

Evaluación del impacto de la canalización del arroyo Alamar en la calidad de agua de su acuífero subyacente

Yair Alejandro Renovato Tirado¹, Fernando T. Wakida, Enrique García Flores,
Miguel Ángel Pastrana Corral

Fecha de recepción: junio 2014 – Fecha de aprobación: diciembre 2014

RESUMEN

El arroyo Alamar se encuentra en la parte este de la ciudad de Tijuana. Subyacente a este arroyo se encuentra un acuífero cuyo principal uso es el riego de hortalizas. Con el fin de llevar a cabo una evaluación preliminar del impacto que han generado las obras de revestimiento del arroyo en la calidad de agua del acuífero, se realizaron muestreos en pozos durante el periodo de junio a octubre de 2013. Los resultados muestran que a partir de las obras de revestimiento del arroyo se ha producido un deterioro en la calidad de agua que se refleja principalmente en un aumento en 100% de la concentración de sólidos disueltos. De la misma manera, las concentraciones de cloruros y de la demanda química de oxígeno aumentaron. Los compuestos de nitrógeno y fósforo disminuyeron su concentración durante este periodo, indicando que la carga de estos contaminantes hacia el acuífero ha disminuido. Los cambios en las concentraciones de los parámetros antes mencionados se producen a consecuencia de la reducción de las infiltraciones del arroyo al acuífero. El revestimiento del arroyo ha tenido impactos negativos en el acuífero reflejados en el abatimiento del nivel freático y en la calidad de agua.

Palabras clave: infiltración, corriente influente, acuífero, contaminación, río Tijuana.

Impact assessment of concrete lined channelization of the Alamar creek on the water quality of its underlying aquifer

ABSTRACT

The Alamar creek is located in the eastern part of city of Tijuana. Underlying this creek there is an aquifer which is used mainly for horticulture irrigation. Groundwater sampling was conducted during June to October 2013 in order to make a preliminary impact assessment of the concrete lined channelization of the Alamar Creek on groundwater quality. The results have shown a deterioration of groundwater quality after the concrete lining channelization of the creek that is mainly reflected in a 100% increment of dissolved solids. In the same way, chloride and the chemical oxygen demand concentrations increased. Nitrogen and phosphorus compound concentrations have decreased during this period, indicating that the load of these pollutants to the aquifer has been reduced. The changes on these parameters concentration before mentioned are due to the reduction of the seepage from the creek to the aquifer. The concrete lined channelization of the Alamar creek had impacted negatively in the increment of the water table depth and groundwater quality.

Keywords: infiltration, influent stream, aquifer, pollution, Tijuana river.

¹ Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Calzada Universidad 14418, Parque Industrial Internacional Tijuana, Tijuana B.C. 22390, Tijuana, Baja California, México. Correo electrónico: fwakida@uabc.edu.mx

Nota: El período de discusión está abierto hasta el 1° de mayo de 2015. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 19, No. 1, 2015, ISSN 1665-529-X.

INTRODUCCIÓN

La tasa anual de crecimiento de la población en la ciudad de Tijuana es de 4.9% y se considera que a este ritmo la población se duplicará en aproximadamente 14 años (Gobierno de Baja California 2013). Este aumento de población es impulsado por el crecimiento en el número de maquiladoras lo cual ha propiciado una fuerte inmigración a esta ciudad, produciendo una serie de problemas ambientales, y una alta presión a los recursos naturales locales y regionales. El crecimiento de la demanda de agua ha causado que los recursos hídricos locales sean insuficientes para el abastecimiento de la ciudad, por lo que más del 90% del agua que se consume en Tijuana proviene de la cuenca del Río Colorado, localizada aproximadamente a 200 km al este, requiriéndose grandes gastos energéticos para el bombeo de este recurso (Wakida y Piñón-Colín 2013).

Las fuentes de contaminación en acuíferos subyacentes a zonas urbanas y periurbanas están clasificadas en puntuales (fugas de tanques subterráneos de almacenamiento, tiraderos de basura); multipuntuales (fosas sépticas); difusas (deposición atmosférica, lixiviados de campos de cultivo) e inclusive lineales (fugas múltiples del alcantarillado sanitario) (Wakida y Lerner 2005). Los acuíferos se pueden contaminar mediante la infiltración de agua contaminada provenientes de ríos o canales no revestidos. Hay dos principales factores que producen que un acuífero se contamine por las infiltraciones de un río o corriente superficial. El primer factor es que la corriente reciba una gran proporción de aguas residuales sin tratamiento o pobremente tratadas y el segundo, es que agua proveniente de la corriente este infiltrando agua al acuífero (Wakida y Lerner 2005). La contaminación de acuíferos debido a la conexión entre aguas superficiales y subterráneas ha sido reportada en varias partes del mundo (BGS 1994, Kacaroglu y Gunay 1997). Gurunadha *et al.* (2001) realizaron el estudio del impacto del Río Nakkavagu sobre su acuífero subyacente. Se encontró que las infiltraciones de dicho río, que recibe descargas de industrias químicas y farmacéuticas, estaba impactando la calidad del acuífero a una distancia entre 500 a 600 metros del río. Lo más alarmante es que la población local se abastece de agua de dicho acuífero. Bougherira *et al.* (2014) estudiaron el impacto de descargas de aguas residuales industriales en el Río Meboudja en Argelia. Sus resultados mostraron que la contaminación en el acuífero por metales se extendía de 500 a 600 metros lateralmente desde el río. Ellos atribuyeron la extensión de la contaminación al bombeo excesivo para uso de riego de cultivos, que produce la infiltración inducida de

aguas del Río Meboudja hacia el acuífero. Otro caso de contaminación de aguas subterráneas debido a la interacción entre corrientes superficiales y acuífero es publicada por Kirshna *et al.* (2009). En el cual se reporta que descargas industriales a corrientes superficiales están contaminando las aguas subterráneas con metales pesados en la región de Patancheru en la India. Una de las recomendaciones de los autores fue el revestimiento de las corrientes superficiales de la región para evitar la infiltración de aguas contaminadas hacia el acuífero. Shekhar y Sarkar (2013) realizaron una evaluación de la calidad de agua del acuífero somero adyacente al dren Najafgarh en Nueva Delhi, India. El estudio identificó que la infiltración del dren estaba contaminando el acuífero somero principalmente con metales pesados y nitratos. De la misma manera determinaron que la recarga del acuífero a lo largo del dren ha causado una dilución que ha producido una evolución en el agua subterránea de una familia de tipo de clorurada a una de tipo bicarbonatada.

