

## NOCIONES BASICAS DE HIDROGEOQUIMICA

Juan Reynerio Fagundo Castillo, Centro Nacional de Termalismo. MINSAP, Cuba, 2002.

### Parte 2. Análisis químico y calidad de las aguas

La determinación de las propiedades químico-físicas de un agua natural o mineral, constituye una herramienta imprescindible para los hidrólogos, hidrogeólogos, carsólogos, geomorfólogos, ingenieros sanitarios y otros especialistas relacionados con el agua.

La primera fase de todo trabajo hidrogeoquímico, comprende el estudio bibliográfico y visitas de reconocimiento en el área objeto de estudio. En esta etapa también se toman muestras, las cuales se analizan con fines de orientación.

Para la aplicación de los métodos hidrogeoquímicos en el estudio de la disolución hídrica, es necesario tomar en cuenta el balance hídrico y parámetros geoquímicos que caractericen a cada sistema, relacionando el volumen de infiltración y circulación del agua con la composición química de la misma en el área de descarga del acuífero. Con ese objetivo, en la segunda fase del trabajo se seleccionan los puntos o estaciones de observación sistemática y se instalan los equipos de registro o medición necesarios para el control de las precipitaciones, los caudales y el quimismo de las aguas.

La composición química de las aguas meteóricas está controlada por los equilibrios químicos de los carbonatos y de otros minerales y varía al cabo del tiempo. Por esta razón, los análisis químicos y las mediciones de pH, así como la conductividad eléctrica deben hacerse "in situ". En muchos países, lamentablemente se acostumbra a hacer los análisis y mediciones en el laboratorio, muchas veces hasta semanas después de tomada la muestra, cuando éstas en la práctica, carecen de valor para interpretar los fenómenos de la naturaleza.

En el caso de las aguas minerales, estos equilibrios químicos son más sensibles, de ahí que debido a la manipulación de las muestras se produzcan cambios en el estado de los equilibrios y la composición química que se obtiene en el laboratorio, en muchas ocasiones, dista mucho de la que posee realmente el agua en la fuente mineromedicinal.

Otra práctica inadecuada consiste en tomar la muestra dejando una cámara de aire, lo cual favorece el escape del CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S disueltos en el agua hacia la fase gaseosa, donde estos gases son más solubles. Esto da lugar a la recombinación de iones y a la precipitación de minerales (con disminución en la conductividad eléctrica) y al aumento del pH.

Los cambios en la composición química de las muestras resultan usualmente de la pérdida de CO<sub>2</sub>, pérdida de calcio por precipitación de CaCO<sub>3</sub>, oxidación de H<sub>2</sub>S a sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), precipitación de dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) en forma de cuarzo o calcedonia; así como oxidación y precipitación de hierro y manganeso.

Entre los componentes que prácticamente no se afectan por el almacenamiento de la muestra se encuentran el sulfato (siempre que no haya H<sub>2</sub>S pues es ese caso éste, al oxidarse, incrementaría el contenido de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), litio, sodio, potasio, fluoruro, bromuro, yoduro y boro. Otros microconstituyentes, sin embargo, tienden al cabo del tiempo a adherirse a las paredes del frasco acusando una concentración menor a la real. Por tal razón se suele preservar parte de la muestra, mediante tratamiento con un ácido mineral como el ácido nítrico y conservación en frío antes de enviar al laboratorio.

La precisión de los análisis químicos se controla mediante diferentes métodos, entre éstos la diferencia entre aniones y cationes que no debe exceder de un cierto valor. También se suele emplear la ecuación de balance:

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Cationes} - \sum_{i=1}^n \text{Aniones}}{\sum_{i=1}^n \text{Cationes} + \sum_{i=1}^n \text{Aniones}}$$

donde, e: Error, en %.

En aquellos casos en que el error calculado por la ecuación anterior sea superior al 10 %, se debe repetir el análisis o desechar la muestra.

Otro método útil para calcular el error del análisis consiste en la comparación entre la conductividad eléctrica real y la teórica, calculada mediante la ecuación:

$$CE_T = \sum_{i=1}^n (\alpha_i C_i S_i)^f$$

donde,  $CE_T$ : Conductividad eléctrica teórica a 25 °C.

Si: Conductividad específica equivalente de cada ion  $i$  a dilución infinita y 25 °C.

$C_i$ : Concentración de cada ion  $i$ , en miliequivalentes por litro (meq/L).

$\alpha_i$ : Fracción de iones libres que aportan a la conductividad eléctrica

$f$ : Factor exponencial empírico que depende de la concentración y del tipo de agua

Para calcular el error del análisis se puede emplear la fórmula:

$$e = \frac{CE_T - CE_R}{CE_R} \cdot 100$$

donde:  $CE_R$ : Conductividad eléctrica real a 25 °C.

Las determinaciones se consideran precisas cuando el porcentaje de error es menor de 5. En el caso de los análisis de campo, no se conocen los contenidos de los iones  $Na^+$  y  $K^+$ , se calcula por diferencia entre los aniones y el resto de los cationes, y se puede tomar  $Na^+ + K^+ = Na^+$ , teniendo en cuenta que en las aguas naturales  $Na^+ \gg K^+$ .

Hoy día, también se incluyen en las marchas analíticas aquellos indicadores de la actividad del hombre en el medio ambiente, especialmente los componentes de los ciclos del nitrógeno ( $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ) y el fósforo (ortofosfato y fosfato total); la demanda química de oxígeno (DQO) y otras técnicas empleadas en la caracterización de aguas residuales.

Otros métodos de medición empleados en los estudios hidroquímicos son los llevados a cabo con equipos electrónicos portátiles o sistemas automatizados de registro o adquisición de datos, que miden uno o varios indicadores como: temperatura, pH, conductividad eléctrica, potencial redox, oxígeno disuelto; así como algunos iones mediante sensores y electrodos selectivos.

### **Representación gráfica de la composición química de las aguas minerales**

La representación gráfica de los datos hidroquímicos constituye una herramienta de trabajo muy eficiente en la interpretación de las propiedades de un agua, así como para hacer comparaciones. También permite ver con facilidad el comportamiento y evolución de un agua en un territorio determinado y a través del tiempo (Fagundo, 1996).

Para la representación gráfica de los análisis de las aguas mineromedicinales son muchos los métodos propuestos, pero ninguno alcanza el ideal de expresar de manera clara y rotunda la mineralización total y la concentración porcentual en miliequivalentes de los diferentes iones, parámetros indispensables para clasificar un agua (Armijo-Castro, 1994c).

