APUNTES PARA LA INTERPRETACION GEOQUIMICA
DE LOS ANALISIS DE AGUAS*

LUIS BLÁSQUEZ L., M.S.G.M.**

CONTENIDO

	Págs.
Introducción	22
Valores de reacción	22
La expresión del equilibrio químico	26
La Salinidad	28
Representación y caracterización química de las aguas	31
Potables	37
Endoterápicas o de mesa	37
Crenoterápicas o para uso exclusivo de balnearios	37
Aterápicas	37
Aguas telúricas	37
Aguas subminerales	37
Aguas minerales	37
Clasificación médica	38
Clasificación geológica	38
Interpretación geoquímica	38
Bibliografía	50

* Conferencia sustentada en la Sociedad Geológica Mexicana el 10 de octubre de 1941.

** Geólogo del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

INTRODUCCION

A medida que se iba obteniendo mayor acopio de análisis de aguas en la oficina de Hidrología del Instituto de Geología, se sentía más imperiosamente la necesidad de tener un medio de comparación apropiado para el agrupamiento de esos análisis, en tal forma, que las aguas de una misma provincia geológica quedaran comprendidas en la misma división, siempre que tuvieran un origen semejante y circularan superficial o subterráneamente a través de las mismas formaciones, siendo evidente su identidad, una vez dado este paso, agrupadas ya las aguas de una o varias provincias, había que adoptar fórmulas comparativas que autorizaran, hasta cierto punto, a presumir por la sola expresión química característica, la identidad de origen, circulación, etc., de aguas que respondieran tanto a esas mismas fórmulas, como en cada caso a las series de fórmulas características.

El objetivo principal debía consistir en poder determinar las formaciones atravesadas o recorridas por las aguas, desde su origen hasta el lugar donde se obtuviera la muestra, suministrando así un medio al hidrólogo para poder determinar la circulación del agua subterránea y la localización, en muchos casos, de las formaciones de que procedieran las aguas, con cuya ayuda pudiera al menos inferirse en casos especiales, si las aguas eran de circulación poco profunda, cuando no pudieran obtenerse datos de temperaturas fehacientes, etc.

Para el logro de este propósito me he inspirado en Chase Palmer, cuyas ideas sobre la expresión del equilibrio químico me han servido de base.

VALORES DE REACCION

El primer paso para lograr la medida unitaria de todos los compuestos minerales de las aguas, es la expresión de su valor en miligramos de hidrógeno en tal cantidad que, representen su valor de reacción correspondiente. Este medio fué recomendado por prominentes químicos alemanes muchos años antes que Stabler lo empleara.

El valor de reacción o capacidad de reacción de un radical, es igual al cociente que resulta de dividir el peso físico del radical entre su equivalente de combinación, por ejemplo: 300 miligramos de sodio tienen por capacidad de reacción 13.04 miligramos que resultan de dividir ese peso entre 23.00.

Es mejor determinar el cociente de división de la unidad entre el

equivalente químico, obteniéndose así el coeficiente de reacción del radical que deberá multiplicarse por el peso físico en cada caso. El coeficiente de reacción del sodio es 0.0435, aproximadamente.

Como la capacidad de reacción de un miligramo de hidrógeno es sensiblemente la unidad (0.99206) igual a la capacidad de reacción de ocho partes de oxígeno y como el coeficiente de reacción de un radical es igual

TABLA 1.—RADICALES NEGATIVOS (ACIDOS)

Acidos fuertes		Peso atómico	Valencia	Coeficiente de reacción
Cl	Cloruros	35.46	1	0.0282
SO ₄	Sulfatos	96.06	2	.0208
NO ₃	Nitratos	62.01	1	.0161
Br	Bromuros	79.92	1	.0125
Y	Yoduros	126.92	1	.0079
S ₂ O ₃	Tiosulfatos (1)	112.00	2	.0178
CO ₃	Carbonatos	60.00	2	0.0333
SO ₃	Sulfitos	80.06	2	.0250
PO ₄	Fosfatos	95.04	3	.0316
HPO ₄	Bifosfórico	96.04	3	0.0206
ASO ₄	Arseniatos	138.96	3	.0216
B ₄ O ₇	Boratos	156.00	2	.0128
HB0 ₂	Metaboratos (2)	43.00	1	0.0226
F	Fluoruros (3)	19.00	1	.0526
S	Sulfuros	32.06	2	.0624
HCO ₂	Bicarbonatos	61.01	1	.0164
SiO ₃	Silicatos (1)	76.30	2	.0262
OH	Hidróxidos (2)	17.00	1	.0588
HSO ₄	Bisulfúrico	97.06	1	0.0103
Gases				
CO ₂	Bióxido de carbono en solución	44.00		0.0227
H ₂ S	Hidrógeno sulfurado en solución	34.00		.0293
H	Hidrógeno	1.008	1	

(1) Puede clasificarse como ácido débil o fuerte.

(2) Más comúnmente como óxido coloidal.

(3) Puede clasificarse como ácido débil o fuerte.

TABLA 2.—RADICALES POSITIVOS (BASES)

Alcalis		Peso atómico	Valencia	Coefficiente de reacción
Na	Sodio	23.00	1	0.0435
K	Potasio	39.096	1	.0256
Li	Litio	6.940	1	.1441
NH ₄	Amonio	18.040	1	.0554
Rb	Rubidio	85.450	1	.0117
Cs	Cesio	132.810	1	.0075
Tierras alcalinas				
Ca	Calcio	40.07	2	0.0499
Mg	Magnesio	24.32	2	.0822
Sr	Estroncio	87.63	2	.0228
Ba	Bario	137.37	2	.0146
Hidrógeno y Metales				
Fe	Fierro (1).....	55.84...	2	0.0358.....
Fe	Fierro			.0537.....
Al	Aluminio (1) ..	26.97...	3	.1107.....
Mn	Manganeso	54.93...	2	.0364.....
Co	Cobalto	58.94...	2	0.0339.....
Cu	Cobre	63.57...	2	0.0315.....
Zn	Zinc	65.38...	2	0.0306.....
Pb	Plomo	207.20...	2	0.0096.....
Cd	Cadmio	112.41...	2	0.0178.....
Ni	Níquel	58.69...	2	0.0341.....
Mn	Manganeso	54.93...	3	0.0546.....

(1) Más comúnmente como óxido coloidal.

al cociente que resulta de dividir la capacidad de reacción de 8 partes de oxígeno, entre el equivalente de combinación del radical, se estima que la capacidad de reacción enunciada de esa manera, representa el número de miligramos de hidrógeno equivalentes, obteniéndose así una medida común para todos los radicales, y en todo caso cifras químicamente comparables..

