

## Riesgo de contaminación del acuífero arroyo Alamar en Tijuana, Baja California

Marnie González Estévez\*  
Vicente Sánchez Munguía\*\*

**Resumen:** el acuífero del arroyo Alamar, en Tijuana, Baja California, es uno de los escasos suministros de agua con que cuenta esta ciudad. En el área que recorre el Alamar se realizan actividades que, aunadas a la falta de medidas de control y vigilancia, inciden en la contaminación del lugar. De acuerdo con las fuentes contaminantes examinadas en el presente estudio, aquí se presentan resultados de un ejercicio de evaluación del riesgo de contaminación al que está expuesto el acuífero, mediante la interacción entre la vulnerabilidad intrínseca y la carga contaminante a la que está siendo sometido; dicha carga se encontró en aproximadamente la mitad de su área.

**Palabras clave:** acuífero, agua, riesgo, vulnerabilidad, contaminantes.

**Abstract:** the Alamar creek aquifer is one of the few sources of water available to the city of Tijuana, Baja California. Various

\* Profesor en la Universidad Autónoma de Baja California, campus Tijuana, unidad Valle de las Palmas, CISALUD. Teléfono: (664) 341 0664. Rincón del Roble 2009-5. Rincón de Otay, C. P. 22457. Tijuana, Baja California, México. Correo electrónico: marnieglez@gmail.com

\*\* Profesor-investigador del Departamento de Estudios de Administración Pública de El Colegio de la Frontera Norte (COLEF). Km. 18.5 carretera escénica Tijuana-Ensenada, San Antonio del Mar, Tijuana, Baja California, México, C. P. 22465. Correo electrónico: vsanchez@colef.mx

activities are carried out in the Alamar area which, coupled with the lack of control and surveillance measures, affect levels of pollution. The present study assessed the contamination risk to which this aquifer is exposed, based on interaction between its inherent vulnerability and the pollutant load to which it is subjected. According to the source pollutants examined in the study, the aquifer is being subjected to pollution loads in about half of its area.

*Key words:* aquifer, water, risk, vulnerability, pollutants.

## Introducción

La zona noroeste de México y, en particular, la península de Baja California constituyen uno de los territorios con menor disponibilidad de agua en el país, como consecuencia de una precipitación pluvial limitada. Al mismo tiempo, ciudades como Tijuana, que ha venido creciendo de forma acelerada, tanto en su población como en el espacio sobre el que se asienta, representa uno de los casos en donde el abastecimiento de agua es una preocupación constante (Secretaría de Desarrollo Urbano Municipal, SEDUM, 2002).

Tijuana se surte principalmente de agua proveniente de las fuentes superficiales y, en menor medida, de las subterráneas. El hecho de que las primeras se encuentran más expuestas a la contaminación ha conducido a la dependencia casi absoluta del bombeo de agua del río Colorado,<sup>1</sup> la cual es transportada por el acueducto Río Colorado-Tijuana desde el valle de Mexicali hasta la presa El Carrizo, a un costo de 1 dólar por m<sup>3</sup> (SEDUM 2002; Sánchez 2006). Además, se cuenta con la presa Abelardo L. Rodríguez, que captura agua de

<sup>1</sup> Aunque formalmente el agua para Tijuana fue una asignación de origen subterráneo, localizada en la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado, lo cierto es que el agua de ese sitio se queda en Sonora, y la que se conduce a Tijuana, a través del acueducto es del río Colorado, en una operación de intercambio que hace la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Comisión Estatal del Agua de Baja California (información confirmada por las autoridades de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana, CESPT, de la CONAGUA en Mexicali, y el doctor Alfonso Andrés Cortez Lara, investigador del COLEF en Mexicali, especialista en este tema).

origen pluvial a través de los escurrimientos del río Las Palmas y del arroyo El Florido.

En el área de Tijuana, el agua subterránea se extrae del acuífero denominado San Diego-Tijuana, por la CONAGUA, en dos de sus zonas acuíferas: la que subyace al río La Misión y la correspondiente al subálveo del río Tijuana-arroyo Alamar, esta última zona localizada dentro del perímetro urbano de la ciudad ([www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx)). El presente trabajo se enfoca en una porción del acuífero ubicado en el subsuelo del Alamar.

