



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
IZTACALA**

**COMPORTAMIENTO DE LOS CONTAMINANTES
FISICOQUÍMICOS Y BACTERIOLÓGICOS EN
EL ACUÍFERO DEL VALLE DE CUERNAVACA**

T E S I S A
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
B I Ó L O G O
P R E S E N T A :
GRACE YASMÍN DOMÍNGUEZ MURGUÍA

**DIRECTORA DE TESIS:
QFB. ESPERANZA DEL S. ROBLES VALDERRAMA**



LANEPANTLA, EDO. DE MÉXICO

2009.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

*DEDICADA CON MUCHO AMOR A DOS GRANDES
SERES HUMANOS, MI MADRE MA. IGNACIA
MURGUÍA Y MI PADRE ANGEL DOMÍNGUEZ POR
ENSEÑARME CON EL EJEMPLO A ENCARAR LA VIDA
CON VALOR, POR BRINDARME LO MÁS PRECIADO
PARA MI, CONFIANZA, LIBERTAD Y EL DESEO DE
SOBRESALIR EN LA VIDA.*

*A MIS HERMANOS, RIGOBERTO, MIREILLE Y ANGEL
POR SU ENTUSIASMO Y APOYO.*

AGRADECIMIENTOS

Gracias A la Q.F.B Esperanza del S. Robles Valderrama, por su confianza, paciencia y disposición que me brindó todo el tiempo.

A la Biol. Ma. Guadalupe Sainz por su paciencia.

A los profesores que fungieron como sinodales:

Dr. Víctor Rivera Aguilar

M. en C. Ángel Duran Díaz

M. en C. Elizabeth Ramírez Flores

Biol. Ma. Guadalupe Sainz

A mis amigas: Roxana Mendoza, Ariana Cabrera, Alejandra Sainz, Jaqueline Rodríguez y Ana Luisa Mendoza por brindarme su amistad.

*NUESTRA RECOMPENSA SE ENCUENTRA
EN EL ESFUERZO Y NO EN EL RESULTADO.
UN ESFUERZO TOTAL ES UNA VICTORIA COMPLETA.*

Mahatma Gandhi

AGRADECIMIENTOS

Por todas las facilidades brindadas para la realización de este trabajo les doy mi agradecimiento a la:

Subgerencia de Explotación y Monitoreo Geohidrológico

Gerencia de Aguas Subterráneas

Subdirección General Técnica

Comisión Nacional del Agua (CNA)

Por todas las facilidades brindadas y su participación en los muestreos les doy mi agradecimiento a la:

Subgerencia de aguas subterráneas

Dirección Técnica

Dirección General del Organismo de la Cuenca del Río

Balsas

Comisión Nacional del Agua (CNA)

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	11
1. INTRODUCCIÓN	12
2. MARCO TEÓRICO	15
2.1. ANTECEDENTES	15
2.2. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS	21
2.3. INDICADORES MICROBIOLÓGICOS	27
3. JUSTIFICACIÓN	29
4. OBJETIVOS	30
5. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	31
5.1. COORDENADAS	31
5.2. CLIMA	31
5.3. TEMPERATURA MEDIA ANUAL	32
5.4. PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL	32
5.5. FISIOGRAFÍA	33
5.6. FORMAS DE RELIEVE	33
5.7. GEOLOGÍA	34
5.8. HIDROGEOLOGÍA	34
6. METODOLOGÍA	35
7. RESULTADOS	39
7.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DESCRIPTIVO	39
7.2. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	83
7.3. ANÁLISIS DISCRIMINANTE	85
8. CONCLUSIONES	90
REFERENCIAS	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del agua de acuerdo a su dureza	24
Tabla 2. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación al pH	39
Tabla 3. Análisis descriptivo para el pH durante 12 meses de muestreo	40
Tabla 4. Comparación de las medias del pH con la NOM-127-SSA1-1994	42
Tabla 5. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a la alcalinidad total	43
Tabla 6. Análisis descriptivo para la alcalinidad total durante 12 meses de muestreo	44
Tabla 7. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en función a los sólidos disueltos	47
Tabla 8. Análisis descriptivo para los sólidos disueltos durante los 12 meses de muestreo	48
Tabla 9. Comparación de las medias de los sólidos disueltos con la NOM-127-SSA1-1994	50
Tabla 10. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a la dureza total	51
Tabla 11. Análisis descriptivo para la dureza total durante 12 meses de muestreo	51
Tabla 12. Comparación de las medias de dureza total con la NOM-127-SSA1-1994	53
Tabla 13. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a la dureza de calcio	53
Tabla 14. Análisis descriptivo para la dureza de calcio durante 12 meses de muestreo	54
Tabla 15. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a la dureza de magnesio	55

Tabla 16. Análisis descriptivo para la dureza de magnesio durante 12 meses de muestreo	56
Tabla 17. Clasificación del agua de cada pozo y manantial de acuerdo a su dureza	57
Tabla 18. Clasificación del tipo de dureza en base a la alcalinidad y dureza total	58
Tabla 19. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a los cloruros	59
Tabla 20. Análisis descriptivo para los cloruros durante 12 meses de muestreo	60
Tabla 21. Comparación de las medias de los cloruros con la NOM-127-SSA1-1994	62
Tabla 22. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a los sulfatos	63
Tabla 23. Análisis descriptivo para los sulfatos durante 12 meses de muestreo	63
Tabla 24. Comparación de las medias de sulfatos con la NOM-127-SSA1-1994	65
Tabla 25. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a los nitratos	66
Tabla 26. Análisis descriptivo de nitratos durante 12 meses de muestreo	67
Tabla 27. Comparación de las medias de nitratos con la NOM-127-SSA1-1994	69
Tabla 28. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a la turbiedad	70
Tabla 29. Análisis descriptivo de la turbiedad durante 12 meses de muestreo	71
Tabla 30. Comparación de las medias de turbiedad con la NOM-127-SSA1-1994	72
Tabla 31. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a la temperatura	73

Tabla 32. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación al OD	74
Tabla 33. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a los coliformes totales	77
Tabla 34. Análisis descriptivo de coliformes totales durante 12 meses de muestreo	78
Tabla 35. Comparación de las medias de coliformes totales con la NOM-127-SSA1-1994	80
Tabla 36. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a los coliformes fecales	81
Tabla 37. Análisis descriptivo de coliformes fecales durante 12 meses de muestreo	81
Tabla 38. Comparación de las medias de cada sitio de muestreo con la NOM-127-SSA1-1994	83
Tabla 39. Resultados del Análisis de Componentes Principales, indica la interrelación existente entre las variables (parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos) que conforman los 5 componentes	85
Tabla 40. Resultados del análisis discriminante	87
Tabla 41. Distancias de Mahalanobis y niveles de significancia observados entre las estaciones de muestreo	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del acuífero de Cuernavaca	31
Figura 2. Pozo Herradura	36
Figura 3. Pozo Universidad	36
Figura 4. Pozo Hotel Prado	36
Figura 5. Manantial Túnel	36
Figura 6. Pozo Texcal	37
Figura 7. Pozo Civac	37
Figura 8. Pozo Tabachines	37
Figura 9. Pozo Cañada	37
Figura 10. Pozo Ojo de agua	37
Figura 11. Pozo Tezoyuca	37
Figura 12. Pozo Zapata	38
Figura 13. Manantial Las Fuentes	38
Figura 14. Variabilidad espacial de los pozos y manantiales en función al OD, pH y temperatura	40
Figura 15. Variabilidad temporal en función al OD, pH y temperatura	41
Figura 16. Comportamiento temporal del pH en pozos	41
Figura 17. Comportamiento temporal del pH en manantiales	42
Figura 18. Variabilidad espacial de los pozos y manantiales en función a la alcalinidad total, dureza total, dureza de calcio y dureza de magnesio	44
Figura 19. Variabilidad temporal en función a la alcalinidad total, dureza total, dureza de calcio y dureza de magnesio	45
Figura 20. Comportamiento temporal de la alcalinidad total en pozos	45
Figura 21. Comportamiento temporal de la alcalinidad total en manantiales	46

Figura 22. Variabilidad espacial en los pozos y manantiales en función a los sólidos totales, sólidos suspendidos y sólidos disueltos	47
Figura 23. Variabilidad temporal en función a los sólidos totales, sólidos disueltos y sólidos suspendidos	48
Figura 24. Comportamiento temporal de sólidos disueltos en pozos	49
Figura 25. Comportamiento temporal de sólidos disueltos en manantiales	49
Figura 26. Comportamiento temporal de la dureza total en pozos	52
Figura 27. Comportamiento temporal de la dureza total en manantiales	52
Figura 28. Comportamiento temporal de la dureza de calcio en pozos	54
Figura 29. Comportamiento temporal de la dureza de calcio en manantiales	55
Figura 30. Comportamiento temporal de la dureza de magnesio en pozos	56
Figura 31. Comportamiento temporal de la dureza de magnesio en manantiales	57
Figura 32. Variabilidad espacial en los pozos y manantiales en función a los cloruros, sulfatos y turbiedad	59
Figura 33. Variabilidad temporal en función a cloruros, sulfatos y turbiedad	60
Figura 34. Comportamiento temporal de los cloruros en pozos	61
Figura 35. Comportamiento temporal de los cloruros en manantiales	61
Figura 36. Comportamiento temporal de los sulfatos en pozos	64
Figura 37. Comportamiento temporal de los sulfatos en manantiales	64
Figura 38. Variabilidad espacial de los pozos y manantiales en función de los nitratos y nitritos	66
Figura 39. Variabilidad temporal en función a los nitratos y nitritos	67

Figura 40. Comportamiento temporal de los nitratos en pozos	68
Figura 41. Comportamiento temporal de los nitratos en manantiales	68
Figura 42. Comportamiento temporal de la turbiedad en pozos	71
Figura 43. Comportamiento temporal de la turbiedad en manantiales	72
Figura 44. Comportamiento temporal del oxígeno disuelto en los pozos	74
Figura 45. Comportamiento temporal del oxígeno disuelto en los manantiales	75
Figura 46. Comportamiento temporal de la temperatura en los pozos	75
Figura 47. Comportamiento temporal de la temperatura en los manantiales	76
Figura 48. Variabilidad espacial de los pozos y manantiales en función de coliformes totales y coliformes fecales	77
Figura 49. Variabilidad temporal en función de coliformes totales y coliformes fecales	78
Figura 50. Comportamiento temporal de los coliformes totales en pozos	79
Figura 51. Comportamiento temporal de los coliformes totales en manantiales	79
Figura 52. Comportamiento temporal de los coliformes fecales en pozos	82
Figura 53. Comportamiento temporal de los coliformes fecales en manantiales	82
Figura 54. Diagrama de dispersión de la función 1 contra la función 2	89
Figura 55. Diagrama de dispersión de la función 1 contra la función 3	89

RESUMEN

Uno de los recursos más importantes del desarrollo económico del hombre es el agua. Su escasez y contaminación amenazan aspectos fundamentales de la seguridad humana como son: el equilibrio del medio acuático, la producción de alimentos y la salud pública (Sardiñas *et al.*, 2006). En el acuífero del Valle de Cuernavaca, la población descarga sus residuos a los cuerpos de agua y al suelo, contaminándolos hasta hacerlos peligrosos para la salud humana, por lo que, la calidad del agua cambia en el espacio y en el tiempo, los desperdicios varían en cada descarga, siendo necesario analizar la calidad para controlar y detectar puntos de contaminación. En el presente trabajo se integró y realizó un estudio estadístico con los resultados de los análisis bacteriológicos y fisicoquímicos efectuados por Monroy, Rubio y García en las zonas norte, sur y centro-oriente del acuífero de Cuernavaca para evaluar su calidad y conocer el comportamiento espacio-temporal.

Para comparar la variación espacial y temporal, a los resultados bacteriológicos y fisicoquímicos se les aplicó un análisis descriptivo, después se hizo un análisis de componentes principales (ACP); posteriormente se les realizó un análisis discriminante por pozo para comparar estaciones de muestreo. Con la matriz de datos del análisis discriminante se calcularon las distancias de Mahalanobis, finalmente se compararon las medias de los parámetros con la NOM-127-SSA1-1994.

En términos generales el acuífero presenta una contaminación natural, de acuerdo a la dirección del flujo, que se genera de norte a sur; dicha evolución genera un enriquecimiento de iones al circular el agua a través del subsuelo. En la variación espacial los parámetros: sólidos totales, sólidos disueltos, alcalinidad total, dureza total, dureza de calcio, dureza de magnesio, OD, sulfatos y temperatura constituyeron el componente principal que cubrió el 52.1% de la variación total. La calidad fisicoquímica en la mayoría de los casos fue buena pues los valores se encontraron por debajo de los límites máximos permisibles de la norma. En la calidad bacteriológica los manantiales fueron los más contaminados. Hasta el momento la capacidad de dilución del acuífero ha permitido en general que se mantenga la misma calidad del agua del Valle de Cuernavaca, aunque se pueden apreciar zonas donde ya es evidente la contaminación antropogénica, trayendo como consecuencia una degradación en la calidad del acuífero.

1. INTRODUCCIÓN

La cantidad de agua con la que contamos en la Tierra no aumenta ni disminuye, pero el crecimiento de áreas urbanas y económicas se ha acelerado; y por lo tanto se ha incrementado la necesidad de este recurso. Para cubrir la demanda de agua, la explotación de acuíferos ha aumentado en los últimos años (Lima, 2007). Por lo tanto uno de los mayores retos a los que se enfrenta el hombre en nuestros días, es el de mantener los recursos naturales del planeta en una situación tal que permita su continua utilización en el futuro.

Una fuente importante de suministro de agua para el hombre son los mantos subterráneos, constituyendo a nivel mundial una gran proporción del agua utilizada; en México representan aproximadamente el 20% (Suárez, 1988; Escolero, 1993, citado en Monroy, 2007).

Se define como agua subterránea el agua superficial que aparece justo bajo el nivel freático en suelos y formaciones geológicas completamente saturadas. Los acuíferos son aquellas formaciones geológicas de roca permeable (porosidad y fracturamiento) que pueden almacenar agua si se encuentra situado sobre otro estrato impermeable. El tamaño y la extensión de un acuífero pueden ser muy variables, y su recarga es por el aporte de corrientes superficiales, aguas pluviales y lagos que se infiltran en el suelo; sin embargo, el factor determinante para el uso del agua subterránea es la profundidad a la que se encuentra (Arizabalo y Díaz, 1991; Jiménez, 2002).

El agua subterránea presenta por naturaleza varias ventajas con respecto al agua superficial, por ejemplo; los almacenamientos de agua superficial pierden cantidades significativas de agua por evaporación, en cambio, los acuíferos sólo pierden cantidades importantes de agua por evaporación cuando los niveles freáticos se encuentran muy someros. Segundo, la distribución es más amplia en el área; el agua superficial es un recurso transitorio y su presencia es relativamente localizada, su aprovechamiento requiere en gran escala de obras de almacenamiento y conducción; en cambio, en el subsuelo el agua tiene una distribución muy amplia, lo que permite su captación en el sitio donde va a ser utilizada, el vaso de almacenamiento ya existe en el subsuelo y funciona al mismo tiempo como un gran conducto. En el acuífero no hay

pérdida de la capacidad de almacenamiento, todo vaso superficial pierde gradualmente su capacidad de almacenamiento al ser azolvado por los sedimentos que transportan las corrientes que lo alimentan, hasta que eventualmente puede quedar inutilizado; la capacidad de almacenamiento de los acuíferos no es afectada significativamente en la mayoría de los casos. Otra ventaja es que la temperatura del agua superficial varía continuamente al estar expuesta a los cambios atmosféricos, en cambio, la temperatura del agua subterránea es casi constante debido a que el subsuelo funciona como regulador térmico (Legarreta, 1994).

El agua subterránea es la fuente de abastecimiento de agua potable más importante para diversos sectores de una población, como el urbano, industrial, comercial; por ello es de gran importancia dotar a estos sectores de este importante recurso en cantidad y calidad adecuadas (Caballero, 2006).

La Comisión Nacional del Agua (CNA) ha identificado y estudiado 653 acuíferos distribuidos en todo el territorio de la República Mexicana (Diario Oficial de la Federación, 2001; citado en Mata, 2004), de los cuales 96 están sometidos a sobreexplotación. Estos acuíferos tienen una recarga media anual de 75 km^3 y una extracción anual para usos público, urbano, agrícola, industrial y otros de 28.5 km^3 , que representa el 40% de la extracción anual bruta (Mata, 2004).

Existen factores físicos, químicos y biológicos que pueden afectar su calidad; existen dos formas a través de las cuales se puede contaminar el agua subterránea. Una de ellas es por contaminantes naturales, es decir, el ciclo natural del agua puede entrar en contacto con contaminantes que se vierten en las aguas y en la corteza terrestre, tales como sustancias minerales y orgánicas disueltas. La otra es a través de los contaminantes generados por el hombre producto de los desechos líquidos y sólidos que se vierten directa o indirectamente en el agua, por ejemplo; las sustancias de rellenos sanitarios, los canales de drenaje, sustancias empleadas en el combate de plagas agrícolas, los sistemas de tuberías para el transporte de hidrocarburos (Lima, 2007; Monroy, 2007).

La agricultura es una fuente potencial de contaminación por el uso continuo de agroquímicos. El aporte de NO_3 en el suelo bajo agricultura puede provenir tanto de la mineralización del N orgánico (humus, estiércol, etc.) como el agregado de fertilizantes nitrogenados. El NO_3 es soluble en agua, y solo es retenido por la fase sólida del suelo,

por lo cual este anión puede lixiviarse fácilmente y alcanzar el agua subterránea, pudiendo permanecer allí por décadas (Perdomo *et al.*, 2001).

En el acuífero de Cuernavaca, se descargan aguas residuales domésticas y municipales sin tratamiento en arroyos y ríos, y debido a la alta vulnerabilidad de los materiales en que van circulando, éstos se infiltran y alteran la calidad del agua subterránea. En algunos pozos de la porción sur del Valle de Cuernavaca se han identificado concentraciones de nitratos que superan los límites permisibles de acuerdo con las normas oficiales mexicanas establecidas (CNA, 2002).

De este modo, la manera de proteger las fuentes de agua subterránea es identificando las áreas y los mecanismos por los cuales los contaminantes entran al sistema (Arizabalo y Díaz, 1991).

1. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 En el Valle de Cuernavaca

Suárez en 1988, evaluó la calidad bacteriológica y fisicoquímica de 39 lugares del Valle de Cuernavaca analizando un total de 86 muestras de pozos, norias y manantiales; concluyendo que las características fisicoquímicas del agua son de buena calidad y corresponde al tipo bicarbonatada-cálcica-magnésica. En cuanto al análisis bacteriológico encontró que en la mayoría de las muestras había bacterias coliformes. También destaca que existe una contaminación por metales en los acuíferos, rebasando las normas establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), cuyas fuentes son las industrias textil y química las cuales aportan el mayor número de contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos ya que utilizan diversas materias primas en sus procesos como hidrosulfito de sodio, sosa cáustica, ácido acético, cloruro de sodio, resinas acrílicas; que al no aprovecharlas en su totalidad, generan una amplia gama de desechos sólidos, líquidos y gaseosos que dependiendo de sus características fisicoquímicas se convierten en elementos contaminantes.

En 2002 la Comisión Nacional del Agua (CNA) presentó un informe sobre la determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero de Cuernavaca, en este informe presentan los resultados de los muestreos de 1995 y 1998, en los cuales se colectaron 31 muestras entre pozos profundos y manantiales. En general la distribución de los elementos contenidos en el agua se caracterizó por tener menos concentraciones en la porción norte del Valle y progresivamente se incrementan con dirección sur. Además identificaron 3 familias de agua, todas ellas pertenecientes al tipo bicarbonatada y observaron un gran número de bacterias patógenas que se distribuyen en forma semejante al contenido de nitratos.

García en 2007 realizó un estudio fisicoquímico y bacteriológico del agua subterránea de 4 pozos en las zonas centro-oriente del Valle de Cuernavaca, Morelos, concluyendo que el único pozo que presentó niveles bajos para la alcalinidad y dureza fue el Pozo Civac, situándolo en ser el único pozo de los estudiados, con un tipo de agua suave. De acuerdo a la calidad del agua, esta disminuyó por la presencia de bacterias. En general los pozos que analizó se encuentran cumpliendo con la Norma Oficial Mexicana (NOM-

127-SSA1-1994), al estar dentro de los límites permisibles para los parámetros fisicoquímicos; la calidad microbiológica se puede clasificar como aceptable sin descuidar la importancia del proceso de cloración.

Monroy en 2007 llevó a cabo un estudio fisicoquímico y bacteriológico del agua subterránea de tres pozos y un manantial en la zona sur del Valle de Cuernavaca, Morelos, concluyendo que el agua es de tipo muy dura, dura y bicarbonatada; y en algunos lugares de muestreo el agua es de muy buena calidad para uso y abastecimiento público (previa cloración) y aceptable para cualquier deporte acuático. En los parámetros bacteriológicos la presencia de coliformes tanto fecales como totales rebasan los límites permisibles principalmente en el manantial Las Fuentes, debido a las descargas de aguas residuales.

Rubio en 2007 realizó unos estudios fisicoquímicos y bacteriológicos del agua subterránea de tres pozos y un manantial ubicados en la zona norte del Valle de Cuernavaca, Morelos, reportando que el agua es de tipo suave y la calidad es buena para el abastecimiento público. De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) se encontró que los tres pozos y el manantial están dentro de los límites permisibles para los parámetros fisicoquímicos; bacteriológicamente los tres pozos rebasaron ligeramente la norma en dos y cuatro muestreos y el manantial excedió la norma debido a la descarga de aguas domésticas.

2.1.2 En el resto del país

Mazari-Hiriart *et al.*, en 1997 realizaron un estudio en 5 pozos piloto de la zona geohidrológica sur de la ciudad de México, con el objetivo de observar la eficiencia en la aplicación de la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) sobre agua para uso y consumo humano, límites permisibles de calidad y tratamientos a los que se debe someter el agua para su potabilización, además se compararon 3 técnicas analíticas para la determinación de bacterias. Detectaron que el agua de los 5 pozos piloto no es potable durante el periodo estudiado lo que implica un riesgo para la salud. La aplicación de la norma para asegurar la calidad microbiológica del agua para uso y consumo humano tiene serias limitaciones que tienen implicaciones en la salud pública.

Mazari-Hiriart *et al.*, en 2000 evaluaron la calidad del agua subterránea de 40 pozos en las zonas sur y oeste de la ciudad de México para estimar enfermedades diarreicas;

concluyendo que el 60% de los pozos monitoreados cumplen con los estándares fisicoquímicos de calidad mexicanos para agua potable, pero al considerar parámetros bacteriológicos, el 95% de los pozos muestreados no ofrecen una buena calidad para el consumo humano. Los pozos más contaminados están en la zona oeste con 54%, debido a la alta densidad poblacional.

Pacheco *et al.*, en 2000, determinaron que grado de contaminación bacteriológica tenía el agua subterránea de una zona rural en el Estado de Yucatán que carece de condiciones de saneamiento; encontrando que los géneros de la familia de Enterobacterias (*Escherichia spp*, *Serratia spp* y *Enterobacter spp*) mostraron una frecuencia elevada, los cuales fueron responsables de gastroenteritis en la población.

Soto *et al.*, en 2000 realizaron un análisis espacial, a nivel de delegación y municipio, de las principales fuentes contaminantes del agua subterránea, en las entidades de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM); con el objeto de identificar zonas propensas a la contaminación, mediante análisis espacial y de clasificación numérica. Se tomaron como fuentes contaminantes la industria, los confinamientos de residuos sólidos, los depósitos de combustible, el sistema de drenaje, las gasolineras, los pozos de extracción y la zona urbanizada; la distribución de las fuentes contaminantes, aunadas a las zonas geológicas principales que subyacen a la Ciudad, permitió determinar que estas fuentes se localizaron principalmente en las entidades centrales de la ZMCM, mientras que el menor número de fuentes contaminantes se presentan en los municipios del Estado de México, que se incorporan recientemente a la megápolis.

En 2001 Vázquez y Domínguez realizaron un monitoreo fisicoquímico y bacteriológico en diferentes sistemas de abastecimiento de agua (pozos profundos) del Valle de México para detectar posibles contaminaciones en el agua potable; obtuvieron que el agua es moderadamente dura y su composición depende del suelo, de ahí que el agua de los diferentes pozos es rica en sílice y en algunos es alta la conductividad; en cuanto a los valores de nitratos, nitritos y pH los sitios están dentro de la norma (NOM-127); de acuerdo a los resultados bacteriológicos, hay una buena calidad en la mayor parte de los sitios muestreados.

Granel y Gález en 2002 llevaron a cabo un estudio del deterioro de la calidad del agua subterránea por el desarrollo poblacional en Cancún, Quintana Roo, para lo cual analizaron muestras de agua de 16 aprovechamientos en la Sección Cancún –

Aeropuerto y 11 manantiales en el sistema lagunar, concluyendo que el desarrollo turístico que ha tenido Cancún en los últimos años ha impactado negativamente la calidad del agua subterránea, debido al incremento de la población que cada vez genera más desechos líquidos y sólidos que de una manera u otra se ve reflejada en la calidad del agua.

En 2002 Pérez *et al.*, realizaron un estudio donde determinaron calidades fisicoquímicas (temperatura, conductividad, pH, dureza, nitratos, cloruros, sólidos totales y sólidos volátiles) y microbiológicas (coliformes fecales) del agua de 20 pozos alrededor de un basurero municipal en Durango, encontrando que el agua del 35% de los pozos estudiados, excede los límites de la norma (NOM-127-SSA1-1994) para coliformes fecales y 15% no es potable debido a sus altos contenidos en nitratos. Los valores de dureza, cloruros y conductividad son más altos en los pozos cercanos al basurero debido a la contaminación de lixiviados.

