

## AVANCES EN LOS ALGORITMOS DE BASE DE LA TECNOLOGÍA DE INYECCIÓN SOMERA DE AGUAS PRODUCIDAS DE YACIMIENTOS GASOPETROLÍFEROS (TISPM) EN MEDIOS CÁRSICOS

**Leslie F. MOLERO-LEÓN**

INVERSIONES GAMMA, S.A.

PO Box 6249, Habana 6, CP 10600, La Habana, Cuba

E-mail: [especialistaprincipal@gmail.com](mailto:especialistaprincipal@gmail.com)

### RESUMEN

La tecnología de inyección somera (TISPM) permite resolver la disposición final del exceso de las aguas altamente mineralizadas y en volúmenes siempre crecientes producidas por la explotación de yacimientos gasopetrolíferos. La tecnología está basada en la aplicación de un modelo geoquímico de flujo multifásico no isotérmico de densidad variable en medio anisotrópico desarrollado por el autor desde inicios de la década de 1990, para identificar y resolver la compatibilidad entre las aguas terrestres subterráneas de los acuíferos salinizados y las aguas producidas de los yacimientos gasopetrolíferos. Esta tecnología permite diseñar las mezclas para inyectarlas en acuíferos someros (a unas pocas decenas de metros) sin necesidad de devolverlas al yacimiento (a varios centenares o aun miles de metros de profundidad). En 2014 los principios básicos fueron inscritos en el Centro Nacional de Derecho de Autor de Cuba (registro 14309-2014). En estudios recientes, el modelo teórico de base ha sido complementado con el caso específico de la solución del transporte reactivo multifásico de densidad variable en cavernas desarrolladas en la zona saturada para fundamentar casos específicos del movimiento del fluido.

### LA TECNOLOGÍA DE INYECCIÓN SOMERA

La **Tecnología de Inyección Somera** (TISPM) es un recurso tecnológico para disponer las aguas producidas de los yacimientos gasopetrolíferos en pozos de poca profundidad y en un acuífero diferente al original para evitar devolverlas a los horizontes profundos de donde una vez fue extraída. Ese diferente entorno geológico, geoquímico y físico constituido por el nuevo horizonte somero receptor requiere de una evaluación para definir la aceptabilidad ambiental de las nuevas aguas. El desarrollo de un modelo teórico y los algoritmos que expresaran esa compatibilidad ha sido, durante mucho tiempo, un objetivo de investigación del autor.

Los estudios que dieron lugar a la TISPM (Molerio, 2015) se desarrollaron para satisfacer la necesidad de disponer los volúmenes crecientes de agua de capa tratada proveniente de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados cubanos. Un impulso particular surgió cuando en algunos yacimientos se detectaron posibles fenómenos de migración lateral desde pozos de inyección (antiguos pozos productores verticales abandonados) y de reinundación probable de horizontes productivos en explotación.

Los ensayos de prueba, el mejoramiento sostenido de los algoritmos y la aplicación a escala de yacimiento permitieron:

- a) Reducir los costos de perforación de pozos inyectoros o la adaptación a inyección de pozos productivos abandonados (Fig. 1)
- b) Reducir los costos de operación asociados con el gasto energético de la inyección en profundidad.
- c) Minimizar la posibilidad de fluencia de agua de los pozos de inyección a los productores Fig. 2).
- d) Disminuir la posibilidad de intercambio inducido entre las capas productivas
- e) No crear pasivos ambientales, aprovechando las aguas salinizadas improductivas y el ecotono litoral como sistema de disposición final autorregulado.
- f) Aprovechar los horizontes acuíferos salinizados litorales de productividad baja a nula (Boesch y Rabalais, 1989).

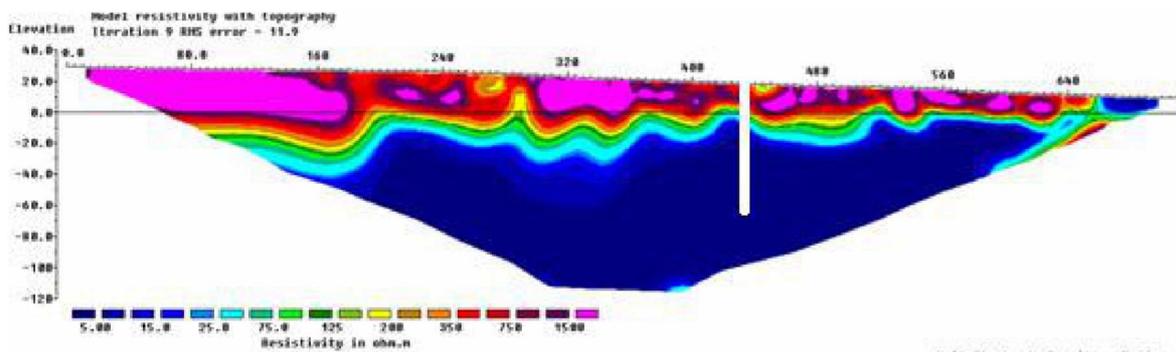


Fig. 1. Corte geoelectrico de una zona potencialmente apta para la inyección somera. El pozo de inyección está señalado con una traza vertical de color blanco



Fig. 2. Pozo productor abandonado en la Granja de Crudos Pesados del Norte de La Habana-Matanzas equipado para inyectar aguas producidas (Foto del autor).

