

Origen de los sulfatos en el agua subterránea del sur de la sierrita de Ticul, Yucatán

Graniel Castro, E.¹, Pacheco Medina, A.² y Coronado Peraza V.³

Fecha de recepción: 10 de febrero de 2008 – Fecha de aceptación: 23 de marzo de 2009

RESUMEN

La zona de estudio se localiza al sur de la Sierrita de Ticul en el estado de Yucatán, la cuál está formada por calizas fosilíferas, microcristalinas y ligeramente arcillosas, que se encuentran dolomitizadas, silicificadas o recristalizadas, secuencia que se incluye a las evaporitas de la Formación Icaiché localizadas a 120 m de profundidad. El área de estudio es una de las zonas agrícolas más grandes del estado de Yucatán. El objetivo del trabajo es determinar el origen de los sulfatos en el agua subterránea y evaluar su comportamiento temporal y espacial; para lo cuál se recolectaron muestras de agua, a las cuales se le determinó temperatura y conductividad eléctrica y los iones mayores (calcio, magnesio, sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos), y se midieron los niveles piezométricos a 19 pozos de 60-70 m de profundidad en junio y septiembre de 1997. La dirección del flujo de agua subterránea fue de sureste-noroeste, encontrándose en la zona centro del área la mayor concentración de sulfatos (13.10 meq/l) disminuyendo en forma radial hasta alcanzar 1.73 meq/l. En la época de lluvias se incrementaron las concentraciones de sulfatos y las zonas con mayor concentración se localizaron al centro del área, donde se ubica la mayoría de las unidades agrícolas, esto debido a la infiltración de los fertilizantes sulfatados utilizados en la agricultura y no a la dilución de las evaporitas (yesos) como lo han mencionado algunos autores.

Palabras clave: Sulfatos, Yucatán, evaporitas, Sierrita de Ticul, fertilizantes, dilución, comportamiento temporal y espacial.

Source of the sulphates in the groundwater of the south of the sierrita of Ticul, Yucatan

ABSTRACT

The study area is located to the south of the Sierrita of Ticul in the state of Yucatan, which it is formed by limestone's fusiliers, microcrystalline and argillaceous, that are dolomites, silicificates or slightly recrystallized, sequence that includes the evaporitas of the Icaiché Formation located to 120 m of depth. The area is of greater agricultural zones the state of Yucatan. The objective of the work is to determine the origin of sulphates and to evaluate its temporary and space behavior, for which they were collected water samples, to which it determined temperature and electrical conductivity to him and the greater ions (calcium, magnesium, sodium, bicarbonates, chlorides and sulphates), and were moderate the levels of water to 19 wells of 60-70 m of depth in June and September of 1997. The direction of the groundwater flow was of the southeastern-northwest, being in the zone center of the study area the greater sulphate concentration (13,10 meq/l) diminishing in radial form until 1,73 meq/l. At the time of rains the sulphate concentrations were increased and the zones with greater concentration were located to the center of the area, where it is located most of the agricultural units, this due to the infiltration of fertilizers sulphated used in agriculture and not to the dilution of the evaporitas (gypsum) since some authors have mentioned it.

Keywords: Sulphates, Yucatan, evaporates, Sierra of Ticul, fertilizers, dilution, temporary behavior and space.

¹ Profesor-Investigador del Cuerpo Académico de Geohidrología. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. E-Mail: graniel@uady.mx

² Maestría en Ingeniería. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán.

³ Técnico Académico. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán.

INTRODUCCIÓN

Los sulfatos (SO_4^{-2}) después de los bicarbonatos, son los principales aniones presentes en el agua; los cuales pueden presentarse de manera natural o como consecuencia de descargas de aguas industriales y por la utilización de fertilizantes agrícolas. Cuando los sulfatos se presentan de manera natural es posible que su origen se deba a algún depósito natural de minerales o por depositación atmosférica (www.skate.ky.us, 2002).

El estado de Yucatán ha sido objeto de múltiples estudios geohidrológicos en los últimos 30 años, en los cuales se ha empleado a los sulfatos como herramienta hidrogeoquímica. Algunos autores (Velásquez, 1996; Steinich et al, 1996; Villasuso y Mendez, 2000) han determinado que su origen está asociado con la disolución de las rocas evaporíticas (yesos), las cuales se localizan a los 120 m de

profundidad con respecto al nivel medio del mar en la zona.

El interés de este trabajo se relaciona con la problemática ocasionada por la salinización del acuífero en la zona sur de la Sierrita de Ticul, por los incrementos en la concentración de sulfatos, la corrosión de los equipos de bombeo y la presencia de sedimentos en los pozos; por lo que el objetivo del trabajo es determinar el origen de los sulfatos en el agua subterránea y evaluar su comportamiento en la zona sur de la Sierrita de Ticul.

La zona de estudio se encuentra ubicada en la porción suroeste de la Península de Yucatán, cuyas coordenadas geográficas son 20° y $20^\circ 35'$ latitud Norte y 89° y 90° de longitud Oeste; la cuál está limitada en su parte norte por la Sierra de Ticul y se localiza aproximadamente a 80 kilómetros al sur de la ciudad de Mérida, Yucatán (Figura 1).

