

Elemento traza: contaminación y valores de fondo en aguas subterráneas de San Luis Potosí, SLP, México

Antonio Cardona B.* , J. Joel Carrillo R.** y M. Aurora Armienta H.**

* *Estudios en Hidrogeociencias, S.L.P.*

** *Instituto de Geofísica, UNAM, México, D.F.*

Recibido: 18 de noviembre, 1991; aceptado: 11 de diciembre, 1992.

RESUMEN

Es una práctica relativamente común en nuestro país, el definir como agua contaminada aquella cuya concentración de una o varias especies químicas es mayor que el límite máximo recomendado por los estándares nacionales e internacionales. Esta consideración es errónea pues no distingue entre dos conceptos fundamentales: i) agua de mala calidad (natural) y ii) agua contaminada (efectos antropogénicos). Se propone el concepto *VALOR de FONDO* para una especie disuelta en agua subterránea, como *la concentración en un determinado punto del sistema de flujo, debida única y exclusivamente a procesos y reacciones químicas naturales entre el agua subterránea y los minerales del acuífero; es función de la mineralogía de la roca, conductividad hidráulica, porosidad efectiva y patrón de flujo subterráneo*. En el caso de ciertos elementos traza como Zn, Li, F, B y Fe, su concentración natural en aguas termales es proporcional a la salinidad, específicamente cuando ésta se considera equivalente al cuadrado de la concentración molar de sodio. Este comportamiento se investigó en el agua subterránea (acuífero profundo) que abastece las necesidades de la ciudad de San Luis Potosí y que posee una componente termal importante (mínimo 70% en volumen). Los resultados de la aplicación del concepto valor de fondo indican que la totalidad del litio (0.01 a 0.22mg/1) y fluoruro (0.3 a 3.6mg/1) se derivan de la interacción agua-roca. El último sobrepasa en muchas muestras el límite de 1.5mg/1. A partir de los valores de fondo para el boro (0.07 a 0.27mg/1) y zinc (0.004 a 0.04mg/1), se distinguió además de la componente natural, otra que denota influencia antropogénica, aunque las concentraciones no rebasan, en ningún caso, los estándares correspondientes para agua potable.

PALABRAS CLAVE: Contaminación, elementos traza, aguas subterráneas, San Luis Potosí.

ABSTRACT

It is misleading not to distinguish between; i) bad (natural) quality water and ii) polluted water (anthropogenic effects). The concept of *BACKGROUND LEVEL* is proposed for the *concentration anywhere in a flow system due to natural chemical reactions between the host rock and the groundwater. It is a direct function of rock mineralogy, hydraulic conductivity, effective porosity and flow system*. In the case of some trace elements such as Zn, Li, F, B and Fe, their natural concentration in thermal waters is proportional to the salinity, especially when it is considered equivalent to the square of molar sodium concentration. This behaviour was studied in the water supply of San Luis Potosí which has an important thermal component (minimum 70% in volume). As expected, the results show that the background levels in groundwater depend on the mineralogical composition of the aquifer and on the nature of the flow system. The background level for boron is between 0.07 and 0.27mg/1 and 0.004 to 0.04mg/1 for zinc, which falls within drinking water standards; however, some of the analyzed samples are polluted. On the other hand, lithium is present from 0.01 to 0.22mg/1 and fluoride is between 0.3 and 3.6mg/1, both as the result of natural mineral solution. Many samples indicate that concentrations for the latter are not in excess of drinking water standards (1.5mg/1).

KEY WORDS: Pollution, trace elements, groundwater, San Luis Potosí.

INTRODUCCION

Por algunas décadas, el conocimiento de la degradación de la calidad del agua superficial por efectos antropogénicos ha sido motivo de preocupación. Sin embargo, hasta hace algunos años el agua subterránea se considera poco susceptible a la contaminación y en consecuencia casi no se efectuaban estudios sobre este aspecto en México. Además, las investigaciones sobre la calidad del agua subterránea presentan una problemática debida a la heterogeneidad y anisotropía de los medios por donde circula. Mas aún, en un gran número de los acuíferos explotados en el país, se

desconoce el cambio de calidad química del agua originado por una política de explotación inadecuada y/o por la filtración de aguas que contienen contaminantes.

En algunos sistemas de agua subterránea del país se ha detectado la presencia de uno o más contaminantes, definidos como: "*toda materia o sustancia, o sus combinaciones o compuestos o derivados químicos o biológicos, tales como humos, polvos, gases, cenizas, bacterias, residuos y desperdicios y cualesquiera otros que al incorporarse o adicionarse al aire, agua o tierra pueden alterar o modificar sus características naturales o las del ambiente*"

(LFCCA, 1971). Sin embargo, no se ha determinado previamente el valor de fondo o la concentración natural de las aguas subterráneas respectivas. Esto limita considerablemente el conocimiento de la evolución en tiempo y espacio de la calidad de la misma, lo que puede llevar a consideraciones erróneas al no poder diferenciar entre agua con mala calidad (natural) y aquella contaminada por efectos de políticas de manejo de los recursos hidráulicos o por la interacción con desechos de cualquier tipo.

MARCO HIDROGEOLOGICO

La cuenca de San Luis Potosí es el resultado de una serie de bloques y fallas que afloran al sureste de la provincia fisiográfica denominada Meseta Central. Esta cuenca se formó en el Terciario después de la extrusión de la mayor parte de la secuencia volcánica presente, y fue subsecuentemente rellenada por una columna importante de sedimentos continentales (denominados informalmente como material Granular Indiferenciado) en los que se intercalan algunos flujos de cenizas. A esta unidad, de acuerdo con varias fuentes (Labarthe *et al.*, 1982; SARH, 1988) se le ha asignado un espesor superior a los 450m.

El Granular Indiferenciado es resultado de la erosión de las montañas, principalmente volcánicas de edad Terciaria que incluye ignimbritas, tobas y flujos lávicos de composición félsica, del tipo calcoalcalino con un contenido elevado de potasio ($5.5 \pm 0.5\%$), que sobreyacen, discordantemente, a las rocas que forman el basamento hidrogeológico compuesto por formaciones post-cretácicas (intrusivo cuarzo-monzonítico) y/o cretácicas sedimentarisa (calizas y lutitas). El espesor combinado de las rocas volcánicas en el centro del valle es del orden de 2.5 km.

La composición química e isotópica del agua subterránea explotada en el valle de San Luis Potosí, demuestra que es de origen meteórico, esto es, aunque existe una componente termal, no es de origen juvenil magmático (Cardona, 1990). Las lluvias de verano se infiltran en las montañas circundantes y cuando las aguas torrenciales en los arroyos llegan al piso del valle. Debido a las formaciones geológicas detectadas, el agua subterránea es almacenada y transmitida por varios medios (fracturado, doble porosidad y poroso). Los pozos que extraen el agua de material volcánico (medio fracturado y de doble porosidad), generalmente son más productores que aquéllos perforados en material granular.

El agua subterránea se encuentra en un sistema acuífero que está formado de arriba hacia abajo por (i) un acuífero somero de tipo libre, compuesto por sedimentos granulares y espesor hasta de 40 m, su límite inferior es una lente de material predominantemente arcilloso con una espesor máximo de 100 m y (ii) un acuífero profundo, limitado por el plano inferior de la lente de arcillas, y compuesto por

flujos lávicos fracturados, tobas, ignimbritas y el Material Granular Indiferenciado; el espesor explotado en el centro del valle es del orden de los 250 m. El sistema aquí descrito sobreyace al basamento hidrogeológico.

