

EVALUACIÓN DEL RIESGO AL ACUÍFERO DE XOCHIMILCO POR LLUVIAS EXTREMAS

• Said Navarrete • Blanca Jiménez* • Inés Navarro • Ramón Domínguez •
Universidad Nacional Autónoma de México

*Autor de correspondencia

Resumen

Este estudio calcula el riesgo de deterioro de la calidad del agua del acuífero de Xochimilco en la ciudad de México. Primero se evaluó la vulnerabilidad del acuífero utilizando el método *Groundwater hydraulic confinement-Overlaying strata-Depth to groundwater table* (GOD), considerando un tiempo de retraso menor a un año. Posteriormente, se analizó la correlación entre los máximos mensuales de precipitación y los indicadores de calidad del agua, conductividad y sólidos disueltos totales (SDT), para el periodo 1980-2007. En seguida, se proyectaron con el uso del modelo de series de tiempo PAR(2) las anomalías en la precipitación mensual generadas por el Sistema de Información de Escenarios de Cambio Climático Regionalizados (SIECCRe), bajo el escenario A2, para los periodos 2011-2030 y 2031-2050, a fin de estimar valores de conductividad y SDT, en función de la precipitación mediante el modelo Gumbel mixta. El análisis de vulnerabilidad muestra que es alta en la región este y baja en la región oeste, que el acuífero responde aproximadamente en cuatro meses, y que muestras con valores elevados de conductividad tienen más probabilidad de encontrar coliformes fecales. Por último, para las proyecciones al 2011-2030 y 2031-2050, se espera que la probabilidad se mantenga constante para el primer periodo, pero se espera un incremento del 28% en la región este y 21% en la región oeste, para el segundo periodo.

Palabras clave: acuífero, calidad del agua, cambio climático, lluvia extrema, series de tiempo, vulnerabilidad.

Introducción

Con frecuencia, el agua subterránea se emplea para suministro municipal por su elevada y constante calidad como producto de su confinamiento. Estas son dos propiedades que, en general, no presentan los cuerpos de agua superficiales (Domenico y Schwartz, 1998), por lo que requieren de mayor tratamiento. Por ello es importante preservar la calidad del agua subterránea. Desafortunadamente, se ha demostrado que los acuíferos son vulnerables a eventos de precipitación extraordinaria (Kabat *et al.*, 2002; Neff *et al.*, 2000). En efecto, las lluvias extremas provocan el arrastre de diversos tipos de contaminantes, como sólidos disueltos, coliformes fecales, algunos organismos patógenos, nutrientes, metales pesados e hidrocar-

buros, entre otros, ya sea a través de pozos mal protegidos o por las fracturas presentes en los estratos que confinan a los acuíferos (Foster *et al.*, 2002). Algunos de estos contaminantes y hasta ciertas concentraciones pueden ser controlados mediante los procesos convencionales de potabilización a un costo razonable. De ahí que sea importante conocer el riesgo de que la calidad del agua subterránea se deteriore, como resultado de la ocurrencia de eventos de precipitación extrema, en especial bajo escenarios de cambio climático, que proyectan un incremento de éstas (Magaña *et al.*, 2002).

Bates *et al.* (2008) mencionaron que existe un vínculo entre las lluvias extremas y el deterioro de la calidad del agua superficial y subterránea. Esto es confirmado por Rozemeijer *et al.* (2009), quienes encontraron en acuíferos de

Holanda, que las concentraciones de nitratos se incrementaron entre 55 y 153% ante la ocurrencia de lluvias extremas atribuidas a la variabilidad climática. Estos son dos ejemplos de estudios; sin embargo, existe una carencia de análisis sobre dicho fenómeno, ya que intervienen una gran cantidad de variables y, en el caso de la ocurrencia de precipitación, el tiempo que el flujo tarda en llegar al acuífero de extracción es también variable.

El tiempo de retraso es el requerido para que el nivel piezométrico en un acuífero alcance el equilibrio después de una perturbación hidráulica; en este caso está dado por el cambio en la tasa de recarga y es un factor que determina el movimiento de contaminantes que va de días hasta miles de año. Sin embargo, en acuíferos constituidos por roca basáltica, como el de Xochimilco, se ha observado que presentan valores altos de conductividad hidráulica y del coeficiente de almacenamiento; esto, aunado al bombeo y la ocurrencia de precipitaciones extraordinarias, que derivan en una mayor escorrentía, inducen a un flujo más rápido, por lo que se espera que este tiempo de retraso (t_r) se reduzca a menos de un año. Otros factores que aceleran el flujo son la presencia de fracturas en la roca y el contenido de arcilla—que en su conjunto condicionan este tiempo de retraso—, la concentración y dirección del flujo de contaminantes hacia los acuíferos (Alley et al., 2010). Por otra parte, Foster et al. (2002) indicaron que además de estos factores, intervienen la distancia entre los pozos de extracción y el sitio de recarga, su profundidad y los patrones de bombeo, ya que contribuyen a alterar el gradiente y la dirección de flujo. En este sentido, Embrey y Runkle (2006), y Nolan y Hitt (2006), a partir de datos de 2 306 pozos en Estados Unidos, encontraron que el contenido de coliformes fecales y nitratos es mayor en pozos perforados en roca fracturada, de poca profundidad (entre 10 y 50 m), localizados a menos de 1 km del sitio de recarga y cercanos a fuentes contaminantes. Estos elementos los presenta el acuífero de Xochimilco, lo cual lo hace más vulnerable.

Existen diversas metodologías para determinar la vulnerabilidad, algunas de las cuales emplean modelos numéricos sofisticados para simular los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en el subsuelo (Shirazi et al., 2012). Entre los métodos más comunes se encuentran el DRASTIC, AVI, GOD, EPIK, RISKE, COP y el SINTACS (Ramos et al., 2010; Kattaa et al., 2010). Vías et al. (2010) emplearon el método COP (*Concentration of flow-ovelaying layers-precipitation regime*) para cuatro acuíferos de Europa; Kattaa et al. (2010) usaron el RISKE (*Aquifer rock, infiltration condition, soil, degree of karstification and epikarst presence or absence*) para un acuífero de Siria. En ambos se encontró que los acuíferos kársticos con suelos no saturados y bajo condiciones de variabilidad de precipitación son más vulnerables que los acuíferos carbonatados en condiciones normales de precipitación. Ramos et al. (2010) utilizaron el método SINTACS (*Static level depth, net recharge, non saturated zone, soil types, aquifer type, hydraulic conductivity of the aquifer and topographic slope*) para la cuenca de la ciudad de México, encontrando alta vulnerabilidad en la zona rocosa expuesta del sureste y valores intermedios de vulnerabilidad en la zona de transición, en tanto que la vulnerabilidad resultó baja al interior de la cuenca. Los valores más altos de vulnerabilidad los halló cerca del cementerio de Tláhuac y en la región de Iztapalapa, donde las posibles fuentes de contaminación son las fugas de los drenajes. Por otra parte, Foster et al. (2002) y Kavehkar et al. (2010), sugieren el empleo del modelo GOD cuando se tienen pocos datos disponibles para determinar la vulnerabilidad, ya que es más sensible a los elementos geológicos. Este método ya fue aplicado en México por Stuart y Milne en 1997, para evaluar el grado de deterioro de la calidad del agua subterránea de León, Guanajuato, debido al riego con agua tratada. El método consiste en representar en forma gráfica las características hidrogeológicas de los estratos del suelo y atribuirles un valor numérico (Foster et al., 2002).

Ahora bien, para establecer la relación entre la precipitación y otras variables, como son los indicadores de calidad del agua más allá de observaciones, se ha probado que los resultados de los análisis a través del método de regresión simple no son válidos estadísticamente; es por ello que para determinar la frecuencia y probabilidad entre ellas, es usual emplear métodos basados en funciones de distribución de probabilidad, que han evolucionado hasta constituir modelos de análisis multivariado (Yue *et al.*, 1999; Escalante, 2007). Por ejemplo, Yue *et al.* (1999), empleó la función de distribución de probabilidad Gumbel mixta para correlacionar el volumen de precipitación con el volumen de escorrentía en un río en Quebec, Canadá, y encontró que este modelo es adecuado para representar las distribuciones de las variables en forma conjunta y estimar sus periodos de retorno. Además, Di Toro (1984) demostró que no sólo los valores de precipitación sino también los de la calidad del agua pueden ser representados con funciones de distribución de probabilidad log-normal y Gumbel. Los mismos autores, así como Escalante y Domínguez (2001), aplicaron este tipo de función en la estimación de la escorrentía superficial, en función de la precipitación, y obtuvieron valores de correlación aceptables ($r^2 > 0.75$), a pesar de que originalmente se comprobó que no existía vínculo desde el punto de vista estadístico por el método de regresión lineal simple y exponencial.

Con estos antecedentes, el estudio de los efectos de las lluvias extremas en condiciones actuales y de cambio climático sobre la calidad del agua para una ciudad como la de México resulta interesante, no sólo por su magnitud (22 millones de habitantes) sino por su complejidad. Para esta urbe, el agua subterránea es fundamental, ya que abastece al 69% de su población; al año se extraen 1 250 Mm³ (39.6 m³/s) del acuífero local; de esta extracción, 7% (4.4 m³/s) proviene del acuífero de Xochimilco (Semarnat, 2009; SACM, 2007).