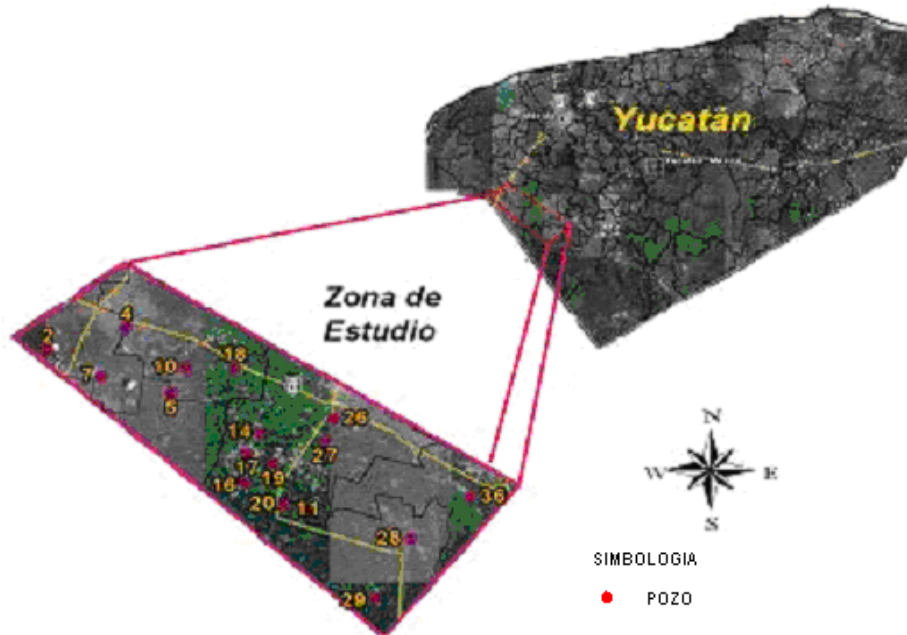


Figura 1. Localización del área de estudio

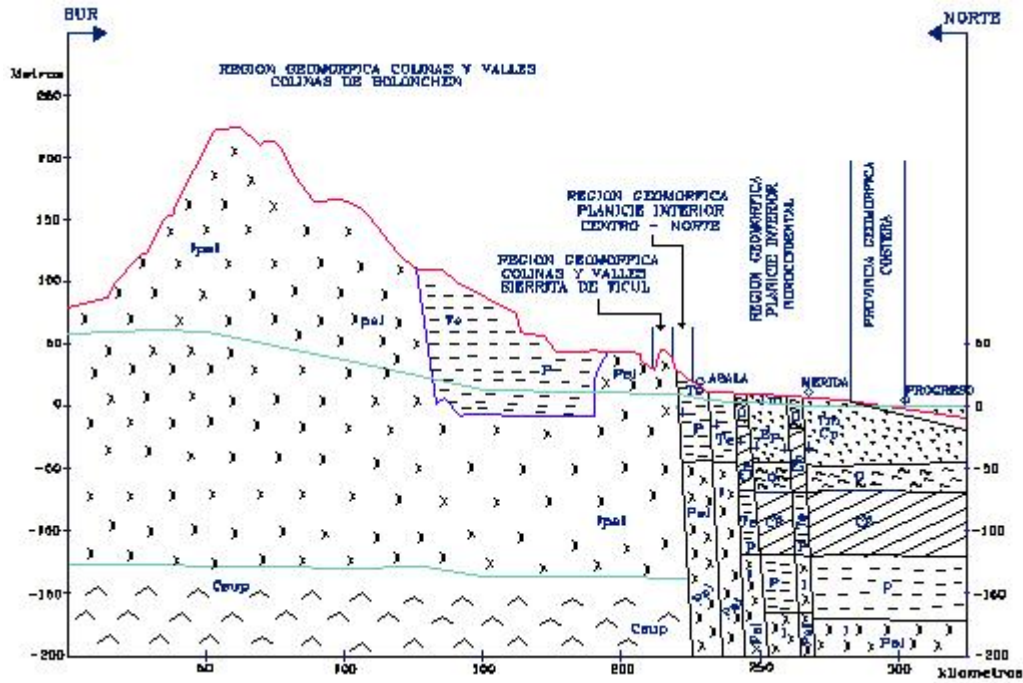
El clima predominante es cálido subhúmedo con lluvias en verano (mayo-octubre) con un promedio anual de 904.6 mm; la época de estiaje se presenta de marzo a mayo. La temperatura promedio anual es de 24.6°C , con una máxima de 35.5°C y una mínima de 12.7°C (CNA, 1997). Se tiene que en la mayor parte del año existe una mayor evaporación que precipitación, excepto de agosto a octubre cuando se presentan las mayores precipitaciones pluviales. Este balance entre precipitación y evaporación indica que el suelo tiene un déficit de humedad durante nueve meses del año (INEGI, 2000).

La región de estudio se encuentra integrada a la región cárstica de "Colinas y Valles" y presenta como características: gran relieve, largas y grandes estructuras subterráneas, así como un macro karst superficial de "torres" y "domos" asociado a un buen desarrollo de suelos limo-arcillosos, en esta región es notoria la ausencia de cenotes y dolinas, y denota un relieve topográfico ondulado como consecuencia de la orogénesis del Eoceno Superior donde los sistemas de canales de disolución que produce el agua subterránea ha permitido la formación de cavernas, las cuales están presentes en la Sierrita de Ticul y de

lo que dan testimonio entre otras las grutas de Lol-Tun y Calcehtok. (Tinajero et al., 1981; CNA, 1997).

Las rocas sedimentarias que afloran en la zona pertenecen a la época del Paleoceno-Eoceno Indiferenciado, caracterizándose por ser calizas fosilíferas, microcristalinas, de coloración clara, grano fino, estratificación masiva y en algunas áreas

se presentan ligeramente arcillosas; las calizas se encuentran dolomitizadas, silicificadas o recrystalizadas. En estas rocas se incluyen las evaporitas de la Formación Icaiché, constituidas por yesos, anhidrita y halita, las cuales son ricas en sulfatos y cloruro de sodio respectivamente (Velázquez, 1986; Velázquez, 1996 y Steinich et al, 1996) (Figura 2).