## FUNDAMENTO TEÓRICO

El modelo teórico toma su fundamento en los principios de la Teoría de Interacción Iónica de Pitzer (1979, 1987, 1991) para el transporte reactivo en salmueras (donde la actividad iónica no sigue las pautas de Debye-Hückel) y resuelve un complejo sistema de ecuaciones que describen el flujo acoplado multifásico de densidad variable no isotérmico, el calor advectivo-dispersivo y el transporte de masa en un sistema local (y aun regional de flujo entre medios de porosidad múltiple; Molerio, 2013).

La circulación se describe mediante la ecuación de transporte advectivo-difusivo, en un esquema fundamentalmente Euleriano que, bajo condiciones específicas de forzamiento (forcing) puede transformarse en Lagrangiano, acompañado de reacciones químicas e intercambio térmico bajo condiciones de control debidas a procesos con potencial fluctuante periódico. Particularmente, el modelo teórico resuelve la distorsión del campo de flujo provocado por el Régimen No Lineal, Turbulento, o Lineal No Darciano que tiene lugar cuando el fluido se mueve en medios anisotrópicos con grandes Números de Reynolds y resuelve los efectos de la turbulencia sobre la dispersión de los solutos el intercambio de temperatura entre los cuerpos de agua y poder adecuar las obras ingenieras de infiltración bajo estas condiciones caso a caso.

## APLICABILIDAD DE LA TECNOLOGÍA TISPM

Inicialmente descrita para yacimientos gasopetrolíferos carbonatados, preferentemente paleokarsts, hoy se puede aplicar bajo cualquier medio acuífero salinizado sin restricción geológica e hidrológica, siempre que se cumplan las condiciones de compatibilidad geoquímica prescritas en el modelo teórico.

La compatibilidad ambiental, una propiedad de los fluidos y el medio, es definida por el modelo y la tecnología como aquellas cualidades del medio geológico, de la físico-química de los fluidos interactuantes, de la geometría del dominio de flujo y del tiempo de interacción aguas-roca que permiten exitosamente, incorporar las aguas producidas al acuífero receptor. Ello incluye su aplicación, incluso, en acuíferos con aguas de formación que no constituyan verdaderas salmueras de petróleo o cuerpos receptores constituidos por sistemas de flujo locales bien diferenciados, preferentemente aparatos cársicos semiconfinados o semilibres

La tecnología ya ha sido ensayada (Fig. 3) y se encuentra en operación. Su generalización se extiende a varios yacimientos. Varios artículos científicos publicados en revistas especializadas describen los aspectos fundamentales del modelo teórico, no así su integración en la Tecnología TISPM, que aguarda el proceso de solicitud de patente industrial.



**Fig. 3. Perforación de pozo de observación y ensayo de carga (Foto del autor)**

Desde hace varios años, la tecnología o sus componentes se está aplicando en yacimientos gasopetrolíferos de la Franja de Crudos Pesados del Norte de Cuba (en pozos menores de 50 metros de profundidad) en acuíferos salinizados, poco productivos, para sustituir la inyección profunda de aguas producidas en pozos productivos abandonados, minimizar los costes energéticos y maximizar la eficiencia las operaciones de vigilancia y control ambiental.

Hasta la introducción en Cuba de la Tecnología de Inyección Somera de Aguas Producidas de Petróleo (TISPM) la única alternativa viable para resolver el problema del exceso de agua en la explotación petrolera era devolverlas al yacimiento, inyectándolas al mismo horizonte de donde fueron extraídas en un pozo productivo abandonado.

Esa tecnología clásica de inyección profunda a pozos abandonados se utiliza internacionalmente y, aunque no es reconocida como una técnica ambiental de disposición final de aguas residuales tiene la ventaja de que no requiere estudios específicos complejos, porque las aguas se devuelven al horizonte de donde se extrajeron. Como tal, presenta el inconveniente que lleva altos costos de adaptación del pozo antiguamente explotado para recibir nuevamente las aguas más los costos energéticos de bombear a presión a varios centenares o incluso miles de metros de profundidad (Fig. 4). La construcción de pozos inyectores nuevos no suele constituir una práctica común.

En yacimientos donde los horizontes que aíslan el petróleo (llamados sellos) son suficientemente impermeables el agua producida se emplea para mantener la presión de capa, que ayuda al movimiento del petróleo y facilita su extracción. Tal no es el caso de Cuba, donde los sellos son de baja calidad y no impermeabilizan suficientemente el o los horizontes productivos de gas y petróleo.



Fig. 4. Instalación para ensayo de carga e inyección de aguas producidas (Foto del autor)

## SÍNTESIS DE LAS BASES TEÓRICAS: EL MODELO BASE DE PITZER

La naturaleza de la tecnología implica que el interés específico se orienta a las reacciones químicas que ocurren cuando los solutos son transportados por advección, difusión y dispersión en el fluido que se mueve en el medio poroso. Para el medio cársico, los detalles de la cinética química clásica en sistemas cársicos epigenéticos no serán tratados aquí y pueden estudiarse en detalle, entre otros, en Bögli (1980) y Dreybrodt (1988). Otros aspectos corresponden al transporte reactivo basado en la 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.

