

Capítulo 12

TECNOLOGÍA INFORMÁTICA PARA EVALUAR LA AGRESIVIDAD DEL BIÓXIDO DE CARBONO EN EL AGUA

Introducción

Aunque las aguas naturales están compuestas por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, incluyen además especies neutras como el bióxido de carbono, aniónicas como bicarbonatos, carbonatos, fluoruros, etcétera, y catiónicas como es el caso del calcio, magnesio, y manganeso, entre otras.

La calidad de las aguas se va alterando durante del ciclo hidrológico o cuando son empleadas para uso doméstico o industrial. Algunos aspectos que modifican las características de las aguas están relacionados con las actividades humanas, por ejemplo, la construcción de presas, embalses y desviaciones de ríos pueden degradar seriamente la calidad de sus aguas (Manahan, 1996); otro ejemplo es la generación de una gran cantidad y diversidad de desechos, los cuales provocan trastornos en el ciclo hidrológico y en la circulación de las aguas; por lo que es frecuente encontrar sustancias en concentraciones tan altas que su depuración, en algunos casos, es prácticamente irreversible.

En su recorrido se van incorporando a las aguas algunos gases, líquidos y sólidos; unos se disuelven conservando su naturaleza, mientras que otros reaccionan con el agua o con otras especies existentes en ella formando nuevas sustancias químicas (Fair *et al.*, 1997).

Según las características químicas del agua, cuando ésta es utilizada en la industria o para el abastecimiento, pueden presentarse, en algún momento, ciertos problemas en las instalaciones de conducción o almacenamiento, derivados de la formación de sólidos insolubles que se incrustan en las superficies con las que el agua entra en contacto, o bien de productos de corrosión que van desgastando progresivamente los materiales. Además, este tipo de aguas tiende a presentar una mala apariencia, olor y sabor, así como un cierto grado de toxicidad.

Como puede apreciarse, todas las aguas presentan una química diferente, y la determinación de la corrosividad e incrustabilidad es un factor imprescindible para poder diseñar el tratamiento adecuado del agua antes de utilizarla y preservar la vida útil del material con que entra en contacto.

Aguas agresivas e incrustantes

De acuerdo con Rodier (1998), las aguas pueden corroer en frío a metales, calizas, cemento y algunos productos derivados como materiales de la construcción y hormigones, o precipitar sólidos insolubles que se aglomeran y se depositan en la superficie de los materiales. Las Figuras 1 y 2 muestran los efectos de corrosión e incrustación derivado de este tipo de aguas.

Entre las aguas agresivas se encuentran algunas aguas naturales de alcalinidad y dureza bajas, así como las aguas coaguladas, suavizadas por intercambio iónico o desmineralizadas (Fair *et al.*, 1997). Las aguas corrosivas debilitan la

pared de las tuberías al eliminar parte del material, en los puntos corroídos aumentan las tensiones debidas a las cargas, y se produce una rugosidad elevada que disminuye la capacidad portante de los ductos (Hernández, 1993). Dependiendo del material con el cual el agua entra en contacto, se puede provocar una coloración en el agua, e incluso en el caso de agua potable alterar su sabor (CNA, 1994).



Figura 1. Efectos corrosivos del agua.

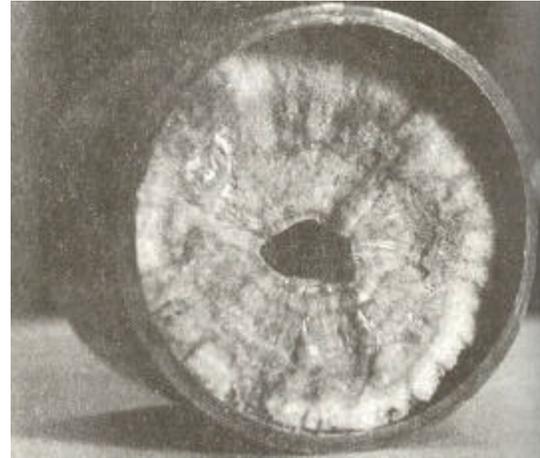


Figura 2. Efectos de incrustación del agua (Snoeyink y Jenkins, 1987).

Es importante tratar las aguas agresivas mediante las técnicas apropiadas según cada caso: neutralización con cal o carbonato de calcio, por filtración usando como medio filtrante el mármol (Hernández, 1993) o alguna zeolita o arcilla básica (Martínez, 2001; Ramírez, 2001; Martínez-Gallegos, 2000; Tsitsishvili *et al.*, 1992; Giannetto, 1990; Breck, 1974).

Con respecto a las aguas incrustantes, éstas acumulan depósitos en las líneas de distribución, calderas y otros equipos, así como en los filtros de grava y arena (Fair *et al.*, 1997), y en general en cualquier dispositivo que emplee agua o tanque de almacenamiento (Nalco, 1988). En el caso de las tuberías, estas aguas reducen la sección útil e incrementan la velocidad y la pérdida de carga; así mismo aumentan la rugosidad y disminuyen la capacidad portante (Hernández, 1993).