Columna estratigráfica

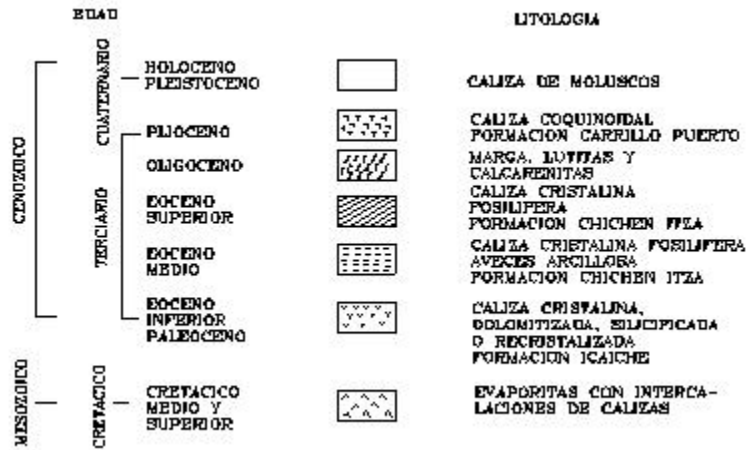


Figura 2. Corte unidades geomorfológicas (Villasuso y Méndez, 2000)

La principal formación geomorfológica es la Sierra de Ticul, con orientación norte 55° oeste y una longitud aproximada de 165 km; se extiende desde Maxcanú hasta Polyuc con una elevación máxima de 150 m snmm predominantemente escarpada a lo largo de

toda su extensión. Su rasgo fisiográfico resultó de una falla normal, conocida como "asentamiento de la cuenca" (Gamboa y Pérez, 1997). En el área de la Sierrita de Ticul afloran calizas y dolomitas compactas recrystalizadas de facies de banco y

lagunar, con textura que varía de fina a media con estratificación de gruesa a masiva su color es crema y rojo con tonos de amarillo ocre e intemperiza a color gris claro (CNA, 1997).

La hidrogeoquímica de la Península de Yucatán está regida por las interacciones agua-roca, mezclas de agua dulce-agua salada, disolución de rocas carbonatadas, y procesos de evaporación y precipitación (Velázquez, 1996). Steinich et al., (1996), encuentran que los valores más altos en las relaciones SO_4^{2-}/Cl^{-1} se presentan en la parte sureste de la península, en el poblado de Abalá y asume la presencia de una fuente de sulfatos; sin embargo no fue posible la localización de esta fuente debido a que las aguas no se encontraban saturadas con respecto al yeso. Existe un decrecimiento gradual en las relaciones SO_4^{2-}/Cl^{-1} hacia el norte de la zona de mayor concentración de sulfatos, la dirección preferencial de flujo de las aguas enriquecidas de sulfatos es probablemente hacia la costa oeste de la península.

METODOLOGÍA

En la zona de estudio se monitorearon 19 pozos profundos (40 a 70 m de profundidad) en junio y septiembre 1997, localizados al sur de la Sierrita de Ticul (Figura 1). Cada uno de los pozos se caracterizaron físicamente, midiendo diámetro del pozo, altura del brocal, profundidad total, profundidad al nivel estático o dinámico según el caso en el que el pozo estuviera dotado con equipo de bombeo o no, cota sobre el nivel medio del mar, coordenadas de ubicación geográficas, equipo de bombeo, gasto de extracción y uso del mismo. A cada pozo se les determinó in situ: temperatura, conductividad eléctrica, pH, y el nivel piezométrico; también se recolectó una muestra de agua para su análisis en laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UADY, donde se les determinó: calcio, magnesio, sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos; de acuerdo al Standard Methods (APHA, AWWA, WEF, 1992).

Previo al manejo de los resultados analíticos, se estimó el porcentaje de error mediante el cálculo de balance iónico, basándose en la siguiente fórmula, la cual requiere concentraciones en meq/l:

$$\% \text{ de error} = \frac{\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones}}{\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones}} \times 100$$

Las técnicas de determinación que se utilizaron en el laboratorio para cada uno de los parámetros determinados son: para el sodio y el potasio se

determinaron mediante el Espectrofotómetro de Absorción Atómica, el calcio se determinó por Valoración Complejométrica con EDTA, el magnesio con Valoración Indirecta, el cloruro por medio de Valoración con Nitrato de plata usando como indicador cromato de potasio, el bicarbonato se determinó en función de la alcalinidad del agua y por último el sulfato se determinó por el Método Turbidimétrico

Se utilizó el Software AquaChem v.4.0 que está específicamente desarrollado para el análisis gráfico y numérico y la modelación de datos de calidad del agua, también está vinculado con el programa de modelación geoquímica PHREEQC para el cálculo de concentraciones de equilibrio (o actividades) de especies químicas en solución y los índices de saturación de la fase sólida en equilibrio con una solución (Waterloo Hydrogeologic, Inc. 2003). Mediante el empleo de este software se obtuvieron diagramas de Piper, familias (tipos) de agua, así como índices de saturación con respecto a los minerales calcita, aragonita, y dolomita.

Debido a las incertidumbres inherentes al cálculo de los índices de saturación, tales como la precisión de los análisis químicos, las constantes de equilibrio mineral y el método del cálculo de las actividades iónicas, en la literatura se recomienda considerar una zona de equilibrio, un rango que ha sido utilizado en varios estudios es de 0 ± 0.5 ó $0 \pm 5\%$ (Log K_{mineral}), (Deutsh 1997), éste último utilizado en el presente estudio; los valores de las constantes de equilibrio que se usaron fueron $K_{\text{calcita}} = 8.840$, $K_{\text{yeso}} = 4.60$ y $K_{\text{dolomita}} = 17.090$ que corresponden a la base de datos de PHREEQC, que es el que utiliza AquaChem v.4.0. (Waterloo Hydrogeologic, Inc. 2003).

Posteriormente se realizaron los mapas de isoconcentraciones de los sulfatos y cloruros. También se determinaron los tipos de familias de aguas, se realizaron las relaciones iónicas para establecer alguna posible relación con el agua de mar y determinar el posible origen y variación de los sulfatos, y por último se calcularon los índices de saturación de la calcita, dolomita y yeso.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

De acuerdo a los datos obtenidos durante el trabajo de campo (Tabla 1 y 2), se tiene que la dirección del flujo subterráneo en la zona de estudio es de sureste a noroeste en dirección paralela a la Sierrita de Ticul; presentando en junio cargas piezométricas entre 0.99 y 2.05 m y en septiembre entre 1.17 a 2.24 m, teniendo una diferencia de las cargas potenciales estables de 0.20 m en promedio en los pozos; siendo

los potenciales mayores en septiembre, debido a la recarga del acuífero, que ha sido alimentado en los

meses de precipitación. (Figura 3).