El objetivo de este estudio fue el de realizar una evaluación preliminar del impacto que ha producido el revestimiento del Arroyo Alamar en la calidad de agua de su acuífero subyacente.

Descripción de la zona de estudio.

El Arroyo Alamar es parte de la cuenca del Río Tijuana, una cuenca compartida por los Estados Unidos y México. Este arroyo es formado por el Arroyo Cottonwood (Cottonwood Creek) que se origina en Estados Unidos y el Río Tecate (Figura 1). Posteriormente, el llamado Arroyo Alamar confluye con el Río Tijuana dentro de la zona urbana de la ciudad del mismo nombre (Wakida y Piñón-Colín 2013). El Arroyo Alamar recorre la ciudad de Tijuana desde el puente Cañón del Padre, ubicado en la carretera de cuota Tijuana-Tecate, hasta el área denominada la bocina de concreto que se encuentra a la altura de la Central Camionera con un cauce de 9.8 km (Michel y Graizbord 2002, IMPLAN 2007). El flujo del arroyo en época de estiaje, es aportado en su mayoría, por descargas de plantas tratadoras de agua residuales ubicadas en la ciudad de Tecate. El promedio de flujo de descarga de la planta municipal de tratamiento de aguas residuales de Tecate es de 150 L/s más 20 L/s de la descarga proveniente de una cervecería (Ponce 2005). Las concentraciones promedio de la demanda química de oxígeno (DQO) de las descargas de la planta tratadora de aguas residuales (PTAR) en 2003 fue de 546 mg/L; de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) fue 185 mg/L y de 43 mg/L para NT (CESPTE, 2004). La capacidad de autodepuración del arroyo permite que en un recorrido de aproximadamente 19 km. aguas abajo de

la descarga de la planta tratadora de aguas residuales de la ciudad de Tecate, la calidad del agua mejore considerablemente (Rodríguez *et al.* 2005), observándose una reducción de 60% en la DBO y de un 70% en la demanda química del oxígeno (DQO) en ese punto. Sin embargo, esta calidad de agua se deteriora en el punto de la caseta de cobro de la carretera Tijuana- Tecate, y aún más cuando entra a la zona de asentamientos irregulares de la ciudad de Tijuana debido a las descargas de aguas residuales no tratadas y la basura depositada en su cauce.

La naturaleza del acuífero del Arroyo Alamar es aluvial con niveles estáticos entre 1 a 10 metros, se constituye por depósitos fluviales muy permeables, cuyo espesor es más de 300 metros con intercalación de una capa de arcilla de unos 100 metros de espesor (CNA 1979).

Diferentes estudios y programas han dividido la zona de estudio en tres zonas (Figura 1), la primera sección se extiende desde el final de la canalización del Río Tijuana hasta el puente del Boulevard Manuel J. Cloutier (zona 1); la segunda, abarca desde el Boulevard Cloutier hasta el Boulevard Terán Terán (zona 2), y la última, se encuentra localizada a partir de este Boulevard hasta el puente de la carretera de

cuota Tijuana-Tecate (zona 3).

En el año 2004, la zona 1 tenía una mayor área urbanizada en el margen norte del arroyo y la margen sur existían asentamientos irregulares en la parte oeste de la zona. Además de una mezcla de parcelas de cultivo de hortaliza y extensiones de tierra baldía que servían de tiraderos ilegales de basura y escombros. En la zona 2 estaba caracterizada en su margen norte por estar mayormente urbanizada, con una porción de parcelas utilizadas para el cultivo de hortalizas (27 ha) en la parte este; en la margen sur del arroyo de esta zona se encontraba el área mayor de asentamientos irregulares que cubrían aproximadamente unos 2 km de longitud por 100 m de ancho. Pero en la mayoría del área eran parcelas de cultivo de hortalizas y tierra vacante, especialmente en la parte este, con la presencia de establos y viveros. Por último, la zona 3 se caracterizaba principalmente por las parcelas de cultivo en la margen sur y zonas urbanizada en la parte norte y zonas de vegetación riparia. Cabe señalar que en la parte norte de la zona 2 colinda con la zona industrial de la Mesa de Otay. En cuanto a la zona 3, en la parte norte colindaba con una zona de asentamientos irregulares, cuyas descargas de aguas residuales desembocaban en el arroyo (Figura 2).