El acuífero profundo es el que aporta el agua potable a la ciudad de San Luis Potosí con $89 \times 10^6 \text{ m}^3$ /año (SARH, 1988) lo que provoca un efecto bien definido a la distribución piezométrica, situación que no ocurre en el acuífero somero, donde se extraen sólo $0.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ /año de agua con una importante componente de aguas residuales domésticas e industriales. Más de un 70% del agua extraída por pozos del acuífero profundo posee temperaturas anormales ($>30^\circ\text{C}$), considerando la media anual ambiental (17°C), y se deriva de flujo regional a través de un medio fracturado.

Las principales unidades volcánicas por las que viaja el agua de jerarquía regional, son rocas ígneas extrusivas (fracturadas) que constituyen derrames muy viscosos, ignimbritas con soldamiento variable y tobas. Su composición varía de félsica (riolita San Miguelito, ignimbrita Cantera, riolita Panalillo) a intermedia (latita Portezuelo). En estas rocas predomina una textura porfirítica con cuarzo y sanidino como fenocristales en una matriz (80% en promedio) parcial o totalmente desvitrificada con magnetita y hematita como minerales accesorios. Sus edades radiométricas entre 30.6 y 26.8 ± 1.3 millones de años las ubica en el Oligoceno.

Evidencias definidas tanto químicas como isotópicas (Labarthe *et al.*, 1982; Verma, 1984; Ruiz *et al.*, 1988) sugieren que los magmas, que dieron lugar al vulcanismo explosivo del área, se originaron a partir de cristalización fraccionada en cámaras magmáticas someras, con generación de magma por fusión parcial de la corteza superior, en un ambiente extensional, con una mínima o nula contribución de magma derivada del manto.

Elementos menores disueltos en el agua subterránea

El origen de los elementos traza, o menores, en las aguas naturales siempre ha sido controversial. Cuando el agua tiene una temperatura elevada ($200\text{-}300^\circ\text{C}$), los elementos menores alcanzan generalmente concentraciones elevadas en ésta. La presencia de los mismos en acuíferos con menor temperatura se asocia comúnmente a un origen externo. Las concentraciones detectadas de litio, rubidio, cesio, boro, flúor, arsénico y dióxido de carbono en aguas de alta temperatura generalmente habían sido consideradas como evidencia de la presencia de agua magmática. Sin embargo, experimentos de Ellis y Mahon (1977) probaron que es posible obtener concentraciones similares a las detectadas en los campos geotérmicos, haciendo reaccionar muestras de las rocas encajonantes del yacimiento con soluciones de agua caliente. Considerando lo anterior, se esti-

mó necesario hacer un repaso acerca de los elementos traza que se pueden esperar en las rocas volcánicas de la zona.

De acuerdo con la génesis de los magmas que originaron las rocas volcánicas, se esperan mayores concentraciones de elementos litófilos como: F, Be, Sn, Pb, Zn, U, etc., con respecto a los elementos siderófilos como el Cr, Cu, Co, Ni, etc. Cuando las rocas se enfrían rápidamente después de su extrusión, como es el caso en San Luis Potosí, dichos elementos generalmente se localizan en la fase vítrea, ya que no tienen oportunidad de reemplazar elementos mayores de radio iónico y carga similares en las fases cristalinas.

Toma de muestras y análisis químicos de agua subterránea

En lo referente a la selección de puntos para toma de muestras, se utilizaron criterios como el conocer *a priori* el corte geológico, diseño del pozo, caudal de operación, elevación del nivel estático (sobre el nivel medio del mar) y registro histórico de análisis químicos realizados previamente, que señalaran la existencia de concentraciones anómalas de alguna especie química. A fin de mantener las condiciones similares en cada sitio de muestreo, se incluyeron únicamente los puntos en que fue posible tomar la muestra directamente de la tubería de descarga del pozo. Las muestras fueron colectadas, en especial, aquellos que tenían varias horas de estar funcionando continuamente el equipo de bombeo; preferentemente, si éste era de tipo turbina vertical o con motor sumergible.

La muestra se colectó en un punto lo más cercano posible al cabezal de descarga del equipo de bombeo, llenando las botellas de polietileno de un litro de capacidad con una manguera de 6.2 mm de diámetro conectada a la llave de la tubería de descarga o a esta misma, enjuagando cuatro veces los frascos antes de llenarlos y cerrarlos herméticamente con tapa y contratapa, evitando al máximo la aereación y agitación del agua, así como la formación y permanencia de burbujas en el seno del líquido. Por último con cera derretida se sellaba el exterior de cada botella. Como conservador se añadieron 5 ml de HNO₃ por litro de muestra, además de colocarlos en contenedores refrigerados para su transporte diario al laboratorio.

Utilizando una celda de aislamiento, en la que el agua que fluye del pozo tiene mínimo contacto con la atmósfera, se midieron en campo la temperatura y pH utilizando un potenciómetro-termómetro digital. El procedimiento incluyó la utilización de soluciones tampon (*buffers*) de pH conocido a la misma temperatura del agua, de tal manera que fue posible obtener lecturas de pH reproducibles con una precisión de ± 0.01 unidades. También se midió la conductividad eléctrica con un conductivímetro portátil provisto de corrección automática por temperatura.

Respecto a los análisis químicos que se efectuaron en el laboratorio de Química Analítica del Instituto de Geofísica, UNAM, el arsénico se cuantificó con el método del dietil-ditiocarbamato de plata. La concentración de boro se obtuvo colorimétricamente por reacción con ácido carmínico. Los metales litio, cromo, plomo, cobre, zinc y hierro, se analizaron por espectroscopía de absorción atómica utilizando un equipo Perkin Elmer 2380. El fluoruro y el cloruro se midieron con electrodo selectivo, adecuando el medio para estabilizar la fuerza iónica, utilizando un potenciómetro Orión Research 407A. Las determinaciones de calcio y magnesio se realizaron por volumetría mediante titulación con EDTA, el sodio se cuantificó por flamometría.

Los métodos analíticos fueron probados con las muestras estándares de minerales y de control de calidad de contaminación, de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA). Los resultados obtenidos correspondieron a los valores reales, se tuvo un 95% como intervalo de confianza. La precisión de los procedimientos se obtuvo analizando muestras por triplicado. Las determinaciones efectuadas por absorción atómica presentaron menos del 3% de desviación estándar relativa, para la cuantificación de arsénico se obtuvo una desviación estándar relativa del 4.1% y de 2% para el boro. Las determinaciones de calcio, magnesio y sodio presentaron una desviación estándar relativa inferior al 5% y de 2% para el fluoruro y cloruro. Los límites de detección fueron de 0.01 mg/l para el cobre, plomo, cromo, hierro y litio; 0.001 mg/l para zinc y arsénico; 0.05 mg/l para boro y 0.1 mg/l para fluoruro. Los resultados analíticos se comprobaron analizando muestras por duplicado. La Tabla 1 muestra una relación completa de las determinaciones de campo (pH, temperatura y CE) y laboratorio; en ésta se usa la nomenclatura de los pozos de la CNA, misma que aparece en trabajos de hidrogeología publicados sobre la zona.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 1 ($rNa^+ - rCl^-$ vs. $rCa^{+2} + rMg^{+2}$) se presenta la diferenciación del agua subterránea del acuífero profundo del valle de San Luis Potosí propuesta por Cardona (1990), misma que se tomará como base para el análisis de adquisición de elementos mayores, desde el punto de vista de equilibrio termodinámico. Esta diferenciación fue básica en la definición de los flujos de agua subterránea tal y como se aprecia en la sección esquemática insertada en las misma figura. Este diagrama muestra los grupos principales definidos de agua subterránea y están ejemplificados por los pozos allí indicados. Los grupos extremos son: 1 (flujo regional) y los 4 y 5 (flujo intermedio); la mezcla entre éstos produce los grupos 2 y 3.