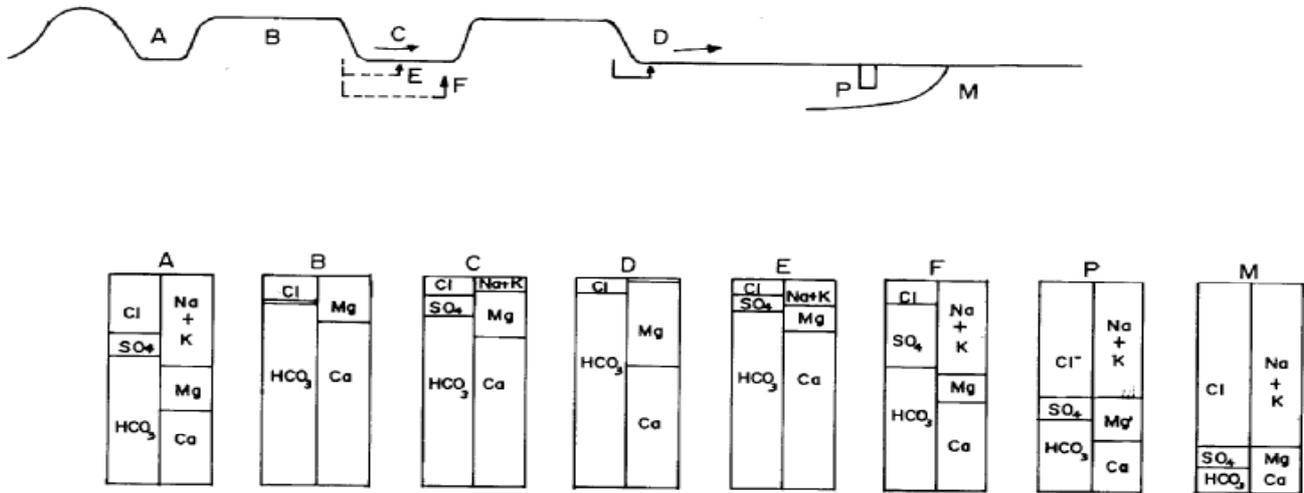
Entre los métodos gráficos más utilizados se destacan los siguientes: diagrama de barra, diagrama circular, diagrama de Stiff, diagrama triangular, diagrama vertical.

Los diagramas de barras o de columna se han empleado ampliamente por su sencillez. La composición química se puede expresar en mg/l, meq/l o % meq/l. La forma más común consiste en presentar en la columna de la derecha los tantos por ciento de los miliequivalentes de aniones en el orden  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$  de arriba hacia abajo y en la columna de a izquierda,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ . (Fig. 3)

El diagrama circular expresa la composición mediante un círculo, cuyos ángulos son proporcionales a las concentraciones y sus radios o diámetros al total de sólidos disueltos, mientras que la suma de los aniones y de los cationes es igual a 180°. Constituye uno de los métodos más útiles para expresar la composición química en el mapa de una zona.

El diagrama de Stiff emplea un sistema de ejes horizontales paralelos y un eje vertical. En cada uno de estos se coloca un ion determinado. Una forma adecuada consiste en colocar en los ejes de la izquierda las concentraciones (meq/l) de los iones  $Na^+ + K^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  de arriba hacia abajo y, en el mismo orden, en los ejes de la derecha, los iones  $Cl^-$ ,  $HCO_3^- + CO_3^{2-}$ , así como  $SO_4^{2-}$ . Este método permite apreciar y comparar en forma rápida los diferentes tipos de agua, cuando éstas se

encuentran en cantidades limitadas. Es especialmente útil cuando se quieren apreciar cambios en el comportamiento de un agua en determinado tiempo, por características climáticas, hidrogeológicas o efectos antrópicos.



### CUENCA DEL RIO CUYAGUATEJE

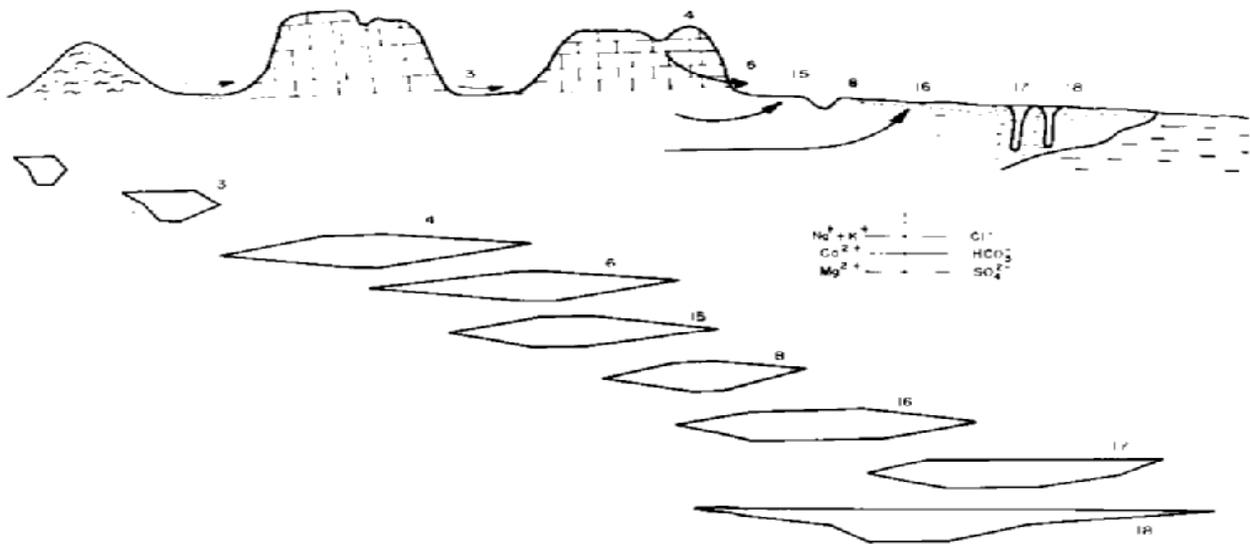


Fig. 3. Representación de la composición química de las aguas de la cuenca del río Cuyaguaje mediante diagramas de barras.

**Fig. 4 Representación de la composición química de las aguas de la cuenca del río Cuyaguateje mediante diagramas de barras.**

Los mapas hidrogeoquímicos ofrecen una valiosa información sobre las relaciones existentes entre el quimismo de las aguas y las condiciones geológicas, así como físico-geográficas, cuando se superponen en el mismo, la litología presente, la red de drenaje y los diagramas (circulares o de Stiff) con la composición química de las aguas (Fig. 4).

Otro método gráfico utilizado para la representación de la composición química de un agua es el de tipo triangular. El más sencillo consiste en el empleo de dos triángulos equiláteros, uno para los aniones y otro para los cationes, donde cada vértice representa 100 % de un ion particular. Schoeller ha propuesto el uso de un triángulo único, en el cual sobre los ejes se representa la concentración (% meq/l) de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ ;  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ ;  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Las concentraciones aniónicas determinan un punto y las catiónicas otro. El agua queda definida por el eje que une ambos puntos.

Los diagramas triangulares de Hill y Piper tienen como ventaja en relación a los anteriores, que permiten representar un gran número de muestras en un sólo gráfico. En éstos, los triángulos de aniones y cationes ocupan los ángulos inferiores izquierdo y derecho con sus bases alineadas. La parte central del diagrama posee forma de rombo y sobre éste se proyectan los puntos de cada uno de los triángulos por medio de una recta paralela al borde superior del rombo. La intersección de estas dos rectas representa la composición del agua con respecto a una determinada agrupación de aniones y cationes (Fig. 5).