La DGCOH (2007), a partir de bases de datos históricos, reporta que la precipitación

acumulada anual en Xochimilco para el periodo de 1951 a 1980 pasó de 838 a 681 mm (-17%) para el periodo de 1981 a 2007, y que el 90% de la precipitación ocurrió durante los meses de mayo a octubre; además, para la temporada de estiaje (noviembre a abril), la precipitación media mensual fue de 13 a 11 mm, y para la temporada de lluvia (de mayo a octubre), de 118 a 100 mm, respectivamente, en los periodos mencionados. Por su parte, Jáuregui (2001) encontró que los eventos extremos de precipitación (> 45 mm) para el primer periodo tuvieron una frecuencia de cinco a siete casos por mes, siendo de 20 a 28 eventos en los meses de junio y septiembre. Este mismo autor señala que por el fenómeno de “islas de calor”, provocado por el crecimiento urbano, si bien la precipitación acumulada anual y la mensual ha disminuido, en contraste, los eventos extremos ocurridos en 24 horas se han duplicado en los últimos treinta años. Tal situación podría agravarse a causa del cambio climático (Landa *et al.*, 2008). Sin embargo, dadas estas mismas condiciones tanto de cambio global como de variabilidad climática local, es muy complejo determinar el grado de variación proyectado a futuro (Jáuregui, 2005) y Bates *et al.* (2008) mencionaron que para el escenario A2 de emisiones de gases de efecto invernadero, más allá de estos resultados, hay escasa concordancia entre modelos en cuanto a la variación de la frecuencia de los eventos de precipitación extrema. Esto último se ve reflejado en las proyecciones a futuro realizadas para la precipitación por el Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México (CVCCM), a través de los modelos *MPIECHAMP5* y *HADLEY*, para el escenario mencionado, que es el más probable para México, las cuales indican que la anomalía de precipitación en ambas temporadas, de estiaje y lluvias, es muy fluctuante, presentándose las anomalías mayores en agosto (-25%) y en septiembre (+25%), cuando ocurre cerca del 40% de la precipitación en el año, como se muestra en el cuadro 1 (CVCCM, 2011).

Basado en lo anterior, el objetivo de este estudio es determinar el rango de precipitación

Cuadro 1. Anomalías de precipitación mensual (%) según el CVCCCM.

Proyección	Estiaje		Lluvia	
	MPIECHAMP5	HADLEY	MPIECHAMP5	HADLEY
2030	-39 - +23	-25 - +15	-29 - +14	-13 - +7
2050	-57 - +35	-34 - +73	-40 - +20	-15 - +9

con el cual la calidad del agua se ha deteriorado históricamente en el acuífero de Xochimilco, considerando el tiempo de retraso, que está en función de las características geológicas del mismo, y bajo condiciones de flujo rápido, dadas por los elementos mencionados en los antecedentes. A partir de este cálculo, se estimarán valores de conductividad y SDT, a partir de los cuales es posible que se presente el indicador coliformes fecales. Por último, se generarán proyecciones de conductividad y SDT, en función de las anomalías de precipitación mensuales bajo condiciones de cambio climático para el escenario A2. Se espera que la metodología propuesta sea una herramienta para facilitar la toma de decisiones y la implementación de medidas de adaptación; asimismo, que sea factible de reproducirse en otros sitios.

Metodología

La metodología propuesta sirve para determinar el riesgo de deterioro de la calidad del agua del acuífero de Xochimilco ante la ocurrencia de precipitación extraordinaria, la cual consiste en recopilar datos fisiográficos de mapas a escala 1:20 000, requeridos para aplicar el método GOD, que se empleará para estimar la vulnerabilidad del acuífero y establecer las zonas más susceptibles a ser contaminadas por las características fisiográficas y por actividad humana. En seguida, a partir del perfil geológico del acuífero principal de Xochimilco, los valores de conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento, se calculará el tiempo de retraso (t_c) desde la superficie hasta el acuífero principal bajo condiciones de flujo rápido.

Posteriormente se ajustarán los datos mensuales de precipitación y calidad del agua para el periodo 1980-2007 a la función Gumbel univariada, para estimar los parámetros de cada variable y calcular la probabilidad de ocurrencia en forma marginal. A continuación, se determinará el vínculo entre los indicadores de calidad del agua, y posteriormente, entre éstos y la precipitación. En un primer caso se compararán los valores mayores a 180 mm de precipitación mensual y los valores de conductividad y SDT, para detectar los periodos en los cuales la calidad del agua se deteriora, al observar valores elevados de los indicadores de interés y al considerar diferentes tiempos de retraso observados (t_o), que se espera se encuentren entre uno a 12 meses, ya que se establecieron condiciones de flujo rápido. En un segundo caso, se calcularán tiempos de retraso estimados (t_e), al vincular las variables de interés a través de un análisis de regresión lineal simple. Para continuar con el análisis, se requerirá fijar un tiempo de retraso de análisis (t_a), al comparar los diferentes tiempos de retraso establecidos de forma previa.

A partir de los datos mensuales, para el periodo 1980-2007 se determinarán los escenarios base de precipitación, SDT y conductividad. En seguida, se obtendrán anomalías de precipitación mensual con el empleo de la herramienta SIECCRe (INE, 2011) bajo condiciones de cambio climático para el escenario A2 en los periodos 2011-2030 y 2031-2050, con las cuales se generará el escenario futuro para los periodos mencionados, al acoplarlas al escenario base con el empleo del modelo PAR(2). Finalmente, se vincularán los escenarios base y futuros con el uso de la función

Gumbel mixta, empleando los parámetros estimados anteriormente en forma marginal, esto con la finalidad de estimar valores y calcular la probabilidad de la conductividad y de los SDT, en función de la precipitación.

Área de estudio

La delegación Xochimilco (19° 10' a 19° 20' latitud norte y -99° 00' a -99° 10' longitud oeste) se localiza al sur de la ciudad de México y cuenta con una superficie de 125 km²; se asienta dentro de la principal zona de recarga del acuífero del Valle de México (figura 1). A partir del análisis de la cartografía a escala a 1:20 000 se observa que Xochimilco se caracteriza por ser 70% rural y 30% urbana. La zona rural se encuentra al sur, cuenta con una población cercana a los 100 000 habitantes y una densidad poblacional de 1 100 hab/km². En esta zona hay cerca de 5 000 viviendas en asentamientos irregulares, que no cuentan

con sistema de drenaje y vierten sus aguas residuales directamente al suelo, el cual es del tipo phaeozem, que se caracteriza por su alta permeabilidad, contiene 50% de arcillas, una humedad del 15 al 20%, y tiene un espesor variable de 0.3 a 2.0 m. La principal actividad económica en el área rural es el cultivo de flores y hortalizas, siendo el nopal uno de los productos más importantes. En la parte más al sur se encuentra la sierra del Chichinautzin, donde se forman los ríos San Lucas, Santiago, San Gregorio, San Buenaventura y Ameca, mismos que drenan agua residual y pluvial hacia el norte. Los dos primeros alimentan a la presa San Lucas Xochimilco, mientras que los tres restantes al lago de Xochimilco, el cual se ubica en la zona urbana, al norte de la delegación. La zona urbana se localiza al norte de la delegación, en el lecho de lo que anteriormente fue el lago de Xochimilco, por lo que su relieve es llano, con una ligera pendiente hacia el sur. Su población es cercana

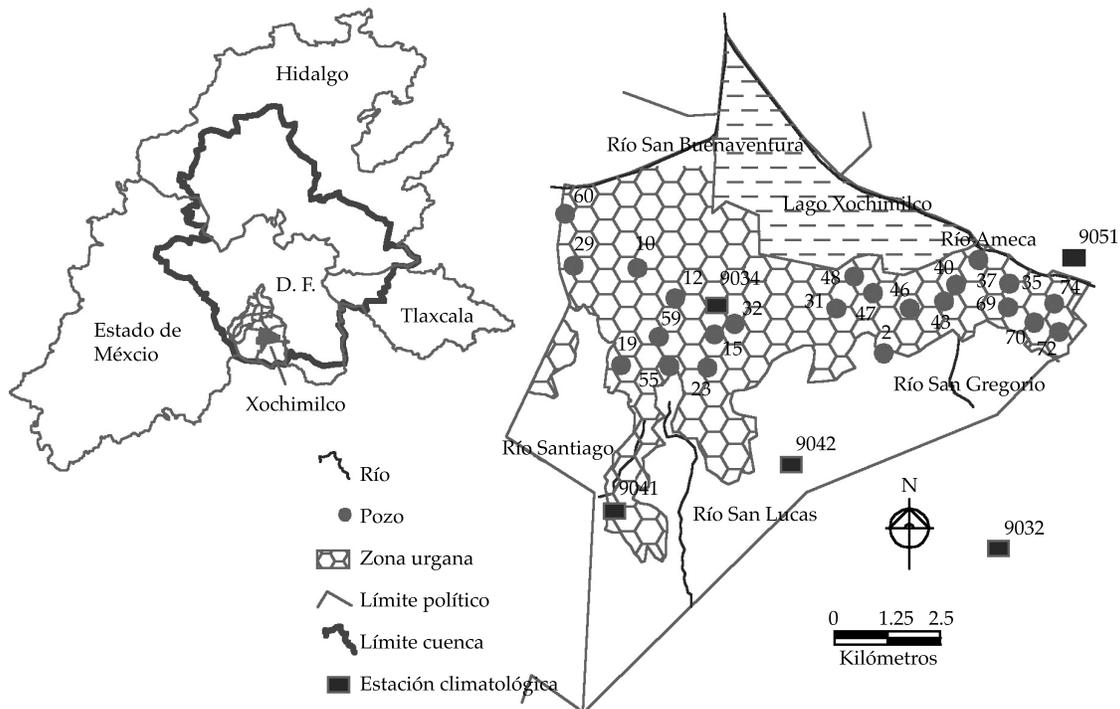


Figura 1. Zona de estudio de la delegación Xochimilco, México.

a los 400 000 habitantes, con una densidad de 10 500 hab/km². Dentro de esta zona se encuentra un área industrial de 2.5 km², y otra de comercios y servicios de 3.5 km². Entre las principales industrias contaminantes destacan 15 empresas de productos químicos, cinco gasolineras y más de cien negocios pequeños de talleres mecánicos, lavanderías y otros. Además, en el área urbana se producen cerca de 100 ton/día de residuos sólidos, que se disponen en tiraderos a cielo abierto. En la zona más al norte se encuentra el lago de Xochimilco, en donde persisten algunos canales precolombinos, que ocupan una superficie de 3.35 km² (DGCOH, 2007).