COEFICIENTES DE REACCIÓN DE LOS SIGUIENTES COMPUESTOS

NaCl	Cloruro de sodio	0.01712
Na ₂ SO ₄	Sulfato de sodio	0.01409
Na ₂ S	Sulfuro de sodio	0.02560
NaNO ₃	Nitrato de sodio	0.01175
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sodio	0.01887
Na ₃ PO ₄	Fosfato de sodio	0.01831
NaHCO ₃	Bicarbonato de sodio	0.01190
NaBO ₂	Borato de sodio	0.01518
NaOH	Hidróxido de sodio	0.02500
Na ₂ O	Sosa	0.03230
Na ₂ O ₅	Pentaóxido de sodio	0.01589
NaC ₂₄ H ₁₂ O ₁₂	Apocrenato de sodio	0.001936
Na ₂ SiO ₃	Silicato de sodio	0.01637
Na ₂ B ₄ O ₇	Tetraborato de sodio	0.00988
KCl	Cloruro de potasio	0.01342
K ₂ SO ₄	Sulfato de potasio	0.01149
K ₂ S	Sulfuro de potasio	0.01818
KNO ₃	Nitrato de potasio	0.00988
K ₂ CO ₃	Carbonato de potasio	0.01447
KHCO ₃	Bicarbonato de potasio	0.00998
K ₃ PO ₄	Fosfato de potasio	0.1414
KBO ₂	Borato de potasio	0.01215
KOH	Hidróxido de potasio	0.01786
K ₂ O	Potasa	0.02123
K ₂ SiO ₃	Silicato de potasio	0.01293
LiCl	Cloruro de litio	0.02358
LiHCO ₃	Bicarbonato de litio	0.01470
Li ₂ O	Litina	0.06700
CaCl ₂	Cloruro de calcio	0.01830
CaSO ₄	Sulfato de calcio	0.01470
CaS	Sulfuro de calcio	0.02775
Ca(NO ₃) ₂	Nitrato de calcio	0.01216
CaCO ₃	Carbonato de calcio	0.02001
Ca(HCO ₃) ₂	Bicarbonato de calcio	0.01234

$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	Fosfato de calcio	0.01925
$\text{Ca}(\text{BO}_2)_2$	Borato de calcio	0.01588
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de calcio	0.02700
CaO	Cal	0.03570
CaSiO_3	Silicato de calcio	0.01720
MgCl_2	Cloruro de magnesio	0.02100
MgSO_4	Sulfato de magnesio	0.01661
MgS	Sulfuro de magnesio	0.03550
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	Nitrato de magnesio	0.01348
MgCO_3	Carbonato de magnesio	0.02380
$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	Bicarbonato de magnesio	0.01367
$\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$	Fosfato de magnesio	0.02279
$\text{Mg}(\text{BO}_2)_2$	Borato de magnesio	0.01810
$\text{Mg}(\text{OH})_2$	Hidróxido de magnesio	0.03430
MgO	Magnesia	0.04960
MgSiO_3	Silicato de magnesia	0.01983
FeCl_2	Cloruro de fierro	0.01580
FeSO_4	Sulfato de fierro	0.08060
FeS	Sulfuro de fierro	0.02280
$\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$	Nitrato de fierro	0.01112
FeCO_3	Carbonato de fierro	0.01725
$\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$	Bicarbonato de fierro	0.01126
$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$	Fosfato de fierro	0.01680
$\text{Fe}(\text{BO}_2)_2$	Borato de fierro	0.01410
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	Hidróxido de fierro	0.02224
FeO	Oxido de fierro (óxido ferroso)	0.02782
Fe_2O_3	Sexquióxido de fierro (óxido férrico)	0.02505

LA EXPRESION DEL EQUILIBRIO QUIMICO

El resultado de un análisis de aguas expresado en capacidades de reacción, es una caracterización química que demanda otros pasos para obtener una base de comparación general simple, pues si se toman en cuenta todos los radicales y las muchas partidas con sus variaciones, la comparación es embarazosa. Como medio principal de comparación, se

atiende a la forma en que ocurre el equilibrio químico y todas las consideraciones van a tener ese principio.

Hay que hacer notar que este medio es incompleto, pues sólo atiende a las materias disueltas y para caracterizar un agua hay que tener también en cuenta en todos los casos las materias coloides; en muchos otros a las materias en suspensión y no en pocos a los gases libres.

Chase Palmer propone según los valores de los grupos de radicales, la división de las aguas en cinco clases como sigue:

Clase I.—Valor de los ácidos fuertes menor que el valor de los álcalis.

Clase II.—Valor de los ácidos igual que el de los álcalis.

Clase III.—Valor de los ácidos fuertes mayor que el de los álcalis, pero menor que el de éstos más el valor de las tierras alcalinas.

Clase IV.—Valor de los ácidos fuertes igual al de los álcalis más las tierras alcalinas.

Clase V.—Valor de los ácidos fuertes mayor que el de los álcalis más las tierras alcalinas.

Es evidente que en esta clasificación por balance, se atiende principalmente a los ácidos fuertes, en seguida a los álcalis y de manera secundaria a las tierras alcalinas, las que podrían equilibrarse con ácidos fuertes o con ácidos débiles, implícitamente considerados. El valor de esta clasificación por balance depende del hecho de que una solución en la cual los ácidos fuertes están equilibrados exactamente con bases fuertes, es relativamente inerte, mientras que una en la cual cada grupo exceda al otro, es relativamente activa. En este orden debe colocarse primero la clase V como la más activa y la II como la menos. En orden descendente de actividad tenemos las clases V, IV, III, I y II.

En la teoría de desplazamientos, interviene como factor principal la fuerza electromotriz, por esto la siguiente tabla, está formada por elementos principales, arreglados de acuerdo con su fuerza electromotriz, o sea la facilidad o capacidad de unir sus cargas iónicas más o menos establemente.

TABLA 3.—ELEMENTOS ARREGLADOS SEGÚN SU FUERZA ELECTROMOTRIZ

ELEMENTOS NEGATIVOS			
Fluoro	Telurio	Oro	Antimonio
Cloro	Fósforo	Osmio	Bismuto
Oxígeno	Cromo	Platino	Arsénico
Nitrógeno	Vanadio	Iridio	Mercurio
Bromo	Tungsteno	Tántalo	Plata
Iodo	Molibdeno	Paladio	Cobre
Azufre	Carbono	Rutenio	Silicio
Selenio	Boro	Rodio	Titanio
			Hidrógeno
ELEMENTOS POSITIVOS			
Estaño	Talio	Gadolinio	Itrio
Plomo	Columbio	Indio	Magnesio
Germanio	Cadmio	Galio	Litio
Circonio	Fierro	Aluminio	Calcio
Cesio	Zinc	Metales-Tierras raras	Estroncio
Níquel	Manganeso	Berilio	Bario
Cobalto	Uranio	Escandio	Sodio
			Potasio.

LA SALINIDAD

La salinidad es la propiedad de los radicales ácidos fuertes, porque estos suministran los compuestos salinos. Alcalinidad es la propiedad de los radicales alcalinos, de tal manera que cuando los álcalis se combinan con los ácidos fuertes se dice que la propiedad resultante es salinidad; pero cuando se combinan con ácidos débiles, se dice que hay alcalinidad y también cuando las tierras alcalinas se combinan con los ácidos débiles. De manera que se dice que hay salinidad cuando intervienen los ácidos fuertes y alcalinidad cuando intervienen los radicales restantes.