Tabla 1. Características físicas de los pozos profundos

ID	Ubicación	Nombre	Coordenadas		Tipo	Prof. Total (m)	Diámetro (")	Alt. Brocal (m)	Elevación (m.s.n.m)	Equipo de Bombeo	Gasto (Lps)	Uso Del Agua
			X	Y								
2	Maxcanú	Hda. San José Ch.	-90.0086	20.5239	Noria	27.00	39	0.38	26.65	Sin equipo	ND	Doméstico
4	Opichén	U.A Xulucce	-89.9292	20.5467	Pozo	43.00	ND	0.37	33.67	Sin equipo	12	Riego
5	Opichén	U.A Chacán Jabín	-89.8833	20.4792	Pozo	67.00	15	0.42	32.71	Sin equipo	36	Riego
7	Maxcanú	U.G.Vicente Guerrero	-89.9542	20.4964	Pozo	50.00	14	0.22	29.54	Sin equipo	ND	Abrevadero
10	Opichén	U.A Salvador Alvarado	-89.8678	20.5053	Pozo	70.00	ND	0.00	38.14	Sin equipo	ND	Riego
11	Sta. Elena	Hotel D Loche	-89.7669	20.3606	Pozo	70.00	10	0.52	53.02	Centrífuga	ND	Servicios
14	Muna	U.R Xmatuy	-89.7925	20.4381	Pozo	65.00	14	0.08	41.24	Sin equipo	64	Riego
15	Muna	U.R.López Port. 8	-89.8203	20.3875	Pozo	65.00	14	0.50	38.33	Centrífuga	64	Riego
16	Muna	U.R.López Port. 9	-89.8083	20.385	Pozo	65.00	14	0.39	37.4	Centrífuga	64	Riego
17	Muna	U.R.López Port 3	-89.8072	20.4169	Pozo	65.00	14	0.25	39.98	Centrífuga	100	Riego
18	Opichén	U.A Justicia Agraria	-89.8194	20.505	Pozo	70.00	14	0.17	44.57	Sin equipo	92	Riego
19	Muna	Hda.San Pedro Xocc.	-89.7805	20.4058	Pozo	65.00	14	0.00	44.26	Veleta	4	Abrevadero
20	Sta. Elena	Hotel Hda. Uxmal	-89.7686	20.3628	Pozo	50.00	8	0.14	43.44	Sumergible	4	Servicios
21	Sta. Elena	U.R López Mateos	-89.7453	20.3525	Pozo	70.00	14	0.32	52.53	Centrífuga	90	Riego
26	Muna	U.R. Kankatuc	-89.7189	20.4519	Pozo	7.00	14	0.46	ND	Centrífuga	100	Riego
27	Muna	U.R Díaz Ordaz	-89.7278	20.4294	Pozo	70.00	14	0.36	ND	Sin equipo	ND	Riego
28	Sta. Elena	U.R Benito Juarez	-89.6405	20.3272	Pozo	70.00	14	2.00	ND	Sin equipo	ND	Riego
29	Sta. Elena	U.R Felipe Carrillo P.	-89.6764	20.2653	Pozo	70.00	15	0.24	ND	Centrífuga	36	Riego
36	Ticul	U.G Lázaro Cárdenas	-89.58	20.37	Pozo	70.00	14	0.60	ND	Centrífuga	ND	Riego

ND No Determinado

Tabla 2. Resultados de las análisis de agua en (A) Junio 1997 y (B) Septiembre 1997

(A)

POZO	N.Est (m)	N.Din (m)	Carga Potencial (m)	CE μ S/cm	pH	CATIONES (meq/l)			ANIONES (meq/l)		
						Ca	Na	Mg	Cl	SO4	HCO3
						2	25.66		0.99	2135	7.09
4	32.35		1.32	1521	6.71	5.170	4.030	4.970	4.757	1.731	7.202
5	30.92		1.79	2181	6.93	4.140	2.640	3.830	2.840	2.292	7.205
7	28.22		1.32	2681	6.62	7.710	19.170	7.500	16.875	6.950	9.910
10	36.35		1.79	2131	6.79	3.730	21.820	7.660	17.254	7.941	3.477
11		45.54		3056	6.99	9.380	14.060	7.240	13.773	7.993	5.447
14	39.34		1.90	2808	6.99	10.470	17.420	7.400	16.472	10.558	8.314
15		37.14		ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
16		36.02		ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
17		38.44		3140	7.25	9.990	18.760	9.400	17.806	11.895	6.635
18	42.74		1.83	3056	7.02	8.900	17.810	7.550	15.408	9.065	5.382
19	41.39		2.05	2320	7.29	9.610	13.230	6.930	11.879	8.700	6.635
20		41.70		2428	6.98	10.940	12.430	7.510	12.285	10.557	6.551
21		50.98		2263	7.09	10.660	11.470	5.600	10.395	9.146	6.299
26		46.41		2008	6.98	8.760	11.550	5.600	9.586	7.953	7.978
27		41.63		2077	7.47	9.420	10.990	6.640	9.854	9.443	7.726
28		53.44		ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
29		50.82		2213	7.31	11.040	10.670	6.550	8.234	11.004	5.963
36		40.64		ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

(B)