Las aguas incrustantes se pueden tratar usando por ejemplo la neutralización con sustancias ácidas, aereación, la precipitación química: precipitación de sulfatos formando yeso, precipitación con cloruro de bario, precipitación de fluoruros y fosfatos, con cal (Pérez y Espigares, 1999), o filtración usando como medio filtrante básico alguna zeolita o arcilla básica (Martínez, 2001; Martínez-Gallegos, 2000; Giannetto, 1990; Tsitsishvili *et al.*, 1992; Lin *et al.* 1991; Szostak, 1989; Breck, 1974).

Además de caracterizar las aguas naturales según su agresividad o incrustabilidad para uso doméstico e industrial, también es importante hacerlo en aquellos cuerpos de aguas que reciben aportes residuales municipales e industriales sin tratamiento. Dentro de los desechos que reciben se encuentran los metales pesados, los cuales se presentan como sedimentos y en formas disueltas, éstas últimas interactúan con otros componentes del agua y, bajo ciertas condiciones, provocan que el agua cambie su naturaleza a incrustante o agresiva.

Por lo anteriormente expuesto, es necesario utilizar la teoría apropiada para determinar, no sólo de manera cualitativa sino además cuantitativa, la naturaleza del agua, y mantenerla en equilibrio; el no aplicar el modelo adecuado, podría generar errores trascendentes en la interpretación de resultados o en los posibles diseños de tratamiento.

Influencia del CO_2 en las aguas

En términos generales, los problemas de corrosión o incrustación de las aguas se deben principalmente a la concentración de anhídrido carbónico libre (CO_2), aunque también pueden intervenir otros elementos como la dureza, el oxígeno disuelto (Allende, 1976), alcalinidad, ácidos húmicos, ácido sulfhídrico, sales y microorganismos (Rodier, 1998).

Para evitar el contacto del agua y reducir las posibilidades de corrosión es importante que los materiales mantengan una película de carbonato de calcio ($CaCO_3$) (CNA, 1994), esto se logra mediante la estabilización química del agua (Droste, 1997; Fair et al., 1997) la cual consiste en ajustar el pH, la concentración de bioóxido de carbono libre, o la concentración de carbonatos ($CaCO_3$) del agua a su equilibrio de saturación de $Ca(HCO_3)_2$. Dado que un agua estabilizada no disuelve ni precipita $CaCO_3$, no remueve las incrustaciones de $CaCO_3$ que pueden proteger a las tuberías contra la corrosión, ni precipitan depósitos de $CaCO_3$ que pueden obstruirlas.

Las aguas pueden contener diferentes cantidades de CO_2 libre, el cual influye en el comportamiento del carbonato de calcio contenido en tales aguas. Se dice que el CO_2 de equilibrio es la cantidad de dióxido de carbono que debe estar presente en el agua para mantener en solución al bicarbonato que se encuentra en dicha agua. Si existe CO_2 en exceso, éste ataca al $CaCO_3$ para aumentar la concentración del bicarbonato y mantener el equilibrio; por otro lado, si hay deficiencia de CO_2 , el $CaCO_3$ se precipita para disminuir la concentración de bicarbonato, aumentando así el CO_2 y restableciendo el equilibrio (González, 1997).

Si el CO_2 libre es mayor que el CO_2 de equilibrio, existe exceso de CO_2 , por lo que se considera que el agua es agresiva. Si el CO_2 libre es igual al de equilibrio, el agua está en equilibrio. Sin embargo, cuando el CO_2 libre es menor que el de equilibrio, existe deficiencia en el CO_2 de equilibrio, y se dice que el agua es incrustante.

Cuando el CO_2 se disuelve en el agua, reacciona con ella para formar ácido carbónico, el cual se disocia en iones hidrógeno y el ion bicarbonato, siguiendo la reacción (Nalco, 1988):



de donde, la primera constantes de disociación del CO_2 , se determina como:

$$K_1' = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3]} \quad (2)$$

La alcalinidad de gran parte de las aguas subterráneas es causada por las sales de bicarbonato (HCO_3^-) disueltas y tienen un pH de aproximadamente 8.2 a 8.4. En el rango de pH entre 4.4 y 8.2 existe un balance entre el CO_2 en exceso y los iones bicarbonato, arriba de un pH de 8.4, el CO_2 deja de existir en cantidades medibles, y el ión carbonato empieza a aparecer. La reacción en equilibrio, y la segunda constante de disociación del CO_2 se expresa como (Nalco, 1988):



$$K_2' = \frac{[H^+][CO_3^{=}]}{[HCO_3^-]} \quad (4)$$

El agua en equilibrio se encuentra parcialmente ionizada, por lo que su constante de equilibrio K_w es su producto iónico (Allende, 1976).



$$K_w' = [OH^-][H^+] \quad (6)$$

La ecuación de solubilidad del CaCO_3 está dada por (Allende, 1976):



$$K'_{ps} = [\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^-] \quad (8)$$

