

Impacto del abasto a la desalinizadora de una planta de gas sobre un acuífero subterráneo

Ing. Odet Caridad Herrera Betancourt email: odetchb@hidraulicos.cu

Dra. Haydee Llanusa Ruiz email: hllanusa@tesla.cujae.edu.cu
Grupo de Agua Subterránea (GAS), Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH),
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae).

RESUMEN

Para incrementar el abastecimiento de agua a la desalinizadora de la planta de gas de Boca de Jaruco, es necesaria la explotación de nuevos pozos, los cuales pudieran desequilibrar el estable comportamiento hidrodinámico que existe en el territorio, debido a que la planta se encuentra en las vecindades de fuentes de abastecimiento de vital importancia, como lo es la fuente de abasto al poblado Boca de Jaruco. Se decide realizar dos simulaciones, la primera sin extraer el caudal sumario de 30 m³/h, exigido por el proyecto para el abasto a la desalinizadora y la segunda extrayendo dicho caudal. Los dos resultados fueron analizados y demuestran que no habrá desestabilización en los recursos de agua subterránea en el territorio.

Palabras clave: acuífero, agua subterránea, AQÜIMPE, explotación, modelo.

Impact over an aquifer used to supply water to a desalination system of a gas plant

ABSTRACT

In order to increase water supply to the desalination plant of the Boca de Jaruco gas plant, there is a need to drill new wells, which could affect the stable hydrodynamic behavior existing in the territory, because the plant is located near extremely important sources of water supply, such as the source that supplies water to the Boca de Jaruco town. To investigate the problem it was decided to make two simulations: in the first simulation, the summary flow of 30m³/h required for the project for supplying water to the desalination plant was not included, and in the second simulation the summary flow was abstracted. The results of both simulations were analyzed and they provide evidence that groundwater resources in the territory will not be affected.

Keywords: aquifer, groundwater, AQÜIMPE, exploitation, model.

INTRODUCCION

La planta de gas ENERGAS S.A., ubicada cerca del poblado Boca de Jaruco, en el municipio Santa Cruz del Norte, perteneciente a la provincia Mayabeque, produce energía eléctrica a partir del gas natural en sus instalaciones de producción de petróleo. Actualmente la planta tiene 360 MW de capacidad energética instalada y se amplió para utilizar el calor excedente y la disponibilidad adicional de gas. Como parte de este proceso se planificó la expansión de la generación eléctrica.

La planta tiene cinco turbinas a gas, operando en un ciclo simple y se invirtió en una nueva fase adicionándole un ciclo combinado. Una planta de energía de ciclo combinado recibe este nombre porque se unen dos ciclos, el Bryton y el Rankine aumentando la eficiencia del proceso. El ciclo combinado aprovecha el calor y los gases calientes de escape provenientes de la turbina a gas, que en lugar de ser ventilados a la atmósfera, pasan a la caldera recuperativa de calor. El vapor que se produce en la caldera llega a la turbina a vapor, la cual mueve un generador y origina energía eléctrica adicional de 150 MWh, lo cual incrementará la eficiencia de la planta de 31 a 47%.

En este proceso se utiliza agua desmineralizada la cual entra a contracorriente en la estructura de intercambio térmico de la caldera; esta operación plantea una demanda de agua de 30 m³/h. En las primeras etapas del proyecto se evaluaron las siguientes posibilidades: agua dulce, aguas de baja mineralización y aguas salobres-saladas. Las investigaciones llevadas a cabo desde el año 2006 hasta el presente permitieron concluir que la fuente más segura de abastecimiento de un caudal de 30 m³/h debía buscarse en el acuífero intrusionado que contiene agua salobre – salada, el cual subyace en las instalaciones industriales de la planta. Durante ese período se llevó a cabo un conjunto de estudios geológicos, geotécnicos, geofísicos e hidrogeológicos en la zona de estudio para identificar y evaluar la disponibilidad de las aguas subterráneas, para que estas abastezcan de manera satisfactoria a las calderas regenerativas de vapor, ultimando la construcción de seis pozos para esta operación, de los cuales el caudal extraído de 30 m³/h pasará a una planta desalinizadora de ósmosis inversa para garantizar la seguridad y el buen funcionamiento de los equipos a trabajar en el nuevo proyecto, pero una de las problemáticas existentes en la zona era la cercanía del poblado de Boca de Jaruco y la otra era el asentamiento poblacional cercano a la planta, más conocido como La Genética, las cuales se abastecían de pozos de agua dulce, cerca de los recintos de la planta, por lo que se planteó la siguiente interrogante:

¿Tendrá el abastecimiento de agua a la desalinizadora de la planta de gas de Boca de Jaruco un impacto en los recursos de agua subterránea dulce del territorio?

Con el propósito de dar respuesta a la interrogante anterior, se profundizó en el desarrollo de los modelos matemáticos de simulación del flujo del agua subterránea (Ramos 2012), la modelación matemática en la explotación de acuíferos costeros (Llanusa y Hernández 2010) y la actualidad y las novedades de este tema en Cuba.

Se definió como objetivo general evaluar el abastecimiento de agua a la desalinizadora de la planta de gas de Boca de Jaruco, haciendo uso de la herramienta AQÛIMPE (Martínez et al. 2000), herramienta muy utilizada y difundida en el país y de esta manera poder visualizar el comportamiento hidrodinámico del acuífero y clasificar el impacto negativo y sus posibles alteraciones debido a la nueva explotación en el territorio.

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

Ubicación geográfica de la zona y área de estudio

La zona de estudio donde se encuentra ubicada el área de interés investigada (planta de gas de Boca de Jaruco), radica al Oeste del poblado del mismo nombre, perteneciente al municipio Santa Cruz del Norte, en la provincia Mayabeque, ver figura 1. Este poblado se sitúa a una distancia cercana a los 40 km de la ciudad de La Habana, ocupando un área de aproximadamente 1700 x 1600 metros, la cual se extiende desde la línea de costa hasta el sur de las instalaciones de la planta. El área en estudio limita al Norte con la costa Norte, al Oeste con Guanabo, al Este con el poblado de Boca de Jaruco y al Sur con el partaguas regional a 3 km de la costa.

