

ARTÍCULO

# PROYECTO DE PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO AVANZADO PARA LA RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO

*David Korenfeld Federman y Oscar Jorge Hernández López*



## Proyecto de planta piloto de tratamiento avanzado para la recarga artificial del acuífero

**Resumen:** En varias regiones del país la sobreexplotación de los acuíferos se presenta como una problemática común, debido principalmente a la demanda desmedida de agua en dos importantes sectores: uso público-urbano y la agricultura.

En el Estado de México se consume el 46% de agua en la agricultura y 47% en el uso público-urbano. La demanda se cubre, en gran medida, con la extracción de agua del subsuelo, en un 32 y un 78%, respectivamente.

Usualmente, para el abastecimiento de agua potable en las principales áreas metropolitanas del país, como Ciudad de México, Guadalajara, Puebla, Monterrey y Toluca, entre otras, se recurre a la sobreexplotación de los mantos acuíferos y a la importación de grandes caudales de cuencas vecinas.

A la sobreexplotación de los acuíferos en los valles de México y Toluca, hay que agregar la expansión de la mancha urbana y de la frontera agrícola, la tala inmoderada de los bosques y la invasión de las zonas naturales de recarga, que han disminuido la capacidad de infiltración natural e incrementado el déficit en el balance hídrico.

Con el fin de revertir este problema, se ha diseñado una estrategia en dos vertientes principales: a) Inducir la recarga natural de los acuíferos con la intensificación o recuperación de la capacidad de infiltración del agua de lluvia y b) Recargar artificialmente los acuíferos mediante el tratamiento avanzado de las aguas residuales.

Con este objetivo el Gobierno del Estado de México ha incursionado, mediante un proyecto de vanguardia, desarrollado en el marco normativo vigente, en la instalación de una planta piloto de tratamiento avanzado con capacidad de 630 mil metros cúbicos por año, para la recarga artificial del acuífero. Ésta servirá para la investigación y la definición de las bases técnicas que permitan la determinación de un proyecto de recarga masiva de los acuíferos localizados en el territorio del Estado de México.

**Palabras clave:** sobreexplotación, planta de tratamiento avanzado, infiltración artificial, uso agrícola, uso público urbano, acuífero, recarga del acuífero, planta piloto, agua subterránea.

## Project of pilot plant of treatment advanced for the artificial recharge of the aquifer

**Abstract:** In several regions of the country the overexploitation of the groundwater appears like a common problematic, due to mainly to the excessive demand of water in two important use

sectors: urban-public and agriculture.

In State of Mexico consumed 46% of water in agriculture and 47% in the urban public use. The demand is satisfied, to a great extent, with the groundwater extraction, in 32 and a 78%, respectively.

Usually for the drinking water supply in the major metropolitan areas of our country, like City of Mexico, Guadalajara, Puebla, Monterrey and Toluca, among others, have been overexploited the aquifers and importing great volumes of neighboring river basins.

To overexploitation of the aquifers in the valleys of Mexico and Toluca, add the expansion of urban area and the agricultural border, the immoderate cutting of the forests and the invasion of the natural zones of charge, have been diminished natural infiltration and increased the deficit in the water balance.

With the purpose to revert this problem has been designed a strategy in two main ways : a) to induce the natural charge of water-bearing with the intensification or the recovery of the capacity of infiltration of the rainwater and b) the artificial charge of ground water through treatment advanced of waste water.

With this objective, the Government of the State of Mexico, has started a project of vanguard, developing in the legal framework, a pilot plant of treatment advanced with capacity of 630 thousand cubic meters per year for the artificial recharge of the aquifer, that will be used for the investigation and definition of technical bases for a project of massive recharge of the aquifers in the territory of the State of Mexico.

**Keywords:** overexploited, advanced treatment plant, artificial infiltration, agriculture use, urban-public use, aquifer, aquifer recharge, pilot plant, groundwater

## Introducción

### Planteamiento del problema

La sobreexplotación de los acuíferos es una problemática común en varias regiones del país. Su principal causa es la desmedida demanda de agua potable para satisfacer las necesidades, principalmente, en dos grandes sectores; el desarrollo de las ciudades y la agricultura. A nivel nacional el consumo de agua en éstos es de 14% para el primero y 77% para el segundo y del acuífero se extrae el agua para cubrir el 33% y el 62%, respectivamente.

Para el Estado de México el escenario de consumo cambia significativamente, ya que para el uso agrícola se tiene un 46% y para el uso público urbano, el 47%. De éstos, el 32% se extrae

del subsuelo, para el primer caso y el 78% para el segundo. Esto denota la importancia del establecimiento de políticas de nuevas fuentes de abastecimiento, entre ellas el agua de segundo uso.