Para calificar esta propiedad, los álcalis o lo que es lo mismo las bases fuertes, se designan como constituyentes primarios, las tierras alcalinas como secundarias y las bases débiles o sean los metales y en casos especiales el hidrógeno como terciarios.

La combinación de los ácidos fuertes con los álcalis se denomina salinidad primaria; la de los mismos ácidos con las tierras, salinidad secundaria; la de esos ácidos con los metales, salinidad terciaria. La combinación de los álcalis con los ácidos débiles se denomina alcalinidad primaria; la de las tierras con los ácidos débiles, alcalinidad secundaria, y la de los metales con los ácidos débiles, alcalinidad terciaria.

Para la denominación de la salinidad se toma en cuenta que aunque los ácidos débiles también forman sales, en la solución, éstas se hidrolizan y forman bases (hidróxidos) cuya energía es mayor que la de los mismos ácidos débiles. En otras palabras, los ácidos débiles no son capaces de vencer la tendencia natural de las bases fuertes para formar soluciones alcalinas.

Estas enunciaciones se apoyan también en la regla de que los ácidos y bases fuertes en condiciones ordinarias desalojan a los ácidos o bases débiles. Los ácidos fuertes se combinan primero con las bases fuertes; si hay exceso se combina con las tierras alcalinas, y si aun hay excedente con los metales. Después que los ácidos fuertes se equilibran, los débiles se neutralizan con los radicales básicos en el mismo orden.

Supongamos que en un análisis se tiene:

Ácidos fuertes	30%
Ácidos débiles	20%
Álcalis	25%
Tierras alcalinas	20%
Metales	5%
	<hr/> 100

Con los ácidos fuertes se combinan los álcalis equilibrando a éstos, la salinidad primaria es de 50%, suma de 25% de álcalis y 25% de ácidos fuertes. El exceso de ácidos se combina con las tierras alcalinas y se obtiene salinidad secundaria en un 10%. Quedan 15% de tierras alcalinas que se combinan con los ácidos débiles y forman 30% de alcalinidad secundaria, dejando un exceso de 5% de ácidos débiles que se neutralizan con el 5% de metales formando 10% de alcalinidad terciaria.

Clase V.—Ácidos mayor que álcalis + tierras.

Salinidad primaria = álcalis x 2.

Salinidad secundaria = tierras x 2.

Salinidad terciaria = (ácidos — (álcalis + tierras) x 2.

Alcalinidad terciaria = (metales = 1/2 salinidad terciaria) x 2.

REPRESENTACION Y CARACTERIZACION QUIMICA DE LAS AGUAS

Se ha tratado de representar siguiendo los pasos de Chase Palmer, con una fórmula, los valores de los grupos de radicales y en otras los valores de salinidad y alcalinidad. Adopto las siguientes convenciones: todo valor a la derecha de otro en la misma línea, es menor, y todo valor situado abajo de otro es menor. Represento los ácidos fuertes con las letras Af; los ácidos débiles con las letras Ad; los álcalis con las letras Al; las tierras alcalinas con la letra T; y los metales con la M y escribo la relación de los grupos con la fórmula:

$$\left(\begin{array}{c|c} \text{Af} & \text{Al} \\ & \text{T} \\ \text{Ad} & \text{M} \end{array} \right)$$

en la que el valor de los ácidos fuertes es el mayor, siguiendo los de álcalis, tierras, ácidos débiles y metales. La línea vertical dentro del paréntesis separa los grupos positivos de los negativos o viceversa y por consecuencia los radicales básicos de los ácidos o viceversa, que tienen valores iguales. Además, sigo las siguientes convenciones:

Cuando un símbolo está en la misma línea vertical y es superior a la mitad del valor correspondiente al símbolo superior, pongo una línea horizontal pequeña abajo del símbolo; y cuando es inferior la pequeña línea queda arriba del símbolo. Ahora cuando es casi igual queda dentro de una $\backslash /$; cuando es superior a las 3/4 partes, queda dentro de un paréntesis; y cuando es menor a la décima parte queda abajo de un acento circunflejo.

Pondré unos ejemplos:

Mayor que la mitad		Menor que la mitad	
<u>Af</u> = 30	se ponen Af	Af = 30	se ponen Af
Ad = 18	Ad	Ad = 9	Ad

Casi igual.

Ad = 29

Af = 30

se ponen Af

 $\swarrow$ Ad $\searrow$

Mayor que las 3/4 partes.

Af = 28

Ad = 22

se ponen Af

(Ad)

Menor que la décima parte

Af = 30

se ponen Af

Ad = 2

 $\swarrow$ Ad $\searrow$

Cuando un símbolo queda sobre la misma línea horizontal, si es mayor que la mitad, es seguida de una pequeña diagonal, por ejemplo así, AL/; si es menor que la mitad es antecedido así /AL; si es superior a las 3/4 partes, el signo será el siguiente AL'; y si es igual o casi igual se marcará =; si es menor que la décima parte llevará un punto antes, así .Af.

Al representar los tipos de aguas con estas fórmulas, voy a tratar de investigar cuántos tipos existen, comprendidos dentro de las mismas.

Si consideramos los ácidos fuertes mayores y en seguida los álcalis, se encuentran variando los valores de ácidos fuertes, tierras y metales, 25 fórmulas. Considerando los dos primeros valores como iguales se encuentran 5 fórmulas.

Combinando los ácidos fuertes con los demás grupos siguiendo una forma semejante, encontramos 32 fórmulas para cada combinación, 96 fórmulas en donde el grupo de ácidos fuertes esté arriba y a la izquierda, y otras 96 fórmulas en donde el grupo de ácidos débiles ocupe ese mismo lugar. Cuando los álcalis, las tierras alcalinas o los metales ocupan ese mismo lugar, obtenemos 28 fórmulas para cada uno de esos grupos o sean 84 fórmulas que sumadas con las 192 de los grupos ácidos dan un total de 276 fórmulas. Es posible que existan más.

Por lo pronto he formado cuatro grupo marcados con las letras A, B, C y D, que corresponden a las aguas que tienen en mayor cantidad ácidos fuertes, ácidos débiles, álcalis o tierras alcalinas. Cuando a los ácidos fuertes les siguen los álcalis, el grupo se marca A — 1, cuando les siguen las tierras alcalinas, A — 2; y si en segundo lugar se encuentran los metales, A — 3.

En igual forma se agrupan las aguas cuando los ácidos débiles ocupan el primer lugar. La siguiente tabla reúne los grupos principales que hemos formado:

TABLA 4.—AGRUPACIÓN DE RADICALES

	A. de ácidos fuertes	
A — 1 Af.AL	A — 2 Af.T	A — 3 Af.M
	B. de ácidos débiles	
B — 1 Ad.AL	B — 2 Ad.T	B — 3 Ad.M
	C. de álcalis:	
C — 1 AL.Af	C — 2 AL.Ad.	
	D. de tierras alcalinas	
D — 1 T. Af	D — 2 T. Ad	

No hemos encontrado hasta ahora un agua que contenga metales en mayor cantidad y con mayor capacidad de reacción que los otros elementos; pero si fuera necesario se marcaría con la letra E, y obtendríamos:

E — 1	E — 2
M. Af	M. Ad

Para identificar un agua marcamos en seguida el tipo particular de la disposición de los radicales, cuyo número agregamos después de un guión al grupo de que se trate. Supongamos que tenemos el grupo A — 2 y que el tipo sea el 6, escribiremos: A — 2 — 6.

