



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA

Modelo de riesgo sobre la modificación de la
calidad del agua por
variabilidad climática en el Distrito Federal

T E S I S

QUE PARA OPTAR EL GRADO DE:

**DOCTOR EN INGENIERIA AMBIENTAL
(AGUA)**

P R E S E N T A:

SAID LUDIM NAVARRETE AVILA

TUTORA:

DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS

Enero, 2013

JURADO:

Presidente: **Dr. Humberto Bravo Álvarez** Centro de Ciencias de la Atmósfera

Secretario: **Dr. Víctor Magaña Rueda** Instituto de Geografía

1er. Vocal: **Dra. Blanca E. Jiménez Cisneros** Instituto de Ingeniería

1er. Suplente: **Dr. Ramón Dominguez Mora** Instituto de Ingeniería

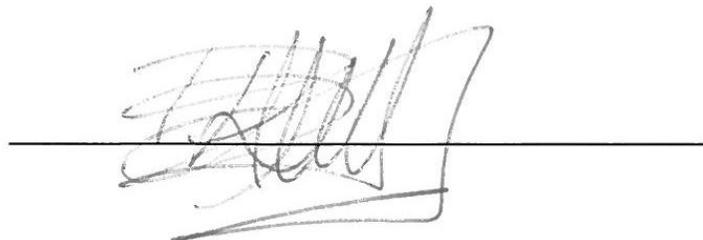
2do. Suplente: **Dr. Luis Marín Stillman** Instituto de Geofísica



INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTORA:

Dra. Blanca E. Jiménez Cisneros



Contenido

Introducción	1
1. Antecedentes	5
2. Hipótesis, objetivos y alcances	12
2.1. Hipótesis	12
2.2. Objetivo general	12
2.3. Objetivos específicos	12
2.4. Alcances	13
3. Metodología	15
3.1. Integración de base de datos	15
3.2. Análisis de los datos de precipitación y de calidad de agua	18
3.3. Evaluación de la vulnerabilidad	21
3.4. Datos empleados	24
4. Resultados	29
4.1. Xochimilco	29
4.1.1. Integración de base de datos	29
4.1.2. Análisis de los datos de precipitación y de calidad del agua	30
4.1.3. Vulnerabilidad del acuífero	46
4.2. Magdalena Contreras	48
4.2.1. Integración de base de datos	48
4.2.2. Análisis de los datos de precipitación y de calidad del agua	49
4.2.3. Vulnerabilidad del acuífero	52
5. Discusión y conclusiones	56
5.1. Discusión	56
5.2. Conclusiones	59
Referencias	64
Anexo A. Fundamentos Teóricos	
Anexo B. Características del Sitio de Estudio	
Anexo C. Bases de Datos	

Índice de tablas y figuras

Tabla 1. Aplicaciones del método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos	8
Tabla 2. Anomalías de precipitación mensual (%) según el CVCCCM	11
Tabla 3. Valores categóricos de los parámetros hidrogeológicos para aplicar el método GOD	21
Tabla 4. Definición de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero	21
Tabla 5. Estaciones climatológicas usadas como fuente de información para la precipitación	23
Tabla 6. Pozos de análisis en Xochimilco para el periodo de 1980-2007	24
Tabla 7. Estaciones climatológicas usadas como fuente de información para la precipitación	26
Tabla 8. Pozos de análisis en Magdalena Contreras para el periodo de 1980-2007	26
Tabla 9. Precipitación media y días lluviosos en Xochimilco en el periodo 1980-2007	30
Tabla 10. Probabilidad y periodo de retorno para la precipitación extraordinaria durante la temporada de lluvias por regiones de Xochimilco para el periodo 1980-2007	31
Tabla 11. Probabilidad de encontrar muestras positivas de coliformes fecales por rango de conductividad	37
Tabla 12. Precipitaciones extraordinarias y valores máximos observados para la conductividad y los SDT un tiempo de retraso t_0 de cuatro meses en Xochimilco	38
Tabla 13. Parámetros estimados por máxima verosimilitud de la función Gumbel univariada	40
Tabla 14. Funciones predictivas de relación lineal en forma conjunta y condicional para la conductividad y los SDT en función de la precipitación	41
Tabla 15. Valores de conductividad y SDT en función de la precipitación en la región Este de Xochimilco	42
Tabla 16. Valores de conductividad y SDT en función de la precipitación en la región Oeste de Xochimilco	43
Tabla 17. Valores de precipitación relacionados con la conductividad y coliformes fecales	45
Tabla 18. Tiempo de retraso calculado t_c en el acuífero principal en Xochimilco	46
Tabla 19. Precipitación media y días lluviosos en Magdalena Contreras en el periodo 1980-2007	48
Tabla 20. Probabilidad y periodo de retorno de la precipitación mensual por regiones de Magdalena Contreras para el periodo 1980-2007	48
Tabla 21. Periodos extraordinarios de precipitación en la región Norte de Magdalena Contreras	50
Tabla 22. Valores máximos de calidad del agua en la región Norte de Magdalena Contreras	50
Tabla 23. Tiempo de retraso calculado t_c en el acuífero principal en Magdalena Contreras	52
Tabla 24. Resumen de resultados del estudio	53
Figura 1. Sitio de estudio en la cuenca del Valle de México	14
Figura 2. Pozos de extracción y estaciones climatológicas de Xochimilco	25
Figura 3. Pozos de extracción y estaciones climatológicas de Magdalena Contreras	27
Figura 4. Análisis de frecuencias de los datos de precipitación mensual en la región Oeste de Xochimilco (1980-2007)	30
Figura 5. Análisis de frecuencias de los datos de precipitación mensual en la región Este de Xochimilco (1980-2007)	30
Figura 6. Análisis de frecuencias de los datos de precipitación mensual en la región Este de Xochimilco	33
Figura 7. Análisis de frecuencias de los datos de precipitación mensual en la región Oeste de Xochimilco	34
Figura 8. Análisis de frecuencias de los datos mensuales de calidad del agua en la región Oeste de Xochimilco (1980-2007)	35
Figura 9. Análisis de frecuencias de los datos mensuales de calidad del agua en la región Este de Xochimilco (1980-2007)	35
Figura 10. Total de muestras que resultan positivas en coliformes fecales en relación con la conductividad	37
Figura 11. Gráficos de dispersión de calidad del agua y precipitación para diferentes tiempos de retraso	39

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 mayor tratamiento. Desafortunadamente, la variación en la precipitación de una región, afecta la disponibilidad del agua de los acuíferos en términos de cantidad y calidad (Kabat et al. 2002, Neff et al. 2000). En particular, en el aspecto de la calidad, al ocurrir una precipitación extraordinaria se provoca el arrastre de sólidos disueltos totales (SDT), coliformes fecales, algunos organismos patógenos, nutrientes, metales pesados, hidrocarburos, entre otros, a las fuentes de agua subterránea. La contaminación ocurre a través de pozos 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 procesos convencionales de potabilización a un costo razonable, pero otros no.

En la Ciudad de México, con 22 millones de habitantes, el agua subterránea abastece al 69% de su población. Del acuífero se extraen cerca de 1,250 Mm³/año (39.6 m³/s), mientras que la recarga es mucho menor, lo que ha ocasionado una situación de “estrés” hídrico (SEMARNAT 2009). El mayor volumen de recarga ocurre en la parte sur de la cuenca, en donde la calidad del agua se había reportado como muy buena (SACM 2007); sin embargo, a causa de eventos de precipitación extraordinaria como los sucedidos en los años de 1982, 1991, 1998 y 2004, se registró en algunos pozos del acuífero de la delegación Xochimilco un incremento de más del 100% en la concentración de conductividad, sólidos disueltos

totales (SDT) y la presencia de coliformes fecales (Landa et al. 2007; Escolero et al. 2008). Lo anterior puede atribuirse según Escolero et al. (2008) al alto nivel de vulnerabilidad dado por la exposición de los estratos que protegen al acuífero, la presencia de contaminantes cercanos al sitio de recarga y la falta de planificación e infraestructura para aminorar el transporte de contaminantes al acuífero. Esa situación se ve agravada porque los procesos actuales de potabilización son inapropiados para muchos contaminantes ya que sólo se basan en la cloración (Liverman y O'Brien 1991, Kistemann et al. 2002). Estos resultados contrastan con los reportados para el mismo periodo y durante los eventos de precipitación extraordinarios en el acuífero localizado en la delegación Magdalena Contreras, ya que no se ha encontrado variación importante la calidad del agua (SACM 2007). De ahí que es importante conocer los elementos o factores involucrados en la modificación de la calidad del agua subterránea en estos dos acuíferos, como resultado de la ocurrencia de eventos de precipitación extraordinaria, esto para las condiciones climáticas actuales, pero sobre todo para proyecciones a futuro en donde se espera que los eventos de lluvia extrema se incrementen (Magaña 2002).

Lo antes dicho se basa en los resultados de los modelos climáticos para el escenario de generación de gases de efecto invernadero A2, que es el más probable que ocurran para México (Landa et al. 2008; Magaña et al. 2002; Liverman y O'Brien 1991). Estos mismos autores, señalan que es muy probable que para horizontes a corto (2030) y mediano plazo (2050) la precipitación acumulada anual sea menor, pero que se intensifiquen los eventos de lluvia extrema en menor cantidad de días, lo que traería consigo una escorrentía consecuente con mayor capacidad de arrastre y erosión. Al ocurrir estos escenarios de cambio climático con las condiciones actuales de la infraestructura para protección de

fuentes de abastecimiento, los impactos en términos de calidad del agua se verán reflejados en la mayor posibilidad de contaminación del agua subterránea (Escolero 2009).

Es por esta evidencia que un estudio que vincule la ocurrencia de precipitación extraordinaria con algún parámetro de calidad del agua, aunque sea de forma indirecta, es útil para realizar proyecciones para una región específica. Por lo tanto, el objetivo de este estudio es elaborar una metodología que determine el riesgo de que la calidad del agua subterránea se vea afectada por la precipitación extraordinaria en situaciones actuales y a futuro considerando escenarios de cambio climático. Para validar la metodología, se aplicó a los acuíferos localizados en las delegaciones Xochimilco y Magdalena Contreras, ya que se cuenta para ello con datos disponibles de precipitación y de calidad del agua; además que poseen condiciones que permiten contrastar resultados.

Además de la introducción, esta tesis contiene en el capítulo 1 los antecedentes de lo que se ha desarrollado en la literatura respecto de este tema. A partir de los antecedentes, en el capítulo 2 se presenta la hipótesis de trabajo, el objetivo general y los particulares. La metodología para realizar el análisis de los datos existentes y generar los escenarios futuros para el sitio de estudio se describe en el capítulo 3. El análisis matemático y los resultados se presentan en el capítulo 4. En el capítulo 5 se realiza un análisis de resultados, la discusión y las conclusiones. Por último, en el Anexo A se describen los fundamentos teóricos y las expresiones matemáticas empleados en el trabajo. En el Anexo B se presentan las características fisiográficas del sitio de estudio, y en el Anexo C se concentran las bases de datos originales y resultantes de los análisis realizados.

Si bien este trabajo aplica herramientas matemáticas ya conocidas, su principal contribución radica en la integración de las mismas como una metodología que logra vincular la precipitación histórica y proyectada a futuro con la calidad del agua. A partir de ello se construyen escenarios de riesgo para diversas condiciones de variabilidad climática. La metodología está pensada de forma que pueda ser modificada para su empleo en otras regiones o cuencas y sea así un instrumento para el diseño de estrategias de adaptación ante el cambio y la variabilidad climática; así como para implementar medidas para proteger los sitios de recarga.

1. Antecedentes

Bates et al. (2008) mencionaron que existe un vínculo entre la precipitación extraordinaria y el deterioro de la calidad del agua subterránea. Esto es confirmado por Rozemeijer et al. (2009) quienes encontraron para acuíferos de Holanda que las concentraciones de nitratos se incrementaron entre 55% y 153% ante la ocurrencia de precipitación extraordinaria atribuida a la variabilidad climática. Los estudios anteriores se basaron en modelos geohidrológicos para establecer la relación entre la precipitación y la calidad del agua, en este trabajo se describen los dos más empleados.

El primero de ellos calcula un tiempo de retraso (t_c) en función de las características geológicas de las capas que conforman el acuífero, la velocidad del flujo de escorrentía desde el nivel superficial hasta el nivel piezométrico, la distancia entre los pozos de extracción y el sitio de recarga, así como de la profundidad de perforación; se muestra así que estos elementos contribuyen a modificar el gradiente y la dirección de flujo (Foster et al. 2002). Con este procedimiento, Rayne et al. (2001) calcularon un tiempo de retraso menor a un año en un sistema de pozos de extracción en Wisconsin, EUA, que se usó para abastecer a la población.

El segundo procedimiento consiste en determinar una relación a través de herramientas matemáticas, que parte del supuesto que un sistema subterráneo está determinado por la interacción entre sus elementos y la manera que se puede estimar la salida en función de la variable de entrada, toda vez que el sistema es cerrado e invariante en el tiempo (Rose

2007). La forma más simple de hacerlo es a través del método de regresión simple; sin embargo se ha probado que sus resultados no son estadísticamente válidos cuando no hay suficientes datos. Es por ello, que se emplean métodos más sofisticados basados en funciones de distribución de probabilidad mismas que han evolucionado hasta constituir modelos de análisis multivariado (Escalante 2007). Yue et al. (1999) emplearon 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; encontrando que este modelo es adecuado para representar las distribuciones de las variables en forma conjunta y estimar sus periodos de retorno. Por otra parte, Escalante y Domínguez (2001) aplicaron este modelo para estimar escorrentía superficial en función de la precipitación, y con coeficientes de regresión lineal aceptables ($R > 0.75$), a pesar de que originalmente se comprobó que no existía vínculo desde el punto de vista estadístico usando el método de regresión lineal simple y exponencial. Un estudio de gran relevancia es el realizado por Di Toro (1984), quien demostró que no sólo los valores de precipitación sino también los de la calidad del agua pueden ser representados mediante el modelo Gumbel.

Independientemente del procedimiento aplicado, se ha documentado que las variaciones en la calidad del agua suceden en acuíferos constituidos por roca basáltica que presentan fracturas y bajo contenido de arcilla, que exhiben valores altos de conductividad hidráulica y del coeficiente de almacenamiento. Además, en acuíferos donde hay bombeo para extracción, se induce a flujos preferenciales, y se condiciona un tiempo de retraso menor, por lo que se espera se observe mayor concentración de contaminantes (Alley et al. 2010). Esto fue estudiado por Rayne et al. (2001), quienes observaron modificaciones en la concentración de diversos indicadores de calidad del agua posterior a la temporada de

lluvia de acuerdo con el tiempo de retraso calculado. Por otra parte, 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 un kilómetro del sitio de recarga y cercanos a fuentes contaminantes por el alto grado de vulnerabilidad que le confiere.

De esta manera, en el acuífero localizado en la delegación Xochimilco, donde existe bombeo constante, cercanía de fuentes contaminantes a los pozos y presencia de fracturas en roca basáltica expuesta; se espera que el tiempo de retraso se reduzca a menos de un año, y que en algunos registros de los pozos se detecte variación en indicadores de calidad del agua en función de la precipitación extraordinaria. En contraste, en el acuífero localizado en la delegación Magdalena Contreras, los pozos de extracción y las fuentes de carga contaminantes importantes, se encuentran lejanos al sitio de recarga; además los estudios geológicos no muestran la presencia de fracturas en los estratos del acuitardo que confina al acuífero principal, por lo que se espera que el tiempo de retraso sea mayor a decenas de años en algunas regiones, y además que sea poco probable que algún indicador de calidad del agua se vea afectado en forma considerable (Ruvalcaba 2009, SACM 2007).

Por otra parte, con la evaluación de la vulnerabilidad de un acuífero se determinan los sitios más susceptibles de ser contaminados, y se establece la relación en forma indirecta entre la precipitación y la calidad del agua del acuífero, al observarse la modificación de la concentración de indicadores de contaminación. Para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero existen diversas metodologías, algunas de las cuales se basan en 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 y Kattaa et al. 2010). Vías et al. (2010) emplearon el método COP (*Concentration of flow-overlying layers-precipitation regime*) para cuatro acuíferos de Europa, y Kattaa et al. (2010) el RISKE (*Aquifer rock, infiltration condition, soil, degree of karstification and epikarst presence or absence*) para un acuífero de Siria. Con 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. Por otra parte, Foster et al. (2002) y Kavehkar et al. (2010) sugieren el empleo del modelo GOD ya que es más sensible a los elementos geológicos y no depende en forma directa de los registros de calidad del agua. 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 debido al riego con agua tratada en León, Guanajuato. 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). En la tabla 1 se muestran los sitios en donde se ha aplicado el método GOD con buenos resultados.

Tabla 1. Aplicaciones del método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos. Modificada de Foster et al. (2002)

Área de estudio	Autores	Año
Barbados	Chilton et al	1990
San Pablo, Brasil	Hirata et al	1990
Río Cuarto, Argentina	Blarasín et al	1993
León, México	Stuart y Milne	1997
Cacapava, Brasil	Martín et al	1998
Esperanza, Argentina	Paris et al	1998
Valle del Cauca, Colombia	Paez et al	1999

Para el caso específico de la Ciudad de México, Ramos et al. (2010) emplearon el método SINTACS (*Static level depth, net recharge, Non saturated zone, soil Types, Aquifer type, hydraulic Conductivity of the aquifer and topographic Slope*). Con este modelo, los autores encontraron un alto nivel de vulnerabilidad en la zona sureste, donde se localizan estratos rocosos de basaltos expuestos y fracturados, lo que corrobora lo antes mencionado. Además encontraron niveles intermedios de vulnerabilidad en la zona de transición y niveles bajos al interior de la cuenca. Los valores más altos los hallaron cerca del cementerio de Tláhuac, y en la región de Iztapalapa donde las posibles fuentes de contaminación son las fugas de los drenajes. Aunado a ello, Escolero et al. (2009) señalaron que el riesgo de que la calidad del agua de algunos pozos de las delegaciones Tlalpan, Xochimilco y Milpa Alta es alto, debido a que existen diversos elementos asociados con las áreas de captación; entre los que destaca la existencia de aportes de agua residual y la presencia de otras fuentes de carga contaminante. Además estos autores mencionaron que la carga contaminante se infiltra a través de pozos deteriorados y mal construidos; dicha carga tiende a alojarse en el acuitardo e incluso llegar al acuífero. Este fenómeno se ve intensificado debido a los altos niveles de degradación dentro de la zona urbana por el cambio de uso de suelo y por tanto de generación de mayor carga contaminante; además, por mayor transporte de ésta, dada por la ocurrencia de precipitación extraordinaria, que se espera se vean incrementadas hasta en un 12% para las proyecciones a futuro (Escolero et al. 2009).

Ahora bien, es necesario analizar el fenómeno climático a partir de la variación en la precipitación extraordinaria, ya que como se ha visto es el principal elemento que contribuye al transporte de contaminantes hacia un acuífero. Para ello lo más usual es

emplear pruebas estadísticas (Jáuregui 2001). En el caso de la Ciudad de México, a partir de bases de datos de 1950 al 2007 de 21 estaciones distribuidas en las 16 delegaciones del Distrito Federal y en 10 estaciones ubicadas en los municipios conurbados del Estado de México (Jáuregui 2000), se ha visto que la precipitación acumulada anual ha disminuido, para el caso de Xochimilco, para el periodo de 1951 a 1980 pasó de 838 mm a 681 mm (-17%) para el periodo 1981 al 2007 (DGCOH 2007). En el caso de los eventos extraordinarios (> 45 mm), Jáuregui (2001) reportó un incremento en la frecuencia de ellos sobre todo en los meses de junio y septiembre, ya que para el primer periodo 1951-1980 se presentaban de cinco a siete casos, en cambio para el periodo 1981-2007 aumentaron de 20 a 28 eventos. Este mismo autor señala que dicha modificación se puede atribuir al fenómeno de “islas de calor” provocado por el crecimiento urbano y el cambio de uso de suelo; situación que podría agravarse a causa del cambio climático (Landa et al. 2008). Es por esto que es fundamental analizar lo ocurrido históricamente y que se ha registrado en las bases de datos de las variables de interés; también es primordial examinar lo que en un futuro a corto o mediano plazo ocurra, debido a que se espera que las condiciones actuales tanto de uso de suelo por el crecimiento urbano como de variación en la precipitación se modifiquen considerablemente (Magaña 2002, Jáuregui 2005).

Ante esto, el Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México (CVCCCM) realizó un estudio a nivel local con el uso de los modelos MPIECHAMP5 y HADLEY para el escenario A2 de emisión de gases de efecto invernadero. Ellos indicaron que para la Ciudad de México, se esperan anomalías en la precipitación mensual siendo las mayores en agosto (-25%) y en septiembre (+25%), cuando ocurre cerca del 40% de la precipitación en el año, como se muestra en la tabla 2 (CVCCCM 2011).

Tabla 2. Anomalías de precipitación mensual (%) según el CVCCCM

proyección	estiaje		lluvia	
	MPIECHAMP5	HADLEY	MPIECHAMP5	HADLEY
2030	-39 a +23	-25 a +15	-29 a +14	-13 a +7
2050	-57 a +35	-34 a +73	-40 a +20	-15 a +9

Sin embargo, dado este nivel de variación que conlleva gran incertidumbre, así como las condiciones de variabilidad climática local, es muy complejo determinar el grado de variación proyectado a futuro (Jáuregui 2005), esto dado principalmente por la baja resolución de los modelos empleados para esa estimación. Como se ha visto, se cuenta con métodos y herramientas de análisis para vincular estadísticamente las variables climáticas, pero no en específico la precipitación con la calidad del agua potable. Más aún, los estudios históricos realizados para la Ciudad de México para la calidad del agua, son escasos debido principalmente a que no se cuenta con información y bases de datos completas que permitan realizar los análisis correspondientes. Es por ello que este estudio extiende tanto la metodología como el análisis a proyecciones bajo condiciones de cambio y variabilidad climática con el uso del modelo SIECCRe (INE 2011) de mayor resolución que el anterior, y que es capaz de realizar un ensamble de distintos modelos validados para proporcionar un resultado más confiable; además, hace uso del modelo PAR(2) para estimar valores faltantes de calidad del agua, acoplar las anomalías de precipitación a futuro a los datos históricos y emplea el modelo univariado derivado de la función Gumbel para vincular la calidad del agua y la precipitación.

2. Hipótesis, objetivos y alcances

2.1. Hipótesis

La calidad del agua subterránea de los acuíferos ubicados en las delegaciones Xochimilco y Magdalena Contreras se deteriora por la ocurrencia de precipitación extraordinaria atribuida a la variabilidad climática local, y ello se puede modelar mediante expresiones matemáticas que son útiles para proyectar las condiciones bajo escenarios de cambio climático.

2.2. Objetivo general

Generar una metodología que evalúe el riesgo de modificación de la calidad del agua subterránea de los acuíferos localizados en las delegaciones Xochimilco y Magdalena Contreras por la ocurrencia de precipitación extraordinaria en condiciones actuales y proyectadas a futuro por variabilidad climática.

2.3. Objetivos específicos

- Construir una base de datos histórica de precipitación, conductividad, SDT y coliformes fecales completa y representativa.
- Establecer la relación de la conductividad y los SDT con los coliformes fecales.
- Establecer la relación entre los parámetros de calidad del agua y la precipitación.
- Evaluar el grado de vulnerabilidad de los acuíferos de análisis.

- Generar proyecciones de precipitación bajo condiciones del escenario A2 de cambio climático para los periodos 2011-2030 y 2031-2050.
- Integrar las proyecciones anteriores a los indicadores de calidad del agua.

2.4. Alcances

Este trabajo se limita a analizar en primer lugar, la calidad del agua a través de los parámetros conductividad, sólidos disueltos totales (SDT) y coliformes fecales de los acuíferos localizados en las delegaciones Xochimilco y Magdalena Contreras a partir de datos históricos del periodo 1981-2007 obtenidos de registros de pozos antes de cloración proporcionados por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM 2007). Por lo que no se realizó muestreo en los sitios de estudio.

En segundo lugar, caracteriza la precipitación mensual en el periodo histórico señalado de datos extraídos de registros de estaciones climatológicas localizadas en las delegaciones Xochimilco y Magdalena Contreras y en sitios adyacentes. La información fue proporcionada por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH 2007).

En tercer lugar analizó la vulnerabilidad de los acuíferos en mención, para ello se recopiló y analizó cartografía de topografía y relieve, uso y tipo de suelo, hidrografía, cobertura vegetal, y geología a una escala 1:20,000 proporcionada por el INEGI (2010).

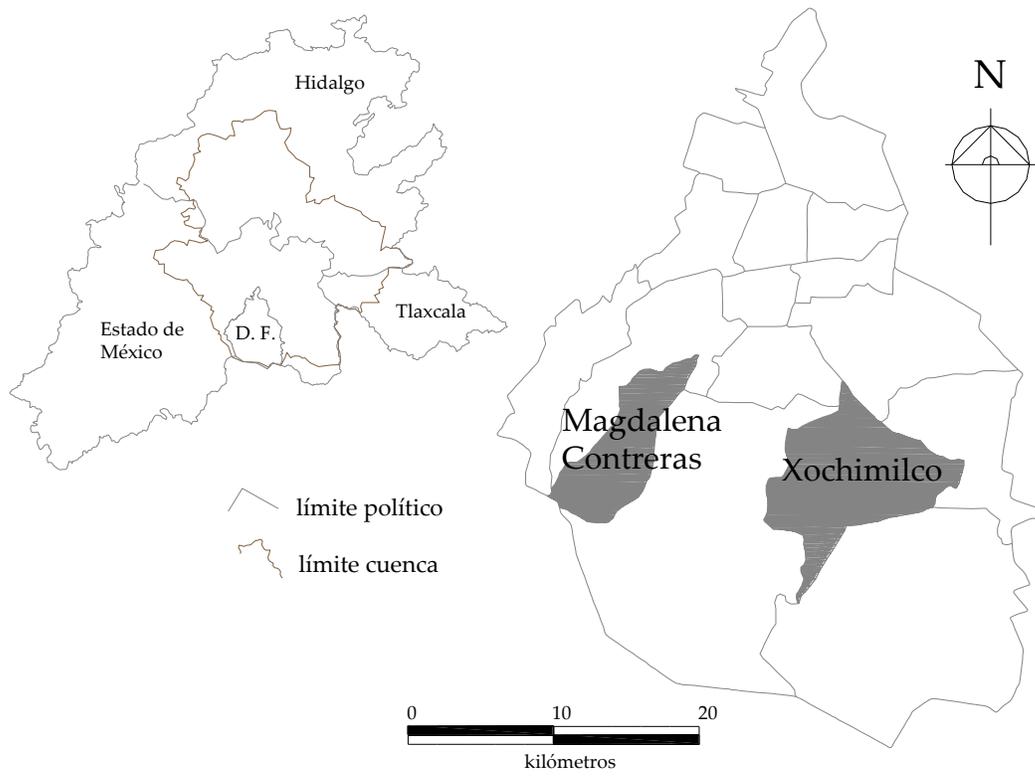


Figura 1. Sitio de estudio en la cuenca del Valle de México

3. Metodología

Esta metodología fue desarrollada para demostrar que la precipitación extraordinaria modifica la calidad del agua en los acuíferos localizados en las delegaciones Xochimilco y Magdalena Contreras, para condiciones actuales y a futuro dadas por el cambio climático. Para cumplir con el objetivo, en primer lugar se integraron bases de datos completas y representativas en cada sitio para los datos de precipitación mensual y los parámetros de calidad del agua conductividad, SDT y coliformes fecales. En segundo lugar, se caracterizaron las bases de datos en forma aislada para posteriormente relacionarlas entre sí. En tercer lugar, se construyeron bases de datos de precipitación bajo del escenario A2 de cambio climático y se integraron a las bases de datos históricas de calidad del agua. Finalmente, se evaluó la vulnerabilidad de los acuíferos antes señalados con el uso de información fisiográfica. A continuación se explica con detalle cada paso de la metodología propuesta.

3.1. Integración de base de datos

Se ubicaron las estaciones climatológicas y los pozos de extracción de Xochimilco y Magdalena Contreras; con base en las bases de datos históricas, se construyeron para cada sitio de estudio, nuevas bases de datos mensuales tanto de precipitación, como de calidad del agua (conductividad, sólidos disueltos totales y coliformes fecales) para el periodo de análisis histórico 1981-2007.

Se emplearon datos de 23 pozos de 79 existentes en la delegación Xochimilco y cinco de nueve en la delegación Magdalena Contreras para los indicadores de calidad del agua conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), sólidos disueltos totales (mg/L) y coliformes fecales (UFC/100ml) a partir de muestreos antes de cloración.

Se recopilaron registros de precipitación (mm) de cinco estaciones pluviométricas de Xochimilco y de tres en Magdalena Contreras. Se utilizaron los datos diarios para conformar valores acumulados mensuales. Para esto se eligió una estación climatológica como principal, que es la que contiene los registros más antiguos y completos; y que se ubica en el sitio de mayor aporte de escorrentía. La representatividad de la estación principal en términos de área de influencia se calculó por el método de polígonos de Thiessen y se corroboró con el mapa de isoyetas (Aparicio 1997). Al resto de las estaciones, interiores y en sitios adyacentes, se les denominó estaciones auxiliares y se emplearon para completar los datos faltantes o para sustituir los erróneos. Tanto para las bases de datos de precipitación como de calidad del agua, se empleó un valor umbral para detectar los datos posiblemente erróneos.

Este valor correspondió a la máxima precipitación histórica registrada en 24 horas, más un 10% adicional. Con esta técnica, el valor umbral resultó de 121 mm. Todos aquellos valores superiores al umbral definido se les denominó atípicos, los cuales pueden ser extremos o erróneos. Para diferenciarlos, se comparó cada valor con otro de una estación auxiliar para el mismo periodo. Los valores que resultaron extremos se conservaron; en cambio, los erróneos fueron sustituidos por los datos de estaciones adyacentes con el empleo del método de regresión lineal simple, con la condición de que los registros de la

estación principal y las auxiliares se observó un valor $R > 0.80$. En caso contrario, el valor erróneo o faltante se sustituyó con el promedio del mes correspondiente.

Para el caso de los valores de calidad del agua se emplearon los registros de los pozos ubicados dentro de los sitios de estudio y que contaban con más de 10 mediciones por mes. Se calculó para cada pozo el promedio y con ello se obtuvo el valor mensual. El valor umbral establecido fue 2,000 unidades ya sea para la conductividad o para los SDT, esto dado que en ningún caso se reportaron valores superiores a éste. En el caso de los meses sin datos o que no cumplieran la condición anterior, se procedió a generar en forma artificial los valores mensuales con el uso del modelo PAR(2) de series de tiempo, cuya justificación se describió en el capítulo de fundamentos teóricos (Ecuación 1).

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

donde, φ_i es un coeficiente de autocorrelación, $z_{v,t}$ es un valor estandarizado y normalizado, y ε_t es la componente aleatoria o residual del modelo. Esta componente es una función de la varianza de los residuales σ_ε y de números aleatorios normales estándar ζ_t que presenta variaciones en función de una serie trigonométrica sinusoidal (Salas et al. 1980).

A las bases de datos mensuales de precipitación y de calidad del agua se les aplicó pruebas estadísticas de normalidad, homogeneidad, independencia y aleatoriedad (Anexo A). Con ello se realizó un análisis adecuado que permite detectar la presencia de fluctuaciones y ciclos, y evitó cálculos erróneos o redundantes (Campos, 2006).

3.2. Análisis de los datos de precipitación y de calidad de agua

En esta segunda etapa, las bases de datos mensuales validados de conductividad y de SDT, se relacionaron con los datos existentes de coliformes fecales para el periodo de análisis a través de un análisis de regresión lineal simple. Posteriormente, se formaron series de tiempo al conjuntar pares de precipitación – conductividad y precipitación – SDT con un tiempo de retraso (t_e) a partir de uno hasta 12 meses. A partir de estos conjuntos pareados se calculó el coeficiente de regresión lineal simple (R). Este tiempo de retraso de hecho fue el empleado para calcular la relación entre las variables de análisis.

A continuación, se obtuvieron las anomalías de precipitación mensual expresadas en porcentaje de déficit o superávit. Para lo anterior, se empleó la herramienta SIECCRe y las condiciones del escenario A2 en el periodo 2011-2030 (futuro a corto plazo) y 2031-2050 (futuro a mediano plazo), considerando el cuadrante 50 km² (18.9° a 19.4° latitud norte y -98.8° a -99.3° longitud oeste) dentro del cual se encuentran los acuíferos de las delegaciones Xochimilco y Magdalena Contreras. Estas anomalías se acoplaron a la base de datos de precipitación histórica usando el modelo PAR(2) descrito y utilizado con anterioridad. Las nuevas bases de datos generadas constituyen las proyecciones a futuro bajo condiciones de cambio climático. Con estas nuevas bases de datos, se formaron series de tiempo en conjuntos pareados de precipitación – conductividad y precipitación – SDT considerando el tiempo de retraso t_e estimado con los datos históricos pero, ahora para las proyecciones a futuro de corto (2011-2030) y mediano plazo (2031-2050). En seguida, las bases de datos mensuales de precipitación de origen (1980-2007) y proyectadas a futuro

(2011-2030 y 2031-2050), así como la base mensual de conductividad y SDT se ajustaron al modelo univariado (Ecuación 2), para estimar así los parámetros de este modelo en forma marginal.