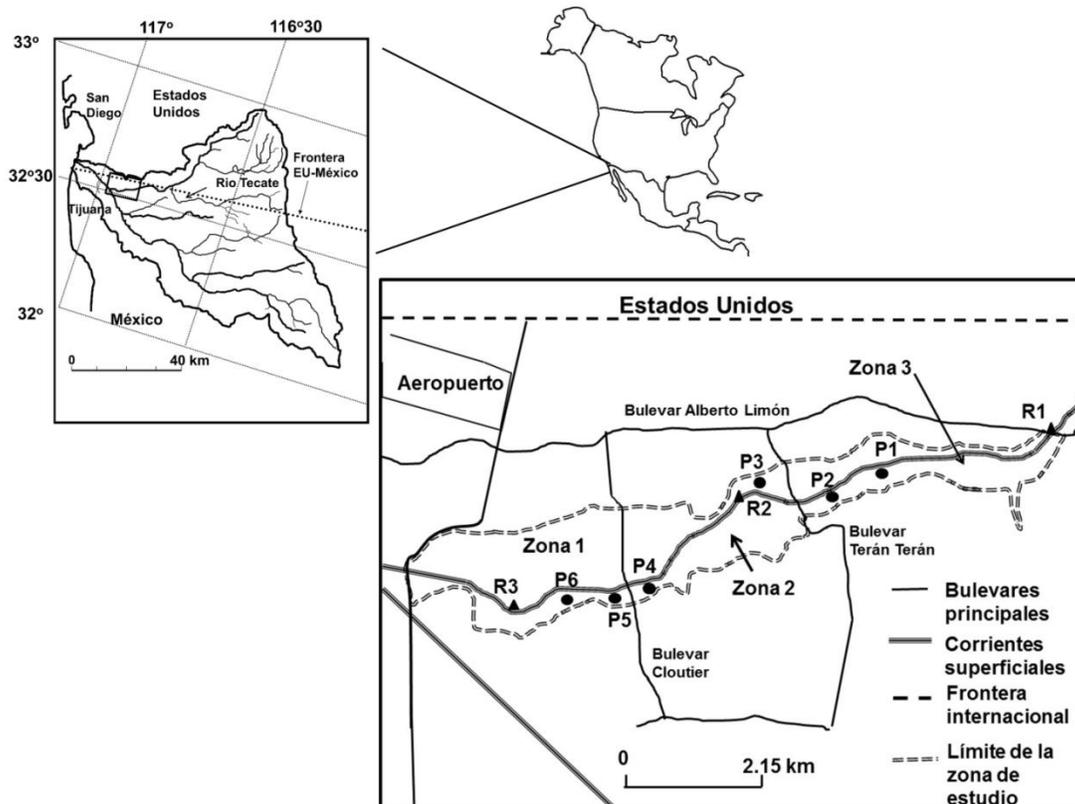


Figura1. La zona de estudio mostrando los sitios de muestreo. Los puntos P1al P6 denotan los pozos muestreados y R1 a R3 los sitios en el arroyo.

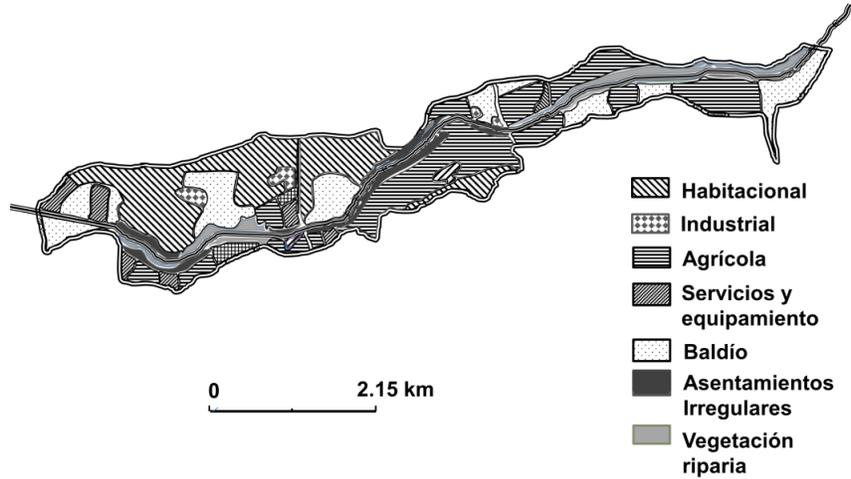


Figura 2. Uso de suelo en la zona del arroyo de Alamar en el año 2004.

Dentro de las fuentes potenciales de contaminación identificadas en el área del arroyo Alamar en el 2004 tenemos: el uso de letrinas en las zonas de asentamientos irregulares, corrales para la cría doméstica de animales, estiércol utilizado en la siembra de hortalizas, infiltraciones del mismo arroyo, escurrimientos de aguas residuales provenientes de asentamientos irregulares, basureros, tiraderos clandestinos de escombros y residuos peligrosos. En el año 2005, se identificó un tiradero de residuos peligrosos clandestino en el área del Arroyo Alamar, específicamente en la Colonia Murua (localizada en la zona 1), el cual llamó la atención de las autoridades ambientales debido al incendio subterráneo que generaba fumarolas constantes y cuyo costo de remediación del sitio fue de 770 mil pesos (Gobierno de Baja California 2007).

Para el año 2013, la margen sur de la zona 1 se

compone en su gran mayoría de terrenos baldíos, parcelas de cultivo de hortalizas y una zona de asentamientos sin servicio. Existe sin embargo también un balneario (que ya existía en el 2004) y una empacadora de cebollín.

La zona 2 es la que ha sufrido un mayor cambio con respecto al uso de suelo. En la margen sur, se construyó parte de un conjunto habitacional con todos los servicios, se disminuyó pero no se eliminaron los asentamientos irregulares, hubo un aumento el área dedicada a la siembra de hortalizas por medio de invernaderos y se construyeron en su extremo este colindante con el boulevard Terán Terán varias naves industriales para la industria maquiladora. En cuanto a la zona tres, el cambio más fuerte además de las obras de revestimiento, es la construcción de un conjunto habitacional en el este de la zona (Figura 3).