En este contexto existen problemas de abastecimiento en las áreas metropolitanas de las principales ciudades del país, como: la Ciudad de México, Guadalajara, Puebla Monterrey y Toluca, etcétera. Esta situación ha traído como consecuencia la sobreexplotación de los mantos acuíferos subyacentes a estas ciudades, y en algunos casos se ha tenido que recurrir a la importación de grandes caudales de cuencas vecinas, fundamentalmente en el Valle de México.

De acuerdo a los últimos datos proporcionados, existen 104 acuíferos sobreexplotados en el país, destacando las cuencas centrales del norte y noreste, y la región hidrológica del Lerma-Santiago-Pacífico.

En el Estado de México, incluyendo la denominada Zona Metropolitana de la Ciudad de México, se tienen identificados 9 acuíferos, y de acuerdo al informe de la CONAGUA, seis de ellos se encuentran sobreexplotados, con la siguiente condición: el acuífero de Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 347.5%; Texcoco, 90.32%; Cuautitlán-Pachuca, 47.5%; Ixtlahuaca-Atlacomulco, 75%; Chalco-Amecameca, 22.1%, y Valle de Toluca, 25%.

En la entidad se provee a las poblaciones 40.17 l/s. De éstos el 85% (34.2 m<sup>3</sup>/s) proviene de los acuíferos subterráneos. De igual manera, al Distrito Federal se le transfieren 8 m<sup>3</sup>/s, de la siguiente manera: 2 m<sup>3</sup>/s provienen del acuífero del Valle de Toluca; 2 m<sup>3</sup>/s, del Ixtlahuaca-Atlacomulco, y 4 m<sup>3</sup>/s del acuífero Cuautitlán-Pachuca.



**La planta de tratamiento avanzada consta de la remoción de siste parámetros**

Aunado a la sobreexplotación de los acuíferos en los Valles de México y Toluca, la tala inmoderada de los bosques, las áreas destinadas a la agricultura y la alta erosión, han disminuido la infiltración

natural, y por ende se ha incrementado el déficit en el balance hídrico. Asimismo se ha visto afectado el entorno ambiental con la desaparición de cuerpos de agua, que en el pasado fueron el hábitat de especies endémicas, muchas de ellas desaparecidas. Es importante destacar que con la disminución de los bosques han aumentado los arrastres de suelo que disminuyen la capacidad de los cauces, viéndose afectadas las condiciones climáticas habituales en estas regiones.

Esta situación debe revertirse. Para ello se ha implementado un programa de acciones, enmarcada en dos rubros:

a) Inducir la recarga natural de los acuíferos. Buscar incrementar la recarga natural mediante obras que intensifiquen o recuperen la capacidad de infiltración de agua de lluvia. Entre estas obras se incluyen: zanjas, trinchera, tinajas ciegas, presas de gavión y reforestación, entre otras.

b) Poner en práctica la recarga artificial de los acuíferos. El Gobierno del Estado de México, preocupado por mejorar el medio ambiente y detener la sobreexplotación de los acuíferos, se ha dado a la tarea de construir una planta piloto que recargue 20 l/s, es decir, unos 630,720 m<sup>3</sup>/año.

Los resultados obtenidos en esta experiencia, serán: la obtención de información acerca de los efectos de colmatación, por la acumulación de materia orgánica o por la precipitación de sales dentro del pozo; las características de calidad de la mezcla resultante, y la identificación de la problemática operacional de los sistemas de tratamiento avanzado.

Esta información servirá de base para la definición de los requerimientos técnicos y financieros de un proyecto de recarga masiva del acuífero, ya que de acuerdo a un balance en esta región, la precipitación anual infiltra apenas 76.80 m<sup>3</sup>/s, volumen insuficiente, comparado con la extracción anual, lo que representa alrededor de 85.90 m<sup>3</sup>/s, teniendo un déficit de 9.1 m<sup>3</sup>/s. Para evitar el abatimiento se requiere la recarga masiva de un caudal de alrededor de 1,718 l/s.



**Vista general de la Macroplanta Toluca-Norte**

En México la experiencia actual es prácticamente a escala piloto. Aún no se han desarrollado proyectos a escala importante. Tal es el caso del Estado de México, donde se cuenta con una planta piloto de tratamiento avanzado para la recarga del acuífero, misma que se especifica en las normas: NOM-014-CONAGUA 2003 y NOM-015-CONAGUA 2007.

