

# **PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE UNA BARRERA HIDRÁULICA PILOTO PARA LA RECUPERACIÓN DEL ACUÍFERO DE LA YARADA-TACNA**

## **PROPOSAL FOR IMPLEMENTING A PILOT HYDRAULIC BARRIER FOR THE RECOVERY OF THE AQUIFER LA YARADA -TACNA**

Pino Vargas E.<sup>1</sup>, Bedoya Jaén C.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Recursos Hídricos, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú, epino68@hotmail.com

<sup>2</sup> M.Sc. Geological Survey. Universidad Nacional Basadre Grohmann, Tacna, Perú, conra19@yahoo.es

### **RESUMEN**

Los estudios del acuífero de La Yarada, concluyen que existe un proceso de descensos de niveles freáticos y degradación de la calidad del agua subterránea por procesos de intrusión marina. En este contexto, nos centramos en analizar específicamente el tema de la barrera hidráulica negativa o también conocida como barrera de depresión contra la intrusión marina, como una medida de control inmediata. Se programa un conjunto de etapas concatenadas para ir estableciendo lineamientos y estudios que nos lleven a definir el diseño de esta barrera hidráulica, y a su vez poner en claro cuáles son las etapas futuras o posteriores a la implementación de la barrera hidráulica piloto para frenar el proceso de intrusión marina.

*Descriptor: Barrera hidráulica, intrusión marina.*

### **ABSTRACT**

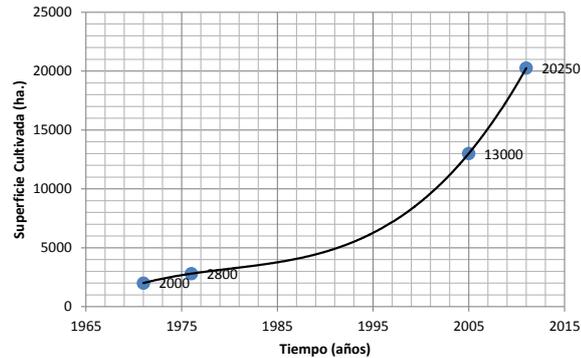
Studies of the La Yarada aquifer, conclude that there is a process of decline of water tables and quality degradation of groundwater by seawater intrusion processes. In this context, we focus at the topic of negative hydraulic barrier, also known as depression barrier against seawater intrusion, as a measure for immediate control. A set of interrelated stages are programmed for establishing the guidelines and studies that will lead us to define the design of this hydraulic barrier, and in turn make clear which are the future stages, after the implementation of the pilot hydraulic barrier, to stop the process of seawater intrusion.

*Keywords: Hydraulic barrier, seawater intrusion*

### **INTRODUCCIÓN**

La región Tacna, está ubicada en la zona más árida de la costa peruana, y en la cabecera del Desierto de Atacama, caracterizándose por la escasez de recursos hídricos, lo cual, dio lugar que desde hace varias décadas se utilicen las aguas subterráneas existentes en el subsuelo del valle de Caplina y en especial de las Pampas de la Yarada para el desarrollo de la agricultura. Sin embargo; el acuífero, debido a la falta de un programa de explotación viene siendo sobreexplotado lo que ha traído como consecuencia un gradual y permanente descenso del nivel freático, comprometiendo sus reservas no renovables, lo que ha causado el fenómeno de la intrusión marina debido a la alta concentración de pozos de explotación de aguas subterráneas.

Según la Dirección Regional Subsectorial de Agricultura Tacna, el área agrícola, así como el número de pozos se fue incrementando hacia el sector de Los Palos, así en 1971 con 55 pozos irrigaban 2 000 ha, cinco años más tarde aumentaron a 2 800 ha ya en el 2005 se incrementó a 13 000 ha y en el 2011 ha llegado a 20 250 ha., para lo cual han utilizado 113 Hm<sup>3</sup> de agua del subsuelo. En la Figura No. 1, se muestra la evolución histórica del área irrigada en las pampas de La Yarada.



