

CONSECUENCIAS ADYACENTES DEL DIÓXIDO DE CARBONO EMITIDO POR UNA FUENTE PUNTUAL EN EL AGUA SUBTERRÁNEA

M. en C.A. **Carolina Alvarez Bastida**^a, **Dra. Verónica Martínez Miranda**^{b*},
Dr. Pablo Romanazzi^c, **Dr. Abraham Benavides**^d,
Dra. Ivonne Linares-Hernández^b, **Dr. Marcos José Solache-Ríos**^e

^{a, b} Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Paseo Colón y Tolloca s/n, C.P. 50000, Toluca, Estado de México, México

mmirandav@uaemex.mx

^b Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Carretera Toluca-Ixtlahuaca, Km. 14.5, C.P. 50200, Toluca, Estado de México, México

^c Departamento de Hidráulica. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de la Plata. Calle 47 Nro. 200, 1er. piso, Of. 6.

^d University of North Texas, Chilton Hall 204F, 410 Avenue C, Denton, TX 76201, USA.

^e Departamento de Química, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, A.P. 18-1027, Col. Escandón, Delegación Miguel Hidalgo, C.P. 11801 México, D.F., México

Resumen

El cambio climático es un cambio significativo y duradero de patrones locales o globales del clima. Las causas pueden ser naturales o antropogénicas, por ejemplo, la emisión de CO₂ y otros gases. Hay estudios sobre este fenómeno en la atmósfera y poca información del impacto del aumento del CO₂ en el agua subterránea. Elevadas concentraciones de CO₂ causan disminución de pH, incremento de Na, K, y de alcalinidad, de metales y de sustancias de rocas o subsuelo inadecuadas para el consumo humano. El agua subterránea generalmente es de buena calidad, que en las últimas décadas ha sido vulnerable a la contaminación y efectos del cambio climático.

Allende en 1976, planteó el uso conjunto de los diagramas de equilibrio de Tillmans, del índice de saturación de Langelier, de la relación de índices de Langelier, de la corrección por fuerza iónica de Mojmir Mach y de la modificación de éste para determinar cualitativamente y cuantitativamente el comportamiento del CO₂. En este trabajo se estudió el comportamiento del CO₂ en el agua subterránea con una fuente puntual que produce de manera continua 108 toneladas de CO₂ por año, utilizando este último modelo.

Se seleccionó un pozo en el acuífero del Valle de Toluca localizado en el Estado de México, dentro de la cuenca Alta del río Lerma y al sur del Altiplano Mexicano. Se desarrolló un plan de muestreo durante un año y se caracterizó el agua de acuerdo a métodos estándar. La alcalinidad es el parámetro con mayor variación dado que, es un agua bicarbonatada sódica magnésica. Con el gráfico de Tillmans se identificó que el contenido de CO₂ en exceso era mayor al del equilibrio, que hace al agua agresiva.

El CO₂ generado por una fuente puntual continua incide negativamente en la calidad fisicoquímica del agua subterránea. El modelo de Mojmir Mach modificado permite conocer el comportamiento del CO₂ en el agua, y calcular el CO₂ en exceso como producto del incremento de este gas o del efecto invernadero.

De acuerdo a criterios establecidos para el agua de uso y consumo humano de acuerdo con WHO, 2004; EPA, 2009; NOM-127-SSA1-2000 estos cambios excluyen riesgo para la salud humana en el uso y consumo, sin embargo se ha argumentado que agua con acidez erosiona dientes y huesos, filtrando el calcio y aumentando la acidez estomacal, puede, agravar el síndrome de intestino irritable. El CO₂ en exceso tiene efectos adversos en la infraestructura que deteriora la calidad del agua.

Palabras clave: CO₂ * agua subterránea * modelo Mojmir Mach modificado * calentamiento global

Introducción

El cambio climático es un cambio significativo y duradero de los patrones locales o globales del clima. Las causas pueden ser naturales (erupciones volcánicas, circulación oceánica, procesos biológicos), o puede ser causada por influencia antropogénica, como por ejemplo, a través de la emisión de CO₂ y otros gases que atrapan calor, o alteración del uso de grandes extensiones de suelos que causan, finalmente, un calentamiento global. Aun cuando hay muchos estudios sobre este fenómeno en la atmósfera, hay poca información acerca del impacto que tiene el aumento del CO₂ en el agua subterránea, la cual lo adquiere por medio del ciclo del agua elevadas concentraciones de CO₂ causando disminución del pH, incremento de cationes como K, Mg, Ca, Si, alcalinidad, además de solubilizar metales y otras sustancias de las rocas o subsuelo inadecuadas para el consumo humano (Yang, et al., 2015; Alvarez-Bastida, et al., 2013).