Xochimilco presenta características fisiográficas y climáticas a nivel superficial y subterráneo, mismas que confieren diferentes grados de vulnerabilidad al acuífero. A nivel subterráneo, se distingue un acuitardo superior, un acuífero principal y un acuífero profundo. El acuitardo superior tiene un espesor promedio de 20 m (2 m en la zona montañosa y hasta 60 m en la llanura central); está formado por depósitos lacustres del Cuaternario. La conductividad hidráulica (k) varía de 0.0864 a 0.000864 m/d, con un coeficiente de almacenamiento (S) constante de 0.012 (Ruvalcaba, 2009).

El acuífero principal se extiende en toda la planicie lacustre de Xochimilco hasta la zona montañosa del sur. Tiene un espesor aproximado de 400 m, a partir de los depósitos lacustres del Cuaternario y su frontera inferior corresponde a la cima de la secuencia estratigráfica del acuífero profundo. Es de tipo confinado por las zonas montañosas y semiconfinado hacia la parte central de la planicie por el acuitardo superior. A pesar de ello, se considera que este acuífero es libre y semiconfinado debido al efecto del bombeo que ha provocado que el nivel piezométrico descienda por debajo de la base del acuitardo superior, por lo que se establecieron condiciones de flujo rápido. Presenta una conductividad hidráulica (k) de 0.0001296 hasta 30.24 m/día. Dada la composición

estratigráfica, la conductividad hidráulica (k) es muy variable, y el coeficiente de almacenamiento (S) es constante e igual a 0.20. Se estima que a este acuífero se infiltran 119 millones de metros cúbicos al año (3.78 m³/s) y se extraen 140 millones de metros cúbicos (4.4 m³/s) por medio de 79 pozos. La mayoría de la recarga se produce en la zona sur, debido a la alta permeabilidad del suelo y del acuitardo superior, lo que según Lesser (2003), por un lado favorece la infiltración, pero por otro facilita la penetración de contaminantes al acuífero principal. Este flujo de recarga se desplaza en forma lateral y descendente a través de basaltos fracturados hacia la zona norte del acuífero principal, esperando tiempos de retraso desde un mes hasta un año (Alley *et al.*, 2010). Subyacente al acuífero principal se encuentra el acuífero profundo, el cual está formado por roca volcánica estratificada fracturada, pero esta capa tiene baja permeabilidad debido a la compresión entre estratos. El espesor promedio es de 200 m. La conductividad hidráulica (k) para el acuífero profundo es de 31.97 m/d y el coeficiente de almacenamiento (S) es de 0.05 (Ruvalcaba, 2009).

Datos empleados

Para este estudio se emplearon datos de precipitación mensual (mm) y de los indicadores de calidad del agua conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y sólidos disueltos totales (mg/L) del periodo de 1980 a 2007. Las bases de datos originales de precipitación fueron obtenidas del sistema CLICOM, proporcionado por la DGCOH (2007), que fueron recopiladas de cinco estaciones climatológicas. De éstas, tres se ubican en la región oeste (Milpa Alta 9032, San Gregorio Atlapulco 9042 y Tláhuac 9051) y dos en la región este (Muyuguarda 9034 y San Francisco Tlalnepantla 9041) (cuadro 2).

En cuanto a los datos de calidad del agua, a partir de los reportados entre 1980-2007 en los 79 pozos de Xochimilco, se observa que en general la calidad es buena, con presencia ocasional de coliformes fecales (SACM, 2007).

Cuadro 2. Estaciones climatológicas usadas como fuente de información para la precipitación (DGCOH, 2007).

Región este									
Clave	Nombre de la estación	Periodo de datos	Periodo (años)	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Promedio (mm)		
							Mensual	Lluvias	Anual
9032	Milpa Alta	1951-2006	77	19° 11' 26"	99° 01' 19"	2 420	68	116	797
9042	San Gregorio Atlapulco	1961-1983	21	19° 13' 00"	99° 05' 00"	2 259	53	91	628
9051	Tláhuac	1961-2006	45	19° 15' 46"	99° 00' 13"	2 240	39	71	483
Región oeste									
Clave	Nombre de la estación	Periodo de datos	Periodo (años)	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Promedio (mm)		
							Mensual	Lluvias	Anual
9034	Muyuguarda	1951-1988	37	19° 15' 00"	99° 06' 00"	2 260	57	104	667
9041	San Francisco Tlalnepantla	1961-2005	44	19° 11' 48"	99° 07' 43"	2 620	76	141	859

La alta dispersión para algunos parámetros posiblemente obedezca a los pocos datos que se colectan, es por ello que se hicieron análisis con distintos parámetros y se consideró que se contaba sólo con datos suficientes para la conductividad y los SDT; para el resto se cuenta con menos de diez datos por mes y menos de veinte años de registro. De esta manera, se seleccionaron 23 pozos (cuadro 3) de 79 existentes en la delegación Xochimilco, por contar con el mayor número de datos para los indicadores de interés. De éstos, 13 pozos se encuentran en la región este y 10 en la oeste. Los primeros fueron perforados cerca de los límites con Tláhuac e Iztapalapa, a profundidades de 200 a 400 m y con niveles piezométricos de 10 a más de 85 m. Los diez pozos de la región oeste se encuentran cerca de la sierra del Chichinautzin, a profundidades de 90 a 250 m, y cuentan con un nivel piezométrico de 40 a 120 m. Estas bases contienen datos de coliformes fecales y totales, conductividad y sólidos disueltos totales, entre otros (SACM, 2007).

Evaluación de la vulnerabilidad

Para evaluar la vulnerabilidad se empleó el método GOD, que identifica la susceptibilidad

de un acuífero a la penetración de los contaminantes, a partir del grado de accesibilidad hidráulica como función de cuatro parámetros hidrogeológicos mostrados en el cuadro 4. El procedimiento consistió en identificarlos en un mapa a escala 1:20 000 y obtener su peso en una escala que va de despreciable a extrema. El índice de vulnerabilidad es el producto de los pesos obtenidos para cada parámetro y se clasificó de acuerdo con el cuadro 5 (Foster *et al.*, 2002).

A continuación se calculó el tiempo de retraso (t_c), el cual es una función de parámetros que dependen del perfil geológico que se muestran en la ecuación (1), desarrollada por Alley *et al.* (2010):

$$t_c = SL^2 / k \quad (1)$$

donde t_c es el tiempo de retraso calculado (d); S , el coeficiente de almacenamiento (1/m); L , el espesor del estrato (m), y k es la conductividad hidráulica (m/d).

El coeficiente almacenamiento (S) en el acuífero de Xochimilco es un valor constante de 0.2 (1/m), la conductividad hidráulica (k) depende del tipo de unidad hidrogeológica, como se muestra en el cuadro 6, y el espesor del estrato (L) se muestra en la figura 2.

Cuadro 3. Pozos de Xochimilco usados para obtener datos de calidad del agua para el periodo de 1980-2007 (SACM, 2007).