**Figura. 1** Evolución histórica de la superficie irrigada

El problema fundamental radica en que el sistema acuífero no tiene un programa de operación, las extracciones de agua son al margen de la normatividad, no hay control de ningún tipo y actualmente no es posible identificar a los infractores. Esto trae consigo el descenso progresivo del nivel freático generando actualmente ya problemas de intrusión marina según los últimos estudios realizados en la zona.

Se busca implementar una barrera hidráulica consistente en una batería de pozos que permitan atenuar e interceptar el proceso de intrusión marina en el acuífero de La Yarada.

## **METODOLOGÍA**

Chávez Guillen R. et. al. (2012), en su artículo “El impacto del cambio climático sobre los acuíferos costeros”, concluyen que en los acuíferos costeros, el ascenso del nivel del mar, derivado del cambio climático, provocará varios efectos: i) la pérdida por salinización de la porción de ellos ubicada en el área invadida por el mar; ii) el avance tierra adentro de la interfase salina agua dulce/agua salada, hacia una nueva posición de equilibrio; iii) la disminución del espesor saturado de agua dulce en la porción ocupada por la interfase salina; iv) la reducción de la disponibilidad y de la reserva almacenada de los acuíferos, y v) la inutilización o salinización de los pozos ubicados en la faja afectada por el fenómeno.

M. Sastre Beceiro (2009), en el artículo: “Aspectos jurídicos de la recarga artificial de acuíferos: regulación actual y retos”, analiza la regulación de la recarga artificial de acuíferos en la normativa comunitaria y española (estatal y andaluza). Asimismo, se hace referencia a la recarga artificial de acuíferos en los actuales planes hidrológicos de Cuenca. A continuación se describe cuáles son los principales problemas de la recarga artificial de acuíferos como: falta de una regulación unitaria, de una definición homogénea sobre recarga artificial y sus tipos, financiación del coste de la operación y quién se hace cargo de la misma, etc.

Ortuño Govern et. al. (2009), La barrera hidráulica para frenar la intrusión salina en el acuífero del Llobregat (Barcelona), inyectando agua regenerada, es el primer proyecto de estas características que se realiza en España, y pionero en Europa. El acuífero principal del Delta del Llobregat es una reserva estratégica de agua para el abastecimiento a la ciudad de Barcelona y su área metropolitana, y está afectado por procesos de intrusión marina desde 1970, producto de la sobreexplotación y de la excavación de la capa superior confinante. Para resolver esta situación, la Agencia Catalana del Agua está llevando a cabo diversas acciones, entre las que destacan la construcción de una barrera hidráulica positiva con inyección de agua para detener el avance de la intrusión. La barrera, formada por una serie de 14 pozos de inyección, eleva el nivel de agua del acuífero cerca de la costa y evita que el agua salada penetre tierra adentro, recargando además el acuífero. La barrera hidráulica se desarrolla en dos fases. La primera fase entró en funcionamiento en marzo de 2007, habiéndose inyectado ya desde entonces en el acuífero algo más de 850 000 m<sup>3</sup>. El agua de inyección es agua regenerada de la EDAR del Baix Llobregat (Barcelona), habiendo pasado por tratamientos secundario, terciario, ultrafiltración, osmosis inversa (sólo el 50% del agua) y desinfección por UV. Actualmente el agua se somete también a cloración antes de inyectarla, aunque se están realizando diferentes estudios para eliminar la adición de cloro por sus efectos nocivos y por la posible aparición de trihalometanos en el acuífero (THMs).

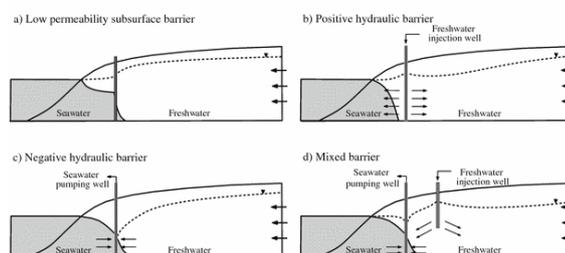
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la actualidad se conocen cinco métodos para controlar y prevenir la intrusión de agua salada:

1. Controlar las extracciones en el interior, o su distribución espacial, con el fin de cumplir los requisitos cuantitativos.
2. Realizar la recarga artificial, para compensar la posible sobreexplotación en el interior.
3. Desarrollar una barrera de depresión (conocida también como barrera hidráulica negativa) adyacente a la costa, mediante una línea de pozos de bombeo, situada paralelamente a la línea de costa.
4. Desarrollar una barrera de recarga costera por medio de una línea de pozos superficiales, paralela a la costa, creando una cresta de presión, que frene el avance del agua del mar.
5. Realizar una barrera subterránea artificial, de impermeabilización, para separar el agua dulce del agua salada.

Sobre lo presentado, por la rapidez de implementación en razón a los problemas actuales de degradación de la calidad del agua subterránea en la zona de estudio, nos centramos en analizar el desarrollo de una barrera hidráulica negativa. Se procedió a identificar la zona de mayor afectación en el sistema acuífero.

El año 2009, Pool M. y Carrera J., publican el artículo “Dynamics of negative hydraulic barriers to prevent seawater intrusion”, en el cual exponen los resultados favorables que se obtienen al implementar una barrera hidráulica negativa para interceptar la intrusión marina. Asimismo muestran los esquemas de los tipos de barreras hidráulicas según la Figura No. 2.



**Figura. 2** Tipos de barreras hidráulicas (Pool M. y Carrera J., 2009)

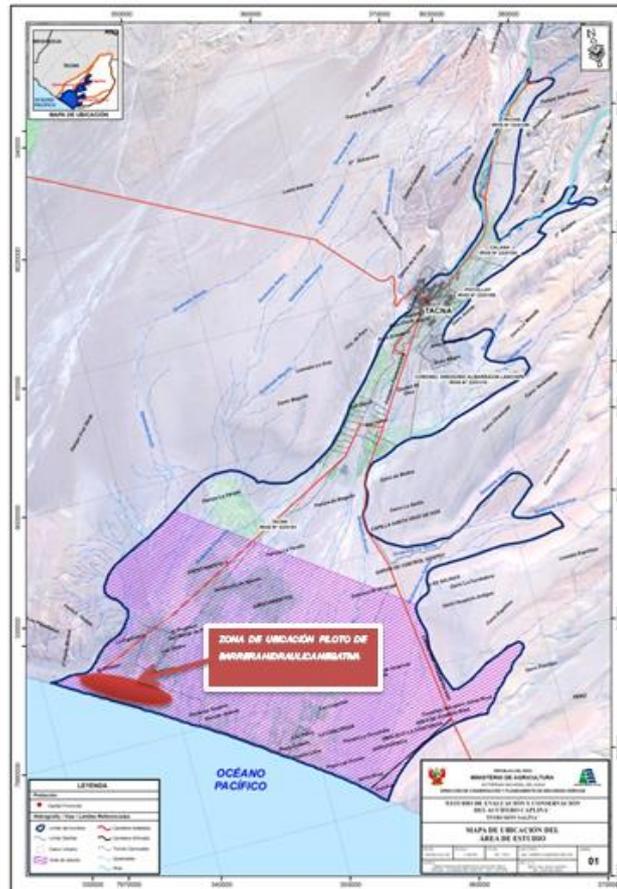
(a) barrera subterránea de baja permeabilidad. (b) barrera hidráulica positiva. (c) barrera hidráulica negativa. (d) barrera mixta (sistema bombeo-inyección).

La ubicación de la barrera hidráulica sin duda es uno de los principales aspectos, puesto, que en gran medida de esto depende el éxito en el control de la intrusión marina. El acuífero de la Yarada, geológicamente no es muy complejo, es un medio granular generado por procesos de deposición de material aluvial, según investigaciones realizadas no se han identificado estratos diferenciados, por tanto es un típico acuífero costero. Consideramos que la ubicación de la barrera hidráulica deberá estar ubicada entre la línea de playa y 1 Km., hacia espacio continental como máximo. Es importante señalar que esta primera etapa exploratoria, con la implementación de una pequeña batería de pozos alineados y distanciados adecuadamente a fin de que sus radios de influencia se corten y permitan un abatimiento mayor y que en conjunto nos permitan obtener un conjunto que evite el proceso intrusivo del agua de mar.