Se debe destacar las posibilidades que ofrecen los diagramas de tipo vertical en la representación gráfica de la composición química de un grupo numeroso de muestras. En estos diagramas se coloca en el eje de ordenadas la concentración (en mg/l, meq/L o % meq/L) y en el eje de las abscisas los distintos iones presentes. El más usado de estos es la variante propuesta por Schoeller, en la cual la composición química se expresa en unidades logarítmicas.

Recientemente se ha propuesto por Defrancesco (1991) un tipo de diagrama circular (Fig. 6) en el cual se representa en una escala logarítmica tanto macro como microconstituyentes y en la misma gráfica se representa la composición de la muestra estudiada y la del patrón de agua potable, mineral o de bebida envasada según la norma correspondiente (Tillán et. al, 1996).

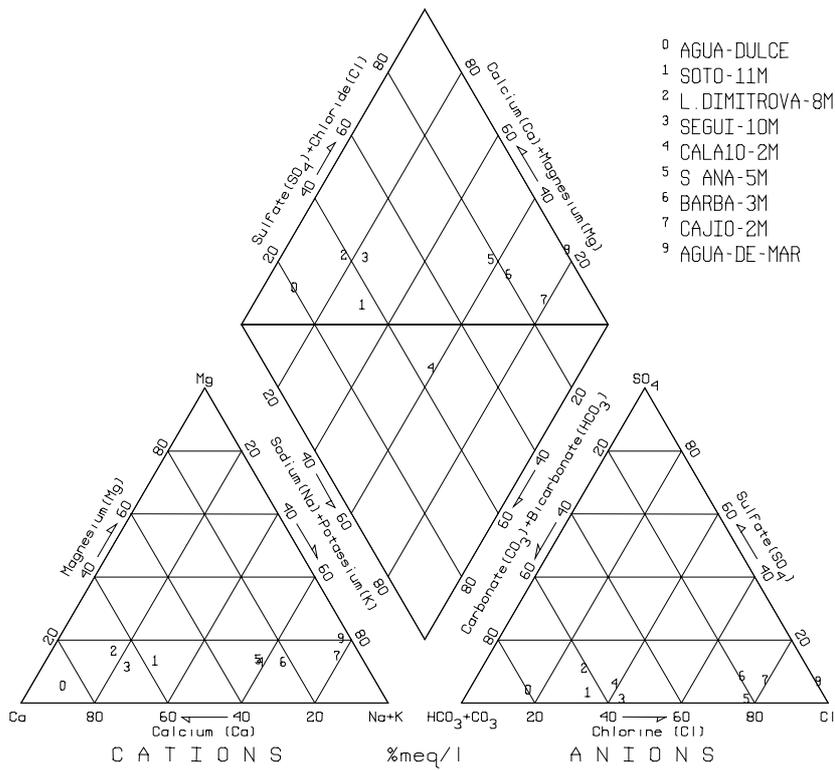


Figura 5. Diagrama de Piper-Hill-Langelier. Sector hidrogeológico Güira-Quivicán de la Cuenca Sur de La Habana.

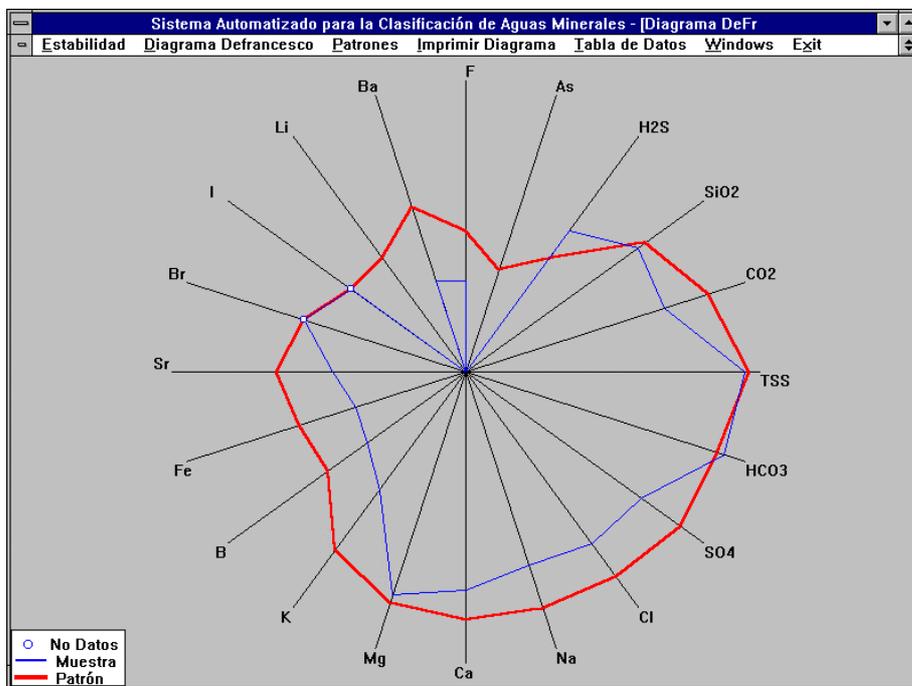


Fig. 6: Diagrama Hidroquímico Defrancesco donde se comparan los datos del pozo PH10 de San Miguel de los Baños con la Norma Cubana de Agua Mineral.

## **Clasificación de las aguas desde el punto de vista geológico**

En forma general, las aguas naturales se han clasificado de formas distintas sobre la base de su génesis, tipo de roca asociada, sus características químico-físicas, agresividad, uso y otras propiedades.

Sobre la base de su génesis, se han clasificado de forma diferente por distintos investigadores, éstas pueden agruparse de la manera siguiente (White et al, 1963):

1. Aguas juveniles (no involucradas en la circulación atmosférica).

a) Magmáticas.

Otras aguas juveniles.

2. Aguas surgentes o reciclables (involucradas en la circulación atmosférica).

a) Aguas meteóricas.

Aguas de precipitación (lluvia o nieve).

Aguas de suelo.

Aguas subterráneas cercanas a la superficie (subsuperficiales).

b) Aguas oceánicas que penetran en los acuíferos.

c) Aguas fósiles o connatas.

De origen marino.

De origen no marino.

ch) Aguas metamórficas.

Aguas con alto contenido de CO<sub>2</sub> y boro.

Otros tipos de aguas.

3. Aguas magmáticas

## **Clasificación del agua por su uso**

La composición química de un agua natural, en función del uso que a la misma se le da, se denomina calidad del agua, y existen una serie de normas que regulan las concentraciones permisibles que debe poseer cada elemento o indicador de calidad según los diferentes usos. Por ejemplo, las normas establecidas para que un agua se pueda utilizar para el abasto exigen un contenido despreciable de los componentes de los ciclos del nitrógeno y el fósforo. Sin embargo, para el riego las aguas deben poseer un alto contenido de los mismos.

Relacionadas con la calidad del agua, se encuentran las medidas a tomar en la colección de la muestra. García y Beato (1979) han propuesto un grupo de recomendaciones para el muestreo de aguas y el control de su contaminación.

Además de la calidad químico-física de las aguas es necesario controlar la calidad bacteriológica. La contaminación del agua por organismos patógenos se debe principalmente al vertimiento o percolación de residuales urbanos, o agroindustriales, puesto que este tipo de microorganismo no se origina en las condiciones naturales.