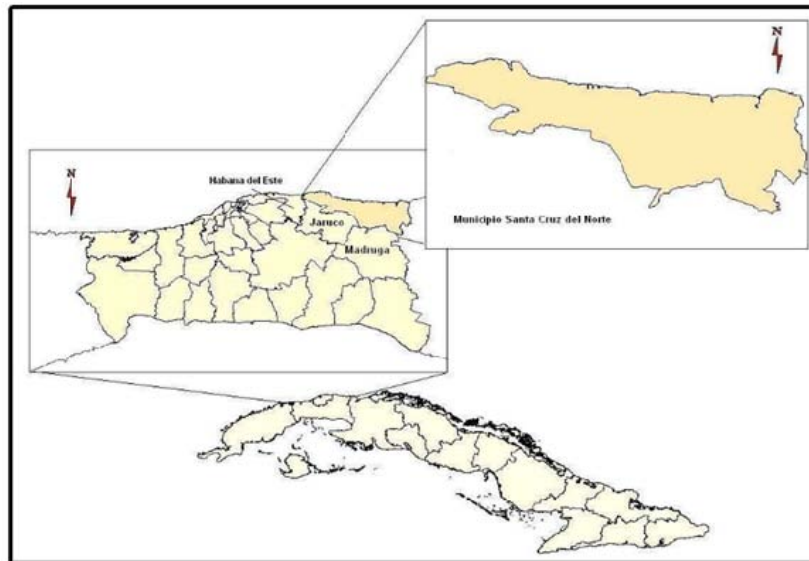


Figura 1. Mapa general de ubicación de la zona de estudio

Poblaciones y redes de comunicación

Existen dos poblaciones cercanas a la zona de estudio, la más cercana es la comunidad El Cayuelo y el poblado de Boca de Jaruco, la primera con una pequeña población de 70 personas y la segunda alrededor de los 1160 habitantes.

La principal vía de comunicación es la autopista de doble vía denominada Vía Blanca, la cual pasa por el Norte de las instalaciones de la Planta de Gas Boca de Jaruco. Existe una adecuada red de terraplenes y caminos vecinales, los cuales enlazan a los principales poblados, asentamientos poblacionales y objetos económicos. Esta es una zona en donde las condiciones naturales del terreno son propicias para la pesca y la explotación y producción de petróleo, convirtiéndose en las actividades fundamentales del territorio.

Características climáticas

Cuba posee en la mayor parte de su territorio un clima tropical con un período lluvioso bien definido que se extiende de mayo a octubre y el poco lluvioso que abarca los meses de noviembre a abril. En general, debido a la condición insular del país, las localidades cercanas a las costas se caracterizan por una menor oscilación diaria de la temperatura y una mayor presencia de las brisas marinas así como valores totales de precipitación inferiores, condiciones que no cambian respecto a la zona de estudio.

Red hidrográfica

El elemento hidrológico de la zona es el río Jaruco, cuyo nombre proviene de la voz indígena Axaruco que significa corriente de agua dulce. El río Jaruco nace en un manantial a 6 km al Suroeste de la Ciudad Condal de Jaruco, en el Potrero Rivas, en la zona de La Jaula, al pie de las montañas conocidas como Escaleras de Jaruco en el actual municipio San José de las Lajas. Tiene una longitud de 31 km y desemboca en la costa septentrional del municipio Santa Cruz del Norte, por el punto llamado Boca de Jaruco, formando un pequeño puerto. En su recorrido el río se sumerge en la zona conocida como La Maculada cerca del Valle del Perú y se desliza de forma subterránea a lo largo de 2 km, resurgiendo en el lugar conocido como Las Tazas aproximadamente a 1 km de Jaruco.

Características geológicas

Las investigaciones geológicas que se llevaron a cabo, estuvieron centradas en la descripción del tipo de roca yacente en la zona de estudio, con el apoyo de la primera y segunda versión del Léxico Estratigráfico de Cuba (MINBAS 2001).

La formación Jaimanitas perteneciente al Pleistoceno Superior es la litología dominante que aflora en toda la superficie del territorio estudiado. Está constituida por calizas biodetríticas masivas, generalmente carsificadas y muy fosilíferas, la cementación es variable y su color predominante es blancuzco, rosáceo o amarillento, formando un espesor único que no excede los 10 m, ver figura 2.



Figura 2. Caliza de la formación Jaimanitas

La formación Vedado está constituida por calizas biohémicas coralino-algáceas y biodetríticas, masivas o con estratificación local poco clara, duras, a veces aporcelanadas, con partes porosas y cavernosas, recristalizadas, que contienen corales en posición de crecimiento o sus fragmentos, con frecuencia dolomitizadas. Contienen por lo general, numerosas impresiones tubulares del coral *Acropora prolifera*. Puede contener lentes de calcaneritas, de color blanco, crema clara, gris y a veces rosada. Sus depósitos se localizan relativamente próximos a la línea costera actual, formando los niveles de terrazas marinas II, III de la región Habana-Matanzas. En el área de interés el espesor de esta formación no sobrepasa los 10m, ver figura 3.

La formación Cojímar se caracteriza por su litología representada por margas calcáreas arcillosas, arenáceas y a veces nodulares, calizas biodetríticas arcillosas, calcarenitas de matriz margosa y arcillas, oscilando entre los colores crema, amarillento, blancuzco y grisáceo, ver figura 4.

La formación Güines en la zona de estudio se destaca por sus calizas biodetríticas de grano fino a medio, fosilíferas, calizas biohémicas, calizas dolomíticas, dolomitas, calizas mitríticas

sacaroidales y lentes ocasionales de margas calcáreas y calcarenitas de poco espesor ver figura 5. La dolomitización es secundaria. Son por lo general masivas, más raramente estratificadas. De coloración blanca, amarillenta, crema o gris. En la zona su espesor no es de gran magnitud, la cual no sobrepasa los 240 m.