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

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

Posteriormente, las bases de datos histórica y proyectada a futuro en forma de series de tiempo pareadas se vincularon a través del modelo Gumbel mixto con un intervalo de confianza del 95%. Para ello, en primer lugar, se usaron los parámetros $\alpha_1, \alpha_2, v_1, v_2$ estimados con anterioridad a través del modelo Gumbel univariado y se agregó un parámetro de asociación bivariada m . Para estimar los nuevos parámetros del modelo Gumbel mixto, se aplicó el proceso iterativo Newton-Raphson, empleando de inicio un valor del parámetro $m = 1$, de acuerdo con lo propuesto por Escalante y Reyes (2002).

Una vez estimados los parámetros para los conjuntos pareados, se obtuvieron las funciones de probabilidades conjunta $F(y,x)$ (Ecuación 3) y condicional $F(y/x)$ (Ecuación 4); para calcular la función marginal $F(x) = F(y,x) / F(y/x)$, por medio de:

$$F(y, x) = \exp \left\{ - \left[e^{-m\left(\frac{x-v_1}{\alpha_1}\right)} + e^{-m\left(\frac{y-v_2}{\alpha_2}\right)} \right]^{1/m} \right\} \quad \text{Ecuación 3}$$

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

Ecuación 4

Posteriormente, se calculó el coeficiente de regresión lineal r para la función marginal anterior, y se eligió la que proporcionó la mejor correlación. A partir de estas últimas funciones se estimaron valores de conductividad y de SDT en función de distintos valores de precipitación y se obtuvo la probabilidad correspondiente a través del modelo bivariado de la función Gumbel mixta (Ecuación 5).

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

Ecuación 5

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).

Con este análisis se relacionó la conductividad y los SDT con la precipitación y el rango a partir del cual es posible hallar coliformes fecales para condiciones históricas (1981-2007) y de cambio climático (2011-2030 y 2031-2050).

3.3. Evaluación de la vulnerabilidad

En esta tercera y última etapa, se evaluó la vulnerabilidad de los acuíferos. Para ello se usó la información de mapas a escala 1:20,000, que se reporta en el Anexo B. Con esto se obtuvieron los valores requeridos para aplicar el método GOD y calcular el grado de vulnerabilidad del acuífero (Tabla 3). El índice de vulnerabilidad se calcula como el producto de los pesos de cada parámetro en una escala que va de despreciable a extrema de acuerdo con la tabla 4 (Foster et al. 2002). Así se detectaron en cada sitio, las regiones más susceptibles a ser contaminadas a causa de elementos hidrogeológicos y por la actividad humana.

Tabla 3. 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			
1	Grado de confinamiento hidráulico	Ninguno ó surgente	Confinado	Semi-confinado	Libre
		0.0	0.2	0.4	0.6-1.0
2	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
3	Nivel piezométrico	>50m	20-50m	5-20m	<5m
		0.6	0.7	0.8	0.9
4	Tipo de suelo en el sitio de recarga	Arcilla no expansiva	Franco arcilloso	Franco limoso-arenoso	Arena gruesa y grava ó suelo delgado
		0.5	0.6	0.8-0.9	1.0

Tabla 4. 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

En seguida, a partir del perfil geológico, los valores de conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento reportados en el Anexo B, se calculó el tiempo de retraso teórico (t_c) con la expresión desarrollada por Domenico y Schwartz en 1998 (Ecuación 6), el cual se espera sea similar al tiempo de retraso estimado (t_e) calculado previamente.

$$t_c = S L^2 / k$$

Ecuación 6

donde, t_c es el tiempo de retraso calculado (d); S es el coeficiente de almacenamiento (1/m) que en este estudio es una constante igual a 0.2; L es el espesor del estrato (m); y k es la conductividad hidráulica (m/d).

3.4. Datos empleados

A continuación se presentan por separado los datos empleados para las delegaciones Xochimilco y Magdalena Contreras.

3.4.1. *Xochimilco*. En esta delegación se emplearon registros de cinco estaciones climatológicas. De éstas, tres se ubican en la región Oeste, y dos en la región Este (Tabla 5 y Figura 2).

Tabla 5. Estaciones climatológicas usadas como fuente de información para la precipitación (DGCOH 2007)

Región Este									
clave	nombre de 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	Tlahuac	1961-2006	45	19°15'46''	99°00'13''	2,240	39	71	483

Región Oeste									
clave	nombre de 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

Se seleccionaron 23 pozos (Tabla 6 y Figura 2) de 79 existentes en la delegación Xochimilco, por contar éstos por lo menos con diez datos por mes y 30 años de registro para la conductividad, los SDT y coliformes fecales. De los pozos seleccionados, 13 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 m a 400 m y tienen niveles piezométricos de 10 m a más de 85 m. Los 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 m a 120 m (SACM 2007).

Tabla 6. Pozos de análisis en Xochimilco para el periodo de 1980-2007 (SACM 2007)

Región Este											
clave	nombre pozo	conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)				SDT (mg/L)				CT	CF
		promedio	DS	máx	mín	promedio	DS	máx	Mín		
2	El Mirador 2	453	215	1151	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	1097	240	567	114	772	196	19	2
69	S – 12	371	200	1500	120	235	73	418	116	2	1
70	S – 13	375	118	1100	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 pozo	conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)				SDT (mg/L)				CT	CF
		promedio	DS	máx	mín	promedio	DS	máx	mín		
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	1377	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

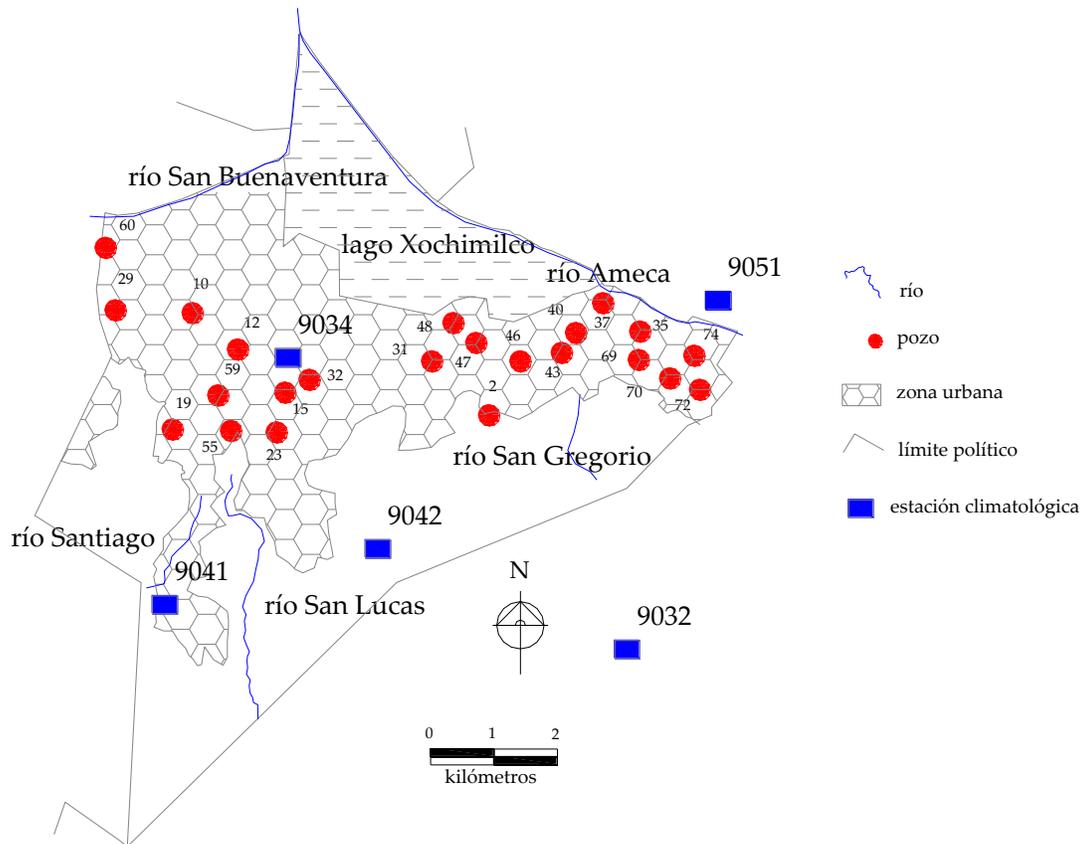


Figura 2. Pozos de extracción y estaciones climatológicas de Xochimilco

3.4.2. *Magdalena Contreras*. En esta delegación se emplearon datos provenientes de cinco estaciones climatológicas ubicadas tres de ellas en la región Norte (urbana), y dos en la región Sur dentro de la zona de conservación ecológica (Tabla 7 y Figura 3).

Tabla 7. Estaciones climatológicas usadas como fuente de información para la precipitación (DGCOH 2007)

Región Norte (urbana)									
clave	nombre de estación	periodo de datos	periodo (años)	latitud	longitud	altitud (msnm)	promedio (mm)		
							mensual	lluvias	anual
9037	Presa Anzaldo	1953-1988	35	19°19'0''	99°13'0''	2,400	72	134	867
17	Tanque Lienzo	1993-2007	19	19°20'15''	99°14'0''	ND	69	154	807
24	San Francisco	1993-2007	14	19°18'45''	99°14'15''	ND	63	122	756

Región Sur (conservación ecológica)									
clave	nombre de estación	periodo de datos	periodo (años)	latitud	longitud	altitud (msnm)	promedio (mm)		
							mensual	lluvias	anual
9030	La Venta	1949-1985	37	19°20'00''	99°18'00''	2,850	96	170	1147
9019	D. Leones	1961-1987	27	19°18'00''	99°18'00''	2,220	109	208	1310

Para los registros de conductividad, SDT y coliformes fecales, se emplearon datos de cinco pozos perforados en la región Norte de la delegación cerca de la zona urbana (Tabla 8 y Figura 3). Su profundidad varía de 175 a los 300 m. El nivel piezométrico se incrementa en dirección Este, en donde los pozos registran profundidades entre 70 y 180 m, en niveles que no han experimentado grandes variaciones desde hace 50 años, cuando fueron perforados.

Tabla 8. Pozos de análisis en Magdalena Contreras para el periodo de 1980-2007 (SACM 2007)

clave	nombre pozo	conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)				SDT (mg/L)				CT	CF
		promedio	DS	máx	mín	promedio	DS	máx	mín	# muestras	
1	Anzaldo	268	30	304	163	234	34	368	196	5	2
2	Padierna 4	320	54	484	192	245	45	398	156	5	1
3	Pedregal 2	282	35	414	190	225	28	288	104	8	1
4	Batam	400	25	434	306	300	43	404	252	5	0
5	Dalias	336	62	450	222	298	83	416	192	2	0

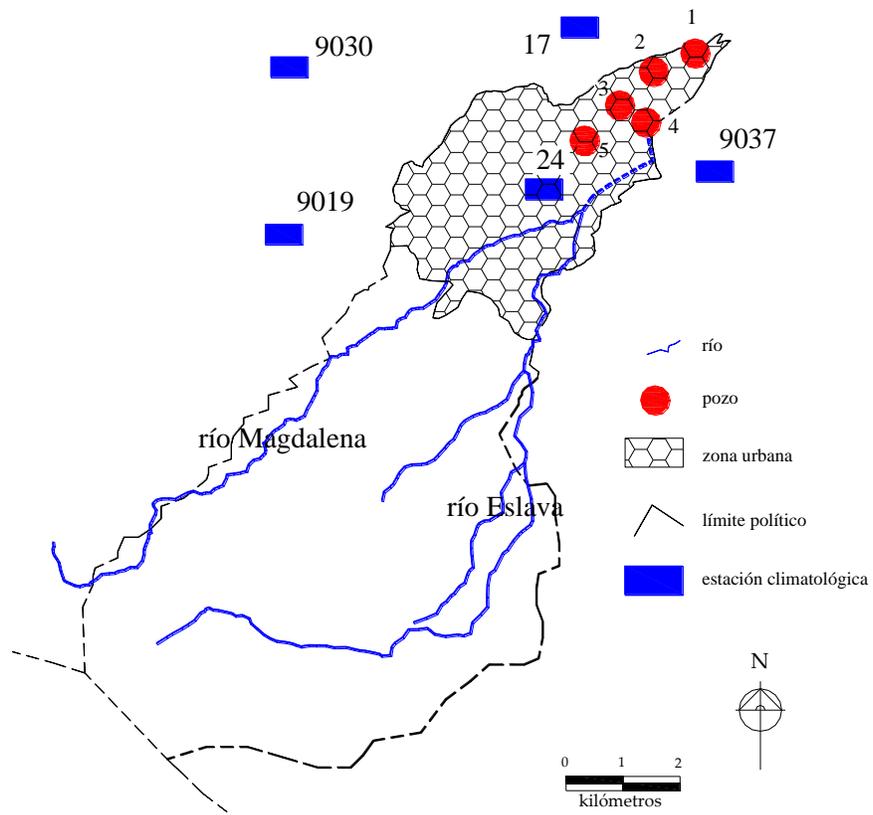


Figura 3. Pozos de extracción y estaciones climatológicas de Magdalena Contreras

4. Resultados

A continuación se presentan por separado los resultados obtenidos en las delegaciones Xochimilco y Magdalena contreras. Se siguió el procedimiento descrito en la metodología. En cada apartado se describe con detalle el desarrollo de cada etapa.

4.1. Xochimilco

4.1.1. Integración de base de datos

Al analizar las bases de datos de precipitación a partir del valor umbral de 121 mm se detectó el valor atípico de 219 mm en el registro de la estación Muyuguarda el 23 de junio del 2005. Este valor se comparó con la base de datos para esa misma fecha, se halló que en la estación auxiliar San Francisco Tlalnepantla se registró una precipitación de 9 mm. Se sustituyó el dato original por medio del método de regresión lineal simple; de esta manera el nuevo valor calculado fue de 13 mm.

Para el caso de los datos de calidad del agua, se detectaron los valores erróneos de conductividad de 8,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 7,598 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en los días 11 de junio y 11 de mayo del 2007 y de 9,689 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en conductividad y de 6,636 mg/L para los SDT el 22 de mayo del 2006 en el pozo Tulyehualco 6. Se sustituyeron estos valores por medio del método de regresión lineal simple con los nuevos calculados de 820 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 760 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 968 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 664 mg/l, respectivamente. También, en el pozo San Luis 4 se encontraron los valores de

conductividad y SDT en cada uno de 5,400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 3,644 mg/L, el 22 de agosto de 1989; 5,400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 3,712 mg/L el 25 de mayo de 1989; así como de SDT de 1,644 mg/L el 28 de enero; 1,832 mg/L el 19 de abril y 1,536 mg/L el 13 de diciembre, todos en el año de 1993. Los anteriores valores, se sustituyeron por 2,400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 964 mg/L; 2,400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 712 mg/L; 644 mg/L, 832 mg/L y 536 mg/L, respectivamente. Por último, en el pozo San Luis 6 se detectó el valor de 1,632 mg/L el 24 de junio de 1994 por lo que se sustituyó por 632 mg/L, de igual manera usando el método de regresión lineal simple.

4.1.2. Análisis de los datos de precipitación y de calidad del agua

En Xochimilco durante el periodo 1981 a 2007 al mes llovió en promedio 105 mm en la temporada de lluvias, y 8 mm en la de estiaje. Esta cantidad distribuida en aproximadamente 15 días para la temporada de lluvias, y en 3 días para la temporada de estiaje. La para una precipitación acumulada anual de 681 mm (Figuras 4 y 5). Se detectó diferencia en el promedio de la precipitación entre las regiones Este y Oeste como se muestra en la tabla 9.

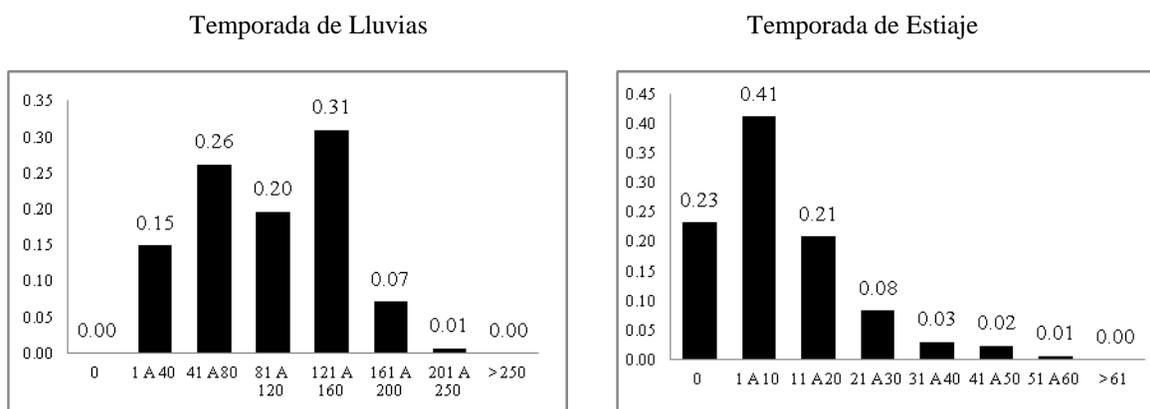


Figura 4. Análisis de frecuencias de los datos de precipitación mensual en la región Oeste de Xochimilco (1980-2007)

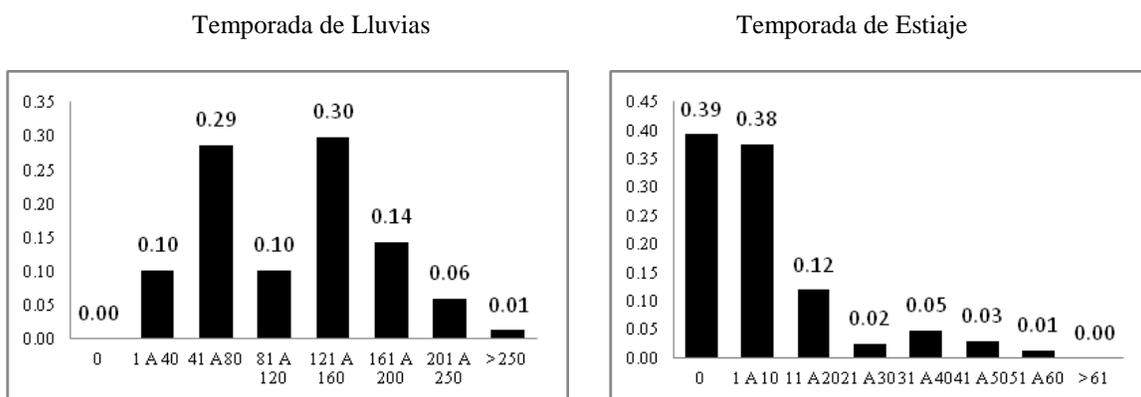


Figura 5. Análisis de frecuencias de los datos de precipitación mensual en la región Este de Xochimilco (1980-2007)

Tabla 9. Precipitación media y días lluviosos en Xochimilco en el periodo 1980-2007

Región	Temporada de lluvias		Temporada de estiaje		media anual (mm)
	Media mensual (mm)	Días de lluvia	Media mensual (mm)	Días de lluvia	
Delegación	105	15	8	3	681
Este	114	16	8	3	729
Oeste	97	14	9	3	634

Se consideró que precipitaciones mensuales superiores a los 180 mm son extraordinarias por tener una baja probabilidad de ocurrencia; sin embargo para aquellos meses cuando

ocurrieron cuatro días consecutivos de lluvia extrema (>45mm) la precipitación mensual extraordinaria (>180 mm), es más probable (Tabla 10).

Tabla 10. Probabilidad y periodo de retorno para la precipitación extraordinaria 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

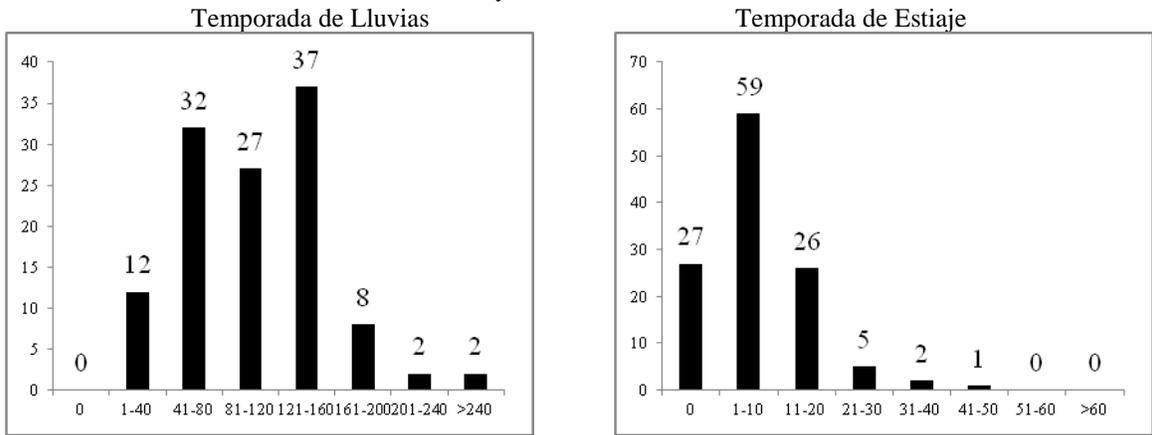
El resultado de la prueba de homogeneidad (*t-Student* y *Mann-Whitney* para $\alpha = 0.05$) aplicada a los datos de precipitación mensual para el periodo de análisis, señala que en la región Oeste la varianza de los datos de precipitación mensual para ambas temporadas es mayor hasta en un 75% en comparación con la región Este; es decir, existe mayor dispersión. La prueba de aleatoriedad indica que se presentan dos ciclos de valores extraordinarios, el primero cada año, y el segundo aproximadamente cada tres a cuatro meses. La prueba de independencia, señala a través de su correspondiente correlograma, la existencia de una mayor cantidad de valores extraordinarios (>180 mm) a partir de la década de los ochenta, en comparación con las décadas anteriores, a pesar de que la precipitación anual es menor. Por último, el resultado de la prueba de normalidad indica que los datos no se ajustan a esta distribución de probabilidad, sino más bien a la función de distribución de probabilidad de tipo Gumbel (*Shapiro-Wilk* para $\alpha = 0.05$) (Anexo C).

Ahora bien, para construir las proyecciones a futuro bajo condiciones del escenario A2 de cambio climático, se generaron anomalías de precipitación mensual para un futuro a corto

plazo (2011-2030) y a mediano plazo (2031-2050), a través del modelo SIECCRe para la región que ocupa las delegaciones Xochimilco y Magdalena Contreras; cabe recordar que la resolución del modelo es de 50 km²; por lo cual no se distingue entre regiones Este y Oeste. Los resultados de éstas anomalías en porcentaje indican que para el periodo 2011-2030 se observa un incremento promedio anual del 1.4%; los meses con mayor variación positiva son mayo y junio con incrementos entre el 16% y el 30%; para el resto de los meses lluviosos se observa un decremento de -9% hasta -18%. Para la temporada de estiaje en todos los meses se detecta un incremento promedio del 2.4%. Para el periodo 2031-2050, se observa un decremento en la precipitación mensual de -0.5% en promedio; sin embargo, en los meses de mayo y junio se observan incrementos entre el 12% y el 16% (Anexo C).

Estas anomalías expresadas en porcentaje se acoplaron a la datos mensuales de precipitación histórica mediante el empleo del modelo PAR(2); con esto se obtuvieron nuevos datos para las proyecciones a futuro de corto y mediano plazo. En las figuras 6 y 7 se ilustra la modificación en la frecuencia de las lluvias por región.

Proyección 2011-2030



Proyección 2031-2050

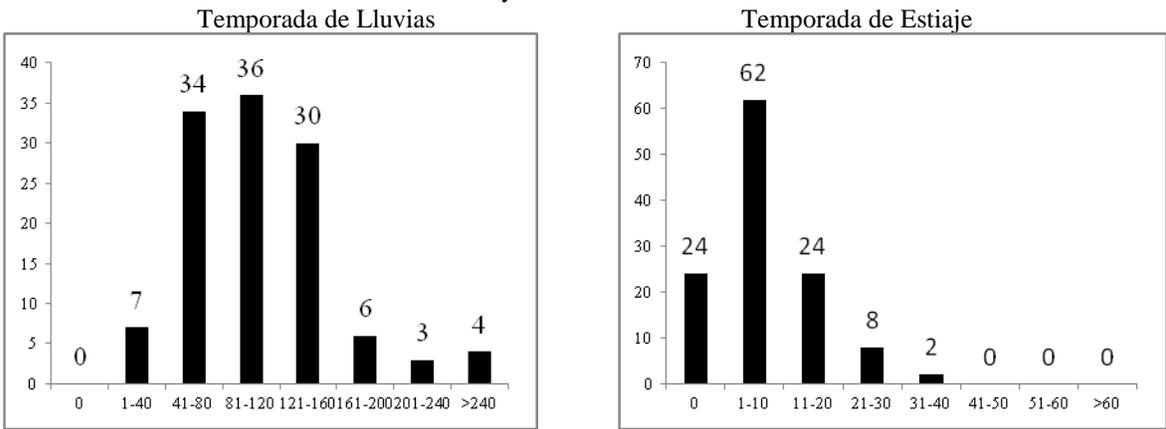
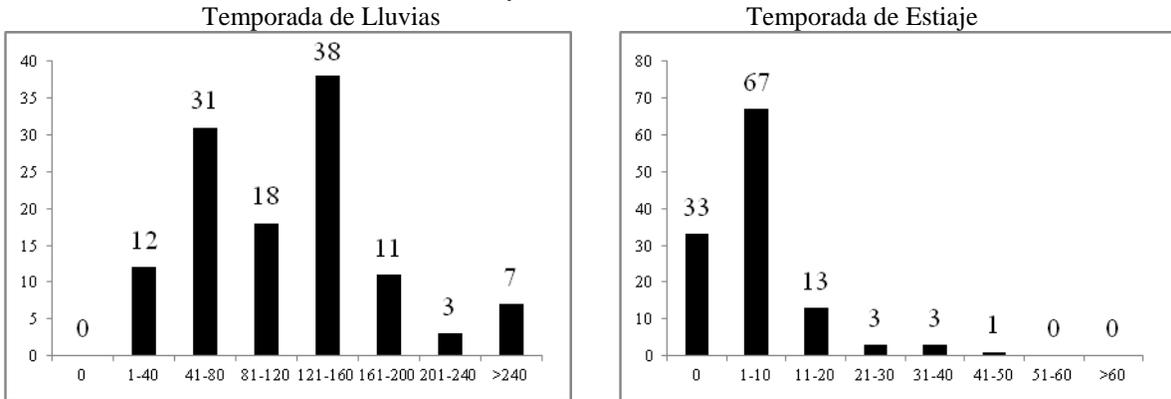


Figura 6. Análisis de frecuencias de los datos de precipitación mensual en la región Este de Xochimilco

Proyección 2011-2030



Proyección 2031-2050

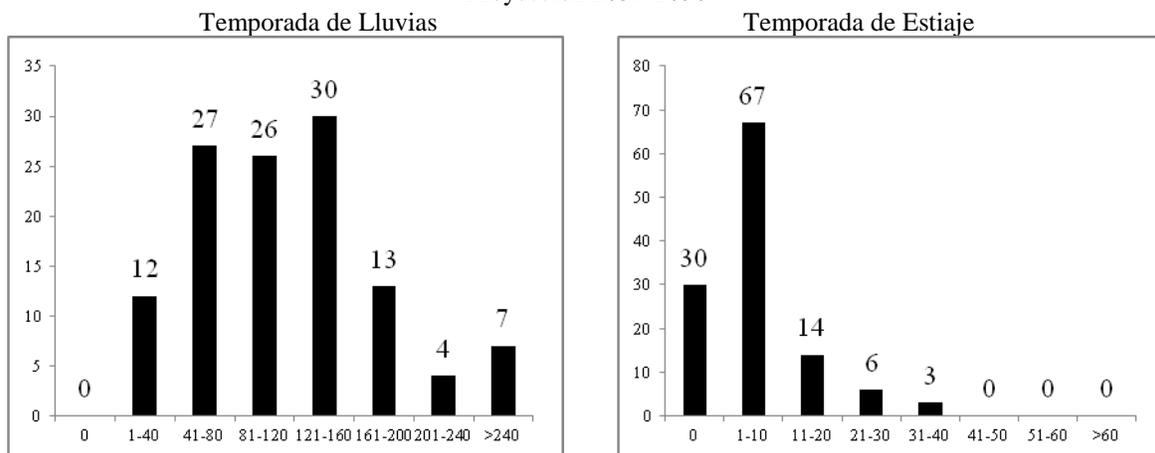


Figura 7. Análisis de frecuencias de los datos de precipitación mensual en la región Oeste de Xochimilco

El análisis de los datos de calidad del agua de los pozos seleccionados en cada región de la delegación Xochimilco resulta en los valores promedio para la región Este de 568 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la conductividad, 425 mg/L en los SDT, y un nivel de detección de coliformes fecales en 26 muestras de 257 (10%). En cambio, en la región Oeste la conductividad promedio fue de 533 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los SDT de 399 mg/L y sólo hubo presencia de coliformes fecales en nueve muestras de 244 (3.7%). Los valores máximos en la región Este fueron 1,600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en conductividad y 1,700 mg/L en SDT; en la región Oeste, estos máximos fueron de 1,150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 902 mg/L, respectivamente (Figuras 8 y 9).

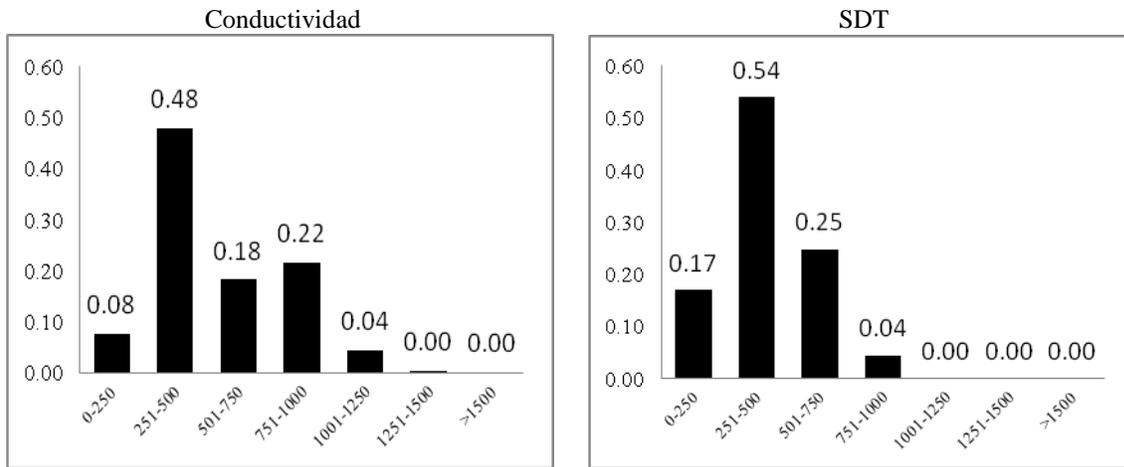


Figura 8. Análisis de frecuencias de los datos mensuales de calidad del agua en la región Oeste de Xochimilco (1980-2007)

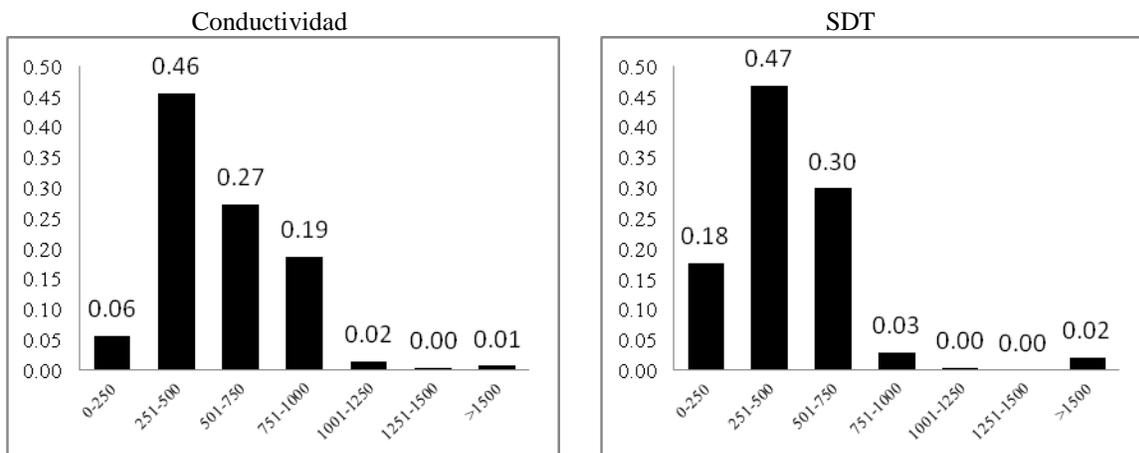


Figura 9. Análisis de frecuencias de los datos mensuales de calidad del agua en la región Este de Xochimilco (1980-2007)

Las pruebas estadísticas aplicadas a los datos mensuales de calidad del agua señalan que en ambas regiones no existe modificación en los valores promedios de conductividad y de SDT cuando ocurren valores extremos de 45 mm de precipitación 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, ambos con un $p_{\text{value}} > 0.253$). Sin embargo, sí se halló diferencia significativa entre regiones para el caso de los datos

mensuales; esto con base a los resultados de las pruebas de homogeneidad (*t-Student* y *Mann-Whitney* para $\alpha=0.05$) (Anexo C).

