

Disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos litorales someros salinizados

Leslie F. Molerio-León *

INVERSIONES GAMMA, S.A.; Cuba; Email: especialistaprincipal@gmail.com

Recibido: agosto 11, 2014

Aceptado: diciembre 23, 2014

Resumen

Se presenta el resumen de un modelo geoquímico de compatibilidad entre las aguas terrestres subterráneas de los acuíferos costeros someros salinizados del norte de Cuba y las aguas producidas de los yacimientos gasopetrolíferos carbonatados que permite mezclarlas para inyectarlas, previo tratamiento, a los acuíferos someros sin necesidad de devolverlas al yacimiento. El modelo se basa en los principios de la Teoría de Interacción Iónica de Pitzer, que es una profundización de la teoría de interacción específica propuesta por Bronsted, según el cual habrá interacción entre dos iones de signo opuesto y la interacción entre iones del mismo signo dependería exclusivamente de la carga eléctrica y la composición y estructura de los iones principales, los cuales son sintetizado en el nomograma de Miembros Geoquímicos Terminales de las aguas terrestres cubanas de Molerio-León.

Palabras clave: acuífero cársico, aguas producidas, inyección de aguas de capa, petróleo, teoría de la interacción iónica

Final disposal of produced water from carbonate oil & gas fields in shallow coastal karst salinized aquifers

Abstract

A geochemical model for the compatibility among salinised shallow coastal shallow karst aquifers from Northern Cuba and produced groundwaters from oil & gas fields of the Heavy Crude Oil Belt of Northern Cuba is summarized in this contribution. After oil removing treatment, this geochemical compatibility allows for the disposal of produced waters with negligible or no pressure to the shallow aquifer avoiding the present techniques of high pressure injection to the productive horizon. Model is based on Pitzer's Theory of Ionic Interaction, a modification of Bronsted's Specific Interaction Theory which states that interaction will be produced between two ions of opposite sign and that interaction between same-sign ions will only depend on electric charge and the composition and structure of the major ions which are synthesized in the Molerio-Leon's nomogram of Terminal Geochemical Members of Cuban terrestrial waters.

Key words: injection of formation waters, karst aquifer, oil, produced waters, theory of ionic interaction

1. Introducción

La producción de petróleo y gas va acompañada de la producción de agua. Esta, así llamada, *agua producida* está compuesta por el *agua de formación o de capa*, que es la que está presente naturalmente en el horizonte productivo, y del *agua de inundación* que, eventualmente, se inyecta a la formación para procesos de recuperación secundaria de petróleo. En tanto progresa la explotación del yacimiento, la cantidad de agua producida se incrementa. En consecuencia, su gestión requiere una aproximación estructurada e integral que considere un amplio rango de tecnologías y estrategias, como las de separación, por ejemplo, y a las que se integra la disposición en cualquiera de sus dos grandes variantes: descarga directa o inyección.

La selección de una de ellas viene definida por lo que se considera el punto clave de la disposición del agua producida; a saber, **la gestión de su movimiento y destino final y la evaluación de los efectos en el ambiente que las recibe**. A esto se le añade que el método que se seleccione como el adecuado deberá subordinarse a las regulaciones ambientales que apliquen en cada caso.

En yacimientos onshore y en ambientes sensibles próximos a la costa o a las riberas de los ríos, la inyección (o el vertimiento) es el método de disposición frecuentemente adoptado. En tales casos, uno de los puntos centrales a aclarar es el grado de confinamiento que puede exhibir un cierto estrato receptor a las aguas producidas inyectadas. Esto se conoce como **aceptabilidad ambiental del proceso de disposición**.

La inyección se puede hacer en la matriz o en fracturas de las rocas y no es un secreto que resulta más compleja operacionalmente que cualquier otro método de disposición. En previsión de contingencias, la buena práctica indica que se deben considerar un grupo de métodos adicionales de disposición que, en el caso que nos ocupa, se reducen a:

- El uso de pozos de inyección alternativos (los llamados stand-by wells)
- Descarga en la superficie, en correspondencia con las regulaciones ambientales
- Descarga en cuerpos de agua dulce, en correspondencia con las regulaciones vigentes
- Almacenamiento en las instalaciones, comúnmente en tanques
- Confinamiento en pozos liquidados o abandonados

Una alternativa común es la inyección en el horizonte productivo de petróleo para contribuir a mantener la presión de campo en el yacimiento y contribuir a acelerar el flujo de petróleo a los pozos productores. Esta práctica, común en los campos petroleros, no se considera un método de disposición por entidades reguladoras tan importantes como la International Association of Oil & Gas Producers.

La primera de las alternativas es la que resulta más competitiva económicamente en términos de operación. Sobre todo cuando se supone que sea **posible inyectar en pozos someros donde la presión de inyección sea baja**. Pero en cualquier alternativa de inyección es imprescindible identificar una serie de propiedades contextuales entre las cuales, la más importante, es la **compatibilidad geoquímica y física de las aguas producidas con el medio acuífero, especialmente la compatibilidad de tipo hidráulico** (Laaksoharju, Degueudre y Skarman, 1995); Koretsky, 2000).

Ella se expresa en los siguientes indicadores:

- Compatibilidad entre las aguas producidas a inyectar y los fluidos del horizonte receptor
- Compatibilidad entre las aguas producidas a inyectar y la litología de las zonas de inyección y los sellos o capas confinantes
- La capacidad calorífica del agua producida a inyectar
- La concentración de los hidrocarburos dispersos y la distribución de los particulados y los sólidos suspendidos de las aguas a inyectar
- Capacidad del horizonte acuífero para asimilar los caudales y la carga química de las aguas producidas a inyectar
- La identificación de un tiempo de tránsito aceptable para las aguas de mezcla que garantice la protección que fijan las regulaciones ambientales
- Propiedades agresivas o incrustantes de la mezcla de agua resultante

Resueltos los problemas de tipo hidrodinámico y geoquímico antes descritos se pasa a la segunda fase, que es la construcción de los pozos de inyección. Esto se logra mediante el adecuado rimado (ampliación de diámetro), cementación, instalación de filtros y desarrollo de los pozos que se proyecten. Esto es tan importante como todo lo anterior porque resulta la solución ingeniera del problema de la disposición final.