En 2003 Pérez *et al.*, llevaron a cabo la caracterización de aguas subterráneas que abastecen al distribuidor general de agua de la ciudad de Zimapán Hidalgo, México y del propio distribuidor; donde se determinaron 28 parámetros fisicoquímicos. De forma general, estas aguas presentaron propiedades fisicoquímicas normales clasificadas como aguas bicarbonatadas-cálcicas y bicarbonatadas-mixtas con bajos niveles de sulfatos, cloruros, sodio y potasio.

Mata en 2004 llevó a cabo un trabajo sobre los fundamentos de contaminación de agua subterránea, en el cual presenta de manera sencilla y práctica, los elementos necesarios para poder entender y resolver problemas de contaminación del agua subterránea, al hablar del conocimiento de los conceptos básicos de los acuíferos, donde se muestra la cantidad de agua que puede almacenar y transmitir un acuífero; también muestra las diferentes fuentes de contaminación de agua subterránea; analizando los diferentes factores que influyen en el movimiento de los contaminantes en un medio poroso como lo es un acuífero; por último habla de los aspectos más importantes que influyen en la restauración o remediación del agua subterránea contaminada, presentando las aplicaciones de métodos y técnicas de remediación de acuíferos contaminados; concluyendo que el tema de contaminación del agua subterránea es poco conocido en México y por lo mismo no se le da la importancia necesaria.

Muñoz *et al.*, en 2004 determinaron si la ubicación, el uso del agua y el tipo de agricultura, influían en las concentraciones de nitrato en el agua subterránea del Valle de Huamantla, Tlaxcala. Se realizaron dos muestreos; uno en verano (final de la temporada de lluvias) y el otro en primavera (antes del inicio de la temporada de lluvias). Sus resultados muestran que la concentración promedio de nitratos en la temporada de sequía sobrepasó la norma (44.29 mg/L de NO_3^- establecida por la Organización Mundial de la Salud en 1985, para agua potable), respecto a la registrada en la temporada de lluvias, es decir; las precipitaciones pluviales tienen efecto de dilución en la concentración de nitratos. También encontraron diferencias con relación a la ubicación (localización del pozo en el valle o en la montaña) y el tipo de agricultura (temporal o de riego); es decir el nitrato presente en el agua subterránea proviene de la agricultura intensiva.

Pacheco *et al.*, en 2004 evaluaron la calidad química y bacteriológica del agua subterránea en el Estado de Yucatán; donde recolectaron muestras en los sistemas de agua potable de 106 cabeceras municipales. Los resultados mostraron que el agua subterránea del Estado de Yucatán presenta una calidad bacteriológica clasificada como "peligrosa" en un 18%, "muy contaminada" en un 14% y como aceptable en un 45%; ya que aproximadamente en el 46% de los sistemas de abastecimiento el agua se distribuía sin clorar y en el 7% las concentraciones de cloro residual estuvieron por debajo de lo establecido en la Norma Oficial Mexicana.

Caballero en 2006 realizó un estudio sobre la calidad del agua subterránea en la subcuenca del Río Guanajuato, en el cual se recolectaron y analizaron 206 muestras que comprendieron norias, pozos, manantiales y aguas superficiales, las cuales se clasificaron con el fin de establecer el posible origen de los contaminantes. Obtuvo que el agua es de buena calidad, sin embargo el impacto de la actividad humana en algunos lugares fue evidente, las familias de agua predominante son la bicarbonatada-sódica seguida de la cálcica-magnésica. También el estudio encontró que algunos parámetros sobrepasan las normas, estos son; NO_3 , As, B, Hg, Cr, Se y U.

González *et al.*, en 2006 analizaron el comportamiento hidráulico y la calidad del agua de 14 manantiales de la microcuenca Atécuaro, en Morelia, Michoacán; encontrando que la calidad del agua es aceptable para todos los usos, incluyendo para agua potable. Los manantiales cuya agua es utilizada para uso y consumo humano requieren de protección física y sanitaria.

En 2006 Lizárraga *et al.*, realizaron una evaluación de la calidad del agua subterránea en Linares, Nuevo León, en donde identificaron las distintas fuentes de contaminación que existen en el área, así como la información para realizar un análisis del grado de vulnerabilidad que presenta el agua subterránea a la contaminación; esta evaluación indica que existe contaminación por sólidos totales, sólidos suspendidos, coliformes totales y fecales, nitratos, sulfatos, mercurio y bario. De acuerdo al análisis de vulnerabilidad, las principales fuentes de contaminación fueron el tiradero municipal, depósitos de barita, descargas de aguas residuales y los residuos generados por los animales; también observaron que la actividad antropogénica ejerce influencia negativa sobre la calidad.

2.1.3 En otros países

En 2002 Campos *et al.*, realizaron un estudio en la Sabana de Bogotá (Colombia) en donde proponen el uso de indicadores de contaminación fecal (bacterias, virus y parásitos) en aguas superficiales, subterráneas, sistemas de potabilización y depuración; concluyendo que tanto las aguas superficiales como subterráneas presentan concentraciones elevadas de la mayoría de los indicadores evaluados lo que refleja importantes niveles de contaminación del recurso utilizado para potabilización y como agua de riego agrícola.

Arcos *et al.*, en 2005 realizaron una revisión de los principales indicadores microbiológicos de contaminación y su significado en la evaluación de la calidad del agua. Analizando que los agentes patógenos implicados en la transmisión hídrica de enfermedades son las bacterias, estos microorganismos pueden causar enfermedades con diferentes niveles de gravedad, desde una gastroenteritis simple hasta cuadros graves de diarrea. Destacando que el grupo de microorganismos coliformes es un indicador de contaminación bacteriana, estas bacterias son de interés clínico, ya que pueden ser capaces de generar infecciones oportunistas en el tracto respiratorio superior e inferior, además de bacteremia, infecciones de piel y tejidos blandos, enfermedad diarreica aguda y otras enfermedades severas en el ser humano.

Dragon en 2007 hace un análisis estadístico, un análisis de correlación y de regresión, para identificar el problema de la contaminación antropogénica sobre las características químicas del agua subterránea de 61 pozos en Polonia, sus resultados muestran que la influencia antropogénica es el factor más importante y determinante en la composición

química del agua subterránea, también indica que las variables más sensibles a este tipo de influencia son los cloruros y sulfatos.

En 2007 Navarro y Carbonell elaboraron una evaluación de la contaminación del agua subterránea en un desarrollo urbano en Barcelona, España; este estudio muestra que este acuífero presenta 3 grupos de agua: bicarbonatada-cálcica, cálcica-sódica bicarbonatada-clorhídrica y sódica-cálcica. También muestran que hay altos contenidos de NO_3^- (90–100 mg/L) y un aumento en las concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} que coincide con una disminución de pH. Esta contaminación se debe a la infiltración de aguas residuales que provienen de depósitos sépticos, de zonas domésticas y de las actividades industriales.

2.2 Parámetros fisicoquímicos.

Existen diversos factores que influyen en la calidad del agua que consume una población. Entre estos se encuentra: la presencia o ausencia de fuentes de abastecimiento naturales de agua, la infraestructura de redes de almacenamiento y distribución de agua, factores políticos y económicos que afectan la normatividad relativa a la inversión en el desarrollo y mantenimiento de sistemas de abastecimiento de agua potable (Sánchez-Pérez *et al.*, 2000).

La utilización del agua para uso y consumo humano requiere de cierta calidad que asegure la inocuidad de la misma. Su importancia es ilimitada, por ello analizar sus características resulta de gran interés para la salud. Por tal motivo el abastecimiento de agua con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar enfermedades (Borbolla *et al.*, 2003).

2.2.1 Parámetros físicos

• pH

La acidez o alcalinidad de una muestra se mide en la escala de pH, que mide la concentración de iones hidrógeno presentes. La escala va de 0 a 14 con 7 como neutralidad, siendo ácido por debajo de 7 y siendo alcalino por arriba de 7. El pH controla muchas reacciones químicas y la actividad biológica normalmente se restringe a una escala estrecha de pH entre 6 y 8; en aguas naturales se mantiene entre 6.5 y

8, aunque puede variar entre 3 y 11. Este parámetro se utiliza en las determinaciones de alcalinidad y dióxido de carbono (Caballero, 2006; Castro, 2000).

• **Sólidos**

El término "sólido" involucra determinaciones que representan un análisis completo del contenido de residuos de una muestra de agua. Los sólidos se definen como la materia que permanece como residuo después de someter a evaporación una muestra de agua a una temperatura de 105° C (Caballero, 2006).

Los sólidos totales incluyen; los sólidos totales suspendidos, o porción de sólidos totales retenidos por un filtro con apertura de poro de 0.45 µm y los sólidos disueltos totales o porción que atraviesa el filtro con poro de 0.45 µm (Rubio, 2007).

Los sólidos disueltos son moléculas e iones que se encuentran diluidos en el agua, su concentración se debe a la presencia de minerales, gases, descomposición de materia orgánica, etc. Los sólidos suspendidos son principalmente de naturaleza orgánica, la mayoría son desechos humanos, desperdicios de alimentos, papel que forma una masa de sólidos suspendidos en el agua (Caballero, 2006; Aguilar, 2002).

• **Temperatura**

La temperatura es importante para la calidad del agua. Los cambios de temperatura son un factor para determinar cual va a ser su comportamiento ante distintas alteraciones, como por ejemplo el grado de solubilidad de las sales en el agua aumenta como consecuencia de una elevación de temperatura; mientras que en los gases la solubilidad disminuye al incrementarse la temperatura. Es por estas razones que los cambios de temperatura hacen variar la conductividad eléctrica. Las características microbiológicas del agua potable están relacionadas con la temperatura debido a su efecto en los métodos de tratamiento de agua, especialmente la desinfección, y su efecto en el crecimiento y supervivencia de los microorganismos. (Aguilar, 2002; OMS, 1987).

✿ **Turbiedad**

La turbidez es una expresión óptica que origina que la luz se disperse y absorba en vez de transmitirse en línea recta a través de la muestra. La turbiedad del agua es producida por materia en suspensión, como arcilla, cieno o materia orgánica e inorgánica finamente dividida, compuestos orgánicos solubles coloreados, descargas de agua residual, desechos industriales, plancton y otros microorganismos, un aumento excesivo de este parámetro reduce la penetración de la luz en los cuerpos de agua lo cual afecta la fotosíntesis que realizan los organismos fitoplanctónicos. La unidad de medida es una Unidad de Turbiedad (UT) o Unidad Nephelométrica de Turbiedad (UNT). Esta característica es importante para la determinación de un aspecto estético para su aceptación como agua potable (Mata, 2004; Castro, 2000; Borbolla *et al.*, 2003).

2.2.2 Parámetros químicos

✿ **Alcalinidad**

La alcalinidad es una medida de una propiedad agregada del agua; esta es causada principalmente por sales disueltas de bicarbonato (HCO_3^-), hidróxidos (OH^-) y carbonatos (CO_3^{2-}), además de los aniones provenientes de la disociación de ácidos débiles. En altas concentraciones produce alcalosis metabólica en animales y seres humanos; provoca formación de espuma, acarreo de sólidos en el vapor, formación de CO_2 en el vapor de calderas utilizadas en la industria (Aguilar, 2002; Robles *et al.*, 2004).

✿ **Cloruros**

El cloruro en forma de ion (Cl^-) es uno de los aniones inorgánicos principales en el agua natural, la mayoría de las aguas contienen algo de cloro; el agua doméstica debe de contener menos de 100 mg/L. El cloruro procede del lavado de los terrenos de origen marino, de agua de lluvia y su concentración en el terreno. Los vertidos urbanos e industriales pueden aportar cantidades importantes (Caballero, 2006; Mata, 2004).

• Dureza

Esta propiedad es debida a los iones metálicos Calcio y Magnesio aunque también son responsables el Hierro y el Aluminio (Morales, 1999).

En el agua podemos determinar distintos tipos de dureza, como la dureza total, que es la mayor de las concentraciones de los iones Calcio y Magnesio; la dureza cálcica es la que expresa la cantidad de sales cálcicas presentes en el agua, la concentración de este ion varía en aguas subterráneas, en aguas dulces la concentración es de 10 y 250 mg/L; la dureza magnésica es la que expresa la concentración de sales magnésicas presentes en el agua, en aguas naturales los contenidos del ion Magnesio no sobrepasan los 40 mg/L (Aguilar, 2002; Rubio, 2007).

La dureza carbonatada o temporal es la que desaparece al someter al agua a ebullición y es equivalente a la dureza total menos la dureza permanente o a la suma de las alcalinidades carbonatada y bicarbonatada y la dureza permanente o no carbonatada es la que mantiene el agua tras la ebullición y filtración posterior. No representa riesgo para la salud, pero tiene desventajas económicas incluyendo un consumo excesivo de jabón y costos altos de combustible (Morales, 1999; Aguilar, 2002).

Tabla 1. Clasificación del agua de acuerdo a su dureza (Rubio, 2007).

Agua suave	1 – 60 mg/L
Moderadamente suave	61 – 120 mg/L
Dura	121 – 180 mg/L
Muy dura	> 180 mg/L

• Nitratos (NO_3^-), Nitritos (NO_2^-)

La contaminación del agua subterránea por nitratos (NO_3^-) es un problema muy extendido en muchos lugares del mundo e impone una seria amenaza al abastecimiento de agua potable. La Organización Mundial de la Salud establece 10 mg/L como concentración máxima en agua subterránea (Muñoz *et al.*, 2004).

Las fuentes de nitratos en las aguas subterráneas es un resultado de procesos naturales y del efecto directo o indirecto de las actividades humanas. Los procesos

naturales incluyen la precipitación, el intemperismo de los minerales y descomposición de materia orgánica; los nitratos provenientes de las actividades humanas incluyen la escorrentía de terrenos cultivados, afluentes de lagunas y tanques sépticos, fertilización excesiva con nitrógeno, deforestación y el cambio en la materia orgánica del suelo como resultado de la rotación de cultivos (Pacheco y Cabrera, 2003).

El problema con los nitratos, es que son contaminantes móviles en el agua subterránea que no son adsorbidos por los materiales del acuífero y no precipitan como un mineral, esto permite que grandes cantidades de nitrato disuelto permanezca en el agua subterránea. Debido a su naturaleza soluble, los nitratos tienden a viajar grandes distancias en la superficie, específicamente en sedimentos altamente permeables o rocas fracturadas (Pacheco y Cabrera, 2003).

El único control del nitrato por debajo de la superficie es la reducción de este, el cual es una reacción natural en la que el nitrato es reducido a gases de nitrógeno menos peligrosos por la acción bacteriana. Una fuente importante de este ion son los fertilizantes. El nitrógeno es un nutriente vital para las plantas, quienes lo utilizan en la síntesis de proteínas para su crecimiento. Los fertilizantes nitrogenados aportan el nitrógeno necesario y a su vez, algunos de ellos son fuentes importantes de nitratos, dando lugar a través de su uso a un incremento de la presencia y concentración de este en el medio (Pacheco y Cabrera, 2003).

La utilización del nitrógeno puede oscilar entre 25 al 85% según el cultivo y las técnicas agrícolas, por lo tanto, a fin de obtener una máxima producción, aplican un exceso del fertilizante nitrogenado al suelo, razón por la cual aumenta substancialmente el arrastre de nitrógeno por aguas pluviales, en México se aplican 44 kg N/Ha (Pacheco y Cabrera, 2003).

Los nitratos pueden causar hipertensión, cáncer gástrico y malformaciones fetales. Su toxicidad en el humano se debe a la reducción de nitratos a nitritos, esta reacción se da en la saliva de los humanos de todas las edades y en el tracto gastrointestinal de los infantes durante los primeros meses de vida (García, 2007).

Los nitritos se forman por la oxidación bacteriana incompleta del nitrógeno en el medio acuático o terrestre, o por la reducción bacteriana del nitrato. Son productos intermedios del ciclo completo de oxidación-reducción y solo se encuentran presentes

en condiciones bajas de oxidación. El nitrito en comparación con el nitrato, es menos soluble en agua y menos estable. Cuando se utiliza el agua con este ion para la preparación de alimentos, se corre el riesgo de formar sustancias carcinogénicas llamadas nitrosaminas. Este ion puede perturbar procesos fisiológicos vitales, como la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, lo que conlleva a la cianosis y en algunas ocasiones a la muerte (Pacheco y Cabrera, 2003; García, 2007).

• Oxígeno disuelto

Es un gas, el más importante que va siendo consumido por la actividad química y biológica. El oxígeno disuelto depende de muchos factores como la temperatura, altitud, movimiento del cuerpo receptor, actividad biológica, actividad química, etc. (Cortés, 2004).

Este parámetro se considera un indicador de contaminación por materia orgánica debido a descargas de residuales tanto domésticos como industriales en cuerpos de agua. Las concentraciones bajas pueden localizarse donde la materia orgánica está en descomposición, lo que significa que las bacterias utilizan el oxígeno para descomponer el desecho, también son bajas en aguas tibias de lento movimiento (Sardiñas *et al.*, 2006).

La baja solubilidad del oxígeno en el agua, es el factor principal que limita la capacidad de autopurificación de las aguas naturales, de ahí la necesidad de dar tratamiento a los desechos líquidos, tanto domésticos como industriales (Ibarra, 2000).

• Sulfatos

Proceden del lavado de terrenos formados en condiciones de gran acidez o en ambiente marino, disolución de yeso, anhidrita y terrenos yesíferos, de las concentraciones en el suelo de agua de lluvia, las actividades urbanas, industriales y en ocasiones agrícolas que pueden aportar cantidades importantes. Los sulfatos son de los aniones más abundantes en las aguas naturales. Causan varios problemas, entre los cuales están:

- En combinación con el calcio y el magnesio son responsables de las incrustaciones duras que se encuentran comúnmente en las tuberías y calderas.

- En combinación con la materia orgánica y las bacterias sulforreductoras, causan problemas de corrosión, principalmente en la corona de las tuberías y concretos de los desagües.
- Los sulfatos pueden contribuir a crear problemas de malos olores al ser reducidos por bacterias, debido a que se produce ácido sulfúrico (Caballero, 2006; Castro, 2000).

2.3 Indicadores microbiológicos

Determinar el tipo de microorganismos presentes en el agua y su concentración proporciona herramientas indispensables para conocer la calidad de la misma y para la toma de decisiones en relación al control de vertidos, tratamiento de aguas y conservación de ecosistemas, evitando así el riesgo de contaminación de las personas y el ambiente (Arcos *et al.*, 2005).

El grupo de microorganismos coliformes es adecuado como indicador de contaminación bacteriana debido a que estos son contaminantes comunes del tracto gastrointestinal tanto del hombre como de los animales de sangre caliente, permanecen por más tiempo en el agua que las bacterias patógenas y se comportan de igual manera que los patógenos en los sistemas de desinfección (Arcos *et al.*, 2005).

Los microorganismos que conforman el grupo de los coliformes totales; *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia*, *Edwarsiella* y *Citrobacter*, viven como saprófitos independientes o como bacterias intestinales; los coliformes fecales (*Escherichia*) son de origen intestinal. Todos pertenecen a la familia Enterobacteriaceae, son bacilos Gram negativos, anaerobios facultativos, no esporulados, fermentadores de lactosa con producción de gas; constituyen el 10% de los microorganismos intestinales de los seres humanos y otros animales, las bacterias del tracto intestinal no suelen sobrevivir en el medio acuático, están sometidas a un estrés fisiológico y pierden gradualmente la capacidad de producir colonias en medios diferenciales y selectivos. Su velocidad de mortalidad depende de la temperatura del agua, los efectos de la luz solar, las poblaciones de otras bacterias presentes y la composición química del agua. La presencia de coliformes en el agua indica la contaminación bacteriana reciente y constituye un indicador de degradación de los cuerpos de agua (Arcos *et al.*, 2005).

Los coliformes fecales se denominan termotolerantes por su capacidad de soportar temperaturas más elevadas, este subgrupo se diferencia de los coliformes totales por la característica de crecer a una temperatura superior. La capacidad de reproducción fuera del intestino de los animales homeotérmicos es favorecida por la existencia de condiciones adecuadas de materia orgánica, pH, humedad, etc. Estas bacterias son de interés clínico, ya que pueden ser capaces de generar infecciones oportunistas en el tracto respiratorio, además de bacteremia, infecciones de piel y tejidos blandos, enfermedad diarreica y otras enfermedades severas en el ser humano.

La presencia de coliformes totales debe interpretarse de acuerdo con el tipo de agua: deben estar ausentes en 85% de las muestras de agua potable tratadas. En caso de estar presentes, su número no puede ser superior a 2-3 coliformes. En aguas tratadas, los coliformes totales funcionan como un alerta de que ocurrió contaminación. Indican que hubo fallas en el tratamiento, en la distribución o en las propias fuentes domiciliarias. Su presencia acciona los mecanismos de control de calidad e intensifica la vigilancia en la red de distribución.

1. JUSTIFICACIÓN

El crecimiento poblacional y el desarrollo industrial han acelerado la demanda del agua potable, provocando como consecuencia el deterioro de ésta, modificando notablemente sus características físico-químicas y bacteriológicas. Por lo tanto este problema contribuye de manera muy significativa a la disminución de la disponibilidad del vital líquido para una población mundial que crece aceleradamente.

Aunque en muchos lugares se cuenta con drenaje, en el Valle de Cuernavaca existe un gran número de casas que siguen arrojando sus desechos domésticos a las barrancas, creando con ello la contaminación del suelo y a su vez la contaminación de los mantos acuíferos.

Los últimos estudios realizados por Monroy, Rubio y García en 2007 muestran como las zonas sur, norte y centro – oriente respectivamente se empiezan a deteriorar en algunas áreas específicas; aunque en general la calidad del agua es buena en los pozos analizados por cada autora.

De ahí la importancia de realizar un estudio estadístico que integre los tres trabajos realizados por Monroy, Rubio y García, para ver en forma global la situación del acuífero de Cuernavaca y conocer mejor el comportamiento de los contaminantes a lo largo del acuífero que cubre el Valle de Cuernavaca.

2. OBJETIVOS

- Integrar y realizar un estudio estadístico con los resultados de los análisis bacteriológicos y fisicoquímicos efectuados en las zonas norte, sur y centro-oriente del acuífero de Cuernavaca para evaluar su calidad.
- Conocer el comportamiento espacio-temporal de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos.

1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

5.1 Coordenadas

La poligonal que define al acuífero Cuernavaca se localiza entre las coordenadas geográficas de 18° 47' y 19° 07' de latitud Norte y los 99° 07' y 99° 25' de longitud Oeste del meridiano de Greenwich.

El acuífero Cuernavaca colinda en la porción norte con las Cuencas Hidrológicas del Valle de México y del Río Lerma. Al este y sur colinda con los acuíferos de Cuautla-Yautepec y Zacatepec, respectivamente, ambos en el Estado de Morelos. Al poniente colinda con la subcuenca del Río Chalma del Estado de México (Figura 1).

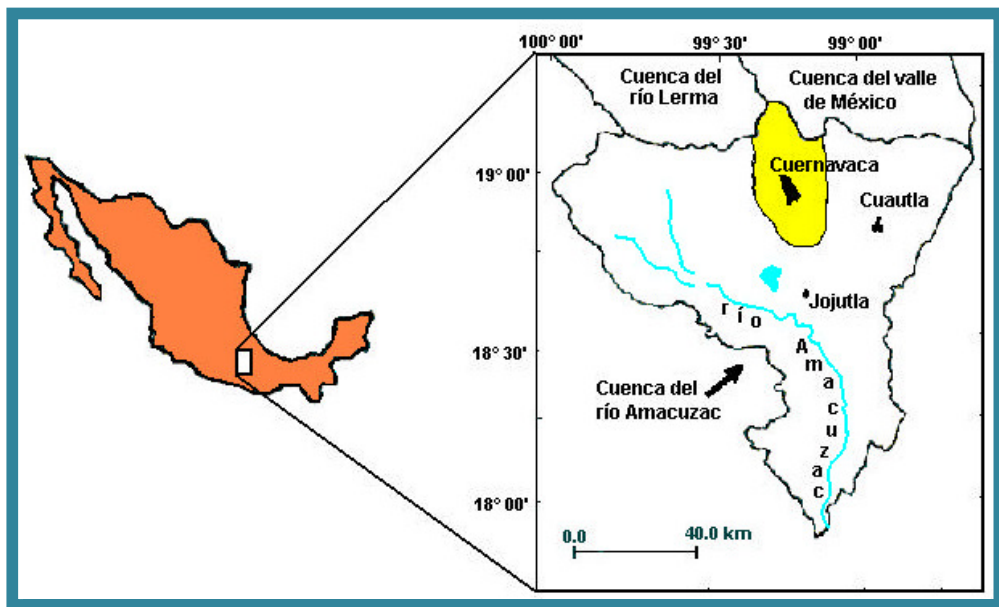


Figura 1. Localización del acuífero de Cuernavaca.

Fuente: Comisión Nacional del Agua. 2002. Determinación de la disponibilidad del agua en el acuífero Cuernavaca, Estado de Morelos.

5.2 Clima

El clima se define por una gran variedad de factores, sin embargo, el principal factor que influye en los climas del Estado de Morelos y del acuífero de Cuernavaca se debe a la geografía, destacando la altitud del Eje Neovolcánico (ENV) y la influencia de la

Sierra Madre del Sur (SMS). El ENV constituye una barrera orográfica que bloquea el paso de los vientos húmedos provenientes del Océano Pacífico y la SMS da lugar a la presencia de pequeños valles entre montañas.