En este sentido se inicia la solución del problema con un proyectos de vanguardia, dentro del marco de aprovechamiento sustentable del recurso, para ayudar a la recarga de los cuerpos subterráneos, que a la vez servirán como base técnica y experimental para escalar proyectos a niveles más importantes.

### **Proyecto piloto para la recarga artificial del acuífero del Valle de Toluca**

Desde 1951 la Cuenca Alta del Río Lerma se convirtió en un importante abastecedor de agua potable para el Valle de México, al enviar 2.5 m<sup>3</sup>/s a la capital del país. Para 1957 su explotación ascendía a 2.85 m<sup>3</sup>/s.

En 1958 el geohidrólogo A. Loehner realizó un estudio para evaluar el potencial de la zona, con la finalidad de incrementar los volúmenes explotados. Los resultados indicaron que se tenía un potencial de explotación de 7.8 a 11.7 m<sup>3</sup>/s adicionales.

En el mismo estudio se recomendó que en un lapso de 10 años se abatieran los niveles freáticos entre 5 y 6 m, con el fin de evitar pérdidas por evaporación. Lo anterior reduciría las áreas pantanosas y permitiría incorporar esas tierras a la agricultura. Así también se aconsejó iniciar un programa de recarga artificial de la cuenca y los estudios para conocer el funcionamiento del acuífero.



**Cada módulo de tratamiento para la recarga masiva será de 50 l**

Desgraciadamente, hasta el momento lo único que ha sucedido es el incremento de los volúmenes explotados. En 1966 se firmó un convenio entre el Estado de México y el Distrito Federal para la perforación de 132 pozos, que sumados a los 97 existentes permitieron una extracción de 12.69 m<sup>3</sup>/s. En las décadas posteriores se incrementaron los volúmenes exportados a la Ciudad de México, hasta llevar el túnel Atarasquillo-Dos ríos a su máxima capacidad, 14 m<sup>3</sup>/s, con los consiguientes efectos negativos (desaparición de los manantiales, desecación de las lagunas del Lerma, etcétera), lo que aunado a la creciente demanda interna de la cuenca, por el acelerado crecimiento de la población, generó una grave problemática.

Como consecuencia de un uso irracional del recurso agua, actualmente se manifiestan problemas que repercuten en el equilibrio ecológico, principalmente en la fase subterránea. Para 1990 los niveles en el acuífero del Valle de Toluca habían evolucionado negativamente, abatiéndose hasta 60 metros en la ciudad de Toluca.



### **El influente para el tratamiento avanzado proviene de la Macroplanta Toluca-Norte**

La explotación de volúmenes para el Valle de México ha disminuido, sin embargo, los requerimientos internos se han incrementado. En la zona metropolitana de Toluca, que comprende los municipios de Zinacantepec, Toluca, Metepec, San Mateo Atenco, Lerma y Ocoyoacac, la demanda de agua es de 3.338 m<sup>3</sup>/s. Esto implica que para estas zonas y para el resto de los municipios de la cuenca, se requerirá una mayor extracción de agua para satisfacer la demanda del líquido. Es probable que con el tiempo los volúmenes que se exportan a la Ciudad de México sean nulos y las importaciones, que actualmente son de 0.61 m<sup>3</sup>/s, del Sistema Cutzamala, puedan aumentar, manteniéndose así la paradoja de la exportación y la importación de agua.

Con la finalidad de iniciar los estudios que permitan definir las acciones necesarias para la



recarga artificial del acuífero que subyace al Valle de Toluca, el Gobierno del Estado de México, a través de la Comisión del Agua del Estado de México, ha considerado conveniente dar inicio a los trabajos para la recarga artificial del acuífero, con caudales provenientes del efluente, con tratamiento a nivel secundario, de la planta Toluca Norte. El caudal de la planta piloto se inyecta de manera directa al acuífero subyacente.

### Ubicación de la planta

La planta de tratamiento avanzado de agua residual, para la recarga del acuífero, se ubica en la Planta Norte, en los terrenos que actualmente ocupa la planta de tratamiento denominada “Macroplanta Toluca-Norte”.

### Calidad del agua influente

El agua influente a la planta de tratamiento avanzado de aguas residuales, proviene de la Macroplanta Toluca-Norte. La alta eficiencia de remoción del tratamiento secundario facilita la depuración, hasta los niveles requeridos, para la inyección directa al acuífero. Los valores del promedio anual de los principales parámetros, son los siguientes:

Demanda biológica de oxígeno (5)	7.69 mg/lit
Demanda química de oxígeno	44.12 mg/lit
Sólidos suspendidos totales	12 mg/lit



**El carbón activado permite la remoción de materia orgánica**

El contenido de metales pesados no es significativo, debido a la procedencia del agua residual, que es de actividades domésticas. Asimismo, el contenido de compuestos orgánicos sintéticos no es importante.