Figura 3. Caliza de la Formación Vedado



Figura 4. Caliza de la Formación Cojímar



Figura 5. Calizas de la Formación Güines

Estas cuatro formaciones que afloran en el área de estudio integran igual número de bandas sublatitudinales, que de Norte a Sur sitúan a la formación Jaimanitas como la más próxima a la costa, la formación Vedado y Cojímar en el centro y más alejada de la costa, la formación Güines.

Características hidrogeológicas

Las condiciones hidrogeológicas que a continuación se describen están tomadas de estudios anteriores realizados en áreas relacionadas con la zona investigada (Molerio 2011a), (Molerio 2011b) y (Molerio 2011c).

En el área se desarrolla un acuífero litoral, libre (sin presión), de flujo difuso, en rocas carbonatadas carsificadas miocénicas. Este acuífero, conocido como cuenca Costera Norte, abarca un área de aproximadamente 60 km² en el tramo comprendido entre los ríos Guanabo y Jibacoa. Sus recursos de agua subterránea son del orden de los 20,5 hm³/año.

Las altas trasmisividades y porosidades, los bajos gradientes hidráulicos de las rocas cavernosas en el área estudiada entre El Cayuelo y el Río Jaruco perteneciente a la zona en estudio, han permitido que se desarrolle un acuífero local, que se extiende desde la costa hasta la primera terraza marina y está fuertemente intrusionado por las aguas marinas que penetran tierra adentro perpendiculares a la línea costera.

La profundidad de yacencia de las aguas subterráneas, en la zona costera donde se desarrollan las calizas de las formaciones Jaimanitas, Vedado y Cojímar muestran variaciones entre 1 y 12 m de profundidad. Al sur del territorio, en las rocas de la formación Güines, se registran profundidades entre 12 y 40 m, llegando a alcanzar hasta 52 m.

En sentido general, la parte más salinizada del acuífero se corresponde con el desarrollo de los horizontes cuaternarios. Pero entre todas las rocas del complejo formacional Neógeno–Cuaternario el intercambio entre las aguas subterráneas no tiene barreras y, de hecho, constituyen una sola unidad hidrogeológica. Ello conduce a que no solamente la intrusión marina, sino cualquier otra carga contaminante se transmite libremente a todo el sistema acuífero.

Adicionalmente cualquier alteración en el balance hídrico del sistema acuífero, ya sea por incremento en las tasas de extracción, sequías prolongadas, obras de recarga inducida, drenajes y similares, pueden provocar el avance tierra adentro de las aguas marinas con las que el acuífero está en equilibrio hidrodinámico. Por ello, el desequilibrio entre el acuífero y las aguas marinas y las fluviales es una fuente potencial de alteración sustancial de la calidad del agua.

MODELO CONCEPTUAL DEL ACUIFERO BOCA DE JARUCO

Un modelo conceptual de un acuífero es una representación simplificada de su geometría y sus propiedades para investigar su comportamiento. Al realizar la modelación matemática de un acuífero se están integrando diferentes bases de datos del sistema, lo cual permite realizar la simulación de su comportamiento ante la presencia de diferentes escenarios que modifiquen las entradas y salidas del mismo, teniendo en cuenta las leyes que rigen su funcionamiento. Mediante los modelos conceptuales se puede obtener una descripción de la realidad fácil de entender pero, para ello, es necesario tener en cuenta los principales aspectos que se detallan a continuación (Hernández et al. 2001), (Llanusa y Hernández 2010), (Martínez et al. 2000).

- Objetivos de la tarea técnica que se pretende resolver con el modelo.
- Bases de datos del área que se modelará.
- Conocimiento preliminar del comportamiento hidrodinámico del acuífero.

Bases de datos de la zona de estudio

Uno de los aspectos más importantes en este tipo de estudios es la obtención y el procesamiento de la información con la que se generan las bases de datos necesarias para crear un modelo conceptual. Habitualmente la información se obtiene de distintas fuentes, en el presente trabajo la información de la explotación y los niveles en los pozos de observación fueron datos proporcionados por la agencia de medio ambiente y los registros de lluvias fueron obtenidos por el pluviómetro más cercano a la zona en estudio. Integrando toda esta información, se pudo procesar y crear la base de datos necesaria para el modelo conceptual del acuífero Boca de Jaruco.

A partir de los estudios geológicos, hidrogeológicos, geofísicos e hidrológicos realizados en la zona de estudio se procedió a puntualizar el área del modelo y las formas de modelar sus fronteras tal como se indica a continuación.

Límites del área a modelar y condiciones de contorno

El área a modelar dentro de la zona en estudio limita al Norte con la línea costera, al Sur con el parteaguas regional a 3 km de la costa, al Este con la red hidrográfica de la zona (río Jaruco) y al Oeste con el Rincón del Caribe. Se contó con el mapa topográfico de la zona de estudio para decidir estos límites del área a modelar. Se definieron dos condiciones de contorno como permeables y otras dos como impermeables que se señalan más adelante en el tópico relativo a la discretización.

Pozos de explotación

En todo el territorio acuífero se inventariaron seis pozos de construcción manual, denominados criollos, artesanos o de brocal, con diámetro de 2m, cuya construcción, según habitantes del lugar es de los años 40 y 50 del siglo anterior. Estos pozos abastecían fincas de ganado y sembrados, su explotación se realizaba mediante molinos, cuyos restos aún se observan en el sitio. Actualmente están en funcionamiento tres de los seis pozos inventariados, dos de ellos se encargan de abastecer a comunidades de gran importancia en el territorio como es el caso de la comunidad de Boca de Jaruco, la granja El Cayuelo (conocida como abasto a la Genética) y la tercera fuente es la que suministra agua salobre-salada a las instalaciones del campismo Boca de Jaruco. A esta situación se añaden los seis nuevos pozos de explotación ya mencionados, de los cuales también se obtiene agua salobre-salada del acuífero intrusionado que subyace en las instalaciones industriales de la planta (Molerio 2008). A continuación se describen estas tres fuentes de explotación que se identificaron en todo el territorio acuífero.