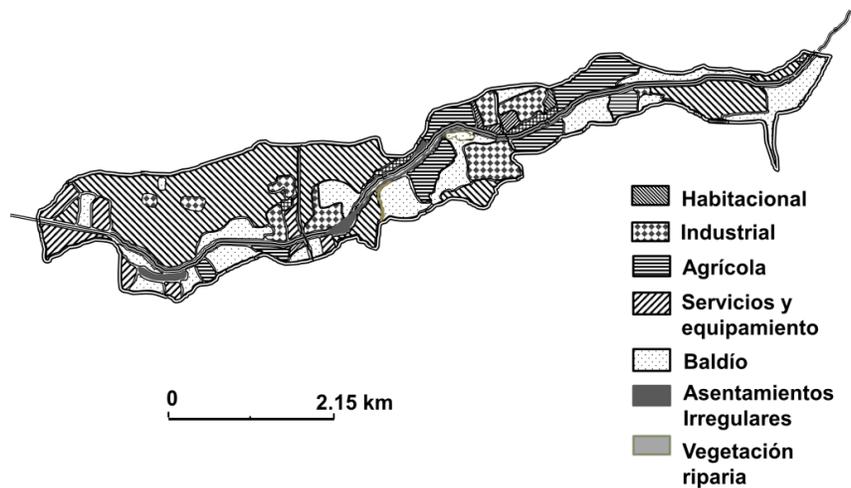


Figura 3. Uso de suelo en la zona del arroyo de Alamar en el año 2013.

METODOLOGÍA

Se realizaron tres muestreos en seis pozos y tres puntos en el arroyo, todos ellos localizados dentro de las tres zonas del acuífero arroyo Alamar durante los meses de junio, agosto y octubre del 2013 (Figura 1). Las muestras fueron colectadas directamente de las tuberías de riego, tomándose en cuenta que la bomba estuvieran trabajando por un mínimo de 30 minutos antes de coleccionar la muestra. La gran mayoría de los sitios de muestreo de aguas subterráneas son de tipo pozo noria. En las cuales su construcción varía desde una simple excavación en el suelo realizada con maquinaria pesada (P1, P2 y P6) hasta una noria protegida con aros de concreto (P4 y P5). Una excepción fue P3, cuya profundidad aproximada es de 20 metros y está totalmente protegido de la intemperie. Muestras instantáneas individuales de agua superficiales fueron tomadas en los puntos mostrados en la Figura 1 y denotadas por R1, R2 y R3. Todas las muestras fueron colectadas en recipientes de plástico de 1L, con excepción de las muestras para el análisis de grasas y aceites en las cuales se utilizaron recipientes de vidrio. Las muestras fueron refrigeradas para su transporte al laboratorio y analizadas dentro de las primeras 24 horas.

Los promedios obtenidos de los parámetros se compararon con los de un estudio realizado por Ponce en el año 2004 (Ponce Serrano 2006; Wakida et al. 2005) cuyo objetivo fue determinar la calidad del agua acuífero del Arroyo Alamar.

Se determinaron parámetros fisicoquímicos como conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, potencial de hidrógeno, grasas y aceites y sólidos suspendidos totales; además de parámetros como demanda química de oxígeno, nitrato-N, nitrito-N, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, fosforo total y cloruros. El fosforo total (FT) fue analizado usando el método descrito en la norma mexicana NMX-AA-029-SCFI-2001 (SE 2001a); la demanda química de oxígeno (DQO) por la norma mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001 (SE 2001 b), sólidos suspendidos totales (SST) con la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001 (SE 2001c), grasas y aceites (G y A) con la Norma Mexicana NMX-AA-005-SCFI-2000 (SE 2000), nitrato-N ($\text{NO}_3\text{-N}$), nitrito-N ($\text{NO}_2\text{-N}$),

nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$) por métodos espectrofotométricos y el nitrógeno total (NT) mediante el método de digestión con persulfato (D'Elia et al. 1977). Los controles de calidad fueron hechos mediante el análisis paralelo de muestras adicionales en las cuales se le adicionó una cantidad conocida de los analitos. Los porcentajes de las recuperaciones de los blancos adicionados son mostrados en la Tabla 1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentraciones en el arroyo y pozos

Las concentraciones de los parámetros analizados en muestras de pozos y el arroyo son mostrados en el Tabla 2. Se encontraron altas concentraciones de sólidos disueltos totales (SDT) en las muestras tomadas en el arroyo que van desde 3397 para el punto R2 y 3777 mg/L para el punto R3. Siendo la conductividad eléctrica un parámetro proporcional a los SDT, sus lecturas fueron para R2, 5117 mg/L y 5660 $\mu\text{S/cm}$ para R3. En cuanto a los niveles de la DQO se observaron concentraciones de 228 mg/L para R2 y 180 mg/L para R3, lo que implica una tendencia de disminución de la concentración de la zona 2 a la 1. Con respecto a las concentraciones de $\text{NO}_3\text{-N}$, las concentraciones encontradas tuvieron promedios de 0.4 y 1.1 mg/L. Las concentraciones de $\text{NH}_3\text{-N}$ fueron de 2.4 y 1.5 mg/L, en R2 y R3 respectivamente. Para el NT se obtuvieron promedios de 5.8 mg/L para R1 y 4.5 mg/L, para R3, de la misma manera, los resultados obtenidos para fosfatos totales fueron de 7.9 mg/L para R2 y 5.8 mg/L, para R3. Se observó una reducción en las concentraciones de NT, FT, DQO y $\text{NH}_3\text{-N}$ conforme el arroyo fluye de este a oeste. Se detectaron niveles elevados de SST, concentraciones en R2 y R3 de 243 y 246 mg/L, respectivamente, debido a que en el momento de la toma de las muestras se encontraba laborando maquinaria en la construcción del revestimiento aguas arriba de los puntos de muestreo, lo que ocasionó la suspensión de sedimentos finos presentes en el lecho del arroyo. Los niveles de grasas y aceites (G y A) en el arroyo no mostraron gran variación en el cauce del arroyo 10 y 9.6 mg/L, estas concentraciones son más bajas que el límite máximo permisible (LMP) marcados por la norma. NOM-002-SEMARNAT-1996 (50 mg/L) que establece los límites máximos para descargas a sistemas de alcantarillado.

Tabla 1. Datos de control de calidad de los parámetros analizados.