Para el Grupo 1 (las aguas de este grupo están representadas en las figuras con el mismo número, así como los otros grupos), el principal proceso de adquisición de

Tabla 1

Análisis físico-químicos de aguas subterráneas, San Luis Potosí, S.L.P.
(PROF. en m, TEMP. en °C, C.E. en $\mu\text{s}/\text{cm}$, CONCENTRACIONES en mg/l)

MUESTRA	PROF.	TEMP.	pH	C.E.	SiO2	HCO3	Cl	SO4	NO3	Na	K	Ca	Mg	F	Fe	Li	B	Zn	T.D.S
M-26	300	26.00	6.22	230.00	97.00	105.64	13.50	9.50	11.00	25.30	13.60	16.80	4.32	0.36	0.04	0.02	0.12	0.00	200.02
M-49	350	27.00	6.66	255.00	103.00	105.64	11.80	10.00	7.70	22.00	10.50	24.00	0.96	0.32	0.04	0.03	0.00	0.00	192.92
1005-Z	400	24.20	7.01	370.00	81.50	211.29	4.30	12.00	15.60	35.10	13.60	45.60	2.85	0.58	0.05	0.04	0.01	0.01	340.92
1130-Z	250	29.60	7.12	310.00	60.00	152.60	37.00	57.00	39.40	10.50	52.00	1.44	0.62	0.24	0.05	0.15	0.01	0.01	350.56
1139-Z	200	29.90	7.19	430.00	68.50	152.60	28.50	73.00	37.00	10.10	38.40	1.91	0.76	0.02	0.05	0.00	0.01	0.01	342.27
1142-Z	31.00	7.18	330.00	62.00	140.86	11.00	10.00	30.40	7.50	28.80	1.44	0.80	0.08	0.02	0.40	0.00	0.00	0.00	230.80
1146-Z	28.80	7.59	830.00	69.50	140.86	17.00	15.00	30.40	8.80	32.00	0.96	0.74	0.03	0.02	0.15	0.01	0.01	0.01	245.76
1148-Z	200	28.80	7.38	415.00	69.00	152.60	28.50	74.00	37.00	10.50	41.60	1.96	0.60	0.01	0.04	0.00	0.01	0.01	346.76
1149-Z	201	26.20	7.36	430.00	73.00	164.34	34.00	30.00	37.90	13.60	42.40	2.40	0.80	0.02	0.04	0.00	0.01	0.01	325.44
1157-Z	250	26.00	7.49	220.00	117.38	6.60	1.00	2.10	14.50	9.70	27.20	1.92	0.46	0.15	0.02	0.02	0.02	0.02	180.86
1158-Z	180	30.20	6.64	150.00	98.00	99.78	4.50	1.50	4.80	13.50	9.70	14.40	1.92	0.36	0.03	0.01	0.02	0.02	150.46
1168-Z	150	23.70	7.23	510.00	88.50	223.03	21.00	30.00	4.40	48.30	16.60	45.60	3.36	0.66	0.24	0.05	0.15	0.01	392.95
1174-Z	150	23.70	6.57	175.00	93.50	74.60	7.50	5.90	6.30	14.80	10.00	12.80	1.92	0.33	0.74	0.01	0.00	0.00	196.80
1177-Z	235	31.50	7.57	300.00	66.50	140.86	9.00	14.00	30.00	5.30	27.20	0.96	0.63	0.04	0.05	0.00	0.00	0.00	227.95
1182-Z	180	25.40	7.49	178.00	85.00	94.40	3.70	2.10	1.60	9.30	9.10	21.60	0.96	0.34	0.07	0.01	0.00	0.00	211.20
1187-Z	330	25.30	6.55	132.00	98.00	62.90	4.50	3.10	5.40	10.20	8.20	8.80	1.92	0.26	0.36	0.01	0.00	0.00	207.20
1195-Z	26.70	7.83	270.00	95.00	140.86	8.80	6.50	4.00	25.70	8.60	27.20	0.48	0.55	0.04	0.05	0.00	0.04	0.04	222.69
1196-Z	80	21.50	6.14	590.00	77.50	152.60	84.00	56.00	25.70	34.20	20.50	81.60	11.52	0.45	0.05	0.01	0.37	0.00	513.59
213-ZA	190	29.70	6.76	240.00	93.00	117.38	6.80	6.00	3.40	19.60	14.00	19.20	2.40	0.44	0.04	0.02	0.00	0.00	189.22
24A-ZA	20	20.80	6.25	536.00	71.50	114.70	63.00	55.50	19.00	35.00	20.10	46.40	5.76	0.29	0.78	0.01	0.00	0.00	383.40
323-ZA	220	16.80	6.97	438.00	49.00	164.34	11.00	20.50	3.90	59.00	4.90	19.20	1.44	3.60	0.03	0.22	0.24	0.04	288.80
347-ZA	55	21.00	6.43	786.00	75.50	312.20	50.00	59.20	2.30	55.10	21.50	86.40	11.04	0.48	0.25	0.01	0.07	0.01	564.80
359-ZA	300	24.40	7.47	208.00	85.00	115.30	4.80	0.70	2.30	9.30	10.40	26.40	1.92	0.28	0.13	0.01	0.15	0.00	272.00
381A-Z	150	26.80	6.54	210.00	98.50	105.64	15.20	7.00	5.50	20.10	11.40	20.00	3.36	0.31	0.12	0.01	0.03	0.03	233.51
387-ZA	200	25.40	7.25	301.00	93.00	136.60	16.00	11.60	2.90	16.60	12.20	32.00	2.40	0.20	0.46	0.01	0.00	0.00	263.60
390-ZA	145	25.00	7.14	460.00	77.00	234.77	18.10	14.00	14.90	46.40	11.80	48.00	4.80	0.74	0.12	0.06	0.02	0.03	393.51
396-ZA	160	23.80	6.52	100.00	96.00	70.43	4.30	1.00	0.70	10.80	7.00	7.20	0.48	0.24	0.03	0.01	0.01	0.01	102.18
398-ZA	170	26.70	7.65	300.00	88.50	152.60	15.50	15.00	45.50	10.90	23.20	1.44	2.85	0.10	0.07	0.20	0.03	0.03	266.99
403A-Z	287	29.00	7.73	290.00	90.00	152.60	9.60	7.50	2.00	38.90	7.00	20.00	1.92	0.96	0.07	0.12	0.28	0.02	239.68