El modelo de Pitzer, como un modelo de interacción, a diferencia de los modelos de asociación, es aplicable con gran éxito a solutos disociados, y 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 (Amado y Blanco, 2010).

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.

De acuerdo con Amado y Blanco (2010) 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:

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

Donde  $N_0$  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  $L \Lambda_{ij}(I)$  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 ( $\gamma_{MX} C$ ), 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:

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

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

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

Donde:

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

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

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

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:

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

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

Como las aguas saladas alteran la densidad del agua provocan algunos efectos importantes en el campo de flujo de manera que además de los controles hidrogeológicos se incorporan los de tipo químico. Estos procesos son similares a los que ocurren en la disolución de las sales y el transporte de salmueras en diapiros salinos, en el transporte de lixiviados de rellenos sanitarios y en residuales industriales, como han señalado Bear et al. (1999).

Por ello, en casos específicos, la solución para aclarar la dinámica del flujo local y regional pasa por acoplar los procesos de flujo controlado por la densidad, el calor advectivo-dispersivo y el transporte de masa. Ello se logra mediante el desarrollo de un balance soluto-fluido en el sistema acuífero, la evaluación del efecto de la producción de salmueras que son incorporadas al fluido y la identificación de los flujos de soluto desde o hacia el sistema, provenientes de otras fuentes eventuales (Bear, 1972; Bear y Bachmat, 1990, Bear y Buchlin, 1991; Bear y Cheng, 2010, Bear, Zaslavsky e Irmay, 1968; Bear et al., 1999).

De acuerdo con Pitzer y Kim (1974), Bedolla, (2007) ha señalado que “el modelo de Pitzer también es aplicable en soluciones multicomponentes, sin embargo, para mejorar la capacidad de predicción requiere una serie de términos de mezclado adicionales, los cuales solo pueden ser estimados a partir de datos experimentales para el sistema electrolito-electrolito-solvente específico”.

## ECUACIONES BÁSICAS DE GOBIERNO

Los problemas de compatibilidad de las aguas son de tipo hidrodinámico y geoquímico y consideran los temas siguientes:

- Rango de compatibilidad entre las aguas producidas y las aguas subterráneas.
- Compatibilidad de la mezcla agua producida/agua subterránea y la litología de la formación receptora.
- Compatibilidad de la mezcla agua producida/agua subterránea y los sellos/barreras de la formación receptora.
- Capacidad calorífica de la formación acuífera y sus componentes (poros, grietas, cavernas).
- Concentración de hidrocarburos (y todo tipo de Líquidos de Fase No Acuosa –LFNA-) y de la distribución de particulados y sólidos en suspensión.
- Actividad de los NORM (Naturally-Occurring Radioactive Materials).
- Tiempo de tránsito de las aguas subterráneas y de la mezcla agua producida/agua subterránea
- Propiedades geoquímicas específicas de las aguas:
  - Incrustación/Precipitación
  - Microelementos tóxicos

- Corrosión
- Propiedades físicas del acuífero.
- Problemas ambientales & necesidades de tratamiento de las aguas.

El algoritmo general que se presenta (Molerio, 2015, 2017, 2020a, 2020b, 2021a, 2021b) está orientado a la resolución de los problemas más complejos relacionados con la interacción agua roca y la organización del flujo polifásico gobernado por la diferencia de densidad de las fases líquidas, como son:

1. La capacidad de asimilación de las aguas producidas y de la mezcla.
2. Reactabilidad y efecto de mezcla en acuíferos cársicos
3. Definición de la longitud de mezcla
4. Transporte de calor

Las ecuaciones básicas de gobierno del transporte de fluido se resumen a continuación:

- a) Campo de flujo en medio heterogéneo, discontinuo y anisotrópico

$$V \cdot [\rho K (\Delta \Psi + \Delta Z)] = \rho [S(\alpha + n\beta) + C] \frac{d\Psi}{dt}$$

- b) Balance de Cloruros y fraccionamiento isotópico

$$c_i - c_0 = \frac{1}{V} \int_0^{m_i} \delta m$$

- c) Fracción de agua fresca en el sistema acuífero

$$x = \frac{Cl_s - Cl_m}{Cl_m - Cl_f}$$

- d) Posición teórica de la interfaz salina

$$\frac{1}{2}(1 + \alpha) \frac{b^2}{a^2} = \frac{q_0}{K} x - \frac{Q_w}{4\pi K} \ln \frac{(x + x_w)^2 + y^2}{(x - x_w)^2 + y^2}$$

