

ESTUDIO DEL YACIMIENTO DE SALMUERAS ALCALINAS DEL VALLE DE MEXICO

*Por Fernando Orozco D. y Antonio Madinaveitia
Instituto de Química.*

Se encuentra en la parte más profunda del Valle de México un depósito subterráneo de salmueras alcalinas. Su estudio ha interesado al Instituto de Química tanto desde el punto de vista teórico como por el interés práctico que pueden tener en la industrialización del país, proporcionando la materia prima para la producción de los álcalis que tanto necesita.

Es el Valle de México un valle cerrado, en su fondo se encuentra el Lago de Texcoco, es natural por lo tanto que estas salmueras se encuentren por lo menos en parte debajo de lo que era el fondo del antiguo lago, hoy desecado en gran parte por haber sido drenado por el canal de desagüe de la ciudad de México.

Yacimientos análogos se encuentran en otros muchos países. Los conocidos de más antiguo son los de Egipto; de ellos se han obtenido y se siguen obteniendo una serie de sales alcalinas que tuvieron mucha importancia en la antigüedad, pues su empleo permitió el desarrollo de la primitiva industria del vidrio. Existen allí varios lagos de agua alcalina que se secan parcialmente durante la estación calurosa dejando en sus orillas masas cristalinas que se recogen. Estos lagos de cuenca cerrada están alimentados por manantiales termales. Las masas cristalinas se conocen con el nombre de Trona, nombre que después se ha aplicado a la especie química, sesquicarbonato sódico con dos moléculas de agua de cristalización; sin que quiera esto decir que estas sales estén constituidas exclusivamente por sesquicarbonato sódico. Citaremos a continuación los análisis de dos muestras de sales naturales de este origen.

Na_2CO_3	51.05 %	18.43 %
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3$	—	47.29 "
NaCl	24.94 "	8.16 "
Na_2SO_4	—	2.15 "
Agua	19.66 "	19.67 "
Otras sales	4.35 "	4.31 "

Mucha mayor importancia industrial tiene otro yacimiento alcalino que existe en Africa, más al Sur. En el Africa Oriental Inglesa, en el Estado de Kenya, se encuentra el lago Magadi, situado en el centro del valle de Rift, cerca de la frontera del territorio de Tanganyik. (1)

Es un lago de cuenca cerrada al que no llega ninguna corriente regular de agua, solamente en la temporada de lluvias recibe algo de agua dulce. Su lecho está formado por una masa de cristales de sesquicarbonato que se encuentran normalmente en un lecho de barro impregnado de salmueras. Está alimentado por una serie de manantiales calientes (40°), algunos bastante caudalosos (2.500 galones por minuto). Junto a los manantiales hay una capa de salmuera, el resto está seco y lleno de trona.

La región del lago cubierta por cristales de sesquicarbonato tiene 16 millas de largo y un ancho medio de $1\frac{3}{4}$ milla. El espesor de la capa de cristales es pequeño en las orillas, en el centro tiene más de 6 pies de espesor. La densidad de la capa cristalina es de 76.4 libras por pie cúbico, admitiendo una profundidad media de 5 pies en $22\frac{1}{2}$ millas cuadradas, representa una cantidad de producto bruto no menor de 107.000.000 toneladas; por lo que I. S. Coates lo considera como el mayor yacimiento del mundo. Los productos que se obtienen son de bastante pureza debido a la pequeña cantidad de otras sales que junto a los carbonatos contienen las salmueras.

Son interesantes los análisis de los distintos productos; la masa cristalina tiene una composición bastante uniforme. Se encuentran en presencia de salmuera de color pardo, aguas madres de su cristalización. (Fué analizada a 40°). La composición del agua de los manantiales nos explica a su vez la de las salmueras.

	Masa cristalina	Salmuera	Agua del manantial.
Na_2CO_3	44.58 %	24.59 %	1.227 %
NaHCO_3	35.88 "	0.31 "	1.283 "
NaCl	1.53 "	16.94 "	1.035 "
Na_2SO_4	—	0.09 "	0.038 "
KCl	—	0.09 "	0.008 "
Insoluble	1.82 "	—	—
Agua	16.32 "	—	—

Junto al lago Magadi se encuentra el Energaramai, mucho menor (5 millas cuadradas). Por ser menor su superficie de evaporación y mayor el caudal de agua que los manantiales le proporcionan (4.000 galones por minuto), no está tan concentrado. De las salmueras que llenan su lecho se separan cristales de bicarbonato sódico.

	Salmueras	Agua del manantial.
Na_2CO_3	1.615 %	0.654 %
NaHCO_3	2.193 "	1.856 "
NaCl	1.490 "	0.904 "
Na_2SO_4	0.036 "	0.030 "
KCl	0.052 "	0.014 "

La explotación del lago Magadi comenzó en 1911 en que se construyeron 93 millas de ferrocarril para poderlo unir con el puerto de Kilindini. Pero no fué hasta 1920 que la instalación estuvo completa. Está equipado para producir con la trona que se recoge hasta 8.000 toneladas mensuales de ceniza de soda, pero nunca ha estado en pleno rendimiento; en el año de 1921 no produjo más que 13.000 toneladas.