Región este											
Clave	Nombre del pozo	Conductividad (μS/cm)				SDT (mg/L)				CT	CF
		Promedio	DS	Máx	Mín	Promedio	DS	Máx	Mín	# muestras	
2	El Mirador 2	453	215	1 151	147	320	145	808	156	9	2
31	San Gregorio Atlapulco 1	443	183	807	88	332	129	780	112	18	12
35	San Luis 1	228	122	753	100	184	94	548	76	10	1
37	San Luis 4	299	96	550	110	202	80	371	74	4	0
40	San Luis 7	336	77	655	140	243	47	428	148	16	1
43	San Luis 10	254	149	686	110	199	101	552	104	4	0
46	San Luis 13	380	216	840	115	245	122	620	116	0	0
47	San Luis 14	355	184	783	140	269	124	536	112	1	0
48	San Luis 15	767	172	1 097	240	567	114	772	196	19	2
69	S – 12	371	200	1 500	120	235	73	418	116	2	1
70	S – 13	375	118	1 100	150	260	98	780	124	9	1
72	Tulyehualco 6	282	80	640	105	226	69	440	126	34	1
74	Tulyehualco 8	373	115	661	150	279	61	456	146	7	5

Región oeste											
Clave	Nombre del pozo	Conductividad (μS/cm)				SDT (mg/L)				CT	CF
		Promedio	DS	Máx	Mín	Promedio	DS	Máx	Mín	# muestras	
10	Noria 2	377	61	680	120	272	50	592	120	16	0
12	Noria 3	724	147	995	302	530	121	976	232	16	0
15	Noria 7	355	187	1 377	134	308	156	992	156	15	0
19	Reclusorio Sur 2	219	61	630	114	182	56	477	68	1	1
23	S-3	175	82	656	115	175	98	688	116	36	2
29	S-9	331	47	646	159	253	47	464	156	8	2
32	San Gregorio Atlapulco 2	182	114	888	120	154	58	408	84	7	2
55	San Lucas Xochimaca	224	67	666	130	181	49	456	112	1	1
59	Santiago Tepalcatlapan	342	145	900	70	261	126	784	108	1	1
60	Tepepan 1	284	60	630	217	227	38	316	120	0	0

Análisis de los datos de precipitación y de calidad de agua

En primer lugar, se caracterizaron estadísticamente los datos, al calcular la media y los valores máximos, y determinar la frecuencia de eventos extraordinarios para el caso de la precipitación; en segundo lugar, se ajustaron los datos mensuales de precipitación, con-

ductividad y SDT a la función Gumbel univariada, en donde se estimaron los parámetros de ubicación y de escala por el método de máxima verosimilitud (ecuación (2)):

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left[\frac{x-v}{\alpha}\right]} e^{-e^{-\left[\frac{x-v}{\alpha}\right]}} \quad (2)$$

Cuadro 4. Valores categóricos de los parámetros hidrogeológicos para aplicar el método GOD (Foster et al., 2002).

Parámetros	Descripción del parámetro y peso en el índice de vulnerabilidad			
	Ninguno o surgente	Confinado	Semi-confinado	Libre
Grado de confinamiento hidráulico	0.0	0.2	0.4	0.6 - 1.0
Tipo del sustrato suprayacente	Arcillas lacustres y suelo residual	Limos aluviales, arcillas	Arenas eólicas, tobas, ígnea/metamórfica	Gravas, calizas, lava reciente
	0.4	0.5	0.6 - 0.7	0.8 - 0.9
Nivel piezométrico	> 50 m	20 - 50 m	5 - 20 m	< 5 m
	0.6	0.7	0.8	0.9
Tipo de suelo en el sitio de recarga	Arcilla no expansiva	Franco arcilloso	Franco limoso-arenoso	Arena gruesa y grava, o suelo delgado
	0.5	0.6	0.8 - 0.9	1.0

Cuadro 5. Definición de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero (Foster et al., 2002).

Clase de vulnerabilidad	Índice	Definición
Extrema	0.7 - 1.0	Vulnerable a la mayoría de los contaminantes, con rápido impacto en diversos escenarios
Alta	0.5 - 0.7	Vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son rápidamente absorbidos o transformados) en muchos escenarios
Moderada	0.3 - 0.5	Vulnerable a algunos contaminantes sólo por fuentes continuas (puntuales y dispersas) y por lixiviados
Baja	0.1 - 0.3	Vulnerable sólo a contaminantes que se preservan cuando son descargados en forma continua y amplia durante periodos largos
Despreciable	0.0 - 0.1	Presencia de barreras naturales o artificiales que impiden el ingreso de la carga contaminante al cuerpo superficial o al acuífero

Cuadro 6. Valores de conductividad hidráulica por unidad hidrogeológica del acuífero de Xochimilco (Ruvalcaba, 2009).

Unidad hidrogeológica	Conductividad hidráulica (m/d)	
	Mínimo	Máximo
Depósitos lacustres del Cuaternario (<i>Qla</i>)	0.000864	0.0864
Depósitos aluviales del Cuaternario (<i>Qal</i>)	0.3542	30.24
Rocas volcánicas del Cuaternario (<i>Qb</i>)	1.4688	2 505.6
Rocas volcánicas basálticas-andesíticas del Plioceno Superior (<i>TPba</i>)	1.1232	596.16
Secuencia volcánica piroclástica y clástica del Plioceno (<i>TPpc</i>)	0.1036	31.10

donde $\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi}$ es un parámetro de ubicación y $v = x - 0.45$, S es un parámetro de escala.

En seguida se estableció la relación entre variables para los datos mensuales del periodo 1980-2007; para ello se vincularon, en primer lugar, la conductividad, los SDT y coliformes fecales, a través de un análisis de regresión li-

neal simple, y en segundo lugar, la precipitación y los indicadores de calidad del agua de interés. Para esto último se identificaron valores de precipitación extrema (> 180 mm) y valores máximos de conductividad y de SDT, y se estableció el tiempo de retraso observado (t_0). Posteriormente se relacionaron las bases

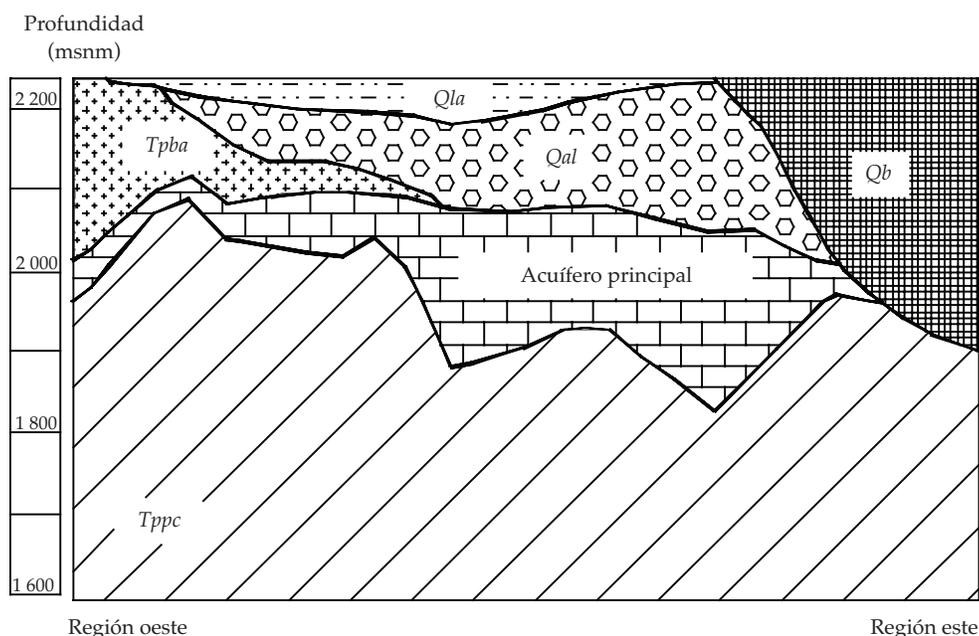


Figura 2. Perfil litográfico del acuífero de Xochimilco con unidades hidrogeológicas (Ruvalcaba, 2009).

de datos mensuales de precipitación y de los indicadores de calidad del agua a través de un análisis de regresión lineal simple con tiempos de retraso estimados (t_e) desde 1 hasta 12 meses; se consideró el tiempo que proporcionara el coeficiente r más elevado.

Se comparó el tiempo de retraso estimado (t_e), el tiempo de retraso calculado (t_c) y el tiempo de retraso observado (t_o), con el tiempo de respuesta teórico (t_l), para determinar el tiempo de retraso de análisis (t_a), con el cual se realizará el cálculo posterior, que vinculará la precipitación con la conductividad y los SDT, a través de la función Gumbel mixta. Cabe señalar que se esperó que el tiempo de retraso se encontrara entre 1 y 12 meses, dadas las condiciones de flujo rápido.

A continuación se obtuvieron los escenarios base de las variables de análisis, a partir de los datos originales del periodo 1980-2007; para generar las proyecciones a futuro, se empleó el modelo SIECCRe en el cuadrante 50 x 50 km² (18.9 a 19.4° latitud norte y -98.8 a -99.3° longitud oeste), dentro del cual se encuentra Xochimilco; este modelo generó anomalías expresadas en porcentaje de precipitación

mensual para los periodos 2011-2030 y 2031-2050 para el escenario A2. Posteriormente se empleó el modelo autorregresivo periódico PAR (2) de series de tiempo, a fin de acoplar las anomalías de la precipitación mensual al escenario base correspondiente (ecuación (3)):

$$PAR(p): z_{v,t} = \varphi_1 z_{v,t-1} + \dots + \varphi_n z_{v,t-p} + \varepsilon_t \quad (3)$$

donde φ_1 es un coeficiente de autocorrelación; z_v un valor estandarizado y normalizado, y ε_t es la componente aleatoria o residual del modelo. Esta componente es una función de la variancia de los residuales $\hat{\sigma}_\varepsilon$ y de números aleatorios normales estándar $\hat{\xi}_v$ que presenta variaciones en función de una serie trigonométrica sinusoidal (Salas et al., 1980).

