

## GESTIÓN DE ACUÍFEROS CÁRSICOS EN YACIMIENTOS GASOPETROLÍFEROS COSTEROS: EXPERIENCIAS EN LA FRANJA NOROCCIDENTAL DE HIDROCARBUROS DE CUBA

### MANAGEMENT OF KARST AQUIFERS IN COASTAL OIL AND GAS FIELDS: EXPERIENCES IN THE NORTHWESTERN HYDROCARBON BELT OF CUBA

 **LESLIE F. MOLERO-LEÓN\***

*Inversiones GAMMA, S.A. Cuba.*

\* [especialistaprincipal@gmail.com](mailto:especialistaprincipal@gmail.com)

**RESUMEN:** La infraestructura fundamental de las operaciones *onshore* de exploración/producción de petróleo y gas de Cuba, iniciada con fuerza a mediados de la década de 1970, se ha construido sobre los sistemas acuíferos costeros cársicos someros de la Franja Noroccidental de Hidrocarburos de Cuba. Estas aguas subterráneas, en dependencia de su mineralización básicamente, soportan sistemas locales de abasto de agua potable, riego, agricultura, ganadería de subsistencia y en el ecotono litoral, turismo de sol y playa. Esta contribución describe las experiencias y resultados más importantes de la gestión de las aguas terrestres que incluyen: a) la operación, desde 1998, de una red optimizada de monitoreo -especialmente diseñada y construida- del régimen y calidad (incluidas aquellas de tipo radiológico) de las aguas subterráneas operada con diferente contenido y frecuencia; b) diseño de sistemas novedosos de disposición final de las aguas producidas ambientalmente sostenibles; c) introducción de métodos no convencionales ambientalmente sostenibles de prospección de petróleo y gas; d) implementación de medidas de protección y saneamiento de las aguas terrestres; e) aplicación conjunta y sistemática de métodos geológicos, espeleológicos, geofísicos y geoquímicos para la delimitación de los sistemas locales de flujo y la caracterización de los procesos de transporte de masa.

**Palabras clave:** acuífero costero, gestión, carso, karst, petróleo.

**ABSTRACT:** The main operational infrastructure of oil & gas E&p developed since the 1970's is developed on the shallow coastal karst aquifers underlying the Heavy Crude Oil Belt of Northern Habana-Matanzas. Depending on its mineralization, these ground waters supplies domestic and municipal supplies, irrigation, husbandry and familiar agriculture and along the coastal ecotone, sun and beach tourism. This contribution describes the experiences and most important results of the regional water management comprising: a) the operation, since 1998, of a specific designed and constructed optimized ground water regime monitoring network of different physical, chemical, radiological parameters sampled at varied frequencies; b) development of innovative methods for the final disposal of produced waters; c) introduction of new non-conventional methods for oil and gas prospecting; d) application of specific measures for protection and sanitation of terrestrial waters; e) systematic joint use of geological, speleological, geophysical and geochemical (including isotope geology and hydrology techniques) and mathematical modelling for specific problems oriented to the delimitation of the local water systems and the characterization of the processes of mass transport.

**Keywords:** management, karst, coastal, aquifer, oil.

**Recibido:** 04/02/2024

**Aceptado:** 21/03/2024



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



## INTRODUCCIÓN

La Franja Noroccidental de Hidrocarburos de Cuba se extiende a lo largo de 190 kilómetros de la costa norte, desde la capital del país, hasta las inmediaciones de la ciudad de Cárdenas, al este (Figura 1) y es la zona más productiva de petróleo y gas de Cuba.

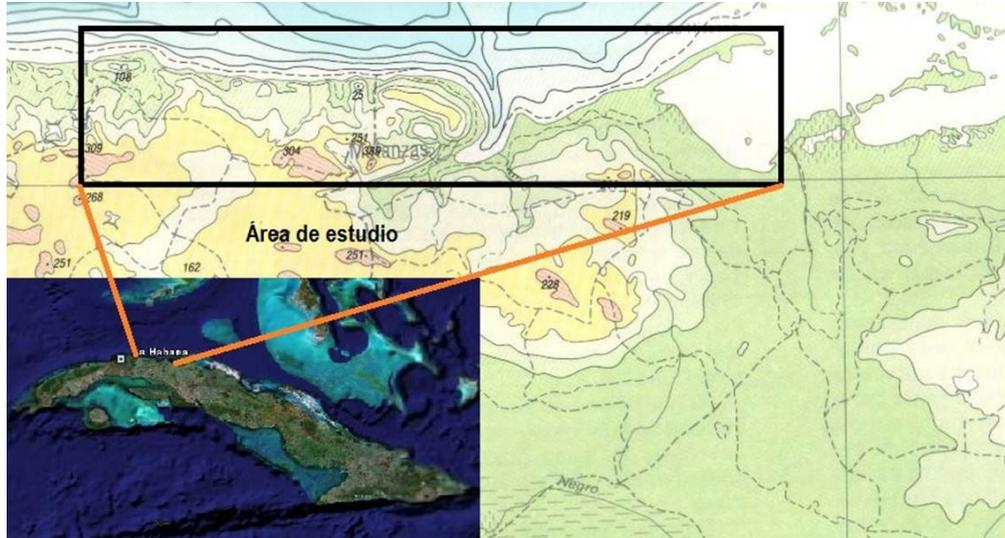


Figura 1. Límites del área de estudio

Los sedimentos de la Cobertura Neoautóctona que afloran, están constituidos por un paquete de rocas carbonatadas que presenta:

- a. Un singular sistema de agrietamiento orientado básicamente de Este a Oeste, paralelo a las estructuras de la sutura marginal norte cubana que ha contribuido al control estructural del desarrollo de elementos morfológicos notables (Molerio, 2023), como la propia línea de la costa actual, la morfología de algunas terrazas marinas, el desarrollo de no pocas formas cársicas singenéticas y epigenéticas (Figuras 2 y 3), desde la alineación de dolinas hasta la de grandes sistemas cavernarios como el de Bellamar (Figura 4) e incluso, en series de micro y nanoformas en el interior de estas cuevas (Figura 5).
- b. Un sistema ortogonal de agrietamiento que favorece el desarrollo de formas cársicas, sobre todo de absorción, expresadas en campos de dolinas o de conducción, expresada en cuevas donde han tenido lugar (y ocurren en la actualidad) procesos de cavernamiento hipogénético asociados a la mezcla de aguas de diferente mineralización y saturación respecto a la calcita y a la dolomita y patrones de drenaje con descarga al mar, formando un karst litoral conforme o, mediante drenaje convergente, a los ríos que desembocan en el mar y cortan perpendicularmente las terrazas marinas, formando valles encajonados en profundos y estrechos cañones (Figura 6).
- c. Un desarrollo de la carsificación controlada por niveles de base cuya altura varió como consecuencia de los cambios eustáticos y glaciostáticos del nivel del mar durante las glaciaciones cuaternarias que se expresan en niveles de cavernamiento superpuestos, tanto secos, como de funcionamiento estacional o permanentes algunos, incluso, por debajo del nivel del mar, cuya interrelación forma el dominante acuífero de flujo difuso (e incluso concentrado), somero, que caracteriza toda la región y cuyos recursos han permitido el sostenimiento de la población, industrias locales, agricultura de subsistencia y ganadería en toda la región (Figura 7).



Figura 2. Línea de costa modelada bajo control tectónico a la altura de Faro de Maya (Foto del autor).



Figura 3. Terrazas marinas abandonadas en la costa de Bacunayagua (Foto del autor).

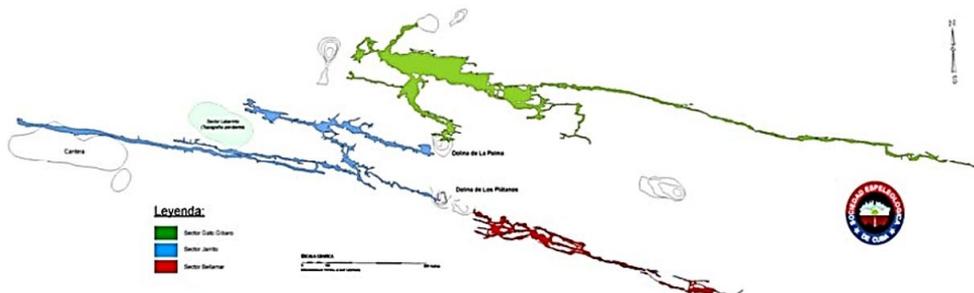


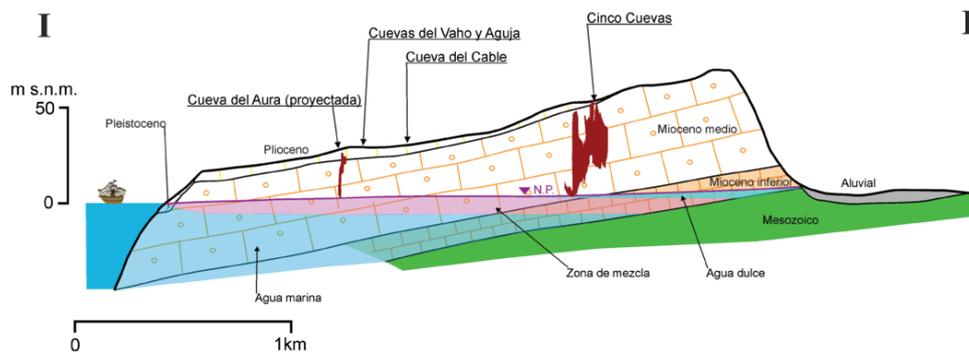
Figura 4. Sistema cavernario Bellamar. Topografía del sistema cavernario Bellamar, mostrando las alineaciones de las galerías que siguen los patrones estructurales de las fracturas marginales de distensión (cortesía de Esteban Grau, ligeramente simplificado)



**Figura 5.** Micro y nanoformas cársticas hipogénicas en Cinco Cuevas, Boca de Jaruco (Foto Vladimir Otero).



**Figura 6.** Cañón del río Bacunayagua (Foto del autor)



**Figura 7.** Corte hidrogeológico de la margen oriental del tercio inferior del río Jaruco mostrando los niveles de cavernamiento (según Otero et al., 2021)

La preservación de la calidad de esas aguas terrestres (superficiales y subterráneas) y marinas, del ecotono costero -sobre todo del ecotono costero- de los recursos propios del karst regional (físicos y bióticos) y la satisfacción de la demanda local de las instalaciones gasopetrolíferas *onshore* ha sido el objetivo de los trabajos sistemáticos que hemos llevado a cabo en la región desde 1998.

Esta contribución describe las experiencias y resultados más importantes de la gestión sistemática de las aguas terrestres de nuestro equipo de trabajo desde 1998, que incluyen: a) la operación, desde 1998, de una red periódicamente optimizada de monitoreo -especialmente diseñada y construida- del régimen y calidad (incluidas aquellas de tipo radiológico) de las aguas subterráneas operada con diferente contenido y frecuencia; b) diseño de sistemas novedosos de disposición final de las aguas producidas ambientalmente sostenibles; c) introducción de métodos no convencionales ambientalmente sostenibles de prospección de petróleo y gas; d) implementación de medidas de protección y saneamiento de las aguas terrestres (superficiales y subterráneas); e) aplicación conjunta y sistemática de métodos geológicos, espeleológicos, geofísicos y geoquímicos (incluidos de hidrología y geología isotópica y modelación matemática) para la delimitación de los sistemas locales de flujo y la caracterización de los procesos de transporte de masa. Una versión extensa fue presentada en el XV Congreso Internacional de Hidráulica CUBAGUA 2023, La Habana, Cuba en octubre de 2023.