Otro aspecto a tomar en cuenta es que la línea de playa es muy extensa como para pretender cubrirla en su totalidad, por tanto debemos centrarnos en efectuar las pruebas piloto en la zona más afectada y cerrando el flujo hacia el continente apoyándonos en la barrera impermeable natural que representa el flanco derecho del acuífero cuya denominación es “Cerro Moreno”. En el mapa elaborado por la Autoridad Nacional del Agua (2010), mostrado en la Figura No. 3, donde se da la ubicación recomendada para la implementación de la barrera hidráulica negativa piloto.

Asimismo, debemos establecer que cada pozo debe de contar con dos (02) piezómetros uno aguas arriba y uno aguas abajo, para controlar y chequear condiciones de flujo en el momento de la operación, tiene que establecerse un programa de control permanente no solo de niveles sino también de control hidroquímico, puesto que la calidad del agua subterránea es un elemento muy importante en el estudio del control de la intrusión marina.

Estimamos que sería recomendable implementar una batería de 4 o 5 pozos estratégicamente distanciados en la zona señalada con su par de piezómetros cada uno de acuerdo a la justificación dada anteriormente. El régimen de operación debe ser ininterrumpido es decir 24 horas por día, sin parar.



*Figura. 3 Ubicación de la barrera hidráulica negativa piloto.*

La información existente en la actualidad es abundante en cuanto artículos científicos sobre intrusión marina, caracterización de dicha intrusión y otros. Nuestra tarea primordial en esta etapa es establecer un programa piloto que nos permita observar el funcionamiento de una barrera hidráulica negativa, para lo cual disponemos de muy poca información. Quizás, nuestra mayor referencia lo representa el proyecto la barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga artificial en el acuífero del Llobregat (Barcelona, España).

Un aspecto que tiene incidencia directa en la disposición de los pozos en la batería que debe conformarse para la barrera hidráulica, es el radio hidráulico. Este elemento a diferencia que en los sistemas de explotación con caudal seguro, ahora debemos plantearlo para que dichos radios se intersecten y permitan obtener una elemento denominado barrera sin permitir flujos intermedios entre los pozos, esta situación de ocurrir sería desventajosa para los objetivos planteados.

En la zona establecida como de interés para el proyecto piloto tenemos:  $T = 1,21 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $K = 1,09 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  y  $S = 0,0087$ . Esta información permite calcular un radio de influencia de 520,00 m. Proponemos que la disposición de los pozos en la batería sea al 50% del radio de influencia, es decir a 260,00 m., a fin de lograr el abatimiento esperado. La Figura No. 4, muestra nuestra propuesta de disposición en una sola línea, de ser posible una disposición de pozos que permitiría garantizar el efecto de la barrera con mayor eficacia sería la utilización de doble línea de pozos con una intercalación en la segunda línea, tal como se muestra en la Figura No. 5.

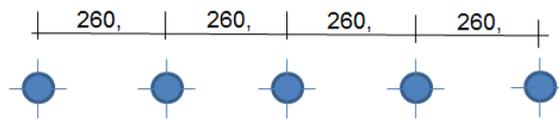


Figura No. 4 Disposición de batería de pozos alternativa "A".

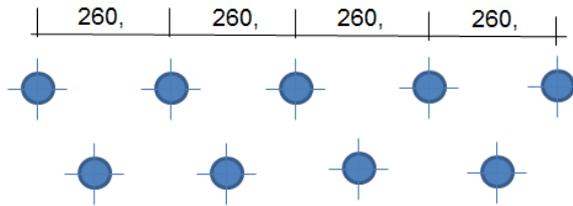


Figura. 5 Disposición de batería de pozos alternativa "B".