Entre los parámetros de diseño, además de la profundidad de los pozos y la distribución de anillos, filtros, camisas ciegas y otro tipo de entubado, así como la cementación y los colchones eventuales de grava, tenemos los siguientes:

- Máxima tasa de inyección.
- Máxima presión prevista de inyección.
- Temperatura de inyección del fluido.
- Composición físico química y propiedades termo hidrodinámicas del fluido de inyección.
- Volúmenes de inyección.

Además, es necesario velar por conservar dentro de los límites aceptables, los siguientes temas que también hay que estudiar a partir de la data hidrogeológica:

- La corrosión que puede producir el fluido a inyectar.
- La reducción del colapso de las camisas debido a la tensión y compresión.
- La eficiencia de los sellos respecto a los efectos de expansión y contracción del entubado debido al eventual ciclo térmico que pudiera estar involucrado.
- La fracturación hidráulica de la capa confinante, que depende de la presión ejercida por el líquido de inyección.
- El radio de influencia del volumen inyectado.

La primera versión de este modelo y su aplicación como solución alternativa para la inyección de aguas de capa tratada de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados ha sido desarrollada por el autor desde el año 2001. El modelo fue inscrito en el Centro Nacional de Derecho de Autor en Abril del 2014 bajo el número de registro 1439-05-2014.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción sumaria del modelo

El Modelo de compatibilidad de las aguas subterráneas de acuíferos cársicos litorales someros para la disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados desarrollado teóricamente por el autor de este artículo se basa, geoquímicamente, en el modelo de Pitzer o Teoría de Interacción Iónica (Pitzer, 1979, 1987, 1991) que es una profundización de la teoría de interacción específica propuesta por Bronsted, según el cual habrá interacción entre dos iones de signo opuesto y la interacción entre iones del mismo signo dependería exclusivamente de la carga eléctrica.

Aunque la anterior premisa es esencialmente correcta, no explica completamente los resultados experimentales. La base teórica del modelo de Pitzer propone que los iones del mismo signo tienden a permanecer alejados entre sí y por lo tanto, las fuerzas de corto alcance entre ellos tendrían muy pocas consecuencias. Al contrario, los iones de signo contrario se acercarían lo máximo posible y en consecuencia estarían afectados por las fuerzas de corto alcance. Además las características de estas fuerzas de corto alcance serían específicas para cada par de iones. Entre los resultados más importantes está el reconocer la dependencia de la fuerza iónica del efecto de las fuerzas de corto alcance en interacciones binarias (Kim y Frederick, 1988a, 1988b).

La ecuación de Pitzer se basa en una analogía entre los gases imperfectos y las soluciones de electrolitos que había sido demostrada en 1945 por McMillan y Mayer (Weber, 2000). Esos autores demostraron que la relación entre la presión osmótica de la solución y los potenciales medios de los solutos en el solvente era igual que la relación entre la presión de un gas y los potenciales entre las partículas (Van de Weerd, Leijnse y van Riemsdijk, 1998). Aunque para calcular distintas propiedades a partir de la presión osmótica es necesario hacer algunas correcciones, no desaparece la semejanza entre las soluciones no ideales y los gases imperfectos en relación con los respectivos potenciales.

$$PV = RT + BP + C'P^2 + D'P^3 + \dots$$

Donde el primer coeficiente virial corresponde al gas perfecto. El segundo coeficiente, B, de acuerdo con la mecánica estadística corresponde a las fuerzas intermoleculares entre los pares de moléculas; el tercer coeficiente corresponde a la interacción entre tres moléculas, etc.

El Modelo de Pitzer es un modelo de interacción y, a diferencia de los modelos de asociación, es aplicable con gran éxito a solutos disociados ya que las propiedades de las soluciones están descritas en términos de interacción entre iones libres; pero además, este modelo también considera las interacciones entre pares de iones del mismo signo y entre tripletas de iones.

Si la fuerza intermolecular entre un par de moléculas depende solamente de la distancia r y el potencial es $u(r)$, el segundo potencial o coeficiente está definido como:

$$B = 2\pi N_0 \int_0^{\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{u}{kT}\right) \right] r^2 dr$$

y

Donde No es el número de Avogadro.

La ecuación de Pitzer tiene un parámetro electrostático (F), que es básicamente una modificación de la ley extendida de Debye-Hückel. El segundo coeficiente virial (B) corresponde a un coeficiente de interacción y su dependencia de la fuerza iónica (I) se ha derivado con base en los siguientes argumentos:

- B tiene un valor finito para I=0
- B varía de forma lineal con I a fuerzas iónicas pequeñas
- B es aproximadamente constante a fuerzas iónicas elevadas

El modelo de interacción de Pitzer está basado en la expresión de la energía libre de Gibbs de la solución de acuerdo con la ecuación de Debye-Hückel y en una expansión virial de las molalidades de las especies disueltas, que pueden ser iónicas o neutras. En la ecuación siguiente el coeficiente de actividad está dado como una sumatoria de una serie de potencias.

$$\ln \gamma_{\pm} = -\frac{\alpha m^2}{1 + \beta m} + \sum_{i=1}^{\infty} B_i m_i$$