Por similitud con la definición de $\text{pH} = -\log H_1$ (Allende, 1976):

$$\text{p}K'_1 = -\log K'_1 \quad (9.1)$$

$$\text{p}K'_2 = -\log K'_2 \quad (9.2)$$

$$\text{p}K'_w = -\log K'_w \quad (9.3)$$

$$\text{p}K'_{ps} = -\log K'_{ps} \quad (9.4)$$

La distribución de las especies químicas relacionadas con el CO_2 se muestran en la *Figura 3*, el CO_2 combinado con el agua es H_2CO_3 , el HCO_3^- corresponde al CO_2 parcialmente entrelazado y el CO_3^{2-} al CO_2 enlazado.

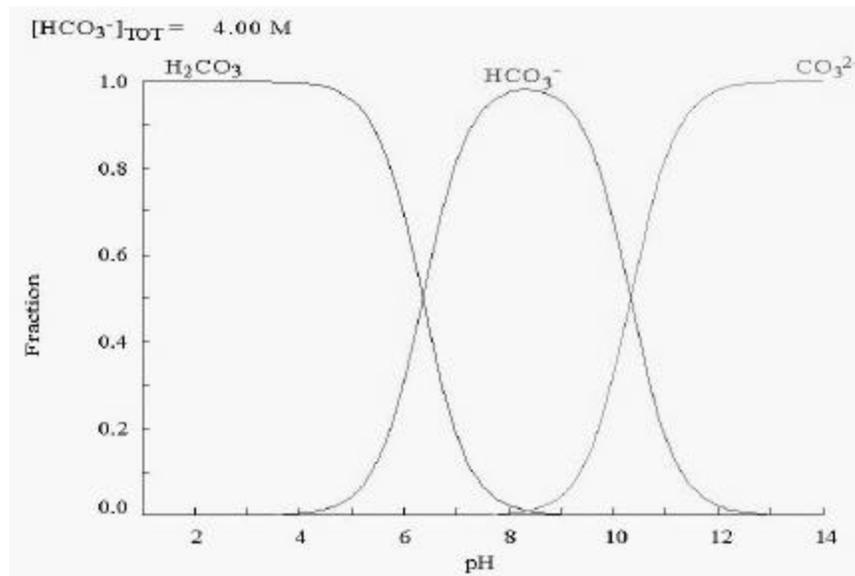


Figura 3. Diagrama de distribución de las especies químicas del CO_2 a $25\text{ }^\circ\text{C}$, sin efectos de fuerza iónica.

Teorías para determinar la agresividad del agua

Con respecto a otros métodos, como el índice de saturación de Langelier, el índice de agresividad, el índice de estabilidad de Ryznar, el índice de Larson y Duswell, el índice de corrosión de Riddick, el índice de fuerza de conducción de Mc Cauley, y los diagramas de Caldwell-Lawrence para determinar la agresividad e incrustabilidad del agua; el método de Mojmir Mach (Allende, 1976) interrelaciona aspectos como la aportación de los iones denominados “ajenos” (todos los cationes y aniones presentes en el agua diferentes al calcio, bicarbonatos, carbonatos y protones) con la fuerza iónica, las relaciones fundamentales de disociación del agua y del ácido carbónico y la ecuación de electroneutralidad.

La representación gráfica del equilibrio de saturación del método de Mojmir Mach (Allende, 1976) está basada en el diagrama de equilibrio de Tillmans (*Figura 3*), a través de un sistema de coordenadas con ordenada $[\text{H}_2\text{CO}_3]$ y abscisa

$\frac{1}{2}[HCO_3^-]$ que permite determinar la agresividad de un agua; este diagrama tiene la ventaja de que la ecuación de la curva de equilibrio es de fácil representación geométrica. En este sistema de coordenadas se pueden representar las concentraciones determinadas de $[H_2CO_3]$ y $[HCO_3^-]$ obtenidas a partir de la acidez y alcalinidad del agua, respectivamente, incluyendo los iones ajenos en el equilibrio de saturación. Si el punto está por debajo de la curva de equilibrio, se clasifica a ésta como un agua incrustante, y cuando está arriba de la curva se clasifica como un agua agresiva.

Los valores de las concentraciones alcanzadas en el equilibrio de $[H_2CO_3]$ y $[HCO_3^-]$ están dados por el punto de intersección entre las curvas de equilibrio y de evolución.

Rodier (1998) propone dos maneras para calcular el pH de saturación (pH_s), en función de los sólidos totales, la concentración de calcio, y la alcalinidad:

$$pH_s = F - \log \frac{1}{Ca^{2+}} - \log \frac{1}{Alc} \quad (10)$$

donde, F es el extracto seco en mg/L, Ca la concentración de calcio en mg/L, y Alc la alcalinidad como $CaCO_3$ en mg/L.