Existen en Europa algunos yacimientos alcalinos en Hungría y en la región del mar Caspio, pero son de escasa importancia. Lo mismo sucede con los de Asia que se encuentran en Siberia, Armenia, la India y China; sin embargo, en esta última hay un lago que producía hasta 200.000 toneladas anuales de carbonato sódico antes de haberse establecido el proceso Solvay. (2)

Mucho más importantes por su explotación y por estar mejor

estudiados son los yacimientos americanos que se encuentran en regiones volcánicas correspondientes a la cadena central.

En los Estados Unidos, en la región de California, existen varios depósitos de salmueras de los que los más importantes son los correspondientes a los lagos Owens y Searles. A pesar de estar próximos y tener posiblemente el mismo origen, ambos son muy diferentes.

En Owens Lake la salmuera se encuentra en forma diluída llenando el lago. Se concentra en evaporadores solares para dar una disolución concentrada que se beneficia; el método empleado para ello es el de carbonatación separando sesquicarbonato menos soluble que se recoge por filtración y se calcina para producir carbonato.

La composición de la salmuera concentrada es:

Na_2CO_3	9.0 %
NaHCO_3	1.2 "
NaCl	1.6 "
Na_2SO_4	3.0 "
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	1.0 "
KCl	1.5 "

Completamente distinto es el yacimiento de Searles Lake. (3)

Contiene una salmuera que se ha concentrado ya hasta cristalización, los cristales se encuentran impregnados de aguas madres, que son las que se explotan aquí para obtener principalmente sales de potasio y bórax, productos que no se benefician en otros yacimientos por encontrarse en concentraciones demasiado reducidas. En este caso se han concentrado por la cristalización de otros componentes. El yacimiento cubre una extensión de 11 millas cuadradas y la masa de sales con salmuera llega hasta una profundidad de 50 a 70 pies; debajo hay barro, carbonatos de calcio y magnesio y sulfato cálcico. La masa cristalina está constituida por cloruro sódico, trona, bórax, glaserita ($3\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$) y hanksita ($9\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{KCl}$). La composición de la salmuera es:

NaCl	16.50 %	Na_2S	0.020 %
Na_2SO_4	6.82 "	As_2O_3	0.019 "

KCl	4.82 "	CaO	0.0022 "
Na ₂ CO ₃	4.80 "	R ₂ O ₃	0.0020 "
Na ₂ B ₄ O ₇	1.51 "	NH ₃	0.0018 "
Na ₃ PO ₄	0.155 "	NaI	0.0014 "
NaBr	0.109 "	Sb ₂ O ₃	0.0006 "
LiCl	0.021 "		

Contiene materia orgánica que la da olor y un color ligero.

También en América del Sur se encuentran yacimientos de este tipo.

Tenemos en México abundantes yacimientos de salmueras alcalinas de muy diverso volumen y en distintos grados de concentración.

En Adahir (Sonora) junto a Punta Peñasco, a la entrada del desierto de Altar, existe un yacimiento concentrado en el que ya se ha efectuado la cristalización parcial. Existe una capa de varios pies de cristales de sesquicarbonato en barro impregnado de salmuera. El análisis de la trona y la salmuera en que se encuentra da:

	Trona bruta	Salmuera.
Na ₂ CO ₃	47.96 %	8.21 %
NaHCO ₃	28.77 "	2.66 "
NaCl	0.68 "	17.05 "
Na ₂ SO ₄	0.65 "	13.57 "
KCl	—	1.63 "
NaBr	—	0.27 "
NaBO ₂	—	0.051 "

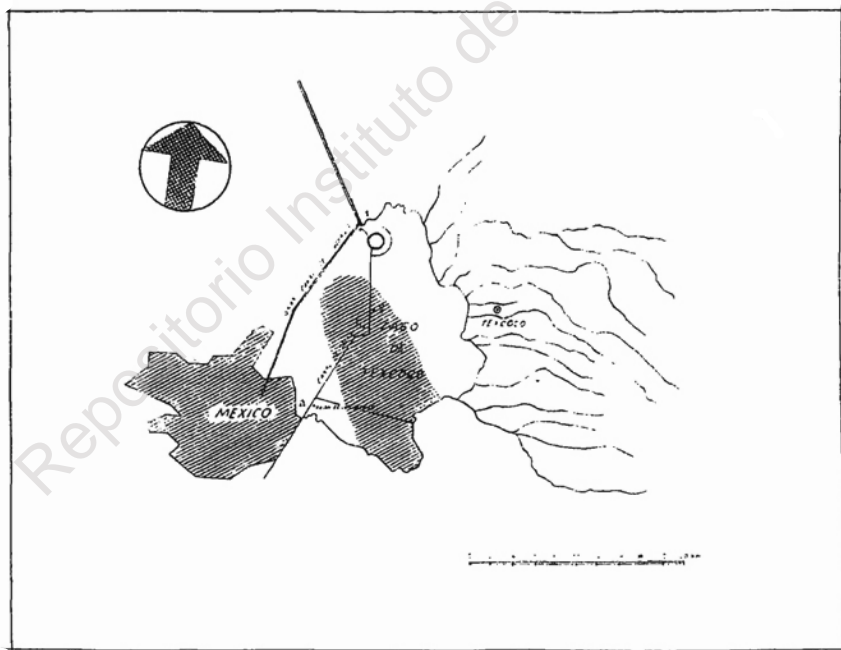
La salmuera de donde cristaliza el sesquicarbonato es muy rica en cloruros y en sulfatos; está muy cerca del punto de saturación de esta última sal, hasta el punto de que en el yacimiento se encuentran cristales grandes de sulfato sódico anhidro que se separan en la época de calor cuando la temperatura del suelo del desierto es superior a 32.4°, el punto de tránsito del sulfato hidratado al anhidro.