La ecuación de Debye-Hückel es una función de fuerza iónica mientras que la ecuación de Gibbs-Duhem es una función de la molalidad. La ecuación de Pitzer se propone como una consecuencia debida a la teoría de Debye-Hückel que es sólo aplicable a muy bajas concentraciones, por tanto, se adicionan una serie de términos *ad hoc* para tomar en cuenta las interacciones de corto alcance. Aunque Pitzer se basa en los parámetros teóricos aceptados por Debye-Hückel, su ecuación incluye términos de origen empírico. Es así como la representación general de la ecuación de Pitzer asume que la energía de exceso de Gibbs está dada por:

$$\frac{G^R}{RTw_s} = f(I) + \sum_i \sum_j m_i m_j \lambda_{ij}(I) + \sum_i \sum_j \sum_k m_i m_j m_k \Lambda_{ijk}$$

La función f(I) depende de la fuerza iónica, la temperatura y las propiedades del solvente. Este término representa las fuerzas de largo alcance e incluye la ley límite de Debye-Hückel. El parámetro $\lambda_{ij}(I)$ representa las interacciones de corto alcance entre dos partículas de soluto en el solvente; la dependencia de la fuerza iónica de este término permite la convergencia en la expansión virial. Este parámetro $\Lambda_{ijk}(I)$ contiene las interacciones de tipo triple y son importantes sólo para altas concentraciones de soluto. A concentraciones aún mayores se requieren de más de cuatro parámetros. El modelo de Pitzer para las ecuaciones de los coeficientes osmótico y de actividad contiene los parámetros de interacción catión-anión (ca) que son funciones de la presión y la temperatura:

$$\beta_{ca}^0, \beta_{ca}^1, \beta_{ca}^2, C_{ca}$$

Sin embargo, la ecuación de Pitzer puede utilizarse con los cuatro parámetros para una concentración alta, o con dos y tres parámetros para concentración baja. El tercer coeficiente virial (γ_{MX}^C) incluye las interacciones entre iones del mismo signo, que se consideraban nulas en la teoría de interacción específica. Sin embargo, este término es despreciable y solo se tiene en cuenta para valores altos de fuerza iónica. La ecuación general de Pitzer modificada de acuerdo a Clegg y Whitfield (Yigui, 2006) para el coeficiente de actividad para un catión M y un anión X y del coeficiente osmótico es:

$$\ln \gamma_{\pm} = |z_+ z_-| F + m_c \left(\frac{2v_+ v_-}{v} \right) B_{cx}^{\gamma} + m_c^2 \left(\frac{2(v_+ v_-)^{3/2}}{v} \right) C_{cx}^{\gamma}$$

$$\ln \gamma_{\pm} = z_x^2 F + \sum_c m_c (2B_{cx} + ZC_{cx}^{\gamma})$$

$$\ln \gamma_m = z_m^2 F + \sum_a m_a (2B_{am} + ZC_{am}^{\gamma})$$

Donde:

$$F = -A_m \left[\frac{I^{1/2}}{1 + B_{ca} I^{1/2}} + \left(\frac{2}{B_{ca}} \right) \log_0 \left(1 + B_{ca} I^{1/2} \right) \right]$$

$$B_{ca}^\gamma = 2\beta^0 + \left(\frac{2\beta^1}{\alpha_1^2 I} \right) \left[1 - \left(1 + \alpha_1 I^{1/2} - \frac{\alpha_1^2 I}{2} \right) \exp \left(-\alpha_1 I^{1/2} \right) \right] + \left(\frac{2\beta^1}{\alpha_1^2 I} \right) \left[1 - \left(1 + \alpha_1 I^{1/2} - \frac{\alpha_2^2 I}{2} \right) \exp \left(-\alpha_2 I^{1/2} \right) \right]$$

$$C_{ca}^\gamma = \frac{3C_{ca}^\phi}{2}$$

Para el coeficiente osmótico:

$$\phi - 1 = \left(\frac{2}{\sum_i m_i} \right) \left[\frac{-A_\phi I^{3/2}}{(1 + 1.2\sqrt{I})} \right] + \sum_c \sum_a m_c m_a (B_{ca} + ZC_{ca}^\phi)$$

Las ecuaciones además contienen los siguientes términos:

$$Z = \sum_i m_i |z_i|$$

$$B_{ca} = \beta_{ca}^0 + \beta_{ca}^1 g(\alpha_{ca} \sqrt{I})$$

$$B'_{ca} = \frac{\beta_{ca}^1 g(\alpha_{ca} \sqrt{I})}{I}$$

El número de carga del ion es z_i y el número estequiométrico total es:

$$v = v_+ + v_-$$

Los valores empíricos calculados son para $b = 1.2$ y para $a=2.0$. La función $g(x)$ se calcula de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$g(x) = \frac{2[1 - (1+x)\exp(-x)]}{x^2}$$

$$g'(x) = \exp(-x) - g(x)$$

3. Resultados y discusión

3.1. Aplicabilidad del modelo

El **Modelo de compatibilidad de las aguas subterráneas de acuíferos cársicos litorales someros para la disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados** es hidrogeológicamente factible en tanto se cumplan un grupo de condiciones de contorno del medio físico de las cuales pueden citarse las siguientes como las más importantes:

Rango de aplicación

- Yacimientos gasopetrolíferos carbonatados, preferentemente paleokarsts.
- Aguas de formación que no constituyan verdaderas salmueras de petróleo.
- Acuíferos cársicos litorales conformes o contrarios o epikarsts.
- Elevado tiempo de residencia de las aguas, preferentemente desvinculadas del ciclo hidrológico actual.
- Cuerpos receptores constituidos por sistemas de flujo locales bien diferenciados, preferentemente aparatos cársicos semiconfinados o semilibres.

Propiedades del cuerpo receptor

- Compatibilidad agua subterránea-roca-agua de formación-agua de mar.
- Adecuada capacidad de absorción.

- Baja capacidad transmisiva y alto almacenamiento.

La correcta aplicación del modelo se basa en la observancia estricta de los siguientes procedimientos:

En las aguas de capa

1. Identificación del volumen y caudal del agua de capa.
2. Caracterización física, química e isotópica con fraccionamiento isotópico del tipo de salmueras o de evaporación en cuencas cerradas (Barrazán et al., 2001).