En términos de la segunda constante de disociación del ácido carbónico (pK), el producto de solubilidad del carbonato de calcio (pK_{ps}), la concentración de calcio $[Ca^{2+}]$, y considerando la actividad a través de la fuerza iónica (μ), en lugar de la concentración de un ion el pH_s es:

$$pH_s = 6.301 + pK_2 - pK_{ps} - \log [Ca^{2+}] - \log [HCO_3^-] + 2.5m^{0.5} \quad (11)$$

donde, $pK_2 - pK_{ps} = 2.09$, a una temperatura de 20°C (Allende, 1976).

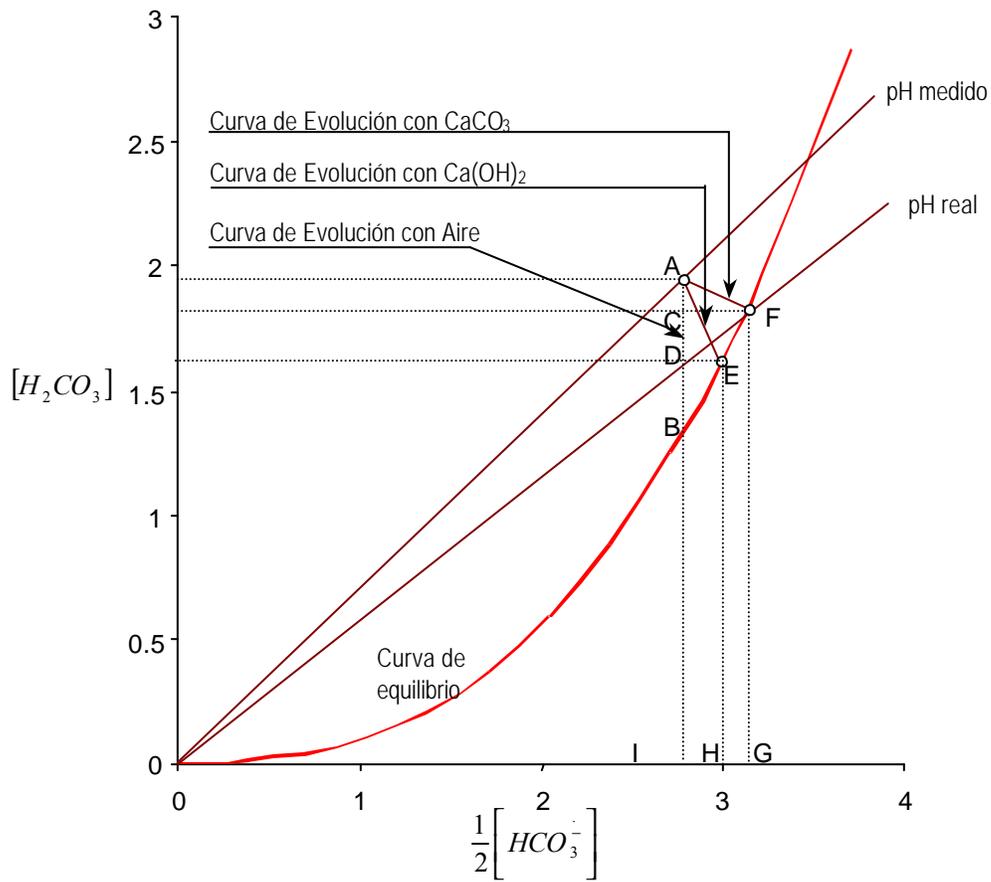


Figura 4. Diagrama de equilibrio de Tillmans (adaptada de Allende, 1976).

Para dar una medida sobre la estabilidad de un agua, Langelier (Rodier, 1998; CNA, 1994; JMM, 1985; ASTM, 1982; Allende, 1976) propuso el índice de saturación (I_s) el cual corresponde a la diferencia entre el pH del agua determinado directamente por el análisis y el pH de equilibrio o de saturación, y responde a la siguiente ecuación:

$$I_s = pH - pH_s \quad (12)$$

El resultado de esta expresión se interpreta de la siguiente manera: si $I_s > 0$, el agua es agresiva; si $I_s = 0$, el agua es inerte; y si $I_s < 0$, el agua es incrustante. Langelier consideró que este índice es sólo una relación cualitativa de la agresividad del agua y que su valor no ayuda para juzgar sobre su actividad real. Un valor mayor del índice de Langelier no coincide necesariamente con una mayor agresividad del agua (Allende, 1976).

La parte analítica del método de Mojmir Mach toma en cuenta algunos aspectos como la aportación de los iones denominados “ajenos” a la fuerza iónica (Snoeyink y Jenkins, 1987, Allende, 1976):

$$m = \frac{1}{2} \sum C_i Z_i^2 \quad (13)$$

donde C_i es la concentración molar del ion i -ésimo y Z_i su correspondiente carga.