5.3 Temperatura media anual

Los tipos de climas que se definen en el acuífero de Cuernavaca forman cinturones climáticos con orientación de este a oeste, los cuales son poco oscilantes a lo largo del año. De acuerdo con las temperaturas medias anuales se tiene que en esta zona acuífera se definen cinturones con climas: semifrío, templado, semicálido y cálido. Los climas semifrío y templado se localizan en la porción norte del acuífero y el clima semicálido y cálido al centro y sur del acuífero, respectivamente.

El clima semifrío presenta temperaturas que fluctúan entre 5 a 12° C y ocurre en altitudes mayores de 2 800 msnm de la Sierra de Chichinautzin en la porción norte del acuífero. El clima templado presenta temperaturas que fluctúan entre 12 a 18° C, a altitudes de entre 2 000 y 2 800 msnm al norte del acuífero. El clima semicálido tiene temperaturas que fluctúan entre 18 y 22° C, se distribuye en un cinturón climático que se encuentra a altitudes de 1 400 y 2 000 msnm en la porción central de la zona acuífera. El clima cálido presenta una temperatura mayor de los 22° C, predomina a altitudes menores de 1 400 msnm, en la porción sur del acuífero.

5.4 Precipitación media anual

La precipitación pluvial que incide en el acuífero de Cuernavaca se ve influenciada por la topografía y relieve. Por lo anterior se tiene que en la porción alta de la región hidrogeológica se genera una precipitación del orden de 1 100 a 1 500 mm anuales. En la porción central del Valle se genera una precipitación pluvial del orden de los 950 a 1 100 mm anuales. En la porción sur del Valle la precipitación pluvial que se genera es del orden de los 850 a 950 mm anuales. Las lluvias que inciden sobre el acuífero inician durante el mes de mayo y terminan a finales del mes de octubre.

5.5 Fisiografía

El acuífero del Valle de Cuernavaca se localiza en la zona de transición del borde septentrional del Eje Neovolcánico en la Depresión del Balsas de la subprovincia de la Cuenca del Balsas - Mexcala de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur.

5.6 Formas de relieve

A través del tiempo geológico el Estado de Morelos ha sido afectado por períodos orogénicos y tectónicos, actividades que han dado lugar a la presencia de una gran variedad de geoformas. Los límites geomorfológicos de la zona acuífera del Valle de Cuernavaca son: al norte con las sierras de Zempoala, Ajusco y Chichinautzin, al sur con la Sierra de Xochicalco, al poniente con la prolongación de la Sierra de Zempoala y al oriente con la sierra de Tepoztlán - Tlaltizapan o anticlinal de Tucumán.

Las sierras del Ajusco (3 750 msnm), Zempoala (3 650 msnm) y Chichinautzin (3690 msnm) son las mayores altitudes y una de las principales zonas de recarga del acuífero Cuernavaca. La Sierra del Chichinautzin, se constituye de coladas de lava de naturaleza basáltica; este material tiene un alto grado de permeabilidad secundaria producto del alto grado de fracturamiento, lo que permite que se infiltren las aguas generadas por lluvia. La Sierra de Zempoala se constituye de volcanes y coladas de lava de naturaleza andesítica, se ubica en los alrededores de las lagunas de Zempoala. El desnivel de las sierras y el Valle es de 2 490 m en una distancia aproximada de 30 km, lo que da lugar a una expresión geomorfológica de gran contraste.

Las sierras descienden abruptamente hacia el sur dando lugar a la formación de lomeríos ondulantes de depósitos aluviales del Valle de Cuernavaca (1 500 msnm), con pendientes con dirección S, SE y SW. El anticlinal de Tucumán es un plegamiento con dirección norte-sur que divide al Estado en dos zonas: poniente y oriente. En la zona poniente del Estado se localizan los Valles de Cuernavaca y Zacatepec y en la zona oriente se localizan los Valles de Yautepec, Cuautla y Tepalcingo- Axochiapan. Este plegamiento está formado por rocas calizas, dolomias, areniscas y lutitas calcáreas.

La sierra de Xochicalco forma la frontera entre el Valle de Cuernavaca y el Valle de Zacatepec, es un plegamiento de rocas calizas que funciona como barrera al flujo subterráneo que fluye hacia el acuífero Zacatepec, con el cual se comunica a través de

los subálveos de los ríos Tembembe, Apatlaco y Río Dulce. El Valle de Cuernavaca se prolonga al sur hasta llegar al valle de Zacatepec que es el nivel base de erosión del río Amacuzac (800 msnm).

5.7 Geología

La columna estratigráfica en el acuífero Cuernavaca se representa por 13 tipos de unidades de roca, las cuales abarcan del período Cretácico Inferior (110 millones de años) al Reciente; en la columna se observan rocas ígneas intrusivas y extrusivas y grandes afloramientos de rocas sedimentarias marinas y continentales.

5.8 Hidrogeología

En función de aspectos geomorfológicos y geohidrológicos se define que la extensión territorial de la zona hidrogeológica del acuífero Cuernavaca tiene 996 km², de los cuales, 595.7 km² se catalogan exclusivamente como zona de recarga y 400.3 km² como zona acuífera. Este acuífero se encuentra alojado en dos diferentes unidades de roca: la primera unidad consiste de rocas ígneas basálticas fracturadas de la Formación Chichinautzin que presentan una alta permeabilidad y distribución irregular; la segunda unidad la constituyen rocas de la Formación Cuernavaca que presenta una permeabilidad media y una distribución irregular.

1. METODOLOGÍA

Los resultados de los parámetros bacteriológicos transformados para fines estadísticos por la ecuación: $\sqrt{0.5 + \text{valor}}$ y fisicoquímicos obtenidos por Monroy, Rubio y García en 2007 se les aplicó un análisis descriptivo (media, desviación estándar, valor máximo y valor mínimo, coeficiente de variación y mediana) para comparar la variación espacial y temporal.

Después se hizo un análisis de componentes principales (ACP) a partir de una matriz de datos de 17 variables (pH, alcalinidad total, sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos suspendidos, dureza total, dureza de Ca, dureza de Mg, cloruros, sulfatos, nitratos, nitritos, turbiedad, temperatura, OD, coliformes totales y fecales), con el objeto de agrupar los parámetros en diferentes componentes de acuerdo a su similitud.

El método de análisis de componentes principales (ACP) es una combinación de análisis estadísticos de correlación, varianza y regresión, analiza simultáneamente el arreglo de la distribución interrelacionada y variabilidad de los datos. También examina las variables y las unifica en índices individuales y expresa las tendencias de la variabilidad de los sistemas (Ibarra, 2000).

Posteriormente se les aplicó un análisis discriminante por pozos con la finalidad de seleccionar los parámetros de mayor relevancia. Con la matriz de datos del análisis discriminante se calcularon las distancias de Mahalanobis entre todos los pozos, para determinar la semejanza o diferencia entre los 12 lugares.

La finalidad del análisis discriminante es para comparar estaciones de muestreo.

Finalmente se compararon las medias de los parámetros con la NOM-127-SSA1-1994 y poder establecer que zonas presentaron más valores fuera de los límites permisibles.

Los pozos y manantiales muestreados por Monroy, Rubio y García fueron los siguientes: en la zona norte se encuentran los pozos Herradura, Universidad, Hotel Prado y el manantial Túnel. En la zona centro-oriente se localizan los pozos Texcal, Civac, Tabachines y Cañada. En la zona sur se presentan los pozos Ojo de agua, Tezoyuca, Zapata y el manantial Fuentes.

📍 Zona norte

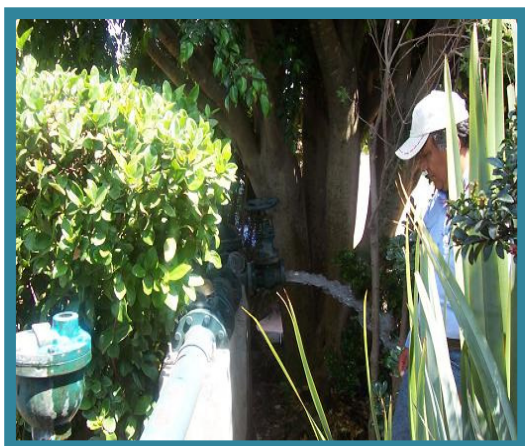


Figura 3. Pozo Universidad.



Figura 2. Pozo Herradura.



Figura 4. Hotel Prado.



Figura 5. Manantial Túnel.

🌿 Zona centro – oriente



Figura 6. Pozo Texcal.



Figura 7. Pozo Civac.



Figura 8. Pozo Tabachines.



Figura 9. Pozo Cañada.

🌿 Zona sur



Figura 10. Pozo Ojo de agua.



Figura 11. Pozo Tezoyuca.



Figura 12. Pozo Zapata



Figura 13. Manantial Las Fuentes.

7. RESULTADOS

7.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DESCRIPTIVO

7.1.1 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), detergentes, nitrógeno amoniacal, demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos.

Las medias, valores mínimos y máximos para DBO₅, detergentes y nitrógeno amoniacal, se encontraron por debajo del límite de detección del método (2, 0.001 y 0.01 mg/L respectivamente) en todos los pozos y manantiales estudiados. Los sólidos suspendidos también presentaron en algunas ocasiones valores en el límite de sensibilidad del método (0.0001 mg/L) y en otras los valores en general fueron muy bajos al igual que la DQO (2 mg/L). Todo esto nos confirma la ausencia de materia orgánica en los sitios muestreados.

7.1.2 pH

En general, podemos decir que en base a los valores de pH obtenidos tanto en los pozos como en los manantiales el agua tiene una alcalinidad debida a bicarbonatos, por otro lado las medias del pH no variaron significativamente en todos los pozos y manantiales muestreados, encontrándose valores entre 6 y 6.9, siendo el más bajo Ojo de Agua (Figura 14); sin embargo hubo muestreos con valores muy ácidos como los casos de Universidad y Ojo de Agua con pH de 4.6; Tezoyuca, Herradura, Zapata, Túnel y Tabachines con 5.1, 5.2, 5.3, 5.7 y 5.8 respectivamente (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación al pH.

pH						
Pozo/manan.	medias	desv. estándar	valor máximo	valor mínimo	coef. de variación	mediana
Cañada	6.96	0.25	7.50	6.50	3.59	6.93
Civac	6.77	0.40	7.30	6	5.99	6.90
Fuentes	6.79	0.42	7.30	6.01	6.17	6.80
Herradura	6.91	0.62	7.72	5.20	8.98	7.05
Hotel Prado	6.82	0.21	7.20	6.50	3.08	6.78
Ojo de Agua	6	0.47	6.57	4.65	7.92	6.05
Tabachines	6.94	0.43	7.58	5.80	6.21	6.95
Texcal	6.96	0.24	7.53	6.61	3.53	6.95
Tezoyuca	6.74	0.49	7.05	5.19	7.41	6.90
Túnel	6.49	0.38	7	5.70	5.85	6.50
Universidad	6.74	0.73	7.68	4.60	10.92	6.90
Zapata	6.54	0.42	6.88	5.30	6.47	6.65

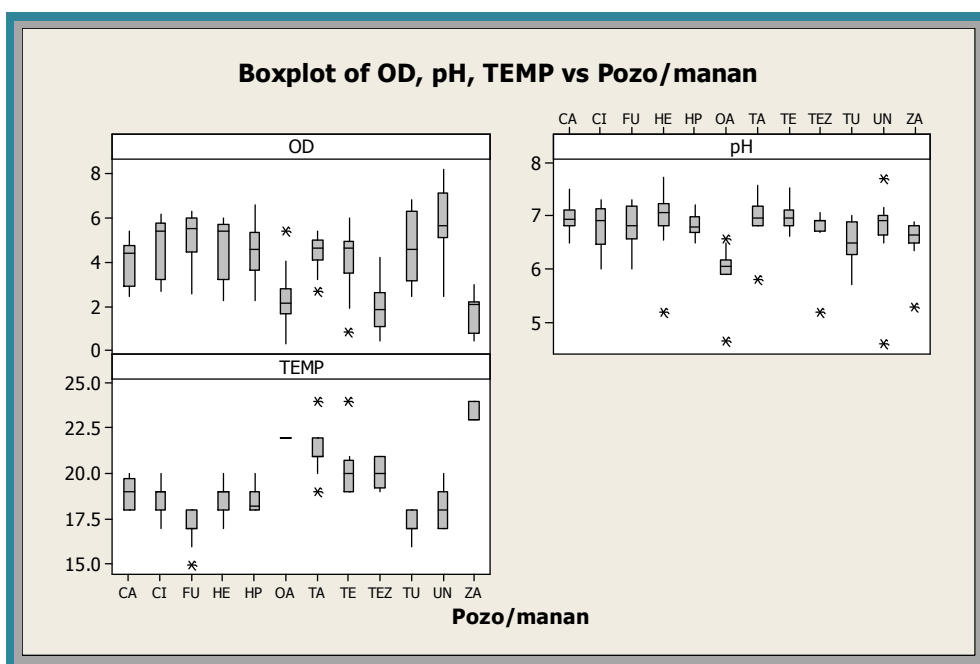


Figura 14. Variabilidad espacial de los pozos y manantiales en función al OD, pH y temperatura.

Los valores más ácidos se presentaron en mayo para 4 pozos, Ojo de Agua, Tezoyuca, Zapata y Tabachines: dos pozos en octubre: Universidad y Ojo de Agua y en diciembre: Herradura (Figuras 15 y 16).

En general las medias del pH no presentaron mucha variabilidad a lo largo de todos los muestreos (Tabla 3 y Figura 15).

Tabla 3. Análisis descriptivo para el pH durante 12 meses de muestreo.

Mes	Medias	Desv. estándar	pH			Mediana
			Valor máximo	Valor mínimo	Coef. de variación	
Enero	6.82	0.28	7.10	6.10	4.15	6.90
Febrero	6.85	0.35	7.40	6	5.14	6.90
Marzo	6.86	0.33	7.30	6.05	4.94	6.90
Abril	6.70	0.43	7.30	5.70	6.55	6.85
Mayo	6.28	0.85	7.17	4.65	13.53	6.56
Junio	6.58	0.38	7.16	5.97	5.79	6.57
Julio	6.81	0.23	7.09	6.27	3.44	6.80
Agosto	6.83	0.66	7.72	6	9.74	6.81
Septiembre	6.93	0.37	7.24	5.90	5.44	7.08
Octubre	6.56	0.71	7.30	4.60	10.89	6.75
Noviembre	6.66	0.27	7	6.10	4.16	6.75
Diciembre	6.77	0.56	7.50	5.20	8.35	6.80

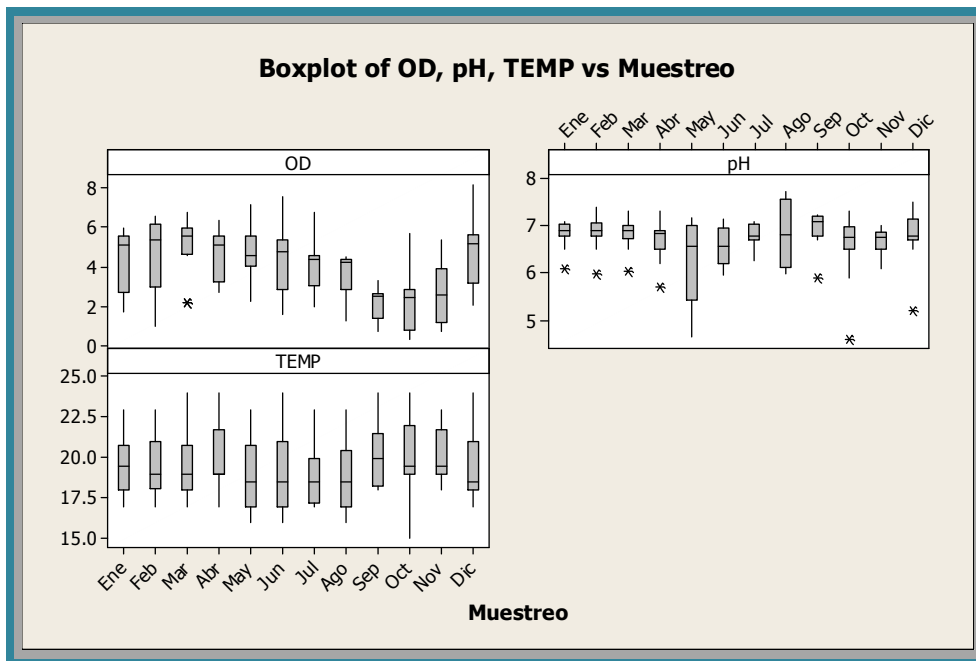


Figura 15. Variabilidad temporal en función al OD, pH y temperatura.

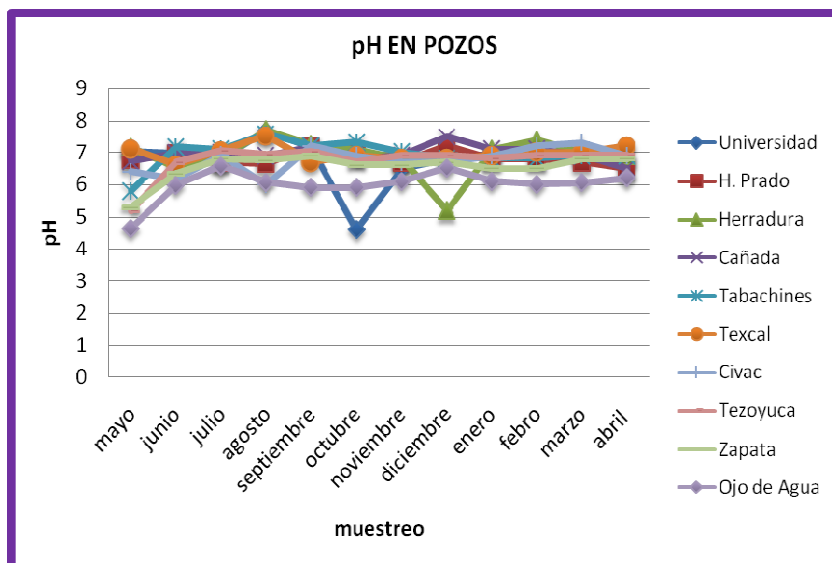


Figura 16. Comportamiento temporal del pH en pozos.

Los manantiales no presentaron datos de pH tan bajos, manteniéndose más o menos constantes durante todos los muestreos (Figura 17).

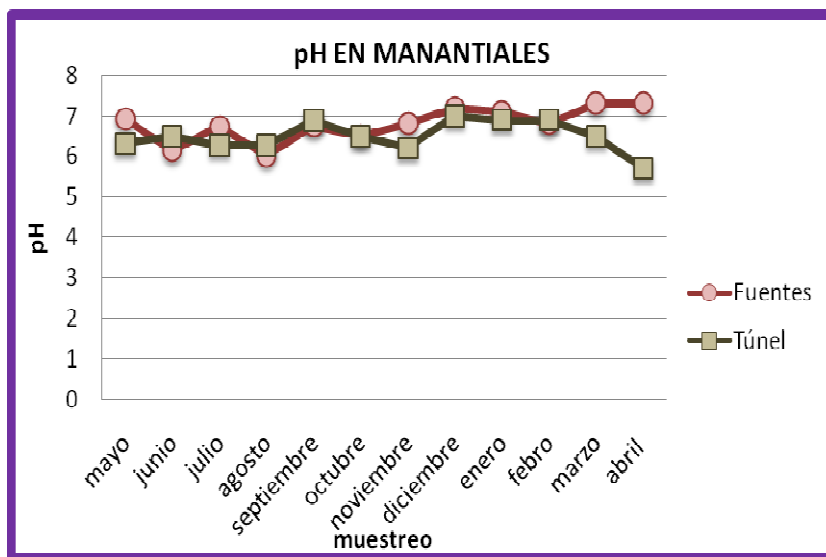


Figura 17. Comportamiento temporal del pH en manantiales.

Tanto las medias como los valores mínimos obtenidos en algunos muestreos nos indican valores que se encuentran por debajo del límite máximo permisible de la NOM-127-SSA1-1994 para agua potable estando en esta situación los pozos Universidad, Herradura, Tabachines, Ojo de Agua, Zapata, Tezoyuca y los dos manantiales Fuentes y Túnel (Tabla 4).

Tabla 4. Comparación de las medias del pH con la NOM-127-SSA1-1994.

pH		
Pozo/manantial	Resultados (medias)	Límite máximo permisible NOM-127-SSA1-1994
Cañada	6.96	6.5 – 8.5
Civac	6.77	
Fuentes	6.79	
Herradura	6.91	
Hotel Prado	6.82	
Ojo de Agua	6	
Tabachines	6.94	
Texcal	9.96	
Tezoyuca	6.74	
Túnel	6.49	
Universidad	6.74	
Zapata	6.54	

7.1.3 Alcalinidad a la fenolftaleina

La alcalinidad a la fenolftaleina fue de cero para todos los pozos y manantiales confirmando con ello que la alcalinidad es debida a la presencia de bicarbonatos.

7.1.4 Alcalinidad total

La alcalinidad total, la cual mide directamente la reserva alcalina, es decir, la suma de aniones procedentes directa o indirectamente de un ácido débil y cuya propiedad normalmente es impartida por la presencia de bicarbonatos y carbonatos; presentó el valor promedio más alto en el pozo Zapata con 443.03 mg/L seguido del pozo Tezoyuca con 328.67 mg/L; tales valores pueden indicar una reserva alcalina elevada que debe estar determinada por la disolución de sales del suelo (Cuevas *et al.*, 1999), mientras que las medias más bajas se observaron en el pozo Herradura con 65.39 mg/L y en el manantial Túnel con 73.84 mg/L oscilando en un rango entre 55.6 y 76 mg/L y de 55.62 y 92.7 respectivamente (Tabla 5, Figura 18).

Considerando el flujo del acuífero que inicia de las partes altas del Valle y va en dirección a las zonas más bajas es importante observar como los valores de alcalinidad empiezan bajos en Herradura y Hotel Prado que son lugares altos y como se van incrementando los valores conforme se va bajando hasta llegar a Tezoyuca y Zapata que son las partes más bajas. Este incremento en las concentraciones es consecuencia de la disolución de las mismas rocas que forman el suelo (Figuras 20 y 21).

Tabla 5. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a la alcalinidad total.

ALCALINIDAD TOTAL						
Pozo/manan.	medias	desv. estándar	valor máximo	valor mínimo	coef. de variación	mediana
Cañada	144.10	13.77	169	126	9.56	142.10
Civac	77.55	12.01	98.80	60	15.49	80.30
Fuentes	86.56	12.54	105.06	70.70	14.49	86.50
Herradura	65.39	5.62	76	55.60	8.59	64.15
Hotel Prado	94.60	12.42	117	74.20	13.13	91.10
Ojo de Agua	204.32	14.47	228	182.20	7.08	200.15
Tabachines	181.93	18.28	217	159	10.05	172.95
Texcal	176.56	14.65	197.76	154.50	8.30	172.15
Tezoyuca	328.67	28.71	373.89	287	8.73	332.85
Túnel	73.84	13.17	92.70	55.62	17.84	74.10
Universidad	75.02	8.82	89.61	61.80	11.75	71.50
Zapata	443.03	30.91	482.04	400	6.98	446.90

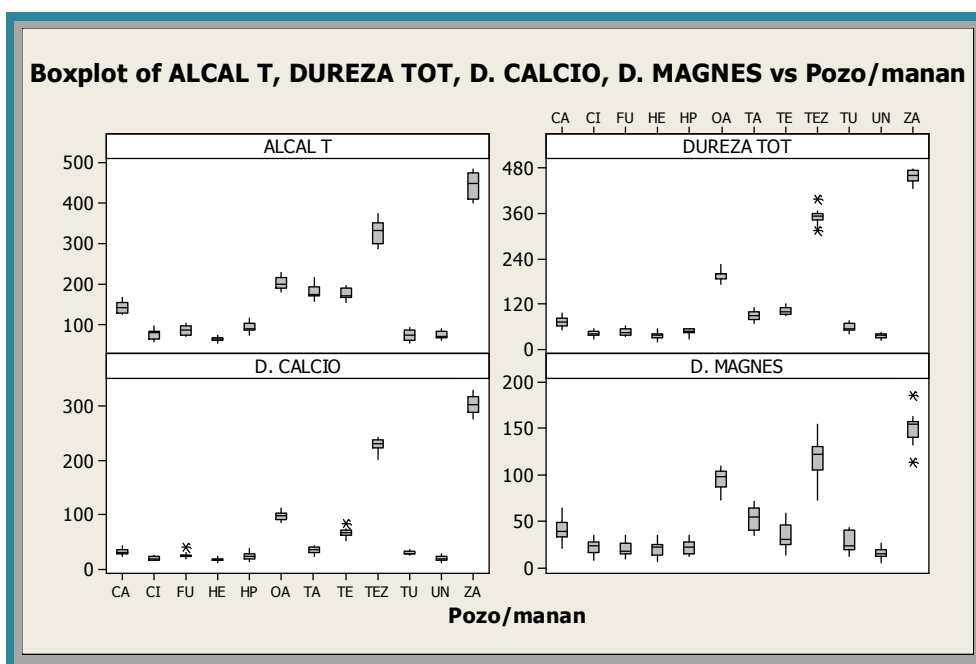


Figura 18. Variabilidad espacial de los pozos y manantiales en función a la alcalinidad total, dureza total, dureza de calcio y dureza de magnesio.

Con respecto a la variación temporal de las medias de alcalinidad, en general no hubo diferencia significativa durante todo el año muestreado, tanto en los pozos como en los manantiales (Tabla 6, Figura 19).

Tabla 6. Análisis descriptivo para la alcalinidad total durante 12 meses de muestreo.