- e) Coeficientes viriales

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

- f) Conservación y movimiento: continuidad estadística de las propiedades físicas

$$K(P) = \frac{1}{n\Delta L(P) \int_{n\Delta L} K dL_U}$$

- g) Difusión bidimensional en medio anisotrópico y régimen no permanente

$$D\nabla^2 c - V_{grad}c = \frac{\partial c}{\partial t}$$

h) Transporte de soluto

$$\frac{\partial c}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}$$

i) Transporte de calor

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{c_w \rho_w}{k} \left( \frac{\partial v_x T}{\partial x} + \frac{\partial v_y T}{\partial y} + \frac{\partial v_z T}{\partial z} \right) = \frac{c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t}$$

j) Reacciones químicas

$$Rs = \sum_{m=1}^r L_{Sm} A_m$$

Para resolver el problema de la distorsión del campo de flujo horizontal existen diferentes aproximaciones. Aquí seguimos una aproximación Euleriano-Lagrangiana para la **solución analítica (Bear, Zaslavsky e Irmay, 1968) de la Ecuación de Dupuit (1863)-Forcheimer (1930)** para flujo permanente, ha demostrado su validez para el caso en que en que  $r > 1,5h$ , ya que entonces puede desprejarse, en la realidad, la configuración curvilínea del flujo horizontal, así como las componentes de flujo vertical y la variación de la velocidad horizontal en el plano vertical. De ese modo, se cumple uno de las condiciones de borde del modelo conceptual de Dupuit; esto es, que el gradiente vertical sea idéntico en todos los puntos de la sección vertical del acuífero y que el gradiente sea igual a la pendiente de la superficie libre del acuífero.

Para resolver la ecuación de transporte 2-D de la ecuación de convección-dispersión de flujo permanente para velocidades y dispersión variables (flujo no uniforme) en el dominio de flujo una buena aproximación se logra con la solución propuesta por Tartakovsky y Di Federico (1997) siempre que la relación entre la dispersividad transversal y la longitudinal sea menor o igual a 0,1. Con esta aproximación, no es necesario asumir una velocidad "promedio" y la solución se aproxima más a la realidad.

La aproximación para la descripción del proceso de transporte más ventajosa es, sin dudas, de tipo Euleriana. En este caso, la determinación de la variación temporal del proceso de transporte midiendo en puntos fijos del dominio de flujo es más económica. Implica, claro está, que la descripción completa del campo de flujo se basa en descripciones instantáneas de las velocidades en todo el campo de flujo con una, a veces, fuerte diferencia cuando se trata de régimen permanente o variable.

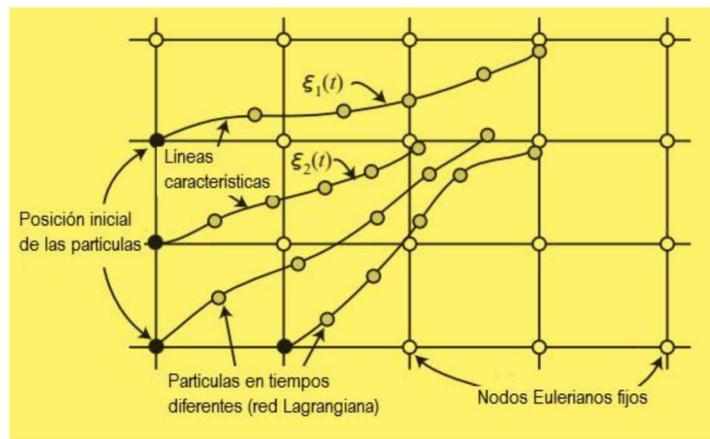
El campo de velocidad Euleriano se describe en un sistema de coordenadas cartesianas del modo siguiente (Bear, 1972), donde las velocidades son las variables dependientes y las coordenadas (x,y,z,t) identifican los puntos fijos en el dominio de flujo respecto a cierto arreglo de referencia temporal y espacial, tal que,

$$V_x = V_x(x, y, z, t)$$

$$V_y = V_y(x, y, z, t)$$

$$V_z = V_z(x, y, z, t)$$

La aproximación Euleriana (Bear, 1972) tiene el inconveniente de provocar una “dispersión numérica” del término advectivo de la ecuación de transporte. Esta dispersión aparente suaviza artificialmente cualquier frente abrupto de avance de la concentración de soluto. De ahí que, (Fig. 5) la aproximación más completa sea de tipo Euleriano-Lagrangiano, ya que la aproximación de Lagrange describe el cambio de posición con el tiempo de la partícula  $\xi$ , debida al movimiento en el dominio de flujo, de tal manera que  $\xi = \xi(t)$ , a partir de una posición inicial  $\xi(0)$ . Así, para una partícula dada en el dominio de flujo, su posición vendrá dada en una red deformada tal que,  $\xi = (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ .



**Fig. 5. Sistema coordinado de control Euleriano (fijo)-Lagrangiano (móvil), ligeramente modificado de Bear (1972).**

Los aspectos generales de la transferencia de temperatura en la mezcla de aguas producidas y naturales (MAP) fueron descritos con detalle en Molerio (2021a). En el estricto sentido de la transferencia bajo condiciones de flujo turbulento el tema fue tratado desde hace muchos años por Obukhov (1941, 1949). Siguiendo a Lelievre (1981) volveremos al problema específico, considerando que a temperatura es un escalar inerte y pasivo que en condiciones de turbulencia del flujo provocan una mezcla del campo, en que los gradientes de temperatura se enlazan por transferencia térmica y la temperatura se homogeniza en el fluido resultante.