La prueba de aleatoriedad aplicada indica que los valores extraordinarios detectados de conductividad y de SDT presentan periodicidad de tres años en la región Oeste y de seis meses en la región Este. En cuanto a los datos de coliformes fecales, no fue posible detectar tanto periodicidad como diferencia significativa entre las temporadas de estiaje y lluvias, debido a la escasez de datos.

Una vez analizadas y validadas las bases de datos mensuales de las variables de análisis, se procedió a relacionar las mismas entre sí. Se encontró que existe una relación muy estrecha entre la conductividad y los SDT ya que se hallaron coeficientes de regresión superiores $R = 0.8$ en ambas regiones. Es por esto que se determinó emplear únicamente los datos de conductividad para relacionarlos con la presencia de coliformes fecales y posteriormente con la precipitación.

De esta manera, se realizó un análisis de frecuencias entre los datos de coliformes fecales y los datos de conductividad, para relacionar los casos de muestras positivas y negativas de coliformes respecto a los valores promedio de conductividad considerando la varianza. Se observa que hay una probabilidad del 10% de encontrar coliformes fecales en las muestras de la región Este y una probabilidad del 4% en la región Oeste. Estas a su vez, se relacionan con la conductividad de manera que para valores superiores es más probable que se hallen coliformes fecales en las muestras como se indica en la figura 10 y la tabla 11.

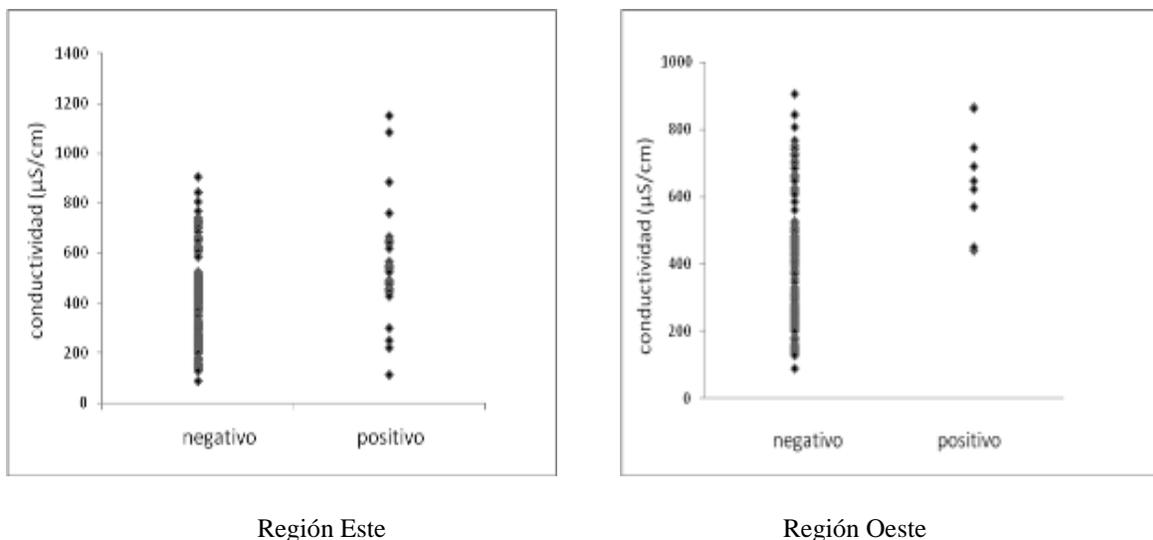


Figura 10. Total de muestras que resultan positivas en coliformes fecales en relación con la conductividad

Tabla 11. Probabilidad de encontrar muestras positivas de coliformes fecales por rango de conductividad

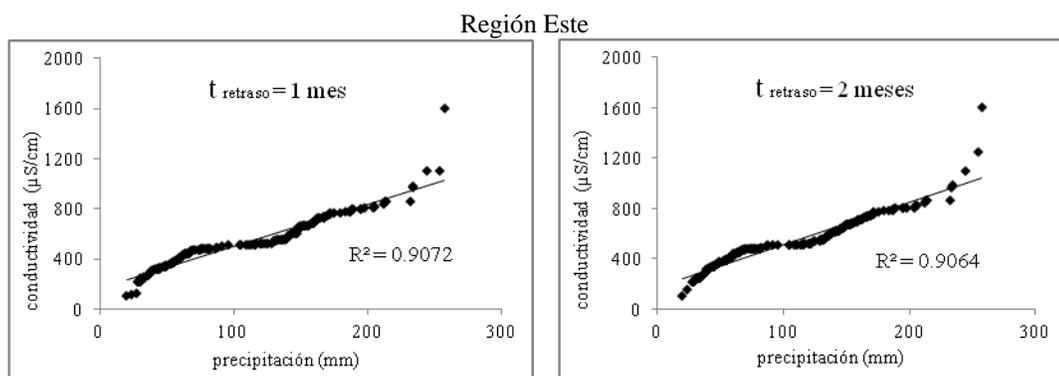
Rango conductividad (µS/cm)	Región Este	Región Oeste
100-200	4%	0%
200-300	8%	0%
300-400	4%	0%
400-500	27%	22%
500-600	23%	11%
600-700	19%	33%
700-800	4%	11%
>800	12%	22%

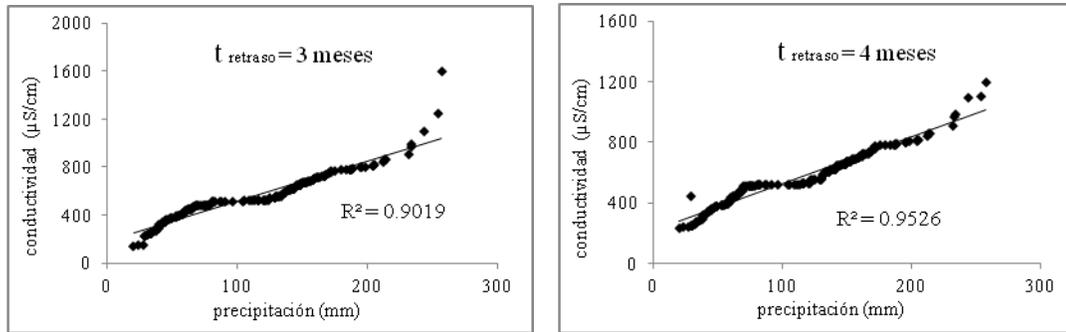
Posteriormente se relacionaron los datos mensuales de precipitación entre los datos de conductividad para diferentes tiempos de retraso (t_e). Se observa que para cuatro meses en ambas regiones se obtiene el máximo coeficiente R (Figura 11). Con este tiempo, se apreciaron incrementos hasta por arriba del 60% en los indicadores de calidad del agua en relación con los promedios históricos (Tabla 12). Sin embargo, cabe señalar que este procedimiento arroja valores con bajo nivel de significancia estadística, por lo cual representa una estimación del tiempo de retraso que será comparado con el tiempo de

retraso teórico y el referido en los antecedentes que se espera no rebase los 12 meses por las condiciones de flujo rápido detectadas en el acuífero, y sirve para realizar el cálculo posterior que relaciona la precipitación y la calidad del agua.

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

Año	Región Este					Región Oeste				
	precipitación extraordinaria mensual (mm)	conductividad máxima mensual ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	% incremento respecto de la media	SDT máxima mensual (mg/L)	% incremento respecto de la media	precipitación extraordinaria mensual (mm)	conductividad máxima mensual ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	% 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	1150	258%	992	291%
1992	160	1100	191%	1700	520%	140	950	196%	902	255%
1994	162	1600	323%	976	256%	141	1007	214%	656	158%
1997	204	1151	204%	808	195%	183	942	193%	780	207%
1998						182	868	170%	650	156%
2001	244	968	156%	780	185%					
2002	204	1250	231%	712	160%					
2003										
2004	257	905	139%	540	97%	202	1200	274%	780	207%
2005	254	1100	191%	750	174%					
Promedio mensual	114	378		274		97	321		254	





Región Oeste

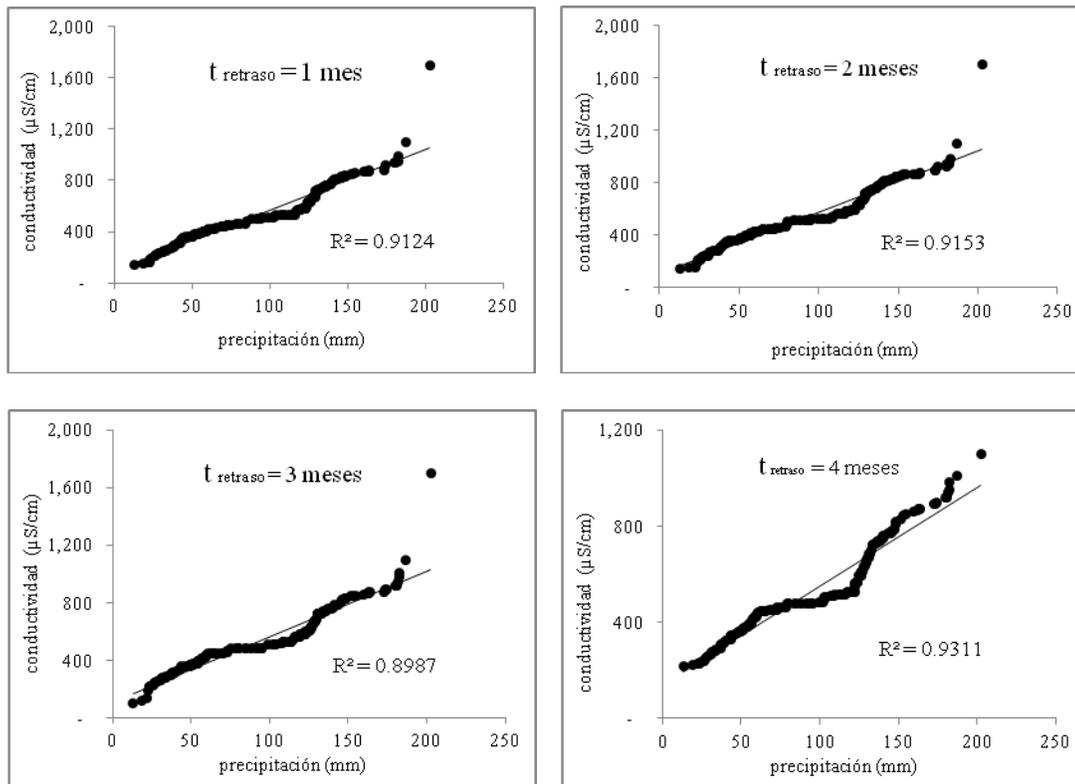


Figura 11. Gráficos de dispersión de calidad del agua y precipitación para diferentes tiempos de retraso

Con base en un análisis de frecuencias de los datos históricos de precipitación en conjunto con los datos de conductividad y coliformes fecales, se observó que se detectan estos últimos como se había mencionado en la región Este en 100 de cada 1000 muestras (10% de probabilidad), de estas 16 ocurren para valores menores que 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y precipitaciones menores a la media de 114 mm; 50 de los casos ocurren para los valores de

conductividad entre 400 y 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$; y 34 casos ocurren para valores de conductividad superiores a 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y precipitaciones superiores a 120 mm. En la región Oeste, en promedio se detectan coliformes fecales en 40 de cada 1000 muestras (4% de probabilidad), de estos 14 casos ocurren para los valores de conductividad entre 400 y 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y precipitaciones hasta 150 mm; y 26 casos ocurren para valores superiores a 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de conductividad y precipitaciones superiores a 150 mm.

Una vez caracterizada y calculada la relación entre los datos de calidad del agua y de precipitación para los datos históricos en el periodo 1981-2007. La metodología propuesta indica que se calculará esta relación para las proyecciones a futuro de la precipitación. Para esto, los datos de precipitación para la base histórica y para los datos generados para un futuro de corto (2011-2030) y mediano plazo (2031-2050), se ajustaron a la función Gumbel en forma univariada, con esto se estimaron los parámetros de escala v , y de ubicación α (Tabla 13).

Tabla 13. Parámetros estimados por máxima verosimilitud de la función Gumbel univariada

Escenario	Base	Futuro Corto Plazo	Futuro Mediano Plazo	Base	
Variable	precipitación acumulada mensual (mm)			conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	SDT (mg/l)
Parámetro	Región Este				
v	82.0	87.4	87.2	476.0	348.0
α	46.1	48.3	54.9	163.4	139.0
	Región Oeste				
v	69.6	74.0	75.3	439.1	342.7
α	39.4	40.2	41.5	167.1	88.1

Los parámetros estimados se emplearon para ajustar las variables de interés por medio de la función Gumbel en forma mixta para calcular una relación de tipo lineal conjunta y condicional llamada predictiva, entre la conductividad y los SDT en función de la precipitación. Como se mencionó anteriormente para el escenario base (1980-2007), para el futuro a corto plazo (2011-2030), y para el futuro a mediano plazo (2031-2050). Las funciones con mayor coeficiente de regresión se muestran en la tabla 15, el resto de las funciones predictivas se muestran en Anexo C.

Tabla 14. Funciones predictivas de relación lineal en forma conjunta y condicional para la conductividad y los SDT en función de la precipitación

Región Este					
Escenario	Periodo	Relación conductividad		Relación SDT	
		Función	<i>R</i>	Función	<i>R</i>
Base	1980-2007	$y = -0.9117x + 1.0319$	0.9729	$y = -0.8462x + 1.0256$	0.9331
Futuro corto plazo	2011-2030	$y = -0.8573x + 1.0383$	0.9281	$y = -0.8849x + 1.0505$	0.9302
Futuro mediano plazo	2031-2050	$y = -0.8414x + 1.0339$	0.9274	$y = -0.8833x + 1.0458$	0.9338

Región Oeste					
Escenario	Periodo	Relación conductividad		Relación SDT	
		Función	<i>R</i>	Función	<i>R</i>
Base	1980-2007	$y = 0.9335x - 0.1155$	0.8880	$y = -0.7453x + 1.0012$	0.9395
Futuro corto plazo	2011-2030	$y = 0.9512x - 0.1331$	0.8765	$y = -0.7779x + 1.0064$	0.9506
Futuro mediano plazo	2031-2050	$y = 0.9189x - 0.1082$	0.8651	$y = -0.7849x + 1.0058$	0.9519

Con el empleo de los parámetros de las funciones resultantes del modelo Gumbel mixto a través de la forma derivada de esta misma (Ecuación 5), se obtuvieron los valores en forma conjunta y condicional para condiciones del escenario base (1980-2007) y de cambio climático a corto y mediano plazo (2011-2030 y 2031-2050), los resultados se muestran en las tablas 15 y 16.

Tabla 15. Valores de conductividad y SDT en función de la precipitación en la región Este de Xochimilco

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
100	215	48%	383	48%	272	56%	228	53%	278	48%	232	52%
110	491	41%	470	42%	367	47%	287	47%	342	42%	294	46%
120	453	34%	560	37%	456	42%	188	42%	409	36%	359	40%
150	657	25%	691	29%	619	32%	314	34%	500	29%	461	32%
180	844	24%	804	24%	858	28%	375	32%	523	28%	501	29%
200	854	18%	844	23%	904	21%	458	26%	604	23%	601	23%
220	898	16%	905	20%	969	18%	484	23%	645	21%	662	20%
230	965	14%	955	18%	1034	16%	513	21%	681	19%	702	18%
240	938	14%	970	18%	1081	14%	501	20%	690	18%	729	17%
250	940	13%	999	17%	1136	13%	497	18%	710	18%	762	15%
260	935	12%	1031	16%	1194	12%	479	17%	732	17%	796	14%
tolerancia (\pm)	16%		18%		18%		28%		26%		26%	

Tabla 16. Valores de conductividad y SDT en función de la precipitación en la región Oeste de Xochimilco

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
100	243	47%	372	44%	371	45%	157	57%	152	59%	132	60%
110	459	38%	435	39%	433	40%	211	51%	196	53%	187	54%
120	379	33%	499	34%	497	34%	130	45%	253	48%	243	49%
150	543	26%	627	27%	622	28%	267	35%	360	38%	353	39%
180	694	23%	686	27%	680	27%	343	31%	417	33%	414	34%
200	737	18%	801	19%	793	21%	449	23%	532	25%	532	26%
220	776	15%	867	16%	858	17%	499	19%	608	21%	612	22%
230	816	14%	911	12%	901	13%	536	17%	651	19%	656	19%
240	803	13%	932	12%	923	13%	542	16%	688	17%	696	18%
250	800	13%	961	11%	952	12%	552	14%	729	15%	738	16%
260	783	12%	990	11%	981	11%	552	12%	771	14%	782	14%
tolerancia (\pm)	17%		18%		18%		25%		28%		29%	

Al analizar los resultados obtenidos bajo condiciones de cambio climático, se observan cambios en las probabilidades de ocurrencia de las precipitaciones. Posteriormente estos nuevos valores de precipitación condicionados a valores de conductividad para los escenarios futuros se vincularon a través del método empleado para el caso de los datos históricos, los cuales a su vez, ya se encuentran en función de una probabilidad de ocurrencia de coliformes fecales.

En la región Este se observa que los valores de conductividad inferiores a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se presentan para la proyección al 2011-2030 a partir de lluvias de 100 mm con una probabilidad del 48%, y para la proyección al 2031-2050 a partir de 110 mm con una probabilidad del 47%; los valores de conductividad entre 400 y 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la proyección al 2011-2030 se presentan a partir de lluvias de 100 mm hasta 115 mm con una probabilidad del 36%, y de 110 mm hasta 130 mm para la proyección al 2031-2050 con una probabilidad del 37%; los valores superiores a 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se presentan para la proyección al 2011-2030 con lluvias superiores a 115mm con una probabilidad de 30%, y superiores de 130 mm para la proyección al 2031-2050 con una probabilidad del 32%.

Para el caso de la región Oeste para ambas proyecciones al 2011-2030 y al 2031-2050, los valores de conductividad entre 400 y 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ presentan con lluvias a partir de 100 mm hasta 135 mm con una probabilidad del 48%; y los valores superiores a 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se presentan con precipitaciones superiores a 135 mm con una probabilidad de 27%.

A continuación se muestra en la tabla 17, un resumen de los valores de precipitación y de conductividad más representativos a partir de los cuales se hallaron coliformes fecales en las muestras, esto para el escenario base y para las proyecciones a futuro.

Tabla 17. Valores de precipitación relacionados con la conductividad y coliformes fecales

Región Este				
conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	precipitación (mm)			% detección coliformes fecales
	base	2011-2030	2031-2050	
< 400	< 114	< 100	< 110	16
400 - 600	114 - 120	100 - 115	110 - 130	50
> 600	> 120	> 115	> 130	34

Región Oeste				
conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	precipitación (mm)			% detección coliformes fecales
	base	2011-2030	2031-2050	
< 400	-	-	-	0
400 - 600	97 - 150	100 - 135	100 - 135	33
> 600	> 150	> 135	> 135	67

4.1.3. Vulnerabilidad del acuífero

Al aplicar el método GOD en la delegación Xochimilco, se halló diferencia en el grado de vulnerabilidad del acuífero entre las regiones Este y Oeste. La región Este presentó un grado Alto (0.50) que según la tabla 4, es vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son rápidamente absorbidos o transformados) en muchos escenarios; esto se infiere ya 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); es decir, es vulnerable sólo a contaminantes que se preservan cuando son descargados en forma continua y amplia durante periodos largos; esto se debe a que el acuífero es semiconfinado (0.4), con estratos de roca porosa consolidada (basaltos, tobas y cenizas volcánicas) (0.7), el nivel piezométrico promedio de los pozos es mayor a los 20 m (0.7), aunque existen fracturas en la roca que da lugar a flujos preferenciales (1.0).

En cuanto al tiempo de retraso calculado (t_c) a través de la ecuación 1, se revela la diferencia de la vulnerabilidad del acuífero entre las regiones 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 (Tabla 18).

Tabla 18. Tiempo de retraso calculado t_c en el acuífero principal en Xochimilco

Zona	Estrato	Espesor promedio del estrato*	Conductividad hidráulica		Tiempo de respuesta		
			L (m)	k (m/d)		T (d)	
				máximo	mínimo	mínimo	máximo
Este	Qb	200	2505.6	1.4688	3	5447	
		150			149	12705	
	Qal	80	30.24	0.3542	42	3707	
Oeste	Qla	20	0.0864	0.000864	926	92593	
	Tpba	20			0.16	71	
		170	596.16	1.1232	10	5146	

A partir del análisis del nivel de vulnerabilidad en la delegación Xochimilco, se observa que el acuífero de la región Este al presentar un nivel de vulnerabilidad alto, es más probable que la calidad del agua se vea modificada, incluso que sobrepasen los niveles establecidos por la normatividad ante la ocurrencia de eventos de precipitación extraordinaria; en contraste, esto se reduce significativamente en la región Oeste que presenta un nivel de vulnerabilidad bajo. Este resultado es congruente con lo analizado anteriormente al vincular las variables por medio del modelo Gumbel mixto; ahí se aprecia de igual forma, una diferencia entre regiones en la probabilidad de ocurrencia de niveles de conductividad y SDT en función de la precipitación, siendo mayor en la región Este que en la Oeste.

4.2. Magdalena Contreras

4.2.1. Integración de base de datos

Al analizar las bases de datos de precipitación, se observó la presencia del dato erróneo de 142 mm el día 30 de septiembre de 1985 en la estación La Venta, el cual fue sustituido por un nuevo calculado de 14.2 mm. En el caso de los datos de calidad del agua, en la revisión realizada en todos los puntos de muestreo no se hallaron valores por encima del umbral para los indicadores de estudio.

4.2.2. Análisis de los datos de precipitación y de calidad del agua

En Magdalena Contreras durante el periodo 1980 a 2007 llovió en promedio al mes 149 mm en 16 días en la temporada de lluvias, y 13 mm en tres días en la de estiaje, siendo la media anual de 1,025 mm. Se aprecia diferencia en la precipitación entre la región Norte o urbana y la Sur o de conservación ecológica, como se observa en la tabla 19.

Tabla 19. Precipitación media y días lluviosos en Magdalena Contreras en el periodo 1980-2007

Región	Temporada de lluvias		Temporada de estiaje		media anual (mm)
	Media mensual (mm)	Días de lluvia	Media mensual (mm)	Días de lluvia	
Delegación	149	16	13	3	974
Norte	131	16	14	3	871
Sur	165	15	14	3	1,077

La precipitación mensual extraordinaria, es decir para valores superiores a los 180 mm, es más probable que suceda cuando ocurren cuatro días consecutivos de precipitación extrema (> 45 mm) como se observa en la tabla 20.

Tabla 20. Probabilidad y periodo de retorno de la precipitación mensual por regiones de Magdalena Contreras para el periodo 1980-2007

Precipitación (mm)	Región Urbana		Región Conservación	
	Probabilidad	Periodo de retorno (meses)	Probabilidad	Periodo de retorno (meses)
180	3%	31	5%	21
200	4%	24	2%	48
220	8%	13	15%	7

Ahora bien, el resultado de las pruebas estadísticas (Anexo C) señala que existe un incremento significativo de hasta el 100% en la dispersión en la precipitación mensual en la región Norte; en contraste, en la región Sur, no se experimentaron cambios significativos en la precipitación acumulada, ni en la cantidad de días lluviosos. Todo esto con base en la prueba de homogeneidad (*t-Student* y *Mann-Whitney* para $\alpha = 0.05$). La prueba de aleatoriedad aplicada a través de análisis espectral de frecuencia señala la existencia de dos ciclos similares para ambas regiones, el primero corresponde al anual y el segundo cada tres años y seis meses. La prueba de independencia muestra la presencia de valores extremos (>180 mm) y que los datos mensuales tanto para la temporada de estiaje como para la de lluvia, son estadísticamente dependientes entre sí.

En cuanto a los datos de calidad del agua, los cinco pozos analizados se ubican en la región Norte, el promedio de conductividad es de 326 ± 64 $\mu\text{S}/\text{cm}$, de 256 ± 50 mg/L en SDT, y se detectaron coliformes fecales en cuatro de 208 muestras (2%). No se observaron valores superiores a la normatividad en ningún caso.

Tampoco se observa un incremento significativo en los valores promedios de conductividad y de SDT cuando ocurren valores extremos de precipitación en un día (>45 mm) (para $t = 1.645$ con $\alpha = 0.05$, $t_0 = 0.002$ para conductividad y 0.004 para SDT en la región Sur, y de 0.001 y 0.002 , respectivamente para la región Norte, ambos con un $p_{\text{value}} > 0.212$). Entre regiones Sur y Norte, la diferencia en la precipitación es significativa según los resultados de las pruebas de homogeneidad (*t-Student* y *Mann-Whitney* para $\alpha=0.05$). Por otra parte, la

prueba de normalidad (*Shapiro-Wilk* para $\alpha = 0.05$) señala que los datos no se ajustan a esta distribución de probabilidad, sino mas bien a la tipo Gumbel.

Dada la escasez de datos coliformes fecales en ambas regiones, no fue posible realizar la prueba de aleatoriedad a través de un análisis espectral de frecuencia, ni la relación que guardan estos con la conductividad y los SDT; sin embargo, se advierte que esta relación es similar a la mostrada en el caso de Xochimilco. A continuación se muestran los resultados de la caracterización de las variables que fue posible realizar para la región Norte donde se encuentran los pozos. Al analizar la base de datos mensuales de precipitación, se detectó la presencia de tres periodos de precipitación extraordinaria (Tabla 21).

Tabla 21. Periodos extraordinarios de precipitación en la región Norte de Magdalena Contreras

año	lluvia promedio (mm)
1992	173
1994	168
2008	165

En cuanto al análisis de la base de datos mensual de calidad del agua, no se detectó ningún valor que se aproximara al límite permitido por la normatividad; únicamente se hallaron cinco meses con valores por arriba de la media (Tabla 22).

Tabla 22. Valores máximos de calidad del agua en la región Norte de Magdalena Contreras

fecha	conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	SDT (mg/L)
diciembre 1998	404	380
julio 1999	434	404
mayo 2005	424	316
enero 2006	484	
agosto 2007	450	

Al comparar los periodos de precipitación de la región Norte con los datos máximos de calidad del agua, además de que no coinciden, no existe algún tipo de relación desde el punto de vista estadístico. De esta manera, en ambas regiones dada las condiciones de escasez de datos, de que se no se halló algún valor de calidad del agua que se acercara al límite permitido por la normatividad, y que no se encontró evidencia estadística de que los máximos tuvieran relación alguna con los periodos extraordinarios de precipitación; no fue posible ajustar los datos a la función de distribución tipo Gumbel para obtener la probabilidad marginal de ocurrencia de los datos de calidad del agua, y por lo tanto, no se realizó el ajuste a la función tipo Gumbel mixta para vincular precipitación con calidad del agua. Es por estos motivos que no se pudo obtener la probabilidad conjunta, condicional, así como los periodos de retorno asociados.

4.2.3. Vulnerabilidad del acuífero

En Magdalena Contreras, al aplicar el método GOD, se detectó en el acuífero un nivel de vulnerabilidad despreciable (0.03), dado que dado que se trata de un acuífero confinado (0.2) formado por arcillas lacustres (0.4), el nivel piezométrico es mayor a 20 m (0.7), y el tipo de suelo en el sitio de recarga tiene un alto contenido de arcilla (0.6). De acuerdo a la tabla 4, esto significa que presenta barreras naturales que impiden el ingreso de carga contaminante al acuífero.

Un grado de vulnerabilidad despreciable significa que existen elementos que impiden o retardan la contaminación de éste, aún ante la magnitud elevada de la amenaza, es por ello, que el riesgo de que se modifique la calidad del agua a niveles de que sobrepasen la

normatividad o que se detecte la presencia de coliformes fecales a causa de lluvias extraordinarias se estima que es poco probable. Desde el sitio de recarga hasta los pozos de extracción se calculó que el tiempo de respuesta aproximado puede variar de un mes hasta cerca de 100 años. Esta estimación se realizó bajo condiciones de flujo rápido, en condiciones estables de bombeo y sin problemas de infiltración del acuitardo superior por sobreexplotación (Tabla 23).

Tabla 23. Tiempo de retraso calculado t_c en el acuífero principal en Magdalena Contreras

Zona	Estrato	Espesor promedio del estrato L (m)	Conductividad hidráulica k (m/d)		Tiempo de respuesta T (d)	
			máximo	mínimo	mínimo	máximo
			Norte	Qb	500	2505.6
Tpba	120	596.16		1.1232	5	2564

Finalmente, se presenta un resumen de los resultados del estudio que incluyen los datos de precipitación, conductividad, SDT y coliformes fecales y su relación entre sí, por delegación y región de estudio para los datos históricos (1981-2007) y las proyecciones a futuro a corto (2011-2030) y mediano plazo (2031-2050), con la finalidad de realizar el análisis de estos y concluir (Tabla 24).

Tabla 24. Resumen de resultados del estudio

Delegación Xochimilco						
Región Este			Región Oeste			
Precipitación media (mm)						
Periodo	lluvia	estiaje	lluvia	estiaje		
1980-2007	114	8	97	9		
2011-2030	115	5	105	7		
2031-2050	118	5	108	7		

Calidad del agua						
Región Este			Región Oeste			
Periodo	conductividad (μ S/cm)	SDT (mg/L)	coliformes fecales (% muestras positivas)	conductividad (μ S/cm)	SDT (mg/L)	coliformes fecales (% muestras positivas)
1980-2007	568	425	10%	533	399	4%

Relación conductividad - coliformes fecales				
Región Este			Región Oeste	
Periodo	conductividad (μ S/cm)	coliformes fecales (% respecto al total de muestras positivas)	conductividad (μ S/cm)	coliformes fecales (% respecto al total de muestras positivas)
1980-2007	< 400	16%	< 400	0%
	400 - 600	50%	400 - 600	33%
	> 600	34%	> 600	67%

Delegación Magdalena Contreras

Precipitación media (mm)

Periodo	lluvia	estiaje
1980-2007	165	14

Calidad del agua

Periodo	conductividad (μ S/cm)	SDT (mg/L)	coliformes fecales (% muestras positivas)
1980-2007	326	256	2%

Vulnerabilidad

Grado	Despreciable	0.03
T retraso (d)	mínimo	24
	máximo	36605

5. Discusión y conclusiones

5.1. 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 fecales en el agua de los acuíferos localizados en las delegaciones Xochimilco y Magdalena Contreras. Sin embargo, no fue posible identificar el efecto para el último parámetro en forma directa por la insuficiencia de datos, por lo que sólo se discuten en este texto los resultados obtenidos para la conductividad y los SDT, así como la relación estadística de estos últimos con la presencia de coliformes fecales. Este análisis es útil ya que ambos parámetros son recomendados en la literatura como indicadores de contaminación (NOM-127-SSA1-1994).

Por otro lado, se ha mencionado que el riesgo de deterioro de la calidad del agua es una función de la magnitud de la precipitación extraordinaria (Madsen y Figdor 2007), la cual se ha incrementado debido a efectos de la variabilidad climática local (Magaña et al. 2002).

En cuanto al primer factor, en las últimas décadas los registros de lluvia indican un mayor número e intensidad de eventos extremos de precipitación. En la Ciudad de México, se atribuye principalmente al cambio del uso de suelo (Madsen y Figdor 2007; Changnon y Huff 1992) que ha provocado el fenómeno de “isla de calor” (Jáuregui, 2005); esto ha traído como consecuencia una mayor contención de vapor de agua en la atmósfera que facilita la formación de nubes más profundas y por consiguiente, la ocurrencia de tormentas más

intensas (Magaña, 1999). Por otro lado, el segundo factor es el cambio climático global cuya principal manifestación e impacto en la Ciudad de México, es a través de la intensificación del fenómeno El Niño/La Niña en las últimas tres décadas. Esto ha traído como consecuencia el decremento en la precipitación acumulada anual, sobre todo en la temporada de lluvias (Landa et al. 2008; Magaña et al. 2002).

En conjunto, ambos factores contribuyen a la fluctuación interanual de la precipitación y a marcadas diferencias en los registros entre regiones, como los resultados lo indican. En la región Este de Xochimilco, en donde se ha experimentado un mayor crecimiento urbano y cambio de uso de suelo, la cantidad de eventos extraordinarios de precipitación es mayor en comparación con la región Oeste y con la región Sur de Magdalena Contreras, estas dos últimas son zonas de conservación ecológica (INEGI 2011; DGCOH 2007).