Alcalinidad total						
Mes	Medias	Desv. estándar	Valor máximo	Valor mínimo	Coef. de variación	Mediana
Enero	155.4	117.5	439.3	61.7	75.62	115.8
Febrero	160.3	122.5	449	64.8	76.40	114.3
Marzo	148.4	106.5	410	63	71.81	107.5
Abril	152.3	106.8	400	60	70.17	107.5
Mayo	176.3	130.5	482	61	74.02	122.1
Junio	168.5	122.9	475	55.6	72.92	134.4
Julio	144.8	107.6	401.7	55.6	74.31	106.6
Agosto	151.4	108.2	410	61.8	71.47	116.8
Septiembre	178.5	129.3	480	57	72.45	138
Octubre	166.6	116.3	444.8	69.5	69.77	119.6
Noviembre	172.3	122	457.2	71	70.80	127.4
Diciembre	176.7	122	466.4	72	69.05	135.5

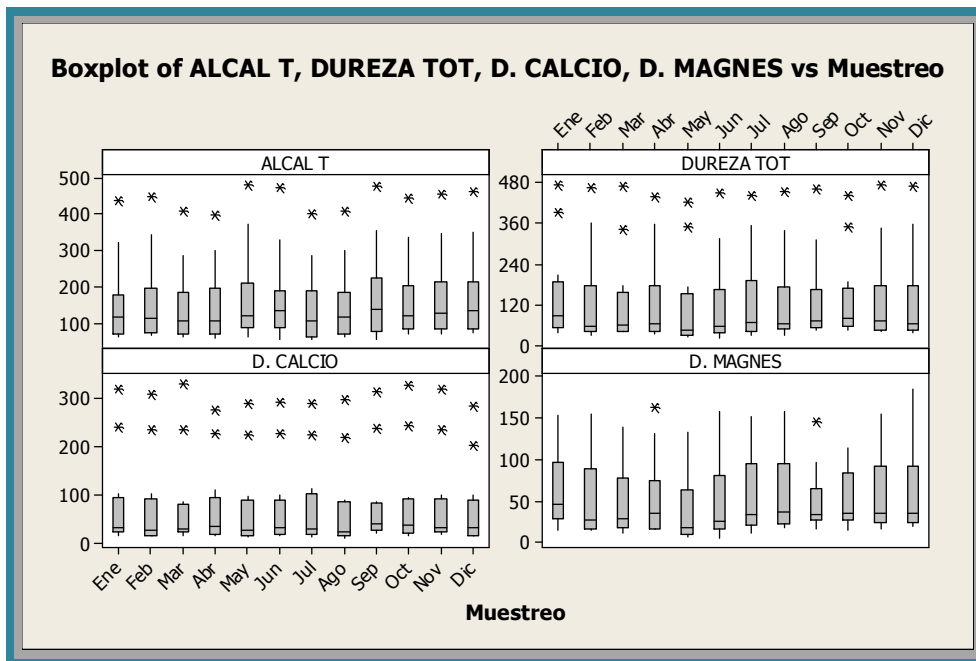


Figura 19. Variabilidad temporal en función a la alcalinidad total, dureza total, dureza de calcio y dureza de magnesio.

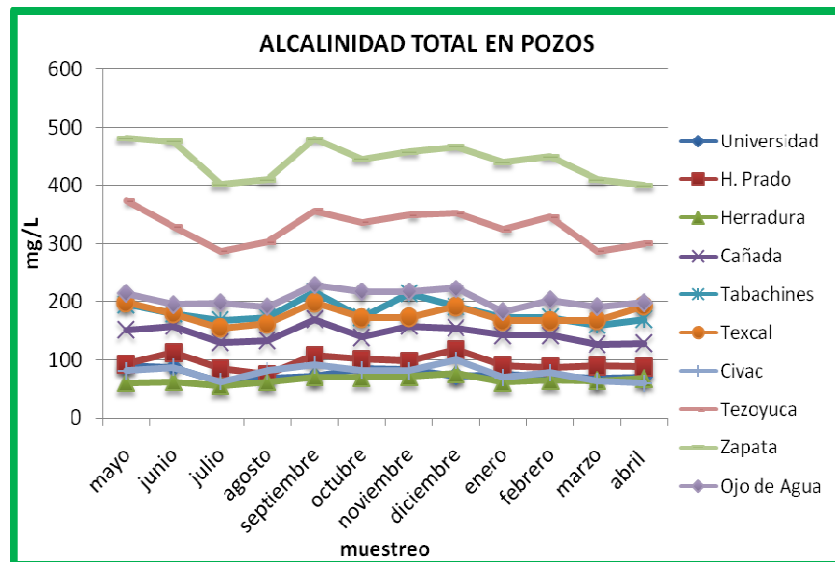


Figura 20. Comportamiento temporal de la alcalinidad total en pozos.

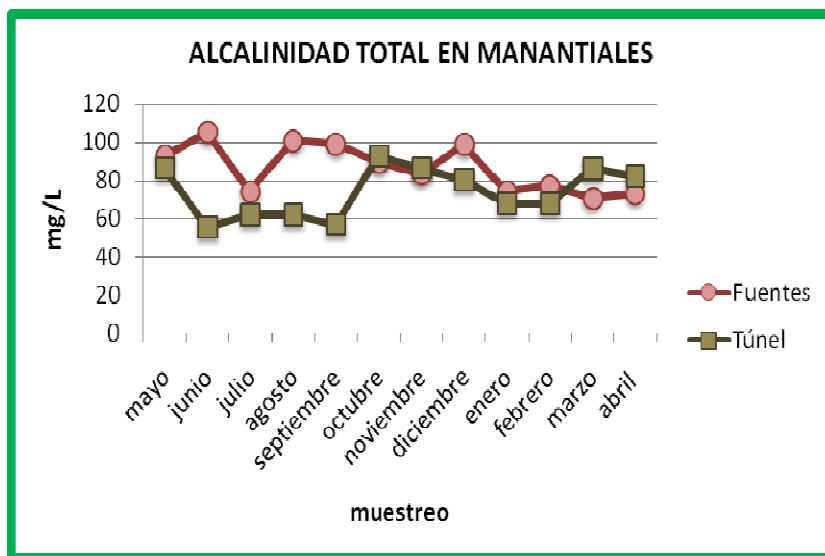


Figura 21. Comportamiento temporal de la alcalinidad total en manantiales.

7.1.5 Sólidos disueltos

Respecto a los sólidos disueltos Zapata presentó el valor más alto con una media de 681.2 mg/L, seguido de Tezoyuca con una media de 450.50 mg/L; mientras que el pozo con el valor más bajo fue Herradura con una media de 80.42 mg/L, este mismo pozo presentó en los 12 meses de estudio los valores más bajos fluctuando entre 63 y 96 mg/L (Tabla 7 y Figura 22).

Hay que recordar que Herradura se localiza al norte y Zapata y Tezoyuca al sur del Valle de Cuernavaca. La CNA (2002) reportó concentraciones de sólidos disueltos de 50 a 100 mg/L para la zona norte del Valle, y para la zona sur de 400 a 600 mg/L; los contenidos de la zona sur son ligeramente rebasados por Zapata, por lo que como ya se mencionó en la alcalinidad total, se deben a la dirección del flujo subterráneo que ocurre de norte (1 800 msnm) a sur (920 msnm), lo que genera un enriquecimiento de estos parámetros al circular el agua a través del subsuelo y/o por la presencia de residuos que se arrastran durante el recorrido del agua a través de la tubería (CNA, 2002; Vázquez *et al.*, 2001) (Figuras 24 y 25).

En lo referente a la variación temporal de las medias de los sólidos disueltos, aquí tampoco se apreció ninguna variación significativa (Tabla 8 y Figura 23).

Tabla 7. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en función a los sólidos disueltos.

SÓLIDOS DISUELTOS						
Pozo/manan.	medias	desv. estándar	valor máximo	valor mínimo	coef. de variación	mediana
Cañada	149.83	11	172	136	7.34	149
Civac	111.92	12.59	128	84	11.25	112
Fuentes	107.92	7.06	118	96	6.55	107.50
Herradura	80.42	10.49	96	63	13.05	80
Hotel Prado	113.33	6.15	123	99	5.43	114
Ojo de Agua	308.17	19.14	340	272	6.21	303
Tabachines	182.92	12.60	200	160	6.89	183.50
Texcal	177.33	11.32	192	160	6.38	180
Tezoyuca	450.50	27.68	492	401	6.14	451
Túnel	117	12.43	132	90	10.63	119
Universidad	110.83	9.11	124	96	8.22	110.50
Zapata	681.2	72.2	772	516	10.61	696

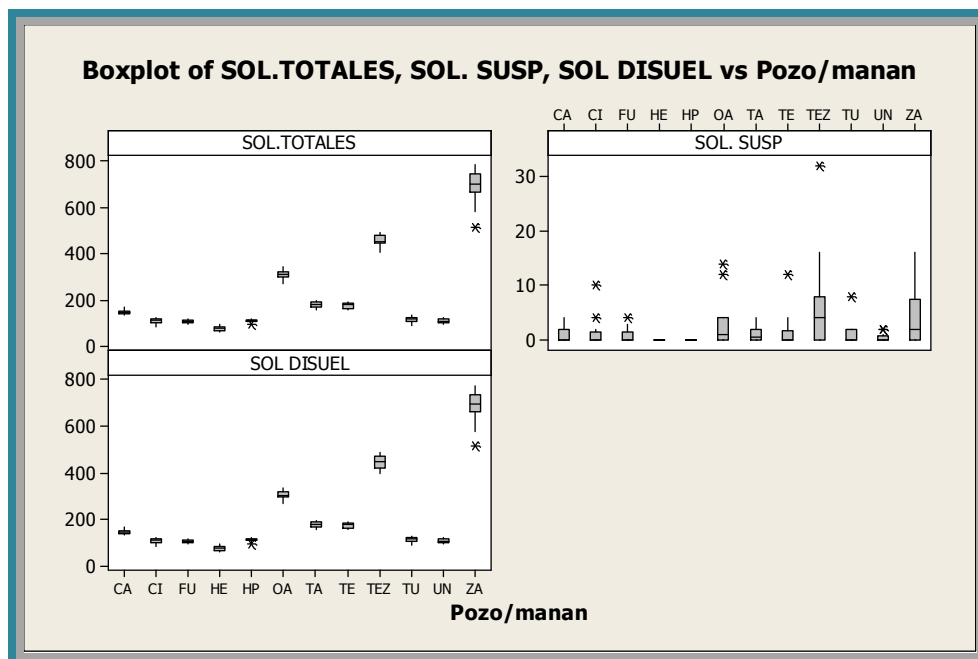


Figura 22. Variabilidad espacial en los pozos y manantiales en función a los sólidos totales, sólidos suspendidos y sólidos disueltos.

Tabla 8. Análisis descriptivo para los sólidos disueltos durante los 12 meses de muestreo.

Sólidos disueltos						
Mes	Medias	Desv. estándar	Valor máximo	Valor mínimo	Coef. de variación	Mediana
Enero	223	197.4	750	96	88.50	137.5
Febrero	220	187.6	712	80	85.27	140
Marzo	223	178.1	666	96	79.79	144
Abril	212.8	185.4	664	84	87.11	138
Mayo	203.1	152.8	580	86	75.24	132
Junio	196.3	135.2	516	70	68.90	136
Julio	211.3	179.7	668	63	85.02	128
Agosto	215.9	185.1	684	80	85.75	132
Septiembre	225	187.7	708	86	83.41	142
Octubre	216.9	199.8	772	68	92.11	138
Noviembre	223	190	714	76	85.19	134
Diciembre	220.8	196.3	740	76	88.90	136

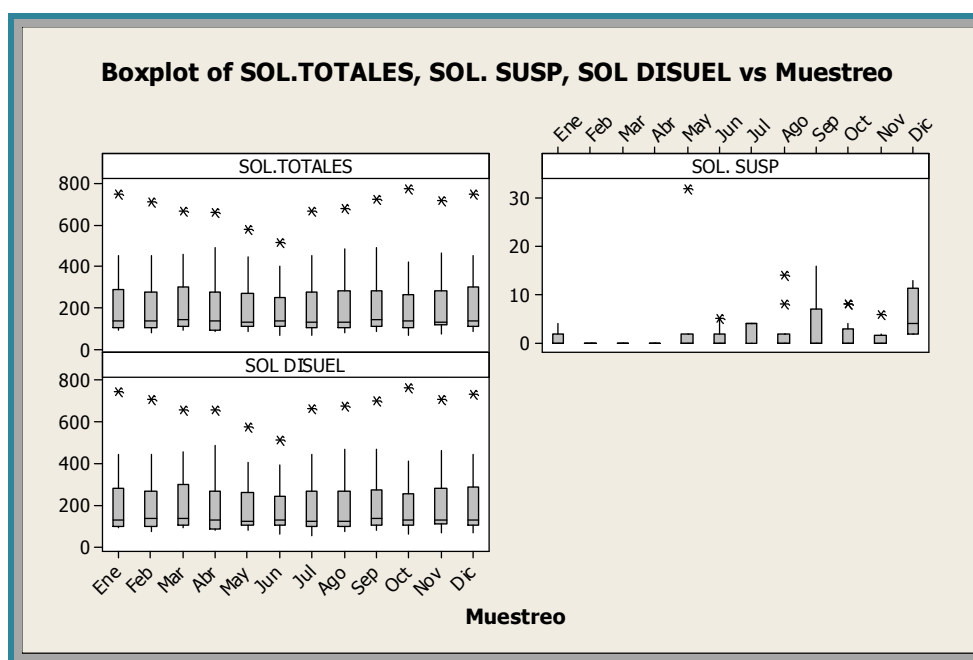


Figura 23. Variabilidad temporal en función a los sólidos totales, sólidos disueltos y sólidos suspendidos.

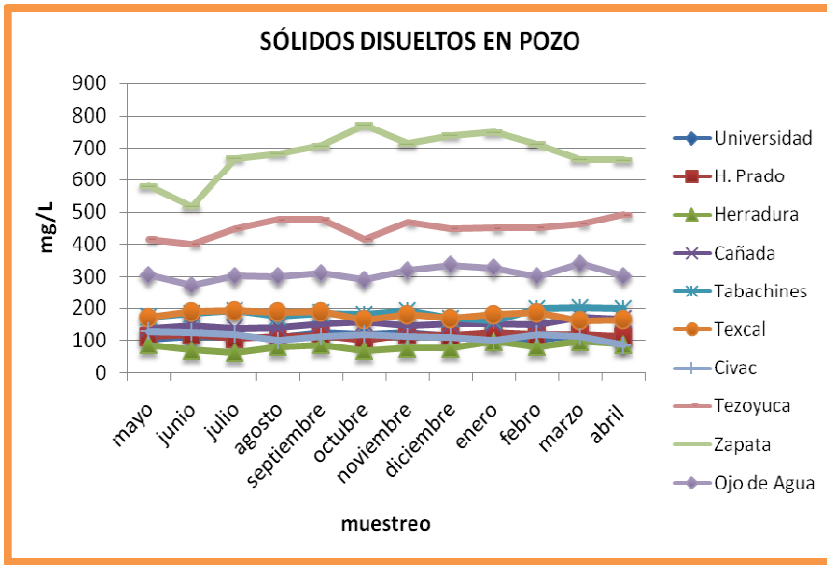


Figura 24. Comportamiento temporal de sólidos disueltos en pozos.

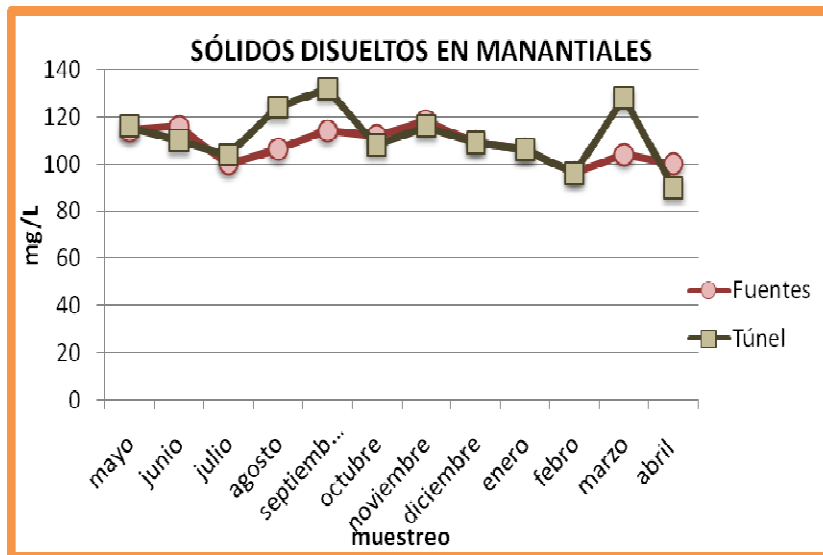


Figura 25. Comportamiento temporal de sólidos disueltos en manantiales.

Comparando las medias con los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 tenemos que todas las medias se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles, es decir, ningún pozo sobrepasa la norma (Tabla 9).

Tabla 9. Comparación de las medias de los sólidos disueltos con la NOM-127-SSA1-1994.

SÓLIDOS DISUELTOS mg/L		
Pozo/manantial	Resultados por pozo (medias)	Límite máximo permisible NOM-127-SSA1-1994
Cañada	149.83	1 000
Civac	111.92	
Fuentes	107.92	
Herradura	80.42	
Hotel Prado	113.33	
Ojo de Agua	308.17	
Tabachines	182.92	
Texcal	177.33	
Tezoyuca	450.50	
Túnel	117	
Universidad	110.83	
Zapata	681.2	

7.1.6 Dureza total

Los mayores valores para la dureza total se presentaron en Zapata y Tezoyuca con medias de 457.32 y 350.33 mg/L respectivamente; sin embargo hubo muestreos en los que se presentaron menores concentraciones tal es el caso de los pozos Universidad, Herradura, Civac, H. Prado y el manantial las Fuentes con 36.99, 37.94, 43.63, 47.89 y 47.39 mg/L respectivamente (Tabla 10 y Figura 18).

La dureza total como parte de los sólidos disueltos presenta también el mismo comportamiento de los pozos del sur y de las zonas más bajas; estos últimos son los que presentaron los valores más altos debiéndose este incremento a las sales que se van sumando a su paso como ya se explicó anteriormente.

Tabla 10. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a la dureza total.

DUREZA TOTAL						
Pozo/manan.	medias	desv. estándar	valor máximo	valor mínimo	coef. de variación	mediana
Cañada	73.95	13.86	99	51.96	18.74	72
Civac	43.63	8.22	57	37.40	18.84	41
Fuentes	47.39	8.94	63	36.40	18.86	45.57
Herradura	37.94	9.51	55	23.53	25.06	37.60
Hotel Prado	47.89	8.82	57	28.43	18.41	49.40
Ojo de Agua	195.65	14.12	223	172.55	7.22	200
Tabachines	91.38	11.80	110	70	12.91	92.06
Texcal	102.56	9.60	122	92	9.36	99.95
Tezoyuca	350.33	21.39	396	314	6.11	351
Túnel	59.03	12.16	77.20	41.17	20.60	55
Universidad	36.99	6.51	46	26.40	17.59	37.50
Zapata	457.32	16.43	476	423.50	3.59	459.40

Aunque en los meses de mayo y junio se presentaron las menores concentraciones en dos sitios de muestreo: Universidad y Herradura; y solamente en mayo se encuentra Civac (Figuras 26 y 27).

Para las medias de la dureza total, en general no hubo una variación temporal significativa (Tabla 11 y Figura 19).

Tabla 11. Análisis descriptivo para la dureza total durante 12 meses de muestreo.

Dureza total						
Mes	Medias	Desv. estándar	Valor máximo	Valor mínimo	Coef. de variación	Mediana
Enero	145.4	144.4	475.1	39	99.26	88.1
Febrero	127.1	144.6	467.3	31.6	113.82	57.4
Marzo	126	140	472	40	111.09	62
Abril	128.8	136.5	442	34	105.93	65
Mayo	112.5	136	423.5	26	120.91	46.6
Junio	119	135.4	453	23.5	113.73	57
Julio	128.6	138	443.1	31.4	107.31	67.7
Agosto	126.4	137	456.8	31.4	108.34	65.7
Septiembre	129.8	130.4	462	44	100.48	74
Octubre	133.8	130.8	445	45	97.78	80
Noviembre	134.7	139.8	476	42	103.85	72
Diciembre	132	142.5	472	36	107.94	64

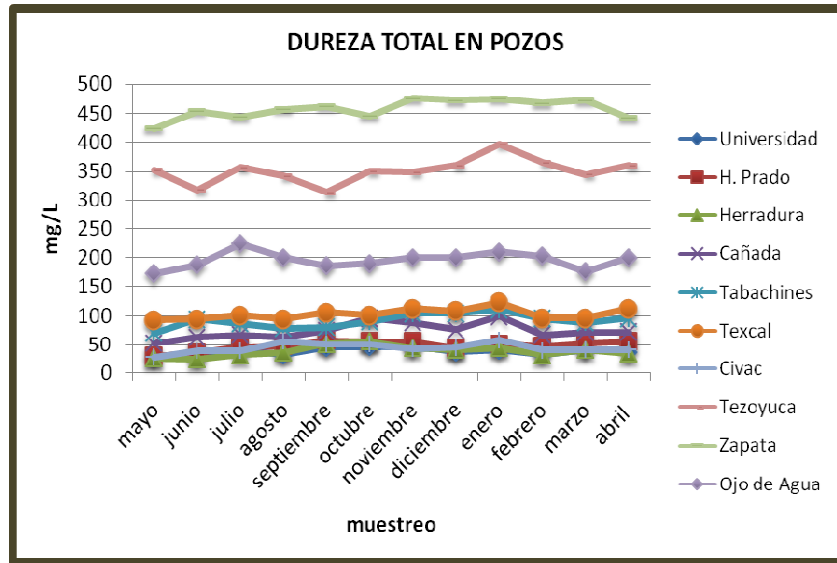


Figura 26. Comportamiento temporal de la dureza total en pozos.

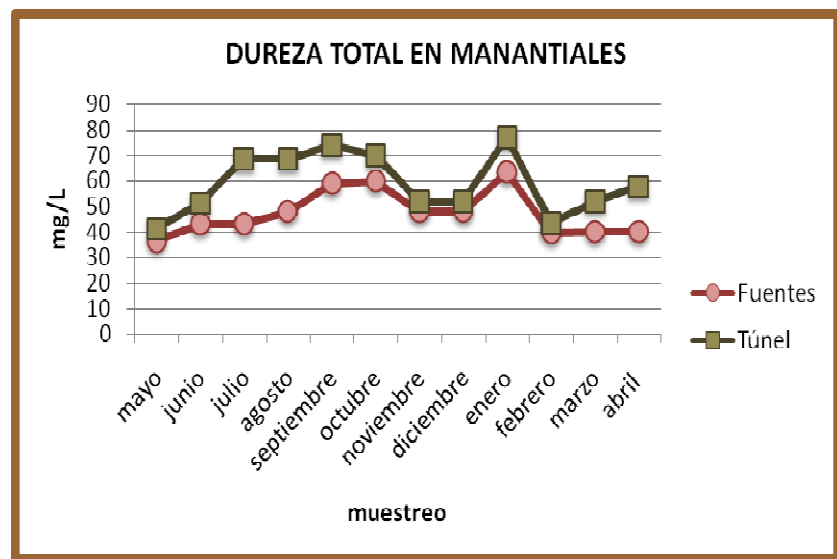


Figura 27. Comportamiento temporal de la dureza total en manantiales.

De acuerdo a las medias, tenemos que todos los sitios de muestreo se encontraron por debajo de los límites máximos permisibles, sin embargo, el pozo Zapata presentó la mayor concentración en relación a los demás pozos y manantiales, pero no rebasa el límite máximo permisible establecido en la norma (Tabla 12).

Tabla 12. Comparación de las medias de dureza total con la NOM-127-SSA1-1994.

DUREZA TOTAL mg/L		
Pozo/manantial	Resultados (medias)	Límite máximo permisible NOM-127-SSA1-1994
Cañada	73.95	500
Civac	43.63	
Fuentes	47.39	
Herradura	37.94	
Hotel Prado	47.89	
Ojo de Agua	195.65	
Tabachines	91.38	
Texcal	102.56	
Tezoyuca	350.33	
Túnel	59.03	
Universidad	36.99	
Zapata	457.32	

7.1.7 Dureza de Ca

El pozo Zapata presentó la media más alta en la dureza de calcio con 305.48 mg/L, le sigue Tezoyuca con 230.80 mg/L; mientras que las medias bajas quedan representados por dos pozos: Herradura y Universidad con 17.62 y 19.99 mg/L respectivamente (Tabla 13 y Figura 18). Como constituyentes de los sólidos disueltos aquí se presenta lo mismo del incremento de los valores en las zonas más bajas (Figuras 28 y 29).

Tabla 13. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a la dureza de calcio.

DUREZA DE CALCIO						
Pozo/manan.	medias	desv. estándar	valor máximo	valor mínimo	coef. de variación	mediana
Cañada	32.89	5.23	42.50	23.50	15.90	32
Civac	20.48	3.67	26	15.60	17.94	20.05
Fuentes	26.31	5.65	42	20	21.48	24.45
Herradura	17.62	3.21	24	11.80	18.21	17.05
Hotel Prado	24.67	7.06	37.50	15	28.62	23.75
Ojo de Agua	99.31	8.27	113.70	88	8.33	100
Tabachines	35.92	5.77	44	23.50	16.07	35.80
Texcal	67.56	8.23	85	52	12.19	68
Tezoyuca	230.80	11.16	245	204	4.84	233
Túnel	30.60	3.06	35	27.50	10	30
Universidad	19.99	4.78	28	11.80	23.93	19.80
Zapata	305.48	18.29	332	278	5.99	304.40

Al igual que la dureza total las medias de la dureza de calcio no presentaron variaciones significativas a lo largo del año de estudio (Tabla 14 y Figura 19).