La disponibilidad de agua dulce es considerada uno de los grandes retos para el futuro, sólo el 3% del agua del planeta es dulce. En la actualidad, la gran mayoría de los acuíferos son explotados para satisfacer la demanda de agua, mediante perforaciones, pozos, o en combinación con el agua superficial (Kondratenko, 2013). En México, el 62% del agua para el uso público urbano proviene de fuentes de agua subterránea (CONAGUA-SEMARNAT, 2011). La mayor parte del agua subterránea es de buena calidad sin embargo en las últimas décadas ha demostrado que no es inmune a la contaminación (UE, 2008), y también a efectos del cambio climático, debido a que se ha incrementado la presencia de CO₂.

El agua en estado natural, contiene gases (CO₂ y O₂), aniones (HCO₃⁻, CO₃²⁻, Cl⁻, SO₄²⁻), cationes (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺), elementos traza (Fe, Mn), y sólidos (suspendidos, disueltos y sedimentables), estos componentes, en distintas concentraciones pueden estar presentes en cualquier tipo de agua, y pueden

variar, debido a la interacción del agua con medios naturales y a acciones antropogénicas (Martínez-Miranda et al., 2013).

En los últimos años se ha incrementado significativamente el CO_2 que puede provenir por un lado de la atmósfera, del suelo y del gas contenido en los poros cerrados de las rocas. En el agua ha sido cuantificado y modelado por modelos matemáticos (Alvarez-Bastida et al. 2013). Este incremento podría ser considerado como indicador del impacto de este gas invernadero como producto del cambio climático.

Si existe CO_2 en exceso, este ataca al CaCO_3 y aumenta la concentración de bicarbonato manteniéndose en equilibrio; por otro lado, si hay deficiencia de CO_2 , el CaCO_3 precipita disminuyendo la concentración del ion bicarbonato e incrementando la del CO_2 (Rodier, 1998). Concentraciones altas o bajas de esta especie pueden causar problemas de corrosión o incrustación del agua y se deben principalmente a la concentración de dióxido de carbono libre (CO_2).

Allende en 1976, planteó el uso conjunto de los diagramas de equilibrio de Tillmans, el índice de saturación de Langelier, y la relación de índices de Langelier y la corrección por fuerza iónica de Mojmir Mach para determinar cualitativa y cuantitativamente el comportamiento del dióxido de carbono. El modelo de Mojmir Mach modificado, tiene un buen sustento teórico para calcular el dióxido de carbono total del agua al incluir el cálculo de todas las constantes de equilibrio químico involucradas en función de la temperatura del agua (Martínez-Miranda et al., 2013).

En el presente trabajo se ha estudiado el comportamiento del CO_2 en el agua subterránea con una fuente puntual que produce de manera continua 108 toneladas de dióxido de carbono por año, utilizando el modelo matemático de Mojmir Mach Modificado que ha sido ampliamente aplicado por varias décadas para conocer concentraciones de CO_2 en exceso y como afectan el sistema de distribución de agua para uso y consumo.

Metodología

Se seleccionó un pozo con fuente puntual con emisiones continuas de CO_2 en el acuífero del Valle de Toluca localizado en el Estado de México, dentro de la cuenca Alta del río Lerma y al sur del Altiplano Mexicano. La fuente puntual considerada es un crematorio que está ubicado a 15 m del pozo en una zona semiurbana, en donde se generan de manera continua 108 ton de CO_2 por año. Se seleccionó esta fuente de CO_2 debido a que el crematorio opera todos los días al año, sin que haya otra fuente potencial cercana.

Toma de muestra

Se desarrolló un plan de muestreo temporal durante un año tomando siete muestras, en las diferentes estaciones. Para éste se utilizaron, botellas de polietileno, para determinar, acidez, alcalinidad, dureza, N-amoniaco, iones cloruro, nitrato, nitrito, sulfato, fosfato, una de 100 mL para la determinación de metales, otra de vidrio de 250 mL, para las muestras microbiológicas, preparados de acuerdo a la APHA-AWWA-WPCF, 2005.