Se aprecia que la variación en la precipitación en Xochimilco expresada por la intensificación y la concentración espacial de la misma, repercutió en la calidad del agua en la región Este, por lo menos en los valores de conductividad y de SDT durante el periodo de 1980-2007 con un tiempo de retraso de cuatro meses, ya que la escorrentía consecuente facilita el transporte de contaminantes como lo señalaron Leemans y Kleidon (2002), y Kabat et al., (2002) y Jacoby (1990). En cuanto a la delegación Magdalena Contreras, si bien se detectó una mayor cantidad de eventos de precipitación extraordinaria; la calidad del agua no se ha visto modificada debido a la protección que ofrece tanto la cubierta vegetal, el tipo de suelo y el acuitardo superior (Escolero 2009; Peterson et al. 1987).

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; en este caso el incremento en el número e intensidad de eventos extremos de precipitación experimentados en los últimos años.

Al comparar los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad en este caso por medio del método GOD, con los realizados por Vías et al. (2010), en un acuífero kárstico en España que aplicaron el método COP, y por Kattaa et al. (2010), en un acuífero basáltico en Siria; se observa que en los tres casos, los principales elementos que determinan la calidad del agua en los acuíferos son principalmente el tipo y estado fracturado o no del macizo rocoso, la profundidad de las capas confinantes al acuífero, así como el transporte de los contaminantes a nivel superficial. Además, en los dos estudios mencionados, en España y en Siria, se dice que la variabilidad en la precipitación manifestada por eventos extremos es un elemento que influye en el índice de vulnerabilidad y por lo tanto en el riesgo de deterioro de la calidad del agua. Lo cual, en este estudio, por la carencia de una base de datos de indicadores de calidad del agua, no se pudo demostrar directamente, y solo se pudo inferir a través de un análisis de regresión lineal simple.

Ahora bien, en lo que respecta a las proyecciones a futuro a corto y mediano plazo bajo condiciones de cambio climático para el escenario A2, éste estudio arrojó como resultado la evidencia de que el incremento de eventos extraordinarios de precipitación observado en las anomalías de los meses de mayo y junio que fueron calculadas por el modelo climático SIECCRe; es suficiente para modificar la concentración de la conductividad y los SDT, lo

cual a su vez, aumenta la incidencia de coliformes fecales que guarda una estrecha correlación con los primeros dos parámetros. Todo esto concuerda por lo dicho por Chigbu et al. (2010) y Foster et al. (2002).

En lo que respecta a la vulnerabilidad de los acuíferos, para el caso de Xochimilco resultó ser alta en la región Este, ya que las características geológicas de porosidad de la roca basáltica fracturada y baja cantidad de arcilla, que condicionan el volumen y la dirección del flujo de recarga que proviene de la zona Sur (conservación ecológica), desde la sierra del Chichinautzin hacia la zona Norte (urbana), a una velocidad mayor a la esperada en condiciones normales, por lo que el tiempo de retraso es menor a un año; sin embargo en la región Oeste de Xochimilco, la vulnerabilidad se ve reducida debido a la lejanía de las fuentes contaminantes. En contraste, en el acuífero de Magdalena Contreras, se encuentra confinado y lejano a las fuentes de contaminantes proveniente de la región urbana en el Norte, además de que el tipo de suelo y alto contenido de arcilla en la zona de recarga, condicionan un flujo lento por lo tanto un tiempo de retraso mayor a un año (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 lo es la distancia entre la fuente de carga contaminante y el sitio de extracción, el tiempo de retraso que es una función del nivel piezométrico y las características del suelo y la geología de los estratos que confinan o no al acuífero.

5.2. Conclusiones

La metodología planteada permitió corroborar que en conjunto la precipitación extraordinaria, el perfil geológico y las condiciones a nivel superficial, determinan la calidad del agua. Así mismo, esta misma metodología es factible de ser aplicada a otros sitios de estudio siempre y cuando se cuente con bases de datos históricos e información requerida para aplicar la misma.

Los resultados obtenidos a partir de la metodología no permiten distinguir el peso específico de la precipitación extraordinaria como elemento que contribuye al deterioro de la calidad del agua; por lo que la lluvia se considera únicamente como un factor que contribuye al transporte de contaminantes en los acuíferos de Xochimilco y de Magdalena Contreras.

El uso de las anomalías en precipitación generadas por el modelo SIECCRe del alta resolución espacial y basadas en condiciones de cambio climático, si bien, arroja datos “coherentes”; conlleva una gran incertidumbre ya que no se tiene la certeza de que el cambio climático global tenga relación directa en el sitio de estudio.

El principal elemento al cual se le atribuye la diferencia en la precipitación histórica entre una región y otra, es el cambio uso de suelo, siendo más notable el cambio en una zona antiguamente de conservación ecológica y rural, ahora urbana.

La diferencia que se observa en la calidad del agua respecto a la presencia de coliformes fecales a través del método GOD, se atribuye principalmente a las características

fisiográficas como son el relieve y la geología, que otorgan mayor protección al acuífero principal, la mayor distancia que existe entre el origen de los contaminantes y el sitio de recarga entre una región y otra. Por lo que se espera haya mayor retención de contaminantes y menor cantidad de ellos se infiltren hasta el acuífero principal en una región más protegida.

Se recomienda fijar un tiempo de retraso entre la ocurrencia de la precipitación, el escurrimiento consecuente y la respuesta del nivel freático en el acuífero principal, siempre y cuando se encuentre dentro del rango del tiempo de retraso calculado. Lo anterior con el propósito de facilitar los cálculos que establecen la relación entre la precipitación y los indicadores de calidad del agua empleados, porque contribuye a disminuir la incertidumbre estadística.

El empleo del modelo Gumbel mixto en su forma bivariada para establecer la relación estadística entre variables fue adecuada, ya que logró identificar la precipitación a partir de la cual se esperan diferentes rangos de conductividad, y a su vez la posibilidad de hallar coliformes fecales.

Los resultados de este estudio indican que en la región Este de Xochimilco para precipitaciones cercanas a la promedio (114 mm) y hasta los 120 mm se tienen una probabilidad de hallar coliformes fecales en el agua subterránea del acuífero de 70 de cada 1000 muestras; en cambio en la región Oeste, se espera que se presenten con una probabilidad de 30 de cada 1000 muestras con precipitaciones superiores a 150 mm siendo la promedio de 97 mm, todo esto para las condiciones históricas. Para las proyecciones a futuro bajo condiciones de cambio climático para el escenario A2, para el periodo 2011-2030 y

2031-2050 se hallaron diferencias en la probabilidad antes señalada para la región Oeste, ya que se espera se presenten con lluvias hasta los 135 mm; es decir, menores que para el escenario histórico.

Con lo descrito anteriormente, se observa que es más probable la presencia de coliformes fecales y por lo tanto de contaminación en el acuífero de la región Este de la delegación Xochimilco respecto a la región Oeste bajo condiciones actuales. A futuro, se espera en la región Este no se presenten cambios considerables; en contraste, en la región Oeste, se espera la presencia de coliformes fecales con lluvias menores. En el caso del acuífero de la delegación Magdalena Contreras, esta probabilidad es muy baja o nula y se espera se mantenga igual si las condiciones de la zona de conservación ecológica donde ocurre la recarga se mantengan o mejoren.

Finalmente, se mostró que el análisis realizado para los datos mensuales de calidad del agua conlleva gran incertidumbre, debido a que se generaron en forma sintética; sin embargo, se calcularon intervalos en donde se observó la presencia de coliformes fecales aún para valores de conductividad y SDT por debajo de la normatividad. Esto lleva a suponer que 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 para contar con una base de datos de calidad del agua representativa desde el punto de vista temporal como espacial. Así mismo, se recomienda hacer un estudio para determinar con mayor precisión de que manera el tipo de litología, la profundidad del pozo y el nivel piezométrico intervienen en el nivel de vulnerabilidad del acuífero.

Referencias

- ALLEY, W., HEALY, R., LABAUGH, J., y REILLY, T. Flow and Storage in Groundwater Systems. *Science*. 296:1985-1990. 2010.
- APARICIO M. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa. 1997.
- BATES, B.C., Z.W. KUNDZEWICZ, S. WU AND J.P. PALUTIKOF, Eds. *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp. 2008.
- BRUCE, B., OELSNER, G. Contrasting water quality from paired domestic/public supply wells, Central High Plains. *Journal of American Water Research Assoc.* 37, 1389. 2001
- CAMPOS, D. Análisis Probabilístico Univariado de Datos Hidrológicos. IMTA. México. 2006.
- CVCCM. CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMOSFERA. Datos para temperatura y precipitación en la Ciudad de México. 2011. Disponible en: http://www.cvccmatmosfera.unam.mx/cvcccm/escenarios_gfdl.php
- CHAGNON, S., y HUFF, F. Potential effects of changed climates on heavy rainfall frequencies in the Midwest. *Water Resources Bulletin*, 27(5):753-759. 1992.
- CHIGBU, P., GORDON, S. y STRANGE, T. Influence of inter-annual variations in climatic factors on fecal coliform levels in Mississippi Sound. *Water Research*. 38(20):4341-4352. 2004.
- DI TORO, D. Probability model of stream quality due to runoff. *J. Environmental Engineering Div.*, ASCE. 105(E1):43-54. 1984.
- DGCOH. DIRECCION GENERAL DE CONSTRUCCION Y OPERACION HIDRAULICA. Plan de Acción Hidráulica del año 2001 al 2005 (Xochimilco), Secretaria de Obras y Servicios, Gobierno del Distrito Federal. 2007.
- DOMENICO, P., y SCHWARTZ, F. *Physical and Chemical Hydrogeology*. 2nd. Ed. John Wiley and Sons, US. 1998.
- DOUGLAS, E., VOGEL, R., KROLL, C. Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *Journal of Hydrology*, 240(1-2), 90–105. 2000.
- EMBREY, S., y RUNKLE, D. Microbial quality of the Nation's ground-water resources, 1993–2004: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006–5290, 34 pp. 2006.

- EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Water Quality Standards Criteria Summaries: A compilation of State/Federal Criteria. 1988.
- ESCALANTE, C. Application of bivariate extreme value distribution to flood frequency analysis: a case study of Northwestern México. *Natural Hazards*. 42(1):37-46. 2007.
- ESCALANTE C., y DOMÍNGUEZ, J. Análisis regional de precipitación con base en una distribución bivariada ajustada por máxima entropía. *Ingeniería Hidráulica de México*. 16(3):91-102. 2001.
- ESCALANTE, C., y REYES, L. Técnicas estadísticas en Hidrología. Facultad de Ingeniería, UNAM. 2002.
- ESCOLERO, O., MARTÍNEZ, S., KRALISCH, S., y PEREVOVOCHTCHIKOVA, M. Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático, México. 2009
- FOSTER, S., HIRATA, R., GOMES, D., D'ELIA, M., y PARIS, M. Protección de la calidad del agua subterránea. WHO-PAHO-CETIS. Banco Mundial. Washington, D. C. 2002.
- INE. INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA. El Cambio Climático en México. Información por Estado y Sector. 2011. Disponible en: <http://zimbra.ine.gob.mx/escenarios/>
- JACOBY, H. Water Quality. In: *Climate Change and US Water Resources*. (Waggoner, P., Ed.) John Wiley and Sons. US: 307-328. 1990.
- JÁUREGUI, E. El clima de la Ciudad de México. Temas Selectos de Geografía de México. Instituto de Geografía, UNAM. Plaza y Valdes Editores. México. 2000.
- 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, Editorial Garmas Impresores. 325:334. 2001.
- JÁUREGUI, E. Possible impact of urbanization on the thermal climate of some large cities in México, *Atmósfera*, 18(4):247-248. 2005.
- KABAT, P., SCHULZE, R., HELLMUTH, M., y VERAART, J. Coping with Impacts of Climate Variability and Climate Change in Water Management: A Scoping Paper. International Secretariat of the Dialogue on Water and Climate, Wageningen. 2002.

- KATTAA, B., AL-FARES, W., 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*. 91(5):1103-1110. 2010.
- KAVEHKAR, N., JAMADI, S., PIROOZ, B., MOHAMMADI, K., 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. 53:58. 2010.
- KISTEMANN, T., CLABEN, T., KOCH, C., DANGENDORF, F., FISCHEDER, R., GEBEL, J., VACATA, V., y EXNER, M. Microbial Load of Drinking Water Reservoir Tributaries during Extreme Rainfall and Runoff. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(5):2188-2197. 2002.
- LANDA, S., MAGAÑA, V., NERI, C. Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático. SEMARNAT. México. 2008.
- LEEMANS, R., y KLEIDON, A. Regional and global assessment of the dimensions of desertification. *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?* Dahlem University Press, Berlin. 215-232. 2002.
- 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. Lesser y Asociados para GDF. Sistema de Aguas de la Ciudad de México SACM. México. Vol. I y II. 2003.
- LIVERMAN, D., y O'BRIEN, K. The impacts of global warming on Mexico. *Global Environmental Change*. 2:351-364. 1991.
- MADSEN, T., y FIGDOR, E. When it rains, it pours. Global Warming and the Rising Frequency of Extreme Precipitation in the United States. Environment America Research and Policy Center. USA. 2007.
- MAGAÑA, V., PÉREZ, J., y MÉNDEZ, M. Diagnostic and Pronostic of extreme precipitation events in the Mexico basin. *Geofísica Internacional*. 2002.
- MONTGOMERY, D., y RUNGER, G. Applied Statistics and Probability for Engineers. John Wiley and Sons. 1996.
- NEFF, R., H. CHANG., KNIGHT, C., NAJJAR, R., YARNAL, B., y WALKER, H. Impact of climate variation and change on Mid-Atlantic Region hydrology and water resources. *Climate Research*. 14:207-218. 2000.

- NOLAN, B., HITT, K. Vulnerability of shallow groundwater and drinking-wells to nitrate in the United States. *Environmental Science Technology*. 40:7834-7840. 2006.
- 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. SSA, México. 1994. Disponible en: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>
- OMM. ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL. Severe weather information center. 2011. Disponible en: <http://severe.worldweather.wmo.int/rain/>
- PETERSON, D., CAYAN, D., DILEO-STEVENSON, J., y ROSS, T. *Some effects of climate variability on hydrology in western North America*. Published by IUGG. 1987.
- RAMOS, J., NOYOLA, C., y TAPIA, F. Aquifer vulnerability and groundwater quality in mega cities: case of the Mexico Basin. *Environmental Earth Science*. 61(6):1309-1320. 2010.
- RAYNE, T., BRADBURY, K., y MULDOON, M. *Hydrogeology Journal*. 9(432). 2001.
- ROSE, D. Monte Carlo Risk Analysis Modeling. In: Molak, V. (ed.) *Fundamentals of risk analysis and risk management*. Lewis Publishers. 2007.
- ROZEMEIJER, J., BROERS, H., VAN GEER, F., BIERKENS, M. Weather induced temporal variations in nitrate concentrations in shallow groundwater. *Journal of Hydrology*. 378:119-127. 2009.
- RUVALCABA, A. Modelación matemática del comportamiento hidrogeológico de la zona lacustre de Xochimilco, México. Tesis de Maestría, Geofísica, UNAM, Ciudad de México. 107. 2009.
- SACM. SISTEMA DE AGUAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO. Estadísticas del agua. 2007.
- SALAS, J., DELLEUR, J., YEVJEVICH, V., y LANE, W. Applied modeling of hydrological time series. *Water Resources Publications*. 484. 1980.
- SANFORD, W., y BUAPENG, S. Assessment of a ground water flow model of the Bangkok Basin, Thailand, using carbon-14-based ages and paleohydrology. *Hydrogeology Journal*. 4(4):26-40. 1996.
- SEMARNAT. SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. Estadísticas del agua de la Región Hidrológico Administrativa XIII, Aguas del Valle de México. 2009.
- SHIRAZI, S., IMRAN H., SHATIRAH A. GIS-based DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment: a review. *Journal of Risk Research*, 1-21. 2012.
- STUART, M., y MILNE, C. Groundwater quality implications on wastewater irrigation in Leon, México. Proceedings of International Association of Hydrogeologists Congress: Groundwater and the Urban

- Environment: Problems, Processes and Management. Nottingham I: 193-198. 1997.
- TERRONES L. A la orilla del agua política, urbanización y medio ambiente. Historia de Xochimilco en el siglo XX. Gobierno del D.F. Delegación Xochimilco. México. 288 p. 2004.
- TJALLING J. YPMA, Historical development of the Newton-Raphson method, *SIAM Review* 37 (4), 531–551, 1995.
- VIAS, J., ANDREO, B., RAVBAR, N., HOTZL, H., Mapping the vulnerability of groundwater to the contamination of four carbonate aquifers in Europe. *Journal of Environmental Management*. 91(7):1500-1510. 2010.
- YUE, S., OUARDA, T., BOBÉE, B., LEGENDRE, P., y BRUNEAU, P. The Gumbel mixed model for flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*. 226(1-2):88-100. 1999.
- ZÚÑIGA A. Análisis de la secuencia estratigráfica y construcción de secciones en la zona entre el Pedregal de San Ángel y el cerro de la Caldera con base en la correlación física y la interpretación estratigráfica de 75 pozos en la Delegación Coyoacán e Iztapalapa. GDF. Sistema de Aguas de la Ciudad de México SACM. México. Vol. II. 2003.

Anexo A. Fundamentos teóricos

Variabilidad y cambio climático

Se entiende por variabilidad climática a la serie de anomalías que se manifiestan en una región y que pueden repetirse de un año a otro. Si dicha variabilidad presenta una tendencia constante hasta modificar el clima de una región con repercusiones en el ambiente, el ecosistema y la sociedad, se habla entonces de cambio climático (Kabat et al. 2002). Ambas situaciones son originadas tanto por factores naturales como por actividades humanas por ejemplo, la deforestación, el cambio de uso de suelo y la quema de combustibles fósiles; los cuales, además de afectar el clima, alteran el ciclo hidrológico (Madsen y Fidgor 2007; Magaña et al., 2002).

Precipitación extraordinaria

La lluvia extraordinaria es aquella que supera el valor promedio en un porcentaje determinado, y que tiene como característica una muy baja probabilidad de ocurrencia (OMM 211, Aparicio 1997). La OMM (2011) define a la precipitación extrema como aquella que es mayor o igual de 50 mm en 24 horas. Para el caso de la Ciudad de México, las lluvias superiores a 45 mm/h se consideran como extremas (Jáuregui 2001), ya que no pueden ser drenadas por el sistema del drenaje profundo (Landa et al. 2008).

Calidad del agua

El concepto de calidad del agua depende del uso al cual se destina. Así por ejemplo, para el caso de agua potable, la norma NOM-127-SSA1-1994 determina los parámetros y valores que el agua debe cumplir para este fin. Para el propósito de este estudio, se empleó la conductividad, los sólidos disueltos totales y los coliformes fecales; debido a que se han determinado con mayor frecuencia (por lo menos 20 años) en una mayor cantidad de sitios (SACM 2007). A continuación se define estos parámetros y en la tabla 2, se presentan los límites establecidos.

Conductividad eléctrica. En el agua este parámetro se emplea como medida de la concentración de minerales u otros iones capaces de transportar carga eléctrica, y es un indicador de la pureza del agua. Este parámetro, no distingue entre tipo de material, sustancia o microorganismo; se ve fácilmente afectado ya que la variación en las sustancias disueltas. Las unidades de medición son $\mu\text{S}/\text{cm}$ (EPA 1988).

Sólidos disueltos totales (SDT). Son cualquier mineral, sal, metal, y en general la suma de cationes y aniones disueltos en agua, entre los cuales se encuentran el calcio, el magnesio, el potasio, el sodio, los bicarbonatos, los sulfatos, cloruros y en menor medida, la materia orgánica. Los SDT se originan tanto de fuentes naturales como de sedimentos que provienen de la erosión y que son transportados por la lluvia, el agua residual municipal e industrial. Los SDT, al igual que la conductividad eléctrica, son un indicador global de la calidad del agua que no distingue el tipo de contaminantes. Se miden en unidades de mg/L (EPA 1998).

Coliformes fecales. Son un subgrupo de los coliformes totales. Se encuentran casi exclusivamente en las heces de animales de sangre caliente. El 95% del grupo de los coliformes fecales están formados por *Escherichia coli* y ciertas especies de *Klebsiella*. Este grupo se considera el indicador que mejor refleja la presencia de contaminación fecal debido a que toleran altas temperaturas que pueden encontrarse fuera del tracto intestinal humano. Además, se relacionan con el grupo tifoide-paratifoide que son bacterias que causan enfermedades muy graves al ser humano. Por su alta concentración en diferentes tipos de muestras, su determinación es relativamente fácil (EPA 1988). Para este estudio la unidad de medida son UFC/100ml (unidades formadoras de colonias) determinado por el método de conteo en placa (NOM-127-SSA1-1994, EPA 1988).

Tabla A1. Límite permisible de indicadores de calidad del agua (NOM-127-SSA1-1994, EPA 1988)

parámetro	aplicación	posible origen	límites
Conductividad	medida indirecta del contenido de material disuelto	sedimentos, desechos sólidos, actividad agrícola	1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Sólidos disueltos totales (SDT)	medida de material sólido contenido en agua	sedimentos, desechos sólidos, uso agrícola	1000 mg/L
Coliformes fecales	contenido de organismos bacterianos	materia fecal humana	0 UFC/100ml

Determinación de la precipitación media por Polígonos de Thiessen

El método consiste en unir mediante líneas rectas dibujadas en un plano de la cuenca, las estaciones más próximas entre sí para formar triángulos (en los vértices se encuentran las estaciones). Posteriormente, se trazan líneas que bisectan los lados de los triángulos y se extienden hasta convergen en un punto. De esta manera, cada estación pluviométrica queda rodeada por esas líneas rectas, de esta manera se forman los polígonos de Thiessen cuya área encerrada por estos y el parteaguas de la cuenca, será el área de influencia de la estación correspondiente (Aparicio 1997)

Extensión de registros por regresión lineal simple

La disponibilidad de registros simultáneos en dos estaciones de medición puede ser útil para extender el registro de uno de ellos a partir del otro. Para ello, los estimadores de los parámetros de la muestra extendida deben ser estadísticamente superiores a los que se obtienen con la muestra original (Montgomery, D., y Runger, G. 2004)

Si se considera un par de secuencias de variables aleatorias, una corta y otra larga, de la forma:

$$y_i, \dots, y_{n_1} \quad \text{Ecuación A.1}$$

$$x_i, \dots, x_{n_1}, x_{n_1+1}, \dots, x_{n_1+n_2} \quad \text{Ecuación A.2}$$

La media y la varianza de la serie corta es:

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} y_i \quad \text{Ecuación A.4}$$

$$S_{y_1}^2 = \frac{1}{n_1-1} \sum_{i=1}^{n_1} (y_i - \bar{y}_1)^2 \quad \text{Ecuación A.5}$$

La media y la varianza de la serie de los valores de x en el periodo común n_1 se obtienen como:

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} x_i \quad \text{Ecuación A.6}$$

$$S_{x_1}^2 = \frac{1}{n_1-1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 \quad \text{Ecuación A.7}$$

La media y la varianza de la serie de los valores de x en el periodo común n_1+1 hasta n_2 se obtienen como:

$$\bar{X}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{j=n_1+1}^{n_1+n_2} x_j \quad \text{Ecuación A.8}$$

$$S_{x_2}^2 = \frac{1}{n_2-1} \sum_{j=n_1+1}^{n_1+n_2} (x_j - \bar{x}_2)^2 \quad \text{Ecuación A.9}$$

Para la secuencia completa de la serie larga, la media y la varianza se expresan como:

$$\bar{X} = \frac{1}{(n_1+n_2)} \sum_{k=1}^{n_1+n_2} x_k = \frac{n_1 \bar{x}_1 + n_2 \bar{x}_2}{n_1+n_2} \quad \text{Ecuación A.10}$$

$$s_x^2 = \frac{1}{(n_1+n_2-1)} \sum_{k=1}^{n_1+n_2} (x_k - \bar{x})^2 = \frac{1}{(n_1+n_2-1)} \left[(n_1-1)S_{x_1}^2 + (n_2-1)S_{x_2}^2 + \frac{n_1 n_2}{(n_1+n_2)} (\bar{x}_1 - \bar{x}_2)^2 \right] \quad \text{Ecuación A.11}$$

Cabe señalar que los estimadores insesgados se obtuvieron por medio de la técnica de máxima verosimilitud. El modelo de regresión lineal simple se puede expresar como:

$$\hat{y}_i = \bar{y}_1 + b(x_i - \bar{x}_1) + \alpha \theta \sqrt{1-r^2} S_{y_1} \varepsilon_i \quad \text{Ecuación A.12}$$

donde,

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} y_i (x_i - \bar{x}_1)}{\sum_{i=1}^{n_1} y_i (x_i - \bar{x}_1)^2} \quad \text{Ecuación A.13}$$

$$\alpha^2 = \frac{n_2(n_1-4)(n_1-1)}{(n_2-1)(n_1-3)(n_1-2)} \quad \text{Ecuación A.14}$$

$$r = b \frac{S_{x_1}}{S_{y_1}} \quad \text{Ecuación A.15}$$

$\theta = 1$: componente de ruido

ε_i : número aleatorio con distribución normal estándar

Aplicación de series de tiempo para el análisis de variables climáticas

Los modelos de series de tiempo generan datos que se extienden a otros periodos, y además permiten ajustar anomalías en este caso de escenarios de cambio climático (Rose 1997; Salas et al. 1988) con la aplicación de funciones de distribución de probabilidad. Estas por sí solas, tienen la particularidad de estimar valores representativos de la variable dentro del sitio de estudio y durante el periodo de análisis (Salas et al. 1988); por lo cual, un modelo de series de tiempo es una herramienta que posibilita generar proyecciones a futuro.

Una serie de tiempo se define como el arreglo de valores numéricos en forma secuencial que representan intervalos de tiempo. Están conformadas por una componente determinística, es decir que puede ser estimada con cierta certidumbre y una componente aleatoria, o sea no predecible. Además, las series de tiempo son susceptibles de asociarse a una distribución de probabilidad, por lo que se les nombra proceso estocástico (Salas et al. 1988).

A través del análisis de series de tiempo periódicas PAR(p), en este caso mensuales, se identifican eventos interanuales que incluye a los valores extremos y de baja probabilidad de ocurrencia y es posible generar nuevos datos en función de variaciones de las componentes, ya sea incrementos o decrementos en la media o la varianza, los cuales a su vez, están basados en los escenarios previstos para un sitio en particular. (Campos 2006; Salas et al. 1988). El modelo autorregresivo PAR(p) para series periódicas se expresa de la siguiente manera:

$$PAR(p): z_{v,t} = \varphi_1 z_{v,t-1} + \dots + \varphi_n z_{v,t-p} + \varepsilon_t \quad \text{Ecuación A.16}$$

donde,

φ_i : coeficiente de autocorrelación

z_t : valor estandarizado y normalizado

ε_t : componente aleatoria o residual de modelo

La componente aleatoria está en función de la varianza y los números aleatorios:

$$\varepsilon_t = \hat{\sigma}_\varepsilon^2 \tilde{\zeta}_t \quad \text{Ecuación A.17}$$

$$\tilde{\zeta}_1 = \left[\ln \left(\frac{1}{U_1} \right) \right]^{1/2} \cos (2\pi U_2) \quad \text{Ecuación A.18}$$

$$\tilde{\zeta}_2 = \left[\ln \left(\frac{1}{U_1} \right) \right]^{1/2} \text{sen} (2\pi U_2) \quad \text{Ecuación A.19}$$

donde,

$\hat{\sigma}_\varepsilon$: varianza de los residuales que depende del modelo

$\tilde{\zeta}_t$: número aleatorio normal estándar

U_i : número aleatorio con distribución uniforme que va de -1 a +1

Ahora bien, dependiendo del tipo de modelo, la estructura está determinada para $p = 2$:

$$z_t = \varphi_1 z_{t-1} + \varphi_2 z_{t-2} + \varepsilon_t \quad \text{Ecuación A.20}$$

$$\hat{\varphi}_1 = \frac{\hat{r}_1(1-\hat{r}_2)}{1-\hat{r}_1^2} \quad \text{Ecuación A.21}$$

$$\hat{\varphi}_2 = \frac{\hat{r}_2 - \hat{r}_1^2}{1-\hat{r}_1^2} \quad \text{Ecuación A.22}$$

$$\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = S^2 \frac{(1+\hat{\varphi}_2^2)}{(1-\hat{\varphi}_2^2)} [(1-\hat{\varphi}_2^2) - \hat{\varphi}_1^2] \quad \text{Ecuación A.23}$$

Con la condición de que:

$$\varphi_1 + \varphi_2 < 1 \quad \text{Ecuación A.24}$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 < 1 \quad \text{Ecuación A.25}$$

$$-1 < \varphi_2 < 1 \quad \text{Ecuación A.26}$$

Transformación Box-Cox para normalizar y estandarizar

Para emplear las series de tiempo, se requiere que las muestras se ajusten a la función de distribución de probabilidad Normal, esto implica que el coeficiente de asimetría sea cero y el de curtosis tres. El proceso de normalización mediante la técnica de Box-Cox establece (Escalante y Reyes 2002):

$$w_i = \frac{(x_i)^\lambda - 1}{\lambda} \quad \text{con } \lambda \neq 0, x_i > 0 \quad \text{Ecuación A.27}$$

$$w_i = \ln x_i \quad \text{con } \lambda = 0, x_i > 0 \quad \text{Ecuación A.28}$$

donde,

x_i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$ serie a normalizar

w_i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$ serie transformada

λ , parámetro de transformación de potencia

Estadísticos de una muestra y pruebas

Los estimadores por momentos de las medidas de tendencia central y de dispersión se muestran a continuación (Montgomery, D., y Runger. G. 2004):

$$\text{Media: } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Ecuación A.29}$$

$$\text{Varianza insesgada: } S^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{Ecuación A.30}$$

$$\text{Coeficiente de asimetría insesgado: } g = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)S^3} \quad \text{Ecuación A.31}$$

$$\text{Coeficiente de curtosis insesgado: } k = \frac{n^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{(n-1)(n-2)(n-3)S^4} \quad \text{Ecuación A.32}$$

Prueba de homogeneidad

La tendencia o saltos se manifiesta en los estadísticos básicos (media, varianza), estas variaciones son efecto de la pérdida de homogeneidad y la inconsistencia; cuyo origen se puede atribuir a procesos naturales como la marcada diferencia entre temporada o estaciones, o los cambios súbitos como tormentas extremas, por lo general se emplea la prueba paramétrica t-Student y para contrastar la prueba no paramétrica Mann-Whitney (Campos 2006).

La tendencia o saltos se manifiesta en los estadísticos básicos (media, varianza), estas variaciones son efecto de la pérdida de homogeneidad y la inconsistencia; cuyo origen se puede atribuir a procesos naturales como la marcada diferencia entre temporada o estaciones, o los cambios súbitos como tormentas extremas. Con la aplicación de las pruebas paramétricas del estadístico t-Student y de Cramer, así como la no paramétrica Mann-Whitney se verificará estadísticamente la existencia de aquellas anomalías.

Prueba paramétrica t-Student para la diferencia de dos medias

Se aplica al registro total, el cual sin ordenar, se divide en dos, a partir de cuando se presente o se observe algún cambio en toda la serie. Se realiza una prueba de hipótesis con el estadístico crítico t_c con un grado de confianza del 95% y del 99% para dos colas (se asume que se ajusta a una función normal) para el grado de significancia ($\alpha_1/2=0.025$ y $\alpha_2/2=0.005$) y N_1+N_2-2 grados de libertad. Así entonces las hipótesis son (Montgomery y Runger 1996):

H0: $t < t_c$, las medias no presentan diferencias significativas (si es homogénea)

H1: $t > t_c$, las medias sí presentan diferencias significativas (no es homogénea)

donde,

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 + \sum_{j=1}^{N_2} (x_j - \bar{x}_2)^2}{N_1 + N_2 - 2}}} \quad \text{Ecuación A.33}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 + \sum_{j=1}^{N_2} (x_j - \bar{x}_2)^2}{N_1 + N_2 - 2}} \quad \text{Ecuación A.34}$$

donde,

t es el estadístico de prueba

valores i de la primera mitad van de 1 hasta N_1

valores j de la segunda mitad van de N_1+1 hasta N_2

Prueba de no paramétrica Mann-Whitney

Es una prueba alternativa a la *t-Student*. El procedimiento consiste en asignar un número que es un rango de todos los n valores ordenados de mayor a menor, para evaluar los estadísticos siguientes:

$$U_1 = n_1 \cdot n_2 + \binom{n_1}{2} (n_1 + 1) - R_1 \quad \text{Ecuación A.35}$$

$$U_2 = n_1 \cdot n_2 - U_1 \quad \text{Ecuación A.36}$$

donde,

$n = n_1 + n_2$, R_1 : suma de rango de los eventos de la muestra n_1

El menor valor entre U_1 y U_2 se evalúa y se convierte en U , para obtener el estadístico de prueba Z , el cual se compara con $Z_c = 1.964$ para $\alpha = 0.05$.

$$Z = \frac{U - \frac{n_1 n_2}{2}}{\sqrt{\binom{n}{12} [n_1 n_2 (n+1)]}} \quad \text{Ecuación A.37}$$

Si el valor absoluto de Z es mayor que Z_c , entonces se rechaza la hipótesis nula (H_0), indicando que los datos provienen probablemente de dos poblaciones. Para comprobar el valor de U , se cuantifica la expresión:

$$U_2 = n_1 \cdot n_2 + \binom{n_2}{2} (n_2 + 1) - R_2 \quad \text{Ecuación A.38}$$

donde,

U_2 debe ser igual a U , cuando el valor de R_2 se determina como: $R_2 = R_n - R_1$

Prueba de aleatoriedad

Detecta las periodicidades y estacionalidad de los datos por medio de la serie de dominio de frecuencia asociada. Los datos de un registro, muestran una variación sobre un espectro continuo de frecuencias $g(f)$. En el caso de que la serie sea completamente aleatoria y de datos no correlacionados, dicha función espectral es una constante y se denomina ruido blanco. En general si r_l no varía estadísticamente de cero, la serie se considera libre de persistencia y la variación se puede explicar por procesos estocásticos. (OMM 2011; Campos 2006).