	FT	DQO	NT	SST	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NH}_3\text{-N}$	G y A
Recuperación (%)	92	92	95	93	90	91	92	90
Desviación estándar relativa (%)	0.8	2.5	0.4	2.2	1.9	2	1.7	4

Se encontraron altas concentraciones de los SDT de 2323 a 4883 mg/L en los pozos muestreados en las márgenes del arroyo, todos estos valores están por encima del límite máximo permisible (LMP) marcado por la norma oficial mexicana para agua potable (NOM-127-SSA1-1994) (1000 mg/L), debido a que la conductividad eléctrica está relacionado a la concentración de los SDT, se obtuvieron valores elevadas de 3473 a 7370 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los pozos con mayor conductividad eléctrica y concentración de SDT fueron P3, P4, P5 y P6, los cuales se localizan dentro de las zonas 1 y 2, que fueron las primeras zonas en las cuales se realizó el revestimiento, además de ser estos los pozos más alejados de las márgenes del arroyo.

En los niveles de DQO se observó un intervalo en las concentraciones de los pozos de 125 a 349 mg/L, las concentraciones más altas se encontraron en P3, P4 y P5, posiblemente como resultado de la presencia de compuestos oxidables inorgánicos. Con respecto a las concentraciones de $\text{NO}_3\text{-N}$, los pozos se encuentran por debajo del LMP marcado en la norma antes mencionada (10 mg N/L), con un intervalo en los promedios de 0.4 - 3 mg/L.

Se encontraron concentraciones de $\text{NH}_3\text{-N}$ en los pozos en intervalo de promedios de 0.2 - 2.3 mg/L, la mayoría de los pozos se encuentran por debajo del LMP que marca la norma oficial mexicana para agua potable a excepción de P1 y P6, en los cuales se indica

una posible contaminación por infiltración de aguas residuales no tratadas. Las concentraciones promedios de NT fueron entre 2.8 - 22.2 mg/L, indicando un incremento de la concentración en los pozos de la zona 3 a la zona 1. Los niveles de fosfatos en los pozos mostraron un intervalo entre 0.5 - 6.5 mg/L. Las concentraciones fosfatos, DQO, $\text{NH}_3\text{-N}$ y NT contribuyen a la afirmación de la existencia de varias fuentes potenciales de contaminación, como son las letrinas en los asentamientos irregulares, lixiviados de las parcelas de cultivo y la presencia de escurrimientos de aguas residuales no tratadas a lo largo de la zona, como consecuencia de la limitada infraestructura de drenaje en la zona. Se observó que las concentraciones de cloruros (Cl^-) en todos los pozos sobrepasaron el LMP marcado en la norma oficial mexicana para agua potable (250 mg/L), con intervalos de promedios de 559 a 2063 mg/L, muy similar al comportamiento de SDT y DQO en los pozos P3, P4 y P5.

Comparación de parámetros en pozos (2004-2013). Los promedios de las concentraciones en muestras de pozos localizados al margen del arroyo Alamar en el 2004 (Tabla 3) fueron comparados con las concentraciones obtenidas de los muestreos realizados en el año 2013 (Tabla 2) con el propósito de observar los cambios que han surgido en la calidad del agua del acuífero del arroyo Alamar con respecto a las obras de revestimiento del mismo.

Tabla 2. Valores promedio de concentraciones de parámetros seleccionados de aguas subterráneas y superficial 2013 (Todos los valores en mg/l, si no es señalado).

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	R1	R2	R3	NOM
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	3530	3473	7370	7103	6723	4355	5247	5117	5660	NN
SDT	2323	2487	4883	4743	4477	2925	3510	3397	3777	1000
pH	7.52	7.41	6.93	6.89	6.87	7.52	8.49	8.18	8.68	NN
DQO	212	125	275	349	341	190	120	228	180	NN
$\text{NO}_3\text{-N}$	0.4	0.6	3.0	2.4	1.5	0.8	0.3	0.4	1.1	10
$\text{NO}_2\text{-N}$	0.04	0.07	0.47	0.15	0.11	0.22	0.02	0.17	0.31	0.05
$\text{NH}_3\text{-N}$	1.5	0.3	0.4	0.2	0.4	2.3	0.3	2.4	1.5	0.5
NT	2.8	6.8	16.4	21.1	22.2	8.1	1.6	5.8	4.5	NN
$\text{PO}_4\text{-P}$	6.5	4.5	0.7	1.9	0.5	1.6	11.7	7.9	5.8	NN
Cl^-	559	670	2063	1535	1390	722	310	486	440	250
SST	***	***	***	***	***	***	45	243	246	NN
G y A	***	***	***	***	***	***	8.7	10.0	9.6	NN

SDT: sólidos disueltos totales; DQO: Demanda Química de Oxígeno; $\text{NO}_3\text{-N}$: Nitrógeno como nitratos; $\text{NO}_2\text{-N}$: Nitrógeno como nitrito; $\text{NH}_3\text{-N}$: Nitrógeno amoniacal; NT: Nitrógeno amoniacal; $\text{PO}_4\text{-P}$: Fosfatos como fósforo- SST: Sólidos suspendidos totales, A: Grasas y aceites, NOM: NOM-002-SEMARNAT-1996.