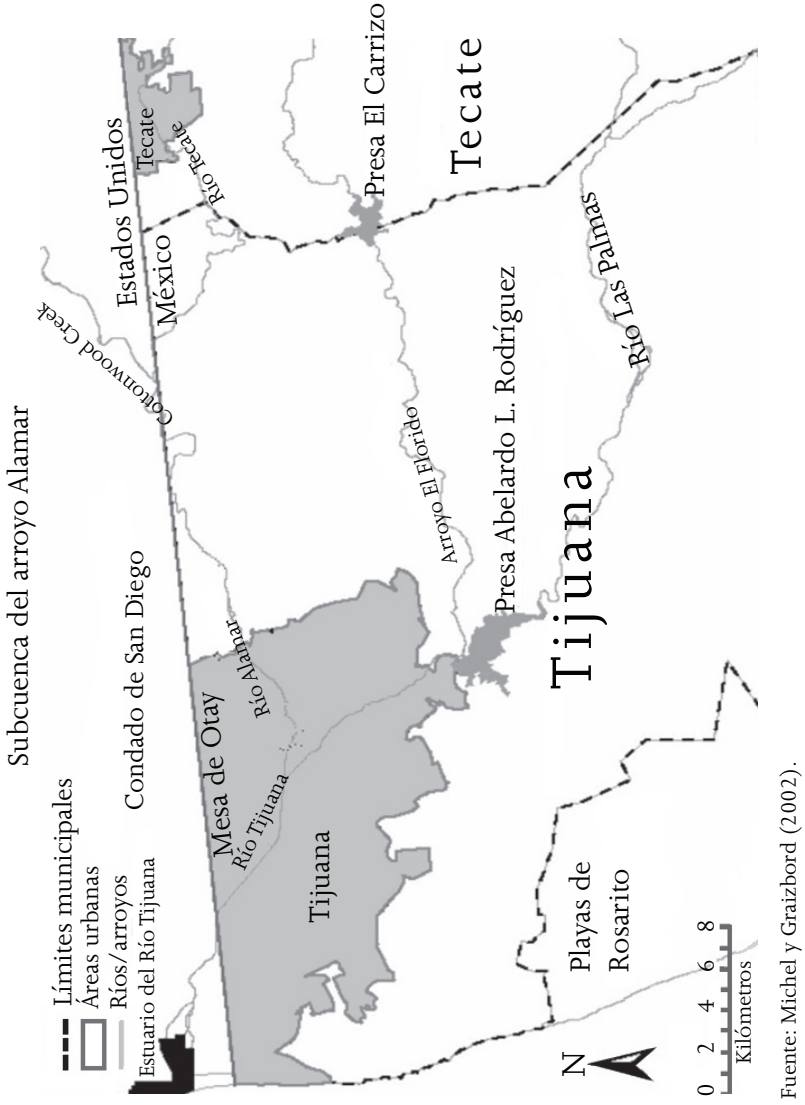
### Área de estudio

El arroyo Alamar forma parte del sistema hidrológico de la cuenca del río Tijuana, compartida por México y Estados Unidos. Este cauce recorre 9.8 km de la ciudad, desde el puente Cañón del Padre hasta el tramo revestido de concreto, de 2.5 km, a la altura de la central camionera (véase figura 1). El Alamar se une al río Tijuana antes de desembocar al océano Pacífico, en Imperial Beach, en el condado de San Diego (Gutiérrez 2006; Michel y Graizbord 2002, 9-31; CONAGUA 1999; Instituto Municipal de Planeación, IMPLAN 2007).

La zona del Alamar no ha podido escapar a la dinámica del crecimiento de la población, que se viene dando desde hace algunas décadas en Tijuana. Hay que agregar la localización de actividades de tipo industrial en las cercanías, ya que uno de los conglomerados más grandes de maquiladoras se asienta en la Ciudad Industrial, al sur de la Mesa de Otay, además existen otros enclaves industriales en las inmediaciones del área de estudio. Igualmente, otro factor importante de impacto hidrológico ambiental es la escasa planeación urbana y la carencia de control administrativo sobre la expansión de la ciudad. Esto ha convertido al arroyo Alamar en un cuerpo receptor de descargas de contaminantes y de deposición de basura (Espinoza et al. 2004).

La CONAGUA cita que hasta 1999 el aporte de agua subterránea del acuífero del arroyo Alamar soportaba el consumo de Tijuana, y representaba 20 por ciento del total. Sin embargo, estudios más recientes indican que esta urbe depende en más de 90 por ciento

Figura 1



del agua importada desde el río Colorado (Wakida et al. 2005, 141-147). Ambos estudios coinciden en no recomendar el uso directo de esta agua para el consumo humano, debido a que su calidad no cumple con los parámetros establecidos (Ibid.; CONAGUA 1999).

El área del acuífero fue tomada del plano base generado por Gutiérrez (2006), con una escala 1:10 000, donde se muestra el contorno y la superficie abarcada. En el plano, el área de estudio se dividió en celdas de 500 x 500 metros, de lo que resultó que la superficie del acuífero quedó distribuida en 89 celdas de 0.25 km<sup>2</sup> cada una. El plano se realizó en la proyección cartográfica UTM considerando el datum horizontal WGS-84, contemplando las coordenadas que van desde la longitud 503000 E a 514000 E y desde la latitud 3596500 N a 3602000 N. Este plano se obtuvo a partir de uno topográfico de la misma escala, elaborado por la Unidad de Sistema de Información Geográfica del IMPLAN. Los parteaguas del arroyo Alamar fueron tomados del atlas de riesgo municipal.

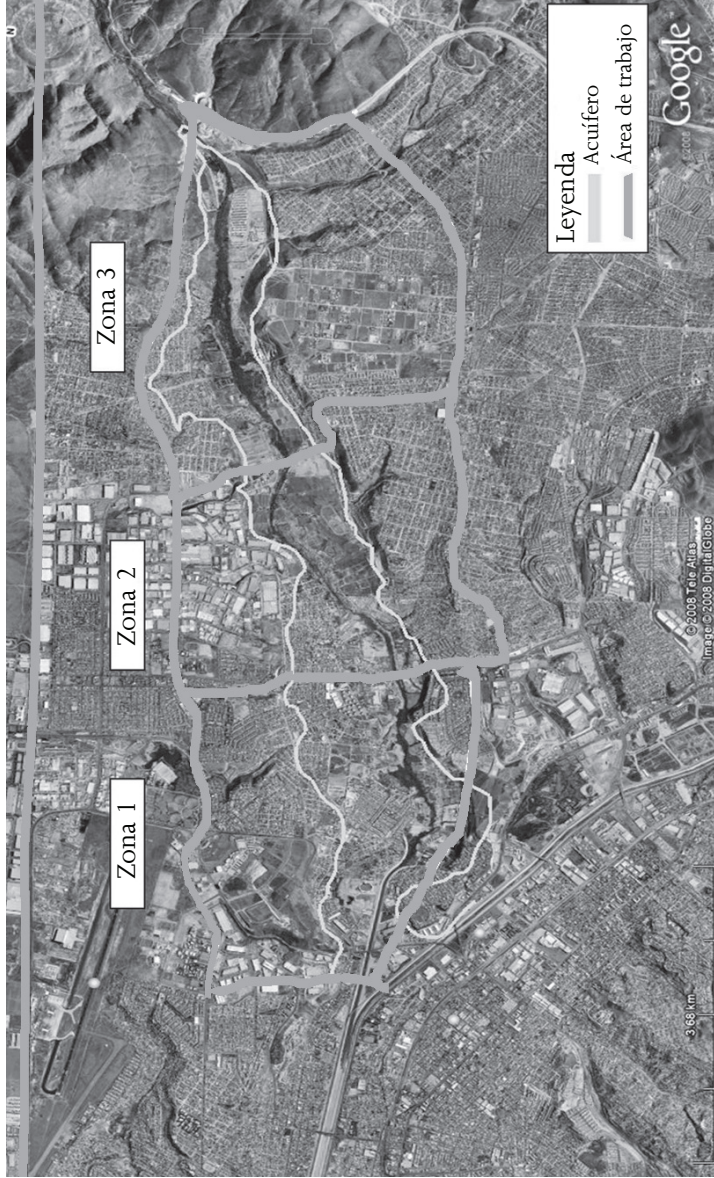
El área considerada para el presente estudio abarca el acuífero y su zona de recarga y los parteaguas del arroyo; en vista de que todas las fuentes potenciales de contaminación ubicadas sobre éstos podrían escurrir al área de recarga del acuífero y contribuir a su contaminación. Es importante mencionar que, para los fines de este trabajo, se conservó la fragmentación física del arroyo Alamar en tres zonas delimitadas en sentido oeste-este, por los bulevares Manuel J. Clouthier y Terán Terán, según lo planteado por Espinoza et al. (2004). Esto por el grado diferente de urbanización a lo largo de él y, por tanto, a las fuentes contaminantes que existen en cada tramo (véase figura 2).