El análisis espectral consiste en calcular una función denominada periodograma, la cual se interpreta como la energía total de la función en la frecuencia ω , también se denomina el espectro. El periodograma para este análisis en términos de la norma cuadrada de la transformada discreta de Fourier de x_t (Campos 2006).

$$Sp(f) = \frac{N}{4\pi} * \frac{[\sum_{t=1}^N x_t \exp i\omega t]^2}{2}; \omega = 2\pi f \quad \text{Ecuación A.39}$$

$$x(t) = C_1 + \sum_{j=1}^m C_{2j} \cos \left[f(j) \left(\frac{2\pi}{365} \right) t \right] + C_{2j+1} \text{sen} \left[f(j) \left(\frac{2\pi}{365} \right) t \right] \quad \text{Ecuación A.40}$$

donde,

C_i , para $i = 1, \dots, 2m + 1$, son los coeficientes de la serie

$f(j)$, para $j = 1, \dots, m$, son las frecuencias representativas de la serie

A la expresión anterior se le conoce como representación en serie de Fourier de $x(t)$. De manera análoga, se encuentra una expresión del espectro $Sp(f)$ en términos de la transformada discreta de Fourier.

Prueba de independencia

Determina si los datos de un registro están influenciados por valores anteriores y que estos a su vez, influyen a los posteriores. Para detectar ello, se aplica la prueba de Anderson (Salas et al, 1988). La prueba consiste en trazar el correlograma, el cual es el diagrama que grafica el coeficiente de correlación autoserial contra los tiempos de retraso k y ciertos límites de confianza. En primer lugar, se identifica el porcentaje de datos de la

serie r_k ubicados dentro de los límites. Si más del 90% se encuentran dentro de los límites, indica que la serie es independiente. Los límites de probabilidad con un grado de confianza del 95% y 99%, se calculan de la siguiente manera (Anderson, 1941):

$$r_k(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{N-k-1}}{N-k} \quad \text{Ecuación A.41}$$

$$r_k(99\%) = \frac{-1 \pm 2.326\sqrt{N-k-1}}{N-k} \quad \text{Ecuación A.42}$$

Los coeficientes de autocorrelación serial r_k para los tiempos de retraso k se determinan por la siguiente expresión:

$$r_{k,t} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{v=1}^N (x_{v,t} - \bar{x}_t)(x_{v,t+k} - \bar{x}_{t+k})}{s_t s_{t-k}} \quad \text{Ecuación A.43}$$

donde,

k : tiempo de retraso de 1 hasta $n/3$

v : año de registro

t : periodo (mes, estación)

Prueba de normalidad

Detecta si los datos se ajustan o no a la función normal a través de la prueba *Shapiro-Wilk*, la cual emplea un parámetro de comparación γ con niveles de confiabilidad $(1-\alpha)$. El procedimiento consiste en ordenar en forma ascendente las i observaciones para la variable que se estudia. Calcular $\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ a partir de los datos de la muestra (Campos 2006).

Si i es par, $i = 2k$, calcular

$$b = \sum a_{n-i+1} (X_{n-i+1} - x_i) \quad \text{Ecuación A.44}$$

Si i es impar, $i = 2k + 1$, entonces se omite la mediana de los datos y se calcula el valor de b de acuerdo a la expresión anterior. Calcular el valor de W que es el estadístico de prueba

$$W = \frac{b^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Ecuación A.45}$$

Comparar W con el valor de W^* de tablas, los valores W de tablas se muestran en el Montgomery y Runger (1996). Si W es menor que W^* de tablas se rechaza la hipótesis de normalidad de los datos. Si se compara con un valor p teórico de 0.05, se dice que se rechaza la hipótesis de normalidad de los datos si p -value calculado es menor que el valor teórico.

$$\hat{\gamma} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^3}{\left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2 \right]^{3/2}} \quad \text{Ecuación A.46}$$

Los límites de probabilidad se determinan mediante la siguiente expresión:

$$\left[-U_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{6}{N}}, U_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{6}{N}} \right] \quad \text{Ecuación A.47}$$

donde,

$Z_c = 1.964$ para $\alpha = 0.05$, o bien, $Z_c = 2.326$ para $\alpha = 0.01$.

Determinación del tiempo de retraso en un acuífero

El flujo del agua subterránea es un sistema que comprende desde la escorrentía a nivel superficial, el medio geológico que contiene el agua (acuífero), las fronteras que confinan o no el flujo, las fuentes de recarga, y los procesos que interactúan con el mismo. En conjunto condicionan un tiempo de retraso el cual se define como el tiempo requerido para que el nivel piezométrico se aproxime al equilibrio después de alguna perturbación hidráulica como el cambio en la tasa de recarga o la influencia del bombeo para extracción (Domenico y Schwartz 1998). Está en función de la conductividad hidráulica y la porosidad de las capas rocosas; este tiempo se puede determinar en forma directa a través de la expresión $v = ki/n$. Esta velocidad (v) se calcula al dividir la expresión de la ley de Darcy entre la porosidad (n) que se considera constante (0.3), y asumiendo que el gradiente del nivel piezométrico (i) es constante igual a 0.001. En forma indirecta, en función del espesor de la capa confinante, la capacidad de almacenamiento y la misma conductividad hidráulica (Alley et al. 2010).

$$t_c = S L^2 / k$$

Ecuación A.48

donde, t_c es el tiempo de retraso calculado (d); S es el coeficiente de almacenamiento (1/m) que en este estudio es una constante igual a 0.2; L es el espesor del estrato (m); y k es la conductividad hidráulica (m/d).

También es un elemento que determina tanto el flujo como la concentración de contaminantes que van desde el nivel superficial hasta el acuífero donde por lo general se perforan los sistemas de pozos de extracción (Bruce y Oelsner 2001). Bajo condiciones naturales, el tiempo de retraso es muy variable, de días hasta cerca de un millón de años. En roca fracturada o porosa este tiempo es relativamente rápido y se acelera con la presencia de bombeo para extracción. Se ha visto que la escorrentía subsecuente a la temporada de lluvias que fluye a través de cientos de metros incluso kilómetros se reduce a menos de un año (Alley et al., 2010).

Función de distribución de probabilidad tipo Gumbel

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

Ecuación A.49

donde,

α , parámetro de ubicación

ν , parámetro de escala.

Para realizar el ajuste de una serie de tiempo, la técnica consiste en:

- a) ordenar las series de datos en forma ascendente
- b) calcular para cada uno de los datos, un periodo de retorno Tr

$$Tr = \frac{n+1}{m}$$

Ecuación A.50

donde,

m , número de orden de los datos ordenados

n , tamaño de la muestra

- c) calcular para la serie de datos ordenada, una probabilidad de excedencia $P(x)$

$$P(x) = 1 - \frac{1}{Tr}$$

Ecuación A.51

- d) calcular los parámetros ν de ubicación y α de escala por medio de los estimadores,

por máxima verosimilitud

$$\hat{\nu} = \bar{x} - 0.455S$$

Ecuación A.52

$$\hat{\alpha} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S$$

Ecuación A.53

por momentos

$$\hat{\nu} = \lambda_1 - 0.577216\hat{\alpha}$$

Ecuación A.54

$$\hat{\alpha} = \frac{\lambda_2}{\ln(2)}$$

Ecuación A.55

$$\lambda_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Ecuación A.56

$$\lambda_2 = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} x_i (n-i)$$

Ecuación A.57

- e) aplicar una prueba de bondad de ajuste para determinar el estimador de parámetros que proporcione el mejor ajuste:

$$EEA = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-np}}$$

Ecuación A.58

donde,

n , número de datos del registro

x_i , datos en orden ascendente originales

\hat{x}_i , datos estimados por una determinada función de distribución de probabilidad

p , parámetros empleados por tipo de función ($p = 2$ para *Gumbel*)

f) estimar valores y un intervalo de confianza en función de determinados periodos de retorno Tr por medio de la función generadora de momentos derivada de la función original

$$x = v - \alpha \ln \left[-\ln \left(1 - \left(\frac{1}{Tr} \right) \right) \right]$$

Ecuación A.59

para el intervalo de confianza:

$$S_T = \left[\frac{\hat{\sigma}^2}{n} (1 + 1.1396k_T + 1.10k_T^2) \right]^{1/2}$$

Ecuación A.60

$$k_T = \frac{z_m - \mu_z}{\sigma_z}$$

Ecuación A.61

$$z_m = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{Tr} \right) \right]$$

Ecuación A.62

$$\mu_z = \frac{1}{n \sum_{i=1}^n z_m}$$

Ecuación A.63

$$\sigma_z = [1/n \sum_{i=1}^n (z_m - \mu_z)^2]^{1/2}$$

Ecuación A.64

Aplicación del modelo Gumbel mixto para el vínculo de variables

La validez del modelo Gumbel mixto fue realizada por Gumbel y Mustafi en 1967, quienes incluyeron un parámetro de asociación denominado m , con lo cual es posible vincular el coeficiente de correlación entre dos variables, de manera que para varias aplicaciones se llegaron a valores de correlación r^2 superiores a 0.75, cuando en forma univariada no mostraban relación alguna. El modelo Gumbel está en función de dos parámetros, el de ubicación ν y el de escala α . Para estimarlos es usual emplear la técnica denominada logística bivariada; la cual genera un modelo exponencial donde las incógnitas son los mismos parámetros, por lo cual se emplean los estimados a través del modelo en forma univariada; estos parámetros son una función de los estadísticos de las muestras de cada variable. Para ello, Jowitt en 1979) y Phien en 1986 (Escalante y Reyes 2002) desarrollaron un procedimiento de estimación por máxima entropía al resolver un sistema de ecuaciones no lineales por el proceso iterativo de Newton-Raphson (Tjalling 1995).

Bajo los conceptos anteriores, se requiere que los datos sean variables aleatorias continuas dentro de un intervalo finito o infinito de valores reales pertenecientes al mismo rango. En el caso de los datos de calidad del agua, si bien se trata de eventos no aleatorios y puntuales, se pueden considerar, para fines prácticos, como variables aleatorias continuas, para lo cual, es necesario estimar o inferir para contar con una serie de tiempo, en este caso se emplean valores mensuales promedio para la calidad del agua y acumulados para la precipitación; así ambas variables podrán ser explicadas mediante una función de distribución de probabilidad conjunta similar, en esta caso tipo Gumbel, ya que cumple con las premisas establecidas (Montgomery y Runger, 1996).

$$f(x, y) = \exp \left\{ - \left[e^{-m \left(\frac{x-\hat{\nu}_1}{\hat{\alpha}_1} \right)} + e^{-m \left(\frac{y-\hat{\nu}_2}{\hat{\alpha}_2} \right)} \right]^{1/m} \right\} \quad \text{Ecuación A.65}$$

En forma conjunta:

$$F_{(y|x)} = \exp \left\{ - \left[-e^{-\left(\frac{x-\hat{\nu}_1}{\hat{\alpha}_1} \right)} + (m-1) \left(\frac{x-\hat{\nu}_1}{\hat{\alpha}_1} \right) + \left[e^{-m \left(\frac{x-\hat{\nu}_1}{\hat{\alpha}_1} \right)} + e^{-\left(\frac{y-\hat{\nu}_2}{\hat{\alpha}_2} \right)} \right]^{1/m} \right] \left[e^{-m \left(\frac{x-\hat{\nu}_1}{\hat{\alpha}_1} \right)} + e^{-\left(\frac{y-\hat{\nu}_2}{\hat{\alpha}_2} \right)} \right]^{\frac{1}{m}-1} \right\} \quad \text{Ecuación A.66}$$

Se estiman los parámetros por máxima entropía para la función tipo *Gumbel* mixta bivariada mediante el proceso iterativo Newton-Raphson. Para ello se sugiere proponer como valores de inicio los parámetros de la función tipo *Gumbel* marginal: $\alpha_1, \alpha_2, v_1, v_2$. El parámetro m de asociación bivariada de inicio será el valor de uno. Se calculan los parámetros igualados a cero mediante las siguientes expresiones:

$$P = \sum_{i=1}^{n_1} \left[\frac{x_i - v_1}{\alpha_1} \right] - n_1 \iota \quad \text{Ecuación A.67}$$

$$Q = \sum_{i=1}^{n_1} \left\{ \left[e^{-m \left(\frac{x_i - v_1}{\alpha_1} \right)} + e^{-m \left(\frac{y_i - v_2}{\alpha_2} \right)} \right]^{1/m} \right\} - n_1 \left(1 + \frac{1}{m} \right) \quad \text{Ecuación A.68}$$

$$R = \sum_{i=1}^{n_1} \left[\frac{y_i - v_2}{\alpha_2} \right] - n_1 \iota \quad \text{Ecuación A.69}$$

$$S = \sum_{i=1}^{n_1} \left\{ \ln \left[e^{-m \left(\frac{x_i - v_1}{\alpha_1} \right)} + e^{-m \left(\frac{y_i - v_2}{\alpha_2} \right)} \right]^{1/m} \right\} - n_1 (1 - m \iota) \quad \text{Ecuación A.70}$$

$$T = \sum_{i=1}^{n_1} \left\{ \ln \left[(m+1) + \left(e^{-m \left(\frac{x_i - v_1}{\alpha_1} \right)} + e^{-m \left(\frac{y_i - v_2}{\alpha_2} \right)} \right)^{1/m} \right] \right\} - n_1 \left\{ \ln(m-1) + \frac{1 - e^{m-1} [\ln(m-1)] - \iota e^{m-1}}{m} - \frac{e^{m-1}}{m} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k (m-1)^k}{kk!} \right\}$$

Ecuación A.71

donde,

$\iota = 0.57716$ constante de Euler

Si los valores anteriores son cercanos a cero, se detiene el proceso, en caso contrario, se calculan los incrementos de cada parámetro, de la siguiente manera:

$$d\alpha_1 = \alpha_{1(i+1)} - \alpha_{1(i)} \quad \text{Ecuación A.72}$$

Posteriormente, se actualizan los estimadores mediante la expresión:

$$\alpha_1 = \alpha_1^0 + d\alpha_1$$

Ecuación A.73

Proceso iterativo Newton-Raphson

El método de Newton-Raphson es un método abierto, en el sentido de que su convergencia global no está garantizada. La única manera de alcanzar la convergencia es seleccionar un valor inicial lo suficientemente cercano a la raíz buscada. Así, se ha de comenzar la iteración con un valor razonablemente cercano al cero (denominado punto de arranque o valor supuesto). Se realizarán sucesivas iteraciones hasta que el método haya convergido lo suficiente. $f'(x)=0$, sea $f: [a, b]$ la función derivable definida en el intervalo real $[a, b]$. Se inicia con un valor inicial x_0 y definimos para cada número natural n (Tjalling 1995).

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

Ecuación A.74

Anexo B. Características del sitio de estudio

Sitio de estudio

El sitio de estudio se localiza en la zona sur de la Ciudad de México en las inmediaciones de la sierra del Chichinautzin, se eligieron los acuíferos de Xochimilco y de Magdalena Contreras, cercanos uno del otro y que cuentan con registros históricos tanto de precipitación como de calidad del agua que permiten construir bases de datos para el análisis propuesto en este trabajo.

A continuación se detallan las características de Xochimilco y Magdalena Contreras a nivel superficial y subterráneo que fueron empleadas para la recopilación de datos históricos y su análisis posterior; así como para la evaluación de la vulnerabilidad.

Xochimilco

La delegación Xochimilco ($19^{\circ}10'$ a $19^{\circ}20'$ latitud norte y $-99^{\circ}00'$ a $-99^{\circ}10'$ longitud oeste) se localiza al sur de la Ciudad de México, cuenta con una superficie de 125 km², se asienta dentro de la principal zona de recarga del acuífero del Valle de México. La delegación se caracteriza por ser 70% rural y 30% urbana. La zona rural se encuentra al sur de la delegación, se considera de conservación ecológica, 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. Xochimilco presenta características fisiográficas y climáticas diferentes a nivel superficial y subterráneo, mismas que confieren diferentes grados de vulnerabilidad al acuífero.

A nivel superficial en la zona rural se distingue por contener un suelo 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 m a 2.0 m; esto proporciona condiciones favorables para el cultivo de flores y hortalizas, siendo el nopal uno de los productos más importantes y la principal actividad económica.

En la parte más al sur se encuentra la sierra del Chichinautzin donde destacan los volcanes extintos Teuhtli con 2,710 msnm, el Tzompoli con 2,650 msnm, el Xochitepec con 2,500 msnm, el Tlacuallelli con 2,420 msnm y el Cuautzin con 2,510 msnm (INEGI, 2002). Al pie de estos 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, ubicado éste en la zona urbana al norte de la delegación. El relieve condiciona que el flujo superficial de la escorrentía originada en el sur fluya hacia el norte; en contraste, la precipitación ocurrida en la parte norte, presenta por lo general un flujo más lento y tiende a infiltrarse en el mismo sitio en suelo no saturado debido a la alta permeabilidad.

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 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 100 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).

A nivel subterráneo, se distinguen 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). Estas condiciones por un lado favorecen la infiltración, pero por otro facilita la penetración de contaminantes al acuífero principal.

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. 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, se desplaza en forma lateral y descendente a través de basaltos fracturados hacia la zona norte del acuífero principal (Tabla B.1 y Figura B.1).

Tabla B.1. Valores de conductividad hidráulica por unidad hidrogeológica del acuífero de Xochimilco. Modificado de Ruvalcaba (2009)

Unidad hidrogeológica	Conductividad hidráulica (m/d)	
	mínimo	máximo
Depósitos lacustres del Cuaternario (Qla)	0.000864	0.0864
Depósitos aluviales del Cuaternario (Qal)	0.3542	30.24
Rocas volcánicas del Cuaternario (Qb)	1.4688	2,505.6
Rocas volcánicas basálticas-andesíticas del Plioceno Superior (Tpba)	1.1232	596.16
Secuencia volcánica piroclástica y clástica del Plioceno (Tppc)	0.1036	31.10

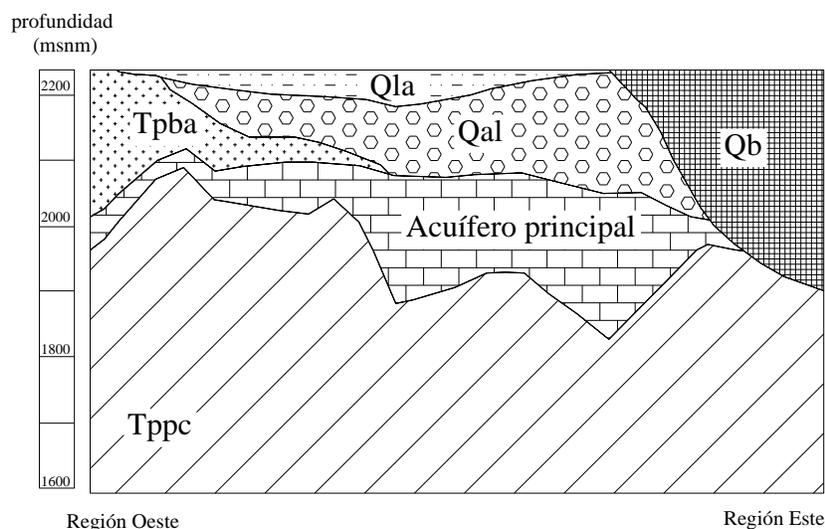


Figura B.1. Perfil litográfico del acuífero de Xochimilco con unidades hidrogeológicas. Modificado de Ruvalcaba 2009

Según datos proporcionados por el SACM (2007), el 90% de la población cuenta con agua potable entubada y el 85% con red de drenaje. La fuente de suministro de agua potable son 79 pozos, de ellos se extrae 3.2 m³/s del acuífero principal; de este caudal, para consumo interno se dota a Xochimilco con 1.3 m³/s, el resto beneficia a las delegaciones Iztapalapa, Coyoacán, Benito Juárez, Tlalpan, Miguel Hidalgo y Cuauhtémoc; todo el caudal es transportado a través de los acueductos Xochimilco y Chalco-Xochimilco, hacia tanques de almacenamiento y regulación; para posteriormente distribuir el agua por medio de la red primaria (Tabla B.2). Los pozos se ubican al oriente en la parte plana de la delegación y a lo largo de la nueva carretera México-Tulyehualco y otras vialidades secundarias como las avenidas Nuevo León, México y Acueducto, alcanzan profundidades que van de 63 m hasta los 440 m, fueron perforados en el acuífero principal y tienen una edad promedio de 40 años, siendo los más antiguos de 70 años.

Tabla B.2. Infraestructura de abastecimiento de agua potable en la delegación Xochimilco. SACM 2007.

Descripción	Cantidad	Unidad
Pozos	79	pozo
Acueductos	27,790	m
Tanques de almacenamiento	27	tanque
Planta de bombeo	17	planta
Tomas domiciliarias domésticas	74,902	toma
Tomas domiciliarias de gran consumo	41	toma

Magdalena Contreras

La delegación Magdalena Contreras ($19^{\circ}13'$ a $19^{\circ}20'$ latitud norte y $-99^{\circ}12'$ a $-99^{\circ}19'$ longitud oeste) se ubica al sureste de la Ciudad de México, tiene una superficie de 76 km^2 ; de los cuales, 42% corresponden a la zona urbana y 58% es zona de conservación ecológica. Cuenta con una población cercana a los 250,000 habitantes, en su mayoría concentrada en la zona urbana residencial (14 km^2) que la conforman 42 colonias, siendo las más pobladas las colonias Héroes de Padierna (200 hab/ha), San Jerónimo Lídice (100 hab/ha), San Jerónimo Aculco (100 hab/ha), Pueblo Nuevo Alto y Bajo (400 hab/ha) y la U. H. Independencia (800 hab/ha) (DGCOH 2007).

A nivel superficial Magdalena Contreras se distingue por asentarse en una zona de relieve accidentado con una topografía montañosa con pronunciadas cárcavas y barrancas (Teximaloya, Texcalatlaco, Coyotera). Las elevaciones principales son los cerros Nezehuiloia con 3,760 msnm, el Panza con 3,600 msnm, el Tarumba con 3,460 msnm, el Sasacapa con 3,230 msnm, y del Judío con 2,770 msnm; que pertenecen a las sierras de la Cruces y del Chichinautzin; en la parte más alta nacen los arroyos El Potrero, La Joya, Viborillas, Chichicaspatl y Cerería; los dos primeros son corrientes efímeras, las otras conforman los tributarios de los ríos Magdalena y Eslava. El río Eslava nace a los 3,900 msnm entre los cerros Nezehuiloia y Panza cerca de los límites con el municipio de Xalatlaco en el Estado de México, fluye en las inmediaciones del cerro del Ajusco en la zona de conservación ecológica para ser entubado a la altura del poblado de Chichicaspatl, a partir de ese punto recibe descargas de agua residual doméstica y confluye con el río Magdalena, su cauce principal tiene una longitud de 25 km. El río Magdalena se forma a los 3,700 msnm por la confluencia de los arroyos Cieneguillas y Cerería entre los cerros de la Palma y Muñeco que forman los límites de la delegación Alvaro Obregón, Cuajimalpa y el municipio de Xalatlaco en el estado de México, la longitud total del cauce principal es de 21 km, de los cuales, los primeros 10 km se ubican en una zona de conservación ecológica, en el parque nacional Los Dinamos y es aprovechado un caudal promedio de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ para dotar de agua potable tratada. Los restantes 15 km se encuentran entubados hasta descargar en la presa Anzaldo, recibe aguas residuales y pluviales y en un punto confluye con el río Eslava.

El 50% de la cuenca de los dos ríos se ubican dentro de la zona de conservación ecológica principal sitio de recarga natural del acuífero principal. La parte más baja cuenta con una pendiente media del 10 al 12%, cubierta en su mayoría por pinos, oyamel y zonas de pastizales (zacatón) y son aprovechados 430 has para cultivo principalmente de maíz, haba y avena forrajera. El tipo de suelo que predomina en la cuenca del río eslava es el Andosol (90%) y en la cuenca del río Magdalena es el Phaeozem (93%) con un contenido de materia orgánica menor al 5%. La principal fuente de contaminantes detectadas en la región urbana al norte de la delegación son dos gasolineras, cinco industrias químicas, cinco ductos de hidrocarburos, así como también una cantidad desconocida de sustancias infiltradas por las fugas de la red de drenaje; en cambio, en la región de conservación ecológica al sur, se han detectado algunas descargas de fosas sépticas, presencia de ganado y fugas de la tubería de drenaje de los locales comerciales y en los trucheros provenientes sobre todo de la comunidad de Atlitic en la cual la principal actividad es la venta de alimentos y bebidas (DGCOH 2007; Lesser 2003).

A nivel subterráneo, se distingue un acuitardo superior con un espesor promedio de 20 a 50 m, formado por arcillas lacustres recientes intercaladas con brechas, aglomerados y tobas. La conductividad hidráulica (k) va de 0.00086 hasta 0.0864.6 m/día y tiene un coeficiente de almacenamiento (S) de 0.012 (Zúñiga, 2003). Adyacente se localiza el acuífero principal conocida como formación Tarango; se compone por depósitos piroclásticos Plio–Cuaternarios, además por rocas andesíticas y basálticas tanto del Plioceno Superior como del Plioceno Inferior localizadas en la base de la sierra de las Cruces, presenta una variedad litológica y de espesor que va entre los 100 y los 500 m que experimenta cambios hidrogeológicos laterales y verticales considerables, así como diferentes grados de conductividad hidráulica, sin embargo el coeficiente de almacenamiento se considera constante con un valor de 0.2 (Tabla B.3 y Figura B.2). Finalmente, subyacente al acuífero principal se encuentra un basamento hidrogeológico constituido por rocas volcánicas andesíticas del Mioceno, es su mayoría se considera impermeable; presenta algunas fracturas cuya conductividad hidráulica (k) es de 0.000864 (Lesser 2003).

Tabla B.3. Valores de conductividad hidráulica por unidad hidrogeológica del acuífero de Magdalena Contreras. Modificado de Ruvalcaba (2009)

Unidad hidrogeológica	Conductividad hidráulica (m/d)	
	mínimo	máximo
Depósitos aluviales del Cuaternario (Qal)	0.3542	30.24
Rocas volcánicas basálticas-andesíticas del Plioceno Superior (Tpba)	1.1232	596.16
Rocas volcánicas del Cuaternario (Qb)	1.4688	2,505.6
Secuencia volcánica piroclástica y clástica del Plioceno (Tppc)	0.1036	31.10

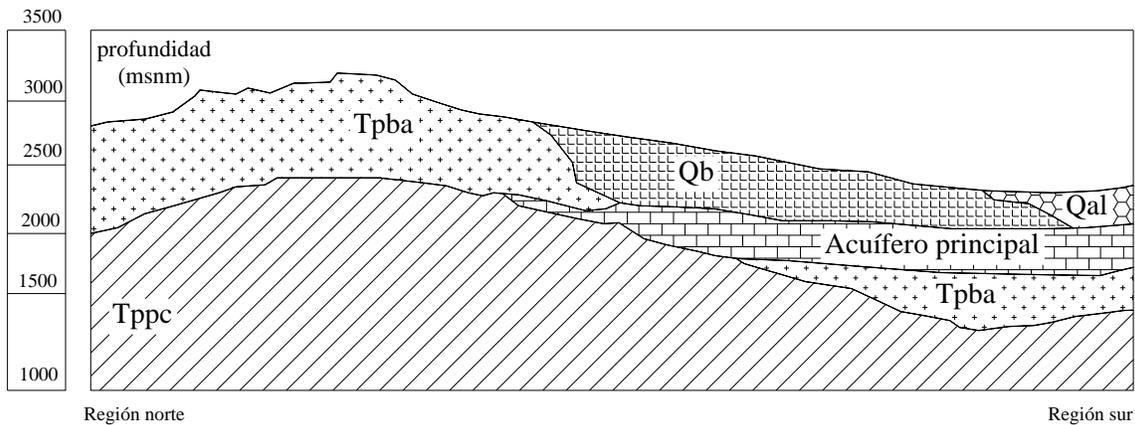


Figura B.2. Perfil litográfico del acuífero de Magdalena Contreras con unidades hidrogeológicas. Modificado de Ruvalcaba 2009

La información proporcionada por el SACM (2007) describe que la delegación Magdalena Contreras tiene una cobertura de agua potable entubada del 98%. Las fuentes de suministro son el Sistema Lerma Ramal Sur a través de la derivación San Bernabé-Picacho, el sistema de manantiales que alimentan el río Magdalena, y en menor proporción por nueve pozos municipales y particulares, en su totalidad dotan con 0.7 a 1.0 m³/s, el cual es transportado a través del acueducto de La Magdalena, hacia tanques de almacenamiento y plantas de bombeo; para posteriormente distribuir el agua por medio de la red primaria (Tabla B.4).

De estos nueve pozos, cinco de ellos operados por el SACM que aportan un caudal de 63 L/s, beneficiando a cerca de 30,000 habitantes de las colonias San Jerónimo Lídice, Héroes de Padierna y Pedregal II; los cuatros pozos restantes son propiedad del IMSS y abastecen a la unidad habitacional Independencia de 13,500

habitantes con 30 L/s, de estos últimos no se cuenta con datos de calidad del agua por lo cual no son tomados en cuenta en este estudio.

La principal zona de recarga del acuífero es en la región sur en la parte alta de la cuenca que va de la sierra de las Cruces hasta el “segundo dinamo”. Los gradientes hidráulicos muestran que el agua subterránea fluye en forma vertical y transversal a través de los estratos basálticos hacia las tierras bajas de la planicie de la cuenca, a partir de las Sierras Chichinautzin y de las Cruces, es decir en dirección suroeste a noreste y noroeste (Zúñiga 2003, Lesser 2003).