## CONCLUSIONES

Al tratarse de bombeo de agua de la interfase agua dulce-agua salada, es de esperar que la salinidad sea un elemento a tomar en cuenta al momento de diseñar el equipo de bombeo. Específicamente en cuanto a los materiales a tener en cuenta para los cuerpos de bomba y demás elementos que estarán expuestos a la gran agresividad química del agua salina.

Una vez implementada la barrera hidráulica piloto, tendremos mayores elementos de juicio para diseñar la barrera en toda su magnitud e iniciar el proceso de ejecución de las siguientes etapas del proyecto que corresponderían a medidas integrales de recuperación del acuífero como por ejemplo barreras hidráulicas positivas o mixtas, a partir de volúmenes de agua generados por trasvases, tratamiento de aguas residuales de la población llegando hasta sistemas de ultrafiltración, tratamiento de agua salina, etc.

## REFERENCIAS

1. Chávez Guillen R. et. al. 2012. El impacto del cambio climático sobre los acuíferos costeros.
2. García A. et. al. 2003. Control de la intrusión marina y modelización del acuífero de Vélez (Málaga, España).
3. Padilla Benítez, F. y Cruz-Sanjulián, J.J. 1997. Modeling seawater intrusion with open boundary conditions. Groundwater.
4. Stephen Foster. 2006. Recarga del Agua Subterránea con Aguas Residuales Urbanas evaluación y manejo de los riesgos y beneficios.
5. Sastre B. 2009. Aspectos jurídicos de la recarga artificial de acuíferos: regulación actual y retos.
6. Molina G. J. 2009. Análisis integrado y estrategias de gestión de acuíferos en zonas áridas.
7. Ortuño Gobern, Felip et. al. 2009. Barrera hidráulica contra la intrusión marina en el acuífero principal del Delta del Llobregat (Barcelona): primera fase.
8. Pool María. 2010. Dinámica de barreras hidráulicas negativas para evitar la intrusión de agua de mar.

# Propuesta de Implementación de una Barrera Hidráulica Piloto para la Recuperación del Acuífero de La Yarada-Tacna

## Proposal for Implementing a Pilot Hydraulic Barrier for the Recovery of the Aquifer La Yarada -Tacna

Pino Vargas E.<sup>1</sup>, Bedoya Jaén C.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional Jorge Basadre Grobmann, Tacna, Perú, [epino66@hotmail.com](mailto:epino66@hotmail.com)

<sup>2</sup> Universidad Nacional Basadre Grobmann, Tacna, Perú, [cbaya10@yahoo.es](mailto:cbaya10@yahoo.es)

### RESUMEN

Los estudios del acuífero de La Yarada, concluyen que existe un proceso de descenso de niveles freáticos y degradación de la calidad del agua subterránea por procesos de intrusión marina. En este contexto, nos centramos en analizar específicamente el tema de la barrera hidráulica negativa o también conocida como barrera de depresión contra la intrusión marina, como una medida de control inmediata. Se programan un conjunto de etapas consecutivas para ir estableciendo lineamientos y estudios que nos lleven a definir el diseño de esta barrera hidráulica, y a su vez poner en claro cuáles son las etapas futuras o posteriores a la implementación de la barrera hidráulica piloto para frenar el proceso de intrusión marina.

**Descripción:** Barrera Hidráulica, Intrusión marina.

### ABSTRACT

Studies of the La Yarada aquifer, conclude that there is a process of decline of water tables and quality degradation of groundwater by seawater intrusion processes. In this context, we focus at the topic of negative hydraulic barrier, also known as depression barrier against seawater intrusion, as a measure for immediate control. A set of interrelated stages are programmed for establishing the guidelines and studies that will lead us to define the design of this hydraulic barrier, and in turn make clear which are the future stages, after the implementation of the pilot hydraulic barrier, to stop the process of seawater intrusion.