- *Fuente de abasto Boca de Jaruco*

Se encuentra al Suroeste del poblado en las coordenadas 371481N y 395366E, en cota 27 m a 1 km del poblado de Boca de Jaruco, ver figura 6. Se ha usado como fuente de abasto por más de 25 años con un caudal de 14,5 L/s y un régimen de bombeo de 16 a 20h diarias, actualmente es de 13h diarias. Consiste en un pozo criollo de 2m de diámetro y profundidad de 27,23m, con bomba ATH-8 y motor eléctrico.

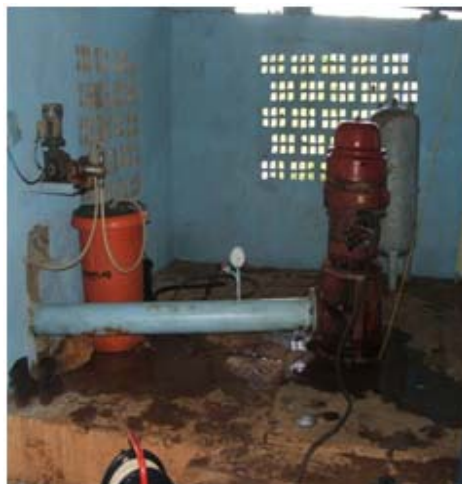


Figura 6. Fuente de abasto al poblado Boca de Jaruco

- *Fuente de abasto La Genética*

Se ubica al Suroeste de la Planta Energas Boca de Jaruco, en las coordenadas 371595N y 393581E, en cota 34m. Se usa como fuente de abasto a la vaquería La Genética y al asentamiento local cercano y como suministro de camiones pipa, ver figura 7. Se extrae un caudal de 7 a 10 L/s con un régimen de bombeo de 4 h en la mañana y 2 h al final de la tarde. Es un pozo perforado a percusión de 0,50 m de diámetro y profundidad de 45 m.

- *Fuente de abasto al campismo de Boca de Jaruco*

Este pozo se ubica en las coordenadas 371500N y 396500E, esta fuente de abasto es una de las más importantes, dada su estrecha relación con el río, hacia el mismo descargan un grupo de manantiales de nivel de base, de flujo difuso, y que son parcialmente utilizados como fuente de abasto parcial a las instalaciones de la base de campismo y antes, a principios del siglo XX, a una Calera, cuyas ruinas se observan en las cercanías de los manantiales, ver figura 8.



Figura 7. Fuente de abasto a La Genética



Figura 8. Antiguo horno de La Calera

Pozos de observación

En la zona de estudio se encuentran 12 pozos de observación, de ese total solo dos tienen registro de mediciones mensuales entre los años 2009-2012, estos dos pozos denominados Cala 1 y Cala 2 se encuentran dentro de las instalaciones de la planta, no siendo así con el pozo de observación CM3 que se encuentra fuera de las instalaciones de la planta y se tiene registro de medición correspondiente al año 2010, las coordenadas de ubicación de estos tres pozos de observación se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de los pozos de observación

Pozos	Este	Norte
Cala 1	394727,95	372870,48
Cala 2	395041,43	372960,64
CM3	393810,00	372180,00

Pluviómetro

En el área a modelar sólo se cuenta con un pluviómetro, con coordenadas 395918,20E y 372481,25N, con mediciones entre los años 2008-2012, la lámina registrada en metros es mayor en el año 2008, con un promedio en cinco años de 1214,88 mm, se identifica con las letras Bj.

Discretización

La discretización o triangulación del área se obtuvo atendiendo a: las propiedades hidrogeológicas, geológicas, ubicación de los pozos de bombeo y de observación, límites del área a modelar y zonas de infiltración. Con este fin se utilizó la herramienta SIG conocida como AQTRIGEO (Cabrera 2007).

Este proceso inicialmente se realizó colocando puntos que representaban los nodos principales de los triángulos, tratando de que estos nodos coincidieran o estuvieran cerca de pozos de explotación o pozos de observación, respetando la geología del terreno. Una vez ubicados los nodos principales se crearon los triángulos o elementos al unir mediante líneas estos nodos, tratando de que cada triángulo estuviera contenido, en un área con una misma propiedad hidrogeológica.

Se crearon topologías de polígonos y de nodos, con las cuales, haciendo uso de un grupo de consultas, se obtuvieron los principales datos para realizar la numeración automática de la malla, como se puede observar en la figura 9 donde se muestra la discretización del área de Boca de Jaruco y la manera en que fueron modelados los contornos. La malla mostrada está compuesta por 51 elementos (triángulos) y 118 nodos.