Los demás yacimientos mexicanos, que son muy numerosos, contienen salmueras diluidas que casi siempre están lejos del punto de cristalización. Señalaremos a continuación los análisis de algunos de ellos efectuados en este Instituto:

	Na_2CO_3	NaHCO_3	NaCl	Na_2SO_4	KCl
Llanos de S. Juárez (Puebla)	1.23	0.07	1.34	0.53	0.19
Lago de Cuitzeo (Michoacán)	0.042	0.350	0.171	0.183	—
Lago de Sayula (Jalisco)	0.235	0.098	0.163	0.039	—

De todos los yacimientos de álcalis mexicanos el que está mejor conocido es el del Lago de Texcoco. Ha sido muy estudiado en estos últimos años por el ingeniero D. Hermión Laríos. (4)

En parte del lecho del antiguo lago, que está muy reducido hoy en su superficie por el drenado que efectúa el canal de desagüe de la ciudad de México, que sale del valle por un túnel, existe una zona en que debajo de la superficie, el suelo está impregnado de una salmuera alcalina, esta zona es muy extensa y en ella se encuentran disoluciones de muy diversa concentración. La zona de concentraciones máximas ocupa una banda de unos 10 kilómetros de ancho por 20 kilómetros de largo.



En general, en esta región la salmuera se encuentra ya a 50 centímetros por debajo del suelo; si se perforan pozos en éste, se ve que la capa de aguas alcalinas alcanza una profundidad que varía entre 20 y 70 metros. En algún sitio del terreno en donde pasa un canal, se ha abierto una trinchera, brota en el fondo un manantial de salmuera que fluye de un modo constante desde hace más de 30 años con un gasto de unos 10 litros por segundo. En otros lugares del lago fluyen también continuamente pequeños manantiales de aguas salobres.

Analizando con frecuencia el agua del primero de los manantiales indicados se ha encontrado que su composición no varía. Es un agua amarilla, de olor a sulfhídrico; salen en el manantial una cierta cantidad de burbujas de gases que están constituidos en su mayor parte por metano. Su composición química es:

NaCl	0.925	%	SiO ₂	0.007	%
Na ₂ CO ₃	0.580	"	MgCl ₂	0.0033	"
NaHCO ₃	0.456	"	R ₂ O ₃	0.002	"
KCl	0.084	"	N (amoniacal)	0.002	"
NaBO ₂	0.019	"			
Na ₂ SO ₄	0.017	"	As ₂ O ₅	0.00015	"
Na ₃ PO ₄	0.0085	"			

Se encuentra la salmuera impregnando un barro muy poco permeable constituido en su mayor parte por bentonita, en el que se ven también trozos de vidrios volcánicos. En la región más explorada, aparece en los pozos debajo de esta capa de barro otra de arena constituida por cantos rodados muy pequeños, entre los que se encuentran algunos fósiles. El espesor de esta capa de arena varía de unos lugares a otros desde algunos centímetros hasta 2 metros. Debajo de la capa de arena y antes de llegar a una impermeable inferior, se encuentran trozos de carbonato cálcico de forma rugosa semejante al que constituye las estalactitas. Viene después una capa impermeable de mayor o menor espesor que está constituida por bentonita muy comprimida, y si se sigue perforando se encuentra a una profundidad de 60-100 metros, agua dulce que sube a la superficie con presión artesiana; esta agua fluye por una capa de arena de cantos rodados con todo el aspecto de arena de río.

Seguramente el Valle de México, hoy cerrado, fué un valle abierto que vertía al Pacífico. La erupción de la sierra del Ajusco lo cerró. Las erupciones posteriores del Popocatepetl y otros volcanes del valle lo llenaron de cenizas; son estas cenizas las que en contacto con las aguas alcalinas se han transformado dando bentonita; reposan posiblemente sobre lo que fué fondo del antiguo valle abierto, que es el que proporciona las capas de arena.