Con el objeto de marcar los 32 tipos que hemos encontrado los numeramos en seguida:

TABLA 5.—TIPOS DE AGUAS

1. Af AL T	2. Af AL Ad T	3. Ad AL T M	4. Af AL Ad T M	5. Af AL Ad=T M
6. Af AL T Ad M	7. Af AL T Ad=M	8. Af AL T M Ad	9. Af Ad AL T M	10. Af AL M
11. Af AL M	12. Af AL M T	13. Af AL Ad M T	14. Af AL Ad=M T	15. Af AL M Ad=T
16. Af AL M Ad=T	17. Af AL Ad M T	18. Af Ad AL M T	19. Af AL	20. Af AL Ad
21. Af AL Ad T	22. Af AL Ad M	23. Af AL Ad T	24. Af AL Ad M	25. Af AL Ad T M
26. Af AL Ad=T	27. Af AL Ad=M	28. Af=AL Ad=T	29. Af=AL Ad=M	30. Af=AL Ad=M T
		31. Af=AL Ad T M	32. Af=AL T Ad M	

Tipos semejantes se encuentran en los grupos A-2, A-3 y B-1, B-2, B-3.

Por lo que respecta a los grupos en donde los álcalis, las tierras alcalinas o los metales ocupan el primer lugar, mostraremos los tipos correspondientes a las tierras alcalinas.

TABLA 6.—TIPOS DE TIERRAS ALCALINAS

1. T Af Ad	2. T Af Ad AL	3. T Af Ad M	4. T Af Ad AL M	5. T Af Ad M AL
6. T Af AL Ad	7. T Af AL Ad M	8. T Af M Ad AL	9. T Af AL M Ad	10. T Af M AL Ad
11. T=Af AL=Ad	12. T=Af Ad AL M	13. T=Af AL Ad M	14. T=Af Ad M AL	★

Estos mismos tipos se encuentran en los grupos C-1, C-2 D-2, E-1 y E-2 cambiando de lugar los álcalis o los metales.

Cualquier tipo nuevo que se encontrara en la práctica podrá determinarse a partir de la numeración aquí alcanzada.

He calculado las fórmulas de 348 análisis de aguas muy variadas y encontrado 22 fórmulas con valor máximo de ácidos fuertes a las que correspondieron 81 muestras de aguas; 18 fórmulas con valor máximo de ácidos débiles a las que correspondieron 127 muestras de agua; 5 fórmulas con valor máximo de álcalis a las que corresponden 53 análisis; y 5 fórmulas con valor máximo de tierras alcalinas a las que corresponden 87 análisis.

De todas estas fórmulas la más común es la que comprende 50 muestras de aguas:

$$\left(\begin{array}{c|c} T & Ad \\ \hline AL & Af \end{array} \right)$$

Atendiendo a las salinidades y alcalinidades ideadas por Palmer y siguiendo las mismas convenciones, se representan como sigue

$$\left(\begin{array}{c|c} A^1 & S^1 \\ A_2 & \\ A_3 & \end{array} \right)$$

en cuya fórmula la letra A representa alcalinidades del orden del número que las acompañan y la letra S salinidades calificadas en igual forma.

En el número de análisis estudiados encontré varias fórmulas de salinidades y alcalinidades correspondientes a una misma fórmula de grupos radicales, pues si de éstos encontré 50 fórmulas; de salinidad y alcalinidad encontré 69 y como el número posible de estas fórmulas es muy crecido, las considero como representaciones de las variaciones numéricas permisibles dentro de las fórmulas de los grupos de radicales.

Para comparar, todos los análisis los reduje al mismo valor de salinidad total. El valor que adapté fué un número entero muy cercano al promedio de valores de salinidad de numerosos tipos de aguas potables, que me resultó ser de 5. En seguida tomando como unidad esta cifra, llamé valor de concentración al cociente que resulta de dividir la salinidad total o sea a la suma de valores de reacción de ácidos más bases entre 5.

Representada la composición de un agua en esta forma, mis esfuerzos se dirigieron a seguir encontrando analogías en orden decreciente, hasta llegar a la individualización del agua, siguiendo las ideas de Clarke de distinguir las aguas por sus compuestos principales, como carbonatadas, cloruradas, sulfatadas, añadiéndoles los nombres de los álcalis, tierras alcalinas o metales predominantes. Clarke distingue 12 clases de aguas que comprenden 13 subclases. A mi se me ocurrió calificar las aguas en el orden de la importancia química de los grupos de radicales, mencionando el mayor de cada grupo, y además mencionando los radicales independientemente de los valores de los grupos, tomando el mayor de cada uno de ellos y prescindiendo de los de valor menor. También se me ocurrió hacer una calificación provisional en el orden de los pesos físicos de los elementos, denominando al principal en cada grupo y a varios, cuando están en proporciones muy semejantes. De manera que califiqué las aguas de tres maneras: 1a.) Por los pesos físicos tomando el mayor en cada grupo; 2a.) Por el valor de reacción de los radicales en el orden de su importancia; y 3a.) Por el valor de cada grupo calificado por el radical mayor, prescindiendo de los valores demasiado pequeños. Adoptaremos en lo sucesivo la segunda norma.

Desde el punto de vista médico distingo las siguientes clases de aguas:

Potables. Con contenido mineral igual o inferior a 500 mg. por litro y valor de reacción igual o inferior a 5, concentración igual a 1.

Endoterápicas o de mesa. Con contenido mineral entre 500 y 3,000 mg. por litro; valor de reacción entre 5 y 100, concentración entre 1 y 20.

Crenoterápicas o para uso exclusivo de balnearios. Con contenido entre 3,000 y 30,000 mg., valores de reacción entre 100 y 2,000 y concentración máxima de 400.

Aterápicas. Sin uso curativo, con contenido mineral, valor de reacción y concentración superiores a las crenoterápicas.

Desde el punto de vista geológico adopto las siguientes denominaciones:

Aguas telúricas. Las de contenido mineral semejante a las potables.

Aguas subminerales. Las correspondientes a las endoterápicas.

Aguas minerales. Las correspondientes a las crenoterápicas y aguas hiperminerales, salinas o salmueras, las aterápicas o de concentraciones que permitan su explotación industrial.

Como la clasificación de las aguas coincide desde los puntos de vista médico y geológico, adopto la división en cuatro grupos. Cada grupo lo divido en tres clases y cada clase en 4 subclases, de acuerdo con el punto de vista químico. Así resultan 48 tipos de aguas en cada grupo.