407-ZA	200	28.70	7.68	315.00	81.50	129.12	10.00	8.00	39.90	6.20	24.80	1.44	1.55	0.04	0.10	0.20	0.00	0.00	221.01
410-ZA	210	28.80	7.33	376.00	77.50	153.70	15.50	35.80	3.80	38.60	7.80	32.80	0.48	1.20	0.10	0.10	0.15	0.00	283.60
415-ZA	250	37.40	7.16	420.00	61.50	152.60	18.00	15.50	4.30	51.10	4.50	21.60	0.96	2.55	0.08	0.17	0.24	0.02	271.11
419-ZA	170	26.20	7.32	290.00	94.00	152.60	12.00	12.00	29.50	9.70	27.20	1.92	0.93	0.10	0.03	0.12	0.03	0.03	245.85
449A-Z	200	29.70	7.01	590.00	90.50	140.86	27.50	11.00	44.00	9.20	63.20	2.40	0.55	0.03	0.05	0.12	0.00	0.00	261.51
465-ZA	200	25.70	7.39	295.00	83.00	134.00	15.60	4.60	4.60	16.60	10.90	36.00	2.40	0.35	0.12	0.01	0.00	0.00	337.00
466-ZA	200	29.80	7.66	286.00	60.50	148.80	8.50	9.20	2.70	29.50	6.00	26.40	2.88	0.78	0.08	0.07	0.07	0.00	227.20
524-ZA	300	21.50	5.94	510.00	71.00	164.34	54.00	62.00	18.50	27.60	21.00	64.00	9.60	0.23	0.11	0.20	0.04	0.04	420.98
550A-Z	300	27.90	6.30	260.00	105.00	105.64	16.80	12.00	0.80	25.30	11.80	18.40	2.88	0.55	0.06	0.03	0.36	0.03	194.16
551-ZA	200	40.40	7.08	490.00	52.50	176.08	14.50	13.50	6.30	60.50	5.30	20.00	0.96	3.40	0.14	0.22	0.20	0.03	300.54
614-ZA	262	28.20	7.51	270.00	100.50	140.86	12.00	7.00	5.00	26.70	13.60	23.20	2.40	0.90	0.11	0.04	0.04	0.01	231.66
624-ZA	314	34.20	7.12	450.00	52.50	164.34	16.50	22.00	6.90	61.50	5.60	12.90	1.44	3.40	0.09	0.20	0.28	0.04	294.58
627-ZA	330	37.00	7.23	420.00	59.00	117.38	12.00	22.00	3.80	54.00	4.90	18.40	1.44	3.10	0.23	0.18	0.28	0.01	237.02
633-ZA	350	23.40	7.60	250.00	82.50	164.34	6.00	21.00	2.10	24.30	14.00	19.20	3.36	2.15	0.49	0.01	0.01	0.01	256.45
636-ZA	250	29.00	7.73	340.00	78.00	152.60	16.00	14.00	41.70	8.80	23.20	0.96	1.50	0.03	0.11	0.16	0.01	0.01	258.76
850A-Z	300	27.30	6.97	370.00	60.00	140.86	11.00	7.00	5.50	54.00	6.40	18.00	1.20	3.10	0.04	0.18	0.20	0.02	247.06
852-ZA	300	27.30	6.72	235.00	79.50	117.38	9.60	10.50	3.00	32.30	11.40	12.80	1.92	1.42	0.06	0.08	0.12	0.01	200.32
901-ZA	260	16.00	7.11	341.00	54.50	156.20	12.20	22.20	2.70	50.50	4.30	19.20	0.48	2.90	0.00	0.07	0.00	0.00	264.20
910-ZA	200	16.50	7.41	354.00	54.50	156.10	12.00	25.40	6.90	51.50	4.70	20.00	0.48	3.50	0.00	0.22	0.00	0.00	283.60
918-ZA	300	16.20	7.10	450.00	54.00	164.37	13.50	18.00	5.30	59.60	5.30	18.40	1.44	3.40	0.03	0.19	0.04	0.04	289.31
919-ZA	350	18.50	7.21	435.00	67.50	158.47	11.00	12.00	4.80	44.60	4.50	18.60	1.44	3.10	0.04	0.18	0.12	0.01	258.51
923-ZA	200	25.10	7.08	230.00	95.00	105.64	13.20	4.00	3.60	17.30	9.70	25.60	0.96	0.48	0.02	0.01	0.03	0.03	180.48
924-ZA	200	24.90	7.17	255.00	95.50	129.12	15.00	10.00	19.60	10.50	29.60	2.40	0.40	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	216.62
926-ZA	95	20.80	5.87	625.00	71.00	191.10	37.50	77.60	22.90	32.20	23.20	70.40	9.60	0.30	0.38	0.01	0.07	0.00	545.60
930-ZA	200	26.30	6.53	144.00	93.50	58.30	7.60	4.60	33.10	10.20	9.10	8.80	2.40	0.30	0.12	0.01	0.01	0.01	298.60
933-ZA	80	21.90	6.45	1103.00	74.00	288.90	97.00	96.50	79.90	64.30	24.10	119.20	15.84	0.33	0.09	0.02	0.07	0.00	789.20
940-ZA	200	35.10	7.10	370.00	77.50	162.30	14.50	24.20	2.70	50.50	5.60	19.20	3.65	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	267.80
943-ZA	300	31.10	6.84	309.00	76.00	129.12	9.00	12.00	2.90	28.60	13.60	22.40	2.40	0.85	0.06	0.05	0.05	0.02	220.87
AHU-1	27.00	6.57	392.00	46.00	191.50	13.50	24.80	3.20	53.30	6.50	26.40	1.44	0.71	0.01	0.13	0.07	0.00	0.00	277.80
INF-2	450	25.20	6.29	129.00	90.50	129.12	9.40	11.00	5.30	30.40	20.00	20.00	4.32	1.10	0.11	0.04	0.28	0.01	250.64
NO-1	15	20.70	6.02	1649.00	55.00	414.80	162.00	235.00	9.10	119.80	33.00	176.00	27.36	0.42	0.34	0.01	0.07	0.00	1131.40
NO-2	30	20.80	6.15	531.00	75.50	94.40	70.00	43.50	11.70	25.80	22.30	50.40	8.16	0.27	0.41	0.01	0.00	0.0	