Antiguamente la calidad bacteriológica en ríos, lagos y aguas subterráneas, no se controlaba mediante la determinación de microorganismos patógenos, sino a través de la identificación de bacterias fecales, es decir, bacterias que subsisten normalmente en el tracto digestivo humano. En general, se utilizaba como índice las bacterias pertenecientes al grupo coliforme. Existe una relación aproximada entre la cantidad de estas bacterias y las de tipo patógenas, tales como: salmonelas, aeromonas, seudomonas, clostridium, estafilococo y shigella.

Las aguas superficiales y subterráneas, si se atiende al carácter de su utilización, se pueden clasificar en diez grupos (Ferro, 1982):

1. Suministro rural y urbano.
2. Regadío para la producción agraria.
3. Abastecimiento para los procesos industriales.
4. Producción de energía mecánica y eléctrica.
5. Agua para fines terapéuticos.
6. Consumo mediante embotellamiento.
7. Carga, descarga y transportación.
8. Conservación de la flora y fauna silvestre.
9. Reproducción y consumo de plantas y animales acuáticos.
10. Agua para fines recreativos y culturales.

Existe una clasificación que además de las diez consideraciones anteriores, relaciona los principales parámetros químico-físicos y bacteriológicos utilizados en el control de la calidad de las aguas (Gutiérrez, 1982). Para la mayoría de los usos que se le da al agua, existen normas establecidas por el Instituto Nacional de los Recursos Hidráulicos (INRH), y el Ministerio de Salud Pública (MINSAP), organismos encargados en Cuba de velar por la preservación de la calidad del agua.

Otro método de determinar la calidad de las aguas, consiste en evaluar un determinado índice de calidad (García, 1988), que representa la suma de diferentes indicadores del deterioro de la misma, a los cuales se les da un peso diferente en dependencia de los objetivos del control.

### **Clasificación hidroquímica**

Los criterios químico-físicos de la clasificación de las aguas naturales en general, se basan en el contenido de los iones más abundantes.

En la literatura aparecen numerosas clasificaciones que responden a diferentes objetivos (García, 1988; Catalán, 1988). De su análisis se puede considerar como más ventajosas las siguientes:

1. Clasificación de Alekine.
2. Clasificación de Shchoukarev.
3. Clasificación de Kurlov
4. Clasificación de Palmer.
5. Clasificación de Schoeller.

En Cuba se suelen utilizar para la clasificación de las aguas naturales, el método de clasificación de Kurlov, el cual toma en consideración los aniones y cationes que exceden el 20 % de meq/L, y el de Shchoukarev, que toma en cuenta un 25 % de los mismos.

### **Factores que determinan la composición y evolución química de las aguas naturales**

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

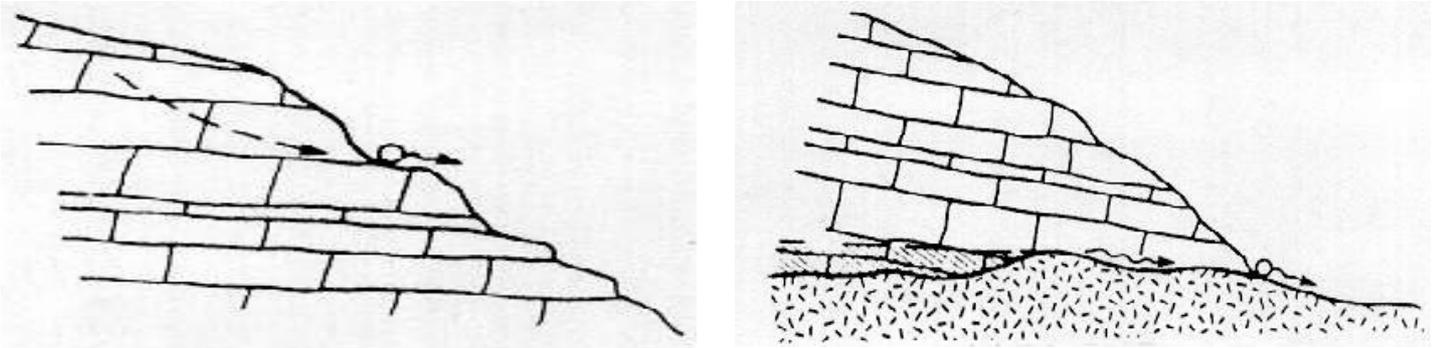
Se debe esperar que la infiltración por percolación de las precipitaciones en rocas salinas, origine aguas superficiales y subsuperficiales (acuíferas) de tipo cloruradas alcalinas; en los depósitos de yeso o anhidrita, sulfatadas cálcicas; en las calizas y dolomías, bicarbonatadas cálcicas o cálcico-magnesianas; en las secuencias con abundante pirita, aguas con alto contenido de ion sulfato; en los granitos y otras rocas insolubles ácidas, aguas del tipo alcalinas o alcalino-térreas según el catión dominante, mientras que en las rocas ultrabásicas, éstas son bicarbonatadas magnesianas.

Sin embargo, en el caso de las aguas minerales, su composición por lo general no refleja las propiedades del material acuífero de la zona de alimentación, sino más bien, las características del propio acuífero confinado, de las capas confinantes y de los flujos hidrotermales.

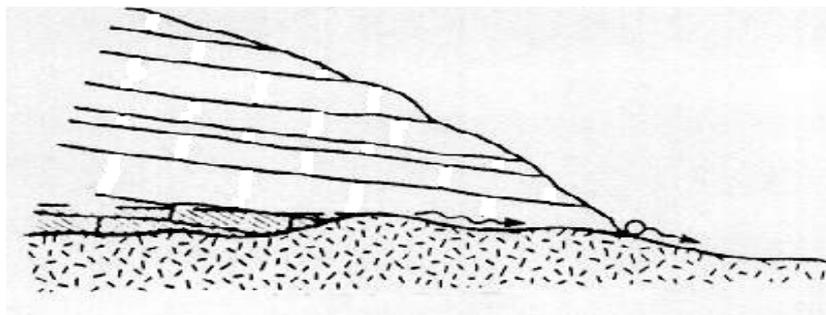
Los factores químico-físicos están regidos por las leyes termodinámicas que controlan la disolución de los minerales, estos factores desempeñan un papel importante en la forma en que las aguas naturales adquieren su composición química. Entre estos se destacan: la solubilidad de los minerales, el contenido de gases disueltos, las condiciones del sistema (abierto o cerrado) en que la disolución tiene lugar, el pH, el potencial redox, el efecto salino o de fuerza iónica, el efecto de ion común y otros que se han discutido en este trabajo. En las figuras 3 y 4 se muestran los procesos geoquímicos que originan la composición química de aguas que drenan sedimentos de tipo carbonatado y no carbonatado respectivamente.

Los factores geológicos se relacionan con la litología (composición de los minerales de las rocas), el estado de yacencia de las secuencias estratigráficas, la tectónica, el agrietamiento, la textura y porosidad de las rocas, etc. La litología determina, por lo general, las facies hidroquímicas dominantes en una región determinada, es decir, el tipo de agua. Así por ejemplo, en los terrenos cársicos carbonatados las aguas suelen ser del tipo bicarbonatada cálcica. Los aspectos vinculados al agrietamiento y porosidad de las rocas influyen de manera determinante en el estado de división de las partículas, mientras más pequeña sea ésta, poseerá mayor superficie y facilitará la disolución del mineral. Las aguas que drenan a través de rocas calcáreas, muy trituradas por los procesos tectónicos, adquieren un contenido mayor de calcita disuelta que aquéllas que drenan a través de calizas más compactas.