POZO	N.Est (m)	N.Din (m)	Carga Potencial (m)	CE μ S/cm	pH	CATIONES (meq/l)			ANIONES (meq/l)		
						Ca	Na	Mg	Cl	SO4	HCO3
						2	25.48		1.17	3543	7.670
4	32.17		1.50	1173	7.66	3.700	3.260	5.850	2.700	3.835	6.927
5	30.72		1.99	1100	7.81	2.700	12.830	5.650	10.395	4.864	5.375
7	28.04		1.50	3046	7.88	8.800	13.520	4.470	16.682	7.656	6.639
10	36.15		1.99	2998	7.70	2.800	12.870	4.890	10.395	4.505	7.108
11		44.98		ND	8.21	9.050	11.160	4.950	10.260	8.449	7.222
14		39.41		3048	7.83	8.010	14.150	6.640	14.040	9.888	4.619
15		35.40		ND	7.78	7.730	14.160	6.730	13.769	10.685	4.704
16		36.00		ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
17		38.25		3363	7.64	7.920	9.160	6.260	8.505	8.771	6.720
18	42.57		2.00	1780	7.57	2.640	12.660	5.050	10.531	4.397	5.038
19	42.02		2.24	2603	7.86	10.370	11.490	5.610	11.205	10.445	6.802
20		41.39		2654	9.08	10.750	11.310	6.640	11.611	10.525	6.971
21		50.98		ND	7.80	3.670	6.430	3.550	6.209	4.666	3.863
26		46.16		ND	7.70	8.200	8.940	5.980	8.776	8.055	7.054
27		41.44		2370	7.72	9.990	9.220	6.450	9.315	11.322	6.382
28		51.34		2441	7.23	5.470	5.220	4.670	4.319	2.773	9.993
29		51.03		ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
36		40.42		1700	8.10	5.750	5.400	4.580	5.264	2.900	9.742

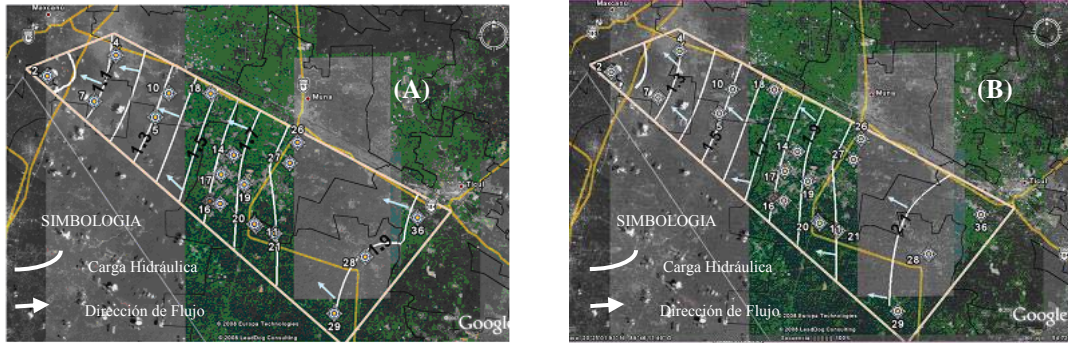


Figura 3. Isocargas hidráulicas en la zona de estudio (A) junio (B) septiembre de 1997.

Los sulfatos en junio variaron entre 11.89 y 1.73 meq/l y en septiembre entre 11.32 meq/l y 2.77 meq/l; en junio la zona de mayor concentración se encontró al sureste y la de menor concentración hacia el noroeste, y en septiembre la mayor concentración se localizó al centro de la zona de estudio disminuyendo en forma radial (Figura 4). En general se observa que de junio a septiembre no se presenta el fenómeno de

dilución de sulfatos por la infiltración del agua de precipitación y que no existe un incremento en la concentración en el sentido de flujo; sino que se observan incrementos de concentración en la zona donde se encuentra el mayor número de unidades agrícolas debido a la infiltración de los fertilizantes sulfatos utilizados por los agricultores.

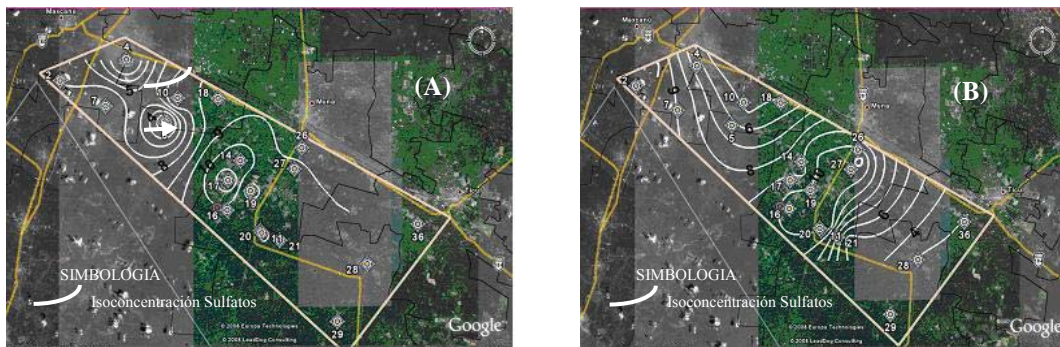


Figura 4. Isoconcentraciones de Sulfatos en meq/l (A) junio y (B) septiembre de 1997

Analizando las isoconcentraciones de cloruros, se tiene que para junio el máximo valor registrado fue de 19.17 meq/l y el mínimo valor registrado fue de 2.84 meq/l, las mayores concentraciones se localizaron en la zona central. Para septiembre el máximo fue de 16.78 meq/l y el mínimo de 2.77 meq/l, las mayores

concentraciones se localizaron al centro y al oeste del área de estudio; se observa también que las concentraciones de cloruros se reducen de junio a septiembre debido probablemente a la infiltración de agua de lluvia en la época de recarga (Figura 5).