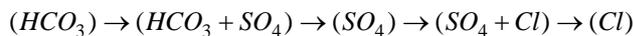
En el cuerpo receptor

1. Caracterización física, química e isotópica de las aguas subterráneas.
2. Identificación en el epikarst y en el acuífero, de las propiedades inerciales y autorreguladoras del karst litoral (Molerio, Guerra y Leal, 2013).
3. Identificación del tiempo de residencia de las aguas.
4. Identificación de la compatibilidad agua de formación-roca-agua subterránea-agua de mar.

En el sistema de tratamiento, recarga y control

1. Capacidad tecnológica, ambiental y financiera (costos capitales y de operación) para satisfacer las restricciones ambientales que imponga la autoridad ambiental.
2. Capacidad tecnológica para satisfacer la compatibilidad agua de formación-roca-agua subterránea.
3. Diseño, construcción y ensayo del sistema de absorción o recarga.
4. Diseño, construcción del sistema de monitoreo.
5. Operación del sistema (tratamiento-inyección-monitoreo)

Estos estudios tienen parte de su basamento en la estructura y variabilidad de los patrones geoquímicos de las aguas terrestres cubanas que se deriva de la Teoría de los Miembros Terminales de las Aguas propuesta por el autor en 1992 como resultado de un estudio sobre la composición química e isotópica de las aguas de lluvia de Cuba (Molerio, 1992). Toma su basamento en la revisión de la Secuencia General de Chebotarev, que se expresa como:



Y esencialmente describe el cambio general de composición química de las aguas terrestres, particularmente las subterráneas desde las fuentes de alimentación hasta el mar.

Los miembros terminales cuya composición genérica en macroconstituyentes y sales disueltas totales se muestra en la Fig. 1 fue obtenida mediante el procesamiento estadístico de varios miles de muestras de aguas terrestres, de lluvia y marinas entre 1974 y 1992 que se publicó originalmente. Con los años se ha ido adecuando incorporando nuevos miembros y, como es el caso de este artículo, se ha insertado en ellas la composición estandarizada de varios cientos de muestras de aguas de capa de la Franja Norte de Crudos Pesados Habana-Matanzas.

Los estudios preliminares desarrollado por el autor respecto a la compatibilidad entre las aguas de capa y las de los acuíferos litorales cársicos salinizados por intrusión marina son prometedoras y sugieren que existe buena compatibilidad entre ellas.

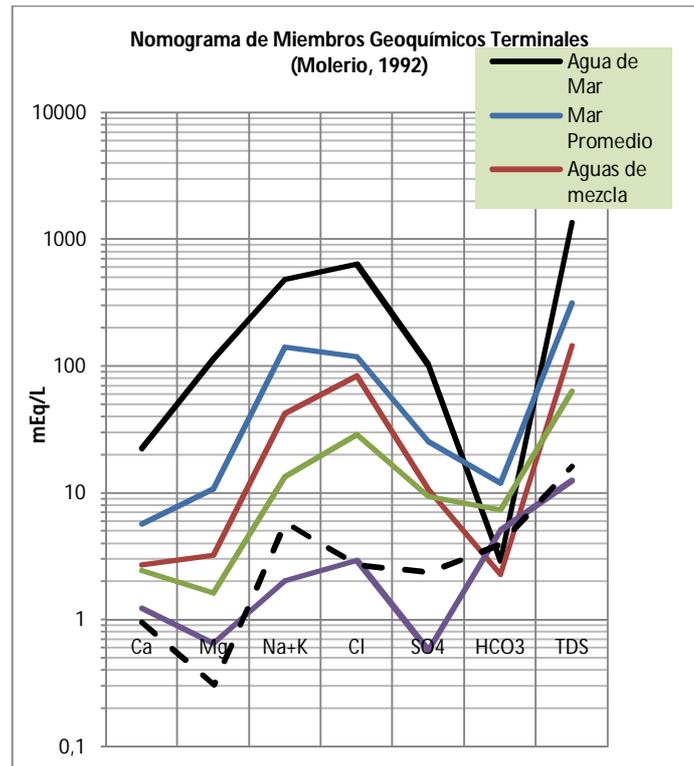


Fig. 1. Miembros terminales de las aguas cubanas (según Molerio, 1991)

Identificación del área perspectiva

El límite inferior para la identificación de las áreas perspectivas se ha tomado a partir de la isopleta 10000 mg/L de mineralización total. Por debajo de este límite las aguas subterráneas del acuífero somero pueden ser utilizadas con diferentes fines. Por encima de este límite la UNESCO la acepta para el uso no renovable de las aguas subterráneas (Fig. 2). La zona experimental se encuentra en un sector costero al Norte de El Corojal, donde se encontró un domo o núcleo de elevada salinidad enmarcado por la isopleta 20 000 mg/L.