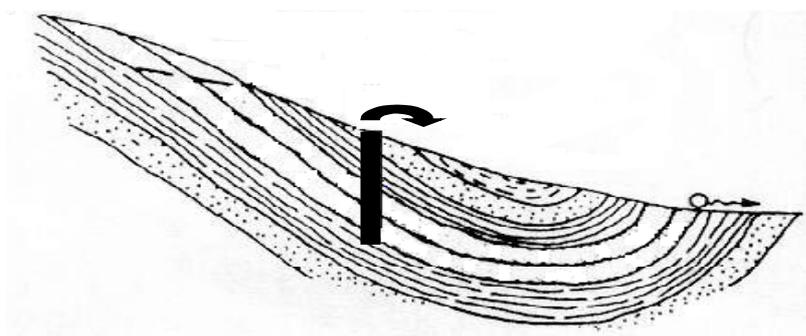
Los factores hidrogeológicos están relacionados con la permeabilidad del acuífero, el tipo de flujo, su velocidad, así como la zona por donde se mueve el agua. Todos estos aspectos inciden en el tiempo de contacto entre el agua y el mineral, por ejemplo, si el flujo tiene lugar en condiciones difusas a través de las rocas, el tiempo de interacción del agua con los minerales es más lento y, por tanto, la cantidad de minerales disueltos es mayor que si las condiciones de flujo son de tipo turbulentas a través de grietas más o menos amplias. En la figura 7 se muestran diferentes formas de movimiento de las aguas subterráneas y su emergencia de acuíferos carbonatados y no carbonatados.



Zona de saturación (acuífero libre)



Circulación profunda (acuífero confinado)



**Figura 7: Movimiento del agua subterránea.**

El contenido de  $\text{CO}_2$ , la dureza y otras propiedades químico-física de las aguas naturales difieren de acuerdo con la forma en que se mueve el agua y la zona hidrogeológica que ocupa. En la zona de alimentación del acuífero (visto el movimiento en sentido horizontal) o en la zona de aireación (visto en sentido vertical), el contenido de  $\text{CO}_2$  de las aguas es relativamente elevado, puesto que en estos lugares tienen lugar los intensos procesos de descomposición bacteriana de la materia orgánica. El pH en esta zona suele no ser elevado y la dureza pequeña. En la zona de conducción del acuífero el nivel de  $\text{CO}_2$  suele ser menor, porque una parte del gas es consumido, como consecuencia de la

interacción del agua con los minerales del medio rocoso. El agua en esta zona adquiere una mayor mineralización y un pH más elevado. Esta evolución se hace más evidente si, por ejemplo, se muestrea un perfil de pozos desde la zona de alimentación hasta la de emisión del acuífero. A medida que el agua se aleja de la zona de alimentación decrece el  $\text{CO}_2$  y aumentan el pH, así como el contenido de calcita disuelta.

En la zona saturada, las aguas adquieren una mayor mineralización. Sin embargo, como resultado de los procesos de mezcla de aguas, éstas pueden hacerse agresivas nuevamente y continuar disolviendo minerales. En la zona de circulación profunda, las aguas se caracterizan por presentar elevados contenidos de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4^{2-}$  y  $\text{NaCl}$  disueltos. En ocasiones aún poseen cantidades elevadas de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ , y en los manantiales por donde emergen precipita el exceso de calcita y yeso. Además poseen, por lo general, una temperatura más elevada y estable que las de tipo meteóricas, la circulación es más lenta y su caudal menor, el tiempo de interacción con los minerales es mayor. En estas condiciones pueden cambiar su típico patrón hidrogeoquímico.

En un trabajo desarrollado en Australia por Chebotarev (en Frezze y Cherry, 1980), en el cual fueron muestreadas más de 10 000 aguas de pozos, se llegó a la conclusión de que en la naturaleza, las aguas subterráneas tienden a evolucionar hacia la composición del agua de mar. El observó que esta evolución química en cuanto a los aniones dominantes, sigue aproximadamente las regularidades siguientes:  $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{Cl}^-$

Estos cambios ocurren en la medida que el agua se mueve desde zonas de grandes caudales, a través de zonas intermedias, hasta zonas donde los flujos son escasos y el agua es vieja desde el punto de vista geológico.

En las regiones cársicas montañosas de Cuba, la evolución química de las aguas sigue una tendencia similar a la observada por esos investigadores y alcanzan, por lo general, las facies ricas en  $\text{SO}_4^{2-}$

Las aguas naturales con elevados contenidos de cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) se suelen encontrar en regiones llanas que presentan gran agrietamiento o fallas, donde los horizontes acuíferos someros se ponen en contacto con otros más profundos. También en algunos pozos artesianos, que se han abierto a grandes profundidades durante los trabajos de prospección geológica o de búsqueda petrolífera; así como en las zonas litorales donde las aguas del acuífero cársico se mezclan con las de mar y como resultado de este proceso se incrementa la solubilidad de los minerales carbonatados (efecto de mezcla de agua y efecto salino o de fuerza iónica).

Los factores de tipo geomorfológico también influyen en la composición química de las aguas, en especial, el escarpe de los macizos, el tipo de vegetación, el grado de erosión de los terrenos y la naturaleza de las propias formas del relieve. A pesar de que las formas de adsorción (dolinas, sumideros, etc.), se pueden considerar el resultado de los procesos cársicos, una vez creadas esas formas, las mismas facilitan o limitan la ulterior acción de corrosión química sobre el medio, lo cual se refleja en la composición química de las aguas.

Otros factores que también influyen sobre la composición química de las aguas naturales son los de tipo pedológicos, los cuales están asociados al tipo de suelo que yace sobre las secuencias estratigráficas. El suelo puede ser el resultado del intemperismo de la roca o tratarse de una cobertura de origen fluvial, pluvial o glaciar; su espesor puede variar desde un grosor apreciable hasta llegar a ser muy escaso o ausente. De sus características y condiciones pedoclimáticas depende la actividad microbiológica asociada, así como de la producción de gases y ácidos disponibles, que luego son arrastrados por las lluvias o las nieves al fundirse, haciendo posible la disolución de los minerales que forman parte del paquete de rocas subyacentes. En el caso de un macizo desnudo, el agua de las precipitaciones puede adquirir el  $\text{CO}_2$  directamente de la atmósfera, pero en una proporción menor que la que se produce en el suelo.

Los factores microbiológicos también juegan un notable papel en el proceso de adquisición de la composición química de las aguas. Las bacterias catalizan las reacciones químicas que ocurren en el medio que de otro modo requerirían elevadas temperaturas y presiones. La microflora del suelo está compuesta de poblaciones de algas, actinomicetos, bacterias nitrificantes, desnitrificantes, desintegrantes de la celulosa, sulfobacterias y productoras de pigmentos, hongos y protozoos. Los microorganismos también están muy difundidos en las aguas naturales, incluso en condiciones de elevadas temperatura como ocurre en algunas fuentes mineromedicinales. El control de estos

organismos, tanto en el suelo como en las aguas, es de gran importancia para determinar el estado de estas últimas y para su explotación en el termalismo de salud.