Las concentraciones de SDT como se muestran en la Tabla 3 evidencian un incremento después del revestimiento del arroyo principalmente en P3 (4883 mg/L) y en P4 (2743 mg/L) con respecto a las concentraciones en 2004, donde se observan concentraciones en los mismos pozos fue de 1710 y 1987 mg/L, respectivamente. En dos pozos localizados en la misma zona se observaron concentraciones de 1710 y 2030 mg/L para SDT en 1997 (CNA, 1997), lo cual confirma que hay una evolución de incremento en las concentraciones de STD. En cuanto a las concentraciones de DQO, en el análisis del 2013 como puede observarse en el Tabla 2 (120 a 215 mg/L) fueron más altos comparados con los resultados obtenidos hace una década, con un intervalo de 24 a 92 mg/L (Tabla 3). En cuanto a las concentraciones de NO₃-N, no se presentaron cambios considerables obteniéndose un intervalo de resultados en el 2013 de 0.4 a 3 mg/L y en el 2004 un intervalo de 0.1 a 1.6 mg/L, los cuales se han mantenido por debajo del LMP marcado por la norma oficial mexicana para agua potable (NOM-127-SSA1-1994) (10 mg/L). Las concentraciones de NO₃-N en 1997 en dos pozos localizados en la misma área fueron de 3.8 y 1.8 mg/L. Estas concentraciones son un poco más altas que las concentraciones de los muestreos realizados en 2004 y en 2013, esto podría tener su origen en la falta de drenaje sanitario y en una mayor área destinada a cultivos en el área del arroyo Alamar en 1997.

Este aumento de concentración de los parámetros antes descritos (SDT, DQO y Cl⁻) puede tener su causa en la disminución de la infiltración del agua del arroyo hacia el manto freático, impidiendo de esta manera la dilución de sólidos y sales inorgánicas en el

acuífero. El bombeo del agua de las norias producía una infiltración inducida del arroyo hacia la noria, antes del revestimiento del arroyo, que es observado en la disminución de STD en los pozos y aumento de compuestos nitrogenados. Caso opuesto ocurrió después del revestimiento, en el cual la infiltración inducida ceso, aumentado la concentración de STD y disminuyendo la concentración de compuestos nitrogenados en el agua extraída de los pozos. Lo explicado anteriormente se puede observar en P1 y P2, donde al momento en que se realizó el muestreo, el arroyo no estaba revestido en el tramo donde se sitúan dichos pozos. En estos pozos se observaron las menores concentraciones de STD (un 100% menos que en todos los demás pozos) y las concentraciones mayores de compuestos nitrogenados.

Al contrario, las concentraciones de NH₃-N en las cuales se observó un descenso en la concentración de P1 al P5 con un intervalo de 2.3 a 11.3 mg/L en el 2004 a un intervalo de 0.2 a 1.5 mg/L en el 2013, donde la mayoría de estos (P2 al P4) cumple con el LMP marcado por la norma oficial mexicana para agua potable (NOM-127-SSA1-1994) (0.5 mg/L). En P6 se observó un ligero cambio en su concentración de NH₃-N (2.3 mg/L en el año del 2004, y de 2.7 mg/L en 2013), debido posiblemente a que material externo haya caído al pozo ya que éste carece de protección adecuada. De la misma manera en los niveles de nitrógeno total (NT) se puede observar cambios en la concentración de los pozos P1, P2 y P3 del 2004 al 2013. Las concentraciones en P1, P2 y P3 en 2001 fueron 30, 44.3 y 40.7 mg/L, respectivamente. Mientras que en el 2013, las concentraciones observadas fueron 2.8, 6.8 y 16.4 mg/L para los mismos pozos.

Tabla 3. Rangos y promedio de concentraciones de parámetros seleccionados de aguas subterráneas y superficial (todos los valores en mg/l, si no es señalado), 2004.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	R1	R2	R3	NOM
Conductividad eléctrica (µS/cm)	2860	2957	3400	3960	6370	3627	2727	3513	2110	NN
SDT	389	224	157	236	269	1827	1373	1763	2110	1000
DQO	24	25	58	56	92	24	51	81	67	NN
NO ₃ -N	0.1	0.4	0.5	0.5	1.6	0.6	1.5	1.2	0.8	10
NO ₂ -N	3.0	2.0	1.7	2.3	6.7	1.0	5.0	5.7	2.0	0.05
NH ₃ -N	7.0	5.8	11.3	4.1	2.3	2.7	4.7	2.6	1.0	0.5
NT	30	44	41	18	24	15	15	15	5	NN
PO ₄ -P	14.1	7.5	12.0	4.6	0.7	1.9	14.1	10.8	3.5	NN
Cl ⁻	120	157	178	228	NA	NA	NA	NA	NA	250

SDT: sólidos disueltos totales; DQO: Demanda Química de Oxígeno; NO₃-N: Nitrógeno como nitratos; NO₂-N: Nitrógeno como nitrito; NH₃-N: Nitrógeno amoniacal; NT: Nitrógeno amoniacal; PO₄-P: Fosfatos como fósforo- SST: Sólidos suspendidos totales; G y A: Grasas y aceites. NOM: NOM-002-SEMARNAT-1996. NA: no analizado.