La agrupación más adecuada de las aguas es, desde el punto de vista químico el de la presencia y proporción de sus sales. Quiere decir que en cuanto a la clase de sales distinguiremos las siguientes:

- 1.—Sódicas
- 2.—Potásicas
- 3.—Cálcicas
- 4.—Magnesianas

Las mismas cuatro clases se distinguen en las cloruradas-sulfatadas y bicarbonatadas, haciendo en total 12 clases. Hay también aguas fosfatadas, boratadas y nitrificadas; pero estas son excepcionales.

Como subclases distingo las aguas por su contenido secundario en sales, así tendremos en cada clase la subclase correspondiente a las bicarbonatadas o sean cuatro. Se comprende fácilmente que así resultan 48 tipos de aguas, correspondientes a tres grupos: cloruradas, sulfatadas y bicarbonatadas. El primer tipo será el de aguas cloruradas—sódicas—bicarbonatadas—sódicas, el último será el de bicarbonatadas—magnesianas—cloruradas—magnesianas.

CLASIFICACIÓN MÉDICA

A G U A S

Potables	{	Hipotónicas	{	Sistema nervioso
Estimulantes		Tónicas		„ circulatorio
Oroterápicas	{	Hipertónicas		„ digestivo
Crenoterápicas		Hipotermiales		
	{	Mesotermiales		
		Hipertermiales		

CLASIFICACIÓN GEOLÓGICA

	Concentración	Contenido mineral aproximado
1. Potables	0 — 1	0. — 0.5
2. Subminerales	1 — 10	0.5 — 2
3. Protominerales	10 — 100	2. — 8
4. Ortominerales	100 — 1,000	8. — 150
5. Metaminerales	más de 1,000	más de 150

INTERPRETACION GEOQUIMICA

Como es muy interesante para la interpretación geoquímica de los análisis de agua, un conocimiento mediano de la composición química y mineralógica de las rocas, transcribimos los siguientes datos tomados de la obra de F. W. Clarke.

TABLA 7.—COMPOSICION MEDIA DE LAS ROCAS ÍGNEAS

	%
SiO ₂	59.83
Al ₂ O ₃	15.02
Fe ₂ O ₃	2.62
FeO	3.43

TABLA 7.—CONTINUACION, COMPOSICION MEDIA DE LAS ROCAS ÍGNEAS

MgO	3.74
CaO	4.83
Na ₂ O	3.37
K ₂ O	3.05
H ₂ O	0.48
H ₂ O+	1.42
TiO ₂	0.79
ZrO ₂	0.023
CO ₂	0.49
P ₂ O ₅	0.29
S	0.10
Cl	0.063
F	0.10
BaO	0.10
SrO	0.043
MnO	0.10
NiO ₂	0.026
Cr ₂ O ₃	0.048
V ₂ O ₅	0.026
Li ₂ O	0.011
	100.000

TABLA 8.—COMPOSICIÓN MEDIA DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS

	Arcillas %	Arenas %	Calizas %
SiO ₂	58.38	78.66	5.19
Al ₂ O ₃	15.47	4.78	.81
Fe ₂ O ₃	4.03	1.08	.54
FeO	2.46	.30	—
MgO	2.45	1.17	7.90
CaO	3.12	5.52	42.61
Na ₂ O	1.31	.45	.05
K ₂ O	3.25	1.32	.33
H ₂ O a 100°C	1.34	.31	.21
H ₂ O a + 110°C	3.68	1.33 (1)	56 (1)
TiO ₂	.65	.25	.06
CO ₂	2.64	5.04	41.58

TABLA 8.—CONTINUACION, COMPOSICION MEDIA DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS

	Arcillas	Arenas	Calizas- Cont.
P ₂ O ₅	17	0.8	.04
S	—	—	.09
SO ₃	.65	0.7	.05
Cl	—	huellas	.02
BaO	0.05	0.5	nada
SrO	nada	nada	nada
MnO	huellas	huellas	.05
Li ₂ O	„	„	huellas
C orgánico	.81	—	—
	100.46	100.41	100.09

(1) Incluyendo materia orgánica.

En consideraciones de una extensión tal, que se trate de discernir el origen de las sustancias disueltas en las aguas del mar, se llega a conclusiones rudas, pero no obstante de utilidad para nuestro objeto. Se puede estimar que una cubierta de 800 metros de rocas sobre toda la superficie de la tierra, representa las sustancias disueltas en las aguas del mar.

La proporción relativa de las diferentes rocas sedimentarias dentro de esa cubierta, puede determinarse toscamente estudiando la composición media de las rocas ígneas y la manera como pueden dividirse. El examen de 70 rocas ígneas estudiadas microscópicamente nos hace creer que su composición mineralógica media es:

Cuarzo	12.0 %
Feldespatos	59.5
Hornblenda y piroxena	16.8
Mica	3.8
Minerales accesorios	7.9

Las calizas en promedio contienen 76% de carbonato de calcio y a las arcillas y areniscas corresponde:

TABLA 9.—COMPOSICIÓN MEDIA DE LAS ARCILLAS Y ARENISCAS

	Arcillas	Areniscas
Cuarzo	22.3.....	66.8
Feldespatos	30.0.....	11.5
Arcilla	25.0.....	6.6
Limonita	5.6.....	1.8
Carbonatos	5.7.....	11.1
Otros minerales	11.4.....	2.2

Si supusiéramos que en las rocas ígneas todo el cuarzo pasara a las rocas sedimentarias, principalmente areniscas y tomando la proporción resultante de considerar que 66.8% de cuarzo de las areniscas corresponde a ese 12% de cuarzo de las rocas ígneas, resultaría que a 100 corresponderían 18% de areniscas. Tal consideración indudablemente peca de excesiva, pues a las arcillas y pizarras arcillosas debe corresponder parte del cuarzo disponible.

Las rocas ígneas contienen como se ha mostrado 4.82% de CaO , que formaría de 8.65% de carbonato de calcio a 11.2%, de una caliza de composición media; pero cuando menos la mitad de CaO debe formar parte de otros sedimentos, de manera que su verdadera proporción no puede pasar del 6%, o la tercera parte de la correspondiente a las areniscas.

El resto de material ígneo, formó el residuo silíceo que se agrupa bajo la denominación vaga de arcillas y pizarras arcillosas.

De una manera aproximada podemos fijar que la litósfera se compone de un 95% de rocas ígneas y un 5% de sedimentarias distribuidas en 4% de arcillas y pizarras arcillosas; 0.75% de areniscas y 0.25% de calizas.

La expresión del equilibrio químico ideado por Palmer, me ha servido de base en mis fórmulas como ya lo he expuesto; pero aunque dicho autor habla de interpretación geoquímica, he hallado este campo casi virgen, y al tratar de interpretar algunos análisis he tropezado con dificultades extraordinarias.

No en balde el reputado Clarke dice "una cuidadosa consideración de todas las evidencias concernientes a las aguas minerales, muestra que es excesivamente difícil generalizar las relaciones entre la composición del agua y su recorrido a través de las diferentes formaciones geológicas. Las reacciones que se verifican en las profundidades no pueden trazarse fácilmente, especialmente cuando el agua puede sufrir varias modificaciones antes de llegar a la superficie".

“Un manantial puede además provenir de la mezcla de aguas de diverso origen, bien directamente o formando una solución en la cual algunos ingredientes hayan sido removidos y por consecuencia solamente en casos particulares podrán hacerse interpretaciones simples”.