Tabla B.4. Infraestructura de abastecimiento de agua potable en Magdalena Contreras. SACM 2007

descripción	cantida d	unidad
Corriente superficial	29	Arroyo
Pozos operados por la DGCOH	5	Pozo
Pozos operados por particulares	4	Pozo
Acueductos	9,340	m
Tanques de agua potable	39	Tanque
Plantas de bombeo	6	Planta
Planta potabilizadora	1	Planta
Tomas domiciliarias domésticas	49,292	Toma
Tomas no domésticas	125	Toma

Anexo C. Bases de datos originales y de análisis

Precipitación mensual de Xochimilco

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ACUMULADA
1980	4	2	8	19	53	138	141	151	139	57	7	2	721
1981	3	2	7	18	52	134	139	148	133	56	6	2	699
1982	15	6	15	31	66	169	149	173	181	67	17	6	897
1983	2	2	6	15	46	128	136	136	126	54	4	1	655
1984	4	2	7	18	55	136	143	156	142	60	8	2	733
1985	0	1	1	4	26	69	119	101	52	34	0	0	407
1986	0	2	2	7	40	86	130	134	74	39	2	0	516
1987	1	1	5	12	45	107	130	135	89	37	3	0	565
1988	0	0	2	7	35	88	125	118	66	32	3	0	477
1989	0	1	1	4	30	70	121	112	48	26	1	0	412
1990	0	1	1	3	28	61	118	107	37	21	1	0	378
1991	0	1	2	7	38	84	125	126	60	25	1	0	471
1992	3	1	6	14	48	116	132	142	96	32	4	1	595
1993	3	1	7	16	49	127	135	143	112	38	4	1	636
1994	4	2	8	19	53	137	139	151	131	44	6	2	696
1995	0	1	3	11	42	109	131	130	98	39	2	0	566
1996	27	8	21	39	75	184	154	190	199	64	26	11	998
1997	13	6	15	31	60	170	145	157	176	60	12	4	849
1998	6	5	9	23	57	153	146	159	165	64	10	3	799
1999	0	3	1	1	17	46	112	83	95	27	1	0	386
2000	6	2	7	19	63	129	146	176	132	55	12	4	752
2001	48	9	35	54	78	207	153	185	212	65	31	14	1091
2002	11	7	15	30	58	171	145	156	176	65	11	3	849
2003	0	0	1	4	29	79	124	109	71	41	0	0	457
2004	36	9	23	42	83	189	160	207	215	76	36	16	1093
2005	38	12	31	50	73	207	152	174	221	73	24	10	1064
2006	1	2	5	14	43	126	136	133	128	60	3	1	651
2007	1	1	3	12	48	116	139	146	122	57	5	1	652
media	8	3	9	19	50	126	137	144	125	49	9	3	681
S²	170	10	82	202	271	193	148	124	285	254	94	20	44272

Días lluviosos en Xochimilco

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ACUMULADA
1980	5	2	0	7	11	13	16	22	18	9	3	0	106
1981	2	4	4	6	14	23	13	15	17	12	2	3	115
1982	0	5	3	6	10	10	15	13	12	5	1	1	81
1983	5	2	1	0	4	7	25	17	19	8	4	2	94
1984	3	3	1	0	17	23	23	16	22	14	1	2	125
1985	2	4	4	14	13	15	20	22	17	6	1	1	119
1986	0	0	2	11	20	28	17	20	20	10	7	0	135
1987	0	1	3	7	10	21	23	23	13	9	3	0	113
1988	0	2	4	2	12	14	20	19	11	7	3	1	95
1989	0	2	3	5	13	18	21	19	17	9	3	1	111
1990	2	0	4	7	11	16	19	23	20	6	2	0	110
1991	1	1	2	6	9	17	23	21	18	7	3	1	109
1992	0	3	3	6	11	13	17	16	21	8	2	2	102
1993	3	3	3	4	8	16	18	16	15	8	3	0	97
1994	2	1	0	7	14	21	20	21	16	13	3	0	118
1995	2	7	0	7	7	18	21	23	14	4	8	0	111
1996	0	0	0	7	3	18	16	23	15	10	0	4	96
1997	0	1	9	9	17	14	17	23	19	12	6	4	131
1998	4	0	0	1	2	12	16	22	27	16	6	0	106
1999	0	0	4	5	8	12	23	20	13	9	2	0	96
2000	0	2	4	7	16	21	12	19	14	8	4	1	108
2001	1	1	3	7	10	18	22	13	10	6	2	1	94
2002	0	0	6	9	5	10	24	19	18	12	5	1	109
2003	0	0	3	5	5	25	16	22	20	10	2	0	108
2004	6	0	4	7	12	19	22	20	21	10	0	2	123
2005	2	1	2	8	7	16	20	22	11	4	0	0	93
2006	0	0	7	5	18	19	25	22	24	14	6	1	141
2007	2	5	5	5	18	16	19	20	0	0	0	0	90
media	2	2	3	6	11	17	19	20	17	9	3	1	108
S²	3	4	5	9	23	23	12	9	27	12	5	1	202

Precipitación mensual de Xochimilco

Región Oeste

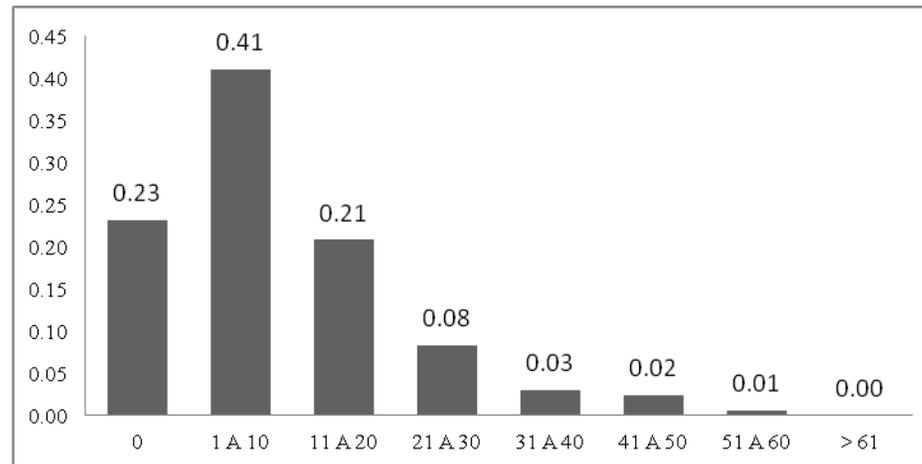
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ACUMULADA
1980	5	2	11	21	51	129	129	140	113	51	7	3	664
1981	4	2	10	20	49	126	128	137	108	50	6	2	644
1982	16	6	18	32	65	152	136	163	148	60	14	11	820
1983	3	1	9	18	43	123	125	123	103	50	5	1	601
1984	4	3	10	21	54	127	131	146	114	52	9	3	673
1985	0	0	2	6	22	78	113	88	41	31	0	0	381
1986	0	0	4	11	38	92	124	126	56	32	2	0	485
1987	3	1	8	16	40	109	124	126	73	34	2	1	535
1988	0	0	5	10	31	95	119	108	54	29	1	0	451
1989	0	0	2	7	26	80	117	102	37	23	0	0	395
1990	0	0	2	6	24	73	115	99	28	19	0	0	366
1991	0	0	5	11	34	92	122	119	48	23	1	0	456
1992	5	1	10	18	44	117	126	133	80	31	3	2	570
1993	4	1	10	19	46	124	127	133	94	37	4	2	602
1994	5	2	11	21	51	129	129	141	108	43	6	3	651
1995	1	1	6	14	38	108	123	118	80	38	3	0	530
1996	6	4	12	24	57	139	132	146	134	59	11	4	727
1997	26	10	22	38	75	162	141	183	163	59	19	19	917
1998	15	4	18	30	57	182	131	143	148	59	10	7	805
1999	0	0	0	2	13	59	107	69	153	26	0	0	430
2000	7	4	10	23	63	122	137	173	103	44	11	8	705
2001	55	11	36	50	73	182	138	174	181	63	16	27	1006
2002	12	4	18	29	57	155	131	141	148	60	11	5	771
2003	0	0	1	6	27	84	116	95	55	37	1	0	422
2004	29	13	22	42	85	163	145	203	173	65	25	29	995
2005	43	9	32	45	68	180	135	160	187	71	16	19	964
2006	1	1	7	15	42	120	124	118	103	53	5	0	590
2007	1	1	5	15	48	112	128	136	95	49	6	1	597
media	9	3	11	20	47	122	127	134	105	45	7	5	634
S²	189	13	79	153	302	1144	76	885	2120	214	42	67	35301

Región Este

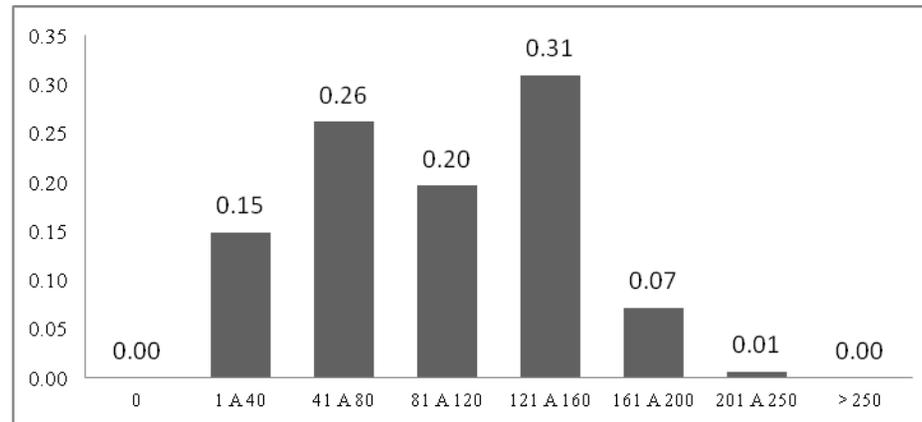
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ACUMULADA
1980	3	2	5	17	55	146	152	163	165	63	7	1	779
1981	2	2	4	15	54	141	151	160	158	62	6	1	754
1982	15	5	13	31	67	187	163	184	213	74	19	2	974
1983	1	2	3	13	49	134	147	150	148	59	3	0	709
1984	3	2	4	16	55	145	155	167	170	68	7	1	793
1985	0	2	0	1	30	60	125	114	64	37	0	0	434
1986	0	3	0	4	42	81	136	141	91	47	1	0	547
1987	0	2	1	8	49	105	137	143	105	41	3	0	595
1988	0	0	0	4	39	81	130	129	79	36	5	0	503
1989	0	1	0	1	34	60	124	121	58	29	2	0	429
1990	0	2	0	1	32	49	120	116	45	24	1	0	390
1991	0	1	0	3	43	76	129	133	72	28	1	0	486
1992	0	0	2	10	53	116	139	150	111	34	4	0	620
1993	1	1	3	13	53	130	143	153	130	38	5	0	671
1994	3	2	5	17	55	144	149	162	153	45	7	0	741
1995	0	1	1	8	45	109	140	142	116	39	1	0	602
1996	28	6	20	40	75	206	168	198	234	69	33	2	1079
1997	10	8	12	32	63	187	158	172	204	60	14	1	921
1998	6	6	7	23	57	167	159	172	195	69	9	1	870
1999	0	5	2	0	20	34	117	96	38	29	2	0	342
2000	5	0	5	14	62	136	156	180	162	65	14	1	799
2001	40	8	35	57	83	232	167	195	244	68	45	1	1176
2002	9	9	12	32	60	188	160	172	205	70	11	1	927
2003	0	0	0	2	30	74	132	122	86	44	0	0	492
2004	43	6	23	42	81	214	175	212	257	87	47	4	1192
2005	33	14	30	55	77	234	168	189	254	76	33	2	1165
2006	0	3	2	12	44	131	149	149	152	66	2	1	711
2007	1	1	1	9	48	121	150	157	149	65	3	1	706
media	7	3	7	17	52	132	146	155	145	53	10	1	729
S²	163	11	88	261	246	3102	253	781	4212	313	178	1	58743

Análisis de frecuencias de los datos de precipitación mensual en la región Oeste de Xochimilco (1980-2007)

Estiaje		
Rango	Frecuencia	Probabilidad
0	39	0.23
1 A 10	69	0.41
11 A 20	35	0.21
21 A 30	14	0.08
31 A 40	5	0.03
41 A 50	4	0.02
51 A 60	1	0.01
> 61	0	0.00
TOTAL	167	1.0

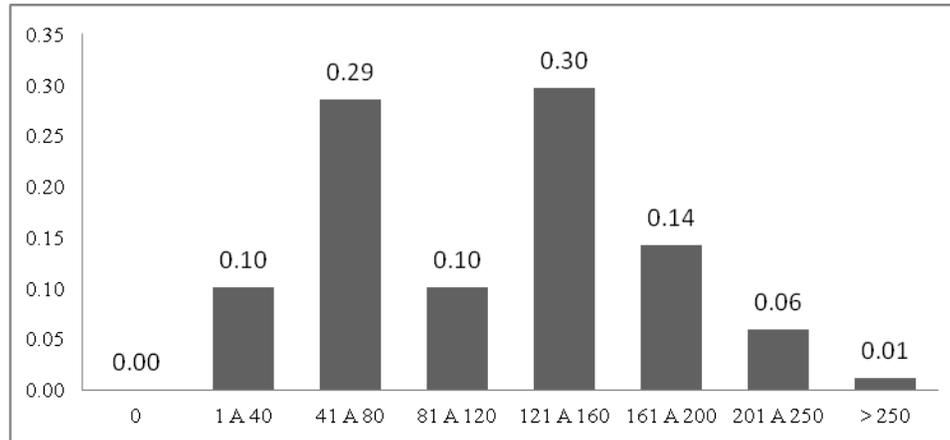


Lluvias		
Rango	Frecuencia	Probabilidad
0	0	0.00
1 A 40	25	0.15
41 A 80	44	0.26
81 A 120	33	0.20
121 A 160	52	0.31
161 A 200	12	0.07
201 A 250	1	0.01
> 250	0	0.00
TOTAL	167	1.0

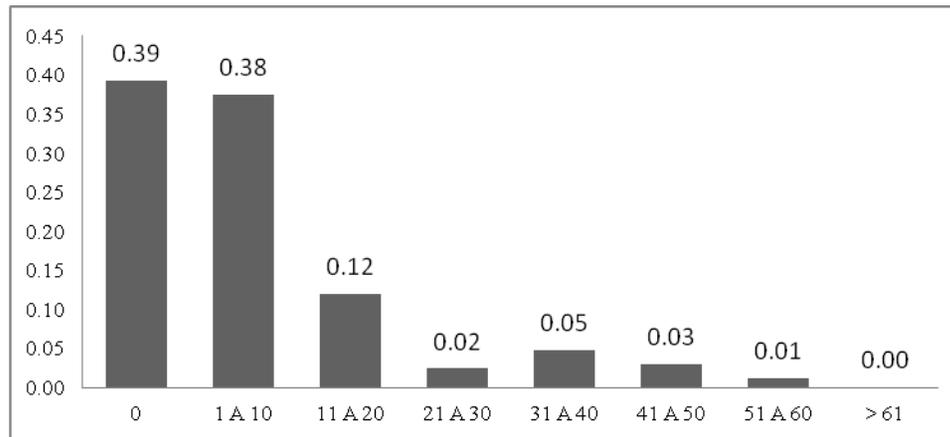


Análisis de frecuencias de los datos de precipitación mensual en la región Este de Xochimilco (1980-2007)

Estiaje		
Rango	Frecuencia	Probabilidad
0	66	0.39
1 A 10	63	0.38
11 A 20	20	0.12
21 A 30	4	0.02
31 A 40	8	0.05
41 A 50	5	0.03
51 A 60	2	0.01
> 61	0	0.00
Total	168	1.0



Lluvias		
Rango	Frecuencia	Probabilidad
0	0	0.00
1 A 40	17	0.10
41 A 80	48	0.29
81 A 120	17	0.10
121 A 160	50	0.30
161 A 200	24	0.14
201 A 250	10	0.06
> 250	2	0.01
Total	168	1.0



Prueba de homogeneidad en Xochimilco

t-Test, $\alpha = 0.005$, se rechaza H_0 si $t_0 < t$

Mann-Whitney Test, $\alpha = 0.005$, se rechaza H_0 si $Z_0 < Z$

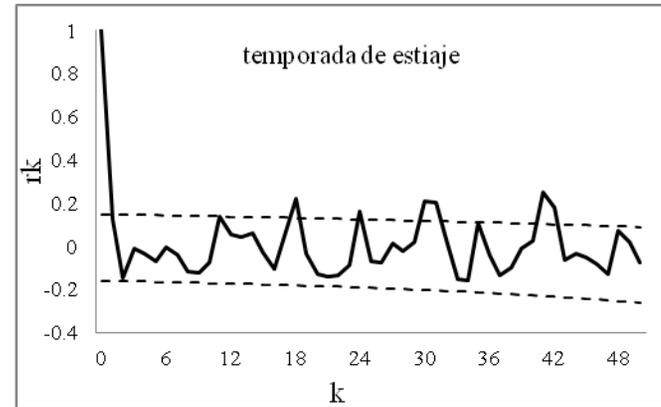
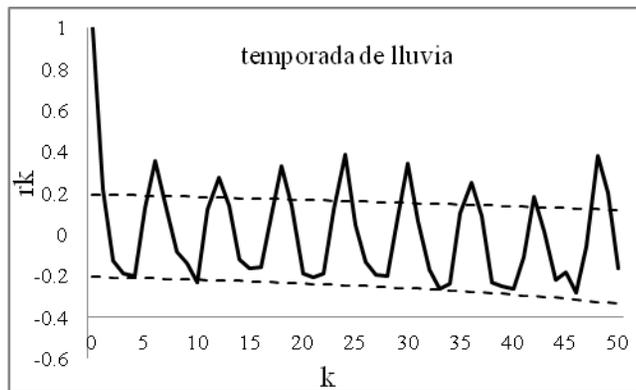
Temporada de lluvias			Temporada de estiaje		
H_0 : lluvia 1961-1980 \neq lluvia 1981-2007			H_0 : estiaje 1961-1980 \neq estiaje 1981-2007		
H_1 : lluvia 1961-1980 = lluvia 1981-2007			H_1 : estiaje 1961-1980 = estiaje 1981-2007		
estadístico	Oeste	Este	estadístico	Oeste	Este
t_0	1.55	0.79	t_0	0.78	0.26
t	0.12	0.43	t	0.93	0.79
Z_0	1.5	1.26	Z_0	0.07	1.26
Z	0.13	0.45	Z	0.95	0.21

En la temporada de lluvias, como $t_0 > t$, y $Z_0 > Z$, entonces NO se rechaza H_0 , con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$; esto es, SI existe suficiente evidencia para afirmar que el promedio de lluvia acumulada mensual en Xochimilco durante la temporada de lluvia en el periodo de 1961 a 1980 es diferente al que se presentó durante el periodo de 1981 al 2007.

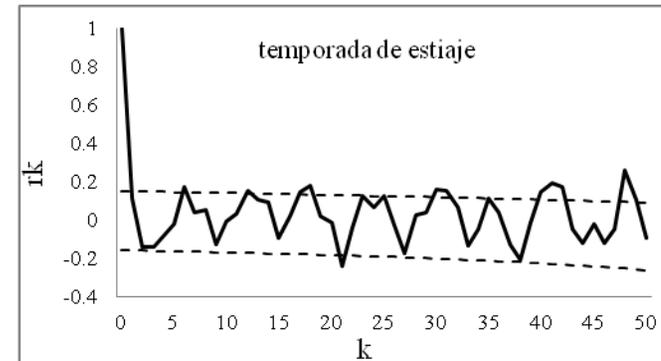
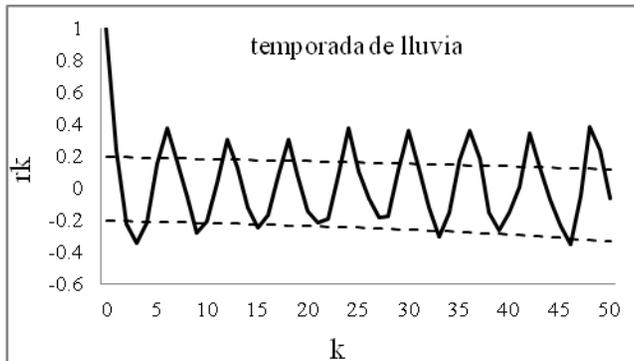
En la temporada de estiaje, como $t_0 < t$ pero $Z_0 > Z$, entonces SI se rechaza H_0 con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$; esto es, NO existe suficiente evidencia para afirmar que el promedio de lluvia acumulada mensual en Xochimilco durante la temporada de estiaje en el periodo de 1961 a 1980 es diferente al que se presentó durante el periodo de 1981 al 2007.

Prueba de independencia en Xochimilco

Región Oeste



Región Este



Se observa la existencia de una mayor cantidad de valores superiores a los límites estimados en los datos de precipitación mensuales a partir de la década de los ochenta, en comparación con las décadas anteriores.

Prueba de normalidad en Xochimilco
Shapiro-Wilk Test, $\alpha = 0.005$, se rechaza H_0 si $W > p$

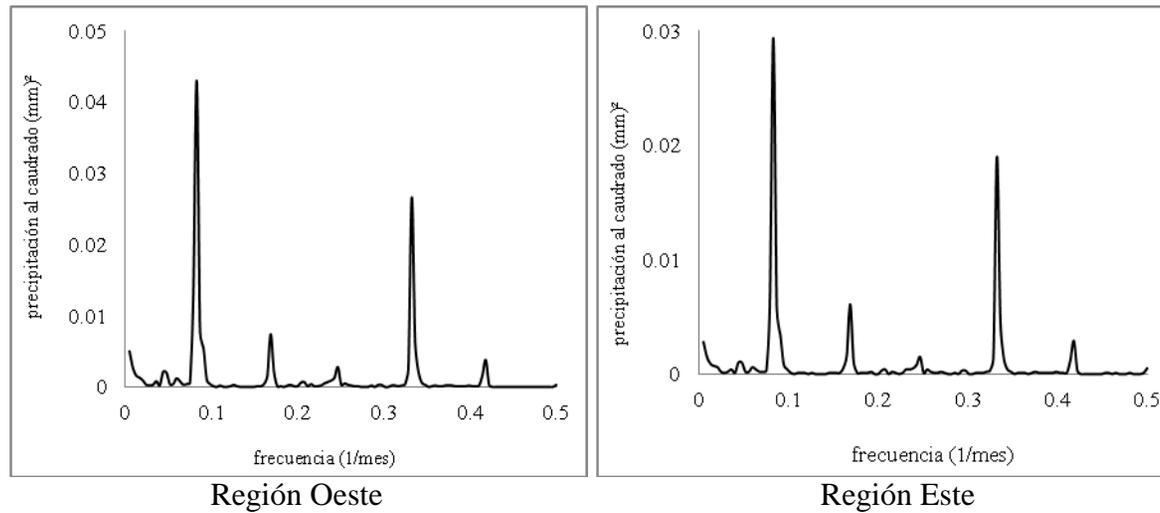
H_0 : los datos se ajustan a la función normal
H_1 : los datos no se ajustan a la función normal

Temporada de lluvias		
estadístico	Oeste	Este
W	0.97	0.97
p	0.02	0.01

Temporada de estiaje		
estadístico	Oeste	Este
W	0.69	0.75
p	<0.0001	<0.0001

Como $W > p$, entonces se rechaza H_0 , con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$; esto es, los datos de precipitación mensual en la temporada de lluvias y estiaje en las regiones Oeste y Este de Xochimilco NO se ajustan a la función de distribución normal.

Prueba de aleatoriedad para la base de datos de precipitación mensual en Xochimilco



$$w_1=1/0.08, P_1 = 12 \text{ meses}, w_2=1/0.33, P_2= 3 \text{ meses}$$

Es decir, los datos de precipitación mensual en ambas regiones de Xochimilco presentan dos ciclos en los cuales la varianza no se distribuye entre todas las frecuencias, lo que se interpreta, para el primer caso como el ciclo anual entre temporada de estiaje y lluvias; en cambio el segundo ciclo puede corresponder a precipitaciones extraordinarias.

Anomalías de precipitación mensual generadas por la herramienta SIECCRe para el modelo MPIECHAMP5 para el escenario A2 de GEI's para Xochimilco para el periodo 2011-2030

Futuro corto plazo (2011-2030)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2011	9.2	5.3	-3.8	-19.8	37.9	35.7	-20.3	-3.3	-12.8	-3.7	-22.4	0.3
2012	23	2.6	-6.5	22.9	-11.1	21.9	-31.5	3.6	34	30	-6.9	0.6
2013	-3.1	8	-3.2	32.4	2.5	112.7	1.7	-24.9	-42.2	20.2	-5	-0.3
2014	-3.8	-5.4	3	0.3	-11.4	20.8	-17.9	-5.9	-77.2	7	9.4	-1.8
2015	19.5	-1.2	-3	18.9	-14.5	55.8	-4.2	-27.3	-42.1	-4.7	22.1	-1.1
2016	-11.7	4	2	-9.6	6.3	35.7	-23.3	-55.6	4.4	-21.7	3.5	1.2
2017	20	-2.2	-0.1	-8.6	50	72.9	2.1	15.1	-72.7	-15.2	-18.8	0.2
2018	-7	4	0.9	2.5	55.4	5.3	9	-32.4	9.5	-8.4	18.4	-0.6
2019	-1.6	0.2	0.4	-10.7	18.3	12.4	-12.2	-19.5	-6.5	-14.7	-22.3	0
2020	2	-4.6	1.4	-12.7	11.9	24.3	-26.6	-59.6	-62.7	24.1	27.1	-3.5
2021	-4.8	-5.1	-1.2	-0.2	-13.7	140.4	14.5	-6.3	56.6	0.2	17	-1
2022	-10.8	3.8	4.5	4.9	45.8	-80.3	-7.9	-14.4	3.3	40.8	-12	2.5
2023	22	4.9	2.6	-17.8	18.7	-27.5	-20.5	29.4	26.2	4.7	10.8	0
2024	10.9	-2	-0.9	-5.3	12	13.6	-13.6	-34.7	-21.7	-22.1	-3	1.1
2025	10.4	-1.4	-0.5	-11.8	21	70.5	19.2	-12.7	11.5	45.7	2.1	-0.3
2026	6.9	-5.1	-0.1	-13.9	-28.5	-9.1	-15.4	45.6	-82.3	-51.2	20.8	2
2027	7.2	-0.7	3.9	-20.1	-1	66	-39	-5	18.2	-7.8	1.6	5.4
2028	10	-5.2	-3.7	-19.5	61.5	15.1	-5.2	-48.5	-51.6	33	21.8	-3
2029	0.5	4.9	-6.2	4.6	39.6	4.7	24.7	27	-13	11.9	13.4	-2.7
2030	17.5	3.8	3.9	37.3	12.6	-0.3	-17.1	-48.6	-43.5	22.9	-6.2	-0.1
media	5.02	0.39	-0.29	-1.91	15.68	25.48	-9.71	-10.75	-20.95	4.65	2.86	0.03
S ²	121.8	16.5	9.61	275.5	601.3	2456	266.6	955.4	1572	536	225	3.81

Futuro mediano plazo (2031-2050)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2031	13.46	-3.01	0.41	10.44	38.57	-22.29	-10.85	22.25	0.32	-54.66	-22.62	1.49
2032	-6.59	-0.3	-5.43	-15.91	-12.82	84.33	21.28	-35.96	-62.47	-7.33	-21.76	-1.67
2033	6.07	4.36	-1.03	-17.22	17.67	28.17	-18.63	1.44	40.88	0.94	33.17	-0.76
2034	0.16	-1.21	0.97	-19	-2.71	-50.99	-5.01	-39.17	-42.77	-16.93	-22.02	-1.13
2035	-5.81	0.75	0.18	0.05	71.41	-22.81	58.17	-10.43	-27.98	7.92	23.97	-2.85
2036	-0.37	-1.27	1.27	-11.92	32.25	30.57	29.76	-26.04	-58.64	23.93	13.06	1.01
2037	6.91	1.59	-5.32	-13.08	-28.11	70.46	10.21	-9.94	99.05	5.32	15.06	0.07
2038	-8.71	5.02	1.13	-13.52	-20.38	78.45	-25.8	30.23	19.07	-41.57	-4.85	1.53
2039	-2.16	5.78	5.37	-0.43	2.26	28.43	-29.2	-14.83	20.89	5.43	-22.43	-3.97
2040	0.34	2.21	-0.28	17.2	3.47	84.65	-22.99	-12.23	-16.48	0.97	-17.83	3.73
2041	7.04	-1.61	-6.2	-16.92	-0.89	51.23	-7.74	27.18	-64.85	-31.06	27.67	1.55
2042	13.12	-2.77	-0.86	-16.53	-4.83	-32.56	16.67	-16.9	-7.1	-5.94	1.69	-3.39
2043	-11.04	-4.34	5.55	7.51	47.53	-29.99	-54.41	-28.76	45.72	6.14	37.16	-1.28
2044	4.02	2.06	2.94	-2.91	42.61	11.59	-17.43	-5.01	12.57	7.04	-8.81	4.53
2045	-10.87	-4.07	0	-11.29	2.41	-5.25	-4.9	-36.57	-6.03	-44.04	-15.38	0.29
2046	-2.92	5.3	-1.54	-3.43	-17.12	15.02	-26.38	38.7	-9.93	6.51	-22.12	0.31
2047	9.13	10.01	4.46	-5.07	19.17	43.41	-21.58	4.63	-45.06	-22.27	-14.27	-2.54
2048	11.36	-0.93	-2.02	-16.33	28.9	-75.64	-24.26	5.62	-36.2	-16.68	-12.24	-1.51
2049	16.95	2.1	-3.05	5.16	-18.2	-13.09	-8.61	-54.92	-2.44	-6.96	-8.54	-0.66
2050	13.81	-4.7	-0.47	-2.88	40.91	36.82	-23.36	-10.7	95.42	-20.73	16.64	3.45
media	2.7	0.75	-0.2	-6.3	12.1	15.53	-8.25	-8.57	-2.3	-10.2	-1.22	-0.09
S ²	76.61	15.4	10.8	110.9	737.3	2149	631.4	627.3	2184	420.6	421.8	5.53

Datos generados de precipitación mensual (10,001 iteración) por el modelo PAR(2) en la región Oeste de Xochimilco para las proyección a futuro

Futuro corto plazo (2011-2030)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2011	6	2	11	17	56	144	125	114	159	71	6	3
2012	5	2	9	25	73	142	122	175	112	66	6	2
2013	16	7	17	42	77	192	134	233	216	156	13	11
2014	3	1	9	18	41	118	131	123	66	57	5	1
2015	5	3	10	25	82	144	128	185	142	94	10	3
2016	0	0	2	5	29	78	117	79	50	36	0	0
2017	0	0	4	10	57	92	121	118	193	58	2	0
2018	3	1	8	16	36	108	125	127	138	35	3	1
2019	0	0	5	9	60	102	124	104	132	39	1	0
2020	0	0	2	6	73	86	122	100	161	38	1	0
2021	0	0	2	6	47	70	114	105	97	52	0	0
2022	0	0	5	11	41	93	126	128	170	5	1	0
2023	6	1	10	15	115	143	135	124	256	34	3	2
2024	5	1	10	18	44	115	126	124	100	42	4	2
2025	6	2	11	19	45	123	128	122	116	72	6	3
2026	1	0	6	12	49	104	125	103	60	36	3	0
2027	7	4	13	19	37	132	135	111	79	83	11	4
2028	28	9	21	31	74	170	134	154	362	79	23	19
2029	15	5	17	32	49	193	131	150	136	62	11	7
2030	0	0	0	3	66	63	113	99	19	37	0	0
media	5	2	9	17	58	121	126	129	138	58	5	3
S ²	50	6	32	101	419	1379	42	1273	6127	988	33	22

Futuro mediano plazo (2031-2050)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV
2031	6	2	11	24	64	139	126	126	220	55	6
2032	4	2	10	17	68	141	115	147	98	123	5
2033	17	6	18	26	82	201	132	193	254	200	18
2034	3	1	9	14	41	116	132	99	64	28	4
2035	4	3	10	21	77	145	128	185	243	72	11
2036	0	0	2	5	29	77	118	70	66	47	0
2037	0	0	4	9	61	93	114	103	138	98	3
2038	2	1	8	14	33	113	126	110	110	62	2
2039	0	0	5	10	59	108	130	103	135	50	1
2040	0	0	2	8	74	87	121	117	167	70	0
2041	0	0	2	5	50	69	107	87	96	79	0
2042	1	0	5	9	46	90	125	107	162	3	1
2043	4	1	11	20	102	137	142	133	378	24	4
2044	5	1	11	19	46	117	130	120	142	47	4
2045	5	2	11	19	40	118	128	108	118	68	5
2046	1	1	6	13	47	110	123	100	50	41	2
2047	7	4	13	23	40	146	141	105	94	119	9
2048	28	10	22	32	83	168	131	129	467	19	16
2049	18	4	18	32	57	197	127	158	112	54	9
2050	0	0	0	2	75	60	112	97	27	50	0
media	5	2	9	16	59	122	126	120	157	65	5
S ²	56	6	34	75	369	1476	80	965	12064	1924	27

Datos generados de precipitación mensual (10,001 iteración) por el modelo PAR(2) en la región Este de Xochimilco para las proyección a futuro

Futuro corto plazo (2011-2030)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2011	3	2	4	13	33	123	138	120	170	60	5	1
2012	2	2	4	19	69	152	143	203	140	74	5	1
2013	14	6	13	41	80	271	164	263	280	187	18	2
2014	1	2	3	13	43	110	151	154	110	62	3	0
2015	4	2	4	19	98	185	155	216	181	120	9	1
2016	0	2	0	1	57	67	132	113	75	52	0	0
2017	0	3	0	3	109	122	145	137	195	97	1	0
2018	0	2	1	8	42	112	143	143	151	45	3	0
2019	0	0	0	3	25	58	125	103	67	29	4	0
2020	0	1	0	1	26	42	119	92	53	27	3	0
2021	0	2	0	1	41	48	119	109	45	60	1	0
2022	0	1	0	4	27	69	133	123	91	5	1	0
2023	1	0	2	9	66	126	151	121	134	35	5	0
2024	1	1	3	13	52	114	146	142	133	56	5	0
2025	3	2	5	15	105	178	162	158	237	133	7	0
2026	0	0	1	7	45	85	140	121	70	39	2	0
2027	30	6	21	32	68	251	175	158	282	135	33	2
2028	11	7	12	25	37	137	147	133	249	61	17	1
2029	6	6	6	24	62	181	149	189	291	75	10	1
2030	0	5	2	0	43	27	112	133	43	21	2	0
media	4	3	4	13	56	123	142	147	150	69	7	1
S ²	55	5	28	128	664	4354	256	1790	6917	2041	64	0

Futuro mediano plazo (2031-2050)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV
2031	3	2	5	19	37	119	138	133	236	47	5
2032	2	2	4	13	65	152	135	170	122	136	4
2033	16	5	13	26	85	282	162	217	330	240	26
2034	1	2	3	11	43	109	152	125	107	30	2
2035	3	2	4	16	92	187	156	216	310	92	9
2036	0	2	0	1	57	66	134	100	100	68	0
2037	0	3	0	3	117	124	137	119	140	165	1
2038	0	2	1	7	39	118	144	124	121	80	3
2039	0	0	0	4	24	61	132	102	69	38	4
2040	0	1	0	2	26	43	119	108	55	50	2
2041	0	2	0	1	44	48	112	90	45	91	1
2042	0	1	0	3	31	67	132	103	87	4	1
2043	0	0	3	11	59	120	160	130	198	25	6
2044	1	1	3	13	54	117	150	138	189	62	4
2045	2	2	5	15	94	171	162	141	243	126	6
2046	0	1	1	8	43	89	138	117	58	45	1
2047	31	7	21	38	74	276	183	150	336	193	28
2048	11	7	12	26	41	136	144	111	321	15	12
2049	7	6	7	24	72	185	145	199	238	65	8
2050	0	5	2	0	49	26	111	129	60	28	2
media	4	3	4	12	57	125	142	136	168	80	6
S	58	5	29	107	628	4886	313	1393	10316	3948	59