Las salmueras se encuentran formando un bolsón que tiene cierta presión hidráulica por el agua procedente de las laderas que se introducen en él y por la aportación de nuevas cantidades de salmueras. Están, naturalmente, más concentradas en el centro del bolsón que en los bordes por donde reciben agua dulce. La circulación a través de la bentonita es lentísima, pero no lo es tanto a través de las capas de arena que se encuentran debajo de ella.

La presencia en el subsuelo de estas salmueras alcalinas da lugar a una serie de fenómenos químicos curiosos. El agua sube por capilaridad a la superficie, en donde cristaliza el soluto por evaporación. En los días fríos se separa de ella el carbonato sódico en forma de decahidrato produciendo costras cristalinas.

Desde antes de la Conquista de México han utilizado este fenómeno los indios para obtener un producto alcalino que conocen con el nombre de tequesquite y es equivalente a la trona egipcia o al urao de Centroamérica. Para obtenerlo en cantidad preparan el suelo y lo riegan con agua dulce para establecer comunicación capilar con la salmuera, al subir ésta deja cristalizar de preferencia el carbonato sódico. Esta industria se lleva a cabo en toda la República y es muy curioso ver cómo es más rico en carbonato el tequesquite que las salmueras que lo engendran.

	Alc. total en Na_2CO_3	NaCl	NaCl Alcalinidad
Tequesquite de Texcoco	25.11 %	37.59 %	1.46
Salmuera	0.86 "	0.97 "	1.13
Tesquesquite de Texcoco	19.5 "	31.4 "	1.61
Salmuera	1.02 "	1.30 "	1.27
Tequesquite de Cuitzeo	8.16 %	3.58 %	0.44
Salmuera	0.12 "	0.072 "	0.61

Tequesquite de S. Juán	34.9	"	11.4	"	0.33
Salmuera	1.31	"	1.34	"	1.02

Los cristales de decahidrato de carbonato sódico que se producen en la superficie efloran cuando los calienta el sol y producen un polvo muy rico en carbonatos que arrastra con facilidad el viento produciendo polvaredas blancas.

	Na_2CO_3	NaHCO_3	NaCl	Na_2SO_4
Polvo de Llanos de S. Juán	51.2	6.7	5.5	0.36
Polvo del lago de Texcoco	50.1	2.3	11.38	1.5

Al cristalizar este carbonato separan sus cristales las partículas de barro; al perder su forma por eflorescencia y secarse quedan estas partículas sueltas constituyendo un polvo muy fino que es el que forma las tolvaneras que cubren a veces la ciudad de México.

Como hemos advertido anteriormente, la concentración de las salmueras cambia en las distintas regiones del lago, las más concentradas que hemos obtenido hasta ahora tienen la siguiente composición:

NaCl	6.28	%	Na_2SO_4	0.09	%
Na_2CO_3	5.94	"	SiO_2	0.04	"
NaHCO_3	2.2	"	Na_3PO_4	0.05	"
KCl	0.5	"	MgCl_2	0.02	"
NaBO_2	0.12	"	R_2O_3	0.01	"
NaNO_3	0.05	"	As_2O_3	0.001	"
NH_3	0.0014	"			

El agua sale acompañada por gases, constituídos casi totalmente por metano. Tiene color y materia orgánica constituida por ácidos húmicos. Valorada esta materia orgánica por oxidación por permanganato a la ebullición en medio alcalino, equivale a 0.29% de ácido oxálico.

La producción de metano y la existencia de ácidos húmicos se explica por la presencia de turba en el subsuelo; al perforar los pozos se atraviesa una capa más o menos importante de turba (desde algunos centímetros a decímetros). Esta turba es la que da a la sal-

muera alcalina los ácidos húmicos. E. Berl ha conseguido acelerar el proceso de transformación de la celulosa en carbón calentándola a presión con líquidos alcalinos, la producción de carbón va acompañada de desprendimiento de metano. De un modo análogo, las aguas alcalinas acelerarán la transformación en carbón de la turba del subsuelo, engendrando el metano que se ve desprenderse.

Entre la salmuera que da este pozo que se encuentra próximo a la zona de máxima concentración y el manantial brotante cerca del borde del bolsón de salmuera que hemos citado antes, hay toda una graduación de concentraciones; así si nos alejamos un kilómetro hacia el borde desde el pozo anteriormente citado, encontramos en otro pozo (g.) la siguiente salmuera, determinando solamente las sales más importantes:

NaCl	2.8	%
Na ₂ CO ₃	2.5	"
NaHCO ₃	0.7	"
Na ₂ SO ₄	0.41	"
NaBO ₂	0.53	"

La presencia del bolsón de salmueras en el subsuelo ha hecho que no se pudiera utilizar para la agricultura una parte importante de las tierras del fondo del antiguo lago de Texcoco ganadas cuando se desecó el lago por el canal de desagüe. El Gobierno ha tratado de lavarlas por percolación superficial con agua dulce. Este lavado se logra sobre todo en la región en que la concentración de la salmuera subterránea no es elevada, y aun en estos casos tiene que repetirse periódicamente, puesto que la salmuera asciende de nuevo por capilaridad. El lavado de estas tierras tiene por objeto, además de ganarlas para la agricultura, el evitar las tolveneras en la ciudad de México.