“El agua que emerge de un estrato salino o yesífero se distingue fácilmente y de igual manera se ve que un agua que circula por granito difiere grandemente de una que salga de calizas. Han podido encontrarse muchas regularidades, pero ningún principio general se puede deducir”.

“Se han hecho varias tentativas para correlacionar la composición de las aguas con los horizontes geológicos de que proceden. Para las aguas de manantiales tales intentos han resultado infructuosos, porque dos manantiales situados uno al lado del otro pueden ser notablemente diferentes. En el caso de pozos artesianos el problema es posiblemente menos complicado porque el horizonte puede ser determinado. Las aguas artesianas de un mismo origen muestran frecuentemente semejanza, especialmente en sus constituyentes menores; siendo siempre un grupo calcáreo, otro relativamente rico en bromo y así por el estilo. No obstante no puede formularse ley alguna que pueda abarcar estas regularidades, porque las aguas excepcionales son demasiado numerosas y dan lugar a demasiada confusión. Que las aguas que provienen de las rocas sedimentarias son por regla general más concentradas y pueden ser más complejas que las que provienen de rocas cristalinas más antiguas, es indudable; pero pretender generalizar más, es inseguro. Es mejor discutir cada agua individualmente y tratar de interpretar su probable historia”.

“La aseveración de Palmer, de que el carácter de las aguas naturales con referencia a la litología de la región de que se derivan, puede mejor definirse atendiendo a las propiedades de su método que es infantil”.

En efecto, en la composición de un agua intervienen un gran número de factores que hay que tomar en cuenta, algunos de los cuales es imposible determinar; pero no obstante hay ya ciertas generalidades que permiten ahondar las investigaciones y que dan índices nada despreciables para el conocimiento de las formaciones geológicas.

Dice el mismo Clarke: “Las aguas que salen de rocas cristalinas feldespáticas, se caracterizan por su elevada alcalinidad primaria, baja concentración y una notable proporción de sílice”.

“Las aguas del océano y de las salinas son casi enteramente salinas, mientras que la alcalinidad está casi o enteramente ausente”.

Igualmente dice: “Se puede considerar como muy probable, basados en numerosos análisis químicos, que un agua con un pequeño valor de con-

centración y con una proporción relativamente considerable de sílice y de álcalis, proviene de rocas ígneas. Las aguas de origen volcánico suelen tener ácidos libres".

Véase lo que Hermión Larios dice en su interesante trabajo geoquímico publicado en este mismo tomo, páginas 52-64.

Pasaré ahora a mis propias observaciones.

De acuerdo con los resultados de los diferentes casos en que he tratado de interpretar los análisis químicos de las aguas atendiendo a las formaciones geológicas, he definido una relación entre la edad de las mismas y los valores de concentración, notando en todos los casos que aquellas aguas de fórmulas poco variables en muestras tomadas con varios años de intervalo, corresponden a formaciones más antiguas o más homogéneas; que los valores de concentración mayores, corresponden a las aguas que circulan, bien por las rocas más jóvenes, por rocas antiguas que sufrieron procesos recientes de precipitación química o impregnación de aguas cargadas de sales; o bien por formaciones que por condiciones especiales sufren un proceso disolutivo enérgico.

La edad de la formación geológica es un índice que hay que tomar en cuenta.

Atendiendo no solamente al equilibrio químico, sino a cada uno de los elementos y al estudio microscópico del agua misma, de los residuos obtenidos por filtración y evaporación, de los coloides en especial, la radioactividad, los gases libres, el pH, la temperatura etc., se tendrán medios de resolver con bastante acierto, la clase de formaciones que atraviesan las aguas, en aquellos casos en que no exista demasiada complicación; pero aun el indicio de ella será útil para confirmar al geólogo en sus referencias de existencia de complejos inferidos por otros medios de investigación.

Voy a presentar someramente algunos de los casos, que tengo estudiados, pues aunque mucho lo deseo, me es imposible referirme a todos.

Las aguas de los manantiales de Xochimilco, que abastecen a la Ciudad de México fueron analizadas por el Prof. C. Castro, Jefe del Laboratorio del Instituto Geológico en el año de 1922. La fórmula obtenida según mis anotaciones es:

$$\left(\begin{array}{c|c} \text{Ad} & \text{T} \\ \text{Af} & \text{A1} \end{array} \right) \left(\begin{array}{cc} \text{A}_2 & \text{S}_1 \\ \text{A}_3 & \text{S}_2 \\ & \text{M} \end{array} \right)$$

Su valor de concentración fué de 1.13. Posteriormente en 1930, se volvió a practicar el análisis de esas mismas aguas obteniendo la fórmula:

$$\left(\begin{array}{c|c} \text{Ad} & \text{T} \\ \hline & \text{Al} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|c} \text{A}_2 & \text{S}_1 \\ \hline \text{A}_1 & \\ \hline \text{A}_3 & \end{array} \right)$$

Valor de concentración 0.93.

Tratándose de un mismo manantial y repitiéndose el caso en los manantiales de San Luis, Santa Cruz y La Noria, podemos asegurar que el agua de una misma formación geológica puede pertenecer en épocas diferentes a distintas clases de Palmer, de acuerdo con los elementos secundarios, accesorios o extraños dentro de la formación, que tienden a desaparecer por la continua disolución y arrastre de los mismos y que igualmente tratándose de rocas de composición homogénea, con más de un elemento la agrupación química del agua variará según la solubilidad de los elementos indicados y la actividad de los solventes.

De aquí se impone el estudio de las variaciones de composición del agua de un mismo origen y de una misma circulación, en rocas con elementos accesorios o extraños y en las mismas en diversas épocas, cuando éstos han desaparecido y las rocas aportan directamente sus contingentes minerales. Estas investigaciones, limitadas a formaciones simples con rocas típicas en diversas condiciones de ambiente, clima, profundidad etc., abren un campo muy amplio de estudio.

En el caso de que nos estamos ocupando, notamos que los radicales ácidos fuertes son los de mayor tendencia a disminuir, así como las bases débiles. Comparando las fórmulas:

$$\left(\begin{array}{c|c} \text{Ad} & \text{T} \\ \hline \text{Af} & \text{Al} \\ \hline & \text{M} \end{array} \right) \text{ y } \left(\begin{array}{c|c} \text{Ad} & \text{T} \\ \hline & \text{Al} \\ \hline \text{Af} & \text{M} \end{array} \right)$$

se nota que en la segunda el valor de los ácidos fuertes ha disminuído y que la relación de los ácidos débiles con las bases y la de éstas entre sí, permanece idéntica. Esta observación nos permite notar una particularidad que llamaremos *consanguinidad de las aguas*.