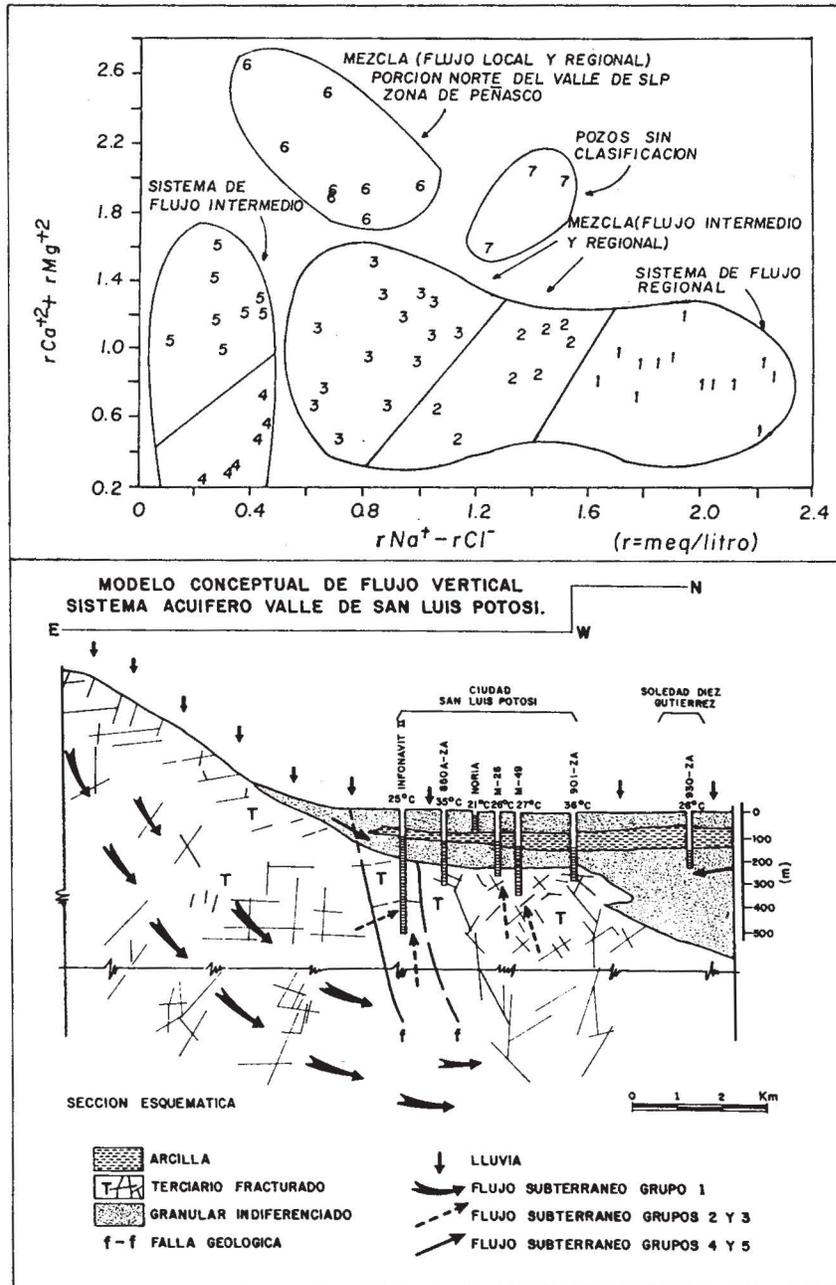


Fig. 1. Diferenciación de grupos de agua subterránea y modelo conceptual de flujo vertical en el sistema acuífero de San Luis Potosí. En el esquema inferior se identifican los grupos de agua señalados en la gráfica superior.

elementos es intercambio iónico y lixiviación a temperaturas moderadas (70-80°C), entre la matriz vítrea de las rocas volcánicas y el agua subterránea. Esto da como productos de desvitrificación a minerales arcillosos (montmorillonita, illita y clorita). Durante el intercambio iónico y lixiviación, los elementos menores también pasan a la fase acuosa.

Los resultados de laboratorio indicaron que el litio, fluoruro, boro, zinc y fierro se presentan en concentraciones mayores que el mínimo de detección, mientras que

el cromo y el cobre están generalmente por abajo de este valor. Este hecho responde al comportamiento geoquímico de los dos últimos elementos al presentarse en concentraciones mínimas en las rocas del área.

De acuerdo con los experimentos de interacción agua caliente/roca con soluciones de NaCl realizados por Ellis y Mahon (1977), se sabe que existe una relación estrecha entre la concentración de elementos menores en la fase acuosa (metales especialmente) con la salinidad, sobre todo cuando esta última se considera equivalente al cuadrado de

ACUIFERO PROFUNDO (VALLE DE SAN LUIS POTOSI)

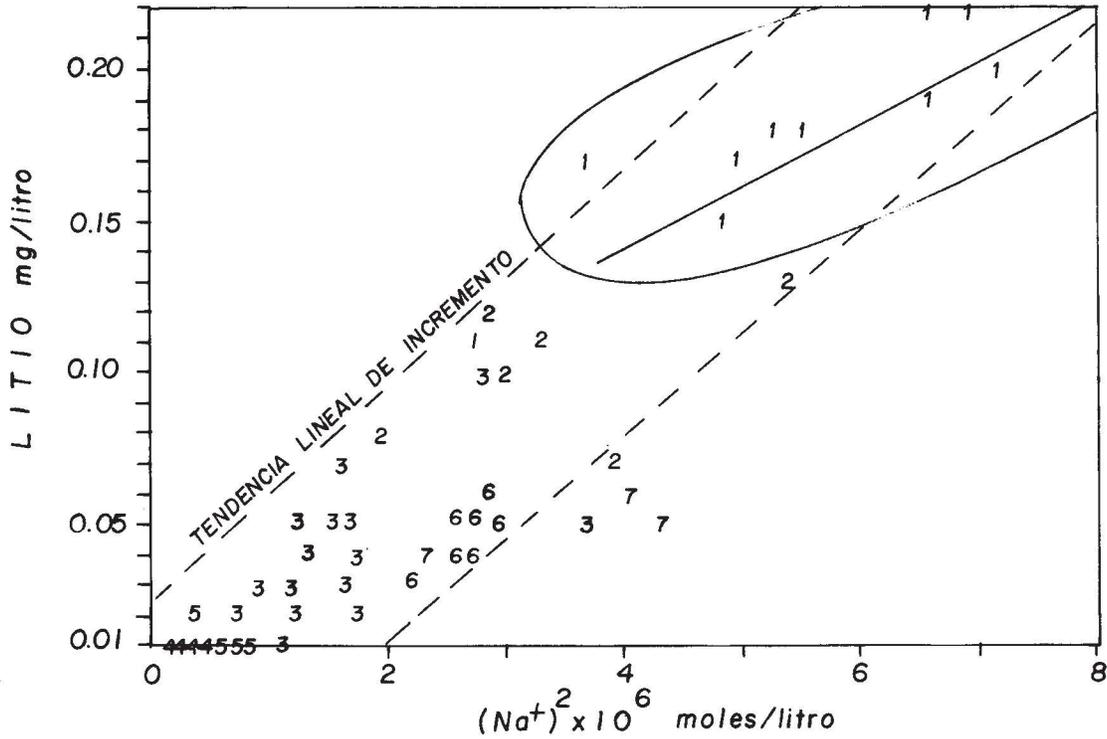


Fig. 2. Concentración molar de sodio al cuadrado vs. concentración de litio en (mg/l), en el acuífero profundo del Valle de San Luis Potosí

ACUIFERO PROFUNDO (VALLE DE SAN LUIS POTOSI)

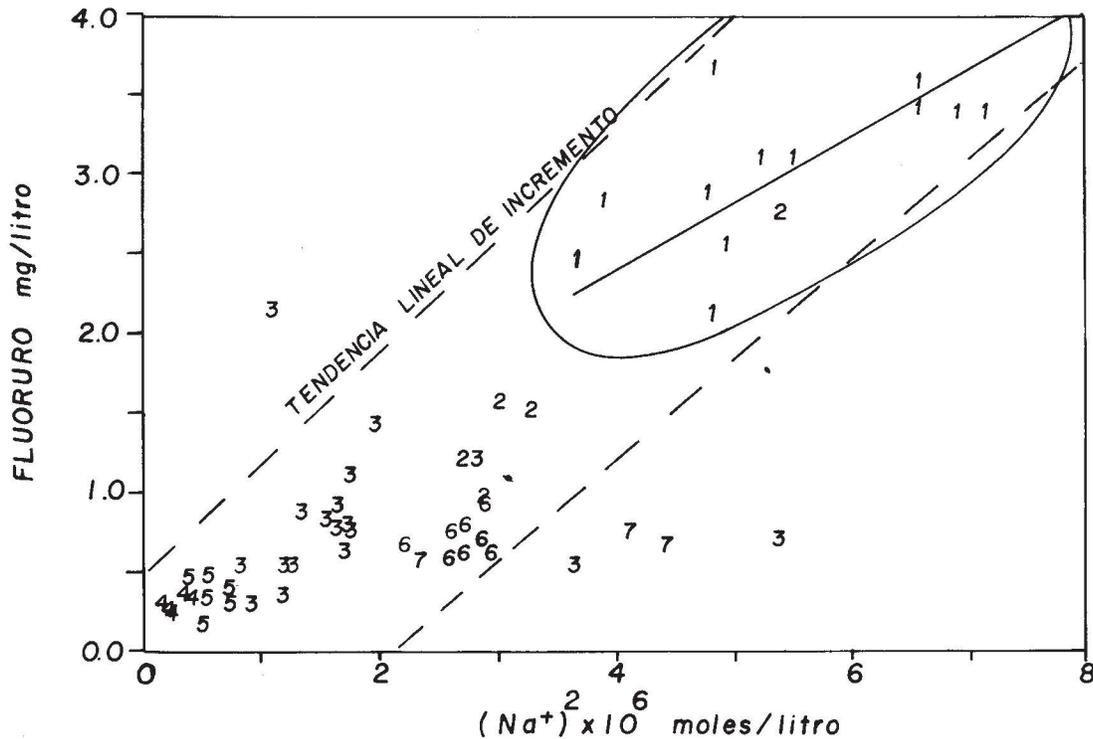


Fig. 3. Concentración molar de sodio al cuadrado vs. concentración de fluoruro (mg/l). Acuífero profundo de San Luis Potosí.