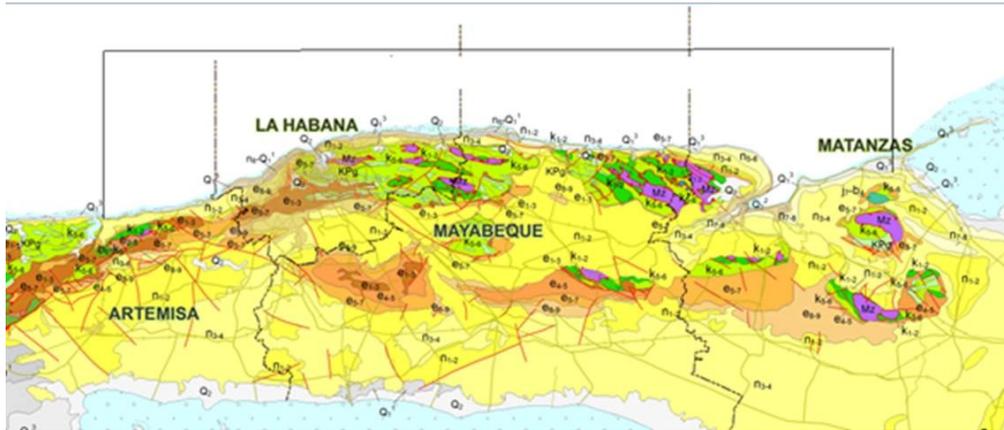
## CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL

El sistema acuífero cársico, discontinuo, de limitada extensión y espesor, somero, de tipo libre y flujo difuso que descarga tanto al mar como, a trechos, a las corrientes fluviales de tipo antecedente que desembocan en la costa norte, tales como los ríos Cojímar, Bacuranao, Tarará, Guanabo, Boca Ciega, Jaruco, Santa Cruz, Canasí, Puerto Escondido y Bacunayagua, entre otros se caracteriza, en general, por bajos gradientes hidráulicos y, en lo común, por la elevada transmisividad de las rocas acuíferas carsificadas que provocan una elevada interacción entre la red fluvial y el acuífero, por un lado, y entre el mar y el acuífero, por otro (Molerio y Rocamora, 2005).

Sin embargo, se reconocen vastas zonas en las que la acuosidad de estas mismas rocas es prácticamente nula, como es el caso de la Loma del Encanto, en la vertiente oriental de la cuenca del río Puerto Escondido y, complementariamente, otras unidades estratigráficas y complejos formacionales presentan una acuosidad de cierta consideración. En general, en estos casos se trata de rocas de diferente tipo, de edad Cretácico-Paleógeno que forman acuíferos semiconfinados, semilibres y, aún, confinados. La composición física, química y radioisotópica de esta agua plantea nuevos problemas acerca de la posición de las zonas de alimentación, el proceso de adquisición de la composición química y el tiempo medio de residencia de las aguas en este territorio (Figura 8).

## RECURSOS DE EXPLOTACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La zona es de productividad baja a media hasta las cuencas de la provincia de Matanzas, donde es de media a alta. Los recursos de explotación de las aguas subterráneas se estiman en unos 60 Hm<sup>3</sup>/año (aunque no se dispone de datos públicos actualizados desde 2000). Las evaluaciones iniciales datan de 1975 y fueron sistematizadas inicialmente por Berri et al. (1975: Molerio y Sardiñas, 2023).



**Figura 8.** Mapa geológico a escala 1:500 000 del territorio estudiado

## AMENAZAS AL RÉGIMEN Y LA CALIDAD DE LAS AGUAS TERRESTRES

Las amenazas naturales al régimen y la calidad de las aguas se resumen a continuación y, un grupo importante están básicamente asociadas a efectos secundarios del Cambio Climático tales como:

- Cambios directos e indirectos sobre las variables del ciclo hidrológico (régimen de lluvias, temperatura, escurrimiento superficial, recarga -infiltración- y evaporación/ evapotranspiración).
- Elevación del nivel del mar, con el consiguiente avance tierra adentro de la intrusión marina e incremento del área costera inundada y afectaciones en los ecotonos tierra-océano y de erosión y desmantelamiento de las estructuras de tierra (Figura 9).
- Cambios directos en el régimen de explotación de las aguas subterráneas, distribución de los sistemas de extracción por las sequías recurrentes.
- Redistribución de las fuentes y focos de contaminación.

Las amenazas al régimen y la calidad de las aguas subterráneas asociadas al desarrollo gasopetróífero del territorio se presentan en la Tabla 1. Aquellas inducidas por la actividad social, industrial, turística y agropecuaria paralelas o independientes a la actividad gasopetróífera se resumen en la Tabla 2.



**Figura 9.** Desmantelamiento de la infraestructura de producción petrolera por erosión costera asociada a la elevación del nivel del mar (Foto del autor)

**Tabla 1.** Amenazas al régimen y la calidad de las aguas subterráneas asociadas al desarrollo gasopetrolífero del territorio

Amenazas	Focos destacados
Derrames de petróleo	Instalaciones de perforación Transporte Centros de procesamiento (baterías e IBM) Centros de almacenamiento Ductos
Fall out (inmisiones)	Precipitación de lluvias ácidas (NOx, SOx, SHx, COx) Incremento de procesos de nitrificación
Derrames de agua producida	Instalaciones de perforación Transporte Centros de procesamiento (baterías e IBM) Centros de almacenamiento Ductos
Radioactividad inducida (TNORM)	Pozos de inyección Instalaciones de perforación Transporte Centros de procesamiento (baterías e IBM) Centros de almacenamiento Ductos
Incremento de la carga de nutrientes	Depósitos de chatarra Repositorios de desechos petrolizados (agua, sedimentos y cortes de perforación) Centros de procesamiento (baterías e IBM) Centros de almacenamiento Depósitos de chatarra Repositorios de desechos petrolizados (agua, sedimentos y cortes de perforación)
Incremento de la concentración de metales pesados y microelementos	Pozos de inyección Instalaciones de perforación
Compuestos orgánicos del tipo de Hidrocarburos totales, grasas y aceites, fenoles, Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP), BTEX	Instalaciones de perforación Transporte Centros de procesamiento (baterías e IBM) Centros de almacenamiento Ductos Pozos de inyección