Ampliando nuestra investigación respecto a la consanguinidad, encontramos que las aguas de los diferentes manantiales que emergen en la misma formación geológica, que en este caso consiste en arenas volcánicas con corrientes efusivas basálticas pertenecen a la fórmula:

de la segunda clase Palmer y a la fórmula: $\left(\begin{array}{c|c} \text{Ad} & \text{T} \\ \hline & \text{M} \\ \hline \text{Af} & \text{Al} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|c} \text{A}_2 & \text{S}_1 \\ \hline \text{A}_3 & \end{array} \right)$

de la tercera parte, como son: $\left(\begin{array}{c|c} \text{Ad} & \text{T} \\ \hline & \text{M} \\ \hline \text{Af} & \text{Al} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|c} \text{A}_2 & \text{S}_1 \\ \hline \text{A}_3 & \end{array} \right)$

los manantiales de Las Fuentes de Tlalpam, Peña Pobre y Santo Niño.

Quedan agrupadas dentro de las mismas fórmulas de las aguas de Xochimilco, las de los manantiales que se encuentran en la vertiente exterior de la Sierra del Ajusco en jurisdicción del Estado de Morelos, como son los de Pazulco, Hda. Calderón, Puente Quebrado, Taza de Casasano y Santa Inés.

Apoyados en este conocimiento investigaremos en otros casos si las aguas que corresponden a esas fórmulas son de origen y circulación semejante, a través de formaciones idénticas, es decir, arenas volcánicas más o menos consolidadas con intercalaciones de tobas y materiales provenientes en su mayor parte de erupciones basálticas; tenemos la fórmula:

$$\left(\begin{array}{c|c} \text{Ad} & \text{T} \\ \text{Af} & \text{M} \\ & \text{A1} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|c} \text{A}_2 & \\ \text{A}_3 & \text{S}_1 \\ & \text{S}_2 \end{array} \right)$$

que representa el análisis del agua del manantial de Ojocaliente, Zac., que circula en rellenos del valle, con importantes depósitos de rocas piroclásticas.

Carezo de análisis que pudieran dar más confirmación o quedar en desacuerdo con los resultados antes obtenidos, motivo por el que considero estas fórmulas como muy probablemente representativas de las aguas que circulan en formaciones basálticas.

Examinaremos ahora la fórmula que resulta representativa:

$$\left(\begin{array}{c|c} \text{Af} & \text{A1} \\ & \text{T} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{S}_1 \\ \text{S}_2 \end{array} \right)$$

Los análisis de ocho aguas de geysers relacionados con el volcanismo tienen la fórmula antes expresada y éstos son los de los volcanes de lodo, en la laguna de Los Volcanes, Delta del Colorado, Mexicali, B. C., y los volcanes de lodo de Jiquilpan, Mich., el manantial de San Gregorio en Cuitzeo de Abasolo, Gto., los geysers de El Salitre, Baño Grande, Baño Viejo y Pozo Blanco, en Ixtlán de los Hervores, Mich., y los geysers de Rotorna, Otukapaurangui, Nueva Zelandia. Los valores de concentración están entre 3.5 y 13.0 y solamente el agua de los volcanes de lodo de Mexicali da 95.0

Cambiando a la fórmula:

$$\left(\begin{array}{c|c} \text{Af} & \text{A1} \\ & \text{T} \\ & \text{M} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{S}_1 \\ \text{S}_2 \\ \text{S}_3 \end{array} \right)$$

que tiene una evidente consaguinidad con la anterior, pues solamente aparecen de más los metales y con ellos la salinidad terciaria, encontramos en el grupo a las famosas aguas de Devils Inkport, Yellowstone National Park, E.U.A., así como las de Rotorna, Geyser, Cameron Bath, de Nueva Zelanda y las de Salsomaggiore, Italia. Conservando consaguinidad, están las fórmulas:

$$(Af = Al) \text{ y } \left(\begin{array}{c|c} Af & Al \\ & T \\ & M \\ Ad & \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|c} S_1 & \\ S_2 & A_2 \\ S_3 & A_3 \end{array} \right)$$

A la primera corresponde el agua de Bench Spring, Upper Geyser Basin, Yellowstone National Park y a la segunda las de dos aguas francamente relacionadas con el volcanismo, como son las de Green Lake, cráter del Volcánteal, Islas Filipinas, y las de Yellow Lake o Hot Pool del mismo volcán. Los valores de concentración de las aguas resultaron muy elevados: de 169 a 339.

Examinando las fórmulas que he presentado, notamos que en todas ellas la alcalinidad está ausente o es muy baja. Esta simple observación nos permite encontrar como pertenecientes al grupo de aguas geyséricas, las siguientes con fórmulas consanguíneas:

$$\left(\begin{array}{c|c} Af & Al \\ & T \\ & M \\ Ad & \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|c} S_1 & \\ S_2 & A_2 \\ S_3 & A_3 \end{array} \right)$$

del Pahua Spring, Nueva Zelanda, con valor de concentración de 145 y de Arva-Polhora, Hungría, con valor de 206;

$$\left(\begin{array}{c|c} Af & T \\ & M \\ & Al \\ \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} S_2 \\ S_3 \\ S_1 \end{array} \right)$$

del geyser California, en el condado de California, de Oak Orchard Spring, Alabama, y Tuscarora Spring, Brantford, Canadá, con valores de concentración de 15.40, 15.70 y 11.30, respectivamente.

Hemos visto con los anteriores casos, que podemos tener en las fórmulas anteriores un indicio de que las aguas pueden ser de origen volcánico y si al mismo tiempo tuviéramos los datos del examen microscópico, radioactividad etc., podríamos tener más términos de comparación que nos ayudarían a resolver los casos más complicados.

Pasaremos ahora, al estudio de unas aguas muy conocidas en el país, como son las de Tehuacán, Pue., y Lourdes, S. L. P. A las primeras corresponde la siguiente fórmula:

$$\left(\begin{array}{c|c} \text{Ad} & \text{T} \\ \hline & \text{Al} \\ \text{Af} & \text{M} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|c} \text{A}_2 & \text{S}_1 \\ \hline \text{A}_3 & \\ \text{A}_1 & \end{array} \right)$$

de los manantiales de Garci-Crespo, El Riego, San Lorenzo y Embotelladora Covadonga con valores de concentración de 7.93, 6.43, 6.40 y 7.12, respectivamente.

Las aguas de Lourdes tienen la fórmula:

$$\left(\begin{array}{c|c} \text{Ad} & \text{Al} \\ \hline & \text{T} \\ \text{Af} & \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|c} \text{A}_1 & \\ \hline \text{A}_2 & \text{S}_1 \end{array} \right)$$

con valor de concentración de 14.0.

Tanto las aguas de Tehuacán como las de Lourdes tienen como formación basal, calizas marinas del Cretácico, y circulan en su trayecto superior, en formaciones terciarias y cuaternarias, donde existen importantes depósitos calcáreos. En el caso de Tehuacán, los famosos "tecoates" y los "sarros" de la galería de captación indican la importancia de los depósitos de travertino; en el caso de Lourdes, la hermosa y característica estructura cupular de los depósitos calcáreos donde brotan las aguas, indica también la importancia de la precipitación química.