Caracterización fisicoquímica

Se determinaron parámetros fisicoquímicos *in situ*: pH, temperatura del ambiente y del agua, conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales, con el potenciómetro marca Hanna modelo H199130, oxígeno disuelto y porcentaje de saturación de oxígeno con el oxímetro marca Hanna, modelo H19146. Se realizaron los análisis de laboratorio correspondientes para caracterizar el agua fisicoquímica de acuerdo a Métodos Estándar (APHA-AWWA-WPCF, 2005).

Parámetros transitorios

Se realizaron *in situ* y en el laboratorio con base en técnicas establecidas de normas mexicanas vigentes (parámetros *in situ*, acidez, alcalinidad, dureza, especies aniónicas y catiónicas).

Análisis de datos

Cálculo de dióxido de carbono

Se calculó el contenido de dióxido de carbono con el modelo de Mojmir Mach modificado utilizando la herramienta informática denominada AgrInc_Agua 2.6 - *Agresividad e Incrustabilidad del Agua* (Trujillo y Martínez, 2010). A través de la interfaz gráfica de usuario considera aspectos de uso de tal forma que se facilita su uso, cálculo que indica el cálculo del CO₂ en exceso.

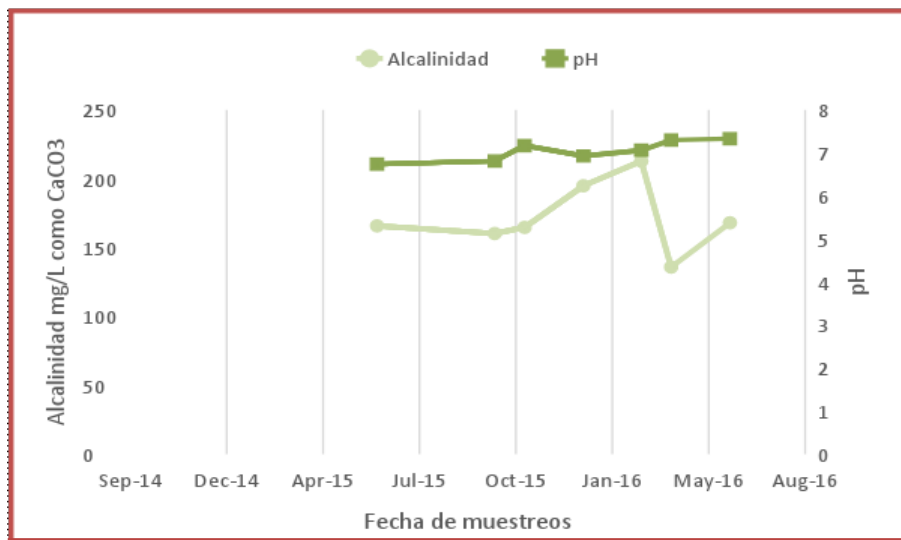


Figura 1. Gráfico de alcalinidad vs. pH.

Resultados

En los siete muestreos realizados, el agua cumple con los criterios establecidos para el agua de uso y consumo humano de acuerdo con WHO, 2004; EPA, 2009; NOM-127-SSA1-2000. Los datos indican que la alcalinidad (Figura 1) es

el parámetro con mayor variación, de acuerdo a los valores de pH la alcalinidad está únicamente en términos de bicarbonatos. A su vez que es un agua bicarbonatada sódica magnésica de acuerdo a lo reportado por Esteller y Andreu, 2005 y Expósito, 2012.

Existe también la variación de la conductividad eléctrica del agua que está relacionada con la disolución de dióxido de carbono, este gas aumenta la agresividad del agua e intensifica la disolución de minerales de las rocas.