**Keywords:** Hydraulic barrier, seawater intrusion

### INTRODUCCIÓN

La región Tacna, está ubicada en la zona más árida de la costa peruana, y en la cabecera del Desierto de Atacama, caracterizándose por la escasez de recursos hídricos, lo cual, dio lugar que desde hace varias décadas se utilicen las aguas subterráneas existentes en el subsuelo del valle de Caplina y en especial de las Pampas de la Yarada para el desarrollo de la agricultura. Sin embargo, el acuífero, debido a la falta de un programa de explotación viene siendo sobreexplotado lo que ha traído como consecuencia un gradual y permanente descenso del nivel freático, comprometiendo sus reservas no renovables, lo que ha causado el fenómeno de la intrusión marina debido a la alta concentración de pozos de explotación de aguas subterráneas.

Según la Dirección Regional Subsectorial de Agricultura Tacna, el área agrícola, así como el número de pozos se fue incrementando hasta el sector de Los Palos, así en 1971 con 55 pozos irrigaban 2 000 ha, cinco años más tarde aumentaron a 2 300 ha ya en el 2005 se incrementó a 13 000 ha y en el 2011 ha llegado a 20 250 ha, para lo cual han utilizado 113 ltr/m<sup>3</sup> de agua del subsuelo. En la Figura No. 1, se muestra la evolución histórica del área irrigada en las pampas de La Yarada. Los últimos estudios realizados han identificado que el incremento de la explotación provocó desequilibrio en el balance de ingreso y egreso de agua al acuífero, facilitando la intrusión de agua de mar [cuña marina]. Los estudios hidrogeológicos (cambio de sentido del flujo subterráneo-costa negativa o cero) y de prospección geofísica (492 sondajes TDEM y 21 secciones geoeléctricas) determinó el ingreso de la cuña marina en una longitud aproximada de 7 km, concordante con un profundidad de 250 m, (ANA 2008). Ver Figura No. 2.

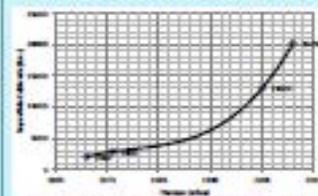


Figura No. 1 Evolución Histórica de la superficie irrigada

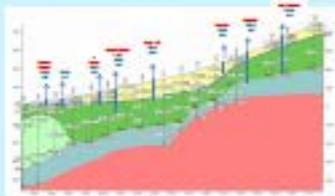


Figura No. 2 Perfil sistema acuífero (ANA 2008)

El problema fundamental radica en que el sistema acuífero no tiene un programa de operación, las extracciones de agua son al margen de la normalidad, no hay control de ningún tipo y actualmente no es posible identificar a los intrusores. Esto trae consigo el descenso progresivo del nivel freático generando actualmente ya problemas de intrusión marina según los últimos estudios realizados en la zona.

Se busca implementar una barrera hidráulica consistente en una batería de pozos que permitan atenuar e interceptar el proceso de intrusión marina en el acuífero de La Yarada. Entre el 2013 y 2014, se hace un planteamiento inicial para la Autoridad Nacional del Agua (ANA), por el autor, donde entre muchas medidas correctivas se propone el uso de barreras hidráulicas para detener el proceso de intrusión marina.

### METODOLOGÍA

Chávez Guillén F. et al. [2012], en su artículo "El Impacto del cambio climático sobre los acuíferos costeros", concluyen que en los acuíferos costeros, el ascenso del nivel del mar, derivado del cambio climático, provocará varios efectos: i) la pérdida por salinización de la porción de áreas ubicada en el área invadida por el mar; ii) el avance tierra adentro de la interfase salina agua dulce/agua salada, hacia una nueva posición de equilibrio; iii) la disminución del espesor saturado de agua dulce en la porción ocupada por la interfase salina; iv) la reducción de la disponibilidad y de la reserva almacenada de los acuíferos, y v) la inutilización o salinización de los pozos ubicados en la faja afectada por el fenómeno.

M. Sastre Becerra [2009], en el artículo: "Aspectos jurídicos de la recarga artificial de acuíferos: regulación actual y retos", analiza la regulación de la recarga artificial de acuíferos en la normativa comunitaria y española ( estatal y andaluza). Asimismo, se hace referencia a la recarga artificial de acuíferos en los actuales planes hidrológicos de Cuenca. A continuación se describe cuáles son los principales problemas de la recarga artificial de acuíferos como: falta de una regulación unitaria, de una definición homogénea sobre recarga artificial y sus tipos, financiación del coste de la operación y quién se hace cargo de la misma, etc.

