca>Mg>Na} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca>Na>Mg} \rightarrow \text{HCO}_3\text{>Cl-Ca>Na>Mg} \rightarrow \text{Cl>HCO}_3\text{-Na>Ca}$.

Grupo III: $\text{HCO}_3\text{-Mg>Ca} \rightarrow \text{HCO}_3\text{-Mg>Ca>Na}$

En general las aguas de la cuenca M-1 poseen buena calidad, los principales procesos geoquímicos que originan su composición son: disolución de halita, calcita y dolomita. En menor proporción se produce también oxidación de pirita e intercambio iónico. En las aguas que presentan ligera intrusión marina prevalecen los procesos de precipitación de calcita y disolución de dolomita. Sólo en una de las fuentes (RC-12) el intemperismo origina disolución de serpentinita en lugar de disolución de dolomita.

Las mejores correlaciones matemáticas entre las variables hidroquímicas se presentan entre HCO_3^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , CaCO_3 y TSS.

BIBLIOGRAFÍA

Academia de Ciencias de Cuba (1989). Instituto de Geología y Paleontología, Mapa Geológico de Cuba. Escala 1: 250 000.

APHA – AWWA – WPCF (1992). Métodos Normalizados para el análisis de Aguas Potables y Aguas Residuales, Am. Public Assoc., Edición 17th. Editorial Grijalbo (Madrid), 4-1 – 4-235.

Ergorov, S.V. y J.R. Luge (1967). Hidrogeología de Cuba. INRH, ICRM, La Habana, 84 p.

Fagundo, J.R. Química del Agua Kárstica (1996). En: Hidroquímica del Karst. Editores: J.R. Fagundo, J.J. Valdés y J.E. Rodríguez. Ediciones Osuna, Universidad de Granada (España), 14-119.

Fagundo J.R., P. González, M. Suárez Muñoz, J. Fagundo-Sierra, C. Melián, E. Alvarez (2005). HIDROGEOQUIM. Contribución a la Educación y Protección Ambiental. ISCTN. Vol 6, Q 58-67. ISBN 959-7136-35-X.

Beato O. (2005) Características Hidrogeoquímicas de las Aguas Subterráneas de la Cuenca M-I de la Provincia de Matanzas.