El fundamento de ello se sustenta en la **Ecuación General de Conducción** que se expresa como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\delta T) = u \cdot \nabla(\delta T) = \chi \nabla^2(\delta T)$$

Donde,  $\delta T$  es la fluctuación de temperatura absoluta  $T$ ,  $u$ , la parte fluctuante de la velocidad del fluido y  $\chi$ , la difusividad térmica.

A partir de la ecuación de conservación:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{2} \langle \delta T^2 \rangle \right) = -\langle \varepsilon_T \rangle$$

Siendo  $\langle \varepsilon_T \rangle$  la tasa media de disipación de la varianza  $\langle \delta T^2 \rangle$  de las fluctuaciones de la temperatura, que se relaciona con el campo  $\delta T(\chi)$  mediante la tasa media de disipación de la energía cinética turbulenta:

$$\langle \varepsilon_T \rangle = \chi \left\langle \left[ \frac{\partial(\delta T)}{\partial \chi_i} \right]^2 \right\rangle$$

En la aplicación de la Primera Hipótesis de Kolmogorov, el campo de fluctuación de la temperatura se considera una función de la estructura, de manera que:

$$\langle \Delta T^2(r) \rangle = \langle [\delta T(\chi + r, T) - \delta T(\chi, t)]^2 \rangle$$

En la zona de equilibrio se expresa como:

$$\langle \Delta T^2(r) \rangle = \langle \epsilon_T \rangle \langle \epsilon_u \rangle^{0.5} \chi^{0.5} h \left( \frac{r}{\eta_T} \right)$$

En la que h es una función universal de la variable adimensional  $\eta_T$ , para:

$$\eta_T = \chi^{3/4} \langle \epsilon_u \rangle^{-1/4}$$

Y, en rigor, (Lelievre, 1981),  $\eta_T$  es el valor más bajo de temperatura que existe en la masa de fluido en movimiento, comparable con la del torbellino disipativo (Eddie) más pequeño  $\eta_T \approx \eta$ .

Pero en la zona de inercia y convectiva, ya la función de la estructura no depende de  $\chi$ , por lo que la temperatura  $T_r$  viene dada por:

$$T_r = \langle \epsilon_T \rangle \langle \epsilon_u \rangle^{-1/3} r^{2/3}$$

Por lo que, en el dominio donde la difusividad térmica atenúa las fluctuaciones de temperatura y para distancias de correlación muy pequeñas, resulta:

$$\langle \Delta T^2(r) \rangle = \frac{1}{3} \chi^{-1} \langle \epsilon_T \rangle r^2$$

La simulación muestra que la temperatura, en condiciones de flujo no lineal, no darciano, se disipa a muy corta distancia de punto de inyección, como se muestra en las Figs. 6 y 7 (modificadas de Molerio, 2017). La Fig. 7, en particular, muestra un caso real de evaluación de "deep injection spill". Ambas demuestran que el flujo no lineal contribuye de manera muy efectiva a disipar la alta temperatura que, eventualmente, puede tener la MAP.

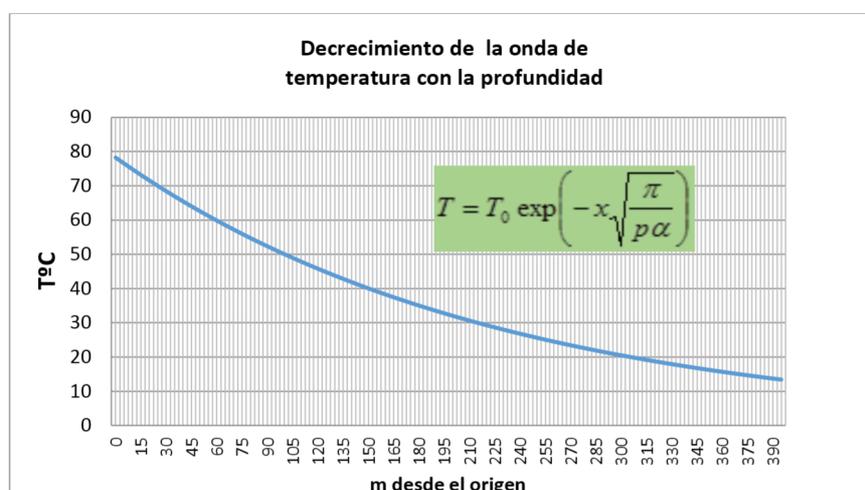


Fig. 6. Decrecimiento de la onda de temperatura con la profundidad

En experimentos de laboratorio, Tilgner, Belmonte y Libchaber (1993) demostraron hace mucho que la capa límite térmica no es estable marginalmente, por lo que la separaron en dos zonas; una de capa límite y otra que denominaron región central. En sus experimentos con flujo a Números de Reynolds ( $Re$ ) del orden de  $10^3$  cerca de la zona de transición, observaron aparición de la turbulencia (la llamada turbulencia fuerte, dura) con Número de Prandtl ( $Pr$ ) de 0,7. Así, un cambio del comportamiento convectivo debe esperarse con valores de  $Re$  de ese orden, para los cuales la dinámica del flujo a gran escala resulte turbulento y dominado por la inercia