**Tabla 2.** Amenazas al régimen y calidad de las aguas inducidas por la actividad social, industrial, turística y agropecuaria paralelas o independientes a la actividad gasopetrolífera

Amenazas	Focos destacados
Incremento de la carga de nutrientes	Comunidades, poblaciones y ciudades que vierten residuos a los ríos o directamente al mar Ganadería Agricultura Actividad biótica en cavernas Vertederos de residuos sólidos
Incremento de la concentración de metales y microelementos	Vertederos de residuos sólidos Descomposición de los residuos de la fauna y flora subterránea (en cavernas)
Radioactividad natural (NORM)	Sedimentos carbonatados recientes o miocénicos litorales
Agotamiento de los recursos de agua dulce (por incremento de la explotación o por contaminación)	Boca de Jaruco, Santa Cruz del Norte, Yumurí, Varadero-Cárdenas

## GESTIÓN DE LOS ACUÍFEROS CÁRSICOS Y SOLUCIONES ESPECÍFICAS

Como respuesta a la gestión sostenible de los cuatro grupos de sistemas (aguas terrestres superficiales, aguas terrestres subterráneas, aguas marinas y el ecotono litoral) hemos encaminado nuestras acciones a:

- a. La operación, desde 1998, de una red optimizada de monitoreo (diferenciada por actores y especialmente diseñada y construida para cada grupo de necesidades) del régimen y calidad (incluidas aquellas de tipo radiológico) de las aguas terrestres y marinas operada con diferente contenido y frecuencia.
- b. Diseño de sistemas novedosos de disposición final de las aguas producidas ambientalmente sostenibles.
- c. Introducción de métodos no convencionales ambientalmente sostenibles de prospección de petróleo y gas.
- d. Implementación de medidas de protección y saneamiento de las aguas terrestres (superficiales y subterráneas).
- e. Aplicación conjunta y sistemática de métodos geológicos, espeleológicos, geofísicos y geoquímicos (incluidos de hidrología y geología isotópica y modelación matemática) para la delimitación de los sistemas locales de flujo y la caracterización de los procesos de transporte de masa.

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### Redes de monitoreo

La red de monitoreo de las aguas subterráneas que opera INVERSIONES GAMMA, S.A. en el territorio está compuesta por 52 pozos especialmente diseñados y construidos con esos fines (Figura 10). Se complementa con 9 pozos adicionales y dos manantiales que se monitorean en momentos específicos. En el momento de mayor desarrollo de algunos campos y obras complementarias, la red llegó a sumar 64 pozos. La red de monitoreo de las aguas superficiales y marinas la integran cinco (5) estaciones, a la que se incorporaron otras cinco (5) luego del incendio en la Base de Supertanqueros de Matanzas.



**Figura 10.** Estación de monitoreo del régimen y la calidad de las aguas subterráneas en Boca de Jaruco (Ana Margarita Sardiñas en la foto del autor)

La data de lluvia e hidrometeorológica dispone de la información de las estaciones INSMET Varadero y Casablanca. La estación Boca de Jaruco provee información climática complementaria y en ella se ha instalado un colector de agua de lluvia para el estudio de la composición química e isotópica. En este último caso, la información sobre isótopos estables  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  y la histórica de  $^3\text{H}$  se obtiene de la estación del Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR) OIEA-GNIPCU01 a unos 50 km al sursuroeste del área de estudio.

## Tecnología TISPM

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. 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 (Molerio, 2015, 2022a) permite diseñar las mezclas para inyectarlas (Figura 11) en acuíferos someros (a unas pocas decenas de metros) sin necesidad de devolverlas al yacimiento (a varios centenares 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.

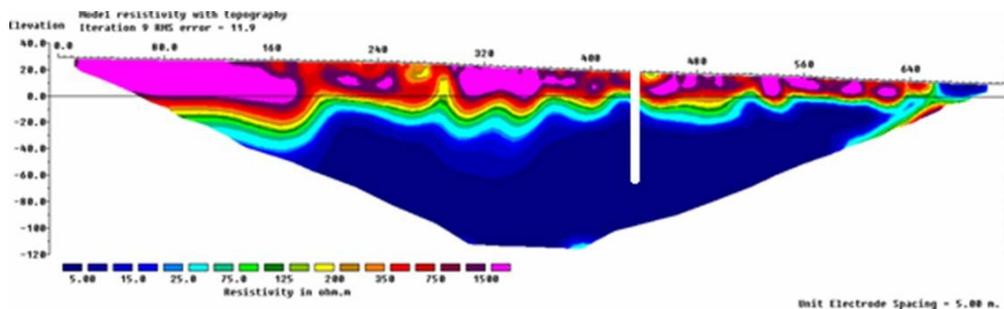


Figura 11. Corte geoelectrico de una zona potencialmente apta para la inyección somera. El pozo de inyección está señalado con una traza vertical de color blanco

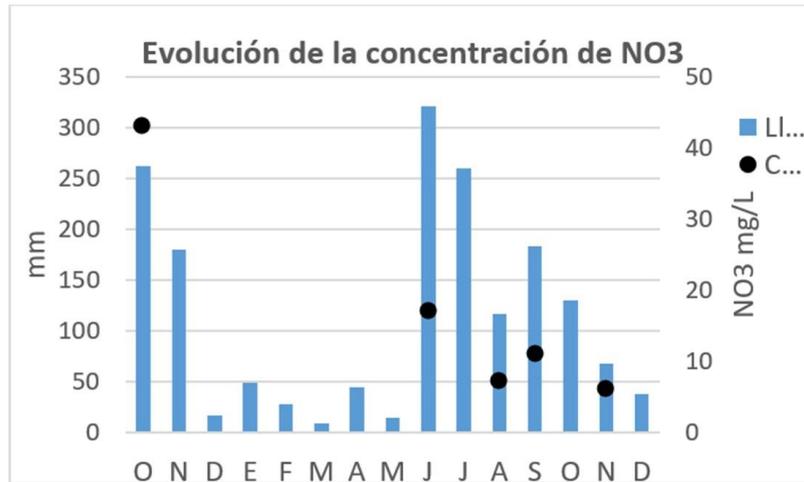
## Métodos no convencionales de exploración

La presencia de karsts hipogénicos formados por la migración de gases desde yacimientos gasopetrolíferos profundos pueden constituir evidencias indirectas de reservas de petróleo y gas. Los llamados "oil-field karsts" (karst de campos de petróleo) descubiertos y definidos a fines de los 90 en Estados Unidos constituyen un método complementario no convencional de exploración cuyo alcance fue descrito por Molerio (2022b).