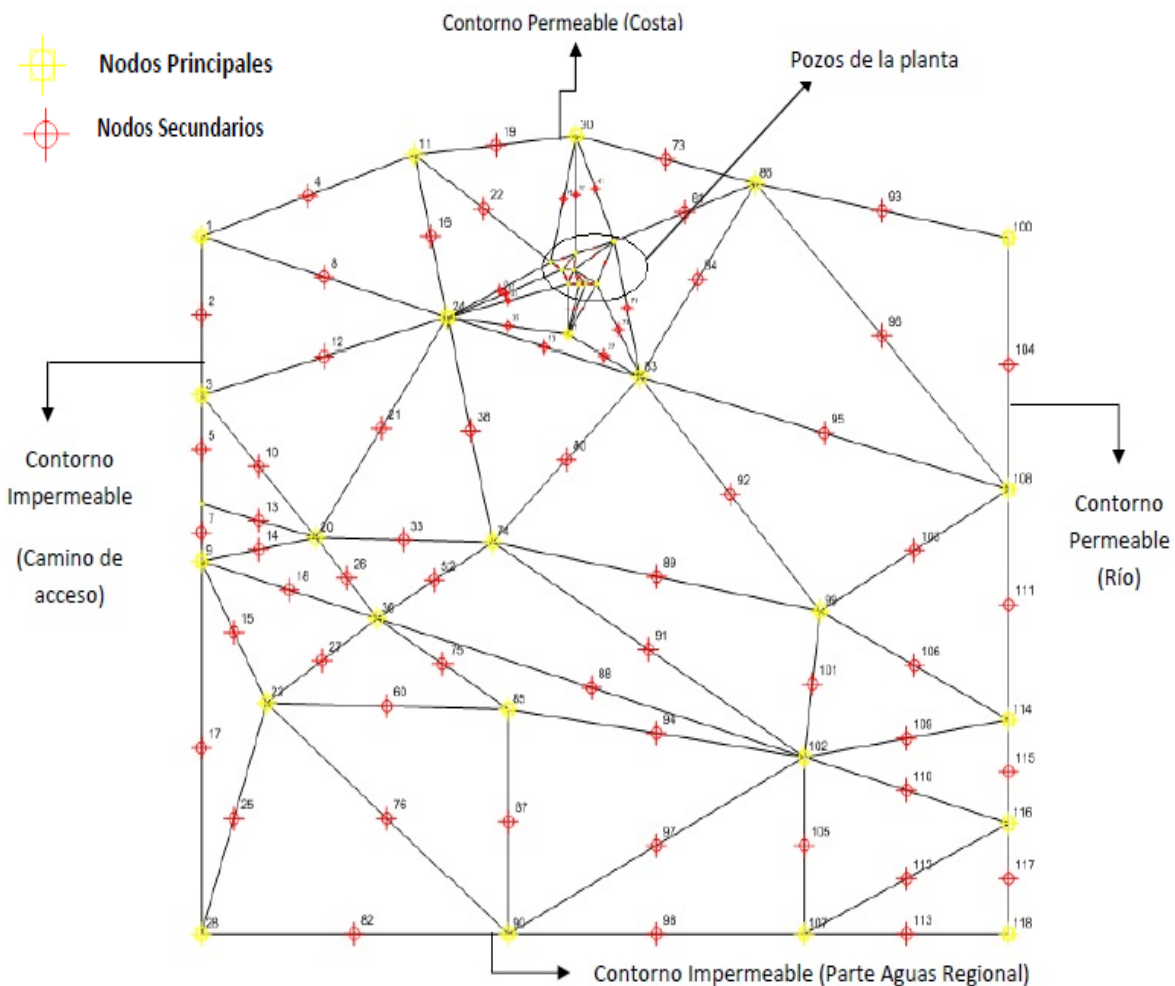


Figura 9. Discretización de la zona de estudio

Además de la numeración, estas macros (propias de AQTRIGEO) que han sido concebidas para este fin permitieron obtener las principales tablas que contienen la información espacial necesaria para el modelo AQÜIMPE. En la figura 10 aparece ampliada la zona de mayor interés para este estudio que coincide con la ubicación de los nuevos pozos de explotación de la planta, con el objetivo de tener mayor precisión en el comportamiento de los niveles de las aguas subterráneas, en esa zona.

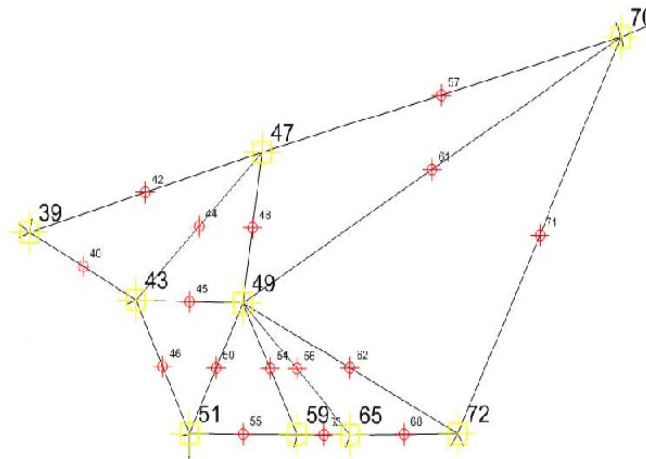


Figura 10. Detalle en los pozos de explotación de la planta

Estado inicial del acuífero

Para la etapa de simulación que se verá posteriormente, se selecciona como estado inicial del acuífero el de enero de 2008. Con los datos de niveles en los pozos de observación, se realiza una interpolación con la herramienta SIG, Surfer 10, utilizando el método de Kriging. Luego superponiendo el mallado que se puede observar en la figura 9, se lleva a cabo la asignación de niveles a todos los nodos (principales y secundarios) de la triangulación pertenecientes al acuífero Boca de Jaruco, obteniéndose el mapa de la figura 11 en donde se muestra los pozos de observación y el sistema de flujo en la zona, en dirección al mar, deteniendo el avance de la cuña de agua salina.

Simulación

El período escogido para realizar un grupo de simulaciones, fue desde enero de 2008 hasta diciembre de 2012, en donde se escogió como intervalo de tiempo el mes, lo que equivale a 60 tiempos durante los cinco años.

A continuación en la tabla 2 se muestran los valores de propiedades utilizados en la simulación, estos valores de propiedades fueron escogidos de otros estudios realizados anteriormente en la zona. Según lo planteado en la introducción, para abastecer de agua a la desalinizadora, es necesario un caudal sumario de 30 m³/h. Para el estudio se realizaron dos simulaciones, la primera simulación sin extraer el caudal y la segunda extrayendo dicho caudal.

En la profundidad del impermeable, representado con el valor de -50, significa que se está midiendo desde el terreno hacia abajo.