Las aguas cargadas de sales procedentes de este lavado de tierras no pueden ser vertidas al canal de desagüe porque salarian las tierras del Valle del Mezquital, que se riegan con sus aguas. Para deshacerse de ellas, aprovechando al mismo tiempo las sales que llean disueltas, las Obras del Valle de México han construido un enorme evaporador solar (800 ha.) en el que se concentran hasta punto de cristalización; pasando después a una fábrica en que se industrializan las diversas sales.

En este evaporador, constituido por diversos compartimentos en los que la concentración va aumentando, hemos tenido ocasión de hacer una serie de observaciones que pueden ser interesantes para el estudio del yacimiento de salmuera.

Por la prolongada exposición al aire el bicarbonato se va descomponiendo dando carbonato sódico; el fenómeno se ve claramente cuando se compara la composición del agua que entra en el evaporador con la ya concentrada.

	Entrada	Agua concentrada
Alcalinidad total expresada en Na_2CO_3	0.34 %	7.02 %
Na_2CO_3	0.21 "	5.92 "
NaHCO_3	0.25 "	1.73 "
NaCl	0.39 "	11.25 "
$\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$	0.84 "	3.41 "
$\text{NaCl}/\text{Alcalinidad total}$	1.15 "	1.61 "

Hemos estudiado con detalle la marcha de esta reacción (5), viendo con qué velocidad se produce.

Se explica así porqué no puede cristalizar el sesquicarbonato más que en aquellas aguas en que como en el lago Magadi o en Adahir la evaporación es muy rápida. En algunos casos como en el lago Energaramai cristaliza incluso el bicarbonato sódico. En los demás casos la mayor parte del bicarbonato se descompone durante la evaporación, y lo que cristaliza es principalmente carbonato sódico. Por eso no es cierto que ni la trona egipcia, ni nuestro tequesquite, ni el urao contengan el carbonato sódico en forma de sesquicarbonato; la cantidad de bicarbonato que contienen es mucho menor que la correspondiente a esta sal. (6)

Otro fenómeno químico interesante es la adsorción selectiva del carbonato sódico por los componentes del suelo. Si se compara la relación de cloruro sódico a la alcalinidad total entre el agua que entra en el evaporador solar y la que está ya concentrada, vemos cómo desaparece por adsorción carbonato sódico.

Esta desaparición de carbonato por adsorción se hace aún mucho más patente cuando en uno de estos tanques de evaporación con

fondo de tierra se llega a producir la cristalización. Al añadir de nuevo en él aguas diluidas, se disuelve el cloruro sódico, pero apenas se disuelve el carbonato que queda retenido por tierra. Resulta curioso el observar estos fenómenos de separación del cloruro y el carbonato sódico; mientras que en la formación del tequesquite es el carbonato el que sube a la superficie sumiéndose el cloruro, en el caso de tanques con fondo de tierra, o lago, es el carbonato el retenido y el cloruro el que permanece en el agua superficial.

Algo análogo se observa si se compara la relación anterior en la salmuera del centro del yacimiento con la de los bordes, cuando más diluida está mayor es la proporción relativa de cloruro sódico.

	Pozo H	Pozo g	Pozo brotante	Pozo en el borde
NaCl	6.28	2.8	0.92	0.25 %
Alcalinidad total expresada en Na ₂ CO ₃	7.3	2.7	0.80	0.15 "
NaCl/Alcalinidad total	0.86	1.03	1.15	1.67 "

Así se ve en otros yacimientos de salmueras alcalinas como en el lago de Sayula, que mientras en el centro se explota tequesquite, en las orillas benefician los indios cloruro sódico extrayendo con agua la tierra llena de cristales de esta sal y evaporando al sol la disolución obtenida.

Se nota bien en Sayula la diferencia en la composición de la salmuera entre el centro y el borde del yacimiento.

	Salmuera central.	Salmuera del borde.
Na ₂ CO ₃ total	0.297 %	0.196 %
NaCl	0.163 "	0.24 "
Na ₂ SO ₄	0.039 "	0.42 "
NaCl/Na ₂ CO ₃ total	0.55 "	1.22 "

En el lago de Texcoco se ha explotado el cloruro sódico. Se ven aún en la orilla occidental ruinas de salinas en las que la sal se obtenía también por extracción de la tierra del borde en la que había cristalizado. Hay que tener en cuenta que cuando el lago estaba lleno, la relación de cloruro sódico a carbonato total era muy dife-

rente de la actual. La poca salmuera que del depósito pasaba al lago sufría la acción adsorbente del suelo que retenía de preferencia el carbonato acumulándose el cloruro en el agua del lago. Al bajar el nivel del agua del lago se ha quitado contrapresión a la capa de salmuera que puede pasar a él con más facilidad, sumándose además la salmuera que por los drenajes de las tierras se vierte al lago.