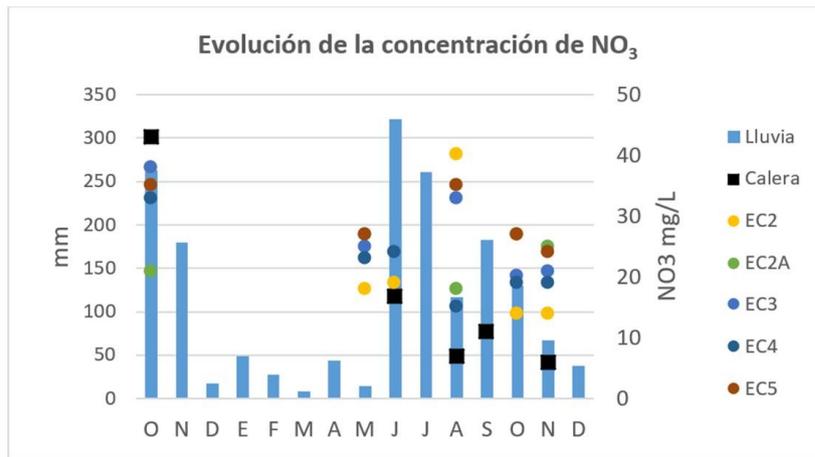
## Los procesos de nitrificación

Una singularidad de los procesos de enriquecimiento de murientes nitrogenados en las aguas subterráneas de la región es que, en algunos casos, no proviene de las fuentes tradicionales de nitrificación, como la agricultura, ganadería, desechos industriales y domésticos, sino de la dinámica biogeoquímica de la fauna y la flora de las cavernas. Otra singularidad es que el movimiento de los compuestos nitrogenados se produce en el acuífero por dos vías diferentes

(Figuras 12 - 13): movilización o disolución en dependencia del modo en que el flujo se organiza: concentrado o difuso (Molerio, 2021; Molerio, Martínez y Sardiñas, 2022).



**Figura 12.** Distribución conjunta de las láminas de lluvia acumuladas y concentración de nitratos en las aguas subterráneas del manantial La Calera, entre octubre 2020 y diciembre, 2021

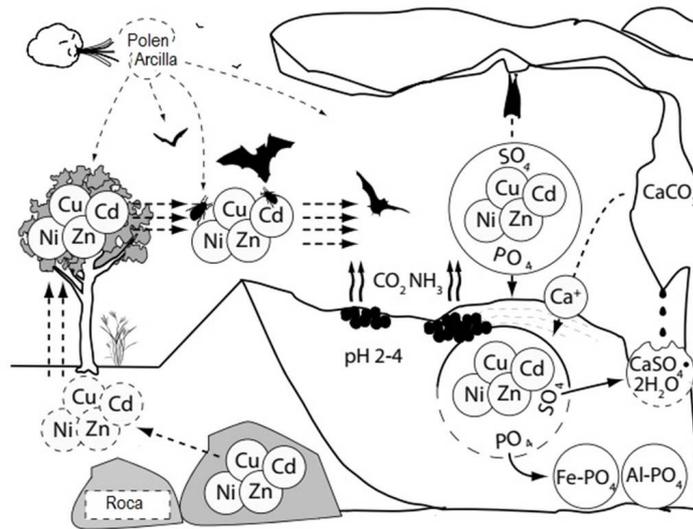


**Figura 13.** Distribución conjunta de las láminas de lluvia acumuladas y concentración de nitratos en las aguas subterráneas del acuífero El Cayuelo (EC), entre octubre, 2020 y diciembre, 2021

Las cuevas constituyen sumideros puntuales de N fijado en la forma del guano y sales de nitrógeno cristalizadas (McFarlane, Lundberg y van Rentergem, 2017; Figura 14). En opinión de estos autores, el nitrógeno que se entrega a la atmósfera como amonio (gas) se pierde en el ecosistema y el que se exporta desde la cueva en la forma de aguas que drenan los depósitos de guano no se distribuyen geográficamente de manera uniforme y no está disponible para la mayor parte del ecosistema. A largo plazo, el secuestro de Nitrógeno en el guano puede ser del orden de decenas de miles de años.

### Medidas de protección y saneamiento

Existe realmente un problema regional de aumento de la mineralización de las aguas subterráneas en el acuífero inducida por factores naturales y artificiales que es totalmente independiente de las operaciones gasopetrolíferas.



**Figura 14.** Enriquecimiento orgánico e inorgánico del guano debido a los murciélagos (tomado de Wurster, et al., 2015)

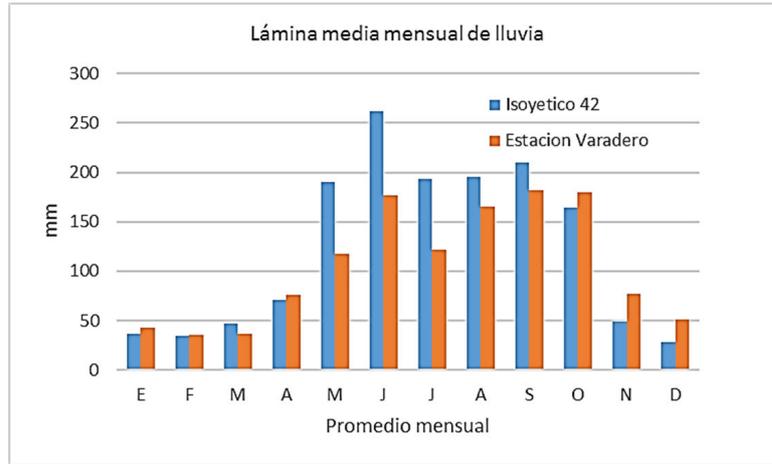
Los factores naturales están asociados a eventos hidrometeorológicos y han provocado un sostenido avance tierra adentro de la intrusión marina en los últimos 20 años asociados a (Figuras. 15-18):