Los factores climáticos intervienen de forma activa en la dinámica de la meteorización mecánica y química de los macizos, al permitir en el primer caso la fragmentación, traslado y acarreo de los minerales lejos del lugar de origen, así como facilitar en el segundo caso, la disolución de los minerales de las rocas. Mientras más intensa sea la acción mecánica, más facilitará al agua su acción corrosiva. En la figura 5 se muestra el efecto de las precipitaciones sobre la conductividad eléctrica, el caudal y la composición química de un agua que emerge de una surgencia cársica.

Los elementos del clima más determinantes en el modo en que las aguas adquieren su composición química son: la temperatura, humedad relativa, intensidad y duración de las precipitaciones, intensidad y duración de las radiaciones, velocidad del aire, entre otros.

Por último, se debe destacar el papel que desempeña el factor antrópico en la composición química de las aguas.

### **Variación espacial y temporal de la composición química de las aguas naturales**

Los cambios temporales en la composición química de las aguas naturales se han clasificado en función de la escala de tiempo como: cambios seculares (producidos en el orden del tiempo geológico) y cambios a corto plazo (Paces, 1980). A cada una de estas categorías le corresponden a su vez, cambios de tipo periódico, abrupto y sistemático.

Los cambios seculares se refieren a la evolución del agua oceánica en el orden del tiempo geológico. Como ejemplo de este tipo de cambio se puede considerar la variación de la relación iónica entre  $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$ , experimentada en los sedimentos carbonatados durante los últimos 2 000 millones de años.

En realidad los cambios de la composición química de las aguas a corto plazo son más estudiados, por su posible medición.

Los cambios periódicos se observan a menudo como respuesta a la radiación solar y pueden ser de tipo diurno o estacional, como ejemplo del primer caso se puede considerar las variaciones que se producen en el intervalo de 24 h en las magnitudes del contenido de  $CO_2$ , las concentraciones de los iones  $HCO_3^-$  y  $Ca^{2+}$ . Estos cambios son inducidos por los organismos fotosintéticos cuya respiración durante la noche incrementan el  $CO_2$ , mientras que por el día esta actividad disminuye y causa una variación en el equilibrio de los carbonatos.

Los cambios estacionales de la composición de un agua están determinados por las variaciones en la temperatura y el régimen de precipitación en las diferentes estaciones del año (Fig.8). En Cuba se distinguen en la práctica dos períodos: el seco, que se extiende desde noviembre a abril y el lluvioso, de mayo a octubre.

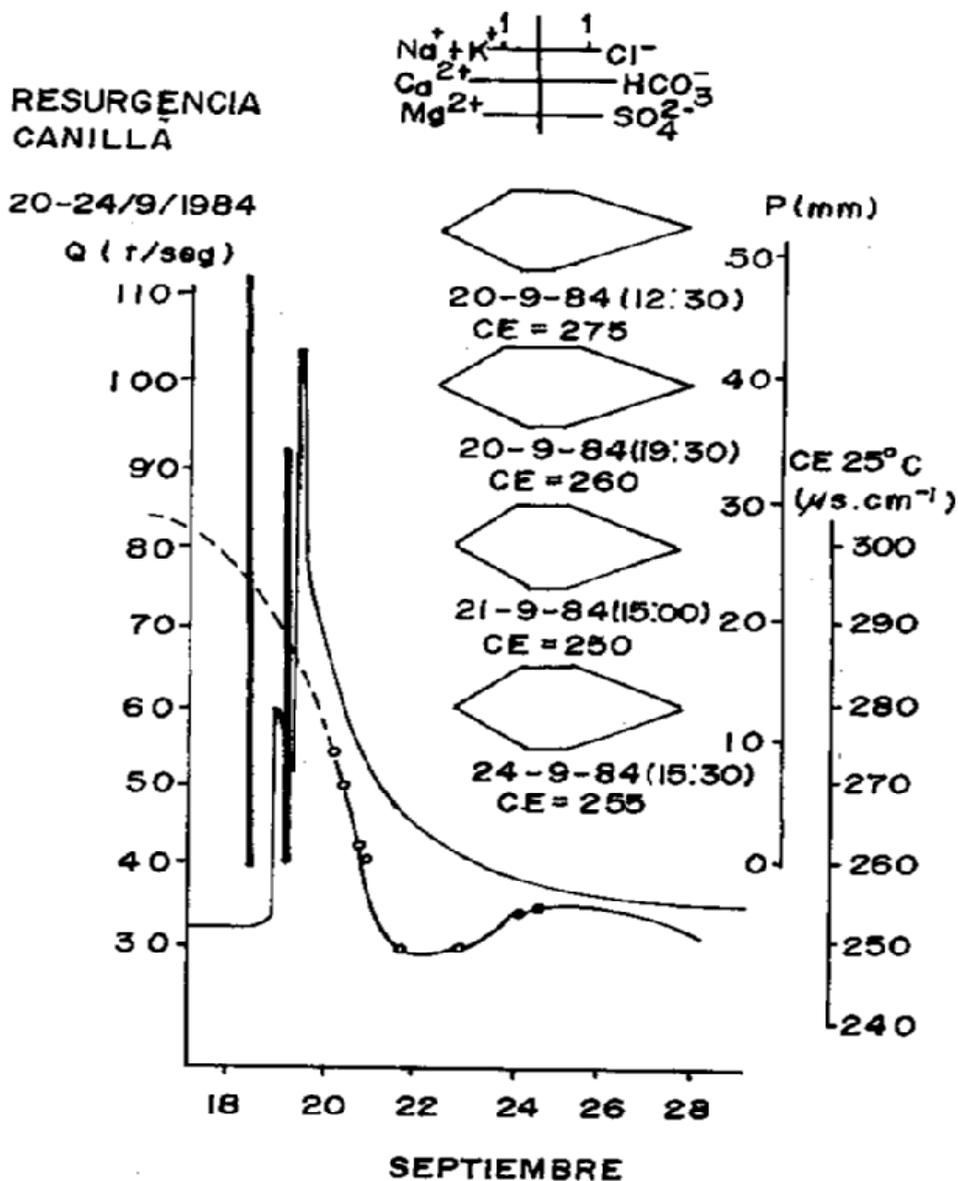
Los cambios abruptos en la composición química de las aguas naturales son causados, por lo general, por la transición de un agua de un medio ambiente a otro, cuyas propiedades químico-físicas y biológicas son muy diferentes.

Por último, los cambios sistemáticos son de tipo continuo y no periódico, que se manifiestan en la variación de la masa disuelta desde un estado inicial hasta otro final.