Tabla 14. Análisis descriptivo para la dureza de calcio durante 12 meses de muestreo.

Dureza de Calcio						
Mes	Medias	Desv. estándar	Valor máximo	Valor mínimo	Coef. de variación	Mediana
Enero	81.2	97.9	320.7	15.8	120.64	34.6
Febrero	75.3	97.3	310.8	18.8	129.19	27.7
Marzo	77.8	100.5	332	16	129.08	30
Abril	73.5	88.3	278	18	120.19	35
Mayo	72.5	90.9	290	15	125.25	29
Junio	73.8	92	294	16.3	124.75	32
Julio	74.5	91	290.2	15.6	122.11	30.4
Agosto	70.3	93.3	298	11.8	132.84	24.2
Septiembre	81	95.3	316	22	117.35	40.5
Octubre	83.3	100.1	330	18	120.14	40
Noviembre	78.7	97.6	320	20	124.05	32
Diciembre	69.5	87.2	286	16	125.50	32

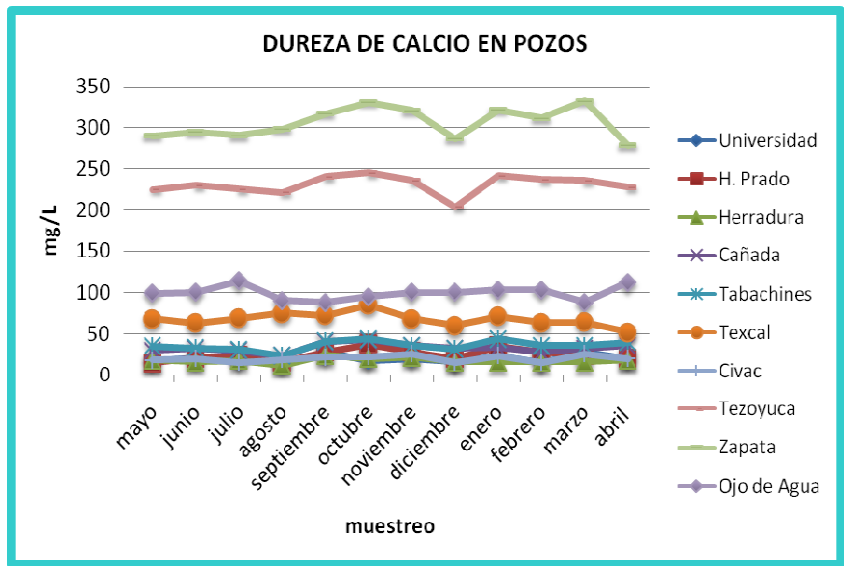


Figura 28. Comportamiento temporal de la dureza de calcio en pozos.

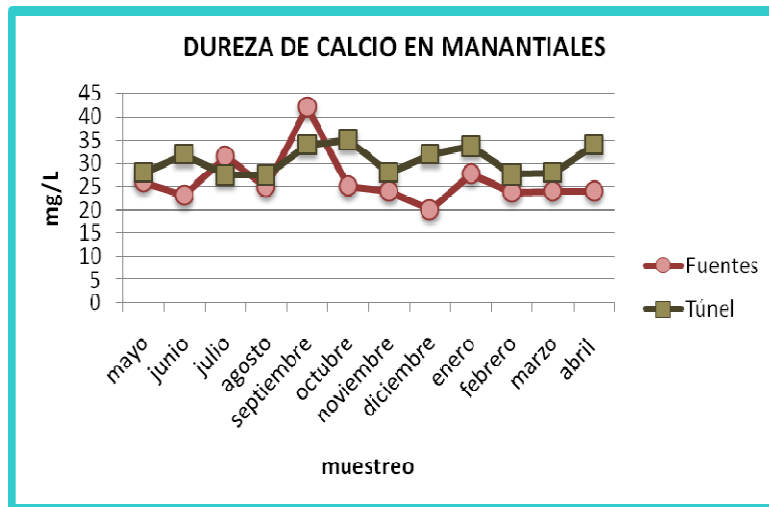


Figura 29. Comportamiento temporal de la dureza de calcio en manantiales.

7.1.8 Dureza de Mg

La dureza de magnesio presenta medias altas en Zapata con 151.84 mg/L y en Tezoyuca con 119.53 mg/L, mientras que las medias más bajas se encuentra en los pozos Universidad, Herradura, Civac y H. Prado con 17, 20.31, 23.15, 23.31 mg/L respectivamente y en los manantiales Fuentes con 21.08 mg/L y Túnel con 28.42 mg/L (Tabla 15, Figura 18).

Tabla 15. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a la dureza de magnesio.

DUREZA DE MAGNESIO						
Pozo/manan.	medias	desv. estándar	valor máximo	valor mínimo	coef. de variación	mediana
Cañada	41.06	11.36	65.40	21.96	27.68	39.40
Civac	23.15	7.91	35.30	8.90	34.15	23.70
Fuentes	21.08	8.35	35.70	10.40	39.59	18.57
Herradura	20.31	8.32	35	7.23	40.96	22.70
Hotel Prado	23.31	7.21	36	13.43	30.94	22.80
Ojo de Agua	95.75	11.42	109.80	73.50	11.93	98.50
Tabachines	53.80	12.62	72	35	23.47	54.92
Texcal	35	13.51	60	15	38.60	31.80
Tezoyuca	119.53	24.21	156	74	20.26	123.35
Túnel	28.42	11.01	43.60	13.17	38.74	24
Universidad	17	6.19	27	5.40	36.39	16.10
Zapata	151.84	14.40	186	115	11.46	155.20

En mayo se presenta la menor concentración de dureza de magnesio en el pozo Herradura, Universidad en junio y Cañada en septiembre, sin embargo, Zapata presentó los valores más altos durante el periodo de muestreo, teniendo su valor más alto en diciembre (Figuras 30 y 31).

Las medias de la dureza de magnesio tampoco presentaron una variación significativa durante los doce muestreos (Tabla 16 y Figura 19).

Tabla 16. Análisis descriptivo para la dureza de magnesio durante 12 meses de muestreo.

Dureza de Magnesio						
Mes	Medias	Desv. estándar	Valor máximo	Valor mínimo	Coef. de variación	Mediana
Enero	64.3	49.1	154.4	15.3	76.39	47.5
Febrero	51.7	49	156.5	15.8	94.82	27.7
Marzo	48.2	41.6	40	12	86.35	30
Abril	53	48.8	164	16	92.16	36
Mayo	39.9	46	133.5	8	115.13	17.7
Junio	45.3	45.9	159	5.40	101.19	25.4
Julio	54.1	49	152.9	11.7	90.52	34.1
Agosto	56.2	46.7	158.8	18	83.08	37.3
Septiembre	48.5	38.7	146	16	79.86	34
Octubre	50.5	34.9	115	15	69	35
Noviembre	56	44.6	156	16	79.61	36
Diciembre	62.5	56.4	186	20	90.25	36

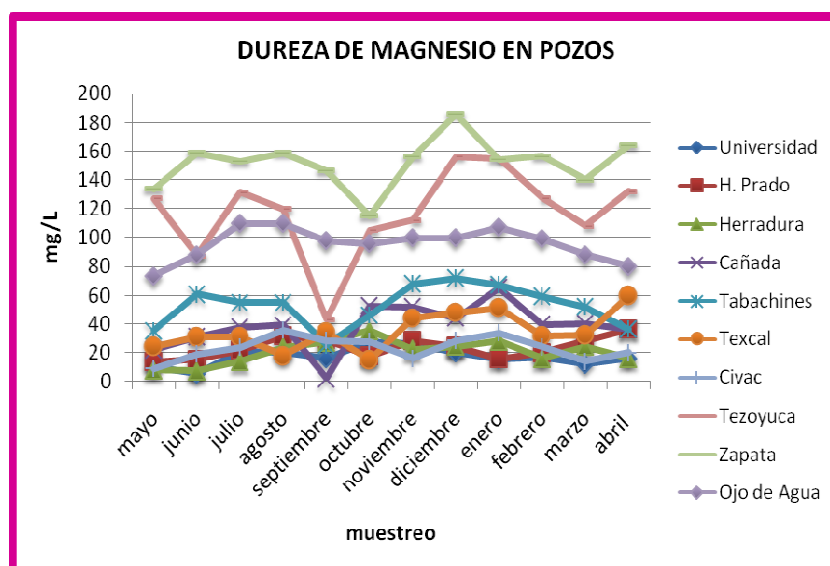


Figura 30. Comportamiento temporal de la dureza de magnesio en pozos.

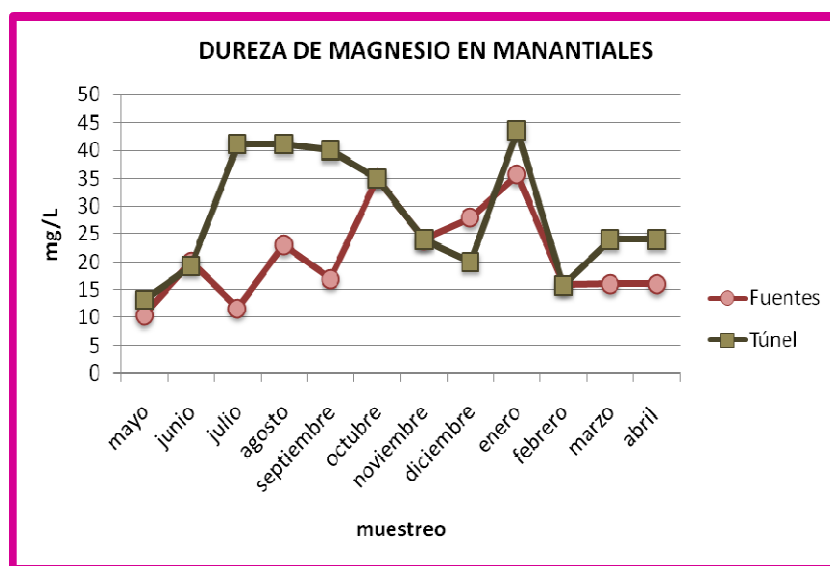


Figura 31. Comportamiento temporal de la dureza de magnesio en manantiales.

En relación a la clasificación del agua de acuerdo a su dureza (Tabla 1), seis puntos de muestreo presentan agua suave, tal es el caso de Civac, Herradura, Hotel Prado, Universidad y los dos manantiales; Cañada, Tabachines y Texcal presentan agua moderadamente suave; mientras que los resultados de Ojo de Agua, Tezoyuca y Zapata nos dicen que el agua es muy dura (Tabla 17).

Tabla 17. Clasificación del agua de cada pozo y manantial de acuerdo a su dureza.

Pozo/Manantial	Dureza Total (medias)	Tipo de agua
Civac	43.63	Agua suave
Herradura	37.94	Agua suave
Hotel Prado	47.89	Agua suave
Las Fuentes	47.39	Agua suave
Túnel	59.03	Agua suave
Universidad	36.99	Agua suave
Cañada	73.95	Moderadamente suave
Tabachines	91.38	Moderadamente suave
Texcal	102.56	Moderadamente suave
Ojo de Agua	195.65	Muy dura
Tezoyuca	350.33	Muy dura
Zapata	457.32	Muy dura

Con los datos de las medias de la alcalinidad total de cada pozo y manantial y su dureza total, se pudo calcular la dureza temporal o carbonatada y la no carbonatada.

La dureza carbonatada o temporal desaparece cuando se hierve el agua, es decir que puede precipitarse mediante ebullición prolongada. Esto se produce porque los bicarbonatos sirven como fuentes de iones carbonato para precipitar Ca^{++} como CaCO_3 a temperaturas elevadas. La dureza carbonatada esta dada principalmente por carbonatos y bicarbonatos. Se calcula de acuerdo a lo siguiente:

Si la alcalinidad total es mayor a la dureza total, la dureza carbonatada es igual a la dureza total. Pero si la alcalinidad total es menor a la dureza total, la dureza carbonatada es igual a la alcalinidad total.

La dureza no carbonatada corresponde principalmente a sulfatos, cloruros y nitratos de calcio y de magnesio. La dureza de no carbonatos, sobre todo cuando el anión es el sulfato, puede dar como resultado la formación de escamas duras en las calderas y otras partes del equipo de intercambio de calor. Este tipo de dureza es más costosa y difícil de eliminar. Se calcula restando la alcalinidad total menos la dureza total (Romero, 1999; Robles *et al.*, 2004).

De acuerdo a lo anterior tenemos que la dureza carbonatada predominó más en Túnel, Zapata, Tezoyuca, Ojo de agua, Texcal; mientras que en Hotel del Prado, Herradura, Universidad, Fuentes, Tabachines, Civac y Cañada tanto la carbonatada como la no carbonatada estuvieron muy parecidas. Esto puede explicarse posiblemente por el tipo de suelo diferente que predomina en esas zonas (Tabla 18).

Tabla 18. Clasificación del tipo de dureza en base a la alcalinidad y dureza total.

Pozo/manantial	Dureza mg /L	Alcalinidad total	Dureza carbonatada	Dureza no carbonatada
Hotel Prado	47.8	94.5	47.89	46.71
Herradura	37.9	65.3	37.94	27.45
Universidad	59.0	73.8	36.99	38.03
Túnel	19.9	75.0	59.03	14.81
Zapata	457.31	443.02	443.03	14.29
Tezoyuca	350.32	328.67	328.67	21.66
Ojo de Agua	195.64	204.32	195.65	8.67
Fuentes	47.385	86.55	47.39	39.17
Texcal	103	177	102.56	74
Tabachines	91.4	182	91.38	90.55
Civac	43.6	77.5	43.63	33.92
Cañada	73.9	144	73.95	70.15

7.1.9 Cloruros

En los resultados de cloruros, Zapata obtuvo el promedio más alto con 81.92 mg/L; mientras que las concentraciones promedio más bajas se encontraron en Herradura con 1.53 mg/L; H. Prado: 2.11 mg/L; el manantial Fuentes: 2.74 mg/L; Texcal: 3.02 mg/L y Universidad: 3.77 mg/L (Tabla 19 y Figura 32).

Tabla 19. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a los cloruros.

CLORUROS						
Pozo/manan.	medias	desv. estándar	valor máximo	valor mínimo	coef. de variación	mediana
Cañada	5.34	2.95	11.90	1.90	55.27	4.70
Civac	3.12	2.84	10.90	1	91.07	1.70
Fuentes	2.74	2.63	8.90	1	96.01	1.69
Herradura	1.53	1.76	5.80	1	114.82	1.24
Hotel Prado	2.11	1.16	3.90	1	55.34	1.95
Ojo de Agua	27.53	5.41	35.90	20.10	19.66	27.65
Tabachines	14.94	2.48	19	11	16.64	15.30
Texcal	3.02	2.62	9.70	1	86.94	1.95
Tezoyuca	8.30	2.84	13.90	4.99	34.19	7.35
Túnel	4.84	1.42	6.90	2.90	29.41	4.70
Universidad	3.77	8.12	7.90	1	215.74	0.49
Zapata	81.92	8.61	90.90	61.90	10.51	84.60

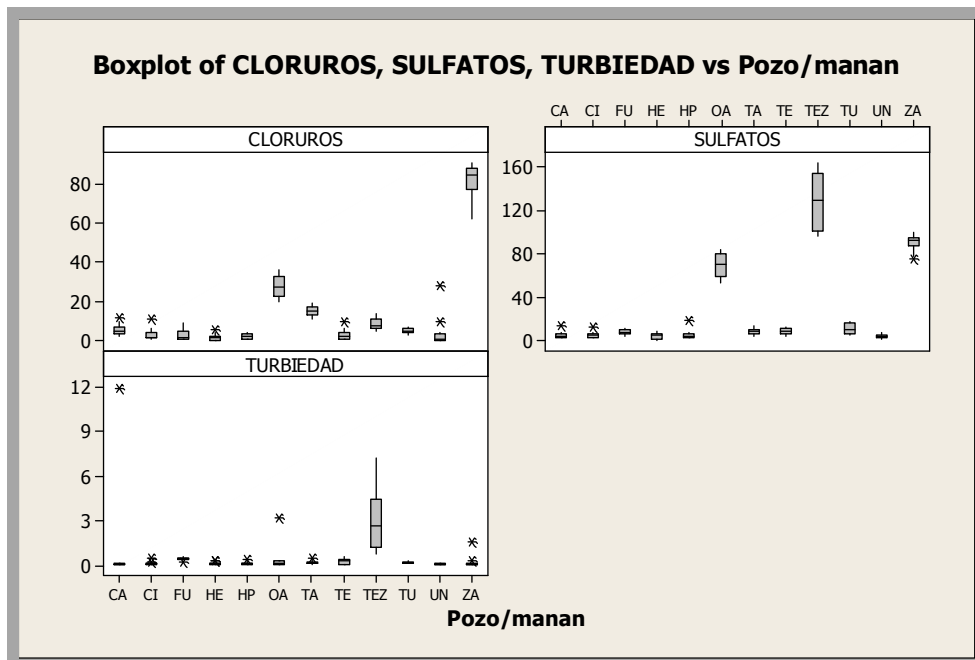


Figura 32. Variabilidad espacial en los pozos y manantiales en función a los cloruros, sulfatos y turbiedad.

Zapata durante los 12 meses de muestreo presentó las mayores concentraciones, con respecto a los demás sitios de muestreo, obteniendo para el mes de diciembre su mayor concentración; mientras que de enero a abril y agosto Universidad presentó concentraciones de cero, este mismo valor se presenta en marzo, octubre y noviembre para Herradura (Figuras 34 y 35).

Sin embargo las medias mensuales de los cloruros en forma general podemos decir que no presentaron diferencias significativas durante el año de muestreos (Tabla 20, Figura 33).

Tabla 20. Análisis descriptivo para los cloruros durante 12 meses de muestreo.

Cloruros						
Mes	Medias	Desv. estándar	Valor máximo	Valor mínimo	Coef. de variación	Mediana
Enero	14.14	23.48	84.20	0	166.06	4.85
Febrero	15.14	24.74	88.10	0	163.38	6.80
Marzo	12.61	22.32	76.40	0	176.99	2.96
Abril	10.63	20.28	70.50	0	190.77	1.93
Mayo	13.18	24.68	89.40	1.49	187.24	4.87
Junio	11.73	24.43	86.90	0.99	208.22	2.74
Julio	17.07	23.52	87.90	3.90	137.82	9.40
Agosto	12.62	22.14	79.90	0	175.48	6.20
Septiembre	13.29	24.48	85	1	184.17	3.25
Octubre	12.17	18.23	61.90	0	149.84	3.95
Noviembre	11.88	23.03	81.90	0	193.94	3.90
Diciembre	14.73	25.89	90.90	0.90	175.73	4.90

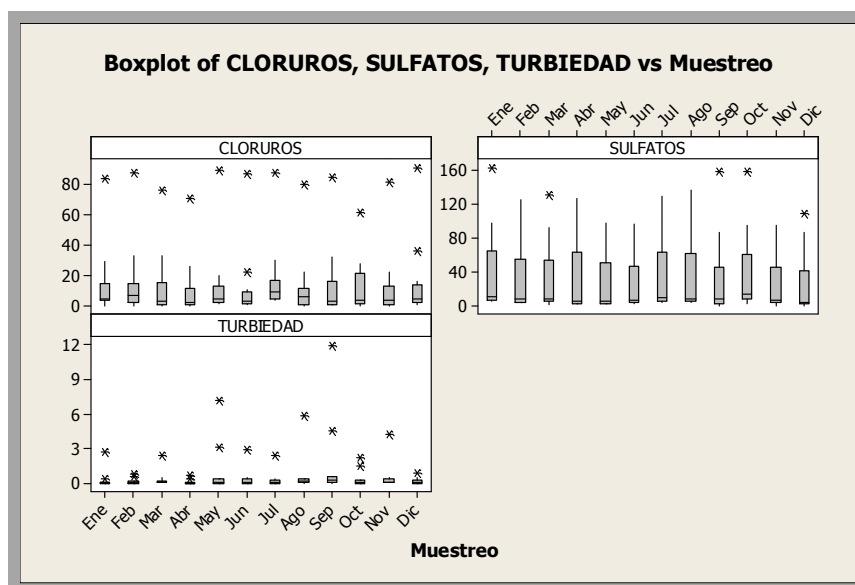


Figura 33. Variabilidad temporal en función a cloruros, sulfatos y turbiedad.

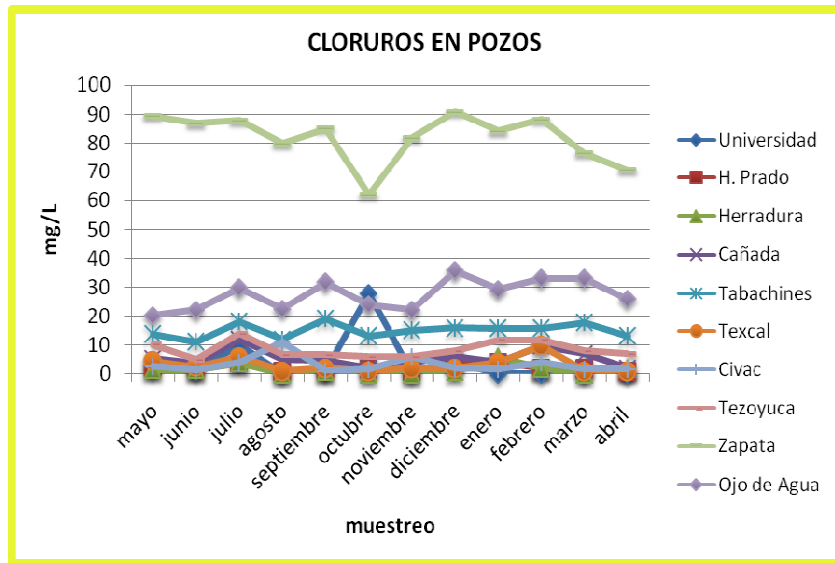


Figura 34. Comportamiento temporal de los cloruros en pozos.

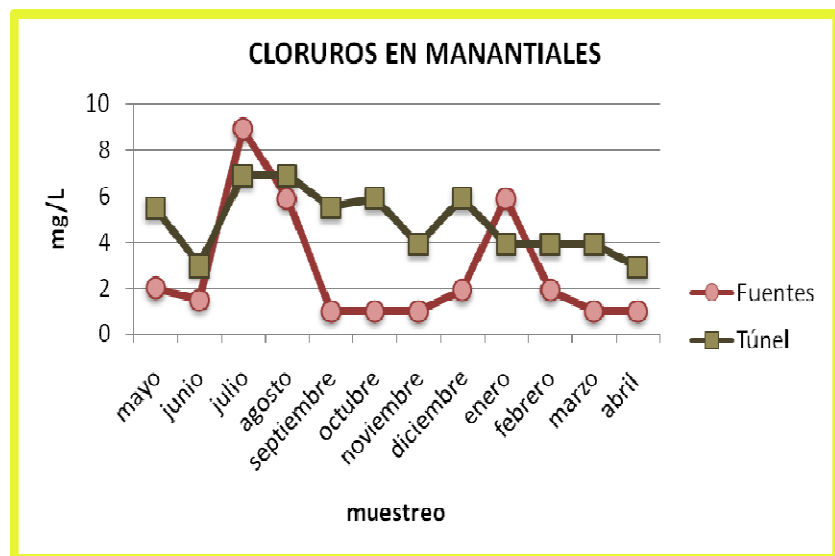


Figura 35. Comportamiento temporal de los cloruros en manantiales.

Comparando las medias de los cloruros con los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 tenemos que en este parámetro todos los puntos de muestreo se encuentran muy por debajo de los límites máximos permisibles (Tabla 21).

Tabla 21. Comparación de las medias de los cloruros con la NOM-127-SSA1-1994.

CLORUROS mg/L		
Pozo/manantial	Resultados (medias)	Límite máximo permisible NOM-127-SSA1-1994
Cañada	5.34	250
Civac	3.12	
Fuentes	2.74	
Herradura	1.53	
Hotel Prado	2.11	
Ojo de Agua	27.53	
Tabachines	14.94	
Texcal	3.02	
Tezoyuca	8.30	
Túnel	4.84	
Universidad	3.77	
Zapata	81.92	

7.1.10 Sulfatos

Los resultados promedio de sulfatos nos indican que; Universidad, Herradura, Cañada, Civac, H. Prado, Fuentes, Texcal, Tabachines y Túnel tienen los valores más bajos de entre 3.82 y 10.30 mg/L, mientras que, Zapata y Tezoyuca presentan medias altas de 89.66 y 128.20 mg/L (Tabla 22, Figura 32). El incremento de esta sal en estos pozos se vuelve a justificar por la acumulación de sales que va llevando el acuífero desde la parte alta hasta la baja como ya se indicó en sólidos disueltos.

El ión sulfato (SO_4), es la forma principal de azufre disponible; los sulfatos son reducidos por vegetales e incorporados a las proteínas puesto que este elemento forma parte de ciertos aminoácidos, además de que también es componente de algunas sustancias como lípidos, ligninas y porfirinas. Cuando estas sales son reducidas y posteriormente oxidadas mediante una acción bacteriana pueden ser transformadas en ácido sulfúrico, el cual es altamente corrosivo, también puede provenir tanto de fuentes orgánicas como del intercambio: agua dulce – agua salada del acuífero o de actividades humanas o industriales que generan descargas residuales con concentraciones de sulfatos y por la infiltración, llegan al acuífero (Ibarra, 2000; Borbolla *et al.*, 2003; Monroy, 2007).

Tabla 22. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a los sulfatos.