Si se compara un análisis de Río de la Loza (7) hecho en 1860 con los actuales, se ve de un modo claro la diferencia.

	Análisis de Río de la Loza	Análisis actual	Agua de lava- do de tierras
Na_2CO_3 total	0.170 %	0.326 %	0.302 %
NaCl	1.254 "	0.493 "	0.364 "
NaCl/ Na_2CO_3 total	7.35 "	1.51 "	1.21 "

Puede verse también que aun ahora la relación de cloruros a carbonatos en el lago es mayor que en el agua de lavado de tierras.

Se ha señalado muchas veces (3) que el agua de los ríos trae al mar una cantidad casi tan grande de carbonato sódico como de cloruro, pero esta primera sal va siendo adsorbida por las arcillas y solamente el cloruro queda en el mar. En los bolsones alcalinos se encuentra cloruro sódico con carbonato, en los domos salinos el cloruro sódico está puro.

La presencia en el agua de fosfatos, nitratos y sales de potasa la pone en excelentes condiciones para que en ella se desarrolle la vida con abundancia. Este desarrollo produce en el evaporador solar una serie de fenómenos bioquímicos que nos han interesado.

Hace en primer lugar aumentar de un modo notable la cantidad de materia orgánica. Si comparamos las cantidades de materia orgánica en la salmuera de los pozos con el agua concentrada del evaporador; determinándolas en ambos casos por oxidación con permanganato en medio alcalino, se ve que en la primera hay 0.29% (expresada en ácido oxálico), mientras que en la segunda se encuentra 1.01%. Como la concentración ha aumentado de 7.2 a 11.0 gr. de carbonato por ciento, la cantidad de materia orgánica lo ha hecho en un 250%. Quedan en el agua concentrada los ácidos húmicos procedentes del yacimiento.

ORIGEN DE LAS SALMUERAS ALCALINAS

Uno de los problemas que más nos han preocupado es el del origen de estas salmueras alcalinas.

Se han admitido toda clase de hipótesis para explicar el origen de este y otros yacimientos análogos.

En algunos casos se admite, como G. Ross Robertson (9) para los depósitos de California que proceden de un mar desecado, sin tener en cuenta que en el agua del mar la cantidad de carbonato con relación al cloruro sódico es muy pequeña. La primera de estas sales es adsorbida por la tierra antes de llegar al mar y se adsorbería mucho más durante el proceso de desecación.

Lo más sencillo sería admitir que los carbonatos proceden del lavado de las rocas que constituyen la cuenca cerrada y se acumularían en el lago que constituye el fondo. Río de la Loza (7) llegó a suponer que pudieran proceder del jabón que usaban los habitantes de la ciudad de México, además de los excrementos de los animales que vivían en el Valle.

Tampoco esta hipótesis se puede defender; se ven dentro de una misma cuenca cerrada, recibiendo las mismas aguas de las laderas lagos de agua dulce y de agua salada próximos.

En los llanos de S. Juan, junto al lago de agua salada que se encuentra sobre el bolsón de salmueras y separado solamente de él por unas colinas de poca importancia, se encuentra una laguna de agua dulce que recoge la que viene de las mismas pendientes que la del lago anterior.

En el Valle de México, junto al lago de Texcoco, que está sobre las salmueras y tiene agua salada, hay otros como Xochimilco, Chalco y Xaltocan, con agua dulce.

Dice ya Solís (cronista de las Indias) con muy buen espíritu de observación en su Conquista de Nueva España publicada en 1684: "Existía en el fondo del valle de México un pequeño mar de treinta leguas de circunferencia, constituido por dos lagos principales; los dos lagos que lo formaban, se unían y comunicaban entre sí por un dique de piedra que los dividía, reservando algunas aberturas con puentes de madera, en cuyos lados tenían sus compuertas levadizas

para cebar el lago inferior siempre que necesitaban de socorrer la mengua del uno con la redundancia del otro. Era el más alto de agua dulce y clara, donde se hallaban algunos pescados de agradable mantenimiento; y el otro de agua salobre y oscura, semejante a la marítima; no porque fuesen de otra calidad las vertientes de que se alimentaba, sino por vicio natural de la misma tierra donde se detenían, gruesa y salitrosa por aquel paraje, pero de grande utilidad para la fábrica de la sal, que beneficiaban cerca de su orilla, purificando al sol y adelgazando por el fuego las espumas y superfluidades que despedía la resaca."

Existe además otro argumento contra la admisión de esta hipótesis: si las sales procedieran de la superficie del lago y se hubiera cambios de composición entre el agua del manantial y la salmuera se pudiera encontrar una cantidad mayor de carbonatos que en el agua del lago.

Nosotros suponemos que el origen de estas salmueras hay que buscarlo en agua vertida por manantiales.