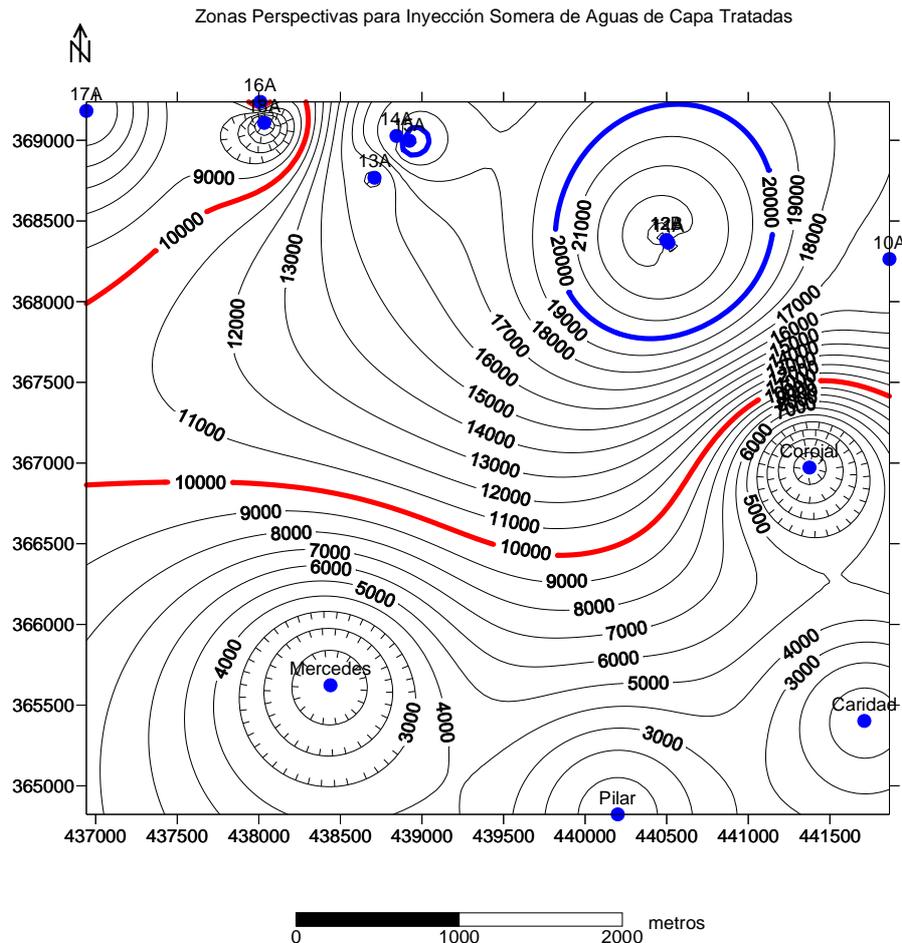


Fig. 2. Isopleteras de mineralización total de las aguas (Sólidos Totales Disueltos) en mg/L. La zona perspectiva identificada para continuar los estudios de factibilidad de inyección de aguas de capa tratadas aparece perfectamente delimitada por la isopleta 10 000 mg/L. Los puntos azules representan los pozos de control hidrogeológico

Estos núcleos de máximos iguales o superiores a 10 000 mg/L son aparentemente debidos a intrusión marina. Sin embargo, no está perfectamente claro hasta este nivel de estudio que los núcleos encerrados por la isopleta 20 000 mg/L sean exclusivamente debidos a este hecho, ya que se encuentran perfectamente diferenciados hidrodinámicamente. No se descarta alguna contribución debida a flujo de aguas de capa debido a su proximidad a zonas de exploración y producción.

Por la naturaleza hidrogeológica del territorio, donde domina un carso epigenético y, probablemente mixto epi-hipogenético, con una zona de recarga bien definida, extensa, y la presencia de al menos dos niveles acuíferos superpuestos pero con fronteras hidráulicas, la distinción de esta frontera ha sido relativamente complicada. El desarrollo del karst local ha provocado la distorsión de la paleored fluvial de la cual aún se reconocen vestigios en paleovalles intercársicos truncados por erosión remontante que han dado origen a valles muertos colapsados o truncados por cavernas (Molerio, 2013).

Ello ha provocado que existan zonas de alimentación (recarga natural) de aguas dulces que han diferenciado de manera tal la geoquímica del área que alternan aguas completamente dulces (con mineralización de hasta 1 mg/L) hasta totalmente salobres (hasta cerca de 35 000 mg/L) en un amplio espectro organizado en sistemas de flujo horizontal a veces total o parcialmente independientes.

Determinación de la compatibilidad geoquímica

El sistema multicomponente agua subterránea de diferente salinidad, agua de capa, agua producida tratada y agua de mar presenta afinidad y compatibilidad geoquímica. Este tipo de procesos de intercambio constituyen un grupo particular de procesos superficiales en los que, de nuevo, las interacciones electrostáticas entre los iones disueltos y las superficies sólidas cargadas juegan un papel fundamental. En los procesos de intercambio un ión asociado a una superficie es reemplazado por otro ión procedente de la solución acuosa. Por ello, pueden contemplarse como una combinación de fenómenos concatenados de adsorción y desorción.

Pese a esta mayor complejidad respecto a los aparentemente “más simples” procesos de adsorción o desorción, los procesos de intercambio iónico son tratados mediante leyes de acción de masa, con sus constantes de equilibrio correspondientes, sin considerar correcciones electrostáticas. Este tratamiento es, en principio, similar al empleado con los procesos de disolución-precipitación mineral. No obstante, presenta una serie de aspectos distintivos que no conviene olvidar.

Por un lado, no se dispone de ningún modelo riguroso con el que obtener las actividades de los iones situados en las posiciones de intercambio de la superficie, elementos que entran en las leyes de acción de masa de forma análoga a los iones en solución que intervienen en la reacción de intercambio. Por otro lado, las constantes de equilibrio de las reacciones de intercambio no son realmente constantes. Estas particularidades condicionan específicamente la metodología de trabajo con los procesos de intercambio y son las responsables de la existencia de distintos convenios para su tratamiento.

Los procesos de intercambio iónico son un tipo de procesos superficiales en los que se combinan fenómenos simultáneos de adsorción y desorción. Estos procesos suponen el desplazamiento de un ión “asociado” a una superficie sólida por otro presente en la solución acuosa y, por ello, pueden ser considerados como una expresión más de los mecanismos competitivos (por un limitado número de sedes de adsorción) que intervienen en los procesos de superficie.

Normalmente se considera que este tipo de procesos de intercambio afectan a los iones adsorbidos como complejos de esfera externa en la capa de Stern o a los situados en la capa difusa asociada a las superficies cargadas y puede producirse entre aniones (intercambio aniónico) o entre cationes (intercambio catiónico).