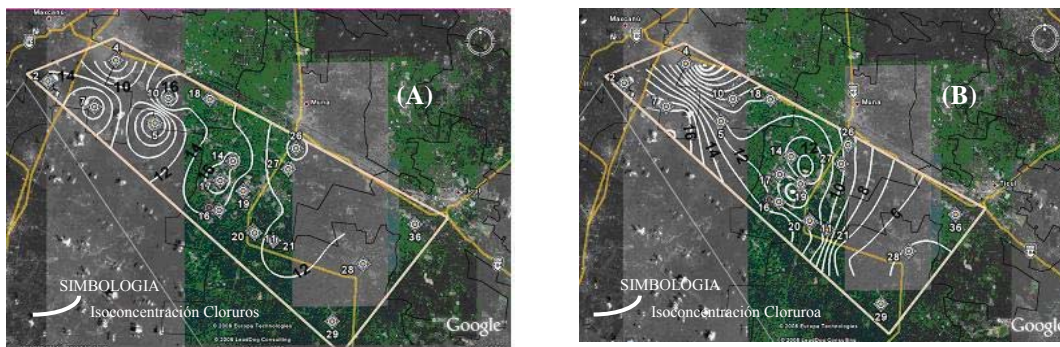


Figura 5. Isoconcentraciones de cloruros en meq/l (A) junio, (B) septiembre de 1997

De acuerdo a los Diagramas de Piper (Figura 6), las aguas de la mayoría de los pozos se clasifican en los tipos de familia de aguas cloruradas sulfatadas en los dos muestreos, con excepción de los pozos 4 y 5 que pertenecen a la familia de aguas bicarbonatada clorurada cálcica en ambas fechas, y el pozo 7 que pertenece a la familia de las aguas cloruradas

bicarbonatadas sódicas en junio y en el mes de septiembre cambio a la familia de aguas clorurada sulfatada sódica. El tipo de familia de agua es debido a la infiltración de agua que arrastra todo tipo de sustancias depositadas en el terreno (agroquímicos) en época de lluvias.

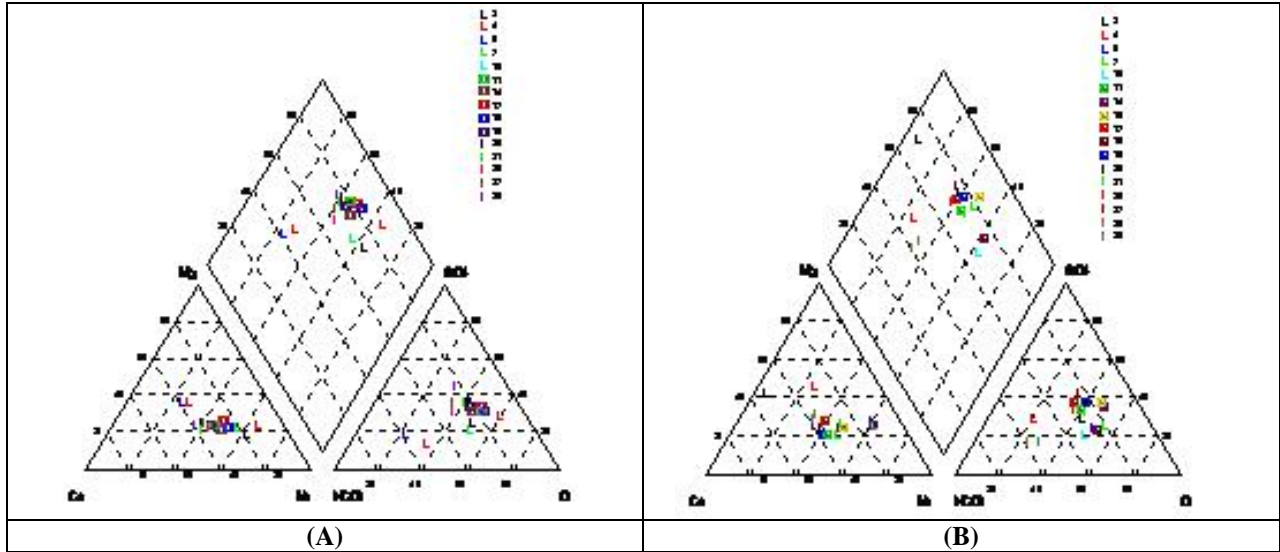
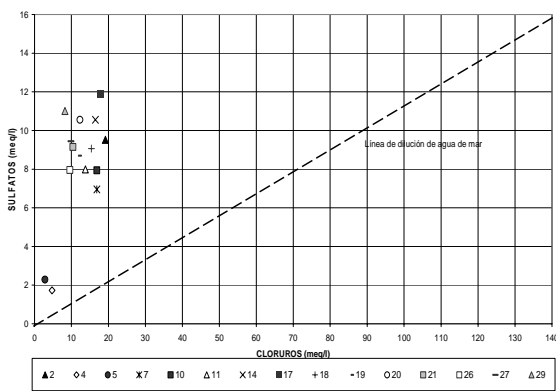


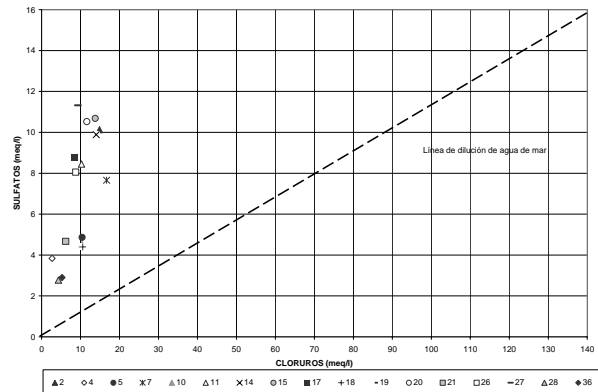
Figura 6. Diagrama de Piper (A) junio, (B) septiembre de 1997

De acuerdo a las relaciones iónicas SO_4^{2-}/Cl^{-1} y HCO_3^{-}/Cl^{-} , se observa que no existe una tendencia preferencial del agua subterránea hacia la línea de

dilución del agua de mar; indicando que no se presenta el fenómeno de intrusión salina en el área de estudio (Figura 7 y 8).