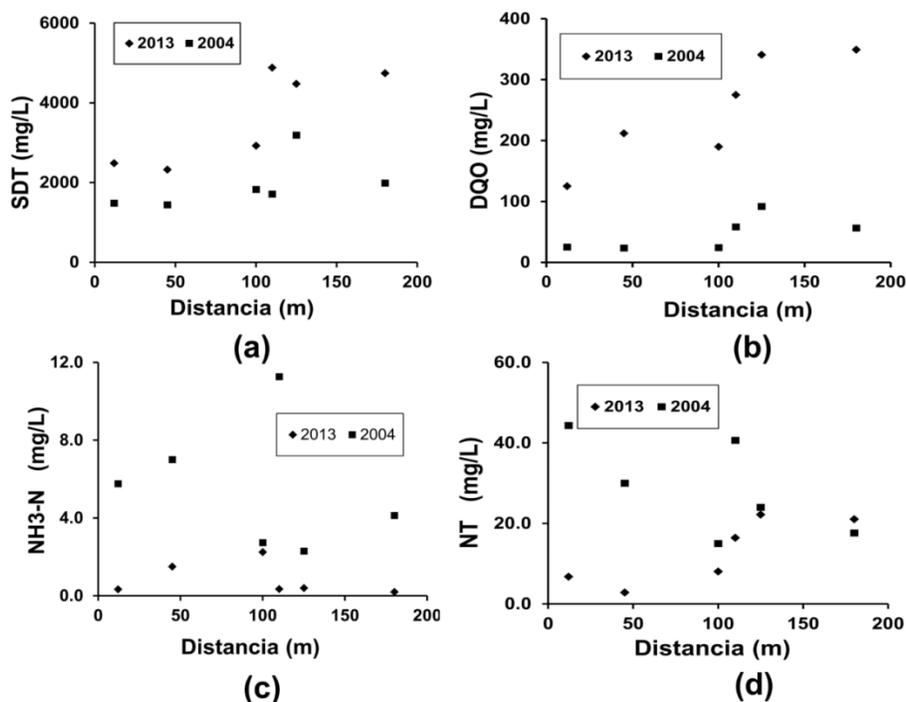


Figura 5. Parámetros de calidad de agua en las norias con respecto a la distancia del Arroyo Alamar (a) Sólidos disueltos totales (SDT), (b) Demanda química de oxígeno (DQO), (c) Nitrógeno amoniacal (NH₃-N) y (d) Nitrógeno total (NT).

Con respecto a las concentraciones de fosfatos también se pudo apreciar un descenso en los pozos en comparación en este periodo del 2004 al 2013, principalmente en los pozos P1 al P4, obteniéndose intervalos en el 2004 de 0.7 a 14.1 mg/L y de 0.5 a 6.5 mg/L en el 2013 (Figura 5). La reducción de los valores de los parámetros antes mencionados (NH₃-N, NT y PO₄-P) podría esperarse debido a que después del revestimiento del arroyo disminuyeron las infiltraciones de agua contaminada al acuífero provenientes del arroyo.

Los trabajos de revestimiento del arroyo y sus obras de urbanización han reducido considerablemente el área de asentamientos irregulares en la zona (ver Figuras 2 y 3). Por lo cual también disminuyeron la carga de contaminantes procedentes de letrinas y tiraderos de basuras

Las mayores concentraciones de compuestos de nitrógeno se observaron en P5 y P6, lo que podría ser resultado de lixiviados provenientes de los campos de cultivo de hortalizas y letrinas, debido a que los pozos se encuentran adyacentes a las mismas. Ponce (2005) estimó que el revestimiento del arroyo provocaría que aproximadamente 94.5 L/s dejarían de infiltrarse al acuífero. Los horticultores han comentado que el nivel freático en sus pozos y norias ha bajado aproximadamente dos o tres metros, lo que ha

generado la necesidad de que se tenga que excavar más profundo para poder bombear agua (Bartolo, comunicación personal).

La Figura 5 muestra los promedios de parámetros seleccionados del 2004 y 2013 contra las distancias al arroyo antes de la canalización. Se observa que para las concentraciones de SDT y DQO, las concentraciones promedio del 2004 fueron menores a las concentraciones encontradas en el 2013. Cabe señalar que los pozos que están más cercanos al arroyo (P1 a 12 m y P2 45 metros), se encuentran situados en una zona en la que el revestimiento del arroyo no ha sido concluido, por lo que posiblemente infiltraciones del arroyo hacia el acuífero estuvieran ocurriendo al momento en que los muestreos se llevaron a cabo.

Es por eso que existe la posibilidad que en estos pozos siga ocurriendo el fenómeno de dilución debido a la infiltración agua del arroyo, ya que la concentraciones de SDT son casi la mitad de los pozos que están localizados más al oeste, zona en la que el revestimiento lleva más de un año. Las concentraciones de DQO tienen una correlación con la concentraciones de SDT ($r^2 = 0.77$) para el 2013, indicándonos que un porcentaje de los sólidos disueltos pueden ser compuestos oxidables. Todo lo contrario ocurre en las concentraciones de NH₃-N y

de NT donde se muestra que los valores del 2013 son más bajos que los observados en el 2004, cabe señalar que los datos de NH₃-N no se observa ninguna tendencia en cuanto a la distancia al arroyo. Las concentraciones de NT en el 2004 tuvieron una tendencia a disminuir con respecto a la distancia del pozo al arroyo, indicándonos posiblemente la influencia de las infiltraciones del arroyo. Para el muestreo llevado a cabo en el 2013, se observa una tendencia opuesta, es decir, las concentraciones de NT aumentan con respecto a la distancia del pozo al arroyo. Lo cual nos podría indicar que las fuentes de nitrógeno son debido a otra fuente diferente a las infiltraciones del arroyo, en este caso podría ser los lixiviados de las parcelas de cultivo y letrinas presentes en la zona. En ambos compuestos nitrogenados se observa una disminución en su concentración indicándonos que la carga de estos compuestos ha disminuido junto con las infiltraciones del arroyo.

CONCLUSIONES

Los resultados han mostrado que el revestimiento del arroyo Alamar ha tenido un impacto negativo en cuanto a la calidad de agua en su acuífero subyacente, con respecto a los sólidos disueltos cuya concentración se incrementó aproximadamente en un 100% entre el 2004 y el 2013. Caso contrario se

presentó con las concentraciones de nitrógeno y fósforo que disminuyeron en el mismo periodo de tiempo. Lo anterior indica que las obras de revestimiento del arroyo han reducido las infiltraciones de agua contaminada al acuífero provenientes del arroyo y los asentamientos. El proyecto de revestimiento del arroyo ha reducido la contaminación generada por escurrimiento de aguas residuales y letrinas de los asentamientos irregulares, sin embargo al parecer su mayor impacto se observa en la cantidad del recurso, que se está manifestando en el aumento de la profundidad del nivel freático. Una solución ambientalmente más amigable al problema de la zona del arroyo Alamar, habría sido la canalización del arroyo mediante el uso de gaviones que permitieran la infiltración del arroyo y obras de introducción de drenaje de las zonas aledañas para evitar que escurrimientos de aguas residuales crudas contaminen el arroyo.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Baja California por el apoyo económico al proyecto a través de la 16va. Convocatoria interna de apoyo a proyectos de investigación (proyecto No 3877) y a los dos revisores anónimos cuyos comentarios enriquecieron este manuscrito.