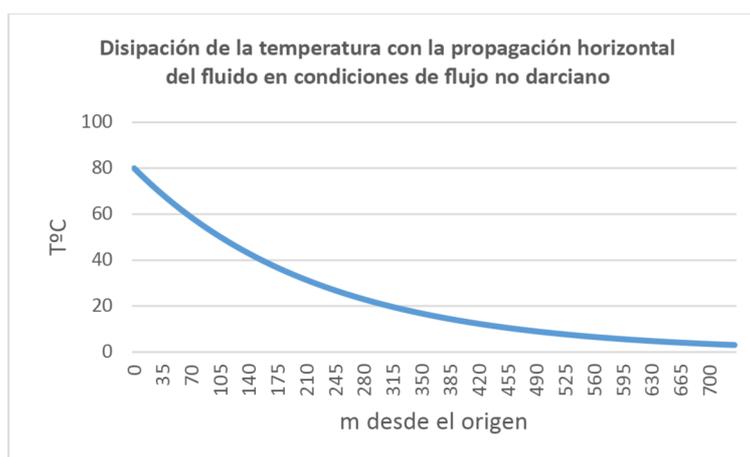


Fig. 7. Disipación de la temperatura con la propagación horizontal del fluido en condiciones de Flujo No Darciano

## IMPACTOS SOCIOECONÓMICOS Y AMBIENTALES

Lograr impactos ambientales positivos ha sido una premisa para la generalización del modelo y la tecnología, sometida a las regulaciones ambientales cubanas, a las políticas ambientales de las empresas operadoras de petróleo y gas que la han aplicado todas bajo el esquema de la iniciativa TSM (Towards Sustainable Mining). Las más importante fueron resumidas en algunos trabajos recientes (Molerio 2019b, 2019c, 2021c); a saber:

- Significativo ahorro energético al reducir el proceso de inyección a presión a profundidad por el cambio de disposición gravitacional somera. En un caso se evaluó un ahorro en energía para la inyección de 3,3 Ton de petróleo equivalente al año por pozo; lo que equivale a suministrar electricidad a poco más de cuatro viviendas urbanas al año)
- Notable reducción de costos de perforación y adaptación de pozos para la disposición de aguas producidas, al reducirse la profundidad varias decenas de veces y los insumos de construcción considerablemente suma
- Eliminación o reducción de las operaciones de tratamiento de aguas para que satisfagan normas de vertimiento, al no requerirse de ciertos productos químicos o costosas acciones de mejoramiento de la calidad del agua
- Eliminación de las restricciones de agua de baño y pesca en las áreas de influencia de los dispositivos de descarga costeros y marinos
- Reducción de los costos de construcción y operaciones de obras civiles en los casos de instalaciones preexistentes (no para obras nuevas)
- Disminución del personal técnico a cargo de la operación y mantenimiento
- Facilitación del mantenimiento, limpieza y reparación de las instalaciones de inyección somera
- Significativo ahorro en la perforación/adaptación de pozos abandonados al sustituirse por pozos someros
- No se incrementan los pasivos ambientales al incorporarse la mezcla de aguas producidas (MAP) al sistema de flujo activo
- Se elimina la posibilidad de fugas en profundidad (Deep water spill) ha ocurrido recientemente  
Permite el aprovechamiento de aguas costeras o interiores altamente salinizadas

- Se aprovecha la energía calorífica de la radiación natural para contribuir a la evaporación (en el caso de soluciones abiertas)
- Reduce el impacto de inserción de descargas profundas en el mar
- Se aprovecha la capacidad de autodepuración del sistema natural para amortiguar la dispersión-difusión de metales y microelementos así como del calor
- Disminuye la acción negativa en la biota y estructuras marinas (como el blanqueamiento de corales)
- Los horizontes someros (sobre todo los carsificados) tiene una capacidad decenas de veces superior al horizonte carbonatado productivo, por lo que asimilan mayores volúmenes de agua producida y/o disminuye el número de pozos de inyección TISPM

## NOTA FINAL

El horizonte acuífero somero receptor de las aguas producidas es un entorno diferente al profundo de donde provinieron las aguas producidas. Constituye un dominio de flujo distinto por la forma en que se organiza el escurrimiento subterráneo, el tiempo de interacción agua roca y, sobre todo porque se convierte en un sistema de flujo multifásico de densidad variable, gravitacional, la mayor parte de las veces, no isotérmico. La mezcla que se produce con las aguas naturales que circulan por el sistema receptor produce cambios en las propiedades físicas y químicas del fluido bajo un nuevo equilibrio termodinámico.

Las ecuaciones de gobierno de ese proceso están continuamente en proceso de desarrollo debido a que no se trata de una solución estandarizada, sino que es necesario evaluar, caso a caso, en la medida que las propiedades del fluido a inyectar, el que circula por el sistema receptor y la nueva mezcla resultante. El entorno geológico del dominio de flujo imprime, en cada caso, condiciones específicas al proceso y, en ciertos medios, como el cársico, las ecuaciones se complican cuando es necesario incluir, además de los algoritmos que describan la heterogeneidad del medio, la estructura de un campo de propiedades físicas con anisotropía tridimensional progresiva en el que interactúan cuatro espacios de flujo manera diferenciada (matriz, poros, grietas y cavernas) e irregularmente relacionados.