La ecuación de electroneutralidad, la cual indica que la suma de cationes es igual a la suma de aniones expresados en equivalentes, al expresarla en concentraciones molares y al considerar como iones ajenos a todos los cationes $[cat]$ y aniones $[an]$ presentes en el agua y diferentes al calcio, bicarbonatos, carbonatos y protones, adopta la forma:

$$2[Ca^{2+}] + 2[Cat^{2+}] + [Cat^+] + [H^+] = 2[CO_3^{2-}] + 2[An^{2-}] + [An^-] + [HCO_3^-] + [OH^-] \quad (14)$$

donde Cat^{2+} son los cationes divalentes, Cat^+ los cationes monovalentes, An^{2-} los aniones divalentes, y An^- los monovalentes.

El método también considera las relaciones fundamentales de disociación del agua y del ácido carbónico, las cuales se expresan como constantes de equilibrio (ecuaciones 2, 4, 6 y 8), de donde:

$$K_1' = K_1 - e \quad (15.1)$$

$$K_2' = K_2 - 2e \quad (15.2)$$

$$K_w' = K_w - e \quad (15.3)$$

$$K_{ps}' = K_{ps} - 4e \quad (15.4)$$

donde e es un término corrector que está en función de la fuerza iónica, siendo definido por:

$$e = \frac{\sqrt{m}}{1 + 0.9\sqrt{m}} \quad (16)$$

Considerando la aportación de los iones ajenos, el pH de saturación (pH_s) es:

$$pH_s = 0.6301 + pK_2 - pK_{ps} - \log[m - A] - \log[m - D] + 2.5e \quad (17)$$

donde, $A = 2[Cat^{2+}] + [Cat^+] + [An^{2-}]$, $D = 4[An^{2-}] + 1/2[Cat^{2+}] + 3/2[An^-]$, Cat^{2+} son los cationes divalentes, Cat^+ los cationes monovalentes, An^{2-} los aniones divalentes, y An^- los monovalentes.

Con todo lo anterior, se puede calcular:

$$[Ca^{2+}] = \frac{1}{3}(m - A) \quad (18.1)$$

$$[CO_3^{2-}] = 0 \quad (18.2)$$

$$[HCO_3^-] = \frac{2}{3}(m - A) \quad (18.3)$$

$$[H^+] = \frac{2K_2'(m - A)(m - D)}{9K_{ps}'} \quad (18.4)$$

$$[H_2CO_3] = 4k(m - A)(m - D)^2 \quad (18.5)$$

$$\text{donde } k = \frac{4K_2'}{27K_1'K_{ps}'} \quad (18.6)$$

Finalmente, y de acuerdo con el método de Mojmir Mach, la agresividad puede determinarse como:

$$Agr = [Ca^{2+}]_{eq} - [Ca^{2+}]_{real} \quad (19)$$

$$Agr = [HCO_3^-]_{eq} - [HCO_3^-]_{real} \quad (20)$$

además, la concentración de bicarbonatos también puede utilizarse, junto con la concentración de ácido carbónico, para calcular la fuerza iónica en equilibrio, misma que nos permite obtener también la agresividad:

$$Agr = \frac{1}{3}(m_{eq} - m_{real}) \quad (21)$$

Las ecuaciones 19, 20 y 21 calculan la agresividad con resultados muy similares.

El cálculo de la agresividad del agua de Mojmir Mach está basado en la teoría de Langelier y en la representación gráfica de Tillmans para determinar si un agua es agresiva o incrustante, sin embargo, se puede usar un criterio similar o el propuesto por Langelier para conocer cuantitativamente la incrustabilidad del agua, es decir que cuando $Agr = 0$ el agua se encuentra en equilibrio, si $Agr > 0$ el agua es considerada como agresiva y en el caso de que $Agr < 0$ el agua es considerada como incrustante (Allende, 1976).

Adecuaciones al método de Mojmir Mach

Efecto de la temperatura

Cuando se tienen una diferencia significativa con respecto a los 20 °C, existe un efecto sobre las propiedades agresivas e incrustantes del agua; este efecto debe considerarse al calcular las constantes de equilibrio de la disociación del agua, del ácido carbónico, y de solubilidad del carbonato de calcio, para ello Masschelein (1992) presenta las siguientes ecuaciones, en grados Kelvin.

$$pK_1 = 353.3094 + 0.060919664T - \frac{21,834.37}{T} - 126.8339 \log T + \frac{1,684.915}{T^2} \quad (22.1)$$

$$pK_2 = 107.8871 + 0.03252849T - \frac{5151.79}{T} - 38.92561 \log T + \frac{563,713.9}{T^2} \quad (22.2)$$

$$pK_w = \frac{4471}{T} + 0.01706T - 6.087 \quad (22.3)$$

$$pK_{ps} = 171.9065 + 0.077993T - \frac{2839.319}{T} - 71.595 \log T \quad (22.4)$$

Dado que la constante k (ecuación 18.6), utilizada en el cálculo de las constantes de equilibrio anteriores, aumenta cuando la temperatura se eleva (Rodier, 1998), resulta importante considerar este efecto para cualquier temperatura en particular.