## Metodología

Este trabajo se basa en la evaluación del riesgo de contaminación del acuífero del arroyo Alamar, y se aplicó la metodología POSH (Pollutant Origin and its Surcharge Hydraulically), propuesta por Foster et al. (2002). Se realizó un inventario de fuentes potenciales de contaminación, con el propósito de identificar las cargas contaminantes

Figura 2

Delimitación del área de estudio



Fuente: González (2008).

en el área de estudio, para después clasificar y estimar las asociadas a cada fuente potencial identificada de acuerdo con Foster et al. (2002), y se elaboró un mapa con esta información. Por último, se procedió a plasmar la interacción entre la vulnerabilidad intrínseca y la carga contaminante a la que está siendo sometido el acuífero, lo que dio como resultado el mapa de riesgo a la contaminación de este cuerpo de agua subterránea.

### Inventario de fuentes contaminantes

Esta parte del trabajo quedó dividida en dos fases: una de campo y otra de gabinete. La información se obtuvo mediante recorridos de campo, el uso de imágenes satelitales de Google Earth e información del directorio de fabricantes y de maquilas, de Baja California, de 2007, y el listado de parques industriales de Tijuana, de 2007. Los recorridos de campo se realizaron con equipo de sistema de posicionamiento global y cámara fotográfica. Esto además permitió identificar, documentar y ubicar algunas fuentes generadoras de contaminación, y sirvió para verificar parte de la información obtenida durante el trabajo de oficina. En el área de estudio<sup>2</sup> se identificaron asentamientos humanos irregulares, prácticas agropecuarias (siembra de hortalizas y cría de cerdos y vacas), extracción de materiales pétreos, actividades industriales y urbanas de tipo variado.

### Clasificación y estimación de la carga contaminante (método POSH)

El criterio que se tuvo en cuenta para clasificar las fuentes contaminantes fue su distribución espacial y, según esto, se clasificaron en difusa y puntual. Cada una se caracterizó y estimó de acuerdo con la metodología POSH. Este método permite categorizar las fuentes potenciales de carga de contaminantes según dos características fácilmente estimables, y que dan lugar a su nombre: el origen (*pollutant*

<sup>2</sup> Probablemente se hayan dejado fuera del inventario algunas fuentes contaminantes, debido a la falta de información registrada o a la necesidad de recorridos de campo más exhaustivos.

origen), que se obtiene asociando la posibilidad de presencia de una sustancia contaminante del agua subterránea con el tipo de actividad antrópica, y la sobrecarga hidráulica asociada (*surcharge hydraulically*), que se obtiene sobre la base del uso del agua en la actividad relacionada. También genera tres niveles cualitativos de potencial de generación de una carga contaminante al subsuelo: reducido, moderado y elevado, asociados en este trabajo con los valores 1, 2 y 3 respectivamente (véase figuras 3 y 4).

Estimación de la vulnerabilidad (método DRASTIC)

Los datos de vulnerabilidad intrínseca del acuífero del arroyo Alamar fueron tomados de la estimación realizada por Gutiérrez (2006), mediante una aplicación del método DRASTIC, desarrollado por Aller et al. (1987).

Figura 3

Clasificación y categorización de fuentes de contaminación difusa de acuerdo con el método POSH

Potencial de carga contaminante al subsuelo	Fuente de contaminación	
	Saneamiento in situ	Prácticas agropecuarias
Elevado	Cobertura del servicio de drenaje menor a 25% y densidad poblacional superior a 100 personas/ha	Cultivos comerciales intensivos y la mayoría de los monocultivos en suelos bien drenados en climas húmedos o con baja eficiencia de riego. Pastoreo intensivo sobre praderas muy fertilizadas
Moderado	Intermedio entre elevado y reducido	
Reducido	Cobertura del servicio de drenaje mayor a 75% y densidad poblacional inferior a 50 personas/ha	Rotación de cultivos tradicionales. Pastoreo extensivo. Sistemas de granjas ecológicas. Cultivos bajo riego de alta eficiencia en zonas áridas

Fuente: Foster et al. (2002).



Figura 4  
Clasificación y categorización de fuentes puntuales de contaminación de acuerdo con el método POSH

Potencial de carga contaminante al subsuelo	Fuente de contaminación			
	Disposición de residuos sólidos	Sitios industriales*	Lagunas de efluentes	Urbanas varias
Elevado	Residuos de industrias tipo 3, residuos de origen desconocido	Industrias tipo 3, cualquier actividad que maneje > 100 kg/día de sustancias químicas	Todas las industrias tipo 3, cualquier efluente (excepto aguas residuales residenciales) si el área es > 5 ha	Operación de campos de petróleo, minas de metales
Moderado	Precipitación > 500 mm/año, con residuos residenciales/industriales tipo 1/ agroindustriales. Todos los otros casos	Industrias tipo 2	Agua residual residencial si el área es > 5 ha, otros casos que no figuran en las categorías anterior y posterior	Gasolineras, rutas con tráfico regular de sustancias químicas peligrosas
Reducido	Precipitación < 500 mm/año, con residuos residenciales/industriales tipo 1/ agroindustriales	Industrias tipo 1	Efluente residencial, urbano mezclados, agroindustrial y minero no metálico si el área es < 1 ha	Cementerios o panteones

\* Los terrenos contaminados por industrias abandonadas deberían tener la misma categoría que las propias industrias.