Garantizar que la tecnología sea una solución ambientalmente aceptable y que satisfaga las normativas vigentes es un principio básico de su desarrollo.

## RECONOCIMIENTOS

El desarrollo de la tecnología TISPM enfrenta no pocos problemas teóricos cuya solución se ha abordado con diferentes aproximaciones, la inmensa mayoría basada en modelos teóricos basados en la exploración directa (o con técnicas indirectas) del karst y las cuevas. La colaboración en los trabajos de campo y gabinete o la discusión de estos resultados se ha beneficiado siempre del aporte e intercambio con: Vladimir Otero<sup>‡</sup>, Esteban Grau, Antonio González, Mario Guerra, Efrén Jáimez, Oriol Chávez, José F. Santiago, José F. Corella, Antonio Magaz, Lisbeth Núñez, María del Carmen Martínez y Orestes Sardiñas. Dos publicaciones periódicas han acogido sistemáticamente la publicación de los resultados de la TISP, de ahí nuestro especial reconocimiento a Carlos Benedetto y al equipo de *"Argentina Subterránea"* y a Argelia Fernández y su equipo de *"Cuba: Medio ambiente y Desarrollo"*. El apoyo logístico de algunos operadores de petróleo ha sido fundamental, por lo que va nuestro agradecimiento a CUPET, PEMEX, PETRAF, PDVSA, SAINT MARTIN CONSTRUCCIONES y SHERRITT INTERNATIONAL. Y también, por supuesto, se agradece el apoyo de las autoridades ambientales cubanas: Jorge Álvarez y Antonio Casanova. Toda la elaboración de estos estudios estuvo sostenida por el apoyo de Ana, mi compañera.

## REFERENCIAS

Amado G., E., L.H. Blanco. (2010): **Aplicación del Modelo de Interacción Iónica de Pitzer a coeficientes osmóticos de soluciones de KCl en función de la temperatura.** Revista BISTUA :31-46

Bear, J. (1972): **Dynamics of fluids in porous media**. Dover edition, American Elsevier Publishing Company, Inc., New York, 756:

Bear, J. y Y. Bachmat (1990): **Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London 553:

Bear, J. y J.M. Buchlin (1991): **Modelling and applications of transport phenomena in porous media**. Springer Science+Business Media Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 380:

Bear, J., A. H.-D. Cheng (2010): **Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport**. Jacob Bear [Ed]: **Theory and Applications of Transport in Porous Media**. Volume 23. Springer Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 834:

Bear, J., A. H.-D. Cheng, S. Sorek, D. Ouazar, I. Herrera (1999): **Seawater Intrusion in Coastal Aquifers. Concepts, Methods and Practices**. Springer Science + Business Media Dordrecht. **Theory and Applications of Transport in Porous Media**, Vol 14, 625:

Bear, J. D. Zaslavsky, S. Irmay (1968): **Physical principles of water percolation and seepage**. Arid Zone Research, UNESCO, Paris, 465:

Bedolla Hernández, M. L. (2007): **Coefficientes de actividad y osmótico en soluciones de electrolitos fuertes del tipo 1:3, 1:4, 2:1, 2:2, 3:1, 3:2 y 4:1 a 298.15 K, usando una ecuación modificada de Pitzer**. Univ. Autónoma de Tlaxcala, Tlaxcala, 91:

Boesch, D.F., N.N. Rabalais (1989): **Produced waters in sensitive coastal habitats. An analysis of impacts. Central Coast Gulf of Mexico**. Louisiana Univ. Marine Consortium. Chauvin, Louisiana, 156:

Bögli, A. (1980): **Karst Hydrology and Physical Speleology**. Springer-Verlag, Heidelberg, 284:

Dreybrodt, W. (1988): **Processes in karst systems. Physics, Chemistry and Geology**. Springer-Verlag, Heidelberg, 288:

Kim, H. T., W. J. Frederick (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., W. J. Frederick (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, Nº 1 .2008) :21-31

Lelievre, J.C. (1981): **Une introduction à la physique de la turbulence**. La Houille Blanche 6:375-392

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. (2015): **Disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos litorales someros salinizados**. Ciencias de la Tierra y el Espacio, enero-junio, 2015, Vol.16, No.1,:75-87, ISSN 1729-3790

Molerio-León, L.F. (2017): **Modelo para la disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos litorales someros salinizados. 3. Transferencia de calor.** Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente, 17(33) julio-diciembre 2017, 8

Molerio-León, L.F. (2019a): **Modelo para la disposición final de aguas producidas tratadas de Yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos litorales someros salinizados.** Octava Convención de Ciencias de la Tierra, Geociencias'2019. XIII Congreso de Geología (GEOLOGÍA'2019). V Taller sobre Aguas subterráneas, Gestión y Contaminación GEO11-CE1. Resumen. Conferencia especial, La Habana: 178

Molerio-León, L.F. (2019b): **Sistemas de monitoreo de las aguas terrestres en yacimientos gasopetrolíferos onshore del trópico húmedo: diseño, operación y optimización.** IX Congreso de Gestión Ambiental, XII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo, La Habana, GA-202