Datos originales de calidad del agua en la región Oeste de Xochimilco (1980-2007)
 conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1981					622							
1982						622						
1983			377	380	495	220	400	240	230	240	630	1080
1984	270	1150	180	250	385	1000	390	280	365	360		450
1985	450	720	580	500		255	230	380	260	395	285	310
1986			370	135	520	385	595	525		346	159	330
1987	370	275	390	340	390	280	880			360	275	
1988	315	235		360	380	345	420	630	370	345		610
1989	380	265	330	390	290	880	350	365	400	255	380	670
1990	250	330	370	870	340	420	370	440	750	820	365	860
1991	770	900	250	870	400	950	720	720	740	310	770	360
1992	350	700	680	315	780	760	800	740	720	920	950	920
1993		760	215	780	448	800	400	828	358	828		783
1994	481	515	246	392	828	291	246	985	1007	671	560	392
1995		381	369	395	891	380	870	870	891	870	446	891
1996	739	157	742	897	774	670	942	670	848	659	869	283
1997	847	733	419	806	837	398	837	816	314	942	303	871
1998			841		838	858	630	848	686	787	686	868
1999		505	787	807	505	505	807	828	214	757	807	776
2000	734	441			739	464	464	762	459	748	726	429
2001	220	419	224	471	740	426	505	451	762		424	424
2002	444	464	448	418	722	767	414	187	293	484	646	318
2003	727	626	217	252	608	177	211	727	141	608		604
2004		493	1211	463		422	454	414	363	636	444	545
2005	323	343		404		505	666	151	414	401	451	561
2006		505	464	404	484	504			636	464	444	520
2007		450	330	430	450	560	160		520	379	461	427
media	479	517	448	498	585	532	532	584	510	566	528	595
S	216	261	286	227	191	244	240	252	256	231	223	244

SDT (mg/L)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1981						425						
1982						432						
1983			782	419	314		258			810	477	856
1984		856	150	210		992	300	206	200	234		290
1985	214	434	116			219	380	292			250	232
1986			302	120	430	284			298	278	156	206
1987	282	210	468	252	260	292	684					
1988				276	406	268	326	404	276	244		494
1989	288	216	260	288	220	568		276	312	288	284	476
1990	212	228	264	272	264	524	454	352	544	584	412	584
1991	548	548	220	544	276	544	496	584	528	272	576	556
1992	268	520	592	244	544	540	350	528		736	902	720
1993		528	232	524	332	568	240	590	240	496		440
1994	372	388	244	232	484	212		596	656	532	348	272
1995		284	516	628	568	272	544	540	568	544	268	556
1996	492	252	520	508	488	448	608	380	532	464	564	208
1997	540	492	288	488	504	292	524	516	252	372	204	780
1998			568		532	516	428	650	408	600	440	425
1999		368	512	584	340	396	496	560	192	516	520	584
2000	500	336			456	324	360	340	364	504	444	276
2001		268	224	304	420	292	296	316	504		304	312
2002	348	312	300	280	484	444	296	136		332	416	200
2003	440	332	192	200								336
2004									244	384	254	780
2005		230		264		322	430			124	272	328
2006		336	276		268	320	328		220	272	436	
2007									332			435
media	375	376	351	349	399	414	410	427	371	429	396	450
S	124	185	192	155	112	197	131	154	154	188	197	208

Datos sintéticos de calidad del agua en la región Oeste de Xochimilco (1980-2007)
 conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)

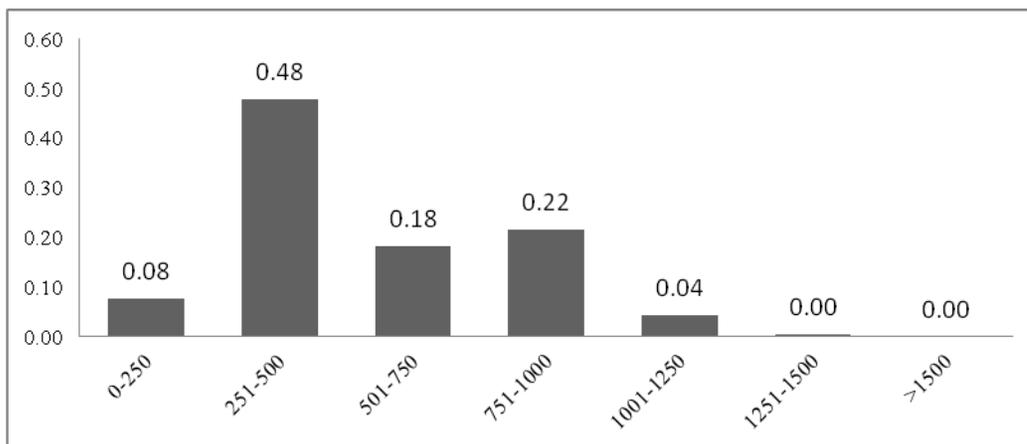
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1981	415	425	389	483	292	271	237	318	299	346	316	300
1982	398	402	366	459	458	482	447	543	503	569	396	400
1983	490	537	488	493	271	252	213	245	219	255	662	788
1984	380	334	307	448	557	543	524	704	552	617	489	459
1985	658	806	764	824	309	307	265	337	316	355	584	692
1986	584	793	796	883	651	911	927	1005	807	844	351	414
1987	553	669	835	702	380	414	493	451	409	449	407	452
1988	624	665	919	654	375	347	449	358	352	400	420	401
1989	413	438	521	443	463	507	611	508	443	489	310	304
1990	500	537	714	670	433	446	583	565	566	631	519	563
1991	761	885	643	1055	1244	1656	1281	1886	1246	1349	595	645
1992	399	354	324	474	512	486	460	636	593	687	371	322
1993	386	398	323	440	586	679	580	721	741	835	549	624
1994	568	602	583	786	391	374	345	505	428	487	352	327
1995	587	712	728	827	232	218	198	276	272	315	386	417
1996	695	744	864	735	526	521	584	528	543	622	562	568
1997	326	401	262	388	312	380	247	369	412	468	526	742
1998	486	511	467	601	949	1202	1196	1327	1227	1356	475	497
1999	641	696	665	624	767	876	855	772	906	1033	477	477
2000	517	551	465	555	481	502	420	509	529	609	564	616
2001	258	204	253	299	463	430	573	597	524	584	559	547
2002	227	175	160	193	497	476	482	488	494	564	735	785
2003	296	297	212	252	286	285	203	243	294	346	402	439
2004	620	729	716	738	457	494	467	515	529	597	380	389
2005	452	453	543	495	396	382	451	423	399	450	466	471
2006	551	624	601	725	410	427	397	511	433	486	495	544
2007	375	372	354	426	806	988	1037	1054	879	955	335	321
media	491	535	532	586	497	546	533	603	549	615	478	512
S	140	191	219	213	253	367	308	413	280	301	121	160

SDT (mg/L)

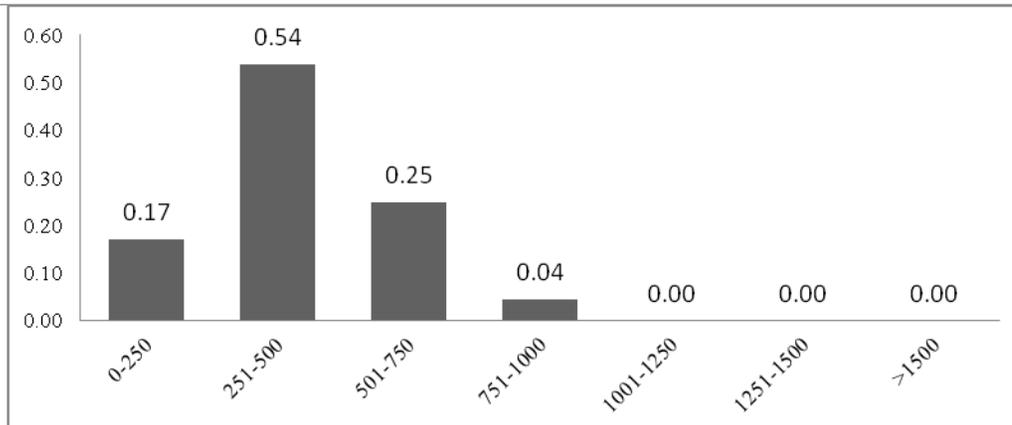
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1981	492	536	509	633	352	343	325	391	357	390	621	729
1982	419	432	409	501	366	361	342	413	377	418	316	297
1983	257	247	204	237	432	492	410	501	567	648	334	350
1984	378	347	259	399	345	307	229	349	283	320	293	246
1985	256	180	213	278	520	462	551	773	694	840	549	497
1986	268	243	269	294	409	426	474	541	465	516	419	439
1987	402	374	483	428	439	420	543	485	492	579	337	296
1988	458	495	461	510	443	474	441	487	412	504	239	208
1989	408	411	516	438	288	260	325	266	249	254	399	400
1990	343	288	368	393	485	458	587	649	625	747	315	258
1991	489	582	411	708	461	538	380	649	421	530	388	428
1992	268	202	167	236	330	267	221	318	327	359	452	407
1993	381	380	316	395	226	189	156	186	195	183	543	607
1994	338	301	313	473	285	240	248	369	291	289	388	361
1995	318	334	338	405	284	288	291	344	304	296	376	417
1996	421	383	463	508	301	245	295	313	275	291	367	320
1997	381	534	369	448	286	364	251	296	282	278	462	691
1998	559	615	592	772	398	392	376	473	467	526	343	322
1999	375	374	338	315	544	613	557	539	672	863	339	327
2000	380	370	375	417	372	361	365	405	401	447	286	255
2001	321	297	346	383	434	442	517	589	512	589	269	235
2002	432	374	459	508	290	220	269	286	247	258	487	438
2003	416	426	432	488	363	355	359	400	373	413	374	369
2004	327	373	316	325	270	289	245	246	251	246	377	452
2005	456	487	600	562	269	241	296	263	172	180	285	260
2006	365	354	351	326	333	313	309	285	275	307	245	208
2007	307	284	270	308	318	298	284	324	308	326	251	217
media	379	379	376	434	366	360	359	415	383	432	374	373
S	79	113	113	140	86	111	118	151	146	196	103	146

Análisis de frecuencias de los datos mensuales de calidad del agua en la región Oeste de Xochimilco (1980-2007)

Conductividad		
Rango	Frecuencia	Probabilidad
0-250	21	0.08
251-500	131	0.48
501-750	50	0.18
751-1000	59	0.22
1001-1250	12	0.04
1251-1500	1	0.00
>1500	0	0.00
TOTAL	274	1.00



SDT		
Rango	Frecuencia	Probabilidad
0-250	39	0.17
251-500	124	0.54
501-750	57	0.25
751-1000	10	0.04
1001-1250	0	0.00
1251-1500	0	0.00
>1500	0	0.00
TOTAL	230	1



Datos originales de calidad del agua en la región Este de Xochimilco (1980-2007)
 conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1981		670				320						
1982			918	155	620	220	250	220	250	320	250	987
1983	270	380	279	449	450	555	520	550	670	285		480
1984			310	460	325	980	220	465		860	370	340
1985	780	220	145	290		600	300	220		860	700	820
1986		350			420	520	800					
1987	720	295	860	310	860	340	860		290	800	770	240
1988	140			740	310	335	410	740	375	770		795
1989	780	320	295	840	750	320		540	155	740	660	710
1990	320	330	340	360	280	300	670	250	385	660	730	710
1991	810	720	410	800	340	750	820	730	730	690	690	710
1992	350	720	680	330	1100	780	800	540		840	800	790
1993	649	560	269	828	716	806		783	448	783	761	392
1994	240	820	230	265	649	1018	470	154	459	1097	257	1600
1995		381	369	239	783	326	739	717	353	652	391	783
1996	391	785	471	359	785	653	324	680	513	607	586	
1997	659	555	628	1151	471	649	607	405	753	446	446	273
1998			304		337	307	334	585	545	606	646	646
1999		384	525	505	394	404	464	474	394	686	605	656
2000		655			467	422	412	443	363		440	374
2001		419	342	404	493	605	471	431	411	968	565	484
2002	424	605	478	428	434	444	505	333	1250	444	585	
2003	414	444	333	484	474	535	495	484		686	272	452
2004	905		362	684	322	463		343	807	474	373	444
2005		727		363	1100	767	727			481	741	481
2006		646	505	706	727	474	343		706	646	363	700
2007		720		420	500	820			339		655	389
media	523	532	431	518	564	545	525	480	510	670	550	620
S	246	185	216	269	249	229	202	187	286	209	178	342

SDT (mg/L)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1981							515					
1982								865				
1983			514	136	278		220			242		456
1984			236	392	286	800	400	498	208	664	272	278
1985	136	170	132			381	314	232		128	502	696
1986	302	562	174	342		614	384	404	578	196		336
1987	226	228	614	208	590	244	618		262			
1988		192		606	452	270	302	582	218	572		640
1989	554	280	260	604	700	320		700	204	540	476	536
1990	232	232	248	264	240	688	524	312	384	500	532	562
1991	600	508	276	516	252	528	636	584	568	556	556	280
1992	284	552	592	236	780	628	612	436	1700	620	620	632
1993	460	368	248	580	528	560		536	280	528	532	304
1994	644	656	208	976	368	752	264	896	308	736	200	540
1995		308	268	164	536	236	512	412	284	120	332	564
1996	280	568	292	278	488	488	300	388	408	472	564	
1997	508	384	548	808	340	480	424	296	546	326	348	220
1998			350		236	196	232	498	440	448	440	464
1999		260	392	452	256	416	440	444	296	552	522	528
2000		624	248	272	312	368	272	300	256		372	652
2001	780	664			360	508	520	560	564	616	300	608
2002	344	368	656	280	296	712	308	252		656	372	
2003	256	312	236	300	252		515					
2004									540	276	274	274
2005		416		266		432	286	750		272	480	232
2006		236	316	216	176	284	228		272	392	300	
2007									284		428	276
media	400	394	340	395	392	472	401	497	430	448	421	454
S	201	166	164	246	177	186	139	201	412	186	120	162

Datos sintéticos de calidad del agua en la región Este de Xochimilco (1980-2007)
conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)

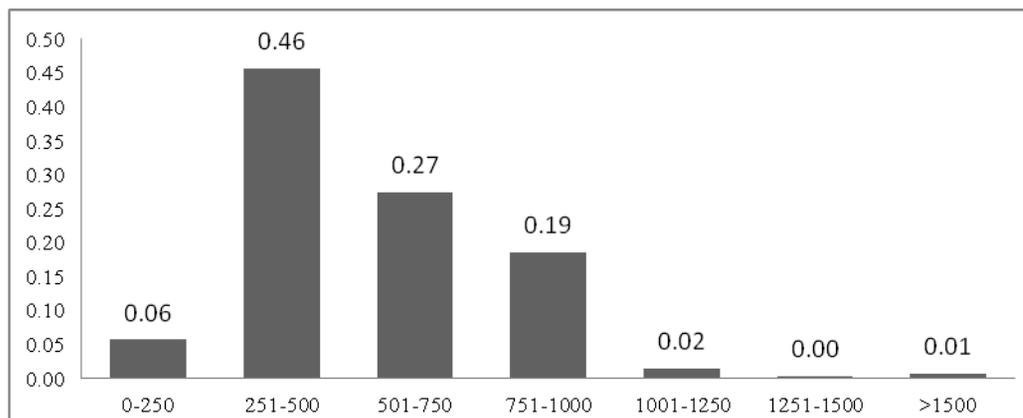
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1981	296	324	322	435	316	343	344	457	359	367	677	756
1982	624	492	491	744	472	388	373	603	370	465	296	273
1983	406	497	353	529	407	498	354	530	403	406	570	413
1984	337	382	342	486	493	527	497	647	562	695	724	718
1985	497	464	352	622	551	506	390	672	607	632	423	317
1986	439	453	367	574	575	570	479	705	604	668	552	462
1987	354	453	349	644	543	652	532	890	714	740	555	442
1988	571	671	501	734	349	442	309	506	386	402	395	271
1989	367	365	307	647	589	545	488	925	631	671	315	258
1990	462	523	378	647	570	624	465	758	614	627	501	360
1991	381	377	444	497	401	394	466	517	452	448	581	732
1992	414	466	465	575	370	424	416	529	439	419	414	404
1993	479	541	557	709	297	361	348	494	393	373	406	399
1994	630	516	525	634	544	456	454	567	483	654	407	398
1995	1734	1312	1322	1627	384	366	301	520	387	442	486	418
1996	365	410	419	516	475	513	544	631	509	536	464	484
1997	278	336	313	409	483	536	538	621	528	597	453	442
1998	725	705	725	854	572	577	575	714	604	635	558	553
1999	456	470	398	630	558	557	486	734	595	639	544	473
2000	399	445	446	604	196	243	221	352	245	253	479	486
2001	599	621	559	792	481	516	451	670	572	631	489	424
2002	388	426	403	445	185	228	195	255	214	195	592	591
2003	396	410	332	504	395	409	332	503	408	521	418	340
2004	505	467	503	580	388	374	389	476	400	458	543	599
2005	509	565	624	708	785	816	955	983	815	854	555	610
2006	752	653	720	764	502	464	485	563	491	591	661	731
2007	326	396	405	555	246	312	307	448	317	303	875	1017
media	526	524	498	664	447	466	431	600	483	524	514	493
S	287	202	224	239	133	126	141	163	138	156	123	175

SDT (mg/L)

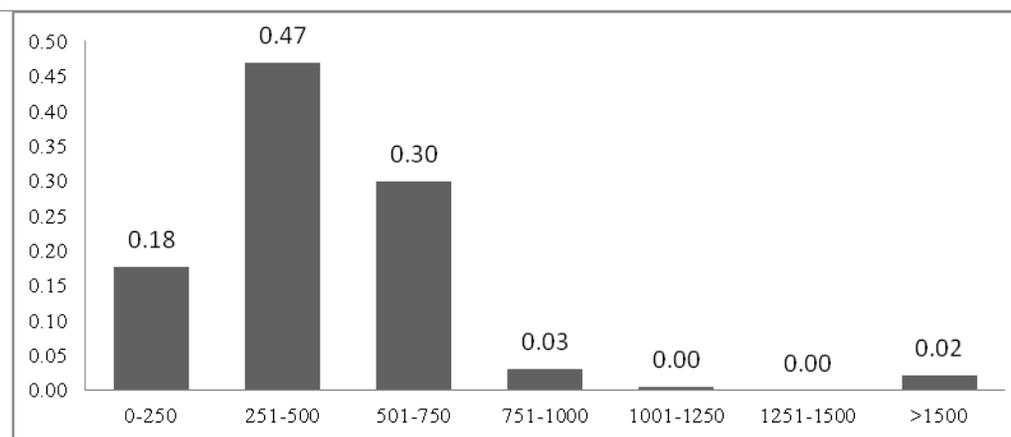
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1981	602	586	639	747	874	840	967	1235	773	988	391	386
1982	288	288	282	277	464	456	479	526	477	522	588	573
1983	457	449	470	515	370	366	371	387	402	405	714	691
1984	445	536	616	839	170	212	211	229	241	241	307	375
1985	356	186	281	206	341	179	268	195	335	315	307	162
1986	293	264	464	340	285	258	450	328	367	333	295	266
1987	180	138	151	130	368	275	334	340	368	412	332	249
1988	571	534	328	532	539	505	307	492	448	562	543	508
1989	480	520	301	503	379	414	232	367	340	399	561	604
1990	292	202	223	193	371	254	291	267	357	375	409	279
1991	625	717	668	848	447	519	460	540	494	533	354	415
1992	484	340	601	355	498	349	620	369	536	476	455	320
1993	332	344	299	368	829	830	825	1259	701	983	274	286
1994	185	296	246	270	232	367	316	365	311	302	338	528
1995	424	440	374	478	655	669	606	858	595	706	370	385
1996	357	270	499	382	544	405	797	673	495	572	314	239
1997	280	366	311	346	288	377	321	360	416	399	131	176
1998	536	515	549	618	458	443	462	501	467	507	382	371
1999	432	389	290	375	345	313	226	277	329	357	377	341
2000	362	357	479	481	491	480	673	727	442	521	354	349
2001	580	845	666	884	338	501	365	426	404	386	483	708
2002	540	510	610	662	470	446	523	550	497	552	188	184
2003	422	334	457	419	586	459	658	652	570	660	271	218
2004	348	423	469	487	240	295	310	295	369	331	244	300
2005	351	362	416	434	270	281	311	305	347	339	396	407
2006	268	300	205	262	297	332	230	300	344	359	636	690
2007	243	258	265	282	467	485	549	682	490	592	307	324
media	395	396	410	449	434	423	455	505	445	491	395	394
S	124	158	153	201	166	161	201	268	119	183	147	168

Análisis de frecuencias de los datos mensuales de calidad del agua en la región Este de Xochimilco (1980-2007)

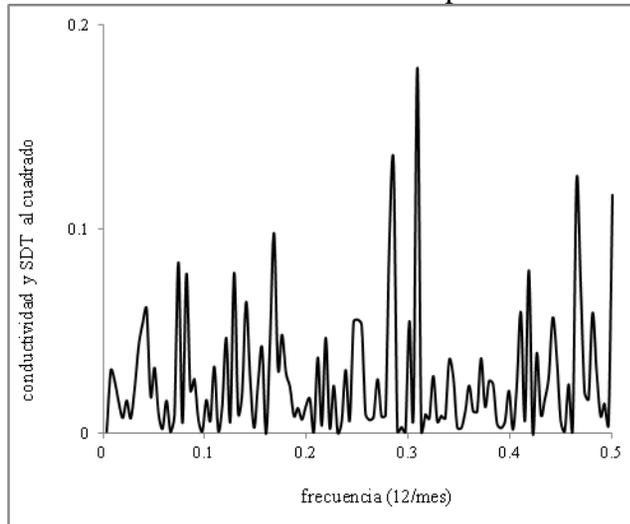
Conductividad		
Rango	Frecuencia	Probabilidad
0-250	15	0.06
251-500	120	0.46
501-750	72	0.27
751-1000	49	0.19
1001-1250	4	0.02
1251-1500	1	0.00
>1500	2	0.01
TOTAL	263	1.00



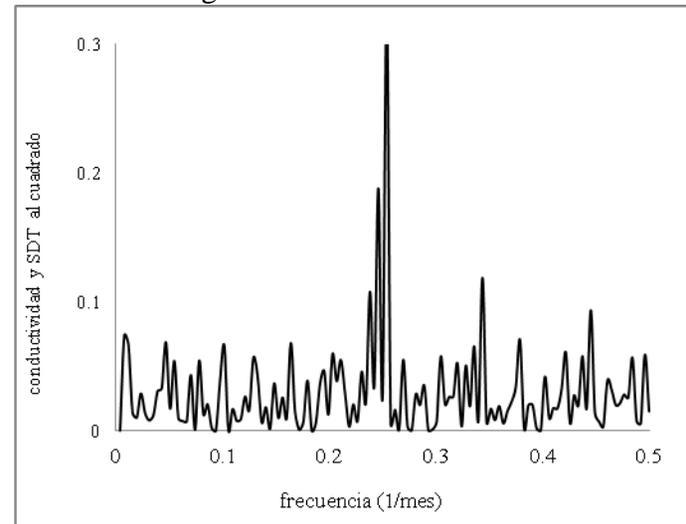
SDT		
Rango	Frecuencia	Probabilidad
0-250	42	0.18
251-500	111	0.47
501-750	71	0.30
751-1000	7	0.03
1001-1250	1	0.00
1251-1500	0	0.00
>1500	5	0.02
TOTAL	237	1.00



Prueba de aleatoriedad para la base de datos de calidad del agua mensual en Xochimilco



Región Oeste



Región Este

Región Oeste: $w_1=1/0.27$, $P_1 = 4$ meses, $w_2=1/0.33$, $P_2 = 3$ meses

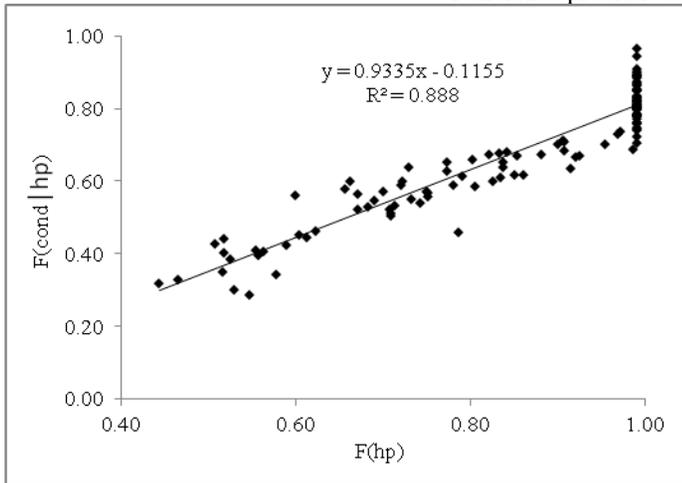
Región Este: $w=1/0.25$, $P = 4$ meses

Es decir, la varianza de los datos de calidad del agua se distribuye en todas las frecuencias con excepción de dos periodos que fluctúan entre los tres y cuatro meses que puede interpretarse como la presencia de valores extraordinarios en ambas regiones del acuífero de Xochimilco

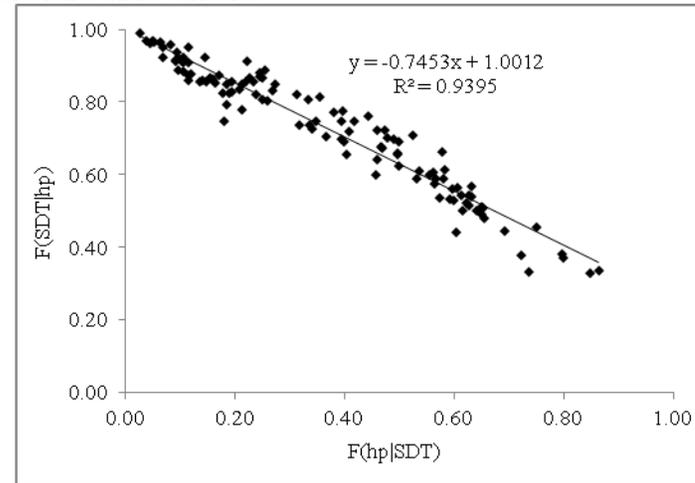
Funciones de relación lineal en forma conjunta y condicional para la conductividad y los SDT en función de la precipitación para el escenario de origen (1980-2007) de la región Oeste de Xochimilco

relaciones	funciones	conductividad dada lluvia				SDT dada lluvia			
		F(hp cond)	F(hp)	F(cond hp)	F(cond)	F(hp SDT)	F(hp)	F(SDT hp)	F(SDT)
conductividad dada lluvia	F(hp cond)	1.00							
	F(hp)	0.43	1.00						
	F(cond hp)	0.65	0.89	1.00					
	F(cond)	0.94	0.27	0.44	1.00				
SDT dada lluvia	F(hp SDT)	0.71	0.10	0.23	0.77	1.00			
	F(hp)	0.26	0.06	0.12	0.25	0.55	1.00		
	F(SDT hp)	0.55	0.08	0.20	0.57	0.94	0.69	1.00	
	F(SDT)	0.78	0.10	0.23	0.89	0.93	0.43	0.79	1.00

Funciones predictivas para las relaciones entre variables



Conductividad dada la precipitación

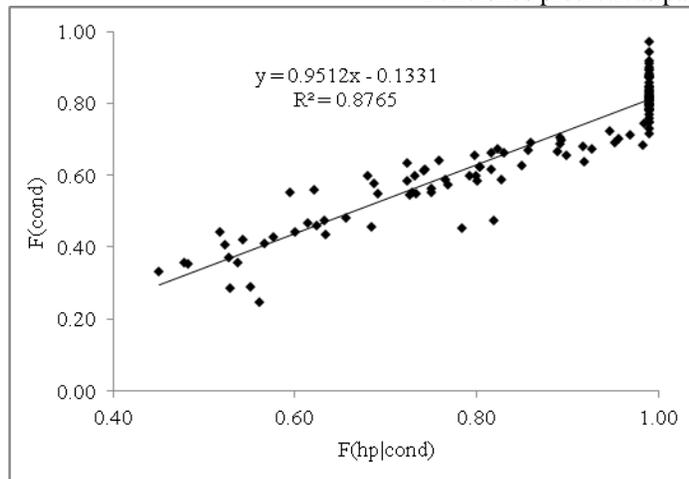


SDT dada la precipitación

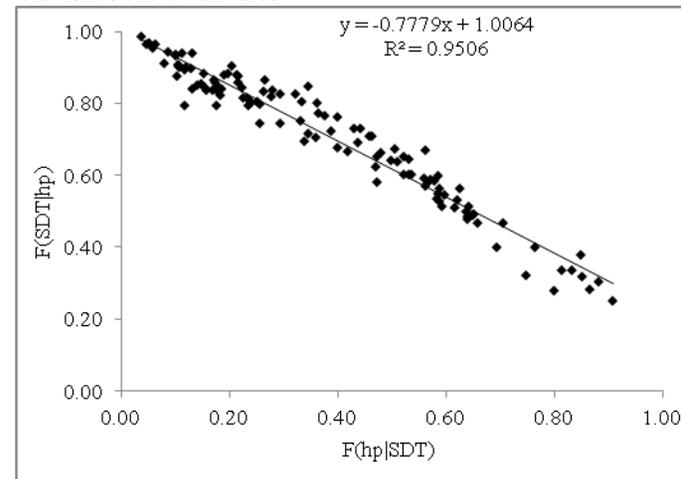
Funciones de relación lineal en forma conjunta y condicional para la conductividad y los SDT en función de la precipitación para la proyección a futuro a corto plazo (2011-2030) de la región Oeste de Xochimilco

relaciones	funciones	conductividad dada lluvia				SDT dada lluvia			
		F(hp cond)	F(hp)	F(cond hp)	F(cond)	F(hp SDT)	F(hp)	F(SDT hp)	F(SDT)
conductividad dada lluvia	F(hp cond)	1.00							
	F(hp)	0.43	1.00						
	F(cond hp)	0.67	0.88	1.00					
	F(cond)	0.93	0.28	0.45	1.00				
SDT dada lluvia	F(hp SDT)	0.74	0.11	0.26	0.78	1.00			
	F(hp)	0.35	0.07	0.15	0.35	0.63	1.00		
	F(SDT hp)	0.60	0.09	0.23	0.61	0.95	0.75	1.00	
	F(SDT)	0.77	0.11	0.25	0.89	0.92	0.51	0.79	1.00

Funciones predictivas para las relaciones entre variables



Conductividad dada la precipitación

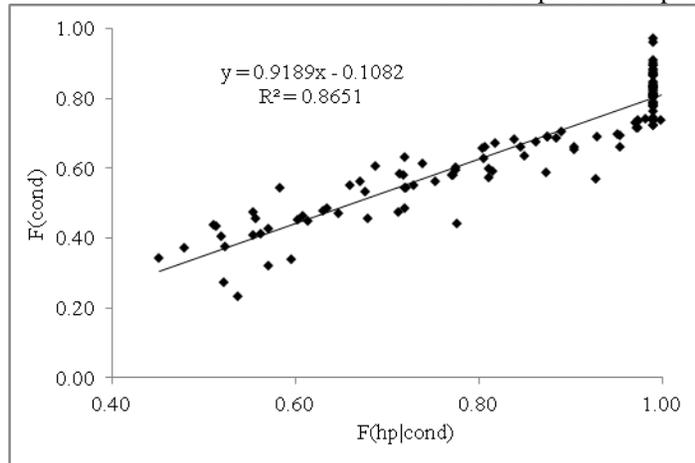


SDT dada la precipitación

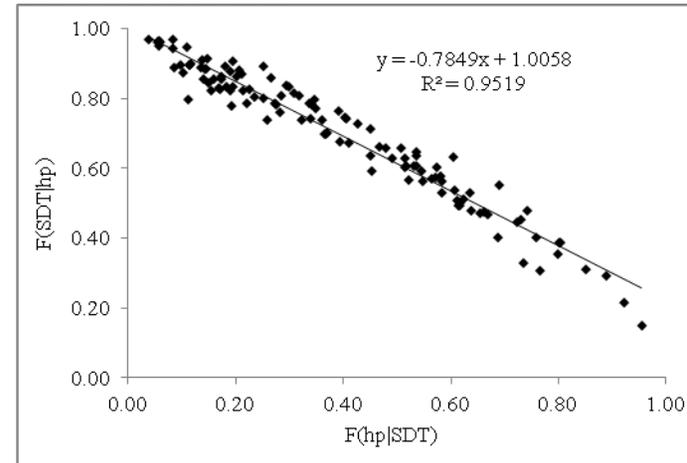
Funciones de relación lineal en forma conjunta y condicional para la conductividad y los SDT en función de la precipitación para la proyección a futuro a mediano plazo (2031-2050) de la región Oeste de Xochimilco

relaciones	funciones	conductividad dada lluvia				SDT dada lluvia			
		F(hp cond)	F(hp)	F(cond hp)	F(cond)	F(hp SDT)	F(hp)	F(SDT hp)	F(SDT)
conductividad dada lluvia	F(hp cond)	1.00							
	F(hp)	0.41	1.00						
	F(cond hp)	0.67	0.87	1.00					
	F(cond)	0.93	0.26	0.46	1.00				
SDT dada lluvia	F(hp SDT)	0.74	0.10	0.27	0.78	1.00			
	F(hp)	0.38	0.08	0.19	0.37	0.64	1.00		
	F(SDT hp)	0.61	0.09	0.25	0.62	0.95	0.76	1.00	
	F(SDT)	0.78	0.10	0.25	0.89	0.93	0.54	0.80	1.00