la concentración molar de sodio. Sin embargo, cuando existen cantidades apreciables de sulfuros, las concentraciones son menores (sin que se pierda su relación con la salinidad) que para un sistema sin sulfuros. La concentración de sulfuros en el agua es función del pH, ya que participa en equilibrios ácido-base formando las especies HS^- y H_2S al disminuir el pH. Existe por ello una compleja interrelación entre la solubilidad de los sulfuros, el pH del agua y la solubilidad de los complejos que forman los metales en solución.

En las Figuras 2 (litio— $[\text{Na}]^2$) y 3 (fluoruro— $[\text{Na}]^2$), indica concentración molar, es muy clara la tendencia lineal de incremento en la concentración de cada ión con respecto a la salinidad del agua (la línea recta que aparece, representa el mejor ajuste por regresión lineal para las aguas del Grupo 1). Esto comprueba que ambas concentraciones son producto del proceso de interacción agua subterránea-roca encajonante, por lo que representan *los niveles de fondo para los diferentes grupos de agua*. En las mismas figuras se hace evidente que los grupos 2 y 3 son producto de mezclas entre aguas del Grupo 1 con aquellas de los 4 y 5.

La gráfica de la Figura 4 (fluoruro—litio) demuestra una relación lineal entre estos iones, con un coeficiente de correlación de 0.90, que se interpreta como resultado de su introducción a la fase acuosa a partir de una misma fuente, en este caso la matriz de la roca. En la misma gráfica se observa la relación de mezcla entre los grupos arriba mencionados, evidente por la relación de temperatura indicada. Por otro lado, en las gráficas de las Figuras 5 (boro— $[\text{Na}]^2$) y 6 (zinc— $[\text{Na}]^2$) se aprecian desviaciones de la tendencia lineal, la cual se puede interpretar como efecto de una fuente externa que adiciona esos elementos.

La presencia de los elementos arriba indicados tiene dos orígenes: uno natural evidenciado por la tendencia lineal y otro externo (contaminación, en el sentido del término propuesto por Freeze y Cherry, 1979), que se identifica por las desviaciones de dicha tendencia. Esto es especialmente notorio para algunas muestras de agua de los grupos 2, 3, 4, 5, 6 y 7 como se observa en las Figuras 5, 6 y 7; este concepto es congruente con el esquema de flujo delineado en la Figura 1.

En la gráfica de la Figura 8 (hierro total— $[\text{Na}]^2$), no se aprecia ninguna tendencia similar a las previamente observadas. Esto se debe posiblemente a la química del hierro. Los estudios de este elemento se efectúan normalmente en conjunto con determinaciones de Eh. Para valores de Eh moderados a elevados (medio oxidante) y pH dentro de los intervalos típicos de las aguas subterráneas, la especie $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (goethita, si está cristalizada) es termodinámicamente estable (Freeze y Cherry, 1979). Por lo tanto, para medios oxidantes se esperan concentraciones de hierro menores a 50 $\mu\text{g}/\text{l}$ (Edmunds, 1973). No se tienen datos

del Eh de las aguas de la zona, pero por consideraciones hidrogeológicas e hidrogeoquímicas (SARH, 1988; Cardona 1990), se considera que prevalecen condiciones de oxidación con valores de Eh moderado. Esto explica la tendencia *horizontal* de los datos de la Figura 8, con valores de hierro relativamente bajos. Se estima que el valor de fondo oscila alrededor de 0.1 mg/l para todos los grupos. Lo anterior se podría comprobar con datos de potencial de óxido-reducción vs. potencial hidrógeno.

Considerando la litología de las rocas encajonantes, la salinidad de los diferentes tipos de agua, las concentraciones detectadas y la localización de los pozos con valores de plomo entre 0.1 y 0.03 mg/l (pozos: 850A-ZA, 624-ZA, 1157-ZA, 381A-ZA, 924-ZA, 636-ZA, 550-ZA, 1177-ZA, 449A-ZA y 524-ZA), se considera que su origen se debe a la filtración de aguas residuales en los poblados de las periferias del valle. Las concentraciones de arsénico tienen su origen por procesos naturales (valor de fondo). Debido a que los valores detectados de Cr y Cu fueron inferiores al mínimo de detección de 0.01mg/l, se considera que el nivel de fondo para estos iones es menor a esa concentración; valores mayores, aún inferiores a las normas de calidad del agua nacionales o internacionales, indicarán contaminación.

CONCLUSIONES

La clasificación de agua subterránea por grupos está influenciada por la litología del acuífero, tipo de permeabilidad y jerarquía del sistema de flujo al que pertenece, por lo que el rango del valor de fondo para cada elemento disuelto es diferente para cada grupo.

La relación entre la concentración de sodio y de los elementos traza analizados, permite diferenciar el origen de los últimos por contaminación antropogénica y por el medio geológico para aguas naturales.

En el acuífero profundo de San Luis Potosí, el litio y el flúor provienen únicamente de la disolución de la matriz rocosa. La presencia de boro y el zinc se debe tanto a su aporte natural como a una fuente externa al sistema agua-roca. Para determinar el origen del hierro es necesario conocer los valores de Eh y pH, y considerar las posibles reacciones de oxidación-reducción y precipitación, en las que puede intervenir este metal.

Los pozos perforados en rocas ígneas muestran una mayor tendencia a la presencia de elementos traza.

El estudio realizado sugiere que la metodología propuesta permite establecer los valores de fondo (naturales) para boro, litio, flúor y zinc, en acuíferos compuestos por rocas volcánicas con influencia de aguas termales.