1. Carpinterías, fábricas de alimentos y bebidas, destilerías de alcohol y azúcar, procesamiento de materiales no metálicos.

2. Fábricas de caucho, pulpa y papel, textiles, artículos eléctricos, fertilizantes, detergentes y jabones.

3. Talleres mecánicos, refinerías de gas y petróleo, manufacturas de pesticidas, plásticos, productos farmacéuticos y químicos, curtidurías, fábricas de artículos electrónicos, procesamiento de metal.

Fuente: Foster et al. (2002).

### Evaluación del riesgo de contaminación

En términos prácticos, la evaluación del riesgo involucra la consideración de la interacción entre la carga contaminante y la vulnerabilidad intrínseca del acuífero, mediante la superposición de los resultados del inventario de cargas contaminantes al subsuelo, con el mapa de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos (Foster e Hirata 1991). La matriz que permitió evaluar el riesgo de contaminación al que se halla expuesto el acuífero del arroyo Alamar se elaboró teniendo en cuenta las clasificaciones de carga contaminante planteadas por el método POSH, así como las clasificaciones de vulnerabilidad del método DRASTIC. A las celdas donde no se localizaron fuentes contaminantes se les asignó un valor de potencial de carga contaminante igual a cero, y se interpretó como “no detección de carga contaminante” (véase figura 5).

Figura 5

Matriz para evaluar el riesgo de contaminación del acuífero Alamar

Riesgo de contaminación		Vulnerabilidad a la contaminación			
		Baja (1)	Media (2)	Alta (3)	Muy alta (4)
Carga contaminante al subsuelo (potencial)	No detectada	0	0	0	0
	Reducido (1)	1	2	3	4
	Moderado (2)	2	4	6	8
	Elevado (3)	3	6	9	12

El rango de los valores para el riesgo de contaminación del acuífero es el siguiente:

Extremo: 8, 9,12 (■)

Alto: 4, 6 (■)

Moderado: 2,3 (■)

Bajo: 1 (□)

Muy bajo 0 (□)

Fuente: González (2008).

## Resultados y discusión

### Inventario de fuentes contaminantes

A partir del inventario de fuentes contaminantes elaboradas, se localizaron en 89 sitios distribuidos en toda el área de estudio, cuya ubicación geográfica se observa en las figuras 6 y 7, donde se identifican mediante el código que les fue asignado. La mayoría de las fuentes contaminantes potenciales se ubicaron en las zonas 1 y 2, que ocupan las porciones occidental y central del Alamar respectivamente y, que a su vez, corresponden con las más cercanas al perímetro urbano de Tijuana y, por ende, son las más urbanizadas.

Figura 6

Imagen satelital de la localización geográfica de las fuentes contaminantes potenciales del acuífero Alamar



Leyenda	
	Industrial (i)
	Extracción de pétreos (m)
	Urbanas varias (v)
	Asentamientos irregulares (al)
	Agropecuarias (a)

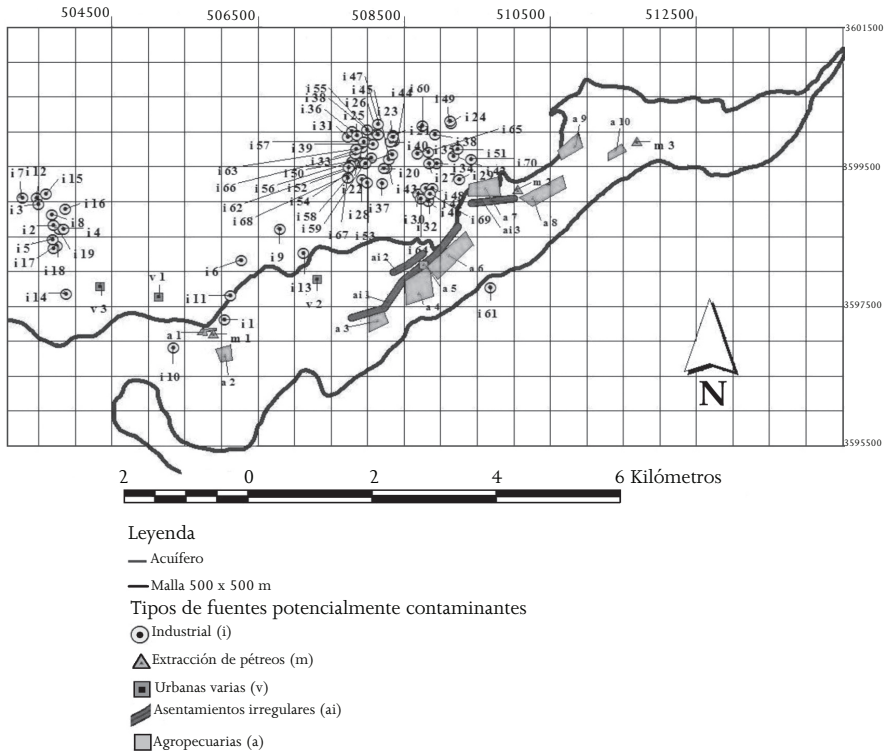
Fuente: González (2008).

Cada una de las fuentes identificadas quedó incluida en uno de los cinco tipos de actividades realizadas en la zona, y el más representativo fue el industrial, el cual constituyó más de la tercera parte en el área de estudio, y representó 78.7 por ciento de las fuentes potencialmente contaminantes. El resto, en conjunto, fue de 21.4; las labores agropecuarias fueron las de mayor peso, con 11.2, mientras que los asentamientos irregulares, la extracción de pétreos y las actividades urbanas variadas representaron de 3 a 4 por ciento cada uno.