## **Normatividad existente en recarga artificial de acuíferos**

La Comisión Nacional del Agua publicó en agosto de 2009 la NOM-014-CONAGUA-2003, en la que establece los requisitos para la recarga artificial de los acuíferos con agua residual tratada. Los parámetros de calidad más relevantes para su cumplimiento, son el nitrógeno amoniacal y el carbón orgánico total.

De acuerdo con la revisión de las referencias existentes, en cuanto a normatividad para la calidad del agua de inyección, se decidió tomar la del cumplimiento de la norma para agua potable en los parámetros que contempla. En los que no se tienen valores, se establecieron criterios de acuerdo a normas internacionales.

## **Tren de procesos de la planta de tratamiento avanzado**

El esquema de tratamiento avanzado tiene como objetivo la remoción de los siguientes parámetros:

- Sólidos suspendidos
- Demanda bioquímica de oxígeno
- Demanda química de oxígeno
- Grasas y aceites
- Nitrógeno amoniacal
- Fosfatos
- Coliformes

Para este fin la planta cuenta con los siguientes procesos de tratamiento:

a) Filtro biológico para nitrificación. La desnitrificación con medio biológico suspendido, usando metanol, tiene las ventajas de la rapidez, tanques pequeños, estabilidad de operación y eficiencias altas de remoción de nitrógeno.

b) Reactor biológico para desnitrificación. El reactor de desnitrificación separada, tendrá seguimiento en un tanque de aireación del mismo tamaño que el reactor de desnitrificación, permitiendo eliminar rastros de nitrógeno gas que se encuentren en el seno del líquido, que podrían dificultar la separación por sedimentación del efluente tratado y los lodos. Además, cualquier traza de metanol sería oxidada en el tanque aireado. Se usará una potencia de

aireación de 1 HP.

c) Sedimentación secundaria. El sedimentador secundario considera la concentración requerida de Sólidos Suspendidos en el Licor Mezclado en el reactor biológico de desnitrificación y la distribución de la biomasa entre el reactor y el sedimentador. Los requerimientos de biomasa en el biorreactor, así como las características de sedimentación de los lodos, determinan el área del sedimentador, la zona de clarificación, la zona de espesamiento, la zona de almacenamiento de lodos y la tasa de recirculación.

d) Coagulación química. El proceso combinado de coagulación química y filtración se aplica comúnmente a los efluentes de sistemas de tratamiento secundario, para la remoción de sólidos suspendidos, fósforo y turbiedad. Esto sería suficiente para cumplir un requerimiento de 2 mg/l de sólidos suspendidos totales y 3 mg/l de fósforo, y 5 unidades de turbiedad en las aguas que se inyecten al acuífero.

e) Filtración en lecho profundo. Ésta tiene la función de remover sólidos suspendidos, presentes en el efluente del sedimentador secundario, y garantizar que el filtro de carbón activado llegue a una concentración de Sólidos Suspendidos Totales inferior a los 5 mg/l. De esta manera se asegura que la eficacia del filtro de carbón activado se dirija exclusivamente a la remoción de la materia orgánica refractaria.

f) Absorción en carbón activado. La finalidad principal del carbón activado será la remoción de materia orgánica refractaria, es decir, materia orgánica que no se pueda remover en los procesos biológicos que preceden a esta reunión.

El filtro de carbón activado deberá remover la Demanda Química de Oxígeno, de 44.12 mg/l a 4 mg/l, es decir, deberá tener una eficiencia de 90.93%.