Consecuencias adyacentes

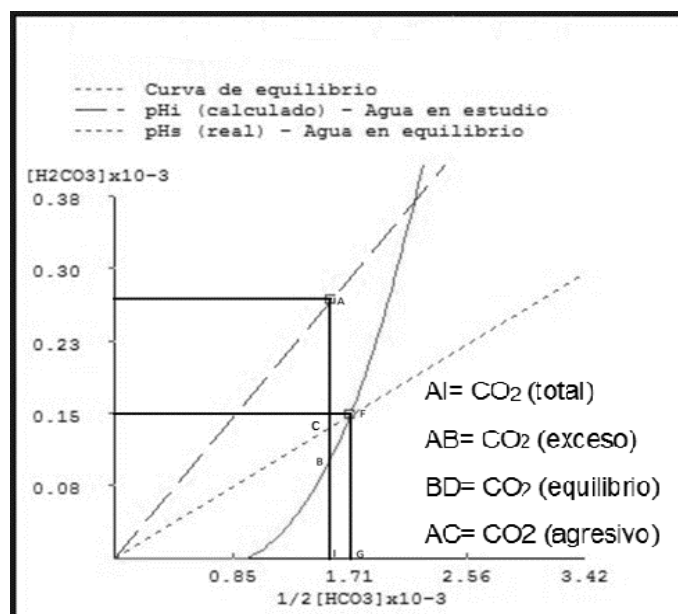


Figura 2. Gráfico de Tillmans del agua del pozo muestreado

El gráfico de Tillmans (Figura 2), permite conocer el comportamiento del CO₂ en el agua de estudio, proveniente de un pozo que está ubicado en una fuente puntual que genera alrededor de 108 toneladas de CO₂ por año. Se visualiza en el gráfico el contenido de dióxido de carbono total, en exceso, en equilibrio, y el agresivo o libre. Se aprecia que el contenido de CO₂ en exceso es mayor al del equilibrio, y se ubica en la parte superior de la curva de estabilidad (punto A). Así se tiene un exceso de CO₂ libre que reacciona con el agua y forma H₂CO₃ que la hace potencialmente agresiva.

Debido al aumento de CO₂ en el agua por la fuente puntual y continua, se encontró que el CO₂ en exceso tiende a disminuir por la reacción de disolución del H₂CO₃ e incrementa la alcalinidad para mantener el equilibrio y regular el valor del pH, por la formación de los iones bicarbonatos (HCO₃⁻), como se muestra en la Figura 1. Este comportamiento del CO₂ de manera directa también está incrementando los iones por lo que existe variación de los sólidos disueltos totales (SDT) y conductividad eléctrica, indicando la interacción agua-roca y la disolución de sales por la infiltración del agua de lluvia.

Se aprecia en la Figura 3, que existe un exceso de acidez con una baja alcalinidad, cuya composición química provoca corrosión u oxidación, (Martínez-Miranda et al., 2013). Todo esto afecta de varias maneras al sistema de extracción, distribución y almacenamiento del agua de uso y consumo, en su composición química, estructura y morfología de los materiales con que entra en contacto como, tuberías (hierro fundido, acero, cemento, asbesto PACK o PVC), válvulas, bombas, tanques de almacenamiento, entre otros, así como a la calidad del agua, por lo que aumenta el costo de distribución y mantenimiento de la red (Sarin et al. 2004).

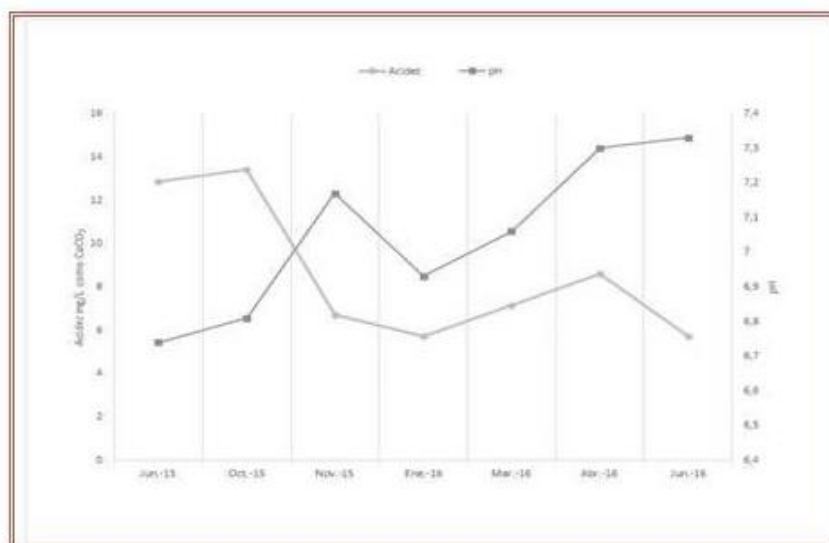


Figura 3. Gráfico de acidez vs. pH

De acuerdo a criterios establecidos para el agua de uso y consumo humano de acuerdo con WHO, 2004; EPA, 2009; NOM-127-SSA1-2000 estos cambios no implican riesgo para la salud humana en el uso y consumo, sin embargo se ha argumentado que el agua con acidez erosiona los dientes y los huesos, filtrando el calcio y aumentando la acidez estomacal. Aparte puede agravar el síndrome de intestino irritable (SII) o producir distensión del estómago que puede reducir la eficacia del ácido estomacal para digerir aquellos alimentos que requieren de mayor acidez.