La actividad de tipo industrial es predominante en el área, se identificaron 70 sitios, todos dentro de las zonas 1 y 2 del Alamar,

Figura 7

Localización geográfica de las fuentes contaminantes potenciales del acuífero Alamar



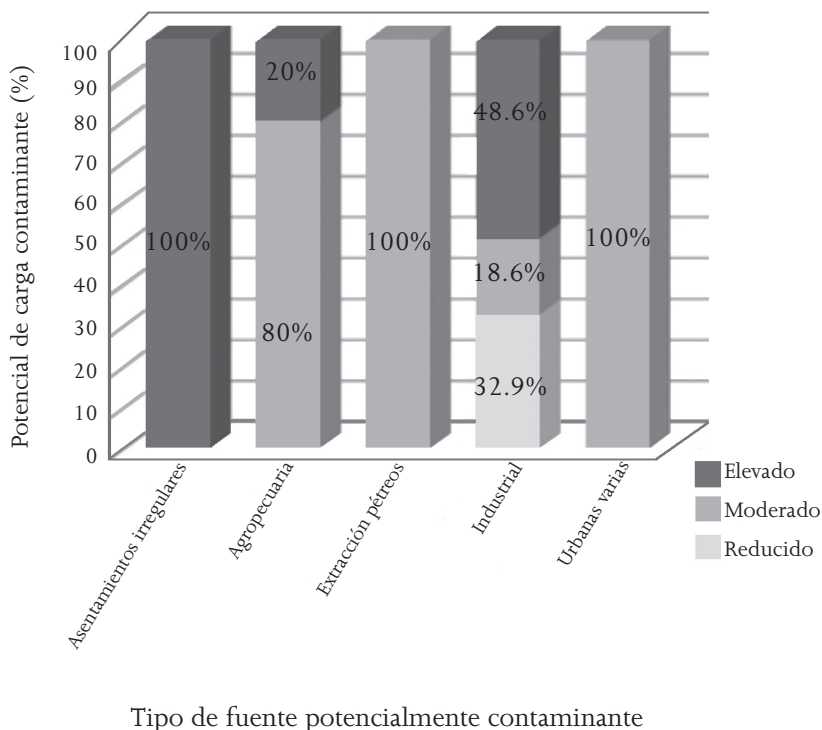
Fuente: González (2008).

y, en coincidencia con lo antes mencionado, corresponden con las más urbanizadas. Dentro de la zona 1, la mayor parte de las industrias estaban dentro del parque industrial FINSA, mientras que en la 2 la mayoría se encontraron en Ciudad Industrial Nueva Tijuana. Ambos grupos de fuentes se pueden distinguir como concentraciones altas de puntos en las figuras 6 y 7.

En la figura 8 se observa el porcentaje que representó cada categoría de potencial de carga contaminante, en los cinco tipos de actividades que se desarrollaban en el área de estudio.

Figura 8

Porcentaje potencial de carga contaminante de acuerdo con el tipo de actividad



Fuente: González (2008).

## Estimación de la carga contaminante del acuífero

Una vez clasificado y estimado el potencial de las cargas contaminantes, se hizo una asociación por cada cuadrícula, de las 89 que conforman el acuífero, de la carga a la que estaba siendo sometido en esa área en específico. A las cuadrículas donde coincidieron varias fuentes contaminantes con potencial de carga diferente (elevada, moderada o reducida), les fue asignado el valor máximo de potencial de carga contaminante que poseían las fuentes ubicadas en ella. En los casos donde dichas fuentes se ubicaron en cuadrículas fuera de las 89 mencionadas, su potencial de carga contaminante se asignó a la celda inmediata inferior, que sí formaba parte del acuífero, por ejemplo las industrias del sur de la Mesa de Otay, que están fuera de éste, pero escurren a él.

A partir de los datos del inventario de fuentes contaminantes y de la asignación de un potencial de carga contaminante a cada actividad, se obtuvo el mapa de carga contaminante del acuífero del arroyo Alamar (véase figura 9).

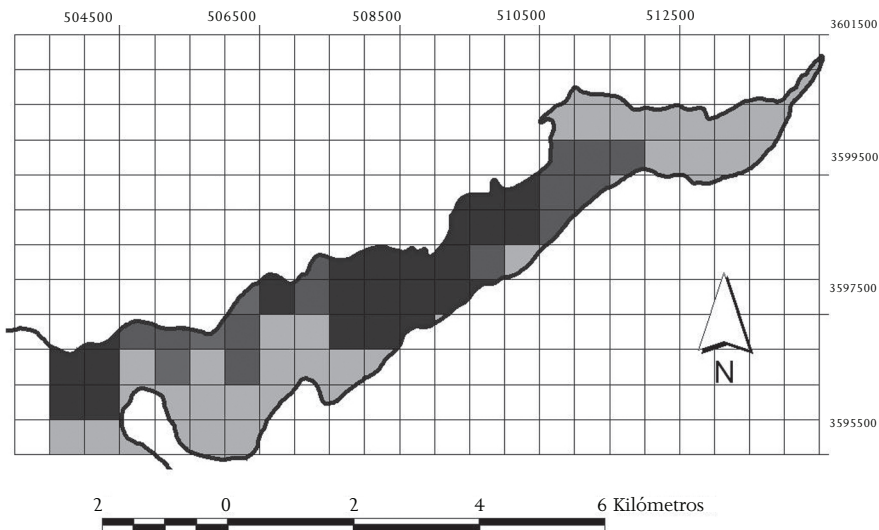
En este mapa se observa la distribución de los potenciales de carga contaminante a lo largo de toda la superficie del acuífero. En él se distinguen con claridad dos áreas donde el potencial es elevado, y coinciden con aquéllas donde hubo gran concentración de las fuentes de origen industrial, correspondientes con los dos parques industriales de la parte sur de la Mesa de Otay (FINSA y Ciudad Industrial Nueva Tijuana). En estas dos zonas también incidieron otros tipos de actividades como las urbanas varias, los asentamientos irregulares, los campos de cultivo y los establos y, en menor medida, la extracción de pétreos.