ACUIFERO PROFUNDO (VALLE DE SAN LUIS POTOSI)

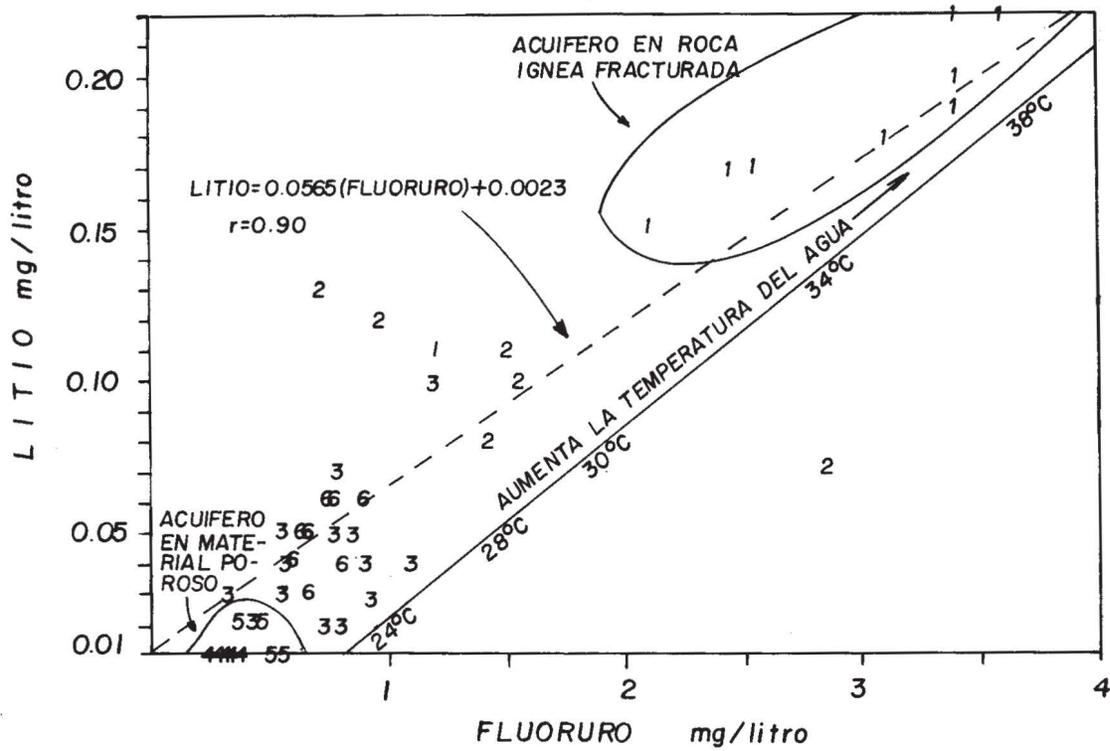


Fig. 4. Concentración de fluoruro vs. concentración de litio. Acuífero profundo de San Luis Potosí (r=coeficiente de correlación).

ACUIFERO PROFUNDO (VALLE DE SAN LUIS POTOSI)

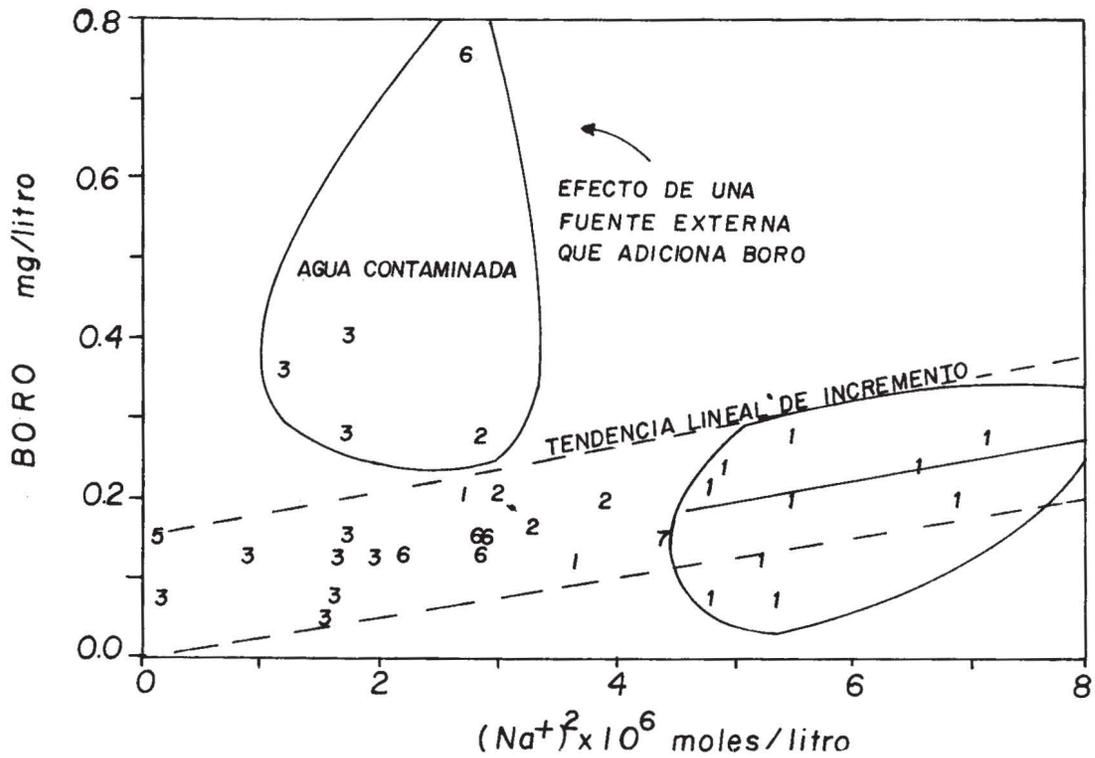


Fig. 5. Concentración molar de sodio al cuadrado vs. concentración de boro (mg/l). Acuífero profundo San Luis Potosí

ACUIFERO PROFUNDO (VALLE DE SAN LUIS POTOSI)

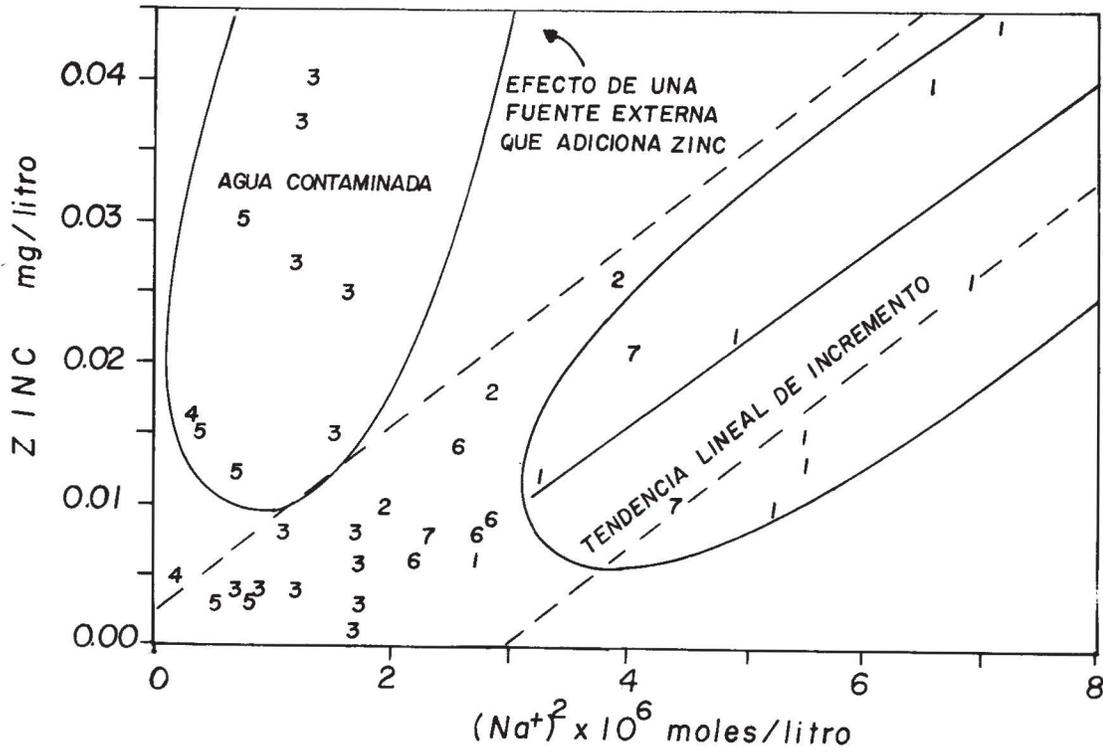


Fig. 6. Concentración molar de sodio al cuadrado vs. concentración de zinc. Acuífero profundo San Luis Potosí