SULFATOS						
Pozo/manan.	medias	desv. estándar	valor máximo	valor mínimo	coef. de variación	mediana
Cañada	4.72	3.22	13.50	2	68.27	4.08
Civac	4.75	3.08	12.10	2	64.88	4.70
Fuentes	7.95	2.50	11.10	3.70	31.49	7.85
Herradura	4.06	2.93	8.80	2	72.24	4.45
Hotel Prado	5.36	4.54	18.70	2	84.71	4.30
Ojo de Agua	69.36	10.61	83	52.80	15.29	70.20
Tabachines	8.41	3.01	13.68	4.24	35.90	8.30
Texcal	8.39	2.94	12.79	3.90	35.05	8.35
Tezoyuca	128.20	24.39	163.70	96	19.03	129
Túnel	10.30	4.29	16.90	5.33	41.70	9.25
Universidad	3.82	1.94	7.30	1.20	50.72	3.56
Zapata	89.66	7.36	99	74.50	8.21	91.65

Tezoyuca presenta los valores más altos durante el periodo de muestreo, obteniendo en enero su valor máximo; Herradura obtuvo en septiembre, noviembre y diciembre los valores más bajos al igual que Universidad (Figuras 36 y 37).

Analizando las medias mensuales de los sulfatos se pudo observar que no hubo diferencias significativas a lo largo del año de muestreo (Tabla 23, Figura 33).

Tabla 23. Análisis descriptivo para los sulfatos durante 12 meses de muestreo.

Sulfatos						
Mes	Medias	Desv. estándar	Valor máximo	Valor mínimo	Coef. de variación	Mediana
Enero	35.2	51.6	163.7	6.10	146.41	10.3
Febrero	28.9	42.6	126.5	3.90	147.37	7.90
Marzo	29.3	43.6	132.2	1.20	148.51	8.45
Abril	29.1	45.3	127.9	2.60	155.47	5.88
Mayo	23.3	35.2	98.6	2	150.89	5.52
Junio	23.22	33.77	97.50	2	145.47	6.90
Julio	31.3	43.3	130.1	4.06	138.21	9
Agosto	31.6	45.1	136.9	4.60	142.51	8.15
Septiembre	29.1	49.1	160	0	168.79	7.90
Octubre	35.7	48.7	159.4	2	136.40	13.6
Noviembre	24.3	35.7	96	0	146.94	7.15
Diciembre	23.8	38	109.6	0	159.42	3.90

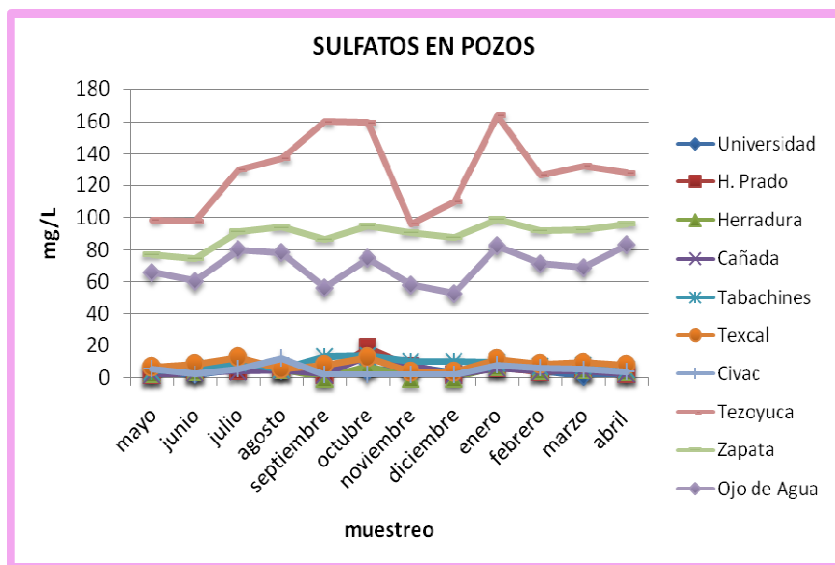


Figura 36. Comportamiento temporal de los sulfatos en pozos.

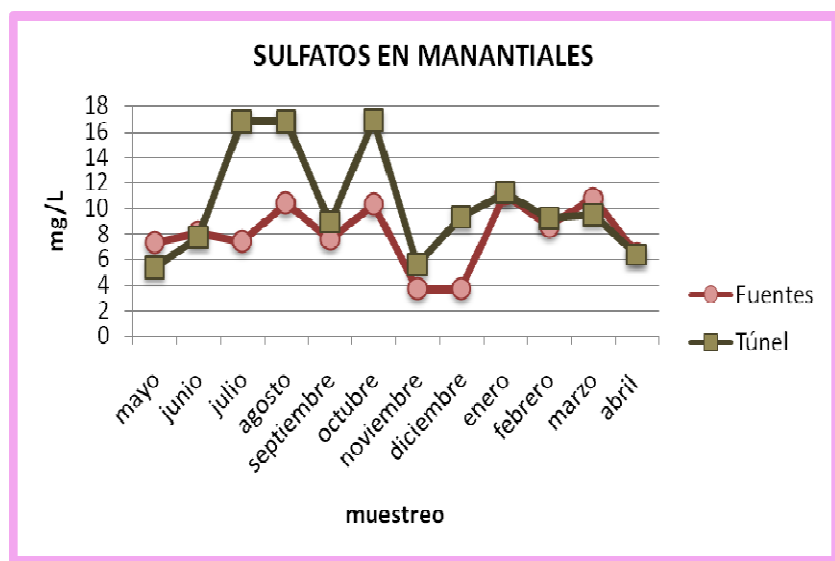


Figura 37. Comportamiento temporal de los sulfatos en manantiales.

De acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994, los promedios anteriores se encuentran por debajo del límite máximo permisible para agua potable (Tabla 24).

Tabla 24. Comparación de las medias de sulfatos con la NOM-127-SSA1-1994.

SULFATOS mg/L		
Pozo/manantial	Resultados (medias)	Límite máximo permisible NOM-127-SSA1-1994
Cañada	4.72	400
Civac	4.75	
Fuentes	7.95	
Herradura	4.06	
Hotel Prado	5.36	
Ojo de Agua	69.36	
Tabachines	8.41	
Texcal	8.39	
Tezoyuca	128.20	
Túnel	10.30	
Universidad	3.82	
Zapata	89.66	

7.1.11 Nitratos

Con relación a las medias obtenidas en los nitratos, podemos decir que estas no variaron significativamente en la mayoría de los pozos y manantiales muestreados, encontrándose los valores más altos en Zapata con 2.77 mg/L, seguido de Ojo de Agua con 2.54 mg/L. Los valores más bajos los presentaron Tezoyuca y Cañada con 0.13 y 0.21 mg/L respectivamente (Tabla 25 y Figura 38).

Un aspecto importante es la continua contaminación derivada de las descargas de aguas residuales domésticas y municipales sin tratamiento que va a dar en arroyos y ríos, que debido a la alta vulnerabilidad de los materiales (roca caliza) se infiltran y alteran la calidad del agua (CNA, 2002). Por lo tanto, Zapata puede ser el pozo más vulnerable a la contaminación por su ubicación en la parte baja, ya que las sales se irán incrementando durante su curso por el acuífero.

Tabla 25. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a los nitratos.

NITRATOS						
Pozo/manan.	medias	desv. estándar	valor máximo	valor mínimo	coef. de variación	mediana
Cañada	0.21	0.11	0.36	0	53.84	0.23
Civac	0.98	0.28	1.41	0.44	29.06	1.01
Fuentes	0.81	0.28	1.34	0.45	35.14	0.72
Herradura	0.71	0.25	1.09	0.14	36.35	0.74
Hotel Prado	0.44	0.23	0.87	0.05	54.24	0.38
Ojo de Agua	2.54	0.95	4.62	1.24	37.56	2.43
Tabachines	0.90	0.35	1.78	0.39	39.27	0.93
Texcal	0.87	0.24	1.28	0.45	28.08	0.89
Tezoyuca	0.13	0.24	0.82	0	177.81	0.03
Túnel	1.67	0.70	2.68	0.16	42.37	1.64
Universidad	0.73	0.33	1.50	0.10	46.02	0.67
Zapata	2.77	1	4.73	1.25	36.22	2.61

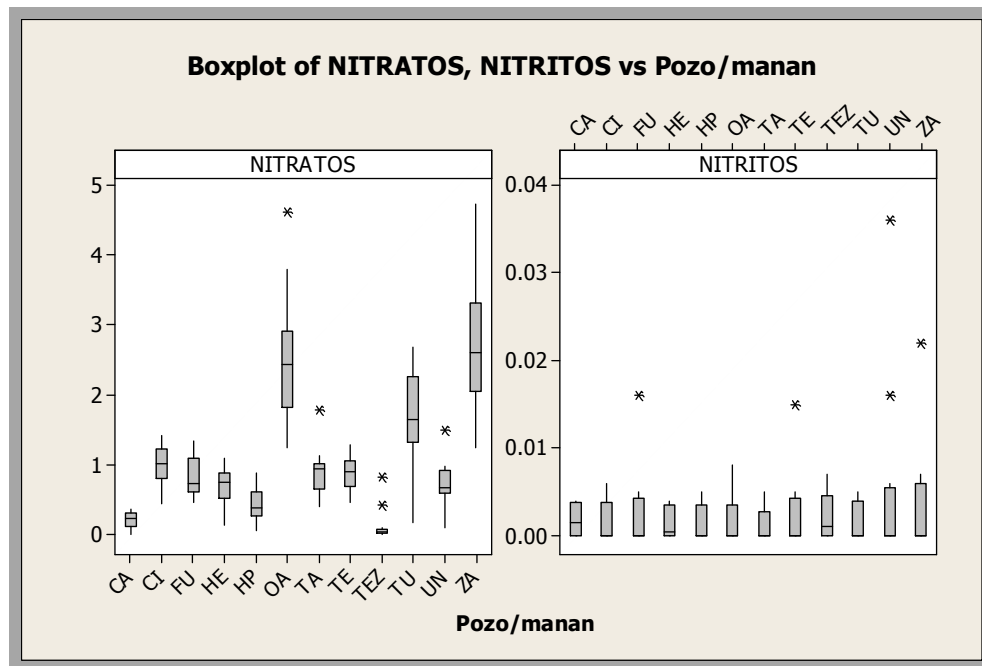


Figura 38. Variabilidad espacial de los pozos y manantiales en función de los nitratos y nitritos.

Zapata y Ojo de Agua presentaron los valores mas altos a lo largo de todos los muestreos, siendo octubre y abril los meses donde hubo mayor concentración, siendo octubre un mes de lluvias que quizás infiltró más este contaminante y en abril pudo haberse introducido este elemento como resultado de actividades agrícolas (Figura 40).

Con respecto a los manantiales fue notorio el incremento de los nitratos en los meses de lluvias en el manantial Fuentes que es un cuerpo de agua abierto mientras que Túnel como su nombre lo indica es un manantial que se encuentra dentro de un Túnel. Siendo de esta forma menos afectado por las lluvias de los primeros meses (Figura 41).

En todo el periodo muestreado las medias de las concentraciones de nitratos no presentaron variaciones significativas (Tabla 26, Figura 39).

Tabla 26. Análisis descriptivo de nitratos durante 12 meses de muestreo.

Nitratos						
Mes	Medias	Desv. estándar	Valor máximo	Valor mínimo	Coef. de variación	Mediana
Enero	1.02	0.82	3.09	0.05	80.38	0.86
Febrero	0.82	0.54	2.04	0.03	66.23	0.74
Marzo	1.22	0.97	3.38	0.27	79.83	0.91
Abril	1.61	1.48	4.73	0.31	91.76	1.07
Mayo	1.02	0.89	2.86	0.06	87.66	0.73
Junio	0.85	0.88	2.41	0	103.52	0.65
Julio	1.34	0.80	2.76	0.01	67.21	1.11
Agosto	1.51	0.81	2.68	0.03	70.40	0.99
Septiembre	0.94	0.91	2.97	0	96.77	0.54
Octubre	1.40	1.38	4.30	0.09	98.06	0.86
Noviembre	0.52	0.44	1.49	0.03	85.02	0.47
Diciembre	0.88	0.66	2.19	0.03	74.62	0.77

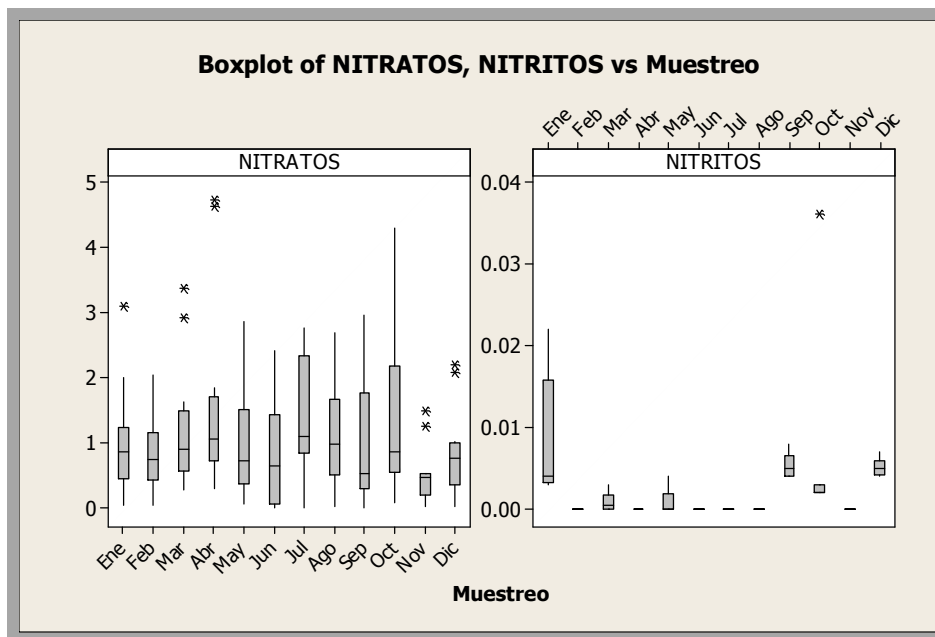


Figura 39. Variabilidad temporal en función a los nitratos y nitritos.

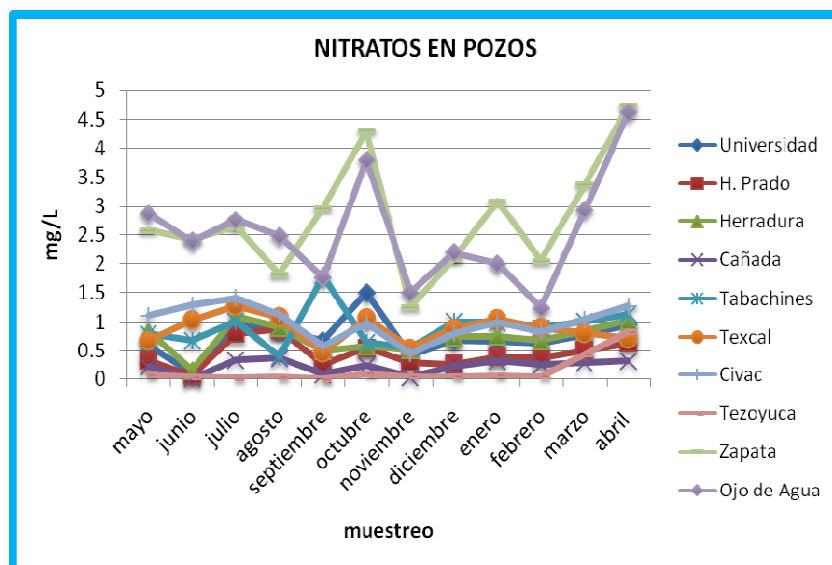


Figura 40. Comportamiento temporal de los nitratos en pozos.

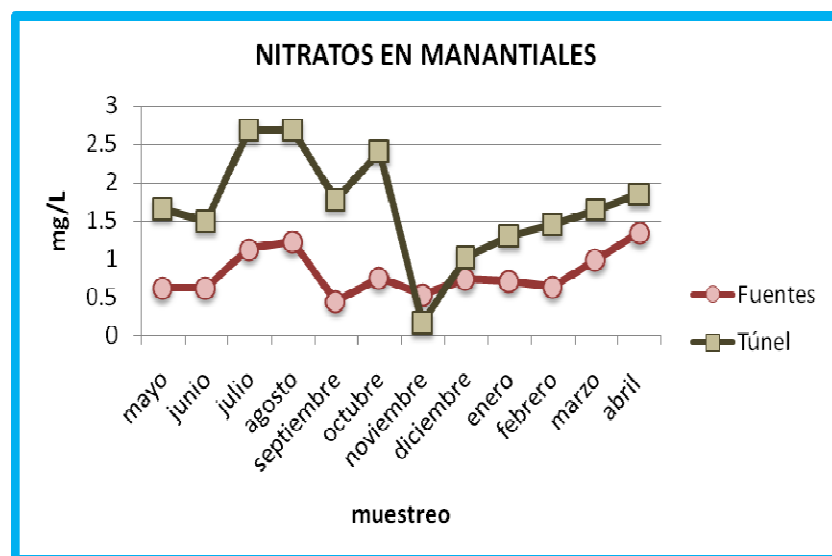


Figura 41. Comportamiento temporal de los nitratos en manantiales.

Tanto las medias como los valores mínimos y máximos de los nitratos indican concentraciones por debajo de los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 (Tabla 27).

Tabla 27. Comparación de las medias de nitratos con la NOM-127-SSA1-1994.

NITRATOS mg/L		
Pozo/manantial	Resultados (medias)	Límite máximo permisible NOM-127-SSA1-1994
Cañada	0.21	10
Civac	0.98	
Fuentes	0.81	
Herradura	0.71	
Hotel Prado	0.44	
Ojo de Agua	2.54	
Tabachines	0.90	
Texcal	0.87	
Tezoyuca	0.13	
Túnel	1.67	
Universidad	0.73	
Zapata	2.77	

7.1.12 Nitritos

La presencia de nitritos en el agua, es un indicio de que el agua no es potable debida a la toxicidad de este ión, por lo anterior se puede decir que en todos los pozos y manantiales el agua se encuentra libre de este ión, debido a que la mayoría de los valores estuvieron por debajo de los límites de detección del método (0.001 mg/L). Por consiguiente tampoco hubo gran variación significativa durante los meses de estudio (Figura 39).

Tanto pozos y los manantiales se encuentran dentro de los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 para agua potable (1 mg/L).

7.1.13 Turbiedad

La media de la turbiedad más alta la presentó Tezoyuca con 3.14 UNT seguido de Cañada con 1.07 UNT y las medias más bajas las presentaron Universidad y Herradura con 0.10 y 0.13 UNT (Tabla 28, Figura 32).

Tabla 28. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a la turbiedad.

TURBIEDAD						
Pozo/manan.	medias	desv. estándar	valor máximo	valor mínimo	coef. de variación	mediana
Cañada	1.07	3.44	1.2	0.05	320.06	0.08
Civac	0.15	0.11	0.47	0.08	74.12	0.11
Fuentes	0.47	0.11	0.63	0.20	24.24	0.50
Herradura	0.13	0.09	0.35	0.07	66.17	0.10
Hotel Prado	0.16	0.11	0.46	0.07	69.28	0.13
Ojo de Agua	0.40	0.87	3.18	0.06	215.17	0.11
Tabachines	0.22	0.13	0.51	0.09	60.69	0.18
Texcal	0.29	0.18	0.62	0.07	62.80	0.29
Tezoyuca	3.14	2.02	7.25	0.80	64.33	2.66
Túnel	0.18	0.05	0.30	0.11	28.01	0.18
Universidad	0.10	0.04	0.18	0.05	39.13	0.10
Zapata	0.23	0.42	1.57	0.06	183.35	0.09

El lugar de muestreo que presentó los valores más altos durante los doce meses de muestreo fue Tezoyuca, presentando en mayo el valor más alto; en septiembre se presenta Cañada (Figura 42).

En los manantiales, Fuentes presentó los valores más altos durante todo el año con respecto a Túnel, pero no se observó diferencias significativas durante los doce muestreos (Figura 43).

La turbidez del agua de Tezoyuca puede estar influenciada por la presencia de partículas suspendidas en el agua, resultado de los sólidos suspendidos que son principalmente de naturaleza orgánica, la mayoría son desechos y desperdicios generados por la actividad humana (Caballero, 2006).

Con respecto a las medias de la turbiedad durante los doce meses no se apreciaron diferencias significativas (Tabla 29, Figura 33).

Tabla 29. Análisis descriptivo de la turbiedad durante 12 meses de muestreo.

Turbiedad						
Mes	Medias	Desv. estándar	Valor máximo	Valor mínimo	Coef. de variación	Mediana
Enero	0.35	0.77	2.80	0	216.52	0.1
Febrero	0.23	0.25	0.90	0.06	111.74	0.13
Marzo	0.39	0.68	2.52	0.11	174.37	0.15
Abril	0.18	0.21	0.80	0.05	118.72	0.08
Mayo	1.01	2.14	7.25	0.06	211.53	0.12
Junio	0.43	0.83	3.02	0.06	192.82	0.13
Julio	0.36	0.67	2.49	0.05	184.03	0.16
Agosto	0.73	1.63	5.90	0.05	221.73	0.28
Septiembre	1.62	3.50	12	0.08	215.66	0.31
Octubre	0.44	0.71	2.27	0.07	159.84	0.11
Noviembre	0.57	1.17	4.29	0.11	204.40	0.17
Diciembre	0.24	0.25	0.92	0.07	104.26	0.15

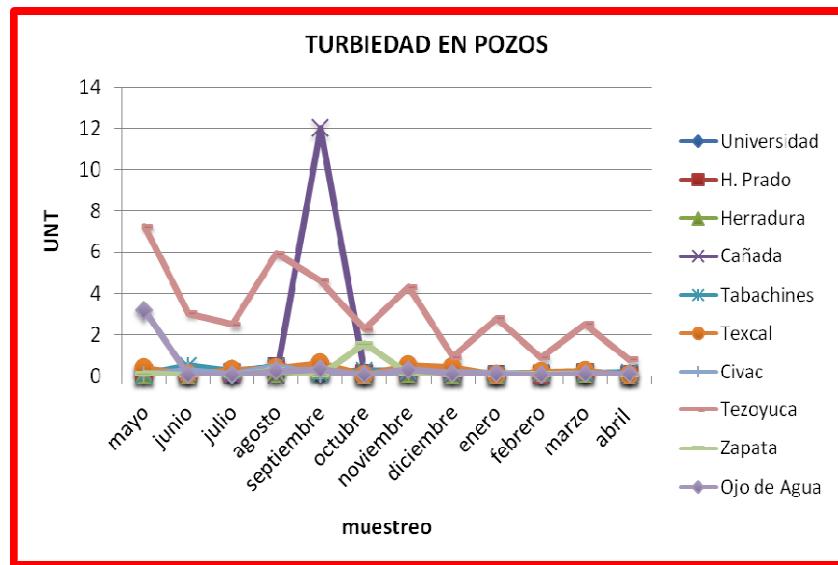


Figura 42. Comportamiento temporal de la turbiedad en pozos.

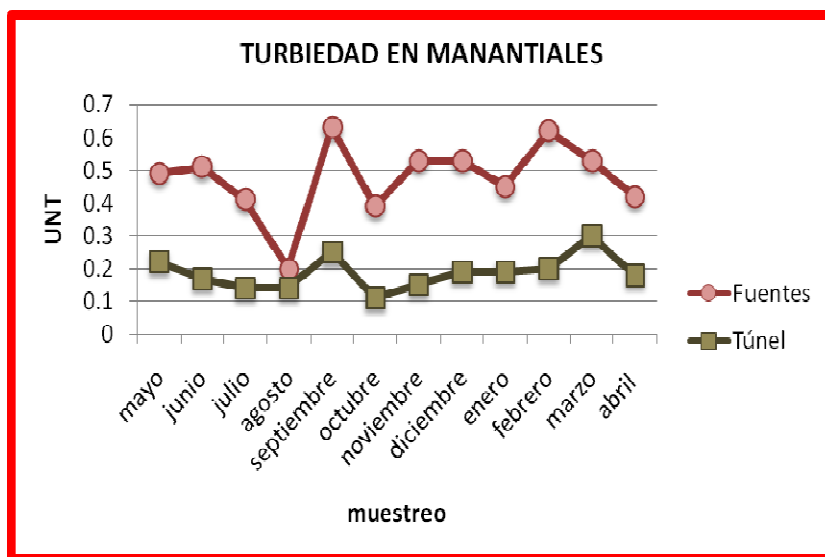


Figura 43. Comportamiento temporal de la turbiedad en manantiales.

El límite máximo permisible en la NOM-127-SSA1-1994 es de 5 UNT, y los pozos que sobrepasan este límite es Tezoyuca y Cañada al menos en un muestreo, sin embargo; los resultados de las medias, nos dice que todos los puntos de muestreo esta dentro de la norma (Tabla 30).

Tabla 30. Comparación de las medias de turbiedad con la NOM-127-SSA1-1994.

TURBIEDAD UNT		
Pozo/manantial	Resultados (medias)	Límite máximo permisible NOM-127-SSA1-1994
Universidad	0.10	5
H. Prado	0.16	
Herradura	0.13	
Cañada	1.07	
Tabachines	0.22	
Texcal	0.29	
Civac	0.15	
Tezoyuca	3.14	
Zapata	0.23	
Ojo de Agua	0.40	
Fuentes	0.47	
Túnel	0.18	

7.1.14 Temperatura y Oxígeno disuelto

Los valores más altos de temperatura los presentaron Ojo de agua y Zapata mientras que en los manantiales hubo mucha variabilidad entre ellos (Tabla 31). Los valores mas altos para el OD los presentaron el manantial Fuentes y el pozo Universidad, se puede entender que el manantial tuviera valores altos ya que esta en contacto con la atmósfera y de esta forma existe una oxigenación, sin embargo, en los pozos no resulta muy confiable que haya valores altos ya que el agua es subterránea y por lo mismo no se esperan tales valores. Una explicación para los valores altos determinados en el sitio de muestreo es la dificultad de la toma de la muestra ya que cuando se toma la muestra el agua sale con mucha presión debido a la bomba y por consiguiente se oxigena en ese momento (Tabla 32, Figura 14)

Tabla 31. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a la temperatura.