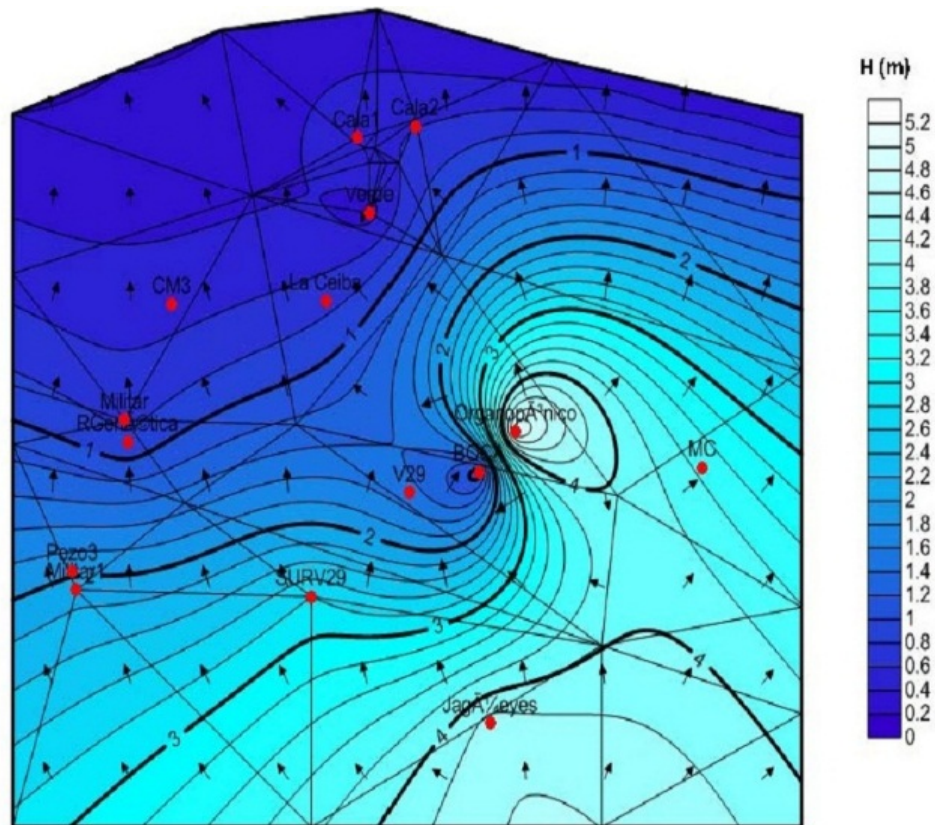


Figura 11. Estado inicial del acuífero Boca de Jaruco
 ● Pozos de Observación en la zona de estudio

Tabla 2. Registro de datos utilizados durante la simulación del programa

Formación	Kd (m ² /d)	Cita	PI (m)	α (%)
Jaimanitas	50	0,04	-50	0,4
Vedado	30	0,02	-50	0,3
Cojímar	50	0,03	-50	0,2
Güines	40	0,04	-50	0,1

Kd: conductividad hidráulica Cita: Porosidad Efectiva
 PI: Profundidad del Impermeable α : Infiltración

A continuación se muestra la figura 12, donde se observan las cuatro formaciones geológicas que afloran en la zona de estudio que integran igual número de bandas sublatitudinales, que de Norte a Sur sitúan a la formación Jaimanitas como la más próxima a la costa, la formación Vedado y Cojímar en el centro y más alejada de la costa, la formación Güines.

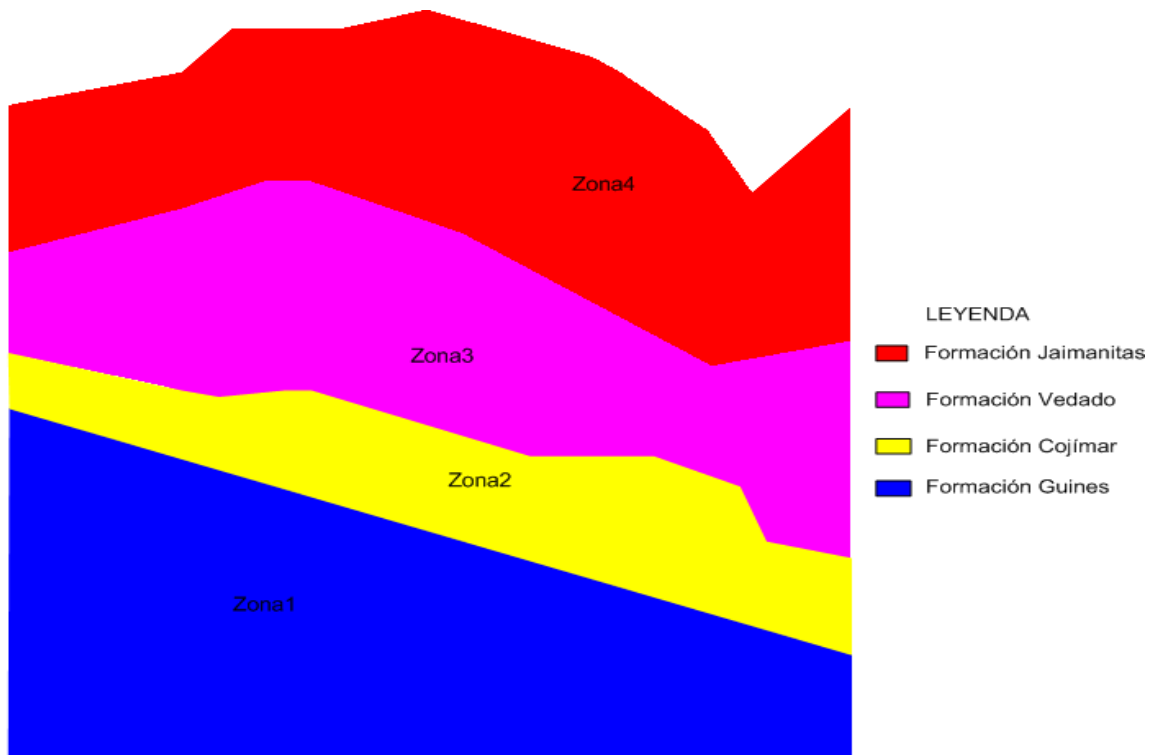


Figura 12. Ubicación de las formaciones en el área de estudio

Resultados de la simulación

A continuación en la figura 13 se muestra uno de los seis pozos que se encuentran en la instalación antes y después de comenzar su explotación, en ellos se aprecia cómo existe una pequeña variación de los niveles del agua subterránea. Esta diferenciación está en el orden de los 0,2 y 0,4mlo que cuantifica el poco cambio.