Molerio-León, L.F. (2019c): **Gestión del alcance de responsabilidad ambiental empresarial en la operación de yacimientos gasopetrolíferos onshore.** IV Congreso de Política, Derecho y Justicia Ambiental. XII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo, La Habana, PJD 004

Molerio-León, L.F. (2020a): **Modelo para la disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos someros salinizados. 1. Ecuaciones de gobierno.** Argentina Subterránea, 20(47-48):71-74. <https://www.researchgate.net/publication/345344234>

Molerio-León, L.F. (2020b): **Modelo para la disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos someros salinizados. 2. Aplicabilidad del modelo.** Argentina Subterránea, 20(47-48):75-77. <https://www.researchgate.net/publication/345344524>

Molerio-León, L.F. (2021a): **Petróleo y Karst: Bases teóricas de una tecnología para la disposición final de aguas producidas tratadas en acuíferos cársicos someros y cuerpos de agua salinizados.** La Habana, 102: <http://fade.smartnec.com/images/prod/lyD9XLDi9F6eaoKQoCoRBarRn4rNvd.pdf> <https://www.researchgate.net/publication/351274801>

Molerio-León, L.F. (2021b): **Petróleo y karst 2: el papel del cavernamiento en el control de la migración de la inyección somera de aguas producidas en medios cársicos.** Argentina Subterránea 21(50) OCTUBRE-NOVIEMBRE 2021:21-46, ISSN 1851-894x <http://www.fade.org.ar/Bibliografia.html>, <https://www.researchgate.net/publication/356893720>

Molerio-León, L.F. (2021c): **Sostenibilidad ambiental del desarrollo gasopetrolífero onshore: Experiencias en el Trópico Húmedo.** *Environmental sustainability of oil & gas developments Onshore: Experiences from the humid tropics.* Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo, 21(41) julio-diciembre 2021, La Habana, 7: <http://cmad.ama.cu/index.php/cmاد/article/view/308>

Obukhov, A.M. (1941): **Sobre la distribución de la energía en el espectro del flujo turbulento.** Doc. Acad. Cienc, URSS, 30(4):22 (*en ruso*)

Obukhov, A.M. (1949): **Estructura del campo de temperatura en flujo turbulento.** Noticias Acad. Cienc. URSS, Geografía y Geofísica, 13(1):58 (*en ruso*)

Pitzer K.S., J. Kim (1974): **Thermodynamics of Electrolytes IV. Activity and Osmotic Coefficients for mixed Electrolytes.** Journal of the American Chemical Society, 1974, 96, 5701-5707.

Pitzer K. S. (1979): **Theory: ion interaction approach**, en: **Activity coefficients in electrolyte solutions**, R. M. Pytkowitz [Ed], CRC Press, Boca Raton: 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.

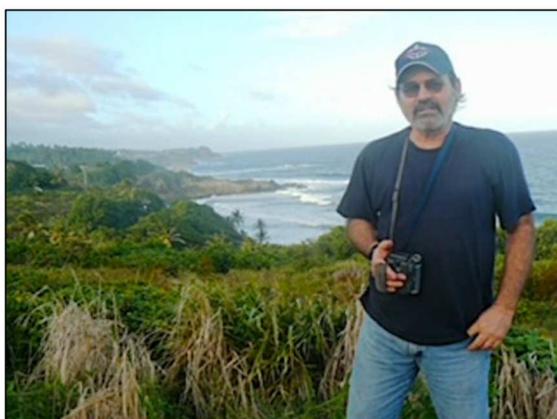
Tartakovsky, D.M., V. Di Federico (1997): **An Analytical Solution for Contaminant Transport in Nonuniform Flow. Transport in Porous Media**, Kluwer Academic Publ. Netherlands 27: 85–97

Tilgner, A., A. Belmonte, Al Libchaber (1993): **Temperature and velocity profiles of turbulent convection in water**. Physical Rev.,47(4), April: R2253-R2256

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



Geólogo de Yacimientos Minerales e Hidrogeólogo-Hidrotécnico, MSc. en Hidrología Isotópica, Ex-Director del Servicio Hidrológico de la República de Cuba, Especialista Principal en Proyectos e Ingeniería en INVERSIONES GAMMA; Acreditación Profesional para la dirección y ejecución de obras subterráneas; Auditor Ambiental; Experto para diferentes agencias de Naciones Unidas; Miembro de la Academia de Ciencias de Nueva York y de 38 sociedades científicas internacionales, cubanas y extranjeras. Conferencista y docente en universidades de Latinoamérica y Europa; tutor o cotutor de 35 tesis de grado, maestrías y doctorados. Ha participado en unos 480 proyectos de su especialidad en 47 países. Tiene publicados unos 340 artículos en revistas especializadas y es autor o coautor de 17 libros y folletos. Ha participado en unos 135 congresos científicos. Posee numerosas condecoraciones y premios por su labor profesional (Orden Carlos J. Finlay del Consejo de Estado de la República de Cuba, el Premio Jesús Fco. de Albear “A la Obra de la Vida” (Sociedad Cubana de Geología) y el Premio Internacional Espeleo 2018 (España).