No se detectó potencial de carga contaminante en dos áreas, correspondientes a los extremos sur-occidental y oriental, en ellas no se localizaron actividades potencialmente contaminantes. En el caso de la porción más oriental coincidió con la parte menos urbanizada del acuífero y más alejada de la ciudad, por lo cual hubo menos actividades que pudieran generar contaminación a este cuerpo de agua.

En la figura 10 se observa el porcentaje de los potenciales de carga contaminante por cada zona del acuífero; mientras que en

Figura 9

## Mapa de carga contaminante del acuífero Alamar



## Leyenda

- Acuífero
- Malla 500 x 500 m
- Carga contaminante (método POSH)
  - No detectada (ND)
  - Reducida
  - Moderada
  - Elevada

Fuente: González (2008).

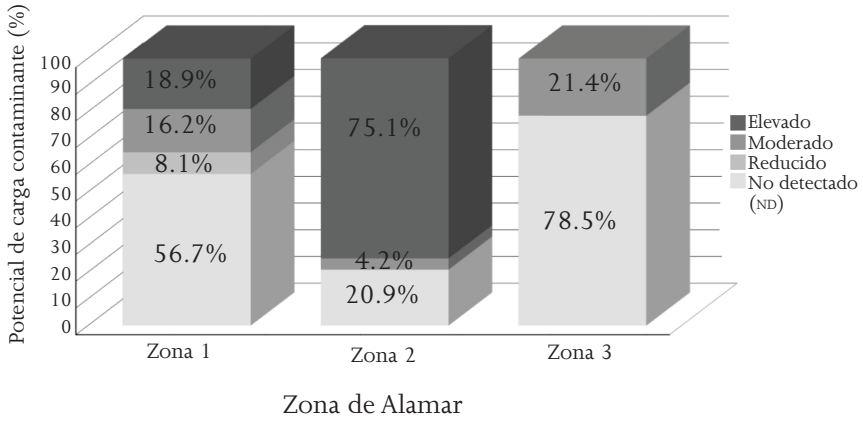
la figura 11 se ven los porcentajes de las cuatro categorías de carga contaminante en toda el área del acuífero.

## Mapa de vulnerabilidad

Los datos de vulnerabilidad intrínseca fueron tomados del trabajo elaborado por Gutiérrez, (2006). De acuerdo con Aller et al. (1987), la vulnerabilidad intrínseca o natural es la que está en función de las condiciones naturales del acuífero, y no considera los atributos ni el comportamiento de contaminantes específicos.

Figura 10

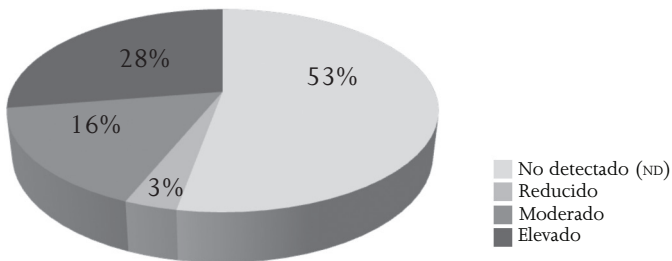
Porcentaje de los potenciales de carga contaminante por cada zona del acuífero



Fuente: González (2008).

Figura 11

Porcentaje de los potenciales de carga contaminante en toda el área del acuífero



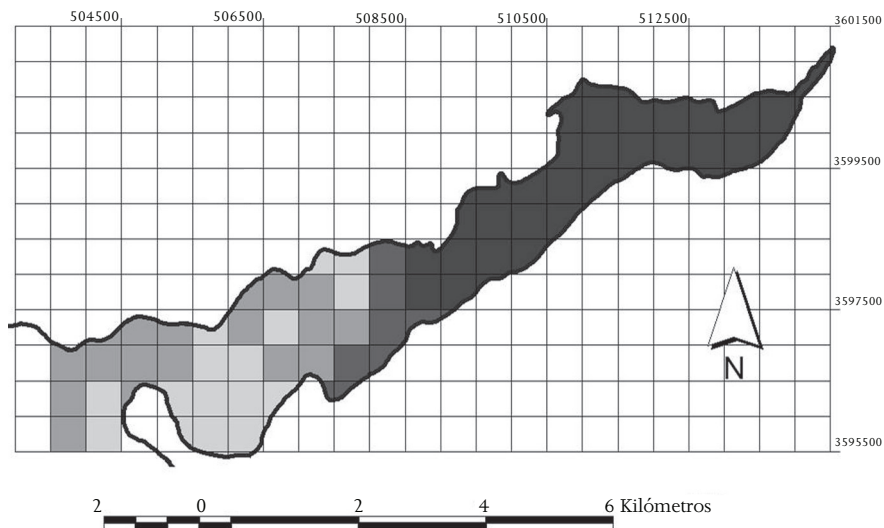
Fuente: González (2008).



En la figura 12 se muestra el mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero, donde se observa que una gran parte de él posee una muy elevada, desde su porción central hasta la oriental; mientras que en la occidental predomina una baja y media.

Figura 12

Mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero del arroyo Alamar



Leyenda

- Acuífero
- Malla 500 x 500 m
- Vulnerabilidad (Método DRASTIC)
  - Baja
  - Media
  - Alta
  - Muy alta

Fuente: Gutiérrez (2006).