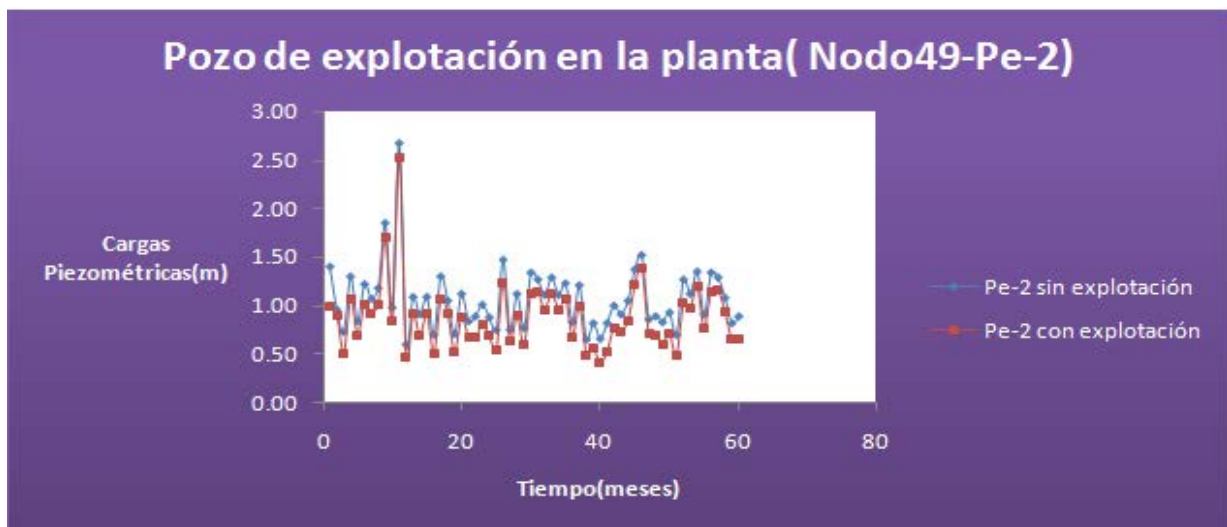


Figura 13. Pozo de explotación en la planta con ambas condiciones

Más adelante, correspondiente al gráfico mostrado en la figura 14, se realiza una comparación de uno de los pozos de explotación actual, previa y posterior a la extracción de los pozos de la planta. Los cambios son realmente despreciables y vale resaltar que, en las pruebas de bombeo, no hubo abatimiento y apenas bajaba el nivel de las aguas subterráneas, lo que confirma que los resultados de la modelación fueron efectivos, por lo que no se verán afectados los pozos de explotación que actualmente se encuentran en servicio.

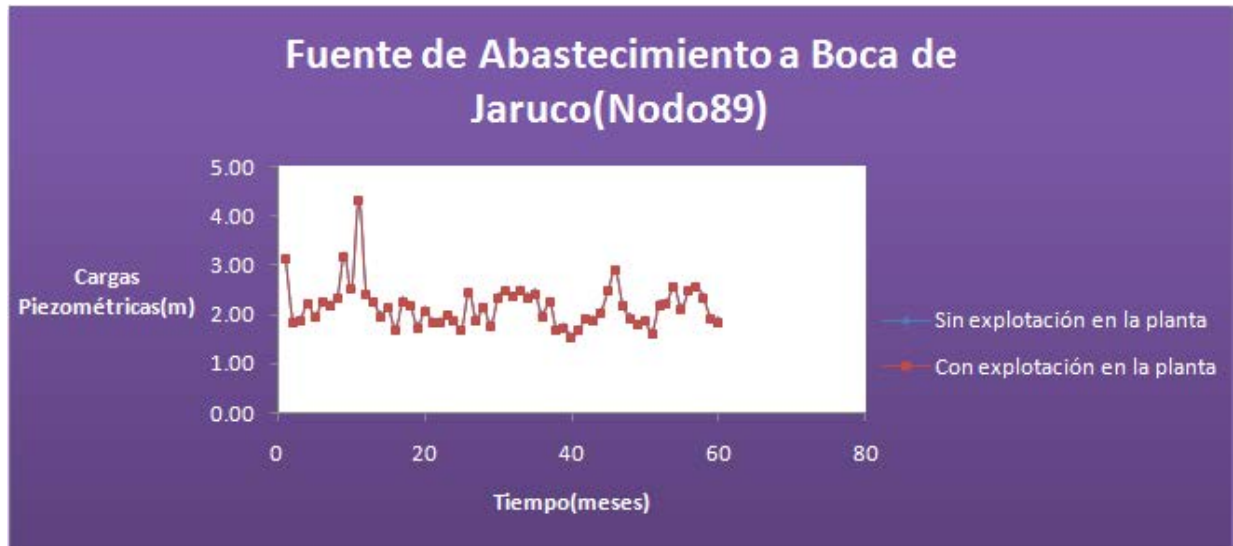


Figura 14. Fuente de Abastecimiento al poblado de Boca de Jaruco

En la tabla 3 se muestran los valores de los volúmenes iniciales y finales de las dos simulaciones realizadas (antes y después de comenzar la extracción de los pozos de la planta) para el tiempo 60. Estos volúmenes varían en la medida que va aumentando el tiempo, pero siempre son mayores cuando se simula sin la extracción de los pozos de la planta. En la tabla 3 se señala el % del cociente de las diferencias entre volumen inicial y final respecto al inicial.