(A)



(B)

Figura 7. Relación Sulfato-Cloruro en A) junio y B) septiembre de 1997

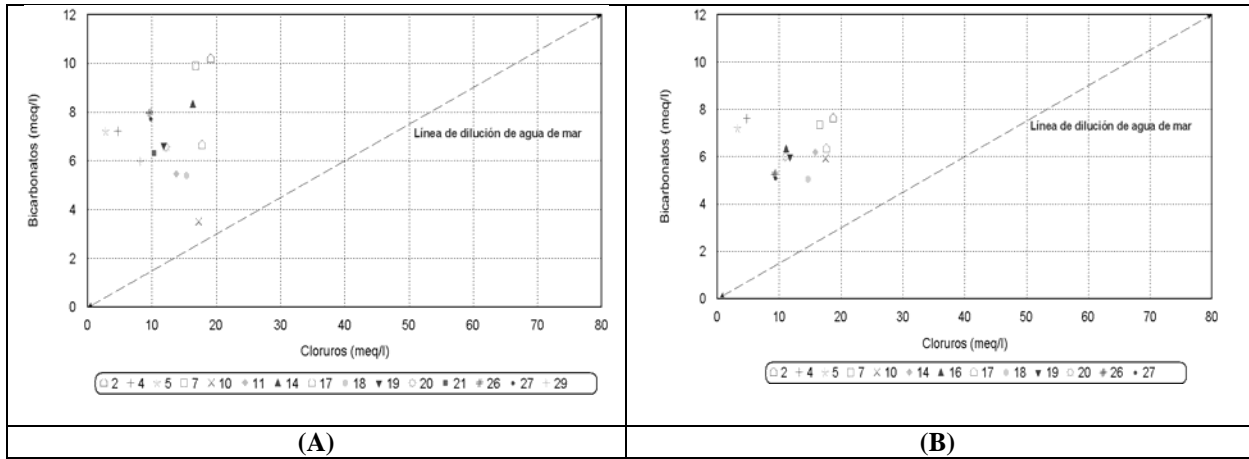


Figura 8. Relación Bicarbonato-Cloruro en A) junio y B) septiembre de 1997

Las aguas subterráneas en junio se encuentran en equilibrio respecto a la calcita y la dolomita, pero en septiembre algunas muestras se sobresaturan de estos

minerales (Figura 9 y 10); debido a la infiltración del agua de lluvia, la cuál se enriquece de estos minerales por la disolución de la caliza.

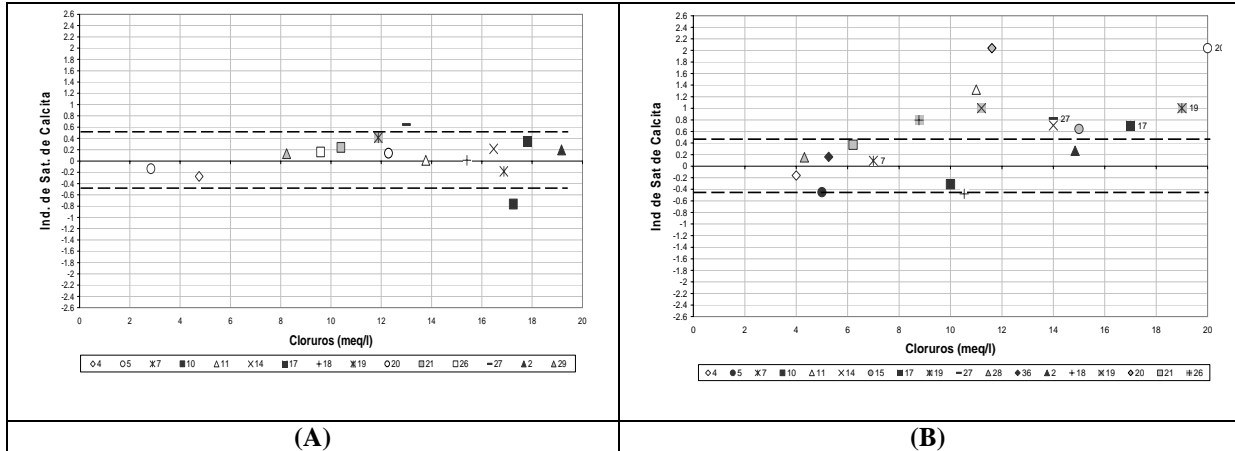


Figura 9. Relación índice de saturación de Calcita vs Cloruro a) junio y b) septiembre de 1997

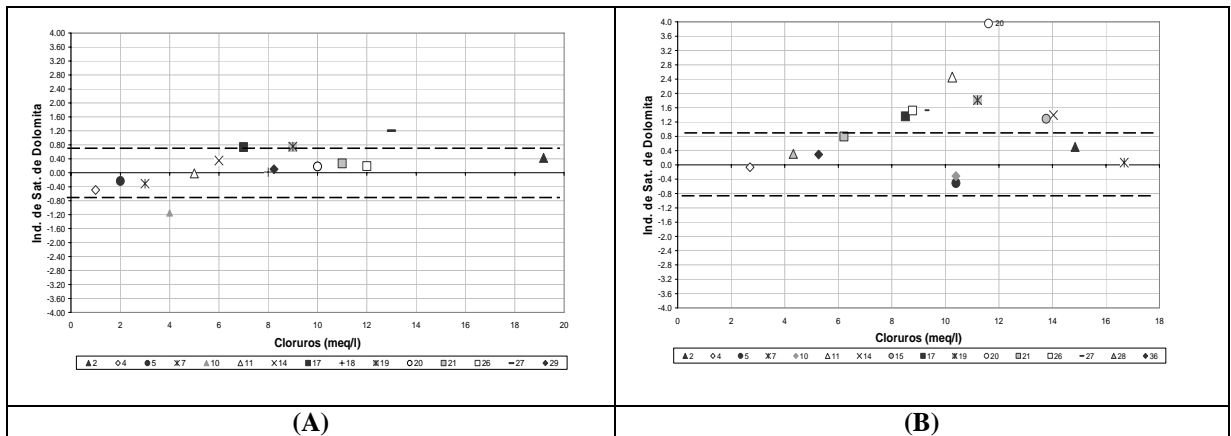


Figura 10. Relación índice de saturación de Dolomita vs Cloruro A) junio y B) septiembre de 1997

El agua subterránea se encuentra subsaturada respecto al yeso en junio y septiembre (Figura 11), indicando que el agua de la precipitación pluvial al infiltrarse no se pone en contacto con algún depósito de yeso o roca

cuya composición tenga sulfatos, por lo tanto se descarta que los sulfatos provengan de un banco evaporítico como mencionan Velásquez, 1996, Steinich et al, 1996 y Villasuso y Mendez, 2000.