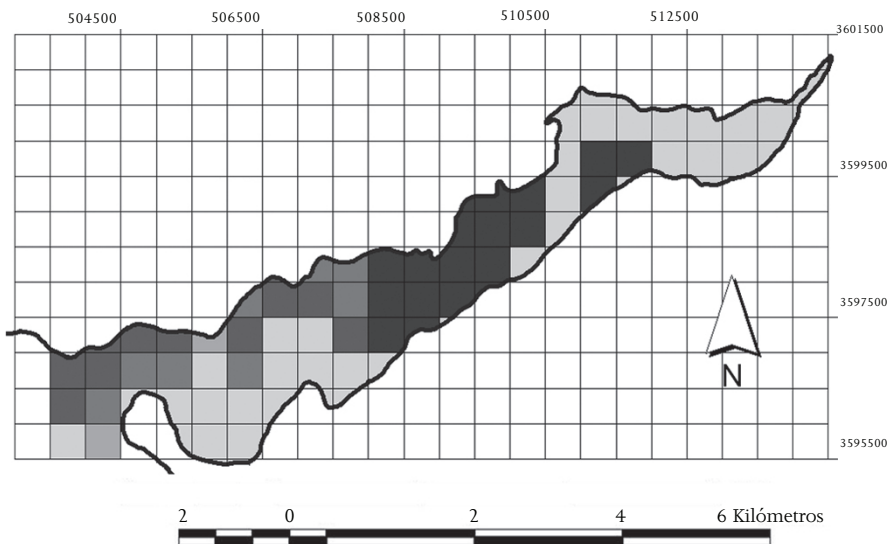
### Evaluación del riesgo de contaminación

Una vez obtenidos los mapas de carga contaminante y de vulnerabilidad intrínseca del acuífero, se superpuso la información contenida

en ambos, y se generó el mapa de riesgo de contaminación del acuífero del arroyo Alamar, válido para el inventario realizado de fuentes potenciales de contaminación (véase figura 13).

Figura 13

Mapa de riesgo de contaminación del acuífero Alamar



- Leyenda
- Acuífero
  - Malla 500 x 500 m
  - Peligro de contaminación (carga contaminante x vulnerabilidad)
    - Muy bajo
    - Bajo
    - Moderado
    - Alto
    - Extremo

Fuente: González (2008).

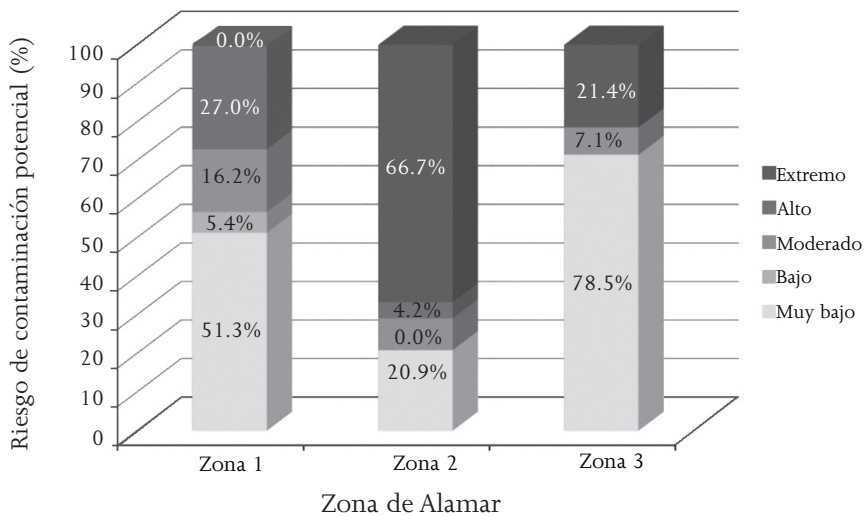
En el mapa se observa cómo queda distribuido el riesgo de contaminación en toda el área del acuífero. Se distinguen dos zonas bien definidas donde hay riesgo, una hacia la porción central y otra

hacia la suroriental, lo cual se explica porque en ellas coincidían potenciales de carga elevado y moderado, con una vulnerabilidad muy alta, lo cual favorecía la contaminación del acuífero. Esto resultó de la combinación de las características de las actividades realizadas, así como de las propiedades físicas del acuífero ahí. También son visibles dos zonas hacia el noroeste, donde el riesgo de contaminación es alto. Por otra parte, se observan otras homogéneas, donde el riesgo de contaminación es muy bajo, correspondientes a las porciones suroccidental y oriental, lo que resulta de no haberse localizado fuentes contaminantes en el lugar (de las inventariadas durante este trabajo), ni detectado potencial de carga contaminante, lo cual conduce a que el riesgo de contaminación en esas áreas sea muy bajo, aunque la vulnerabilidad intrínseca sea muy alta y favorezca la contaminación.

En la figura 14 se muestra cómo se comportó el riesgo de contaminación en cada una de las tres zonas en que queda dividido el Alamar.

Figura 14

Porcentaje del riesgo de contaminación potencial por cada zona del acuífero

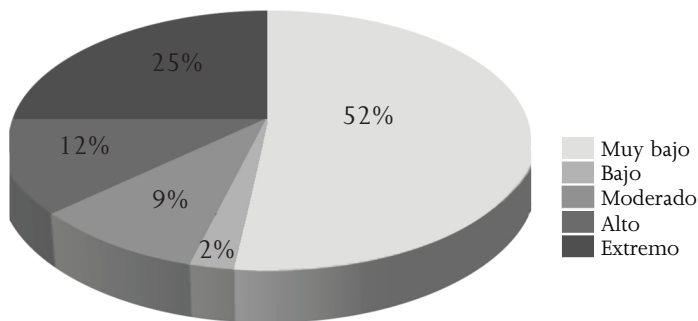


Fuente: González (2008).

La figura 15 ilustra el comportamiento del riesgo de contaminación en toda el área del acuífero; aproximadamente la mitad mostró uno muy bajo (51.7 por ciento), correspondiente con aquéllas donde no se detectó carga contaminante (de acuerdo con las actividades inventariadas durante el estudio). En la otra mitad, 48.3 por ciento, se advirtió riesgo, distribuido en las cuatro categorías restantes (extremo, alto, moderado y bajo). Las zonas con riesgo de contaminación extrema y alta representaron 37.1 por ciento del área del acuífero, es decir, poco más de la tercera parte de su superficie, y es ahí donde se debe centrar la atención y extremar las medidas de prevención y control.

Figura 15

Porcentaje de los potenciales de riesgo de contaminación por cada zona del acuífero



Fuente: González (2008).