ACUIFERO PROFUNDO (VALLE DE SAN LUIS POTOSI)

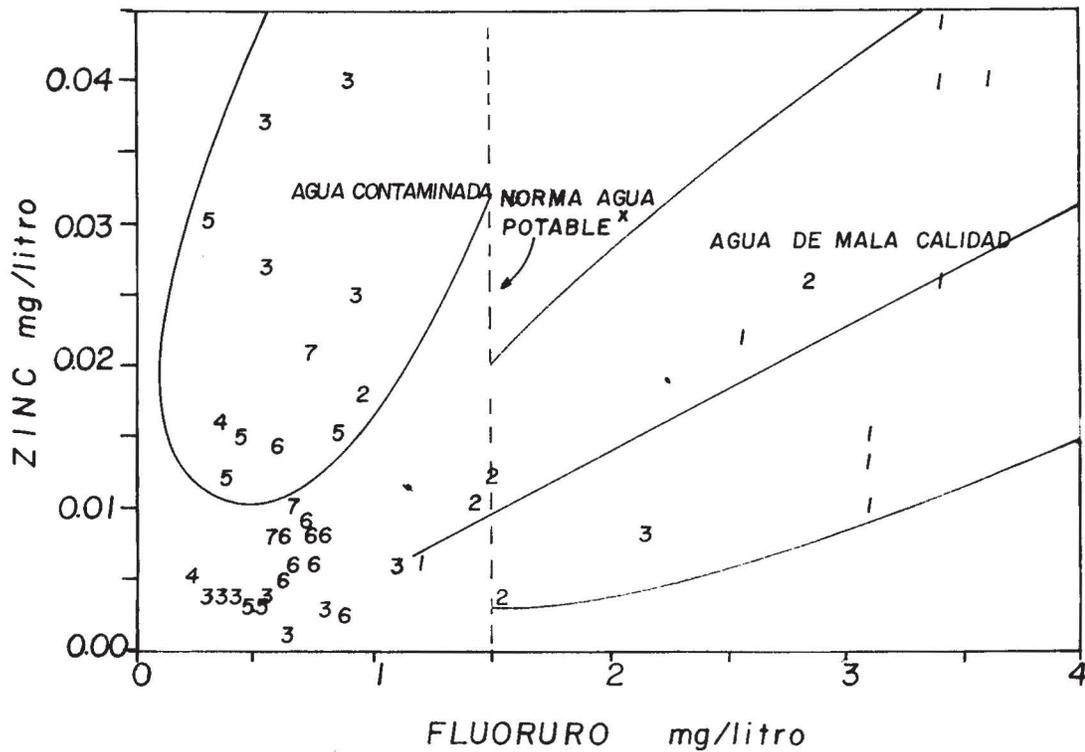


Fig. 7. Concentración de fluoruro vs. concentración de zinc. Acuífero profundo San Luis Potosí. (x la norma varía según el régimen climático).

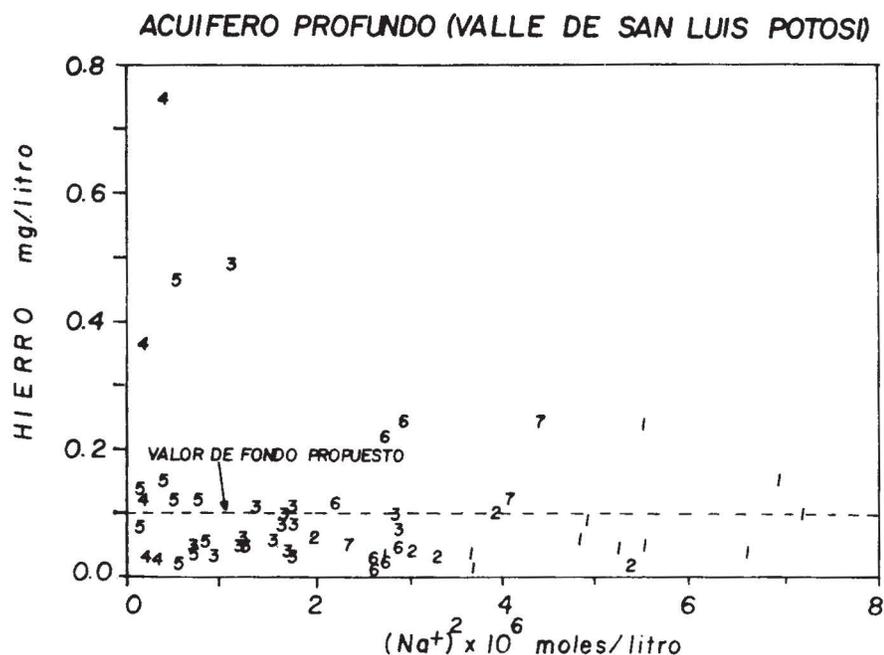


Fig. 8. Concentración molar de sodio al cuadrado vs. concentración de hierro (mg/l). Acuífero profundo San Luis Potosí

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer los comentarios de los árbitros anónimos para la edición de la presente publicación, así como a Rosa María Gómez Hernández por la captura en el procesador de palabras de las diferentes versiones realizadas.

BIBLIOGRAFIA

CARDONA, B.A., 1990. Diferencia hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del acuífero profundo del Valle de San Luis Potosí, Tesis de Grado (Maestría en Hidrología Subterránea) Universidad Autónoma de Nuevo León, México, 97 p.

EDMUNDS, W.M., 1973. Trace element variations across on oxidation-reduction barrier in a limestone aquifer, In E. Ingerso (editor), Proc. Symp. Hydrogeochem. and Biogeochemistry, Tokio, 1970. Clark, Washington, D.C., 8, 500-520.

ELLIS, A.J. y W.A.J. MAHON, 1977. Chemistry and Geothermal Systems. Academic Press, N.Y., 379 p.

FREEZE, R.A. y J.A. CHERRY, 1979. Groundwater. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 589 p.

LABARTHE, H.G., G.M. TRISTAN y G.J. ARANDA, 1982. Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte

central del Estado de San Luis Potosí, Folleto Técnico 85, UASLP, Inst. Geol. y Met., SLP, 208 p.

LEPCCA (Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental), 1971. Art. 4, Cap. I, Diario Oficial de la Federación, marzo 23, 1971.

RUIZ, J., T.J. PATCHETT y R.J. ARCULUS, 1988. Nd-Sr isotope composition of lower crustal xenoliths - Evidence for the origin of Mid-Tertiary felsic volcanics of Mexico. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 99, 336-343.

VERMA, S.P., 1984. Sr and Nd isotopic evidence for petrogenesis of Mid-Tertiary felsic vulcanism in the Mineral District of Zacatecas, Zac. (Sierra Madre Occidental), Mexico. *Isot. Geosci.*, 2, 37-53.

SARH (1988), (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). Estudio geofísico-geohidrológico del Valle de San Luis Potosí, SLP. Estudio para CNA, (Subdirección de Estudios, Planes y Programas), Méx., D.F., 152 p.

Antonio Cardona B.¹, J. Joel Carrillo R.² y M. Aurora Armienta H.²

¹ Estudios en Hidrogeociencias, Av. Venustiano Carranza 1540, 78250, S.L.P.

² Instituto de Geofísica, UNAM, Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F.