Cálculo del bióxido de carbono total

Utilizando el gráfico de Tillmans es posible conocer la cantidad de bióxido de carbono total, como se ha señalado anteriormente en la descripción del gráfico; sin embargo, sería apropiado considerar lo propuesto en el modelo de Legrand-Poirier (Rodier, 1998), que coincide con el planteamiento desarrollado por Mojmir Mach para el cálculo de los bicarbonatos y ácido carbónico, y a partir del cual se puede calcular la cantidad de bióxido carbónico total, simplemente sumando los bicarbonatos y el ácido carbónico como se expone en la siguiente ecuación.

$$[CO_2]_t = [HCO_3^-] + [H_2CO_3] \quad (23)$$

Tecnología informática

Como se ha observado, la aplicación del método de Mojmir Mach es complejo y requiere de cálculos exhaustivos que alientan el desánimo en su uso y aplicación. Una manera de promover el uso de un procedimiento como éste, es mediante el empleo de tecnologías informáticas.

La determinación de la agresividad e incrustabilidad del agua mediante una herramienta informática permite incorporar métodos y modelos complejos que en épocas pasadas eran difíciles de manejar; así mismo, como lo indica Zayas (2000), se resuelve un problema específico, se genera un avance tecnológico aplicable a cualquier parte del país, y permiten transferir la tecnología a otras áreas y usuarios de características similares, así como a personal no experto.

Para automatizar la metodología hidroquímica presentada anteriormente se propuso el lenguaje de programación Visual Basic 6.0 (marca registrada de Microsoft Corporation) por ser un lenguaje nativo del sistema operativo Windows (marca registrada de Microsoft Corporation), por la cantidad de componentes disponibles, su sencillez de programación, su portabilidad, y por la precisión que proporcionan sus tipos de datos.

El modelo informático desarrollado, y en etapa de refinamiento (*Figuras 5, 6 y 7*), considera la determinación tanto cualitativa como cuantitativa de la agresividad e incrustabilidad del agua, aplicando las teorías de Ryznar, Langelier, Tillmans, y Mojmir Mach. Se ha verificado que al automatizar dichas teorías mediante una computadora y un lenguaje de programación, se obtienen los mismos resultados que aplicando el método de manera manual, con la ventaja de que se elimina la intervención del personal técnico y/o especializado en los cálculos, para que de manera integral y confiable puedan determinar el tipo de agua y cuantificar su grado de agresividad e incrustabilidad, y proponer los métodos adecuados para mantener el equilibrio del agua.