La composición química espacial de las aguas en una región determinada, sólo da una información parcial del funcionamiento de ese medio. La variación a lo largo de uno o más años hidrológicos, así como durante los períodos de intensas lluvias, ofrece mucho más información. Las determinaciones conjuntas a lo largo del tiempo de la composición química de las aguas y el caudal en los manantiales y pozos, así como el registro simultáneo de los elementos del clima, ofrece la oportunidad de correlacionar las respuestas hídrica y química en relación con las precipitaciones, lo cual permite conocer cómo está organizado interiormente el sistema rocoso. y brinda la posibilidad de discernir acerca de su carácter minero medicinal o no

La variación estacional de la dureza, la mineralización y la conductividad se ha utilizado por muchos investigadores para interpretar la forma en que se mueven las aguas en el medio. Shuster y White (1971) propusieron el empleo del coeficiente de variación de la dureza en lugar de la dureza misma, como un índice para determinar si las aguas se mueven en forma difusa o a través de conductos. Las

aguas que discurren por fisuras y conductos abiertos poseen un mayor coeficiente de variación (por encima del 5 %), puesto que en esas condiciones se produce un mayor efecto del clima en la fluctuación de la dureza.



**Figura 8. Variación Temporal de la conductividad eléctrica el caudal y la composición química de las aguas de un arroyo cársico.**

Como las aguas minerales se caracterizan por presentar una composición química estable, el coeficiente de variación de la mineralización o la conductividad puede ser un valioso indicador para evaluar el grado de fluctuación de su composición como consecuencia de los cambios en el régimen de precipitación y las condiciones de alimentación y estructuración del sistema. Aunque no se ha determinado la magnitud de este tipo de estadígrafo (coeficiente de variación) para discernir entre una agua mineral y otra no mineral, este valor siempre será inferior al 5 %.

En Cuba, como se ha señalado anteriormente, además del coeficiente de variación de la dureza se ha empleado la temperatura y la conductividad eléctrica, para distinguir la forma en que tiene lugar el escurrimiento del agua a través de los macizos carbonatados (Fagundo et al, 1981; 1986). Estos estadígrafos han sido incluidos también en el sistema informático SACAN (Tillán et al, 1996) para establecer cuándo un agua cumple lo establecido en las normas de agua mineral. Se puede tomar

como criterio que los coeficientes de variación de la mineralización, de la conductividad eléctrica y de los contenidos de los iones mayoritarios (mayor de un 20 % de meq/L) no deban exceder el 5 %.

Otro criterio para la caracterización del tipo de agua ha sido establecido por Bakalowicz (1979). El mismo utiliza como criterio la frecuencia de distribución de la conductividad eléctrica, la cual puede ser de tipo unimodal en aquellos acuíferos cuyas aguas se mueven a través de flujos difusos, o plurimodal, cuando las aguas se mueven a través de conductos o sistemas mixtos. Este método ha sido empleado por Fagundo et al (1997) para distinguir aguas superficiales o subsuperficiales de aquellas que proceden del drenaje profundo en la Sierra del Rosario.

### **Patrones hidrogeoquímicos y control de la composición química de las aguas naturales**

A pesar de que las aguas naturales adquieren su composición química mediante un proceso complejo como el que se acaba de analizar en el epígrafe anterior, donde intervienen diferentes factores, en un sitio determinado o área con cierta homogeneidad, muchos de éstos se hacen constantes y en esas condiciones la composición química absoluta del agua varía dentro de cierto rango, como consecuencia del régimen de lluvia: en los períodos lluviosos la mineralización es más pequeña que en los períodos secos. Sin embargo, la composición química relativa varía poco, especialmente en el caso de las aguas minerales, las cuales en todo momento mantienen su tipo hidroquímico y poseen por, lo general, un mismo patrón hidrogeoquímico. En las figuras 6 se muestra un agua cuya composición varía muy poco a través del tiempo, pudiéndose expresar la misma por un solo patrón hidrogeoquímico. Por el contrario, en la figura 7 se presenta el comportamiento de un agua que a través del tiempo sufre un progresivo deterioro y su composición en ese intervalo presenta varios patrones hidrogeoquímicos,

El uso de relaciones matemáticas entre la concentración iónica y la conductividad eléctrica de las aguas naturales, se ha propuesto sobre la base de un modelo de adquisición de la composición química, similar al que ocurre en un reactor de laboratorio donde se hace pasar una corriente de  $\text{CO}_2$  a un agua y se coloca un mineral carbonatado (Fagundo, 1985, 1990a; Fagundo y Pajón, 1987; Fagundo, 1996).

En este proceso cinético, la velocidad de disolución del mineral depende de su composición en la roca (litología). La concentración de los principales iones que resultan de este proceso se incrementa en el tiempo y sigue una función exponencial. Una función matemática similar presenta la conductividad eléctrica.

Si se grafica la relación entre la concentración de cada ion y la conductividad eléctrica se obtiene una línea recta que pasa por el origen de coordenadas, cuya pendiente depende de la litología (Fagundo, 1990 b). Por ejemplo, en el caso de una caliza pura constituida prácticamente por mineral calcita, la pendiente correspondiente a los iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$  son similares entre sí y sus magnitudes son mucho más grandes que las del ion  $\text{Mg}^{2+}$ . En una dolomía constituida por cantidades más o menos similares de calcita y dolomita, la pendiente correspondiente al ion  $\text{HCO}_3^-$  es del mismo orden que en el caso anterior, sin embargo, las pendientes correspondientes a los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  son en este caso similares entre sí y mucho menor que la del  $\text{HCO}_3^-$ .

Si se determinan las concentraciones iónicas al multiplicar las conductividades eléctricas, en cada momento en que se hizo el experimento, por las correspondientes relaciones matemáticas obtenidas, se encuentra que no existen grandes diferencias entre la composición química real y la obtenida por estos modelos matemáticos.

Basado en estos principios se elaboró un sistema automatizado (Alvarez et al, 1990) capaz de determinar en forma rápida los modelos de correlación matemática entre la concentración iónica y la conductividad eléctrica, con el objetivo del ulterior control de la composición química de las aguas mediante mediciones en el campo con conductímetros portátiles. En general, cuando uno de los factores es dominante en el modo de adquisición de la composición química de las aguas, las relaciones entre las concentraciones iónicas y la conductividad eléctrica son de tipo lineal. Si más de un factor posee un peso semejante en este proceso, las ecuaciones de segundo grado ajustan mejor. En este último caso se observa, por lo general, más de un patrón hidrogeoquímico.

En el caso de aguas subterráneas que se encuentran estratificadas como resultado de mezcla con el mar o con otro horizonte acuífero, como sucede en los acuíferos carbonatados litorales y en aguas de mezcla en general, la evolución ocurre según una serie de patrones hidrogeoquímicos en el que se va incrementando, de manera progresiva, el contenido relativo de los iones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  y en menor medida  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , así como decreciendo el de los iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$ . La actividad del hombre,

especialmente la sobreexplotación de los acuíferos para el abasto o el regadío altera los patrones hidrogeoquímicos naturales.

Para controlar la composición química de estas aguas mediante mediciones de conductividad eléctrica y el empleo de ecuaciones de correlación matemática, es necesario procesar los datos por tipos de patrones hidrogeoquímicos, en base a los cambios en sus relaciones iónicas, para lo cual dan buenos resultados los denominados métodos de reconocimiento de patrones. Estos métodos son especialmente útiles para la comparación y control de la composición química de las aguas minerales, ya que las mismas se caracterizan por presentar un sólo patrón hidrogeoquímico. Si en el procesamiento de los datos hidroquímicos de una fuente de posible origen termal se obtiene más de un patrón, se puede sospechar en un proceso de mezcla y desechar la hipótesis de que el agua es mineral. En las figuras 9 y 10 se presentan las variaciones temporales y patrones hidrogeoquímicos correspondientes a dos fuentes de abasto de la provincia de Pinar del Río.