g) Desinfección con luz ultravioleta

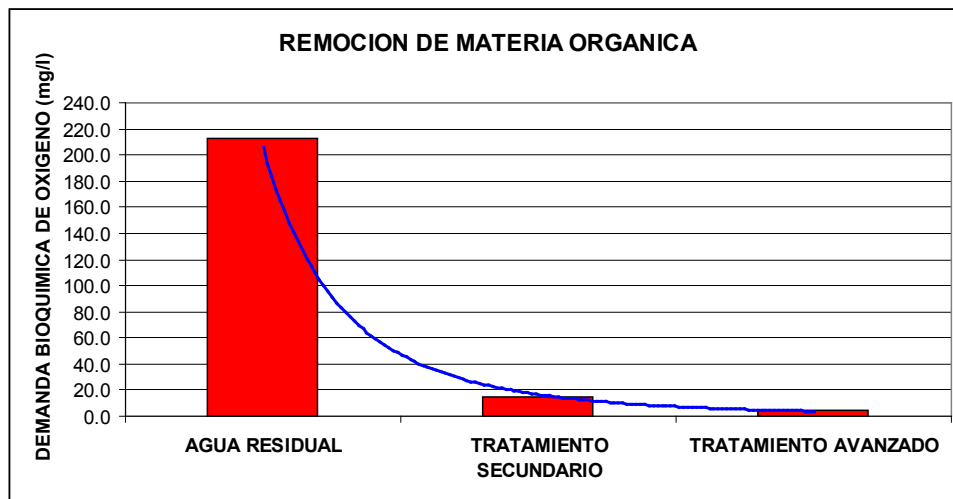
La desinfección del agua producida por la planta de tratamiento terciario proyectada, se hará con unidades de luz ultravioleta, ya que el uso del cloro es objetable ecológicamente. Además, la alta calidad del agua producida por la planta de tratamiento terciario, principalmente en los parámetros de sólidos suspendidos, turbiedad y color, garantiza el funcionamiento óptimo de un sistema de desinfección basado en la luz ultravioleta.

### **Resultados de calidad obtenidos**

Se mantiene un monitoreo permanente de la calidad del agua de recarga. Los resultados promedio, obtenidos en los principales parámetros, son los siguientes:

Demanda biológica de oxígeno (5)	menor a 4 mg/lt
Demanda química de oxígeno	menor a 10 mg/lt
Nitrógeno amoniacal	menor a 1 mg/lt

El utilizar el agua proveniente de actividades domésticas implica que el principal componente a remover para reusarla, sea la materia orgánica, la cual es biodegradable en un nivel alto. En el grafico se observa cómo este elemento es removido mediante el sistema biológico de manera eficiente, restando al tratamiento avanzado la eliminación de cantidades marginales, lo cual se realiza mediante la adsorción en carbón activado.



### Pozo de inyección

La inyección del agua al acuífero se realiza mediante un pozo perforado y ademado, con las siguientes características:

de 0 a 10 m en diámetro de 26"
de 10 a 80 m en diámetro de 20"

### Costos de operación y mantenimiento

Los costos anuales de operación de la planta son los siguientes:

Consumo de energía	\$239 832.00
Herramienta y equipo	\$2 373.65
Personal	\$671 673.60

Reactivos:	
Carbón activado	\$243 607.50
Metanol	\$0.00
Sulfato de aluminio	\$0.00
<b>Suma total</b>	<b>\$1 157 486.75</b>
Costo por m <sup>3</sup> de agua tratada (avanzado)	\$2.572
Costo por m <sup>3</sup> de agua tratada (secundario)	\$1.17
<b>Costo total por m<sup>3</sup> de agua tratada</b>	<b>\$3.74</b>

### Proyecto de recarga masiva en el acuífero del Valle de Toluca

El planteamiento es instalar módulos distribuidos en forma estratégica, que incluyan el tratamiento de aguas residuales o de lluvia a nivel avanzado y la infraestructura para pozos de inyección al acuífero.

Considerando módulos de 50 lps:

Planta de tratamiento a nivel terciario	28.5 mdp
Infraestructura complementaria para la inyección	2.5 mdp
En total un módulo costaría del orden de	30 mdp

Se propone desarrollar la infraestructura para recargar del orden de 2 500 litros por segundo, para lo que se requieren aproximadamente 50 módulos, con una inversión del orden de 1000 millones de pesos.

### Conclusiones

Las grandes ciudades establecidas en la Altiplanicie Mexicana se encuentran en una situación crítica, por la creciente disminución del agua disponible. La principal causa es la sobrepoblación. En estas regiones, donde la cantidad de agua aprovechable para el abastecimiento es limitada, una alternativa viable para revertir esta situación y darle sustentabilidad a estos centros urbanos, es la recarga artificial de los acuíferos mediante el reúso del agua residual.

Con la operación del proyecto piloto de recarga artificial en el Valle de Toluca, se ha demostrado que es técnicamente factible la remoción de contaminantes en las descargas de las aguas residuales de origen doméstico, para reutilizarlas en la recarga artificial del acuífero con las características de calidad necesarias. Asimismo, los costos de operación del proyecto de recarga demuestran su viabilidad económica, ya que representan montos similares o menores a los que actualmente se invierten para la importación de agua de cuencas lejanas.

Ante estos resultados, es importante gestionar ante la Comisión Nacional del Agua su intervención para que se vean favorecidas las acciones de recarga artificial, con acciones como la condonación del pago de derechos a las entidades y municipios que construyan y operen infraestructura para este fin.