## Conclusiones

Cerca de la mitad del área que abarca el acuífero del arroyo Alamar está en riesgo de hallarse contaminada; el mayor porcentaje presenta un riesgo de extremo a alto. Estas áreas coincidieron con las

porciones noroccidental, central y suroriental, donde la interacción entre la vulnerabilidad y la carga contaminante impuesta al acuífero resultó en zonas muy expuestas a la contaminación. La otra mitad presentó un riesgo muy bajo, lo cual correspondió con las áreas en donde no se identificaron fuentes potencialmente contaminantes durante el levantamiento del inventario, localizadas en la porción suroccidental y extremo oriental, cuya característica común es que están menos urbanizadas.

El mayor riesgo de contaminación del acuífero del Alamar se encontró en la zona 2, donde converge una vulnerabilidad muy alta con una carga contaminante elevada. Ahí se identificó un mayor número de fuentes potencialmente contaminantes, por tanto en esa sección del acuífero es donde se debe prestar una mayor atención a las actividades que se realizan. En contraste, la zona 3 tiene menor riesgo de contaminación, no obstante ser la de vulnerabilidad más alta, fue en donde se identificaron menos actividades potencialmente contaminantes y, por tanto, se asoció menor carga contaminante a esta sección del acuífero.

La actividad industrial fue la fuente potencialmente contaminante más significativa, identificada en el inventario levantado dentro del área de estudio, y con los potenciales de contaminación más elevados, que se debieron a que la mayoría de las industrias identificadas pertenecían a sectores muy contaminantes, por el tipo de sustancias que manejan.

El riesgo de contaminación del acuífero del arroyo Alamar fue alto en poco más de la tercera parte del área que abarca. Si se tiene en cuenta la falta de control en el sitio y la contaminación que se viene dando a consecuencia de ello, se puede inferir que los resultados obtenidos no eran los esperados, porque el inventario de fuentes contaminantes realizado tuvo limitaciones y en el futuro será necesario que se actualice con mayor detalle, teniendo en cuenta las zonas de los parteaguas del Alamar y la información acerca de las fuentes contaminantes identificadas en el inventario, tales como el tipo de sustancia contaminante que maneja, así como sus concentraciones y volúmenes, con el propósito de estimar con exactitud la carga contaminante que aportan al acuífero.

Otros factores que pudieron haber influido en la evaluación de las cargas contaminantes, y probablemente en la subvaluación del

riesgo de contaminación del acuífero, pudieron ser las limitaciones inherentes al método empleado como consecuencia de poca disponibilidad de información acerca de las fuentes contaminantes. La metodología POSH no considera las concentraciones, ni los volúmenes de contaminantes emitidos por cada una de las fuentes, lo cual hace difícil conocer el área de influencia real de cada una de estas actividades y hasta dónde contribuyen en realidad a la contaminación del acuífero.

Pese a las limitaciones señaladas, el trabajo permitió tener una aproximación al riesgo de contaminación del acuífero, e indicar áreas específicas, actividades y fuentes potencialmente contaminantes, información básica para sugerir la urgencia de que las autoridades con competencia en el caso asuman un mayor control y vigilancia de las actividades que se desarrollan en el área, para proteger la calidad del valioso recurso que almacena el acuífero del arroyo Alamar.

Recibido en febrero de 2012

Aceptado en marzo de 2012

## Bibliografía

Aller, L., T. Bennet, J. Lehr, R. Petty y G. Hackett. 1987. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. U. S. Environmental Protection Agency Report/600/2-87/036:1-455.

CESPT. 2006. Reporte técnico: arroyo Alamar. Agosto.

CONAGUA. 1999. Estudio de simulación hidrodinámica de los acuíferos de Tijuana y La Misión, Baja California.

Espinoza, Ana Elena, Pietro Magdaleno y Víctor Miguel Ponce. 2004. *Arquitectura fluvial sustentable en el arroyo Alamar, Tijuana, Baja California,*

- México. San Diego, California, Centro de Estudios Sociales y Sustentables, Tijuana, Baja California y San Diego State University. [http://ponce.sdsu.edu/alar\\_m\\_arquitectura\\_sustentable\\_reporte1.html](http://ponce.sdsu.edu/alar_m_arquitectura_sustentable_reporte1.html) (mayo de 2008).
- Foster, Stephen, R. Hirata, D. Gomes, Mónica D'Elia y Marta Paris. 2002. *Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. Washington: Banco Mundial.
- \_\_\_\_\_ y Ricardo Hirata. 1991. *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una metodología basada en datos existentes*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Organización Mundial de la Salud, Programa de Salud Ambiental.
- González Estévez, Marnie. 2008. *Estimación del riesgo de contaminación del acuífero del arroyo Alamar, Tijuana, B. C.* Tesis de maestría en administración integral del ambiente, COLEF-Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada.
- Gutiérrez A., Arizbé. 2006. *Análisis de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del arroyo Alamar y actitud social hacia su protección*. Tesis de maestría en administración integral del ambiente, COLEF-Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada.
- IMPLAN. 2007. *Programa Parcial de Desarrollo Urbano del Arroyo Alamar 2007-2018. Versión abreviada*. Tijuana.
- Michel, Suzanne y Carlos Graizbord. 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.
- Sánchez Munguía, Vicente. 2006. *La gestión del agua en Tijuana, Baja California*. En *La gestión del agua urbana en México: retos, debate y bienestar*, coordinado por David Barkin. Guadalajara: Universidad de Guadalajara.

SEDUM-XIX Ayuntamiento de Tijuana. 2002. Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tijuana 2002-2025. México. <http://www.tijuana.gob.mx/dependencias/sedum/pducpt.asp> (mayo de 2008).

Wakida, Fernando T., Luis E. Ponce Serrano, E. Mondragón Silva, E. García Flores, D. Lerner y Guillermo Rodríguez. 2005. Impact of a Polluted Stream on its Adjacent Aquifer: The Case of the Alamar Zone, Tijuana, Mexico. En *Bringing Groundwater Quality Research to the Watershed Scale*. Proceedings of GQ2004, the 4th International Groundwater Quality Conference, Waterloo, Canadá.