En seguida, se vincularon las variables precipitación-conductividad, precipitación-SDT y conductividad-SDT, con un intervalo de confianza del 95% del escenario base y futuros a través de la función Gumbel mixta (Yue et al., 1999). Para ello se usaron los parámetros $\alpha_1, \alpha_2, \nu_1, \nu_2$, estimados del modelo Gumbel univariado, y se agregó un parámetro de asociación bivariada m . Para estimarlos en

forma mixta, se aplicó el proceso iterativo Newton-Raphson y se propuso usar de inicio $m = 1$ (Escalante y Reyes, 2002).

Una vez estimados los parámetros para las relaciones anteriores, se obtuvieron funciones para calcular las probabilidades conjunta $F(y,x)$, condicional $F(y|x)$ y marginal $F(x)$, a través de las ecuaciones (4), (5) y (6), que vincularon cada variable. Posteriormente, se calcularon coeficientes de correlación lineal r^2 entre las funciones señaladas y se eligieron las que proporcionaron el mayor valor. A partir de esas funciones, se calcularon expresiones lineales o exponenciales para relacionar cada función, es decir, precipitación-conductividad, precipitación-SDT o conductividad-SDT:

$$F(y,x) = \exp \left\{ - \left[e^{-m \left(\frac{x-v_1}{\alpha_1} \right)} + e^{-m \left(\frac{y-v_2}{\alpha_2} \right)} \right]^{1/m} \right\} \quad (4)$$

$$F_{(y|x)} = \exp \left\{ - \left[-e^{-m \left(\frac{x-\hat{v}_1}{\hat{\alpha}_1} \right)} + (m-1) \left(\frac{x-\hat{v}_1}{\hat{\alpha}_1} \right) \right] + \left[e^{-m \left(\frac{x-\hat{v}_1}{\hat{\alpha}_1} \right)} + e^{-m \left(\frac{y-\hat{v}_2}{\hat{\alpha}_2} \right)} \right]^{1/m} \right\} \left[e^{-m \left(\frac{x-\hat{v}_1}{\hat{\alpha}_1} \right)} + e^{-m \left(\frac{y-\hat{v}_2}{\hat{\alpha}_2} \right)} \right]^{1/m-1} \quad (5)$$

$$F(x) = \frac{F(y,x)}{F_{(y|x)}} \quad (6)$$

Por último, se estimaron valores de conductividad y de SDT, en función de distintos valores de precipitación, por medio de la relación elegida, y se obtuvo tanto la probabilidad y como el periodo de retorno correspondientes, a través de la forma derivada de la función Gumbel mixta (ecuación (7)):

$$x = v_1 - \frac{\alpha_1}{m} \ln \left\{ \left[-\ln y \right]^m + e^{-m \frac{hp-v_2}{\alpha_2}} \right\} \quad (7)$$

donde x e y son las funciones condicionales, conjuntas o marginales, según sea el caso de la relación elegida, y hp es la precipitación acumulada mensual (mm).

Resultados

Vulnerabilidad del acuífero

Se halló diferencia en el grado de vulnerabilidad del acuífero entre las regiones este y oeste de Xochimilco. La región este presentó un grado de vulnerabilidad alto (0.50), dado que se trata de un acuífero libre (0.8), donde el bombeo produce un efecto que induce infiltración desde el acuitardo superior; las capas confinantes (gravas, arenas gruesas intercaladas con arcillas y coladas de basalto) no se encuentran consolidadas (0.9); el nivel piezométrico es mayor a 20 m (0.7), y el tipo de suelo en el sitio de recarga es muy delgado (1.0). En contraste, la región oeste presentó un nivel de vulnerabilidad bajo (0.20), ya que el acuífero es semiconfinado (0.4), con estratos de roca porosa consolidada (basaltos, tobas y cenizas volcánicas) (0.7), y el nivel piezométrico promedio de los pozos es mayor a los 20 m (0.7), aunque existen fracturas en la roca que dan lugar a flujos preferenciales (1.0).

El tiempo de retraso calculado (t_c) a través de la ecuación (1) revela la diferencia de la vulnerabilidad del acuífero entre las zonas este y oeste. Al considerar los estratos de suelo de cada sitio, se observa que estos tiempos son muy variables, dependiendo de los estratos en cada región (cuadro 7).

Análisis de los datos de precipitación y de calidad del agua

El análisis de los datos diarios de precipitación del periodo 1980-2007 indica que ésta fluctuó entre 7 y 10 mm en promedio, con 14 a 16 días de lluvia por mes. Sin embargo, no se observa un incremento significativo en los valores promedio de conductividad y de SDT cuando ocurren valores extremos de 45 mm

Cuadro 7. Tiempo de retraso calculado, t_r desde el nivel superficial hasta el acuífero principal en Xochimilco.

Zona	Estrato	Espesor promedio del estrato* L (m)	Conductividad hidráulica k (m/d)		Tiempo de respuesta T (d)	
			Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Este	Qb	200	2 505.6	1.4688	3	5 447
Oeste	Qal	150	30.24	0.3542	149	12 705
		80			42	3 707
	Qla	20	0.0864	0.000864	926	92 593
	Tpba	20	596.16	1.1232	0.16	71
170		10			5 146	

de lluvia acumulada en un día (para $t = 1.645$ con $\alpha = 0.05$, $t_0 = -0.0001$ para conductividad y -0.002 para SDT en la región este, y de 0.004 y 0.003 , respectivamente, para la región oeste para $p_{\text{value}} > 0.253$). Lo que sí se observa es que la precipitación acumulada mensual para valores a partir del noveno decil (> 180 mm) son más probables cuando ocurrieron cuatro días consecutivos de eventos de precipitación extrema. Esta probabilidad varía entre 7 y 16% para la zona este (con periodos de retorno de 7 a 15 meses), y de 3 a 7% en la oeste (con periodos de retorno de 14 a 36 meses) (cuadro 8). El promedio de la precipitación acumulada mensual para la delegación fue de 105 mm, siendo de 114 mm para la zona este y de 97 mm para la zona oeste.

El análisis histórico para el periodo 1980-2007 entre la región este y oeste realizado para los datos de conductividad, sólidos disueltos y coliformes fecales de los pozos seleccionados, señala que el agua extraída del subsuelo de la región este tiene una conductividad promedio de $568 \pm 209 \mu\text{S}/\text{cm}$, SDT de $425 \pm 173 \text{ mg}/\text{L}$

y un nivel de detección de coliformes fecales en 26 (10%) de 257 muestras. En cambio, en la región oeste, la conductividad promedio fue de $533 \pm 211 \mu\text{S}/\text{cm}$, SDT de $399 \pm 146 \text{ mg}/\text{L}$ y sólo hubo presencia de coliformes fecales en 9 (3.7%) de 244 muestras. Siendo los valores máximos de $1\ 600 \mu\text{S}/\text{cm}$ en conductividad y de $1\ 700 \text{ mg}/\text{L}$ en SDT en la región este; en cambio, para la región oeste, los valores máximos fueron de $1\ 150 \mu\text{S}/\text{cm}$ y $902 \text{ mg}/\text{L}$, respectivamente. Cabe destacar que la normatividad señala límites para estos indicadores de calidad del agua: $1\ 000 \text{ mg}/\text{L}$ para la conductividad, no detectado para los coliformes fecales de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994, y $1\ 500 \mu\text{S}/\text{cm}$ para los SDT de acuerdo con la EPA (1988).

Se estimaron los parámetros de la función Gumbel univariada para los datos mensuales de precipitación, conductividad y SDT (cuadro 9). Lo valores de los parámetros obtenidos se emplearon en cálculos posteriores para la función Gumbel mixta.

Se encontró que existe una relación muy estrecha entre la conductividad y los SDT, ya

Cuadro 8. Probabilidad y periodo de retorno para la precipitación acumulada mensual durante la temporada de lluvias por regiones de Xochimilco para el periodo 1980-2007.

Precipitación (mm)	Región este		Región oeste	
	Probabilidad	Periodo de retorno (meses)	Probabilidad	Periodo de retorno (meses)
180	16%	7	7%	14
200	10%	10	5%	22
220	7%	15	3%	36

Cuadro 9. Parámetros estimados por máxima verosimilitud de la función Gumbel univariada para las variables de interés.

Parámetros Gumbel marginal	Precipitación acumulada mensual (mm)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	SDT (mg/L)
Región este			
ν	82.0	476.0	348.0
α	46.1	163.4	139.0
Región oeste			
ν	69.6	439.1	342.7
α	39.4	167.1	88.1

que se hallaron coeficientes de correlación superiores a $r^2 = 0.8$ en ambas regiones. En cuanto al contenido de coliformes fecales y los valores de conductividad, en la región este se halló que la probabilidad de que alguna de estas muestras resulte positiva es menor al 3% para valores de conductividad menor a 400 $\mu\text{S}/\text{m}$; del 18% para valores entre 400 y 700 $\mu\text{S}/\text{m}$, y hasta el 19% para valores mayores que 700 $\mu\text{S}/\text{m}$ (figura 3 y cuadro 10).

En el caso de la región oeste, no se encontraron coliformes fecales para valores de conductividad menor a 400 $\mu\text{S}/\text{m}$, en comparación con el 7% para valores entre 400 y 700 $\mu\text{S}/\text{m}$, y el 14% para valores mayores a 700 $\mu\text{S}/\text{m}$ (figura 4 y cuadro 10).