Los procesos de intercambio iónico son rápidos, reversibles y estequiométricos. Dentro del conjunto de procesos geoquímicos de baja temperatura representan uno de los tipos de reacciones con una velocidad más elevada y, por ello, su cinética se encuentra controlada por los mecanismos de transporte de los iones.

Por otro lado, este tipo de procesos se denominan estequiométricos ya que, como consecuencia del requerimiento de electroneutralidad, los iones que abandonen la superficie tienen que ser reemplazados por una cantidad equivalente (en términos de carga eléctrica) de otros iones.

Los procesos de intercambio iónico pueden ser tanto procesos de intercambio catiónico como procesos de intercambio aniónico. El que sean de un tipo u otro dependerá de la carga de la superficie sólida en contacto con la solución acuosa. La compatibilidad geoquímica se muestra en las Figs. 3 y 4. Los resultados más importantes son:

- Las aguas que integran el sistema multicomponente tienen una composición en macroconstituyentes semejante.
- La data correspondiente a las aguas de capa no muestra la existencia de verdaderas salmueras de petróleo. Por el contrario, como puede verse en las figuras correspondientes, todos los casos evaluados muestran aguas con mineralización igual o menor a las del mar en la zona de trabajo y de composición semejante a las aguas subterráneas lo que parece deberse a:
- Son aguas de horizontes carbonatados carsificados y/o con notable porosidad secundaria.
- Los tiempos de renovación son variables pero más bien bajos.
- Las aguas de los yacimientos no parecen haber sido sometidos a procesos intensos de evaporación y concentración geoquímica.

Índice de saturación de Langelier

Las aguas muestreadas en el Yacimiento Seboruco y los datos disponibles de los pozos productores muestran un Índice de Langelier positivo, indicando propiedades de incrustación de las soluciones, que se encuentran todas saturadas o sobresaturadas respecto a la calcita. La Tabla 1 resume las propiedades de este tipo. La Fig. 5 muestra el gráfico de Tillmans-Trombe de relación de saturación de calcita.

Estimación preliminar del caudal de absorción

El cálculo definitivo depende de los ensayos en los pozos de exploración propuestos; sin embargo, a partir de los datos de campo se puede estimar un caudal máximo de absorción estabilizado entre 2- 5 lps por pozo.

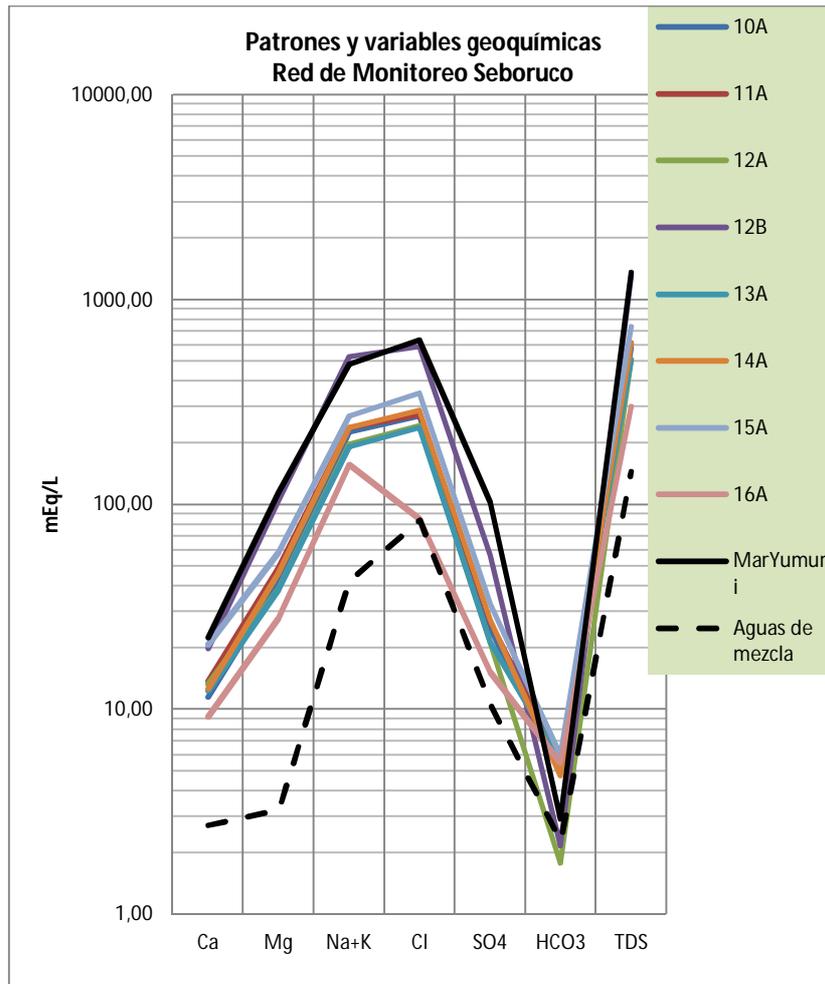


Fig. 3. Patrones geoquímicos y composición en macroconstituyentes de las aguas subterráneas en el Campo Seboruco a partir de la información de los pozos de observación

Cálculo del tiempo de residencia de las aguas

El tiempo de residencia de las aguas es uno de los indicadores más importantes a fin de evitar que errores de manejo del sistema de inyección perjudiquen la calidad de las aguas subterráneas, marinas, la biota asociada al karst y al medio marino. El modelo aquí propuesto recomienda aguas con un tiempo de tránsito desvinculado del ciclo hidrológico actual. En todo caso, pretende que el tiempo de renovación de las aguas, definido como el intervalo de tiempo que demora una gota de agua en recorrer la distancia desde el punto de infiltración al de descarga, sea lo suficientemente largo para poder tomar acciones de remediación y rehabilitación en el recorrido subterráneo.