Ortuño Gobert et. al. (2009), la barrera hidráulica para frenar la intrusión salina en el acuífero del Llobregat (Barcelona), inyectando agua regenerada, es el primer proyecto de estas características que se realiza en España, y pionero en Europa.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la actualidad se conocen cinco métodos para controlar y prevenir la intrusión de agua salada: [1] Controlar las extracciones en el interior, o su distribución espacial, con el fin de cumplir los requisitos cuantitativos. [2] Realizar la recarga artificial, para compensar la posible sobreexplotación en el interior. [3] Desarrollar una barrera de depresión (conocida también como barrera hidráulica negativa) adyacente a la costa, mediante una línea de pozos de bombeo, situada paralelamente a la línea de costa. [4] Desarrollar una barrera de recarga costera por medio de una línea de pozos superficiales, paralela a la costa, creando una cresta de presión, que frene el avance del agua del mar. [5] Realizar una barrera subterránea artificial, de impermeabilización, para frenar el agua dulce del agua salada.

Sobre lo presentado, por la rapidez de implementación en razón a los problemas actuales de degradación de la calidad del agua subterránea en la zona de estudio, nos centramos en analizar el desarrollo de una barrera hidráulica negativa. Se procedió a identificar la zona de mayor afectación en el sistema acuífero.

El año 2006, Pool M. y Carrera L., publican el artículo "Dinámica de negative hydraulic barriers to prevent seawater intrusion", en el cual exponen los resultados favorables que se obtienen al implementar una barrera hidráulica negativa para interceptar la intrusión marina. Asimismo muestran los esquemas de los tipos de barreras hidráulicas según la Figura No. 3.

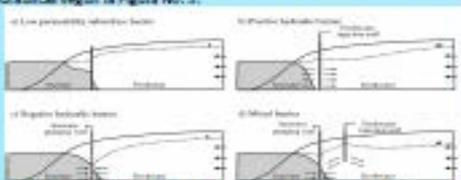


Figura No. 3 Tipos de barreras hidráulicas (Pool M. y Carrera L., 2006)

(a) barrera subterránea de baja permeabilidad. (b) barrera hidráulica positiva. (c) barrera hidráulica negativa. (d) barrera mixta (sistema bombeo-inyección).

Según la propuesta realizada para la ANA entre 2013 y 2014, por los autores, la ubicación de la barrera hidráulica sin duda es uno de los principales aspectos, puesto, que en gran medida de esto depende el éxito en el control de la intrusión marina. El acuífero de la Yarada, geológicamente no es muy complejo, es un medio granular generado por procesos de deposición de material aluvial, según investigaciones realizadas no se han identificado estratos diferenciados, por tanto es un típico acuífero costero. Consideramos que la ubicación de la barrera hidráulica deberá estar ubicada entre la línea de playa y 1 Km, hacia espacio continental como máximo. Es importante señalar que esta primera etapa exploratoria, con la implementación de una pequeña batería de pozos alineados y distanciados adecuadamente a fin de que sus radios de influencia se corten y permitan un abatimiento mayor y que en conjunto nos permitan obtener un conjunto que evite el proceso intrusivo del agua de mar.

Otro aspecto a tomar en cuenta es que la línea de playa es muy extensa como para pretender cubriría en su totalidad, por tanto debemos centrarnos en efectuar las pruebas piloto en la zona más afectada y cerrando el flujo hacia el continente apoyándonos en la barrera impermeable natural que representa el flanco derecho del acuífero cuya denominación es "Cerro Moreno". En el mapa elaborado por la Autoridad Nacional del Agua (2002), mostrado en la Figura No. 4, donde se da de la ubicación recomendada para la implementación de la barrera hidráulica negativa piloto.



Figura No.4 Ubicación de la barrera hidráulica negativa piloto.