Se identificaron valores de precipitación mensual superiores a 180 mm y se compararon con los valores de conductividad y de SDT. Para un tiempo de retraso (t_0) de cuatro meses, se apreciaron incrementos hasta por arriba del 60% de los indicadores de calidad del agua en

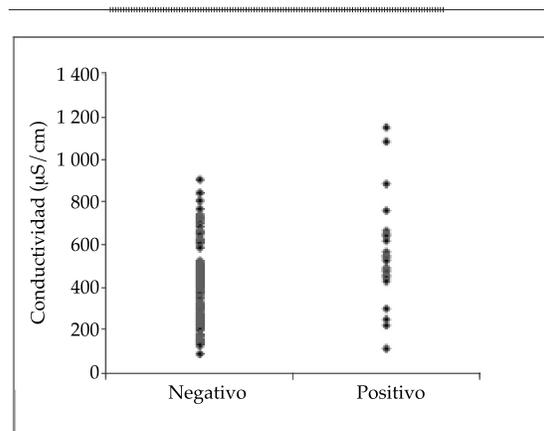


Figura 3. Total de muestras que resultan positivas en coliformes fecales en relación con la conductividad para la región este.

relación con los promedios históricos (cuadro 11). Asimismo, no se encontraron valores de precipitación mayores a 180 mm en las temporadas de estiaje.

Al relacionar las bases de datos mensuales de precipitación y de los indicadores de cali-

Cuadro 10. Probabilidad de encontrar muestras positivas de coliformes fecales por rango de conductividad.

Rango de conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}$	Región este	Región oeste
100 - 200	4%	0%
200 - 300	8%	0%
300 - 400	4%	0%
400 - 500	27%	22%
500 - 600	23%	11%
600 - 700	19%	33%
700 - 800	4%	11%
> 800	12%	22%

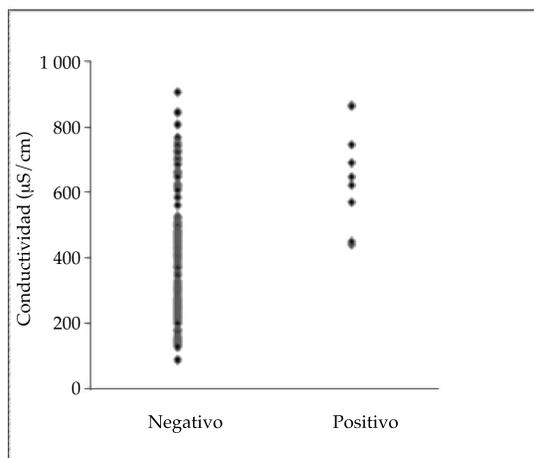


Figura 4. Total de muestras que resultan positivas en coliformes fecales en relación con la conductividad para la región oeste.

Se compararon los tiempos de retraso teórico, calculado, observado y estimado. Como antecedente, el tiempo de respuesta teórico indica de 1 a 12 meses, el calculado varía de un mes a más de un año, pero bajo condiciones de flujo rápido, se espera sea menor a un año; ahora bien, los tiempos de retraso observado y estimado para ambas regiones fluctúan en los cuatro meses para la región este, y en cuatro meses y hasta nueve meses en la región oeste. De esta manera, para el análisis posterior, se toma el tiempo de respuesta igual a cuatro meses.

Las anomalías de precipitación mensual generadas a través del modelo *SIECCRe* se obtuvieron para la totalidad del territorio de Xochimilco, ya que la resolución del modelo no distingue entre regiones este y oeste. Para el periodo 2011-2030 durante la temporada de lluvias indican un aumento del 1.4%; sin embargo, para los meses de mayo y junio se observan incrementos entre +16% y +30%, y otra ligera subida en octubre de +5%; en contraste, el resto de los meses lluviosos se observa un decremento de -9% hasta -18%. Para la temporada de estiaje, en todos los meses se detectan cambios en promedio de +2.4%. En el periodo 2031-2050, para ambas temporadas se espera una baja en la precipitación mensual de -0.5% en promedio, y de igual manera, en los meses de mayo y junio se observan incrementos

dad del agua de interés, el tiempo de retraso estimado (t_e) que presentó el máximo coeficiente de correlación r se observó para cuatro meses en ambas regiones; aunque en la región oeste se observa que con un tiempo de respuesta de nueve meses también existe un coeficiente de regresión alto; además, se obtuvo el mayor promedio para el caso de la conductividad en la región este, sin cambios apreciables en la región oeste (cuadro 12).

Cuadro 11. Promedios de precipitación y de los indicadores de calidad del agua para tiempos de retraso estimado t_e de uno a doce meses, con los coeficientes de regresión r para el periodo 1980-2007.

Región este												
t_e	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Promedio de conductividad	547	559	559	568	554	529	531	519	519	510	524	549
r	0.08	0.08	0.07	0.14	0.04	0.01	0.13	0.05	0.06	0.11	0.05	0.11
Mes de inicio	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo
Región oeste												
t_e	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Promedio de conductividad	542	542	542	542	543	542	542	542	540	540	540	539
r	0.10	0.06	0.04	0.12	0.02	0.08	0.01	0.03	0.12	0.08	0.05	0.05
Mes de inicio	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo

Cuadro 12. Precipitaciones extraordinarias y valores máximos observados para la conductividad y los sólidos disueltos para un tiempo de retraso t_0 de cuatro meses en Xochimilco.

Año	Región este					Región oeste				
	Precipitación extraordinaria mensual (mm)	Conductividad máxima mensual (ms/cm)	% incremento respecto de la media	SDT máxima mensual (mg/L)	% incremento respecto de la media	Precipitación extraordinaria mensual (mm)	Conductividad máxima mensual (ms/cm)	% incremento respecto de la media	SDT máxima mensual (mg/L)	% incremento respecto de la media
1982	213	987	161%	865	216%					
1984	170	980	159%	800	192%	146	1 150	258%	992	291%
1992	160	1 100	191%	1 700	520%	140	950	196%	902	255%
1994	162	1 600	323%	976	256%	141	1 007	214%	656	158%
1997	204	1 151	204%	808	195%	183	942	193%	780	207%
1998						182	868	170%	650	156%
2001	244	968	156%	780	185%					
2002	204	1 250	231%	712	160%					
2003										
2004	257	905	139%	540	97%	202	1 200	274%	780	207%
2005	254	1 100	191%	750	174%					
Promedio histórico mensual	114	378		274		97	321		254	

entre +12 y +16%. Estas anomalías mensuales se acoplaron al escenario base de precipitación con el uso del modelo PAR (2).

Posteriormente, se vincularon las variables de interés por medio de la función Gumbel mixta, se establecieron relaciones de tipo lineal en forma conjunta y condicional de la conductividad o los SDT, en función de la precipitación para el escenario base (1980-2007),

el futuro a corto plazo (2011-2030) y el futuro a mediano plazo (2031-2050). Las relaciones obtenidas, con las cuales se generaron los datos para los indicadores de calidad del agua en función de la precipitación, se muestran en el cuadro 13.

Para la región este, resultó que $y = F(\text{cond} | hp)$, $x = F(hp)$, o bien $y = F(\text{SDT} | hp)$ y $x = F(hp | \text{SDT})$; para la región oeste, $y = F(\text{cond} | hp)$,

Cuadro 13. Funciones de relación lineal en forma conjunta y condicional para la conductividad y los SDT en función de la precipitación.

Región este					
Escenario	Periodo	Relación de conductividad		Relación SDT	
		Función	r^2	Función	r^2
Base	1980-2007	$y = -0.9117x + 1.0319$	0.9729	$y = -0.8462x + 1.0256$	0.9331
Futuro a corto plazo	2011-2030	$y = -0.8573x + 1.0383$	0.9281	$y = -0.8849x + 1.0505$	0.9302
Futuro a mediano plazo	2031-2050	$y = -0.8414x + 1.0339$	0.9274	$y = -0.8833x + 1.0458$	0.9338
Región oeste					
Escenario	Periodo	Relación de conductividad		Relación SDT	
		Función	r^2	Función	r^2
Base	1980-2007	$y = 0.9335x - 0.1155$	0.8880	$y = -0.7453x + 1.0012$	0.9395
Futuro a corto plazo	2011-2030	$y = 0.9512x - 0.1331$	0.8765	$y = -0.7779x + 1.0064$	0.9506
Futuro a mediano plazo	2031-2050	$y = 0.9189x - 0.1082$	0.8651	$y = -0.7849x + 1.0058$	0.9519

$x = F(hp | cond)$, o bien, $y = F(SDT | hp)$ y $x = F(hp | SDT)$. Donde *cond* es la conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), SDT son los sólidos disueltos totales (mg/L), y *hp* es la precipitación (mm). Con el empleo de los parámetros de las funciones resultantes y con el uso de la ecuación (7), se vincularon las relaciones conductividad-lluvia y SDT-lluvia, por medio de la función Gumbel mixta, esto para condiciones del escenario base (1980-2007) y de cambio climático a corto y mediano plazos (2011-2030 y 2031-2050). Los resultados se muestran en el cuadro 14.

Se observa que en la región este, los valores mayores a $800 \mu\text{S}/\text{cm}$ de conductividad y a $500 \text{mg}/\text{L}$ de SDT ocurren a partir de precipitaciones de 170mm , con una probabilidad del 25% para el escenario base, y entre el 27 y el 28% para las proyecciones de los periodos 2011-2030 y 2031-2050, respectivamente. En cambio, en la región oeste se presentan esos valores a partir de lluvias de 200mm , con una probabilidad del 16%, que se incrementa hasta el 19 y el 21%, para las proyecciones de los periodos respectivos.