Conclusiones

Cada vez se están realizando más estudios que refieren a los efectos del cambio climático en materia ambiental. En este trabajo se describe que el dióxido de carbono generado por una fuente puntual de manera continua todo el año incide negativamente en la calidad fisicoquímica del agua subterránea que se extrae para uso y consumo humano.

Conocer el comportamiento de este gas permite tomar medidas que prevengan o corrijan tendencias corrosivas en el agua, que eviten un mayor deterioro de la

calidad del agua y de la infraestructura, con la finalidad de garantizar que el usuario además de tener un buen servicio, reciba agua con la calidad requerida.

El modelo de Mojmir Mach modificado es cuantitativo y permite conocer el comportamiento del CO₂ en el agua, y calcular el CO₂ en exceso como producto del incremento de este gas. Esta herramienta se ha utilizado por décadas para analizar la tendencia corrosiva o incrustante de agua subterránea únicamente. Sin embargo se puede también utilizar para analizar el fenómeno del calentamiento global en el agua subterránea ya que aporta datos muy interesantes sobre el aumento de CO₂ (CO₂ en exceso) y es una herramienta que puede ser utilizada con este fin.

Es importante que en lugares donde las emisiones de CO₂ son elevadas se verifique el comportamiento de la calidad del agua subterránea con el objetivo de prever o limitar cambios en su extracción, distribución, almacenamiento, y uso y consumo humano.

Agradecimientos

Los autores agradecen: a CONACYT por la beca de investigación otorgada, a “*The 100,000 Strong in the Americas Initiative*” por el financiamiento para el proyecto tripartita entre la UAEMex, la UNT y la UNLP; “*Bridging the Americas: Promoting Global Solutions for Local Landfill Problems through Student Service and Learning*”; a COMECYT por el apoyo económico otorgado para la asistencia a este congreso. UAEMex por los apoyos complementarios otorgados.

Bibliografía

APHA–AWWA–WPCF. Standard methods for examination of water and wastewater. 17th edition. Washington D. C., U.S.A.: American Public Health Association and Water Pollution Control Federation, 2005.

Expósito JL. Características hidrodinámicas e hidroquímicas del acuífero multicapa del Valle de Toluca y sus implicaciones en la optimización de estrategias para la protección de la calidad del agua subterránea. Tesis de Doctorado. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México 2012. .

Esteller MV, Andreu JM. Antropic effect on hydrochemical characteristics of the Valle de Toluca aquifer (Central Mexico) . Hydrogeology Journal, 2005; 13: 378-90.

Trujillo FE, Martínez MV. AgrInc-Agua 2.5. Programa para computadora. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México. México, 2010.

CONAGUA-SEMARNAT. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Estadística del agua en México. Edición, 2011. México. En el sitio: www.conagua.gob.mx, 2011.

Yang Q, Matter J, Stute M, Takahashi T, O'Mullan G, Umemoto K *et al.* Groundwater hydrogeochemistry in injection experiments simulating CO₂ leakage from geological storage reservoir. *Int J Greenh Gas Control*. 2014b; 26, 193 - 203.

Alvarez-Bastida C, Martínez-Miranda V, Vázquez Mejía G, Solache-Ríos M, Fonseca-Montes de Oca G, Trujillo-Flores E. The corrosive nature of manganese in drinking water. *Science of the Total Environment* 2013; 447: 10–16.

Kondratenko, B. Estudio Hidrogeoquímico del acuífero del Valle de Tenancingo, Estado de México, México, Tesis de Maestría en Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México, México, 2013.

Unión Europea. Protección de las aguas subterráneas en Europa. La nueva directiva sobre las aguas subterráneas- consolidación del marco normativo de la UE. 36pp. 2008.

Martínez V, Trujillo E, Linares I. Corrosividad del agua y su estimación. *Avances en Ciencias del Agua*. Ed. Plaza y Valdez, S.A. de C.V. y por la Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados de la Universidad Autónoma del Estado de México, 2013.

Rodier J. Análisis de las aguas, aguas naturales, aguas residuales, aguas de mar. Ediciones Omega S.A, 1998; p 1059.

Sarin P, Snoeyink VL, Little DA, Priven WM. Iron corrosion scales: model for scale growth, iron release, and colored water formation. *Journal of environmental Engineering* 2004; 130: 364.