TEMPERATURA						
Pozo/manan.	medias	desv. estándar	valor máximo	valor mínimo	coef. de variación	mediana
Cañada	18.83	0.83	20	18	4.43	19
Civac	18.58	0.99	20	17	5.36	19
Fuentes	17.08	0.90	18	15	5.27	17
Herradura	18.58	0.90	20	17	4.84	19
Hotel Prado	18.62	0.77	20	18	4.15	18
Ojo de Agua	21.95	0.33	22	21	1.52	22
Tabachines	21.25	1.21	24	19	5.72	21
Texcal	20.08	1.44	24	19	7.19	20
Tezoyuca	20.08	0.79	21	19	3.95	20
Túnel	17.16	0.71	18	16	4.18	17
Universidad	18.16	1.03	20	17	5.67	18
Zapata	23.41	0.51	24	23	2.20	23

La temperatura presentó los valores más bajos en los meses de mayo, junio julio, agosto y diciembre con 18°C, lo cual en general corresponde con los valores más altos de OD (Figura 14). Los meses de octubre, febrero, marzo y abril presentaron 19°C; mientras que en septiembre, noviembre y enero se tuvieron las temperaturas más altas (20°C), correspondiendo con los valores más bajos de OD. Esto coincide con lo que se reporta en la literatura que al aumentar la temperatura, el oxígeno disminuye ya que éste es menos soluble (Robles *et al.*, 2004) (Figuras 44, 45, 46 y 47).

Tabla 32. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación al OD.

OXÍGENO DISUELTO						
Pozo/manan.	medias	desv. estándar	valor máximo	valor mínimo	coef. de variación	mediana
Cañada	4.11	1.04	5.40	2.45	25.47	4.40
Civac	4.75	1.32	6.20	2.67	27.84	5.40
Fuentes	5.01	1.23	6.28	2.57	24.64	5.51
Herradura	4.68	1.38	6	2.25	29.66	5.40
Hotel Prado	4.55	1.33	6.60	2.25	29.30	4.60
Ojo de Agua	2.37	1.32	5.40	0.31	55.95	2.14
Tabachines	4.42	0.81	5.40	2.66	18.46	4.65
Texcal	4.12	1.44	6	0.82	34.99	4.61
Tezoyuca	1.93	1.02	4.23	0.41	53.20	1.86
Túnel	4.67	1.57	6.80	2.45	33.81	4.60
Universidad	5.84	1.62	8.20	2.47	27.72	5.65
Zapata	1.73	0.82	3	0.41	47.50	2.10

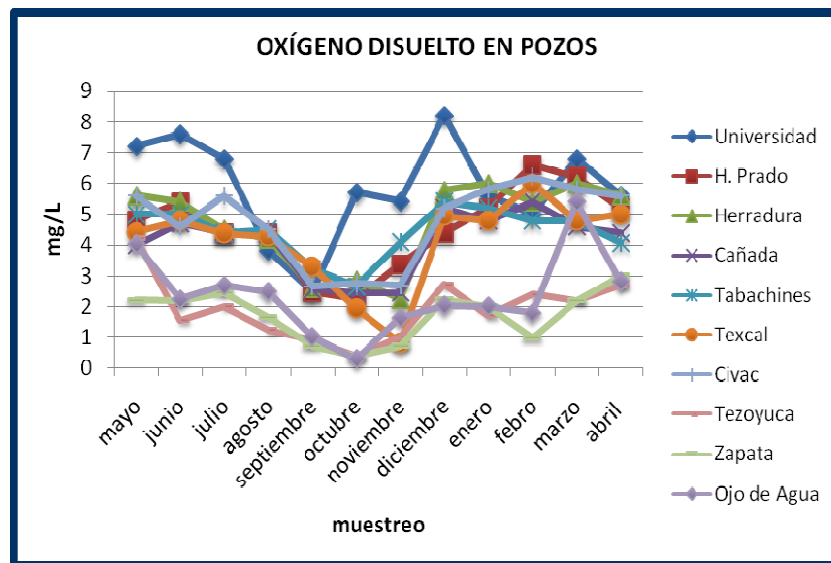


Figura 44. Comportamiento temporal del oxígeno disuelto en los pozos.

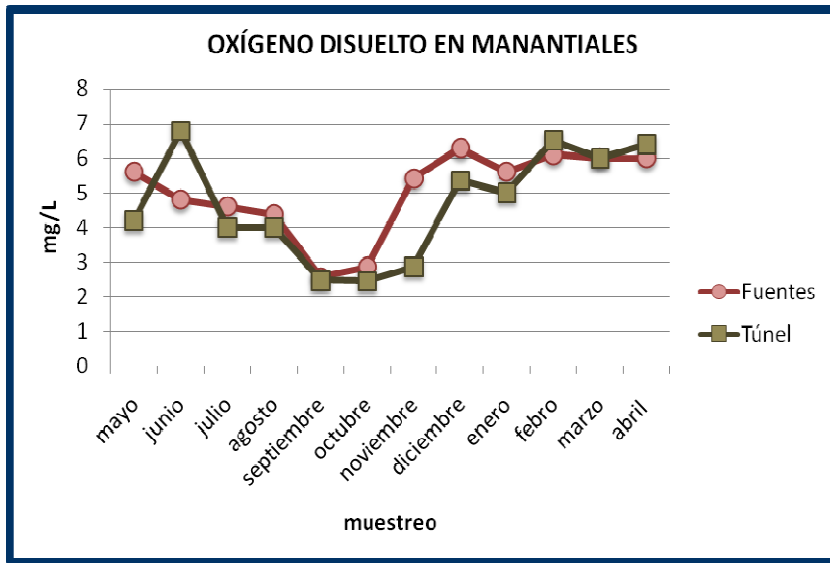


Figura 45. Comportamiento temporal del oxígeno disuelto en los manantiales.

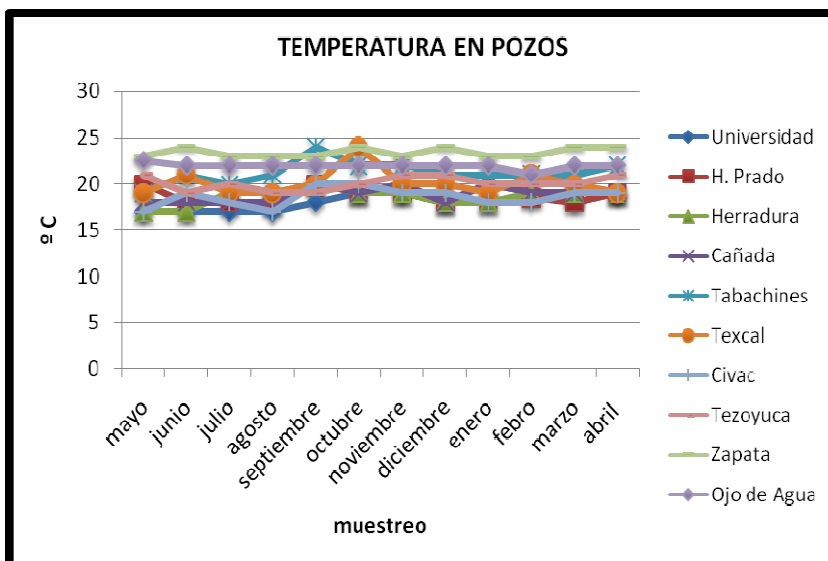


Figura 46. Comportamiento temporal de la temperatura en los pozos.

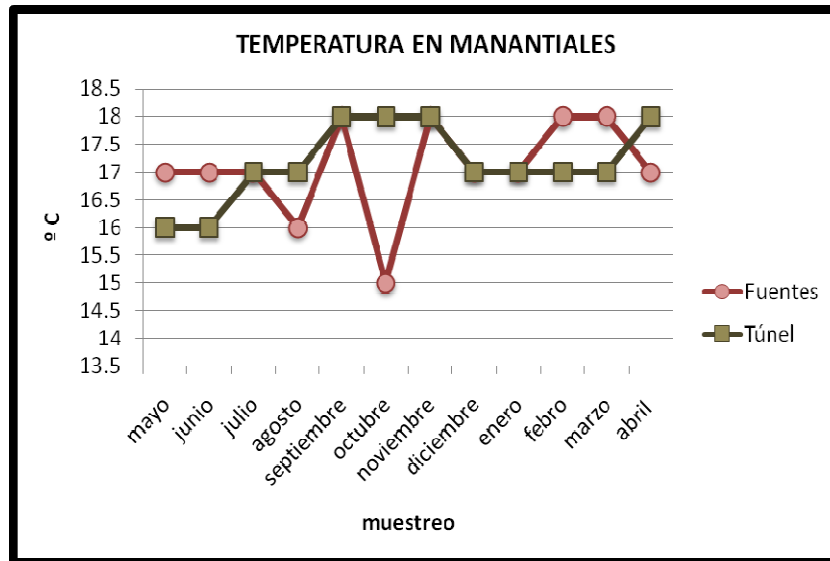


Figura 47. Comportamiento temporal de la temperatura en los manantiales.

7.1.15 Coliformes totales

Para manejar los resultados bacteriológicos se transformaron los valores con la siguiente ecuación:

$$\sqrt{0.5 + \text{valor}}$$

Con respecto a los coliformes totales, los promedios indican que los dos manantiales: Fuentes y Túnel fueron los que obtuvieron los valores más altos con 51.5 UFC/100 mL y 18.35 UFC/100 mL, al igual que el pozo Ojo de Agua con 10.90 UFC/100 mL (Tabla 33, Figura 48).

Tabla 33. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a los coliformes totales.

COLIFORMES TOTALES						
Pozo/manan.	medias	desv. estándar	valor máximo	valor mínimo	coef. de variación	mediana
Cañada	1.66	2.67	10	0.71	160.63	0.71
Civac	1.49	0.74	2.92	0.71	50	1.40
Fuentes	51.5	38.5	141.4	16.5	74.78	36.1
Herradura	1.20	1.40	5.61	0.71	116.48	0.71
Hotel Prado	0.89	0.36	1.87	0.71	40.99	0.71
Ojo de Agua	10.90	11.60	31.63	0.71	106.45	6.08
Tabachines	2.39	3.80	14.16	0.71	159.14	0.96
Texcal	1.14	0.81	2.92	0.71	70.73	0.71
Tezoyuca	3.64	3.59	8.97	0.71	98.69	1.89
Túnel	18.35	8.22	40	11.42	44.79	17.33
Universidad	1.55	1.56	6	0.71	100.66	0.71
Zapata	3.46	2.76	10.12	0.71	79.70	2.83

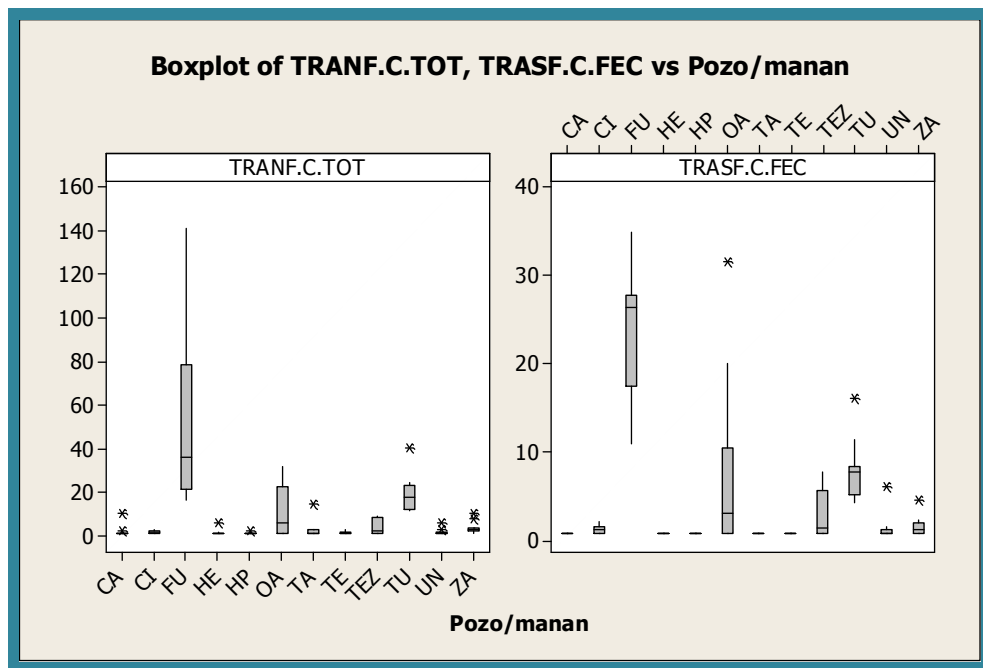


Figura 48. Variabilidad espacial de los pozos y manantiales en función de coliformes totales y coliformes fecales.

El pozo menos contaminado, presentando contaminación por coliformes totales en tres muestreos con solo 3, 1 y 1 UFC/100 mL; fue H. Prado (Figura 50).

Fuentes presentó los valores mas altos en los meses de abril y julio; mientras que Túnel no presentó variación significativa durante los doce meses muestreados (Figura 51).

Las medias de coliformes totales en general no mostraron diferencias significativas durante los doce meses muestreados (Tabla 34, Figura 49).

Tabla 34. Análisis descriptivo de coliformes totales durante 12 meses de muestreo.

Coliformes Totales						
Mes	Medias	Desv. estándar	Valor máximo	Valor mínimo	Coef. de variación	Mediana
Enero	6.60	9.34	24.91	0.71	141.43	0.71
Febrero	9.88	22.12	78.74	0.71	223.88	1.42
Marzo	9.56	22.35	78.74	0.71	233.93	0.71
Abril	16.1	41	141.4	0.71	254.75	0.96
Mayo	5.71	6.13	17.33	0.71	107.49	2.92
Junio	9.28	13.73	43.59	0.71	147.94	2.16
Julio	11.53	26.46	92.74	0.71	229.51	1.58
Agosto	4.89	7.53	24.51	0.71	153.92	2.11
Septiembre	10.18	12.39	36.06	0.71	121.77	4.50
Octubre	5.96	10.79	36.06	0.71	180.97	0.96
Noviembre	4.88	9.20	31.63	0.71	188.47	0.71
Diciembre	3.61	6.29	20.01	0.71	174.47	0.71

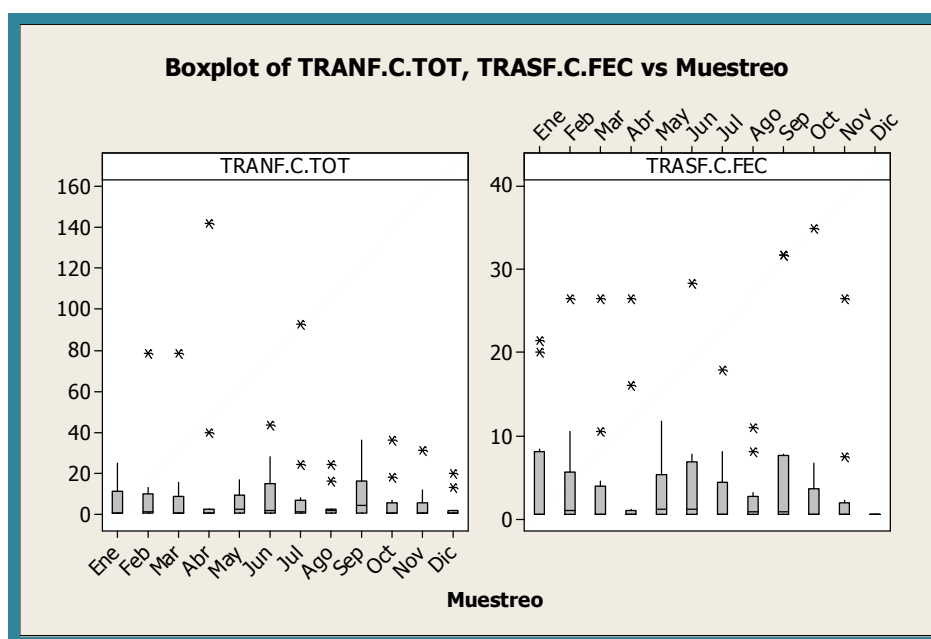


Figura 49. Variabilidad temporal en función de coliformes totales y coliformes fecales.

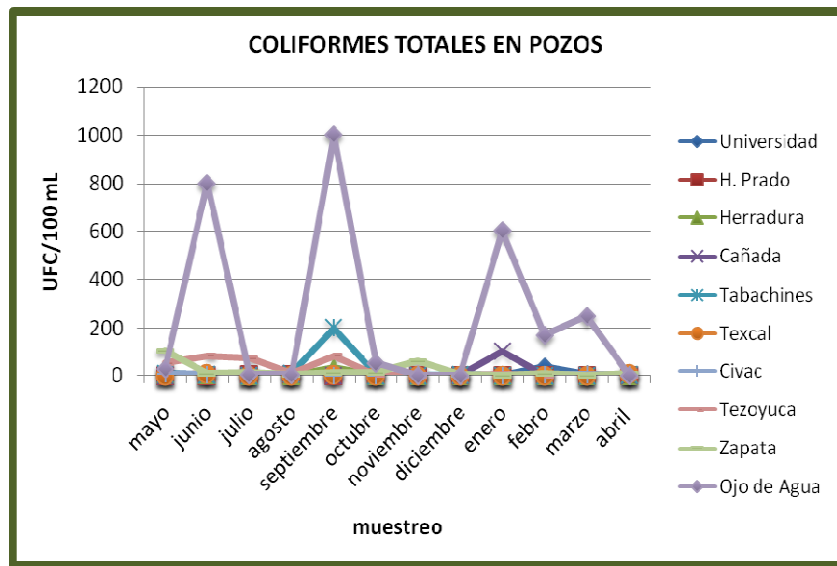


Figura 50. Comportamiento temporal de los coliformes totales en pozos.

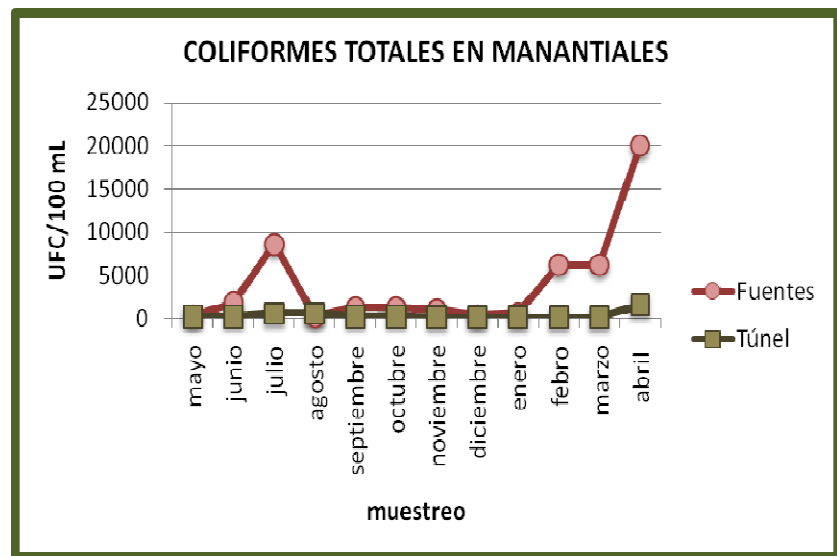


Figura 51. Comportamiento temporal de los coliformes totales en manantiales.

Los valores de los muestreos nos indican que todos los pozos sobrepasan el límite máximo permisible, teniendo al manantial Fuentes como uno de los principales sitios de contaminación con estos microorganismos (Tabla 35).

Tabla 35. Comparación de las medias de coliformes totales con la NOM-127-SSA1-1994.

COLIFORMES TOTALES UFC/100 mL		
Pozo/manantial	Resultados (medias geométricas)	Límite máximo permisible NOM-127-SSA1-1994
Cañada	1.66	ausencia
Civac	1.49	
Fuentes	51.5	
Herradura	1.20	
Hotel Prado	0.89	
Ojo de Agua	10.90	
Tabachines	2.39	
Texcal	1.14	
Tezoyuca	3.64	
Túnel	18.35	
Universidad	1.55	
Zapata	3.46	

7.1.16 Coliformes Fecales

Al igual que en los coliformes totales en los manantiales Fuentes y Túnel también predominó la presencia de coliformes fecales, teniendo promedios de 23.36 UFC/100 mL y 7.96 UFC/100 mL respectivamente. Los lugares en donde no se detectó su presencia fueron Herradura, H. Prado y Texcal (Tabla 36, Figura 48).

De los pozos el que presentó los valores más altos fue Ojo de Agua resultando los meses de septiembre y enero donde se obtuvieron las concentraciones más altas (Figura 52).

Los meses de septiembre y octubre fueron los que presentaron los valores más altos en el manantial Fuentes (Figura 53). Probablemente porque son meses de lluvias y éstas arrastran contaminantes al manantial, específicamente en este lugar se encuentra a unos metros un canal abierto que lleva aguas residuales.

Para el manantial Túnel el mes más alto de contaminación fue abril, siendo quizás porque en este mes los volúmenes altos de agua que lleva el acuífero ya bajaron y entonces se concentran más las densidades de coliformes fecales (Figura 53).

En las medias de los coliformes fecales tampoco se observaron diferencias significativas durante los doce muestreos realizados (Tabla 37, Figura 49).

Tabla 36. Análisis descriptivo para cada pozo y manantial en relación a los coliformes fecales.

COLIFORMES FECALES						
Pozo/manan.	medias	desv. estándar	valor máximo	valor mínimo	coef. de variación	mediana
Cañada	1.24	1.84	0.71	0.71	148.59	0.71
Civac	1.18	0.52	2.12	0.71	44.25	1.22
Fuentes	23.36	7.51	34.94	10.98	32.17	26.47
Herradura	0.71	0	0.71	0.71	0	0.71
Hotel Prado	0.71	0	0.71	0.71	0	0.71
Ojo de Agua	7.55	9.65	31.63	0.71	127.82	3.06
Tabachines	0.82	0.40	2.12	0.71	49.19	0.71
Texcal	0.71	0	0.71	0.71	0	0.71
Tezoyuca	2.97	2.79	7.78	0.71	93.73	1.41
Túnel	7.96	3.24	16.14	4.30	40.77	7.78
Universidad	1.31	1.51	6.04	0.71	115.72	0.71
Zapata	1.56	1.11	4.64	0.71	71.25	1.22

Tabla 37. Análisis descriptivo de coliformes fecales durante 12 meses de muestreo.

Coliformes Fecales						
Mes	Medias	Desv. estándar	Valor máximo	Valor mínimo	Coef. de variación	Mediana
Enero	5.34	7.68	21.46	0.71	143.75	0.71
Febrero	4.64	7.52	23.47	0.71	162.15	1.15
Marzo	4.19	7.58	26.47	0.71	180.93	0.71
Abril	4.19	8.30	26.47	0.71	198.23	0.71
Mayo	3.43	4.17	11.85	0.71	121.60	1.22
Junio	4.69	7.90	28.29	0.71	168.45	1.22
Julio	3.23	5.20	17.90	0.71	160.99	0.71
Agosto	2.54	3.39	10.98	0.71	133.31	0.96
Septiembre	7.15	11.71	31.63	0.71	163.87	0.96
Octubre	4.43	9.81	34.94	0.71	221.21	0.71
Noviembre	3.60	7.46	26.47	0.71	207.08	0.71
Diciembre	2.68	5.04	17.33	0.71	187.78	0.71

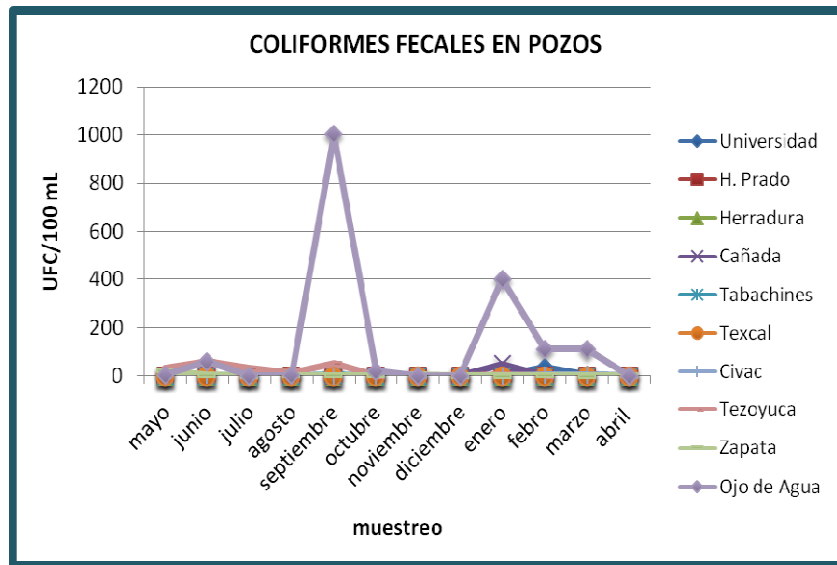


Figura 52. Comportamiento temporal de los coliformes fecales en pozos.