Funciones predictivas para las relaciones entre variables



Conductividad dada la precipitación

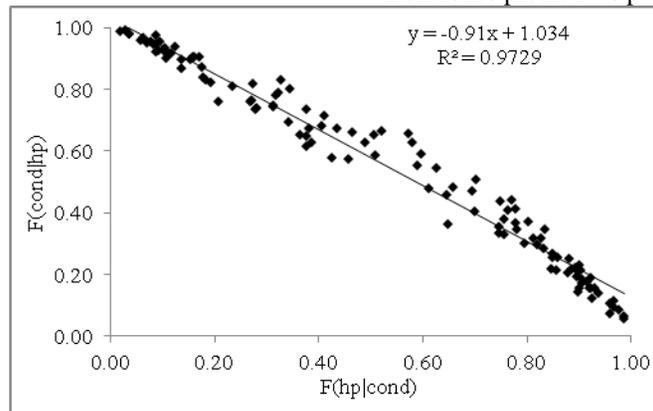


SDT dada la precipitación

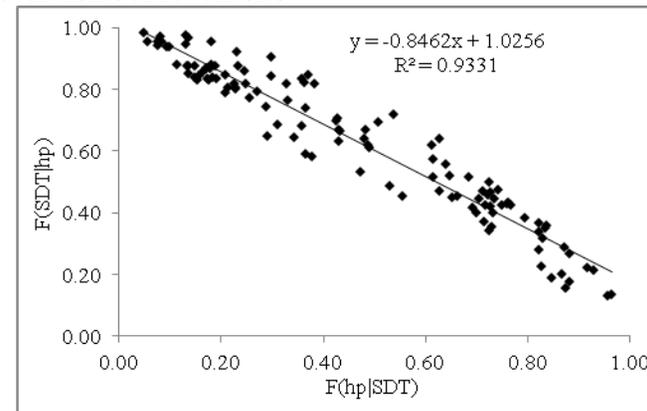
Funciones de relación lineal en forma conjunta y condicional para la conductividad y los SDT en función de la precipitación para el escenario de origen (1980-2007) de la región Este de Xochimilco

relaciones	funciones	conductividad dada lluvia				SDT dada lluvia			
		F(hp cond)	F(hp)	F(cond hp)	F(cond)	F(hp SDT)	F(hp)	F(SDT hp)	F(SDT)
conductividad dada lluvia	F(hp cond)	1.00							
	F(hp)	0.68	1.00						
	F(cond hp)	0.97	0.79	1.00					
	F(cond)	0.88	0.47	0.77	1.00				
SDT dada lluvia	F(hp SDT)	0.57	0.29	0.51	0.61	1.00			
	F(hp)	0.21	0.16	0.20	0.23	0.65	1.00		
	F(SDT hp)	0.39	0.21	0.35	0.40	0.93	0.81	1.00	
	F(SDT)	0.75	0.36	0.64	0.86	0.85	0.43	0.66	1.00

Funciones predictivas para las relaciones entre variables



Conductividad dada la precipitación

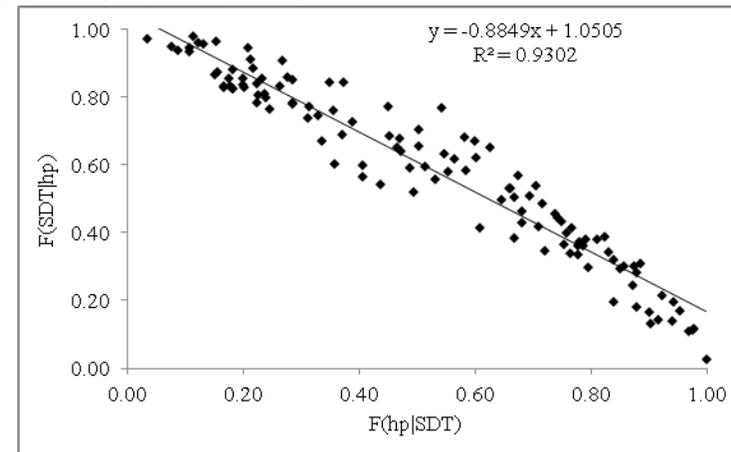
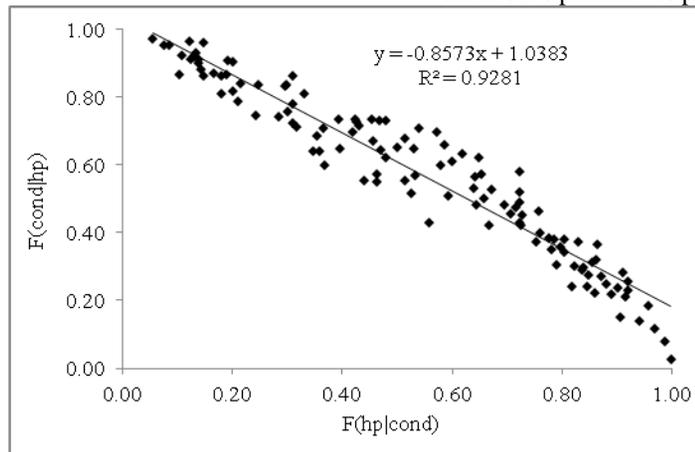


SDT dada la precipitación

Funciones de relación lineal en forma conjunta y condicional para la conductividad y los SDT en función de la precipitación para la proyección a futuro a corto plazo (2011-2030) de la región Este de Xochimilco

relaciones	funciones	conductividad dada lluvia				SDT dada lluvia			
		F(hp cond)	F(hp)	F(cond hp)	F(cond)	F(hp SDT)	F(hp)	F(SDT hp)	F(SDT)
conductividad dada lluvia	F(hp cond)	1.00							
	F(hp)	0.61	1.00						
	F(cond hp)	0.93	0.79	1.00					
	F(cond)	0.86	0.37	0.66	1.00				
SDT dada lluvia	F(hp SDT)	0.58	0.22	0.45	0.61	1.00			
	F(hp)	0.19	0.11	0.16	0.21	0.62	1.00		
	F(SDT hp)	0.40	0.18	0.34	0.39	0.93	0.79	1.00	
	F(SDT)	0.69	0.23	0.48	0.86	0.82	0.38	0.61	1.00

Funciones predictivas para las relaciones entre variables



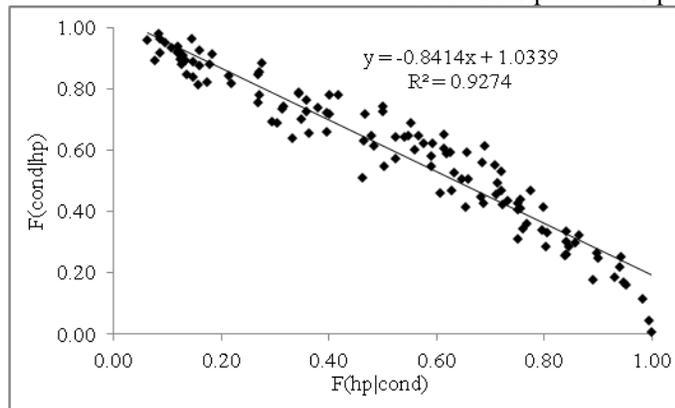
Conductividad dada la precipitación

SDT dada la precipitación

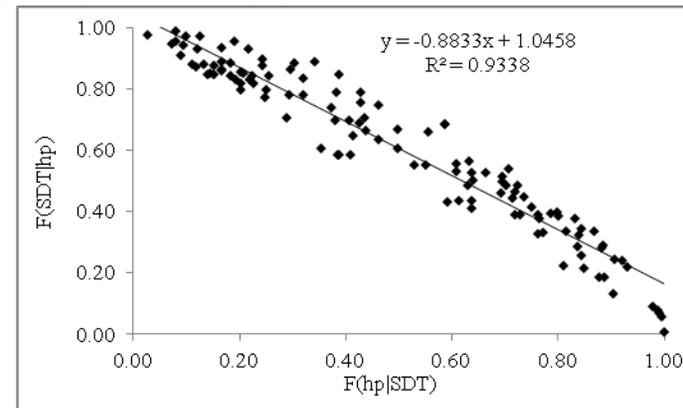
Funciones de relación lineal en forma conjunta y condicional para la conductividad y los SDT en función de la precipitación para la proyección a futuro a mediano plazo (2031-2050) de la región Este de Xochimilco

relaciones	funciones	conductividad dada lluvia				SDT dada lluvia			
		F(hp cond)	F(hp)	F(cond hp)	F(cond)	F(hp SDT)	F(hp)	F(SDT hp)	F(SDT)
conductividad dada lluvia	F(hp cond)	1.00							
	F(hp)	0.57	1.00						
	F(cond hp)	0.93	0.75	1.00					
	F(cond)	0.87	0.37	0.67	1.00				
SDT dada lluvia	F(hp SDT)	0.61	0.25	0.50	0.59	1.00			
	F(hp)	0.22	0.14	0.20	0.22	0.65	1.00		
	F(SDT hp)	0.45	0.21	0.40	0.38	0.93	0.79	1.00	
	F(SDT)	0.71	0.25	0.51	0.86	0.83	0.42	0.63	1.00

Funciones predictivas para las relaciones entre variables



Conductividad dada la precipitación

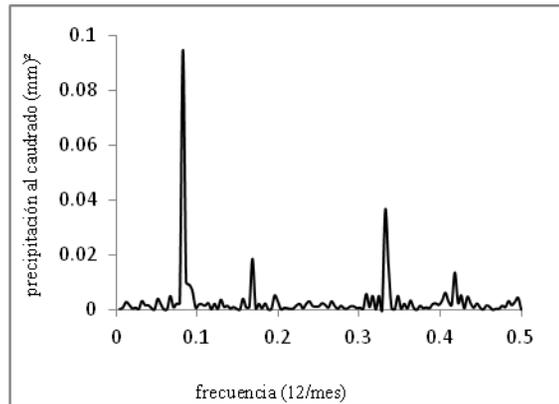


SDT dada la precipitación

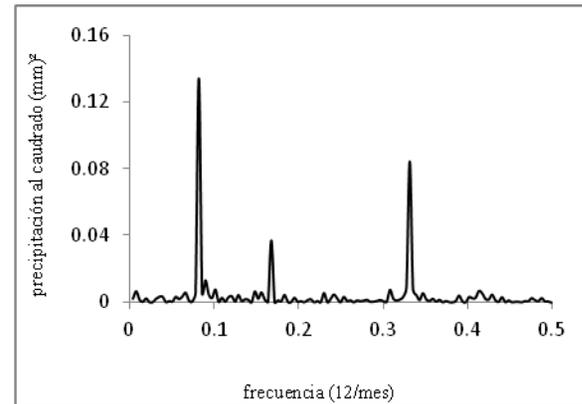
Precipitación mensual de Magdalena Contreras

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ACUMULADA
1980	21	3	7	41	86	111	132	291	212	49	19	0	972
1981	31	24	14	63	68	297	318	283	297	80	3	16	1495
1982	0	10	7	20	140	173	218	210	43	46	3	4	874
1983	19	18	18	0	14	108	287	211	192	97	20	2	985
1984	15	3	2	3	123	193	409	286	279	69	0	7	1390
1985	2	11	6	68	67	274	197	198	150	56	2	8	1039
1986	0	8	1	26	140	359	186	223	160	120	14	10	1245
1987	9	0	16	9	43	211	273	204	108	0	0	0	873
1988	0	3	31	0	83	171	68	266	49	42	6	0	720
1989	7	1	0	13	95	129	171	140	149	18	1	8	732
1990	0	6	8	37	45	101	312	143	138	74	0	6	870
1991	11	0	0	21	86	192	279	88	99	122	5	3	905
1992	18	15	16	29	79	38	203	241	276	147	42	1	1105
1993	16	8	11	26	47	109	184	199	214	101	30	1	946
1994	10	1	3	45	58	255	207	297	193	135	7	0	1212
1995	21	15	3	45	95	224	171	229	186	12	34	4	1040
1996	4	6	7	24	28	212	163	127	219	74	0	16	881
1997	7	8	36	69	79	130	275	179	159	78	29	9	1058
1998	21	0	0	11	5	103	177	309	317	82	12	2	1039
1999	0	0	11	15	34	86	198	251	202	87	0	2	887
2000	0	0	14	7	89	222	163	196	175	54	16	1	936
2001	5	13	15	64	77	160	172	189	253	31	1	5	985
2002	0	3	6	37	32	97	99	117	194	61	21	1	665
2003	1	0	14	13	18	262	173	164	179	67	4	0	895
2004	28	1	15	36	63	226	97	123	36	19	1	4	648
2005	6	0	5	27	24	195	171	115	111	3	0	0	658
2006	2	2	9	24	32	39	96	217	222	114	25	1	783
2007	5	18	27	12	80	124	196	282	214	48	7	1	1013
media	9	6	11	28	65	171	200	206	180	67	11	4	959
S ²	88	46	85	413	1286	6099	5795	3954	5261	1553	150	21	

Prueba de aleatoriedad para la base de datos de precipitación mensual en Magdalena Contreras



Región Norte



Región Sur

$$w_1=1/0.08, P_1 = 12 \text{ meses}, w_2=1/0.33, P_2= 3 \text{ meses}$$

Es decir, los datos de precipitación mensual en ambas regiones de Magdalena Contreras presentan dos ciclos en los cuales la varianza no se distribuye entre todas las frecuencias, lo que se interpreta, para el primer caso como el ciclo anual entre temporada de estiaje y lluvias; en cambio el segundo ciclo puede corresponder a precipitaciones extraordinarias.

Precipitación mensual de Magdalena Contreras

Región Sur (conservación ecológica)

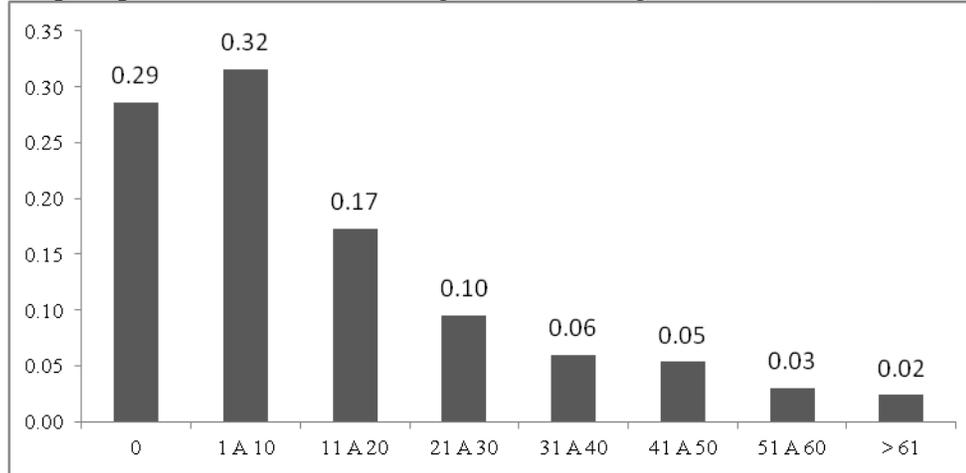
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ACUMULADA
1981	40	33	21	83	85	354	433	363	290	66	5	32	1805
1982	0	15	7	24	175	238	293	282	58	35	2	5	1133
1983	24	28	26	0	28	116	346	234	213	104	23	3	1145
1984	23	5	3	6	170	264	458	274	264	77	0	6	1551
1985	4	16	8	77	68	265	197	238	189	64	4	16	1147
1986	0	6	1	22	169	345	214	266	143	111	18	15	1309
1987	8	0	15	9	40	200	258	194	103	0	0	0	827
1988	0	3	30	0	79	162	65	252	47	40	5	0	682
1989	6	1	0	12	90	123	162	132	141	17	1	8	693
1990	0	6	7	35	42	96	295	136	131	71	0	5	825
1991	10	0	0	20	82	182	264	83	94	116	5	3	858
1992	17	14	15	27	74	36	193	229	261	140	40	1	1047
1993	19	16	17	30	83	40	214	254	290	155	45	1	1164
1994	4	1	6	45	58	289	227	322	225	162	13	0	1352
1995	22	20	6	45	118	275	198	328	193	8	63	8	1284
1996	0	0	3	21	26	233	189	160	235	74	0	18	959
1997	2	16	43	103	100	162	364	176	219	62	56	13	1317
1998	22	0	0	11	10	119	192	363	407	149	24	0	1299
1999	0	0	8	15	31	80	182	373	105	170	1	0	964
2000	0	0	13	5	125	201	228	223	146	61	10	1	1014
2001	1	16	21	60	111	183	195	173	272	40	1	9	1081
2002	0	4	7	43	28	82	100	154	269	97	37	1	822
2003	1	0	17	7	20	267	146	188	220	133	8	0	1005
2004	54	1	31	49	61	273	142	85	69	38	1	7	810
2005	12	1	10	36	29	284	209	164	128	4	1	0	878
2006	3	4	3	34	62	77	193	228	264	133	47	0	1048
2007	7	12	35	9	92	113	172	292	208	62	10	2	1013
media	10	8	13	31	77	186	225	233	194	80	16	5	1077
S ²	182	85	129	680	2079	8157	8075	6810	7226	2561	374	55	

Región Norte (urbana)

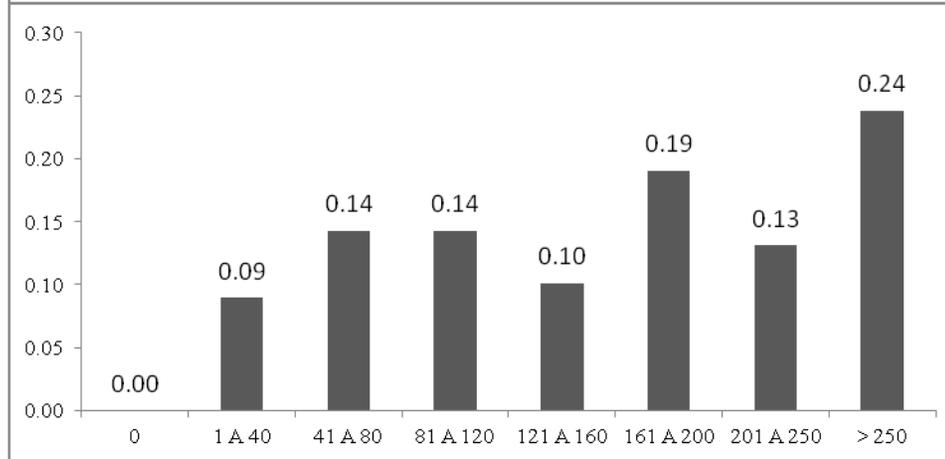
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ACUMULADA
1981	21	15	6	43	52	241	203	204	305	93	2	1	1185
1982	0	5	7	15	106	109	143	138	29	57	5	3	615
1983	13	9	9	0	0	100	227	188	171	91	17	0	824
1984	8	1	1	0	76	123	360	298	295	60	0	9	1229
1985	0	5	4	59	66	283	196	159	111	48	1	0	931
1986	0	9	0	31	110	373	158	180	178	129	11	4	1181
1987	9	0	17	10	45	222	287	215	114	0	0	0	919
1988	0	3	33	0	88	180	72	280	52	44	6	0	758
1989	7	1	0	14	100	136	180	147	157	19	1	9	770
1990	1	7	8	39	47	106	328	151	145	78	0	6	916
1991	11	0	0	22	91	202	294	93	104	128	5	3	953
1992	19	16	17	30	83	40	214	254	290	155	45	1	1164
1993	13	1	6	21	11	177	154	144	139	46	16	0	728
1994	16	1	0	45	58	220	186	273	161	108	2	0	1071
1995	21	10	0	45	72	173	145	131	179	16	5	0	796
1996	8	13	12	28	30	191	137	93	202	74	0	14	804
1997	13	0	29	36	57	98	185	181	99	94	3	4	799
1998	21	0	0	10	0	86	162	255	226	15	0	4	779
1999	0	0	14	15	37	93	214	130	300	3	0	3	809
2000	0	0	16	9	52	242	98	169	205	47	21	0	859
2001	9	9	10	69	43	138	149	205	234	22	0	0	888
2002	0	2	4	30	37	111	99	79	118	25	4	0	508
2003	1	0	11	19	17	257	201	140	138	0	0	0	785
2004	3	0	0	23	66	179	52	161	2	0	0	0	485
2005	0	0	0	19	19	106	133	66	94	2	0	0	438
2006	0	1	15	13	2	1	0	205	180	95	3	2	517
2007	4	24	19	15	69	136	220	271	219	34	3	0	1014
media	9	5	8	25	54	157	175	180	165	55	5	2	840
S ²	100	39	82	293	1020	6389	6484	4014	6155	1935	90	12	

Análisis de frecuencias de los datos de precipitación mensual en la región Sur de Magdalena Contreras (1980-2008)

Estiaje		
Rango	Frecuencia	Probabilidad
0	48	0.29
1 A 10	53	0.32
11 A 20	29	0.17
21 A 30	16	0.10
31 A 40	10	0.06
41 A 50	9	0.05
51 A 60	5	0.03
> 61	4	0.02
TOTAL	174	1.0

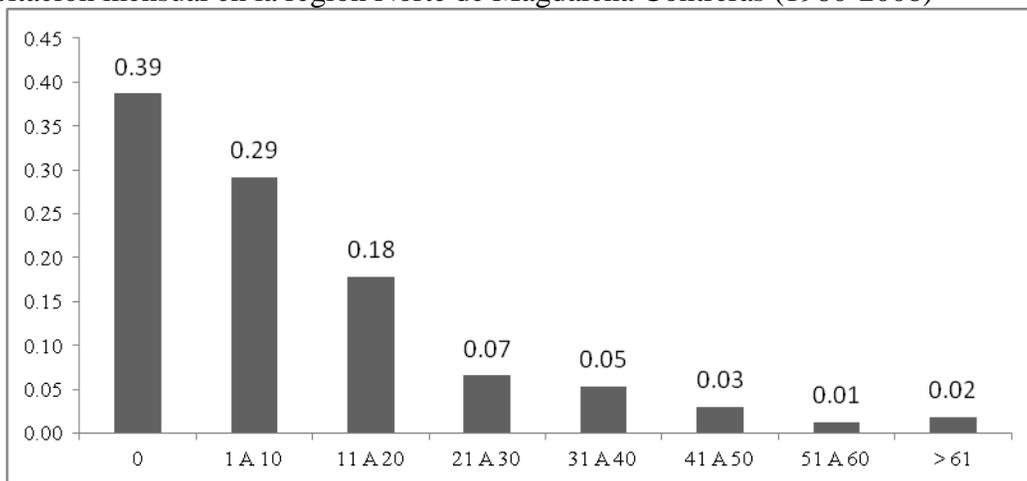


Lluvias		
Rango	Frecuencia	Probabilidad
0	1	0.01
1 A 40	14	0.08
41 A 80	24	0.14
81 A 120	24	0.14
121 A 160	17	0.10
161 A 200	31	0.18
201 A 250	23	0.14
> 250	40	0.24
TOTAL	174	1.0

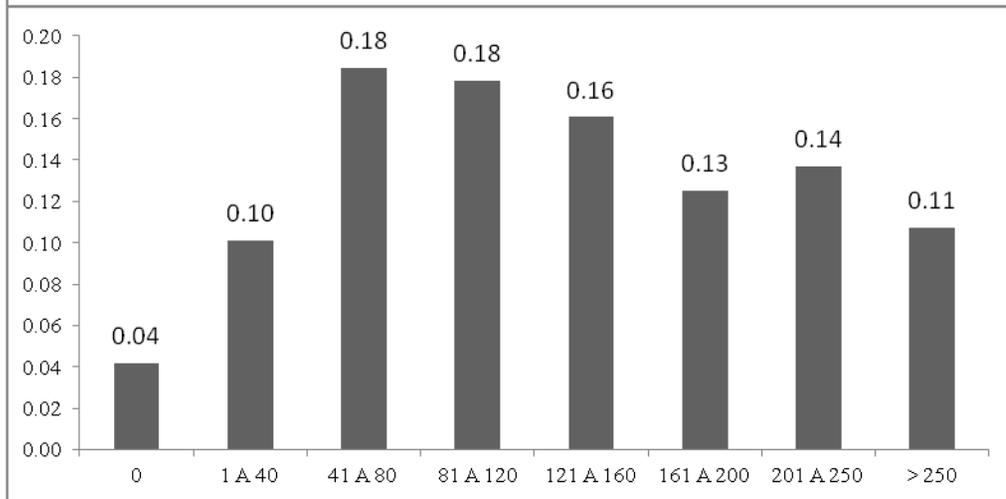


Análisis de frecuencias de los datos de precipitación mensual en la región Norte de Magdalena Contreras (1980-2008)

Estiaje		
Rango	Frecuencia	Probabilidad
0	65	0.39
1 A 10	49	0.29
11 A 20	30	0.18
21 A 30	11	0.07
31 A 40	9	0.05
41 A 50	5	0.03
51 A 60	2	0.01
> 61	3	0.02
TOTAL	174	1.0



Lluvias		
Rango	Frecuencia	Probabilidad
0	7	0.04
1 A 40	17	0.10
41 A 80	31	0.18
81 A 120	30	0.18
121 A 160	27	0.16
161 A 200	21	0.13
201 A 250	23	0.14
> 250	18	0.11
TOTAL	174	1.0



Prueba de homogeneidad en Magdalena Contreras

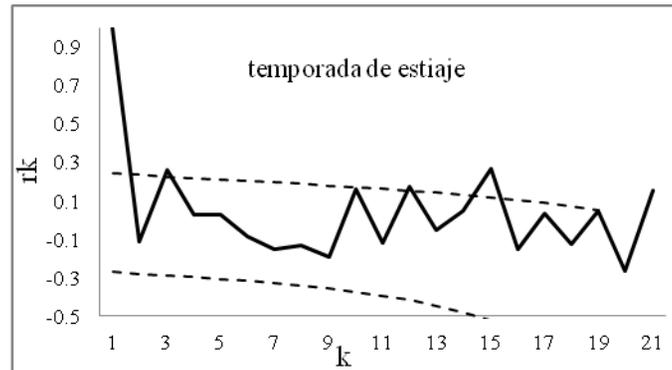
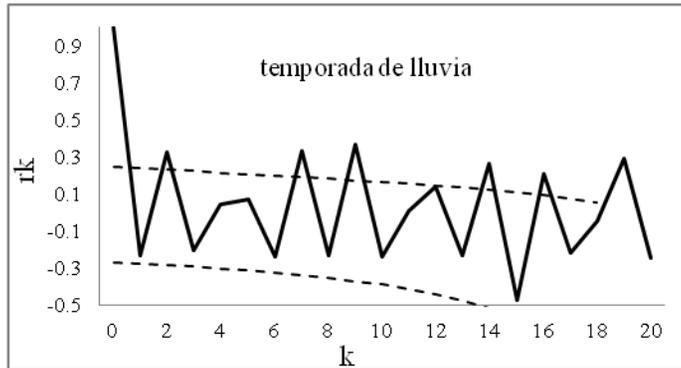
t-Test, $\alpha = 0.005$, se rechaza H_0 si $t_0 < t$

Mann-Whitney Test, $\alpha = 0.005$, se rechaza H_0 si $Z_0 < Z$

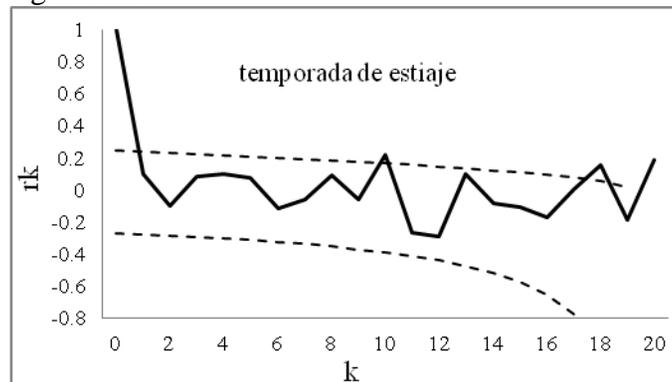
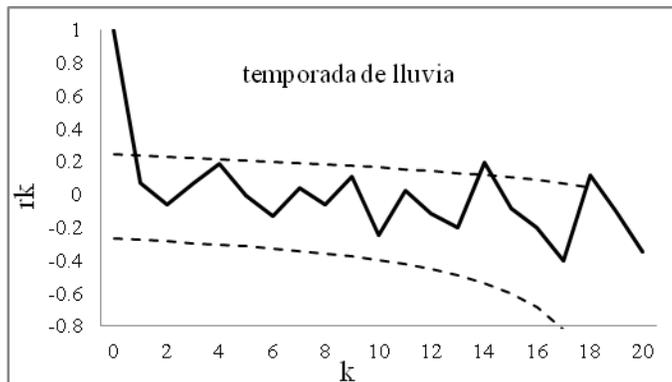
Temporada de lluvias			Temporada de estiaje		
H_0 : lluvia 1961-1980 \neq lluvia 1981-2007			H_0 : estiaje 1961-1980 \neq estiaje 1981-2007		
H_1 : lluvia 1961-1980 = lluvia 1981-2007			H_1 : estiaje 1961-1980 = estiaje 1981-2007		
estadístico	Sur	Norte	estadístico	Sur	Norte
t_0	1.98	1.68	t_0	0.10	0.12
t	0.05	0.02	t	0.11	0.16
Z_0	2.05	1.97	Z_0	0.48	0.36
Z	0.04	0.02	Z	0.63	0.63

En la temporada de lluvias, como $t_0 > t$, y $Z_0 > Z$, entonces NO se rechaza H_0 , con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$; esto es, SI existe suficiente evidencia para afirmar que el promedio de lluvia acumulada mensual en Magdalena Contreras durante la temporada de lluvia en el periodo de 1961 a 1980 es diferente al que se presentó durante el periodo de 1981 al 2007. En la temporada de estiaje, como $t_0 < t$ pero $Z_0 > Z$, entonces SI se rechaza H_0 , con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$; esto es, NO existe suficiente evidencia para afirmar que el promedio de lluvia acumulada mensual en Magdalena Contreras durante la temporada de estiaje en el periodo de 1961 a 1980 es diferente al que se presentó durante el periodo de 1981 al 2007.

Prueba de independencia en Magdalena Contreras
Región Sur



Región Norte



Se observa la existencia de una mayor cantidad de valores superiores a los límites estimados en los datos de precipitación mensuales a partir de la década de los ochenta, en comparación con las décadas anteriores

Prueba de normalidad en Xochimilco

Shapiro-Wilk Test, $\alpha = 0.005$, se rechaza H_0 si $W > p$

H_0 : los datos se ajustan a la función normal

H_1 : los datos no se ajustan a la función normal

Temporada de lluvias		
estadístico	Sur	Norte
W	0.97	0.98
p	0.17	0.16

Temporada de estiaje		
estadístico	Sur	Norte
W	0.69	0.52
p	<0.0001	<0.0001

Como $W > p$, entonces se rechaza H_0 , con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$; esto es, los datos de precipitación mensual en la temporada de lluvias y estiaje Magdalena Contreras NO se ajustan a la función de distribución normal.

Datos originales de calidad del agua en la región Norte de Magdalena Contreras (1990-2007)

conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1990						250	250	255				
1991		245		265						250		240
1992	260		250		250		250				260	
1993		260		294		294	302		291			
1994	291							313	302		291	
1995		358			293	315		293		304	304	283
1996		325	275	303		272		272		314	230	
1997			272			296	408		293	405		284
1998						337		372	394	303	383	404
1999			384	394			434		389	303	393	400
2000	409	388				330	299			418	286	397
2001	408	309			325				291		293	
2002		303	398		293			394				
2003								293			303	
2004									313			
2005					424	363					421	
2006	484		424				414		424			
2007	220							450				327
2008			383		353							
media	345	313	341	314	323	307	337	330	337	328	316	334
S ²	10630	2557	5191	3107	3647	1342	6364	4611	3070	3689	3816	4535

SDT (mg/L)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1990						230	238	256				
1991		348		24						252		188
1992	220		216		224		244				244	
1993		236		236		224	232		236			
1994	208							240	236		284	
1995		220			212	240		220		260		216
1996		272	212	232		240		368		236	196	
1997			304			228	252		232	276		312
1998						264		380	316	244	284	252
1999			302	276			398		280	252	404	416
2000	276	296	256			228	288			308	236	244
2001	252	248			248				220		252	
2002		216	292		232							
2003				230								
2004									232			
2005						316						
2006							236					
2007												296
2008			290		268							
media	239	262	267	200	237	246	270	293	250	261	271	275
S ²	953	2234	1582	9993	475	955	3555	5675	1199	585	4328	5705