Tabla 3. Volúmenes iniciales y finales de las dos simulaciones

Volúmenes	Sin extracción	Con extracción
Vinicial (m ³)	725091,74	725091,74
V Final (m ³)	702650,89	692132,38
Dif. / Vinicial (%)	1,03	1,05

En la figura 15 se muestra el mapa de hidroisohipsas con su sistema de flujo, después de simulada la extracción de los pozos de la planta para el tiempo 60. En este se puede ver cómo se han modificado los niveles piezométricos con respecto al estado inicial, pero como ya se observó anteriormente en los resultados graficados de la simulación, esta disminución de nivel no afectará las fuentes de abasto en la zona.

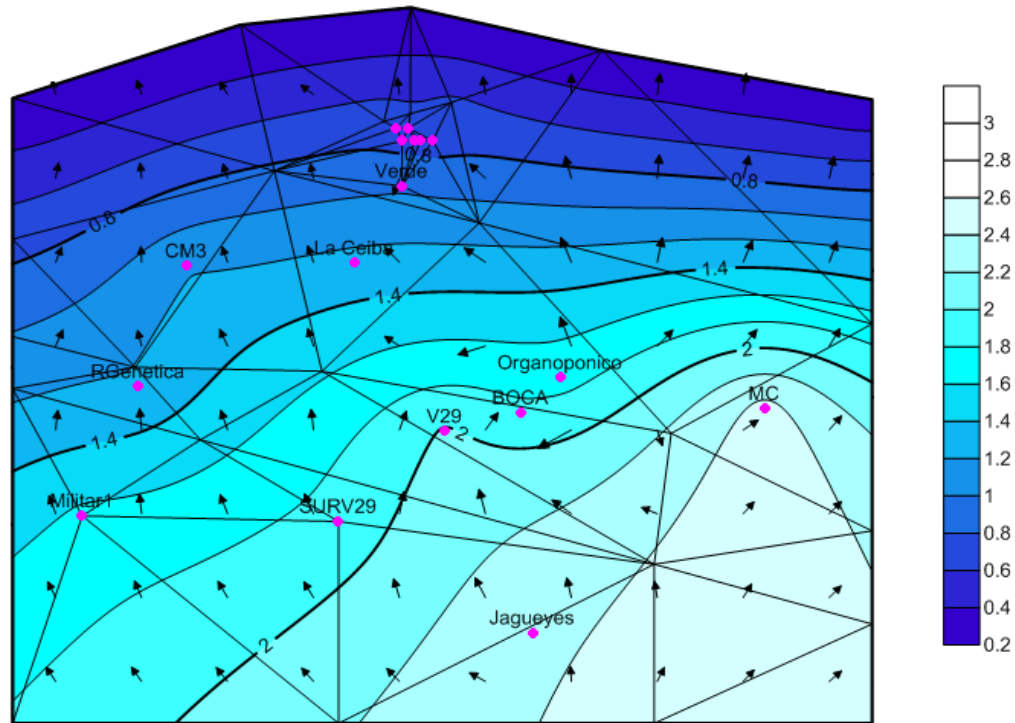


Figura 15. Mapa de hidroisohipsas del acuífero Boca de Jaruco para el tiempo 60 (tiempo final) después de poner en marcha los pozos de explotación en la planta

CONCLUSIONES

- Por primera vez se crea un modelo matemático del acuífero “Boca de Jaruco”, lográndose simular el comportamiento del acuífero. Los resultados alcanzados en la simulación demuestran que las pruebas de campo realizadas por los especialistas fueron efectivas y aportaron datos confiables.
- Después de simulada la puesta en marcha de los pozos de la planta no se observan prácticamente variaciones en los niveles del agua subterránea, de forma similar a lo sucedido durante los aforos (abatimientos muy pequeños) por lo que se puede concluir que el abastecimiento de agua a la desalinizadora de la Planta de Gas de Boca de Jaruco no tendrá un impacto negativo en los recursos de agua subterránea dulce del territorio.

REFERENCIAS

- Cabrera E.** (2007). “Simulación de acuíferos con el empleo de herramientas de los Sistemas de Información Geográfica”. Tesis de maestría en Ingeniería Hidráulica, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana, Cuba.
- Hernández A.O., Martínez J. B., Dilla F. y Llanusa H.** (2001). “Modelación de acuíferos”, Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). Habana, Cuba.

- Llanusa H. y Hernández A. O.** (2010).“La modelación matemática en la explotación de acuíferos costeros”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, vol. 31, no. 1, pp. 51-60. ISSN 1815–591X, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana, Cuba.
- Martínez J. B., Llanusa H., Hernández A. O. y Dilla F.** (2000). “Manual del Usuario del Sistema AQÜIMPE”. CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). Habana, Cuba.
- MINBAS** (2001). “Léxico Estratigráfico de Cuba”. Instituto de Geología y Paleontología, Ministerio de la Industria Básica, Edición digital, Habana, Cuba.
- Molerio L.** (2008).“Construcción del sistema de captaciones y monitoreo de las aguas subterráneas de abasto al ciclo combinado de la planta de gas de Boca de Jaruco”. Informe de prospección hidrogeológica, Empresa ENERGAS, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente(CITMA), Habana, Cuba.
- Molerio L.** (2011a).“Estudio de Impacto Ambiental en la planta de gas de Boca de Jaruco”. Informe Técnico, Empresa ENERGAS, CITMA, Habana, Cuba.
- Molerio L.** (2011b).“Geología de Boca de Jaruco”. Informe Técnico, Empresa ENERGAS, CITMA, Habana, Cuba.
- Molerio L.** (2011c).“Geotecnia, hidrogeología y geofísica de la obra de toma de agua de mar del ciclo combinado de la planta de gas de Boca de Jaruco”. Informe Técnico, Empresa ENERGAS,CITMA, La Habana, Cuba.
- Ramos L. C.** (2012).“Modelación matemática del acuífero Cuentas Claras”. Tesis de diploma de Ingeniería Hidráulica, Facultad de Ingeniería Civil. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.