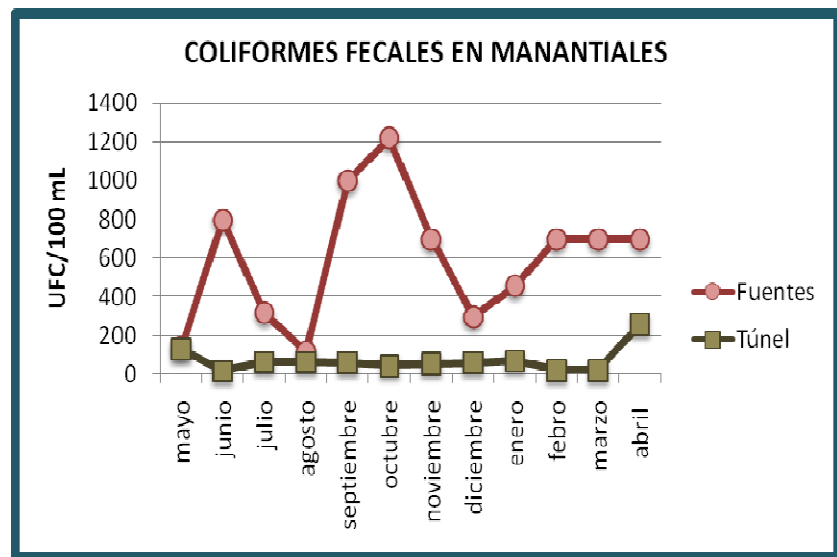


Figura 53. Comportamiento temporal de los coliformes fecales en manantiales.

Las medias geométricas nos indican que Herradura, H. Prado y Texcal fueron los únicos pozos que cumplen con la NOM-127-SSA1-1994, presentado ausencia de Coliformes Fecales (Tabla 38).

Tabla 38. Comparación de las medias de cada sitio de muestreo con la NOM-127-SSA1-1994.

COLIFORMES FECALES UFC/100MI		
Pozo/manantial	Resultados (medias geométricas)	Límite máximo permisible NOM-127-SSA1-1994
Cañada	1.24	ausencia
Civac	1.18	
Fuentes	23.36	
Herradura	0.71	
Hotel Prado	0.71	
Ojo de Agua	7.55	
Tabachines	0.82	
Texcal	0.71	
Tezoyuca	2.97	
Túnel	7.96	
Universidad	1.31	
Zapata	1.56	

Los altos valores de coliformes totales y por lo tanto de fecales en ambos manantiales evidencian que ambos cuerpos de agua están afectados en su calidad, por lo cual se puede suponer que reciben vertimientos de aguas residuales por el progresivo crecimiento urbano que esta ganando participación en el uso del agua; en el caso del manantial Fuentes la cercanía del canal que lleva aguas residuales es un foco de contaminación para dicho manantial. En el caso del manantial Túnel, su ubicación esta en donde hay una barranca en el cual la gente arroja sus aguas residuales, esto se convierte en el foco principal de contaminación de este manantial. En el caso del pozo Ojo de Agua, se encuentra en una zona (Municipio de Temixco) donde también la falta de drenaje en algunas zonas y las actividades agrícolas que se desarrollan en este municipio permiten la infiltración de contaminantes afectando a este pozo. (CNA, 2002; Monroy, 2007).

7.2 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)

De acuerdo a los resultados del análisis de componentes principales se obtuvieron 5 componentes (Tabla 39), los cuales en conjunto explicaron el 84% de la variación total.

El primer componente explicó el 52.1% del total de la variancia, y está representado por los sólidos totales, sólidos disueltos, alcalinidad total, dureza total, dureza de calcio, dureza de magnesio, sulfatos, oxígeno disuelto y temperatura.

Los parámetros que comprenden este componente tienen cierta relación entre ellos así tenemos por ejemplo que en los sólidos totales van implícitos los sólidos disueltos, es decir, de los sólidos totales obtenidos, una parte corresponde a los sólidos disueltos tales como calcio, sodio y compuestos orgánicos solubles; las concentraciones de estos sólidos disueltos se debe a la presencia de minerales o a productos de la descomposición de materia orgánica; el sulfato al igual que los sólidos disueltos procede de la descomposición de sustancias orgánicas (Rubio, 2007).

La temperatura está estrechamente relacionada con el OD, por lo tanto al aumentar la temperatura disminuye el OD.

La dureza representa la concentración de cationes metálicos multivalentes presente en el agua (la más común es la de calcio y magnesio); la dureza total incluye la dureza de calcio más la de magnesio. También se clasifica en dureza carbonatada y no carbonatada; la alcalinidad total es debida principalmente en este caso a aniones del tipo carbonatos (CO_2^{-3}) y bicarbonatos (HCO_3^-) de los cuales sus cationes como Ca y Mg son los causantes de la dureza (Maya y Jiménez, 1999).

El segundo componente que representa a los coliformes fecales y totales explica el 11.1% del total de la variabilidad, estas bacterias son indicadoras de contaminación bacteriológica y por lo tanto, son un índice de deficiencias sanitarias en las fuentes de agua. Los coliformes totales incluyen a los coliformes fecales.

El componente 3 explicó el 9.4% de la variación total, este componente quedó integrado por los nitratos, la turbiedad y los cloruros. La presencia de cloruros en el agua puede deberse a lixiviados de depósitos sedimentarios marinos o por residuos industriales o doméstico (Monroy, 2007), la entrada de nitratos en las aguas subterráneas se debe a las mismas condiciones; la turbidez queda relacionada con los dos parámetros anteriores al estar influenciada por la presencia de partículas suspendidas en el agua, estas reducen la penetración de luz en el cuerpo de agua.

El pH y los sólidos suspendidos conforman el componente 4, explicando un 7.1% de la variabilidad total; el pH juega un papel importante en muchos procesos químicos y biológicos. Los sólidos suspendidos están constituidos por partículas inorgánicas (arcilla, arena, suelos) y orgánicas (bacterias, células algales, etc.), que al estar presentes y descomponerse pueden cambiar el pH del cuerpo de agua.

Por último el componente 5 quedó integrado solo por los nitritos explicando el 5.1% de la variación total.

Tabla 39. Resultados del Análisis de Componentes Principales, indica la interrelación existente entre las variables (parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos) que conforman los 5 componentes.

Componente	Valor característico	Varianza explicada (%)	Porcentaje de varianza acumulada	Variables que constituyen el componente
1	8.86	52.1	52.1	sólidos totales, sólidos disueltos, alcalinidad total, dureza total, dureza de calcio, dureza de magnesio, OD, sulfatos y temperatura
2	1.88	11.1	63.4	coliformes totales y fecales.
3	1.60	9.4	72.7	nitratos, turbiedad y cloruros
4	1.20	7.1	79.8	pH y sólidos suspendidos
5	0.86	5.1	84.8	nitritos

7.3 ANÁLISIS DISCRIMINANTE

De los datos obtenidos mediante el análisis discriminante (Tabla 40) se formaron 5 funciones: la primera comprendida por sólidos totales, sólidos disueltos, alcalinidad total, dureza total, dureza de calcio, dureza de magnesio, OD, sulfatos y temperatura; la segunda por coliformes totales y fecales; la tercera por nitratos, turbiedad y cloruros; la cuarta por pH y sólidos suspendidos y la quinta por nitritos. Siendo las 5 funciones estadísticamente significativas ($p < 0.05$) con niveles de significancia de 0.000, explicando el 99.76 % de la variación total de los datos. Sin embargo con solo las tres primeras funciones se explican el 98.28 % de la variación total.

Para comparar las 12 estaciones de muestreo, se calcularon a partir de la matriz de datos del análisis discriminante las distancias de Mahalanobis con su respectivo nivel de significancia, las cuales se muestran en la Tabla 41.

Los pozos que estuvieron mas cercanos en sus distancias y que por consiguiente representan ciertas similitudes en las concentraciones de sus parámetros analizados fueron Herradura, Hotel Prado, Universidad y Civac y un poco más separados los manantiales Túnel y Fuentes, Tabachines y Cañada.

Mientras que los que marcaron grandes diferencias con respecto a los demás fueron Zapata y Tezoyuca separados entre ellos todavía por una gran distancia (1 077.64).

El pozo Ojo de Agua se encontró también separado en una distancia intermedia en general con respecto a los otros.

En general podemos decir que las similitudes de estas zonas se deben en gran parte a su localización; ya que estos pozos y manantiales se encuentran distribuidos básicamente en la zona norte y media del Valle de Cuernavaca. Zonas donde las concentraciones de sales disueltas no son muy altas; mientras que en la zona sur dichas concentraciones se elevan considerablemente marcando una apreciable diferencia. Los pozos que se encuentran más distantes (Zapata, Tezoyuca y Ojo de Agua) se encuentran precisamente en esa zona sur que es donde viene finalizando el Acuífero Cuernavaca y dando inicio al acuífero Zacatepec.

Agrupando las distancias de acuerdo a las 3 funciones constituidas en el análisis discriminante y que forman el 98.28 % de la variación total, se obtuvieron los diagramas de dispersión (Figuras 54 y 55).

Así tenemos que de acuerdo a la función 1 (sólidos totales, sólidos disueltos, alcalinidad total, dureza total, dureza de calcio, dureza de magnesio, OD, dulfatos y temperatura) y la función 2 (coliformes totales y fecales) los pozos se agruparon de la siguiente forma: se formaron 3 grupos totalmente separados y 2 relativamente cercanos. Los separados fueron un grupo con solo el pozo Zapata (el más lejano), el grupo 2 con el pozo Tezoyuca, el grupo 3 intermedio y constituido solo por el pozo Ojo de Agua, y los dos relativamente cercanos uno formado por el pozo Tabachines y el pozo Texcal y el resto de los pozos y manantiales agrupados en un grupo.

De acuerdo a la función 1 (sólidos totales, sólidos disueltos, alcalinidad total, dureza total, dureza de calcio, dureza de magnesio, OD, sulfatos y temperatura) y la función 2 (coliformes totales y fecales) con relación a la función 3 (nitratos, turbiedad y cloruros), los pozos se agruparon de la siguiente forma: se formaron 3 grupos totalmente separados y 4 relativamente cercanos. Los separados fueron un grupo con solo el pozo Zapata (el mas lejano), el grupo 2 con el pozo Tezoyuca, el grupo 3 intermedio y constituido solo por el pozo Ojo de Agua, y de los 4 relativamente cercanos hubo un grupo solo para Tabachines, otro para Texcal y se forma otro con solo Cañada y el último que agrupa a los pozos restantes.

En general podemos decir que el comportamiento de agrupación de los pozos y manantiales en los diagramas de dispersión, de acuerdo a las 3 funciones que explican el 98.28 % de la variación total, confirman lo observado en las distancias de Mahalanobis de la diferencia marcada en los parámetros que conforman las tres funciones y que separan totalmente a los pozos Zapata, Tezoyuca y Ojo de Agua del resto de los otros pozos y de los manantiales.

Tabla 40. Resultados del análisis discriminante.

Función	Valor característico	X²	Nivel de significancia observada (P)	Porcentaje de varianza acumulada	variables
1	21.25	1126.22	0.000	92.63	sólidos totales, sólidos disueltos, alcalinidad total, dureza total, dureza de calcio, dureza de magnesio, OD, sulfatos y temperatura
2	5.40	730.64	0.000	97.13	coliformes totales y fecales.
3	4.82	493.82	0.000	98.28	nitratos, turbiedad y cloruros
4	2.17	269.11	0.000	99.30	pH y sólidos suspendidos
5	0.48	121.94	0.000	99.76	nitritos

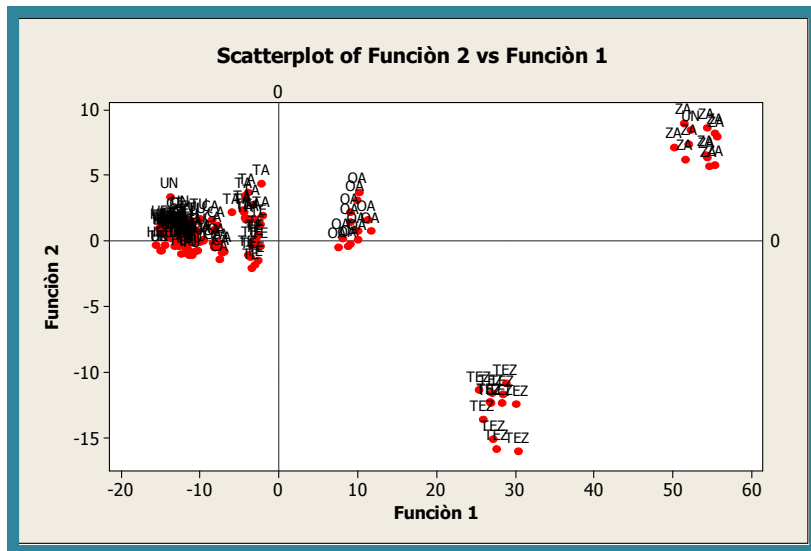


Figura 54. Diagrama de dispersión de la función 1 contra la función 2.

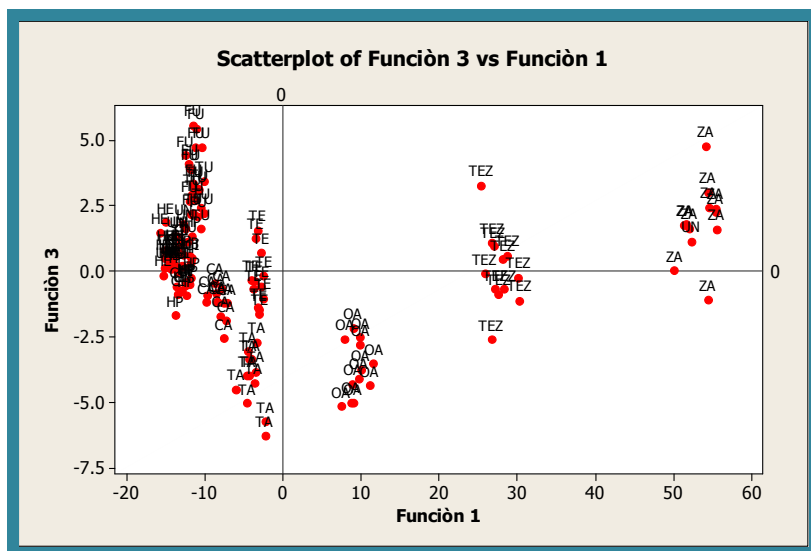


Figura 55. Diagrama de dispersión de la función 1 contra la función 3.

8. CONCLUSIONES

El acuífero presenta una contaminación natural proveniente del arrastre de las sales del suelo que se van disolviendo en el agua, de acuerdo a la dirección del flujo, en este caso de la parte más alta a la parte más baja, notándose una gran diferencia del contenido de sales entre los pozos y manantiales ubicados al norte (mayor altitud) con respecto a la zona sur (menor altitud).

La zona que presentó la mayor dureza fue la sur, clasificándose el agua de tipo muy dura. Mientras que en general los pozos de la zona norte y la mayoría de los del centro presentaron agua suave, predominando en éstos la dureza carbonatada, mientras que en los demás fue muy parecida la cantidad de dureza carbonatada y la no carbonatada.

Los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos no mostraron variación temporal significativa.

En la variación espacial los parámetros: sólidos totales, sólidos disueltos, alcalinidad total, dureza total, dureza de calcio, dureza de magnesio, OD, sulfatos y temperatura constituyeron el componente principal que cubrió el 52.1% de la variación total.

La calidad fisicoquímica en la mayoría de los casos fue buena pues los valores se encontraron por debajo de los límites máximos permisibles de la norma.

Con respecto a la contaminación bacteriológica los manantiales fueron los más contaminados y un poco menos el pozo Ojo de agua.

Los pozos que presentaron la mejor calidad bacteriológica fueron los ubicados en la zona norte y media del Valle de Cuernavaca, con excepción del manantial Túnel.

Dado que el agua del acuífero ya presenta cierto grado de contaminación bacteriológica es importante que no se deje de clorar los pozos cuyo uso es doméstico.

En general la contaminación es el resultado de las fuentes externas de contaminación que se encuentran cercanos a ellos, como las aguas residuales que van a dar directo al suelo en varias zonas o el uso agrícola en otros casos.

La detección de contaminación bacteriológica en el acuífero nos indica que la capacidad de dilución del acuífero no es suficiente mostrando puntos específicos donde la filtración de las bacterias está llegando al acuífero, provenientes en parte a las descargas de aguas residuales que van directas al suelo y en otros casos al incumplimiento de los pozos tanto en la construcción (NOM-003-CNA-1996), como en la protección (NOM-004-CNA-1996) de los mismos.

La alta vulnerabilidad de los materiales del acuífero en unas zonas y media en otras, en los que va circulando el agua, permite la infiltración de contaminantes que alteran la calidad del agua subterránea.

Hasta el momento la capacidad de dilución del acuífero ha permitido en general que se mantenga la misma calidad del agua del Valle de Cuernavaca, aunque se pueden apreciar zonas donde ya es evidente la contaminación antropogénica, trayendo como consecuencia una degradación en la calidad del acuífero.

REFERENCIAS

- Aguilar, R. I. 2002. Estudio bacteriológico y fisicoquímico de la calidad del agua de la Laguna de Mecoacan, Tabasco, México. Tesis de Licenciatura. FES-Iztacala. UNAM. 87 p.
- Arcos, P. M. P., Ávila de Navia, S. L., Estupiñán, T. S. M., Gómez, P. A. C. 2005. Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua. NOVA- Publicación Científica. 3: 69 - 79.
- Arizabalo, R. D y Díaz, G. G. 1991. La contaminación del agua subterránea y su transporte en medios porosos. Cuadernos del Instituto de Geofísica. Cuaderno 6. UNAM. 34 p.
- Borbolla, S. M. E., De la Cruz, V. L., Piña, G. O. E., De la Fuente, G. J. del C., Garrido, P. S. M. G. 2003. Calidad del agua en Tabasco. Salud en Tabasco. 9: 170 – 177.
- Caballero, A. D. 2006. La calidad del agua subterránea en la subcuenca del río Guanajuato. Tesis de Licenciatura. Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería. Instituto de Geofísica UNAM. 169 p.
- Campos, C., Cárdenas, M., Guerrero, A. 2002. Comportamiento de los indicadores de contaminación fecal en diferentes tipos de aguas en la Sabana de Bogotá (Colombia). Seminario Internacional sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales. 202 – 207.
- Castro, J. M. 2000. Análisis Fisicoquímicos y Bacteriológicos de la calidad del agua Ramal Tláhuac 1991–1992. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. 75 p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA) 2002. Informe técnico “Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero de Cuernavaca, Morelos”. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación Geohidrológica. 52 p.
- Cortés, M. R. S. 2004. Evaluación de la calidad bacteriológica y fisicoquímica de la presa de Valle de Bravo. Tesis de Licenciatura. FES- ztacala. UNAM. 54 p.
- Cuevas, E., Pacheco, J., Cabrera, A., Coronado, V., Vázquez, J., Comas, M. 1999. Calidad química y bacteriológica del agua subterránea en el principal campo de pozos para el abastecimiento de Mérida, Yucatán, México. Informe de Investigación. Sistema de Investigación Regional Justo Sierra del CONACYT. Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Ingeniería. UNAM. Instituto de Geofísica.
- Dragon, K. 2007. The influence of anthropogenic contamination on the groundwater chemistry of a semi-confined aquifer. (The Wielkopolska Buried Valley Aquifer, Poland). Water Resource Mange. s/p.

- García, O. N. L. 2007. Estudio fisicoquímico y bacteriológico del agua subterránea en las Zonas Centro-Oriente del Valle de Cuernavaca, Morelos, México. Tesis de Licenciatura. FES – Iztacala. UNAM. 83 p.
- González, C. J. C., Cabrera, G. A., Ayala, G. J. M. 2006. Flujo, calidad de agua y uso potencial de los manantiales de la microcuenca Atécuaro, Morelia, Michoacán, México. Biológicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 31 – 46.
- Granel, C. E y Gález, H. L. 2002. Deterioro de la calidad de agua subterránea por el desarrollo poblacional: Cancún, Quintana Roo. Ingeniería Revista Académica. 6: 41–53.
- Ibarra, M. M. R. 2000. Evaluación de la calidad bacteriológica y fisicoquímica de Laguna Negra, Puerto Marques, Gro. México. Tesis de Licenciatura. FES–Iztacala. UNAM. 109 p.
- Jiménez, E., Cisneros B., 2002. La contaminación ambiental en México: causas efectos y tecnología apropiada. Editorial Limusa. México D. F. 183 p.
- Legarreta, L. N. 1994. Contaminación del agua subterránea. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM. 195 p.
- Lima, M. A. J. 2007. Evaluación bacteriológica de la calidad del agua del río Lerma, México. Tesis de Licenciatura. FES–Zaragoza. UNAM. 88 p.
- Lizárraga, M. L., De León, G. H., Medina, B. F., Návar, J. 2006. Calidad del agua subterránea en Linares Nuevo León, México. Ciencia UANL: 4:426 – 430.
- Mata, O. F. 2004. Fundamentos de contaminación de agua subterránea. Tesis de Licenciatura. Ingeniero Civil. FES–Acatlán. UNAM. 321 p.
- Maya, R. C y Jiménez, C. B. E. 1999. Calidad fisicoquímica y microbiológica en afluentes secundarios por el Lago "Nabor Carrillo", México. Instituto de Ingeniería. UNAM. s/p
- Mazari-Hiriart, M., Cifuentes, E., Velázquez, E., Calva, J. J. 2000. Microbiological groundwater quality and health indicators in Mexico City. Urban Ecosystems. 4:91 – 103.
- Mazari-Hiriart, M., Velásquez, E., Torres-Beristain, B., Ruiz de E, R. 1997. Calidad del agua subterránea en la zona sur de la ciudad de México con base en microorganismos. Instituto de Ecología. s/p.
- Monroy, P. D. 2007. Estudio fisicoquímico y bacteriológico del agua subterránea en la zona sur del Valle de Cuernavaca, Morelos, México. Tesis de Licenciatura. FES–Iztacala. UNAM. 85 p.

- Morales, S. C. 1999. Análisis del comportamiento y variabilidad de los parámetros fisicoquímicos y calidad del agua del río Acaponeta (1990–1993). Tesis de Licenciatura. ENEP-Iztacala. UNAM. 50 p.
- Muñoz, H., Armienta, M. A., Vera, A y Cenicerros, N. 2004. Nitrato en el agua subterránea del Valle de Huamantla, Tlaxcala, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 20: 91 – 97.
- Navarro, A., Carbonell, M. 2007. Evaluation of groundwater contamination beneath an urban environment: The besòs river basin (Barcelona, Spain). *Journal of Environmental Management.* 85: 259 – 269.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). 1987. Criterios relativos a la salud y otra información de base. Publicación científica. Organización Panamericana de la salud. 2: 3 – 329.
- Pacheco, A. J., Cabrera, A., Marín, L. E. 2000. Bacteriological contamination in the Karstic Aquifer of Yucatan, México. *Geofísica Internacional.* 39: 285-291.
- Pacheco, A. J., Cabrera, S. A. 2003. Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. *Ingeniería Revista Académica.* 7:47 – 54.
- Pacheco. A. J., Cabrera, S. A., Pérez, C. R. 2004. Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México. *Ingeniería Revista Académica.* 8:165 - 179.
- Perdomo, C, H., Casanova, O. N y Ciganda, V. S. 2001. Contaminación de aguas subterráneas con nitratos y coliformes en el Litoral Sudoeste de Uruguay. *Agrociencia.* 5: 10 - 22.
- Pérez, L. M. E., Vicencio, R. M. G., Alarcón, H. M. T., Vaca, M. M. 2002. Influencia del basurero municipal en la calidad del agua del acuífero de la Ciudad de Durango, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 18:111 - 116.
- Pérez, M. F., Prieto, G. F., Rojas, H. A., Galán, V. C. A., Marmolejo, S. Y., Romo, G. C., Castañeda, O. A., Rodríguez, A. J. A., Barrado, E. E. 2003. Caracterización química de aguas subterráneas en pozos y un distribuidor de agua de Zimapán, Estado de Hidalgo, México. *Hidrobiológica. Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa* 13: 95 - 102.
- Robles, E., González, M., Castillo. P. 2004. Contaminantes físicos y químicos del agua: sus efectos en el hombre y en el medio ambiente. FES–Iztacala. UNAM. 120 p.
- Romero, R. J. A. 1999. *Calidad del agua.* 2ª Ed. Editorial Alfaomega. México.
- Rubio, R. M. A. 2007. Estudio fisicoquímico y bacteriológico del agua subterránea en la zona Norte del Valle de Cuernavaca, Morelos, México. Tesis de Licenciatura. FES–Iztacala. UNAM. 96 p.

- Sánchez-Pérez, H. J., Vargas-Morales, M. G., Méndez-Sánchez, J. D. 2000. Calidad bacteriológica del agua para consumo humano en zonas de alta marginación de Chiapas. *Salud Pública de México*. 42:397 – 406.
- Sardiñas, P. O., Chiroles, R. S., Fernández, N. M., Hernández, R. Y., Pérez, C. A. 2006. Evaluación físico-química y microbiológica del agua de la presa El Cacao (Cotorro, Cuba). *Higiene y Sanidad Ambiental*. 6: 202 – 206.
- SEMARNAT (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-003-CNA-1996. Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Diario Oficial de la Federación*. 6 de Enero de 1997.
- SEMARNAT (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-004-CNA-1996. Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Diario Oficial de la Federación*. 24 de Julio de 1997.
- Soto, G. E., Mazari, H. M., Bojórquez, T. L. A. 2000. Entidades de la zona metropolitana de la Ciudad de México propensas a la contaminación de agua subterránea. *Investigaciones Geográficas*. 60 – 75.
- SSA (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano (modificación). Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. Secretaría de Salud. *Diario Oficial de la Federación*. 16 de Diciembre de 1999.
- Suárez, B. M. D. 1988. Calidad físico-química y bacteriológica del agua subterránea del Valle de Cuernavaca, Morelos. Tesis de Licenciatura en Ingeniero Geólogo. Facultad de Ingeniería. UNAM. 84 p.
- Vázquez, O. D y Domínguez, M. E. 2001. Calidad de agua en el Valle de México. CNA.