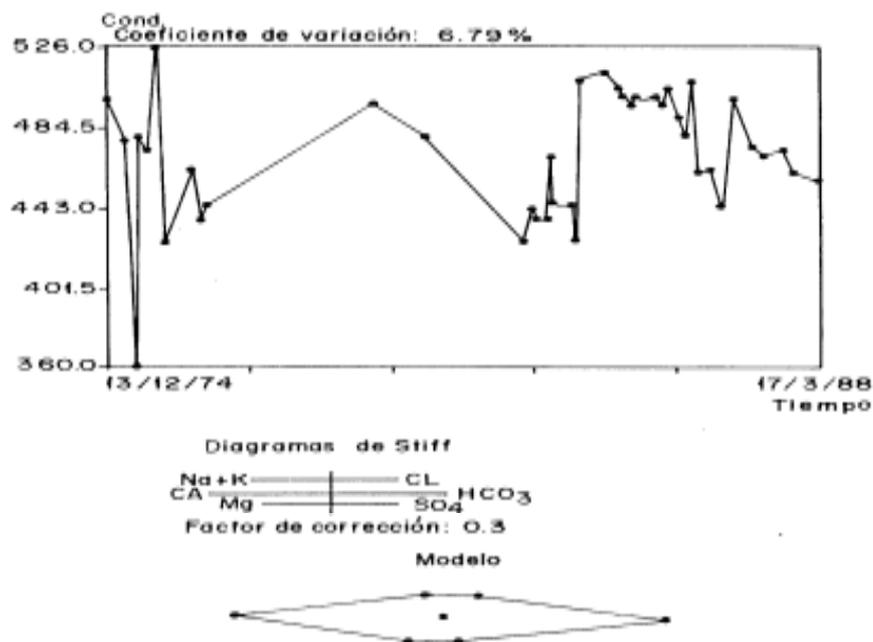


Figura 9. Variación temporal de la conductividad eléctrica y patrón hidrogeoquímico correspondiente, en las aguas de un pozo de abasto a la población en la provincia de Pinar del Río.

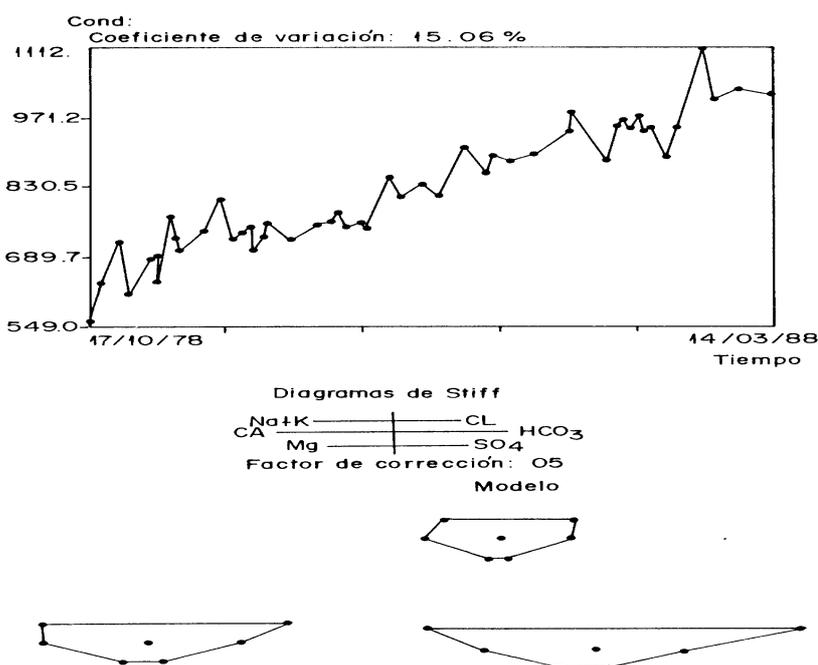


Figura 10. Variación temporal de la conductividad eléctrica y patrón hidrogeoquímico correspondiente, en las aguas de un pozo utilizado para el regadío en la provincia de Pinar del Río.

### **Zonas de protección y control sistemático de la calidad de las aguas**

La actividad del hombre causa un deterioro progresivo de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. A pesar de que estas últimas son menos susceptibles a la contaminación, una vez contaminadas, se hace muy difícil restablecer su calidad original (González y Jiménez, 1988).

Con vistas a preservar la calidad de los recursos hídricos, de forma tal que se puedan utilizar racionalmente en beneficio de la economía, se han establecido zonas de protección sanitaria, como tal se denomina el área alrededor de la toma de agua, donde se establecen diferentes tipos de regulaciones con el objetivo de evitar la contaminación y hacer mínimo el riesgo de su degradación.

En los últimos años, se han llevado a cabo muchas investigaciones aplicadas en el campo de la hidrogeología, con el objetivo de establecer las zonas de protección sanitarias alrededor de las fuentes de captación de interés económico social (Dioxian, 1987; Fritz y Pavicic, 1987; Kullman, 1987 y otros).

En Cuba se han realizado, recientemente, numerosos trabajos con vistas a establecer las zonas de protección sanitarias en acuíferos cársicos (González y Jiménez, 1988; Menéndez y Guerra, 1997).y de los yacimientos de aguas minerales y mineromedicinales (Ruz Peña et al, 1993); Expósito et al, 1993; Iraola y Lugo, 1993).

La falta de cultura en relación con lo que debe ser la zona de protección de una fuente de abasto o una fuente mineromedicinal, hace que con frecuencia se construyan letrinas en la misma área en que se encuentra el pozo que se utiliza para el consumo de las personas o un manantial empleado con fines balneológicos, lo cual da lugar a que por percolación pasen a la fuente gérmenes patógenos y se requiera instalar un sistema costoso de tratamiento del agua. Esta forma de contaminación era muy frecuente en muchos pueblos de nuestro país hace algunos años e incidía de manera significativa en un alto índice de parasitismo en la población infantil. Las unidades de Salud Pública, particularmente las de Higiene y Epidemiología velan porque no se produzcan enfermedades de tipo microbiológico tanto por ingestión de aguas contaminadas como por contacto en balnearios medicinales.

Con vistas al control de la calidad de las aguas naturales, también se han elaborado políticas y sistemas de vigilancia en el INRH, mediante el registro sistemático en una red de control de calidad, de algunos indicadores de tipo químico-físico y bacteriológico. En relación a las aguas minerales, el control de su calidad se garantiza a través de la Oficina de Minerales del MINBAS, de acuerdo a lo establecido en la Ley de Minas.

### **Bibliografía básica**

Fagundo J.R. Química del Agua Kárstica. En: Hidroquímica del Karst. Ed.: J.R. Fagundo, J.J. Valdés, J.E. Rodríguez. Univ. Granada (España), 15-119, 1995.