REFERENCIAS

BGS (British Geological Survey) (1994). "Impact of urbanization on groundwater: Hat Yai. Final report". Technical Report WC/94/43. British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, 65 pp.

Bougherira N., Hani A., Djabri L., Toumi F., Chaffai H., Haied N., Nechem D., Sedrati N. (2014). Impact of the urban and industrial wastewater on surface and groundwater, in the region of Annaba, (Algeria). "Energy Procedia", 50, 692-701.

CESPTE (2004). "Rehabilitación de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la ciudad de Tecate", manifiesto de impacto ambiental-hidráulico:

<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/bc/estudios/2004/02BC2004H0002.pdf>

Consultado el 18/01/2014.

CNA (1979). "Estudio Geohidrológico del Valle de Tijuana en el estado de Baja California Norte". Comisión Nacional del Agua, Mexicali, B. C., México.

CNA (1997). "Diagnóstico Actual y Propuesta de Explotación y Tratamiento de los Pozos de Agua Potable de la Ciudad de Tijuana, Baja California". Comisión Nacional del Agua, Mexicali, B. C., México

D'Elia C.F., Steudler P.A., Corwin N. (1977). Determination of total nitrogen in aqueous samples using persulfate digestion. "Limnology and Oceanography", 22, 760-764.

Gobierno del estado de Baja California. (2007). "Sexto informe de gobierno" Eugenio Elorduy Walter. Baja California [en línea] http://www.bajacalifornia.gob.mx/VI_Informe/006economico/economico.html. Consultado 19/09/2008.

Gobierno de Baja California. (2013). "Nuestro estado, población, situación demográfica" [en línea] http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro_estado/situacion_dem/demografico.jsp 9/01/2014.

Gurunadha Rao V.V.S, Dhar R.L., Subrahmanyam K. (2001). Assessment of contaminant migration in groundwater from an industrial development area, Medak district, Andhra Pradesh, India. "Water, Air and Soil Pollution", 128, 369-389.

IMPLAN (2007). "Programa parcial de desarrollo urbano del arroyo Alamar 2007-2018". Versión abreviada, Tijuana.

Kacaroglu F., Gunay G. (1997). Groundwater nitrate pollution in an alluvium aquifer, Eskisehir urban area and its vicinity, Turkey. "Environmental Geology", 31, 178-184.

Krishna A.K., Satyanarayanan M., Govil P.K. (2009) Assessment of heavy metal pollution in water using multivariate stastical techniques in an industrial area: A case study from Patancheru, Medak District, Andhra Pradesh, India. "Journal of Hazardous Materials", 167, 366-373.

Michel S., Graizbord C. (2002). "Los ríos urbanos de Tecate y Tijuana: Estrategias para ciudades sustentables". San Diego: Institute for Regional Studies of the Californias, San Diego State University.

Ponce Serrano L. E. (2006). "Evaluación de la calidad del agua del acuífero del Arroyo Alamar". Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Tijuana, Baja California, México.

Ponce, Victor M. (2005). "Flood Hydrology of the Binational Cottonwood Creek-Arroyo Alamar, California and Baja California". San Diego State University versión 1.04, agosto 5 de 2003 [en línea] http://alamar.sdsu.edu/alamar/alamar_english.html. Consultado 2/06/2004.

Rodríguez-Ventura G.J., F.T. Wakida, R. Radilla-Camacho. (2005). Water quality evaluation of the Tecate River, México, for reuse purposes. En "River Basin Management III WIT Transactions on Ecology and the Environment", Brebbia C.A. y Antunes do Carmo J.S. (eds), 403-409, WIT Press, Southampton, Reino Unido.

SE (Secretaría de Economía) (2000). "Norma Mexicana NMX-AA-005-SCFI-2000. Análisis de agua-Determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba". Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de Diciembre del 2000.

SE (Secretaría de Economía) (2001a). "Norma Mexicana NMX-AA-029-SFCI-2001. Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 17 de abril del 2001.

SE (Secretaría de Economía) (2001b). "Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001. Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba". Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 17 de abril del 2001.

SE (Secretaría de Economía) (2001c). "Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001. Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba". Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1 de agosto del 2001.

SEMARNAT (1998). Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de junio de 1998.

SSA (2000). Norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano - límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización". Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de noviembre de 2000.

Shekhar S., Sarkar A. (2013). Hydrogeological characterization and assessment of groundwater quality in shallow aquifers in vicinity of Najafgarh drain of NCT Delhi. "Journal of Earth System Sciences", 122, 43-53.

Wakida F.T., Lerner D. N. (2005). Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study. "Water Research", 39, 3-16.

Wakida F.T., Piñón Colín T.D.J. (2013). Calidad de agua del acuífero del Arroyo Alamar. En "El arroyo Alamar de Tijuana, un río urbano amenazado". Sánchez-Munguía, V. (coordinador), 29-41, Editorial de la red nacional de investigación urbana, México D.F

Wakida F.T., Ponce-Serrano L.E., Mondragón-Silva E., García-Flores E., Lerner D.N., Rodríguez Ventura G. (2005). Impact of a polluted stream on its adjacent aquifer: the case of the Alamar zone, Tijuana, México. En: "Bringing Groundwater quality research to the watershed scale". Thomson, N.R. (Ed), 141-147. IAHS publication 297. IAHS.

Este documento debe citarse como: Renovato Tirado, Y., Wakida, F., García Flores, E., Pastrana Corral, M. (2015). **Evaluación del impacto de la canalización del arroyo alamar en la calidad de agua de su acuífero subyacente.** Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 19-1, pp 13-23, ISSN 1665-529-X.