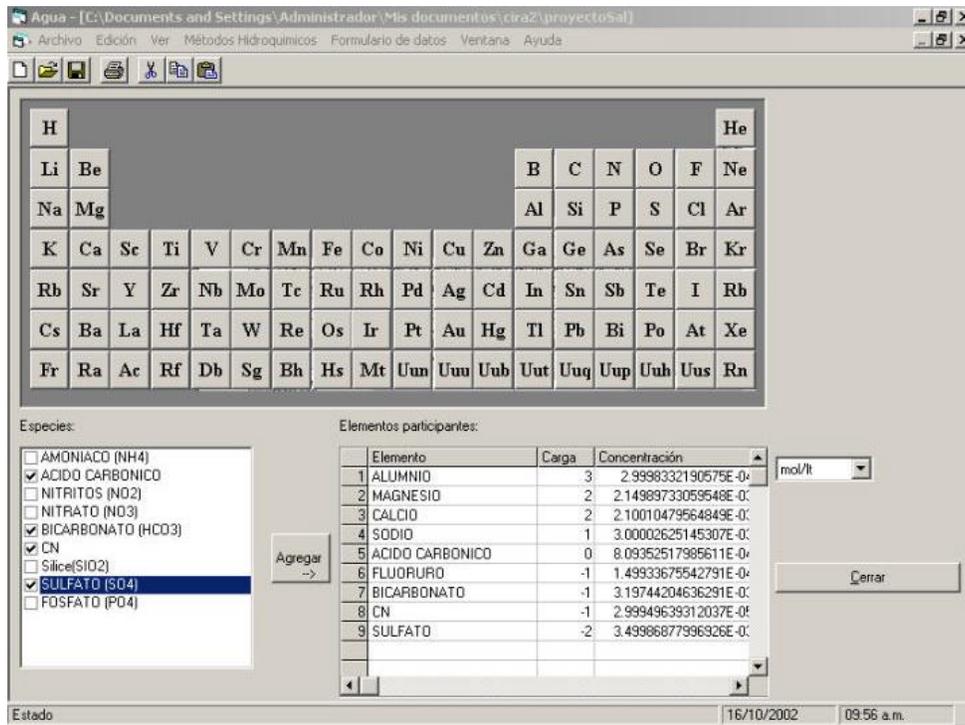


Figura 5. Selección de la composición química del agua

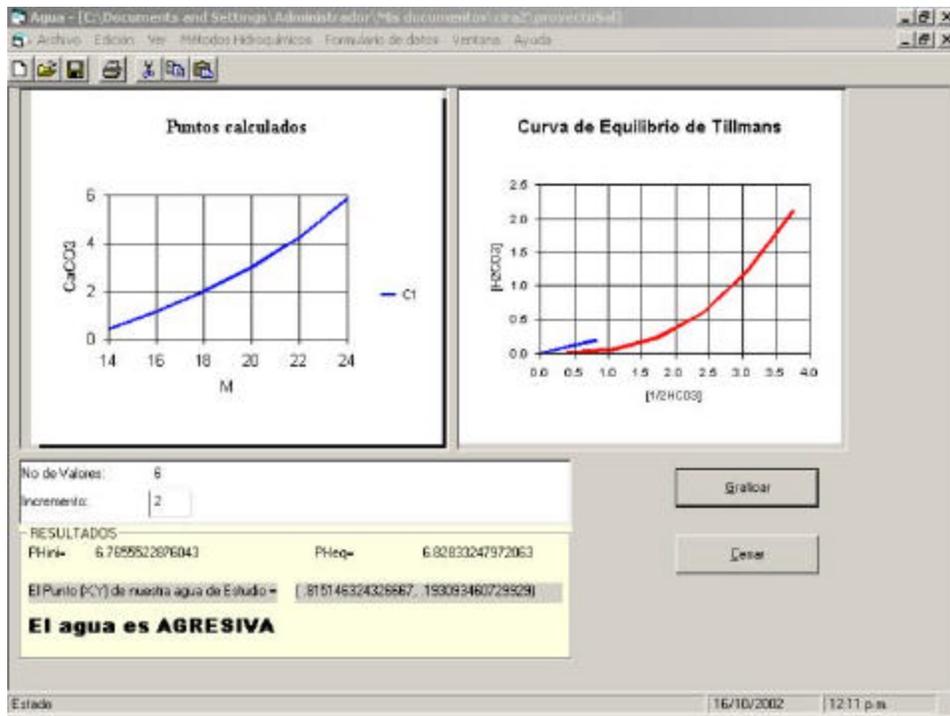


Figura 6. Resultados gráficos y numéricos tomando como base el modelo de Tillmans.

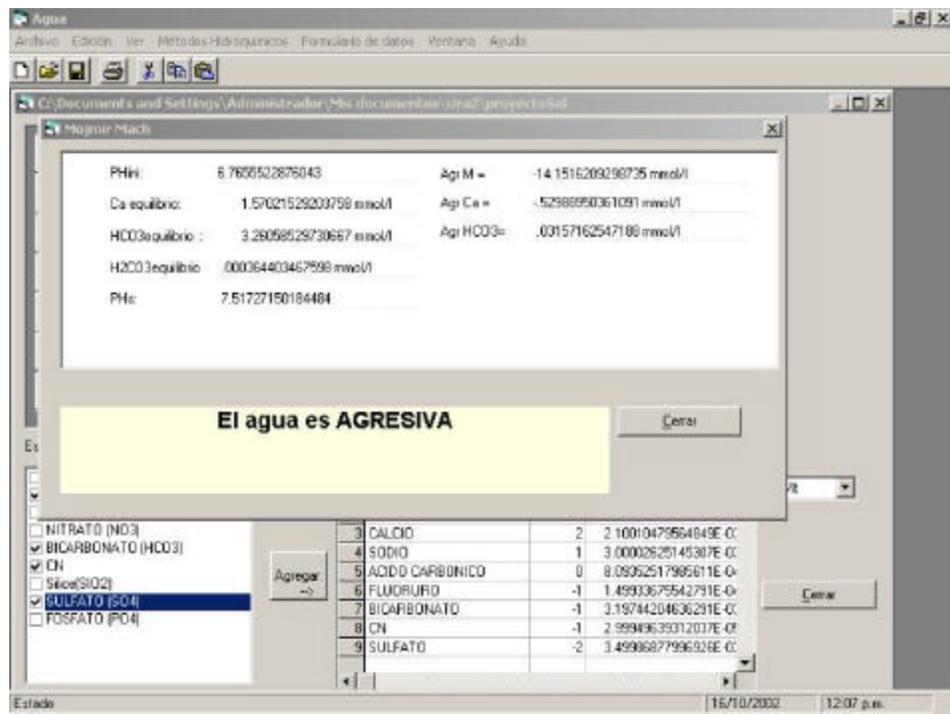


Figura 7. Resultados numéricos del modelo de Mojmir Mach.

Conclusiones

El profesionalista que se encarga de diseñar los métodos de tratamiento de aguas para uso industrial o doméstico, o para llevar a cabo estudios de caracterización de la calidad de las aguas naturales, requiere sin excepción, que sus diseños se fundamenten en los mejores análisis cualitativos y cuantitativos.