El tiempo de renovación (t_r), asumiendo flujo darciano en el territorio, ausencia de desviaciones debidas al efecto de marea y homogeneidad en las propiedades físicas a lo largo de la línea de flujo se ha calculado a partir de la expresión siguiente:

$$t_r = \frac{D}{v_f}$$

En la que K, es la conductividad hidráulica en m/día; I, el gradiente hidráulico o diferencia de potencial entre dos puntos de referencia y n, la porosidad efectiva.

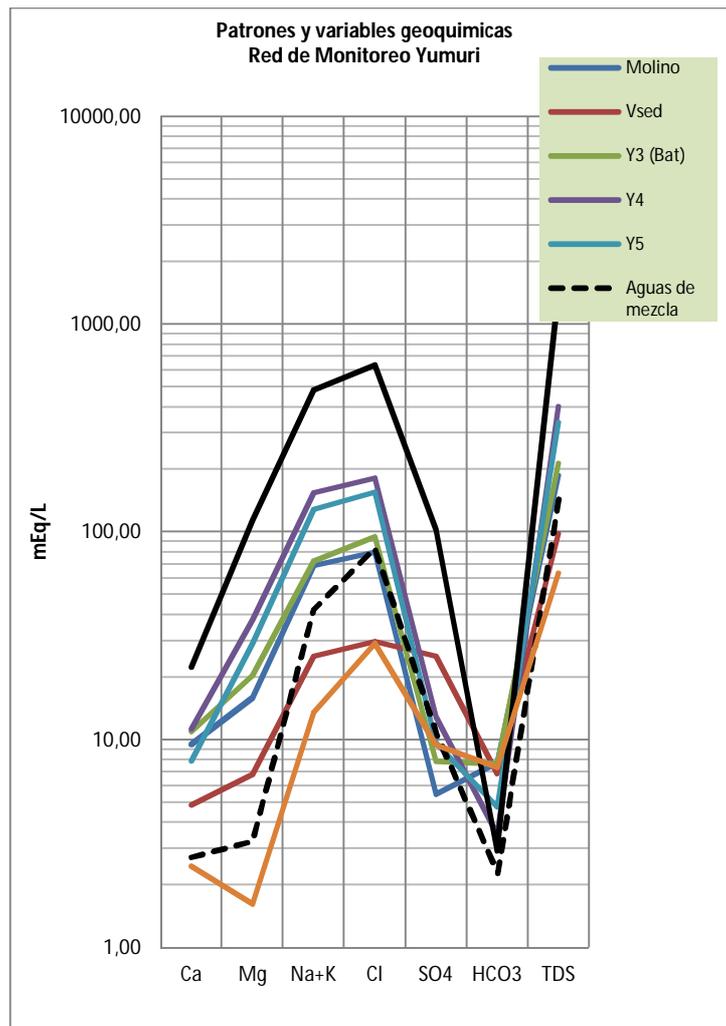


Fig. 4. Patrones geoquímicos y composición en macroconstituyentes de las aguas subterráneas en el Campo Seboruco

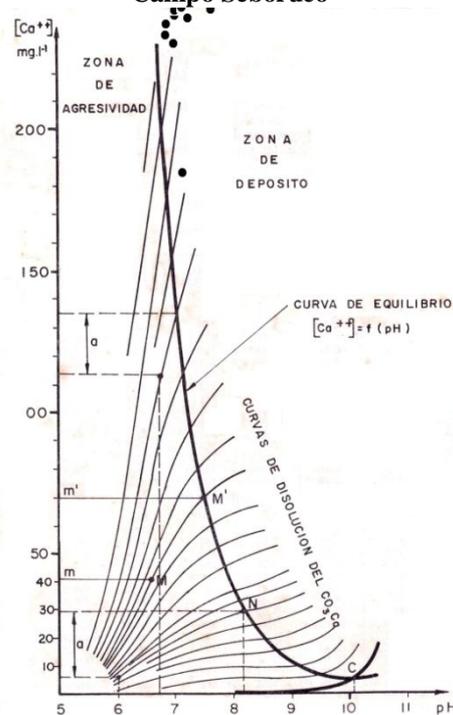


Fig. 5. Gráfico de Tillmans-Trombe mostrando la relación de saturación de calcita de las aguas muestreadas

Donde D, es la distancia a recorrer por la partícula de agua y v_f la velocidad de flujo, que, a su vez, viene definida por:

$$v_f = \frac{KI}{n}$$

A partir de los datos del autor estimados en mediciones de terreno, datos de archivo e interpretación de imágenes aeroespaciales y otros recursos, se adoptaron como valores preliminares los siguientes:

$$\begin{aligned} K &= 50 \text{ m/día} \\ n &= 0,10 \\ I &= 0,000424 \end{aligned}$$

Sustituyendo apropiadamente se obtiene una velocidad de flujo promedio de 0,212 m/día que para un punto mínimo de descarga situado a 500 m del punto de inyección equivale a un t_r de aproximadamente 2360 días; unos 6,5 años.