- El déficit de lluvia y el incremento de la evapotranspiración, que han disminuido notablemente la recarga natural de las aguas, por escorrentía superficial o por la reducida infiltración, que han favorecido el deterioro de la barrera natural contra la intrusión al disminuir considerablemente la carga de agua dulce sobre las marinas.
- La elevación del nivel del mar, como consecuencia del calentamiento global y el balance con los procesos de levantamiento/hundimiento neotectónicos activos en el territorio, que ha favorecido el avance de la intrusión marina tierra adentro.
- La consecuente disminución del nivel de agua (cota piezométrica, carga) con inclinación de la pendiente hacia el mar reduce o invierte el gradiente natural y el desequilibrio hidrodinámico provoca que el líquido de mayor densidad ascienda y ocupe la posición del agua dulce.

El resultado más importante del procesamiento de estas series cronológicas es que absolutamente todos los atributos tienden a decrecer en el período. Es decir, que como se puede notar en la Figura 17, se presenta una sostenida tendencia a la disminución de la lámina anual de lluvia anual, así como de la lámina mensual de lluvia, la lámina de lluvia máxima en 24 horas, los días con lluvia de cada mes y, consecuentemente, los niveles de agua subterránea (Figura. 18).

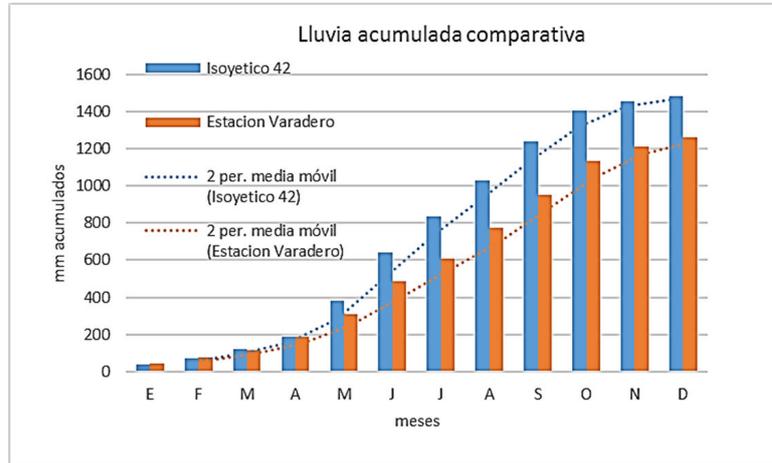
## Materiales radioactivos naturales

El monitoreo de isótopos radioactivos de <sup>222</sup>Rn demostró la presencia de Materiales Radioactivos Naturales (NORM) de base en el territorio y asociados, en primer lugar, con las aguas subterráneas someras del horizonte acuífero Mioceno-Cuaternario litoral. Se trata de aguas relativamente jóvenes pero que muestran una activa presencia de Radón-222 que se deriva de la desintegración del Ra-226 (Figura 19). Recientemente se concluyeron estudios que demuestran que el Radón 222 se moviliza con aguas de largo tiempo de residencia en el acuífero como consecuencia del impulso que provocan lluvias torrenciales recargando el acuífero (Molerio y González, 2023). Queda pendiente definir si estos materiales radioactivos naturales también están asociados a los producidos tecnológicamente y asociados a la exploración y producción de petróleo y gas (T-NORM).



**Nota:** Obsérvese la sostenida disminución de las láminas promedio mensuales en el período 1999-2018 excepto en los meses de noviembre, diciembre y enero, interesante efecto asociado a la variación en la distribución temporal de la precipitación muy probablemente asociado al calentamiento global.

**Figura 15.** Lámina media mensual comparativa de la lluvia registrada en la Estación Varadero respecto a la del Mapa Isoyético de Cuba de 42 años



**Figura 16.** Comparación entre las láminas de lluvia acumulada para el período 1999-2018 en la Estación Varadero y las del Mapa Isoyético de Cuba para Matanzas de 42 años



**Figura 17.** Lámina de lluvia anual registrada en la Estación Varadero en el período 1999-2018. La línea negra continua indica la tendencia lineal decreciente de la variable

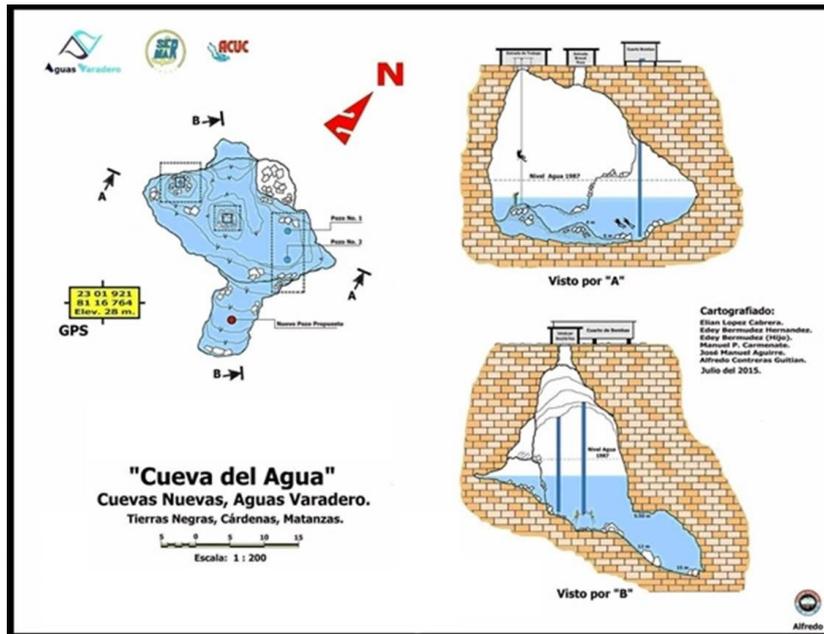


Figura 18. Cueva Nueva, Tierras Negras, Cárdenas (cortesía de Alfredo Contreras, ligeramente modificado)