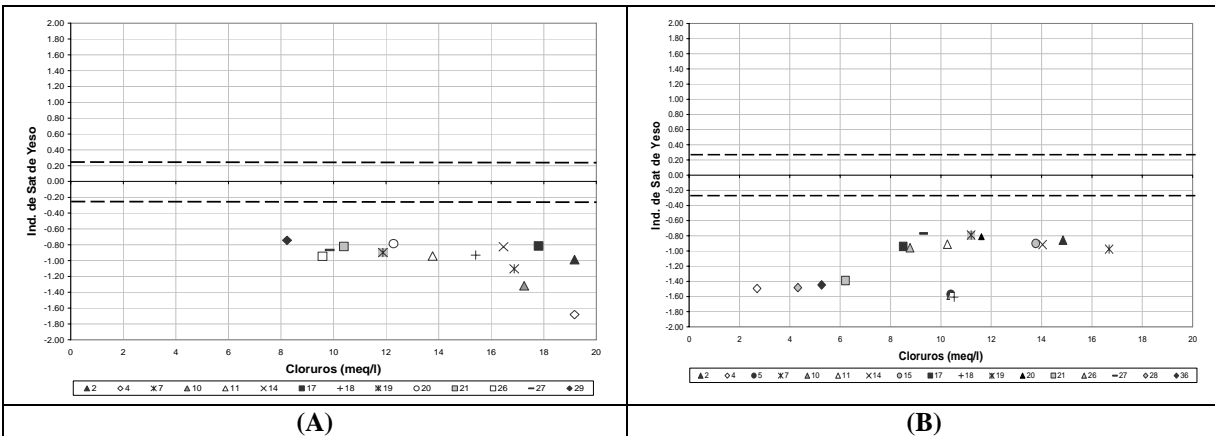


Figura 11. Relación índice de saturación de Yeso vs Cloruro a) junio y b) septiembre de 1997

CONCLUSIONES

La dirección del flujo de agua subterránea es de sureste a noroeste, paralela a la Sierrita de Ticul, la cual funciona como una barrera hidrogeológica. También se observa que no existe un enriquecimiento en las concentraciones de sulfatos en la dirección del flujo de agua.

El agua de la mayoría de los pozos esta catalogada en la familia de agua tipo clorurada sulfatada sódica, a excepción de 3 pozos que presentan otros tipos de familia de agua.

Las aguas de la zona de estudio no provienen del agua de mar de acuerdo a las relaciones sulfato-cloruro y bicarbonato-cloruro.

El agua se encuentra en equilibrio con respecto a la calcita y la dolomita en junio y sobresaturadas en septiembre, debido a la disolución de la caliza por el agua infiltrada en la época de lluvia.

La mayoría de los pozos se encuentran subsaturados con respecto al yeso, lo cual indica que el agua no pasa por algún depósito de yeso que le aporte ese mineral; indicando así que los sulfatos difícilmente puedan tener su origen en un banco de evaporitas.

En general se concluye que los sulfatos presentes en el agua subterránea de la zona sur de la Sierrita de Ticul no provienen de las evaporitas que se localizan a más de 120 m de profundidad y que el origen posible sean los fertilizantes que ingresan al acuífero por la infiltración del agua de lluvia en la época de recarga.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA, AWWA, WEF. (1992). Standard methods for the examination of water and wastewater. 18 th Edition. Washington, American Public Health Association.

Comisión Nacional del Agua. (1997). Condiciones hidrogeológicas para el aprovechamiento del agua subterránea para riego en el Valle de Opichén. Documento técnico.

Gamboa J., Pérez I. (1997). Geología de la Península de Yucatán: era proterozoica y era paleozoica. Boletín Académico Facultad de Ingeniería UADY.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (2000). Carta de evapotranspiración y déficit de agua.

Steinich B., Velásquez G., Marín L., Perry E. (1996). Determination of the ground water divide in the karst aquifer of Yucatan, Mexico, combining geochemical and hydrogeological data. Geofísica Internacional. Vol. 35, Num. 2, pp.153-159.

- Tinajero G. J., Velázquez A., Zúñiga O. D. (1981). Hidrogeología e Hidrogeoquímica regional de la Península de Yucatán, México. Cap. II proyecto CPNH-IAS 8104. Estudio de las características geohidrológicas del acuífero en el área de Mérida, Yucatán.
- Velázquez G. (1996). Estudio geoquímico del anillo de cenotes, Yucatán.; Tesis Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Velázquez L. (1986). Aplicación de principios geoquímicos en la hidrología kárstica de la península de Yucatán. Ingeniería Hidráulica en México. pp. 21-29.
- Villasuso M., Méndez R. (2000). A conceptual model of the aquifer of the Yucatan Peninsula. International Institute for Applied Systems Analysis.
- Waterloo Hydrogeologic, Inc. (2003). AquaChem user's Manual. Water Quality Data, analysis, Plotting and Modeling. Water Hydrogeologic, Inc.; Ontario, Canadá, 276 pags.
- www.skate.ky.us. (10 de Julio de 2002). Kentucky Water Wacht Home Page; página de internet.

Este documento se debe citar como:

Graniel Castro, E., Pacheco Medina, A. y Coronado Peraza, V. (2009). **Origen de los sulfatos en el agua subterránea del sur de la sierrita de Ticul, Yucatán.** Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 13-1, pp. 49-58, ISSN: 1665-529X