Conclusiones

1. La posibilidad de utilizar pozos de inyección con baja o nula presión para la disposición final de aguas de capa tratadas de yacimientos gasopetrolíferos onshore de la Franja de Crudos Pesados del Norte de La Habana-Matanzas (FCP) parece una alternativa viable utilizando el acuífero cársico litoral somero carsificado que se extiende a lo largo del litoral donde tienen lugar las operaciones gasopetrolíferas.
2. Una alternativa de este tipo representaría un cambio rotundo en la matriz de disposición final de las aguas de capa tratadas y su implementación estaría en dependencia de la aceptabilidad ambiental del acuífero para recibir determinados volúmenes de las aguas tratadas.
3. La definición de esta aceptabilidad se basa en el Modelo de compatibilidad de las aguas subterráneas de acuíferos cársicos litorales someros para la disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados desarrollado teóricamente por el autor de este artículo fundamentada geoquímicamente, en la Teoría de la Interacción Iónica Pitzer, en la Teoría de los Miembros Terminales de las Aguas Terrestres de Cuba y en un conjunto de propiedades físicas, hidráulicas, geoquímicas e hidrodinámicas del acuífero.
4. Estos indicadores son los siguientes:
 - a. Compatibilidad entre las aguas producidas a inyectar y los fluidos del horizonte receptor
 - b. Compatibilidad entre las aguas producidas a inyectar y la litología de las zonas de inyección y los sellos o capas confinantes
 - c. La capacidad calorífica del agua producida a inyectar
 - d. La concentración de los hidrocarburos dispersos y la distribución de los particulados y los sólidos suspendidos de las aguas a inyectar
 - e. Capacidad del horizonte acuífero para asimilar los caudales y la carga química de las aguas producidas a inyectar
 - f. La identificación de un tiempo de tránsito aceptable para las aguas de mezcla que garantice la protección que fijen las regulaciones ambientales
 - g. Propiedades agresivas o incrustantes de la mezcla de agua resultante
5. Los resultados obtenidos en la modelación de los procesos en los activos ambientales de la FCP han mostrado la factibilidad técnica y económica de generalizar estos resultados en una aproximación sostenible para el cambio de la matriz de disposición final de las aguas de capa tratadas en este tipo de yacimientos gasopetrolíferos.

Referencias

- Barrazán, R.M., Portugal, E., Arellano, V.M., Martínez, A.E., Ascencio F. 2001. *Modelación química de aguas de formación del Activo Luna*, Tabasco. Bol. 11E, Julio-Agosto: 180-184
- Kim, H. T., Frederick, W. J., .1988a. Evaluation of Pitzer Ion Interaction Parameters of Aqueous Electrolytes at 25°C. 1. Single Salt Parameters. J. Chem. Eng. Data 33, 177-184.

- Kim, H. T., Frederick, W. J., .1988b. Evaluation of Pitzer Ion Interaction Parameters of Aqueous Electrolytes at 25°C. 2. Ternary Mixing Parameters. *J. Chem. Eng. Data* 33, 278-283. Innovación, Año 20, N° 1 .(2008) 21-31
- Koretsky, C. 2000. The significance of surface complexation reactions in hydrologic systems: a geochemist's perspective. *Journal of Hydrology*, 230, 127-171.
- Laaksoharju, M.; Degueldre, C. and Skarman, C. 1995. *Studies and their importance for repository performance assessment*. SKB Technical Report 95-25. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, Sweden, 68 p.
- Molerio León, L. F. 1992. *Composición Química e Isotópica de las Aguas de Lluvia de Cuba*. II Cong. Espel. Latinoamérica y el Caribe, Viñales, Pinar del Río, Cuba,:20-21
- Molerio León, L.F. 2013. Ecuaciones de intercambio termohidrodinámico entre medios continuos múltiples en el karst y sus consecuencias ambientales. *Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente*. Año 13, No.24, 2012 ISSN-1683-8904, La Habana, 15:
<http://ama.redciencia.cu/articulos.php?sid=91529a91e366de61e4ac7b8e3f27fb89>
- Molerio León, L.F; Guerra Oliva,M.G., Leal, R.M. 2013. Modelo Difusivo de Transporte de Masa. Algoritmo Adriana, Versión 2.91) y Curvas de Retención de Humedad en la Zona No Saturada de los acuíferos cársicos (Modelo RETC). Aplicación a las cuevas del tercio superior del curso subterráneo del río San Antonio, Artemisa, Cuba. *Mapping Latino*. 23 Septiembre 2013, 51:
<http://mappinglatino.com/blog/2013/09/23/modelo-difusivo-de-transporte-de-masa-algoritmo-adriana-versin-2-91-y-curvas-de-retencion-de-humedad-en-la-zona-no-saturada-de-los-acuferos-carsicos-modelo-retc-apl/>
- Pitzer K. S.1979. Theory: ion interaction approach, en: *Activity coefficients in electrolyte solutions*, R. M. Pytkowitz .ed.), CRC Press, Boca Raton, pp.157-208.
- Pitzer K. S.1987. A thermodynamic model for aqueous solutions of liquid-like density, en: *Thermodynamic modeling of geological materials: Minerals, fluids and melts. Reviews in Mineralogy*, I. S. E. Carmichael y H. P. Eugster .eds.), , : 97-142.
- Pitzer, K. S.1991. *Activity Coefficients in Electrolyte Solutions*, 2nd ed.; Pitzer, K. S.,Ed.;CRS Press.
- Van de Weerd, H.; Leijnse, A. and van Riemsdijk, W.H. 1998. Transport of reactive colloids and contaminants in groundwater: effect of nonlinear kinetic interactions. *Journal of Contaminant Hydrology*, 32, 313-331.
- Weber, C.F. .2000. Calculation of Pitzer Parameters at High Ionic Strengths. *Ind. Eng.Chem. Res.* 39, 4422-4426.
- Yigui, LI .2006. Recent Advances in Study on Thermodynamic Models for Real Systems Including Electrolytes. *Tsinghua Science and Technology*, 11 (2): 181-187

Acerca del autor:

Leslie F. Molerio-León: Geólogo de Yacimientos Minerales e Hidrogeólogo, Master en Hidrología Isotópica, Consultor en Ingeniería Ambiental y Gestión de Recursos Hídricos, Asesor de la Agencia de Medio Ambiente de Cuba, Ex-Director del Servicio Hidrológico de la República de Cuba. Ha participado en unos 460 estudios geológicos, geomorfológicos, geotécnicos, hidrológicos, hidrogeológicos, ambientales, espeleológicos y de riesgos naturales para obras civiles, hidráulicas, hidroenergéticas, mineras y gasopetrolíferos en 40 países de África, América Latina, Asia y Europa. Experto para FAO, OIEA, PNUD y PNUMA. Conferencista y docente en diferentes universidades de América Latina y Europa. Miembro de 20 sociedades científicas cubanas y extranjeras.