Lunge (10), al hablar de la trona de Egipto, dice: "Los lagos de trona están alimentados por una infinidad de pequeños manantiales cuyas aguas no señalan nunca más de 1° - $1,5$ Bé, mientras que el agua del lago señala 28° - 30° ."

Hemos indicado cómo en el lago Magadi el yacimiento de trona cristalizada está alimentado por manantiales de agua alcalina. Los cambios de composición entre el agua del manantial y la salmuera se pueden explicar por la concentración y la separación por cristalización de alguno de los componentes.

Este fenómeno lo hemos podido estudiar de un modo casi experimental en una pequeña laguna que se encuentra sobre el pueblo de Yuriria (Guanajuato) y se conoce con el nombre de la Joya. Se encuentra esta pequeña laguna circular, que tendrá un diámetro de unos 500 metros, ocupando una concavidad cerrada que tiene el aspecto de un cráter de volcan. Su agua es de reacción alcalina. Está alimentada por un manantial de agua bicarbonatada, que mana con exceso de gas carbónico, su agua tiene reacción ácida. Al evaporarse en la laguna, al mismo tiempo que se concentra, se descompone el bicarbonato dando carbonato; el agua de la laguna tiene reacción al-

calina. Resulta interesante la comparación de los análisis de ambas aguas.

	NaHCO ₃	Na ₂ CO ₃	NaCl	Na ₂ SO ₄
Manantial	0.31	0	0.034	0.012 gr. p. litro
Laguna	2.93	3.70	0.83	0.61 " " "

Hemos buscado el origen de las salmueras alcalinas del yacimiento del Valle de México. No existen aquí manantiales de aguas exclusivamente bicarbonatado sódicas como el de la Joya, ni aguas con carbonato y bicarbonato sódicos como las de los manantiales del lago Magadi.

Se pudiera admitir como su origen el agua que, saturada de carbónico y con presión artesiana, se encuentra debajo de la capa impermeable que constituye el fondo de las salmueras a una profundidad que oscila entre 60 y 100 metros. Esta agua, que mana con una temperatura constante de 26° y un pH de 6.42, tiene la siguiente composición en partes por millón:

HCO ₃	242	SO ₄	12
Na	115	K	6.6
CO ₂ libre	99	BO ₂	2.9
SiO ₂	73	As ₂ O ₃	0.013
Cl	37	Li	contiene
Ca	17	Br	0
Mg	16		

Si se admite que debido a su presión artesiana se introduce a través de las fisuras que pueda haber en la capa impermeable y pasa a la zona de las salmueras, se podrá evaporar y concentrar subiendo por capilaridad a la superficie. Durante esta evaporación se perderá ácido carbónico pasando a carbonatos los bicarbonatos y precipitarán los iones de calcio y de magnesio.

Sin embargo, hay varios motivos que nos hacen desechar esta idea: Esta agua carece de bromo en cantidad apreciable, que se encuentra en la salmuera. Las relaciones entre los componentes fundamentales son muy diferentes en ambas aguas; por ejemplo, tiene esta

agua profunda muchos más sulfatos con relación a los cloruros que no la salmuera.

Existe casi en uno de los extremos del antiguo lago, junto a la ciudad de México, un cerro formado por una masa intrusiva de lava, el Peñón de los Baños. En sus bordes fluyen en abundancia varios manantiales termales de aguas bicarbonatadas con mucho gas carbónico. Algunos de estos manantiales se han explotado; unos como baños termales, otros para aprovechar su gas carbónico para usos industriales. Analizando el agua de uno de estos manantiales, que brota a 43° saturado de carbónico, se encuentra en partes por millón:

HCO ₃	1.650	K	79
Cl	748	BO ₂	72
Na	705	SO ₄	20
Ca	235	Br	9.0
SiO ₂	165	Li	1.5
Mg	135		

Esta agua sí es más probable que sea la que haya engendrado la salmuera. Al evaporarse habrá perdido carbónico precipitando calcio y magnesio. Se puede calcular la composición de la salmuera que daría si se concentra el agua hasta tener una concentración en cloruros como la salmuera (tomaremos como tipo la del pozo brotante).

Partes por Millón	Salmuera actual	Salmuera teórica procedente de los manantiales del Peñón de los Baños	Salmuera teórica procedente del agua artesiada
Na	6.603	5.300	17.500
Cl	5.620	5.620	5.620
CO ₃ total	4.545	3.480	13.120
K	439	595	1.000
BO ₂	125	540	440
SO ₄	117	150	1.820
SiO	74	1.240	11.100
Li	0	11	contiene
Br	25	67	0.000

Puede apreciarse lo bien que se adapta la composición de la salmuera a lo que en teoría debiera de ser si procediera del agua de los manantiales del Peñón de los Baños.