Además, debemos establecer que cada pozo debe de contar con dos (02) piezómetros uno aguas arriba y uno aguas abajo, para controlar y chequear condiciones de flujo en el momento de la operación, tiene que establecerse un programa de control permanente no solo de niveles sino también de control hidroquímico, puesto que la calidad del agua subterránea es un elemento muy importante en el estudio del control de la intrusión marina.

Entendemos que sería recomendable implementar una batería de 4 o 5 pozos estratégicamente distanciados en la zona señalada con su par de piezómetros cada uno de acuerdo a la justificación dada anteriormente. El régimen de operación debe ser inintermitente es decir 24 horas por día, sin parar.

La información existente en la actualidad es abundante en cuanto artículos científicos sobre intrusión marina, caracterización de dicha intrusión y otros. Nuestra tarea primordial en esta etapa es establecer un programa piloto que nos permita observar el funcionamiento de una barrera hidráulica negativa, para lo cual disponemos de muy poca información. Cabe, nuestra mayor referencia lo representa el proyecto la barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga artificial en el acuífero del Llobregat (Barcelona, España).

Un aspecto que tiene incidencia directa en la disposición de los pozos en la batería que debe conformarse para la barrera hidráulica, es el radio hidráulico. Este elemento a diferencia que en los sistemas de explotación con causal seguro, ahora debemos plantearlo para que dichos radios se intersecten y permitan obtener un elemento descomulgado barrera sin permitir flujos intermedios entre los pozos, esta situación de ocurrir sería desventajosa para los objetivos planteados.

En la zona establecida como de interés para el proyecto piloto tenemos:  $T = 1,21 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $K = 1,09 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  y  $S = 0,0007$ . Esta información permite calcular un radio de influencia de 520,00 m. Proponemos que la disposición de los pozos en la batería sea el 50% del radio de influencia, es decir a 260,00 m., a fin de lograr el abatimiento esperado.

### CONCLUSIONES

Al tratarse de bombeo de agua de la interfase agua dulce-agua salada, es de esperar que la salinidad sea un elemento a tomar en cuenta al momento de diseñar al equipo de bombeo. Específicamente en cuanto a los materiales a tener en cuenta para los cuerpos de bomba y demás elementos que estarán expuestos a la gran agresividad química del agua salina.

Una vez implementada la barrera hidráulica piloto, tendremos mayores elementos de juicio para diseñar la barrera en toda su magnitud e iniciar el proceso de ejecución de las siguientes etapas del proyecto que corresponden a medidas integrales de recuperación del acuífero como por ejemplo barreras hidráulicas positivas o mixtas, a partir de volúmenes de agua generados por trasvases, tratamiento de aguas residuales de la población llegando hasta sistemas de ultrafiltración, tratamiento de agua salina, etc.

En su fase primaria el proyecto contemplaría solamente una barrera negativa, cuyas aguas extraídas sería vertidas directamente al Océano Pacífico, en una segunda fase se debería incorporar una barrera positiva, generando una barrera mixta, cuyos efectos son mucho más recomendables, según la propuesta de Pool y Carrera (2009).

### REFERENCIAS

- [1] Chávez Guillén F. et al. 2012. El Impacto del cambio climático sobre los acuíferos costeros.
- [2] García A. et. al. 2003. Control de la intrusión marina y modelación del acuífero de Wier (Málaga, España).
- [3] Padilla Benítez, F. y Cruz-Sanjulán, J.J. 1997. Modeling seawater intrusion with open boundary conditions. Groundwater.
- [4] Stephen Foster. 2006. Recarga del Agua Subterránea con Aguas Residuales Urbanas evaluación y manejo de los riesgos y beneficios.
- [5] Sastre B. 2009. Aspectos jurídicos de la recarga artificial de acuíferos: regulación actual y retos.
- [6] Molina G. J. 2009. Análisis integrado y estrategias de gestión de acuíferos en zonas áridas.
- [7] Ortuño Gobert, Felipe et. al. 2009. Barrera hidráulica contra la intrusión marina en el acuífero principal del Delta del Llobregat (Barcelona): primera fase.
- [8] Pool María. 2010. Dinámica de barreras hidráulicas negativas para evitar la intrusión de agua de mar.