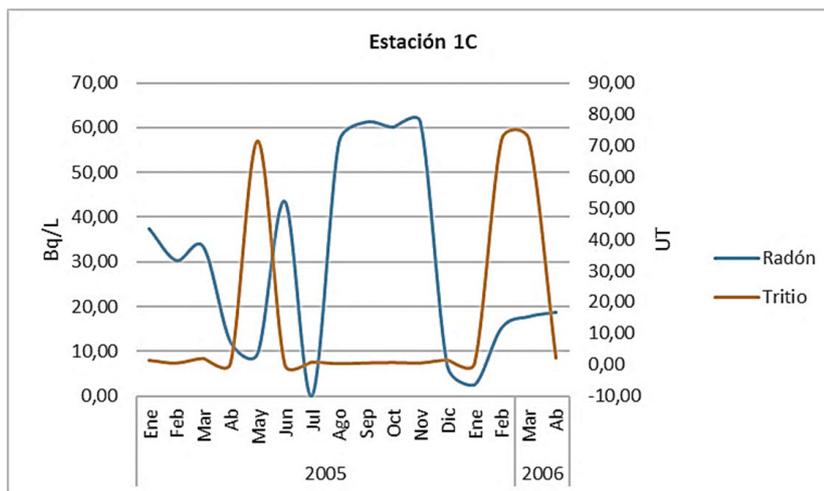


Figura 19. Ritmo de  $^{222}\text{Rn}$  y  $^3\text{H}$  en las aguas subterráneas de la estación de monitoreo 1C

## NOTA FINAL

Las acciones de gestión de los recursos hidráulicos superficiales y subterráneos en esta región deben enfrentar el fuerte impacto de la actividad petrolera. La naturaleza cársica de los acuíferos litorales involucrados, de limitada productividad, pero de alta incidencia local para la satisfacción de necesidades de desarrollo agropecuario y pesca de subsistencia y el abastecimiento doméstico, requiere de acciones más coherentes y enérgicas que las que hasta ahora se están llevando a cabo. En este sentido, una de las acciones no estructurales más importantes concierne a la necesidad de crear unidades de gestión del agua que actúen como rectoras en el espacio específico y que, del mismo modo, las entidades de exploración/producción de petróleo y gas se adhieran coherentemente a los principios de gestión ambiental en materia de agua; sobre todo, bajo principios como los de la Iniciativa de Minería Sostenible que siguen algunas de las empresas que actúan en el territorio.

En este sentido, la creación de entidades de gestión del agua en el ámbito de cuencas, bajo cualquiera de sus modalidades implica la ejecución de una serie de procesos que se pueden llevar a cabo en forma paralela y que son continuos en el tiempo. Estos procesos se pueden ordenar en tres grupos: un proceso central de articulación, un grupo de procesos de carácter socio-económico y otro grupo de carácter técnico-físico.

Estos procesos han sido implementados de manera muy dispar por los actores mencionados anteriormente:

- Proceso de comunicación, concientización y sensibilización.
- Proceso de formación de alianzas y acuerdos.
- Proceso de legalización de funciones.
- Proceso de formulación de escenarios, evaluaciones y diagnósticos.
- Proceso de consolidación operativa de cada actor.
- Proceso de organización de la administración.
- Proceso de formulación de estrategias y de valorización económica.
- Proceso de operación del sistema hidráulico compartido.
- Proceso de conservación de cuerpos de agua, hábitat silvestre y biodiversidad.
- Proceso de control de contaminación, de recuperación de cursos de agua y zonas aledañas a los ríos, y de recuperación de la capacidad de drenaje a nivel rural y urbano.

Concebido como un sistema automatizado, tipo SCADA a implementar por etapas, la arquitectura general del sistema se diseña como un instrumento para la toma de decisiones basado en la interpretación inmediata de la data de campo, la modelación matemática de los procesos del régimen y calidad de las aguas terrestres y marinas, la toma de decisiones multicriterio (deterministas, estocásticas) complementadas con indicadores automatizados (de inteligencia artificial) sobre un soporte geográfico delimitado por la cuenca vertiente y establecido sobre el conjunto de sistemas de flujo superficial y subterráneo.

## RECONOCIMIENTOS

Mucho del éxito de esta gestión se debe a la buena voluntad y el rigor de las políticas ambientales de la mayor parte de las compañías gasopetrolíferas que operan o han operado en el territorio que han brindado su comprensión y apoyo logístico en el diseño y ejecución de estas tareas durante todos estos años. Nuestro reconocimiento, por ello, a las autoridades y personal técnico de Sherritt International Oil & Gas (Cuba), Sherritt Power-ENERGAS, PEBERCO-PEBERCAN Elvin Saruk, Bary Zimmerman, Fernando Gil, Miguel Gala, Julio Hernández, Alberto Villalonga; de la Empresa de Perforación y Explotación de Occidente (EPEPO) a Juan Carlos Dávila, Carmen Montesinos e Ileana Morejón y de EPEP CENTRO a José Miguel Verrier y Xiomara Guedes. Nelvis Estrada y Yoandy González de PETRAF, S.A. A nuestros compañeros de CESIGMA, S.A. e INVERSIONES GAMMA, S.A.: María del Carmen Martínez y Orestes Sardiñas y a Ana, mi compañera, que además tiene esa dualidad. También, de manera especial, a los espeleólogos que nos han acompañado en exploraciones y estudios en la región: Vladimir Otero, Mario Guerra, Marilú Labrada, Ámbar Menéndez, Elio Fariñas, Omar Azcue, Oriol Chávez, Orlando Velázquez, Orlando Solés, Reynaldo Suarez, Esteban Grau, Ercilio Vento, Lisbeth Núñez y Brigitte Pileta. A los dos revisores anónimos por su tiempo y atención a este artículo.