En algunas organizaciones no siempre se puede disponer de especialistas en el área para realizar los estudios hidroquímicos correspondientes, o bien, se llevan a cabo de manera incompleta o inadecuada, lo cual puede generar diversos problemas de corrosión o incrustabilidad por ejemplo en las tuberías de distribución, calderas, materiales de construcción, y hormigones, o en el caso de cuerpos de agua con aportes residuales se cometerían serios errores en la interpretación de resultados y en consecuencia en el diseño de un posible tratamiento.

Hoy en día es necesario hacer uso de la tecnología y los métodos de análisis pertinentes que permitan explotar debidamente la información disponible, por ello, es conveniente contar con herramientas informáticas que permita aplicar las metodologías de la forma más completa posible, y determinar fácil, confiable y adecuadamente la agresividad o incrustabilidad de las aguas analizadas.

Agradecimientos: Los autores desean agradecer a la Coordinación General de Investigación y Estudios Avanzados de la Universidad Autónoma del Estado de México por el apoyo brindado para el desarrollo del presente trabajo en el marco del proyecto “Sistema informático para la determinación de la agresividad e incrustabilidad del agua”, con clave 1558/2002.

Bibliografía

- ALLENDE, A. V. 1976. *Apuntes sobre Química del Agua*. I.S.P.J.A.E. Habana, Cuba. pp. 105-140.
- ASTM. 1982. *Manual de aguas para usos industriales*. American Society for Testing and Materials. Ed. Limusa. México. pp. 80, 81, 270, 274.
- BRECK, D. W. 1974. *Zeolite Molecular Sieves*. John Wiley y Sons. New York . pp. 761, 771.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 1994. *Protección catódica y recubrimientos anticorrosivos*. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Libro V 3.5.1. pp. 22-33.
- DROSTE, R. L. 1997. *Theory and practice of water and wastewater treatment*. John Willey & Sons, Inc. pp. 468-471.
- FAIR G. M. ; GEYER, J. C. OKUN, D. A. 1997. *Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales*. Vol. II. Ed. Limusa. México. pp. 133, 147.
- GIANNETTO, P. G. 1990. *Zeolitas. Características, propiedades y aplicaciones industriales*. Ed. Innovación Tecnológica. Caracas, Venezuela. pp. 24, 25, 70, 109-111.
- GONZÁLEZ, C. M. C. 1997. *Caracterización de las aguas de la cuenca del río Lerma a través de metodologías de especiación metálica y la construcción de gráficos Tillmans, de Langelier y Mojmir Mach*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. pp. 167-197.
- HERNÁNDEZ, M.A. 1993. *Abastecimiento y distribución de agua*. Servicio de Publicaciones de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid. pp. 715-730.
- JMM (James M. Montgomery, Consulting Engineers, Inc.). 1985. *Water treatment principles and design*. John Willey & Sons. pp. 346-348.
- LIN, J.; CHAO, K.; WANG, Y. 1991. *The location of cations in Cs-exchanged ZSM-5 zeolite*. *Zeolites*. 11: pp. 376-379.
- MANAHAN, S. 1996. *Environmental chemistry*, 6ª edición, Editorial CRC Press. Inc. Estados Unidos.
- MARTÍNEZ, M. V. 2001. *Eliminación del herbicida 2,4-D por medio de zeolitas y arcillas*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma del Estado México. Facultad de Ingeniería. pp. 90 - 104, 110-118.
- MARTÍNEZ-GALLEGOS M. S. M. 2000. *Remoción de cromo VI de agua de tenería mediante hidrotalcitas*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma del Estado México. Facultad de Ingeniería. pp. 20.
- NALCO (Nalco Chemical Company). 1988. *The Nalco Water Handbook*. McGraw Hill.
- PÉREZ, L. J. A.; ESPIGARES, G. M. 1999. *Estudio Sanitario del Agua*. Editorial Universidad de Granada. Universidad de Granada. pp. 229-233.

- RAMÍREZ, F. E. 2001. *Estudio sobre el comportamiento del europio en medios acuosos, enfocado al tratamiento de aguas contaminadas*. Tesis de maestría. Universidad Autónoma del Estado México. Facultad de Ingeniería. pp. 70-71
- RODIER, J., 1998. *Análisis de las aguas. Aguas naturales, aguas residuales, agua de mar*. Ediciones Omega S.A. pp. 121-130.
- SNOEYING, V.L.; JENKINS, D. 1987. *Química del Agua*. Limusa, Noriega Editores.
- SZOSTOKA, R. 1989. *Molecular sieves. Principles of synthesis and identification*. Ed. Van Nostrand Reinhold, New York, USA. pp. 28-32.
- TSITSISHVILI, G. V.; ANDRONIKASHVILI, T. G.; KIROV, G. N.; FILIZOVA, L. D. 1992. *Natural zeolites*. Ed. Ellis Horwood, Great Britain. pp. 111-114, 141-144.
- ZAYAS, S. J. C. 2000. *Los paquetes tecnodidácticos una opción para la transferencia de tecnología del IMTA*. XVI Congreso Nacional de Hidráulica. AMH-IMTA.