Discusión

Al inicio de la investigación se consideró estudiar el efecto de la precipitación extrema en la conductividad, los sólidos disueltos totales, y las bacterias coliformes totales o fecales en el agua del acuífero de Xochimilco. No obstante, no fue posible identificar el efecto para los dos últimos parámetros en forma directa debido a la insuficiencia de datos de calidad de agua, por lo que sólo se discuten en este texto los resultados obtenidos para la conductividad y los SDT, así como la relación de estos últimos con la presencia de coliformes fecales. El análisis es útil, ya que ambos parámetros son recomendados en la literatura como indicadores de contaminación (NOM-127-SSA1-1994).

En lo que respecta a la vulnerabilidad del acuífero de Xochimilco, se muestra que se determina principalmente por la distancia entre la fuente de carga contaminante, el

sitio de recarga y la ubicación de la fuente de suministro, así como por el tiempo de retraso, que en este caso es menor a un año, dadas las características geológicas de porosidad de la roca basáltica fracturada y la cantidad de arcilla, ya que condicionan el volumen y la dirección del flujo de recarga que proviene de la zona sur, desde la sierra del Chichinautzin hacia la zona urbana, a una velocidad mayor a la esperada en condiciones normales (Terrones, 2004; Ramos *et al.*, 2010). Esto coincide con lo dicho por Embrey y Runkle (2006), ya que ellos otorgan un gran peso a la interrelación entre las características fisiográficas, como es la distancia entre la fuente de carga contaminante y el sitio de extracción, el tiempo de retraso que lleva implícito el nivel piezométrico y la geología. También se menciona que el riesgo de deterioro de la calidad del agua está en función no sólo de la vulnerabilidad, sino también de la magnitud de la amenaza, debido a la ocurrencia de eventos de precipitación extrema (Magaña *et al.*, 2002; Madsen y Figdor, 2007). En este sentido, se aprecia que la variación en la precipitación dentro de la cuenca de Xochimilco repercutió en la calidad del agua, por lo menos en los valores de conductividad y de SDT durante el periodo de 1980-2007, con un tiempo de retraso de análisis de cuatro meses, ya que la escorrentía consecuente facilita el transporte de contaminantes, como lo señalaron Leemans y Kleidon (2002), Kabat *et al.* (2002), y Jacoby (1990).

En general, los resultados concuerdan con lo dicho por Kistemann *et al.* (2002), Douglas *et al.* (2000), y Peterson *et al.* (1987), quienes demostraron que existe una relación entre la calidad del agua y la variabilidad climática de una región por el incremento en el número e intensidad de eventos extremos de precipitación debido a las condiciones de cambio y variabilidad climáticas. Asimismo, se observó que existe una fuerte correlación entre los indicadores conductividad y SDT, con coliformes fecales, cuya presencia se observó con mayor probabilidad en la región este, es decir, la más vulnerable, como Chigbu *et al.* (2010) y Foster *et al.* (2002), lo señalaron.

Cuadro 14. Valores de conductividad y de SDT en función de la precipitación.

Precipitación acumulada mensual (mm)	Región este											
	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)						SDT (mg/L)					
	Escenario base		Escenario 2011-2030		Escenario 2031-2050		Escenario base		Escenario 2011-2030		Escenario 2031-2050	
	Valor	Probabilidad	Valor	Probabilidad	Valor	Probabilidad	Valor	Probabilidad	Valor	Probabilidad	Valor	Probabilidad
120	614	34%	560	37%	456	42%	349	42%	409	36%	359	40%
150	781	25%	691	29%	619	32%	439	34%	500	29%	461	32%
170	808	24%	804	24%	858	28%	473	32%	523	28%	501	29%
200	958	18%	844	23%	904	21%	561	26%	604	23%	601	23%
220	1 029	16%	905	20%	969	18%	616	23%	645	21%	662	20%
230	1 102	14%	955	18%	1 034	16%	650	21%	681	19%	702	18%
240	1 110	14%	970	18%	1 081	14%	674	20%	690	18%	729	17%
250	1 147	13%	999	17%	1 136	13%	703	18%	710	18%	762	15%
260	1 189	12%	1 031	16%	1 194	12%	734	17%	732	17%	796	14%
Tolerancia (\pm)	16%		18%		18%		28%		26%		26%	
	Región oeste											
Precipitación acumulada mensual (mm)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)						SDT (mg/L)					
	Escenario base		Escenario 2011-2030		Escenario 2031-2050		Escenario base		Escenario 2011-2030		Escenario 2031-2050	
	Valor	Probabilidad	Valor	Probabilidad	Valor	Probabilidad	Valor	Probabilidad	Valor	Probabilidad	Valor	Probabilidad
	120	525	33%	499	34%	497	34%	268	45%	253	48%	243
150	656	26%	627	27%	622	28%	373	35%	360	38%	353	39%
170	715	23%	686	27%	680	27%	426	31%	417	33%	414	34%
200	831	18%	801	19%	793	21%	538	23%	532	25%	532	26%
220	896	15%	867	16%	858	17%	611	19%	608	21%	612	22%
230	941	14%	911	12%	901	13%	653	17%	651	19%	656	19%
240	961	13%	932	12%	923	13%	689	16%	688	17%	696	18%
250	988	13%	961	11%	952	12%	729	14%	729	15%	738	16%
260	1 015	12%	990	11%	981	11%	769	12%	771	14%	782	14%
Tolerancia (\pm)	17%		18%		18%		25%		28%		29%	

Conclusiones

Se observa un mayor grado de vulnerabilidad en la región este en cuanto a la región oeste; esto se atribuye a la geología, la cercanía a fuentes de contaminación y al tiempo de retraso menor, que en conjunto facilitan que el flujo de contaminantes desde la superficie hasta el nivel piezométrico sea más rápido. Otro elemento que incrementa el riesgo es la ocurrencia de eventos extremos de precipitación más intensos. Se detecta que una serie de estos eventos a lo largo de un mes incrementa los valores promedio de los indicadores de calidad del agua, conductividad y SDT, hasta en un 60%, y la probabilidad de que ocurran estos eventos mensuales para las proyecciones a futuro con respecto al escenario base se incrementa hasta en un 5% en ambas regiones. La probabilidad de que se presenten muestras positivas de coliformes fecales es mayor del 20% cuando se registran valores mayores a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en conductividad; para valores mayores a 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la probabilidad acumulada incluso puede alcanzar el 100% de las muestras. Esto se presenta en la región este a partir de 170 mm de precipitación y de 200 mm para la región oeste. La probabilidad de que ello ocurra en la región este resultó del 24, 24 y 28% para los escenarios base, 2011-2030 y 2031-2050, respectivamente; así como del 16, 19 y 21% en la región oeste, respectivamente.

Este estudio responde a los siguientes cuestionamientos:

- ¿Cuál es el tiempo de respuesta de la precipitación en el acuífero de Xochimilco?
- ¿Cuál es el rango de valores de conductividad y SDT que producen coliformes fecales?
- ¿Cuál es la precipitación mensual que genera esos valores?
- ¿Cuál es la probabilidad de que ocurran esos valores de calidad del agua en función de la precipitación?

El análisis realizado para los datos mensuales de las variables de análisis presenta

gran incertidumbre; sin embargo, fue posible detectar diferencia en la vulnerabilidad del acuífero en dos regiones, y se calcularon intervalos en los que los parámetros de calidad del agua analizados son más probables de alcanzar un nivel de riesgo de contaminación; es decir, que se observe la presencia de coliformes fecales, lo cual sucedió para valores menores a los que establece la normatividad; además, es muy posible que otros indicadores de calidad de agua también se vean incrementados. Para confirmar esto, se requiere establecer un programa de muestreo en sitios específicos y en fechas establecidas, a fin de contar con una base de datos de calidad del agua representativa desde el punto de vista tanto temporal como espacial. Por último,, se recomienda hacer un estudio para determinar con mayor precisión de qué manera el tipo de litología, la profundidad del pozo y el nivel piezométrico intervienen en el nivel de vulnerabilidad del acuífero.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo y patrocinio recibido dentro del Fondo Sectorial de Investigación en Salud y Seguridad Social, por parte de Conacyt-Secretaría de Salud, proyecto con clave 70055, para la realización del presente estudio.