## REFERENCIAS

- Berri, I., Loskutov, K., Díaz, A., Varela R. (1975): *Principios Fundamentales del Esquema General del Aprovechamiento Complejo de los Recursos Hidráulicos y agrarios de la República de Cuba. Tomo 3: Condiciones Hidrogeológicas*. Grupo Hidráulico Nacional, D.A.P. La Habana. Inédito. Archivo Inst. Nac. Rec. Hidráulicos. p. 292.

- MacFarlane, D., Lundberg, J., Rentergem van G. (2017): *Preliminary observation on Tropical Bat caves as Biogeochemical Nitrogen Sinks*. Proc. 17<sup>th</sup> Internat. Congr. Speleol. Sidney: 157-160.
- 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. 16 (1) pp.75-87. ISSN 1729-3790.
- Molerio-León, L.F. (2021): *Las cuevas como focos puntuales de nitrificación de las aguas subterráneas en el karst*. Gota a Gota. <https://sites.google.com/site/espeleovillacarrillo/home/gotaa-gota-no-24-2021>.
- Molerio-León, L.F. (2022a): Avances en los algoritmos de base de la tecnología de inyección somera de aguas producidas de yacimientos gasopetrolíferos (TISPM) en medios cársicos. *Revista Maya de Geociencias*. UNAM. Edición Especial: 21-36.
- Molerio-León, L.F. (2022b): Métodos no convencionales de prospección de petróleo y gas: karsts hipogénicos de Cuba Occidental. *Revista Maya de Geociencias*. UNAM. Marzo: 52-59 <https://www.researchgate.net/publication/358924299>.
- Molerio-León, L.F. (2023): Karst en fracturas de distensión del litoral norte de Artemisa-Matanzas. Consecuencias ingeniero-geológicas e hidrogeológicas. *Cuba Geográfica. Cuadernos de Geomorfología de Cuba*. (4): 19-33. <https://www.researchgate.net/publication/367251013>.
- Molerio-León L. F., González Ramírez C. M. (2023): Respuesta impulsional de Tritio y Radón 222 por el efecto de las lluvias intensas en un karst litoral. 1. Análisis cualitativo. *Revista Maya de Geociencias*. UNAM. México, Número Especial 9 Febrero: 88-113. <https://www.researchgate.net/publication/368535400>.
- Molerio-León, L.F., Martínez Hernández, M. C., Sardiñas Gómez O. (2022): Variación de los tenores de nitratos en el Manantial Cársico La Calera (Boca de Jaruco, Cuba) en respuesta a eventos de lluvia. *Gota a gota*. (25): 84-89. Grupo de Espeleología de Villacarrillo. G.E.V. (ed.) <https://drive.google.com/file/d/1yXLUO29CNyEEqSpBf4qQluHxHSP18NBN/view>.
- Molerio León, L.F., Rocamora Álvarez, E. (2005): *Sistemas acuíferos del noreste de la provincia de La Habana, Cuba*. Memorias. VI Congreso de Geología. La Habana. Memorias 1<sup>a</sup> Conv. Cubana de Ciencias de la Tierra.
- Molerio-León, L.F., Sardiñas, A. M. (2023): Evaluación de los recursos hídricos de Cuba (II): Dominio de los acuíferos cársicos, regionalización y recursos potenciales de agua subterránea. *Gota a gota*. (29): 33-46. Grupo de Espeleología de Villacarrillo, G.E.V. (ed.) <https://www.researchgate.net/publication/370601094>.
- Otero Collazo, V., González Ramón, A., Molerio León, L. F., Chávez Bonora, O., Alonso Martínez, M. (2021): Sobre la espeleogénesis de las cavidades de Boca de Jaruco, Mayabeque-Cuba. Primeros resultados de las campañas de 2019-2020. *Boletín SEDECK*. 16. 15: <https://www.leg.mn.gov/docs/2013/other/130624/vol2.pdf>.

**Leslie F. Molerio León.** Geólogo de Yacimientos Minerales e Hidrogeólogo-Hidrotécnico. Ms. C. en Hidrología Isotópica, Consultor en Ingeniería Ambiental y Gestión de Recursos Hídricos, Ex-Director del Servicio Hidrológico de la República de Cuba, Especialista Principal en Proyectos e Ingeniería en INVERSIONES GAMMA, S.A., acreditado profesionalmente (MINFAR-CUBA) para la dirección y ejecución de obras subterráneas; Auditor Ambiental graduado. Experto para IADB-BID, FAO, OIEA, OMS-OPS, OMM, PNUD, PNUMA, UNESCO y UNICEF; Miembro de la Academia de Ciencias de Nueva York y Embajador de su Bicentenario y de 35 sociedades científicas internacionales, cubanas y extranjeras; Experto y Miembro de la Unidad de Respuesta Rápida a Crisis del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) para la Industria Extractiva. Conferencista y docente en diferentes universidades de América Latina, El Caribe y Europa y tutor o cotutor de unas 35 tesis de grado, maestrías y doctorados. Ha participado en unos 480 proyectos de su especialidad en 47 países. Su bibliografía inédita comprende unos 460 estudios y reportes y ha publicado unos 335 artículos y notas en revistas especializadas y en memorias de eventos científicos y es autor o coautor de 17 libros y folletos. Ha participado en unos 135 simposios y congresos científicos. Posee numerosas condecoraciones, distinciones y premios nacionales cubanos, internacionales y extranjeros por su labor profesional, científica y docente; entre ellas, la Orden "Carlos J. Finlay" que confiere el Consejo de Estado de la República de Cuba, el Premio "Jesús Fco. de Albear" de la Sociedad Cubana de Geología y el Premio Internacional "Espeleo 2018".