Las aguas de Lourdes tienen una concentración doble que las de Tehuacán, y acusan como en el caso de las aguas de Xochimilco en 1922 un valor más alto de elementos secundarios que las aguas de Tehuacán, que aparecen como en el caso de las de Xochimilco en 1930, es decir de la fórmula:

$$\left(\begin{array}{c|c} \text{Ad} & \text{Al} \\ \hline & \text{T} \\ \text{Af} & \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|c} \text{A}_1 & \\ \hline \text{A}_2 & \text{S}_1 \end{array} \right) \text{ se pasa a la } \left(\begin{array}{c|c} \text{Ad} & \text{T} \\ \hline & \text{Al} \\ \text{Af} & \text{M} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|c} \text{A}_2 & \text{S}_1 \\ \hline \text{A}_3 & \\ \text{A}_1 & \end{array} \right)$$

por el lavado más activo de las formaciones, ya que el gasto hidráulico de los manantiales de Tehuacán es muy superior al de los de Lourdes. Aquí nos resulta un factor importante en el estudio de la expresión química como es el gasto hidráulico; pues en formaciones de la misma edad, la composición del agua acusará menor proporción de compuestos accesorios o de mayor solubilidad, con un desalojamiento de radicales más activos a menos activos, mientras mayor sea el gasto. En la actualidad estoy tratando de encontrar un índice numérico que fije la relación edad-gasto hidráulico, en las emergencias acuíferas.

Los manantiales muy caudalosos y de formaciones geológicas recientes, se encuentran representados por la fórmula más común que hemos encontrado o sea:

$$\left(\begin{array}{c|c} T & Ad \\ \hline Al & Af \end{array} \right)$$

Es interesante hacer notar que la composición media de las aguas de los ríos, tomando en cuenta los análisis obtenidos en todo el mundo por Clarke, corresponde a la fórmula anterior y aquí tenemos en ese grupo las aguas de los ríos Lerma, Nazas, Sigüera y Guacina, Sin.

Dentro de las representaciones anteriores resulta tanto más difícil una interpretación mientras más común es una fórmula, necesitándose tomar en consideración los distintos elementos químicos, principalmente los no comunes y reunir los datos auxiliares que antes he referido. Abrigo la creencia de que hay una fórmula o un grupo de fórmulas muy comunes, a las que tienen como meta todas las aguas que por el completo lavado de las formaciones geológicas, han reducido la solución a una constante poco variable con el tiempo, agotando los elementos más activos o solubles, hasta tomar una fisonomía en concordancia con los términos medios de composición. Esta idea me ha venido al considerar que, aguas que provienen de francas formaciones calizas según Clarke, así como las de la Gruta de Tonaltoño, Hgo., las de Topo Chico, en Monterrey, N. L., las de Alhuelica, en Tehuacán, Pue., queden dentro de la misma fórmula que aguas que circulan en formaciones ígneas, como las del manantial de Santa Cruz en Xochimileo, D. F., el Peñón de los Baños, numerosos manantiales altos de la Sierra de las Cruces y Monte Alto y en Guanajuato, Gto.

Considerando que las fórmulas más comunes, son aquellas donde predominan los elementos menos activos, se piensa que por el contrario las fórmulas menos comunes, que tipifican o individualizan mejor las aguas son las de elementos activos predominantes.

Una amplia recolección de análisis y el estudio del origen y circulación de las aguas pertenecientes a cada tipo caracterizado, podrán ayudar con el tiempo, sobre todo contando con un buen número de análisis, a poner de manifiesto analogías y propiedades comunes que aun no podemos ni siquiera sospechar.

Es de lamentar que los análisis considerados sean tan reducidos en número, así como que no hayan sido hechos en muestras tomadas sistemáticamente.

Lo ideal sería tomar muestras de aguas que circulan en las formaciones geológicas abarcándolas de una en una, de dos en dos, de tres

en tres, etc., con todas las variaciones de clima, temperatura, topografía, gasto hidráulico etc., para tener con esos análisis fórmulas comparativas.

Es de desearse la instalación de un laboratorio especial para el estudio de muestras de aguas de distintas clases como destilada, de lluvia, cargada con ácidos orgánicos, como los húmicos, carbónico y los diversos solventes que tienen las aguas naturales, haciéndolas pasar con diferentes condiciones de temperatura y presión, por capas y columnas de arenas y gravas de las distintas rocas, con diferente grado de alteración y duración de contacto. En la naturaleza no podemos tomar muestras de aguas de un mismo origen con un intervalo de tiempo digno de ser tomado en consideración, dentro de las edades geológicas. Es posible lograr en el laboratorio, el mismo resultado que se obtiene en la naturaleza con gran lentitud, acelerando las reacciones, hasta reducir los elementos solubles de las rocas en unos cuantos minutos. Lo que se necesita es que se opere en condiciones semejantes a las naturales. Podrían obtenerse así en el laboratorio, no solamente fórmulas patrón para interpretar la circulación del agua, sino las fórmulas correspondientes a un ciclo completo de variación para el agua obtenida en cada una de las formaciones geológicas.

Podemos inferir de acuerdo con los casos que hemos estudiado, que el agua que circula en una formación, corresponde a un tipo que está definido entre muchos factores, que merecen consideración particular, por el gasto hidráulico de la corriente, de manera que un pequeño manantial de lenta circulación, puede tener un agua fuertemente concentrada y de elementos químicos muy activos, mientras que en la misma formación, al mismo tiempo emerja una corriente caudalosa de aguas de baja concentración y radicales predominantes poco activos. Así podemos pensar que cada agua sigue en su composición un ciclo, que a semejanza del relieve terrestre, va también de la juventud a la edad madura, y como aquel, llega a una especie de peneplanación en que la actividad química es casi nula. El estudio geoquímico tomará en cuenta las etapas del ciclo químico del agua, quizá representado por una serie numerosa de fórmulas y entonces se fijarán y comprenderán mejor las relaciones de la edad geológica de las formaciones, la constitución química de ellas y la de las aguas correspondientes.

Debo hacer notar que las fórmulas que he propuesto me han sido también útiles para comparar análisis de rocas entre sí y con las de las aguas que circulan por ellas, así como también resultan adecuadas para comparar aguas medicinales, siendo de posible utilidad en los estudios

hidroterápicos, así como en los que fijan la calidad del agua en usos industriales.

Para terminar, tengo que excusarme por haber presentado ante ustedes una investigación tan incompleta; pero la magnitud de la obra por emprender, me ha dado la convicción de que al paso que llevo, tardaría muchos años para presentar algo digno de ustedes, pareciéndome más conveniente exponer mis ideas, con la esperanza de que se interese alguien más capacitado en proseguir estas investigaciones hasta llegar a resultados que sean verdaderas conquistas para nuestra ciencia.

BIBLIOGRAFIA

Clarke, Frank W. (1920).—The data of geochemistry (fourth edition), U. S. Geol. Survey, Bull. 695, pp. 206-207.

Palmer, Chase (1911).—The geochemical interpretation of water analysis: U. S. Geol. Survey, Bull. 479, 31 pp.

Stabler, Herman (1911).—Some stream waters of the western United States, with chapters on sediment carried by the Rio Grande and the industrial application of water analysis: U. S. Geol. Survey Water Suppl. Paper 274, 188 pp.