Hay una disminución importante en la cantidad de sílice; durante la concentración, este componente precipita en parte, y probablemente su precipitación arrastra todo el litio. Una buena parte de la sílice será arrastrada por el carbonato de magnesio en su precipitación. Actualmente el método más eficaz para eliminar la sílice del agua de alimentación de calderas consiste en un tratamiento por magnesia.

En la perforación de pozos se encuentra con frecuencia nódulos de sílice amorfa de aspecto de ópalo.

Unos iones han sido más adsorbidos que otros, falta potasio y bromo por este motivo. La disminución en los sulfatos se puede explicar por adsorción y por la pequeña cantidad que se reduce a sulfuros y se pierde en forma de sulfhídrico.

Se puede admitir que la salmuera procede en su mayor parte del agua de los manantiales del Peñón, sin excluir que pueda entrar también en el manto una pequeña cantidad de agua artesiana.

El agua de estos manantiales, que ha estado manando desde hace muchos siglos, se sume en la tierra hasta la capa impermeable. Se va concentrando en la superficie a donde sube por capilaridad; pierde carbónico y precipita carbonato de calcio y de magnesio. En la perforación de los pozos se encuentra siempre antes de llegar a la capa impermeable trozos de carbonato cálcico en forma de placas rugosas semejantes a estalactitas. El análisis de una muestra da:

CaCO_3	87 %
MgCO_3	6.9 "
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	1.2 "
Insoluble en HCl	5.0 "

Una cantidad pequeña del ion magnesio queda disuelto en la salmuera a favor del amoníaco que contiene.

Si el bolsón de salmuera se produce a expensa del agua de estos manantiales, es natural que vaya siendo más concentrada conforme se va alejando de su origen, llegue a un máximo y luego se vaya

diluyendo conforme se llega a la región en la que se diluye por el agua dulce que viene de las laderas. Es en realidad lo que sucede, la zona de máximo de concentración se encuentra equidistante del Peñón de los Baños.

En resumen, consideramos que las sales del depósito del Valle de México no proceden del agua que corre por las laderas, sino que su origen hay que buscarlo en el agua de los manantiales termales que brotan en el Peñón de los Baños. Esta agua se ha concentrado por evaporación, y esta concentración va acompañada por una serie de alteraciones en la composición química.

Naturalmente que en última instancia esto no excluye que el origen de las sales esté en las rocas que constituyen la cuenca. Refiriéndose al lago Magadi dice I. S. Coates (1): "El agua superficial penetra por las grietas de las rocas llegando a capas profundas. En el valle de Rift las rocas volcánicas son de formación relativamente reciente y las últimas fases de la actividad volcánica se manifiesta en el desprendimiento de gas carbónico, que disolviéndose en el agua, hace que ésta pueda atacar a las rocas produciendo carbonato sódico, que queda disuelto en ella.

Finalmente estas aguas se ponen en contacto con lavas aún calientes y vuelven a la superficie en forma de manantiales termales."

Todo esto sería aplicable al yacimiento de Texcoco.

Es decir, se admite que las sales disueltas de las rocas entran a formar parte del depósito en un solo punto, en donde brota el manantial, en lugar de venir por todas las laderas; esto explica que en una misma cuenca cerrada puedan existir juntos dos lagos, uno de agua dulce y otro de agua salada, según que sea en uno o en el otro en el que brote el manantial.

BIBLIOGRAFIA

- (1) The Soda Deposits of lake Magadi in Kenya. I. S. Coates. Bulletin of the Imperial Institute. V. 21, p. 431-444, (1923).
- (2) Te-Pang Hou, The manufacture of soda. Reinhold Publishing Corp. New York, 1942.

- (3) Teeple E. I. The Industrial development of Searles lake brines. Reinhold Publishing Corp. New York, 1929.
- (4) Alice R. Gerstel—Development in lake Texcoco—Chemical News 20 p. 1300 (1942).
- (5) Orozco F. y Madinaveitia A. Estudio químico de los lagos alcalinos: Origen del carbonato sódico. Boletín del Instituto de Biología, 1941, p. 429.
- (6) Mancera O. Carbonato sódico natural. Tesis de la Escuela de Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de México, (1943).
- (7) Río de la Loza. El Origen del tequesquite en el lago de Texcoco. Un vistazo al lago de Texcoco.
- (8) Walter P. Sodium carbonate of the Magadi lake. Am. Mineralogist, 7, p. 86 (1922).
- (9) Robertson G. R. California Desert Soda. Ind. Eng. Chem. 1931, p. 479.
- (10) Lunge G. Fabrication de la Soude II, p. 293.

SUMMARY

We have studied the under ground deposit of brines located at the bottom of the closed Valley of Mexico, comparing it with others similar existing in the Republic and other countries. This deposit is of great interest because it may be used as raw material for the alkali industry of this country.

Its constitution and distribution has been studied taking into consideration the alterations suffered by its brines for the action of the atmospherical agents and the land.

The origin of this alkali bed and others similar referres to thermal springs, which waters, by flowing in closed valley, where the evaporation is intense, concentrate suffering, at the same time, several changes in its chemical composition.