Recibido: 25/06/12

Aceptado: 17/10/12

Referencias

- ALLEY, W., HEALY, R., LABAUGH, J., and REILLY, T. Flow and Storage in Groundwater Systems. *Science*. Vol. 296, 2010, pp. 1985-1990.
- BATES, B.C., KUNDZEWICZ, Z.W., WU, S., and PALUTIKOF, J.P. (editors). *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC Secretariat, 2008, 210 pp.
- CVCCM. Datos para temperatura y precipitación en la Ciudad de México [en línea]. Centro de Ciencias de la Atmósfera, 2011. Disponible en *World Wide Web*: http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx/cvcccm/escenarios_gfdl.php.
- CHIGBU, P., GORDON, S., and STRANGE, T. Influence of inter-annual variations in climatic factors on fecal

- coliform levels in Mississippi Sound. *Water Research*. Vol. 38, No. 20, 2010, pp. 4341-4352.
- DI TORO, D. Probability model of stream quality due to runoff. *J. Environmental Engineering Div. ASCE*. Vol. 105(E1), 1984, pp. 43-54.
- DGCOH. *Plan de Acción Hidráulica del año 2001 al 2005 (Xochimilco)*. México, D.F.: Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaría de Obras y Servicios, Gobierno del Distrito Federal, 2007.
- DOMENICO, P. and SCHWARTZ, F. *Physical and Chemical Hydrogeology*. 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 1998.
- DOUGLAS, E., VOGEL, R., and KROLL, C. Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *Journal of Hydrology*. Vol. 240, No. 1-2, 2000, pp. 90-105.
- EMBREY, S., and RUNKLE, D. *Microbial quality of the Nation's ground-water resources, 1993-2004*. Reston, USA: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5290, 2006, 34 pp.
- EPA. *Water Quality Standards Criteria Summaries: A compilation of State/Federal Criteria*. Washington, D.C.: Environmental Protection Agency, 1988.
- ESCALANTE, C. Application of bivariate extreme value distribution to flood frequency analysis: a case study of Northwestern México. *Natural Hazards*. Vol. 42, No. 1, 2007, pp. 37-46.
- ESCALANTE, C. y DOMÍNGUEZ, J. Análisis regional de precipitación con base en una distribución bivariada ajustada por máxima entropía. *Ingeniería Hidráulica de México*. Vol. 16, núm. 3, julio-septiembre de 2001, pp. 91-102.
- ESCALANTE, C. y REYES, L. *Técnicas estadísticas en Hidrología*. México, D.F.: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2002.
- FOSTER, S., HIRATA, R., GOMES, D., D'ELIA, M. y PARIS, M. *Protección de la calidad del agua subterránea*. Washington, D.C.: WHO-PAHO-CETIS, Banco Mundial, 2002.
- INE. *El cambio climático en México. Información por estado y sector* [en línea]. Instituto Nacional de Ecología, 2011. Disponible en *World Wide Web*: <http://zimbra.ine.gob.mx/escenarios/>.
- JACOBY, H. Water Quality. In: *Climate Change and US Water Resources*. Waggoner, P. (editor). New York: John Wiley and Sons, 1990, pp. 307-328.
- JÁUREGUI, E. *Las precipitaciones extremas en la Ciudad de México*. II Congreso de la Asociación Española de Climatología: el tiempo del clima. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Buñol, España: Editorial Garmas Impresores, 2001, pp. 325-334.
- JÁUREGUI, E. Possible impact of urbanization on the thermal climate of some large cities in México, *Atmósfera*. Vol. 18, núm. 4, 2005, pp. 247-248.
- KABAT, P., SCHULZE, R., HELLMUTH, M., and VERAART, J. Coping with Impacts of Climate Variability and Climate Change in Water Management: A Scoping Paper. Wageningen: International Secretariat of the Dialogue on Water and Climate, 2002.
- KATTAA, B., AL-FARES, W., and AL CHARIDEH, A. Groundwater vulnerability assessment for the Banyas Catchment of the Syrian coastal area using GIS and the RISKE method. *Journal of Environmental Management*. Vol. 91, No. 5, 2010, pp. 1103-1110.
- KAVEHKAR, N., JAMADI, S., PIROOZ, B., MOHAMMADI, K., and KHOLGHI, M. Comparison of three groundwater vulnerability assessment methods in Minab Aquifer, Iran. *Proceedings of 2010 International Conference on Environmental Science and Development*, Singapore, February 26-28, 2010, pp. 53-58.
- KISTEMANN, T., CLAßEN, T., KOCH, C., DANGENDORF, F., FISCHER, R., GEBEL, J., VACATA, V., y EXNER, M. Microbial Load of Drinking Water Reservoir Tributaries during Extreme Rainfall and Runoff. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 68, No. 5, 2002, pp. 2188-2197.
- LANDA, S., MAGAÑA, V. y NERI, C. Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2008.
- LEEMANS, R., and KLEIDON, A. Regional and global assessment of the dimensions of desertification. *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?* Berlin: Dahlem University Press, 2002, pp. 215-232.
- LESSER. *Estudio de medición de red de pozos piloto en la parte sur de la Cuenca del Valle de México, medición parámetros y análisis de la evolución en 2003*. Vol. I y II. México, D.F.: Lesser y Asociados para GDF, Sistema de Aguas de la Ciudad de México SACM, 2003.
- MADSEN, T., and FIGDOR, E. *When it rains, it pours. Global Warming and the Rising Frequency of Extreme Precipitation in the United States*. Boston: Environment America Research and Policy Center, 2007.
- MAGAÑA, V., PÉREZ, J., and MÉNDEZ, M. Diagnostic and pronostic of extreme precipitation events in the Mexico basin. *Geofísica Internacional*. Vol. 42, núm. 2, 2002, pp. 247-259.
- NEFF, R., CHANG, H., KNIGHT, C., NAJJAR, R., YARNAL, B., and WALKER, H. Impact of climate variation and change on Mid-Atlantic Region hydrology and water resources. *Climate Research*. Vol. 14, 2000, pp. 207-218.
- NOLAN, B., HITT, K. Vulnerability of shallow groundwater and drinking-wells to nitrate in the United States. *Environmental Science Technology*. Vol. 40, 2006, pp. 7834-7840.
- 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 [en línea]. México, D.F.: SSA, 1994.

- Disponible en *World Wide Web*: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>.
- PETERSON, D., CAYAN, D., DILEO-STEVENSON, J., and ROSS, T. *Some effects of climate variability on hydrology in western North America*. Menlo Park, USA: IUGG, 1987.
- RAMOS, J., NOYOLA, C., and TAPIA, F. Acuífer vulnerability and groundwater quality in mega cities: case of the Mexico Basin. *Environmental Earth Science*. Vol. 61, No. 6, 2010, pp. 1309-1320.
- ROZEMEIJER, J., BROERS, H., VAN GEER, F., BIERKENS, M. Weather induced temporal variations in nitrate concentrations in shallow groundwater. *Journal of Hydrology*. Vol. 378, 2009, pp. 119-127.
- RUVALCABA, A. Modelación matemática del comportamiento hidrogeológico de la zona lacustre de Xochimilco, México. Tesis de Maestría. México, D.F.: Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 2009, 107 pp.
- SACM. *Estadísticas del agua*. México, D.F.: Sistema de Aguas de la Ciudad de México, 2007.
- SALAS, J., DELLEUR, J., YEVJEVICH, V., and LANE, W. *Applied modeling of hydrological time series*. Colorado: Water Resources Publications, , 1980.
- SEMARNAT. *Estadísticas del agua de la Región Hidrológica Administrativa XIII, Aguas del Valle de México*. México, D.F.: Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2009.
- SHIRAZI, S., IMRAN H., and SHATIRAH, A. GIS-based DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment: a review. *Journal of Risk Research*. Vol. 15, No. 8, 2012, pp. 991-1010.
- VÍAS, J., ANDREO, B., RAVBAR, N., and HOTZL, H., Mapping the vulnerability of groundwater to the contamination of four carbonate aquifers in Europe. *Journal of Environmental Management*. Vol. 91, No. 7, 2010, pp. 1500-1510.
- YUE, S., OUARDA, T., BOBÉE, B., LEGENDRE, P., y BRUNEAU, P. The Gumbel mixed model for flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*. Vol. 226, No. 1-2, 1999, pp. 88-100.

Abstract

NAVARRETE, S., JIMÉNEZ, B., NAVARRO, I. & DOMÍNGUEZ, R. Assessment of risk due to extreme rainfall for the Xochimilco aquifer. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. IV, No. 3, July-August, 2013, pp. 103-123.

This study estimated the risk of deterioration in the water quality of the Xochimilco aquifer, Mexico City. First, the vulnerability of the aquifer was evaluated using the Groundwater hydraulic confinement - Overlaying strata- Depth to groundwater table (GOD) method, considering a response time of less than one year. Subsequently, the correlation between maximum monthly precipitation and water quality indicators was analyzed, for conductivity and total dissolved solids (TDS) for the period 1980-2007. Then, using the PAR(2) time series model, monthly precipitation anomalies were projected using the Regionalized Climate Change Scenarios Information System (SIECCRe, Spanish acronym), based on the A2 scenario for the periods 2011-2030 and 2031-2050. These projections were used with the Gumbel mixed model to estimate conductivity and TDS values for precipitation. The analysis showed that vulnerability is high in the eastern region and low in the west, and that the aquifer responds in roughly four months. In addition, samples with elevated conductivity values were found to have an increased probability of containing fecal coliforms. Finally, for the projections for 2011-2030 and 2031-2050, the probabilities are expected to remain constant for the first period, and increase to 28% in the east and 21% in the west for the second period.

Keywords: *aquifer, water quality, climate change, extreme rainfall, time series, vulnerability.*

Dirección institucional de los autores

M.I. Said Navarrete
Dra. Blanca Jiménez
M.C. Inés Navarro
Dr. Ramón Domínguez

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito Escolar s/n
Ciudad Universitaria, colonia Copilco El Bajo,
Delegación Coyoacán 04510
México, D.F., MÉXICO
Tel.: +(52) (55) 5623 3675
bjimenezc@iingen.unam.mx
ing@pumas.iingen.unam.mx
rdm@pumas.iingen.unam.mx