



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA  
LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

“ESTUDIO BACTERIOLÓGICO Y  
FISICOQUÍMICO DEL AGUA DE LLUVIA”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**BIÓLOGO**

PRESENTA:

LUIS OSVALDO SÁNCHEZ AGUILAR



DIRECTOR DE TESIS: Mtra. Esperanza del S. Robles Valderrama

Los Reyes Iztacala; Edo. De México, 2019



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.

## Dedicatorias

*A Dios trino, el "Bien" absoluto y supremo...*

*A Luis Sánchez Guzmán, mi incansable luchador el Guerrero fuerte y tenaz que nunca se doblegó y me dio el ejemplo de sacrificarlo todo por amor. A ti mi amado Padre que desde los cielos me proteges, vigilas mis pasos y sigues amándome.*

*A Cruz Itzel Aguilar Guerrero mi ángel de amor y ternura que supo guiar mis pasos con firmeza hacia el camino del bien y del diálogo. A ti, la ingeniosa del "Todo se puede con ayuda de Dios", y mi ejemplo de fortaleza en momentos de turbulencia. A ti amada madre que siempre me acoges con amor.*

*A Raymundo Sánchez Aguilar, mi hermano carnal, el portador de luz y conocimiento, aquel que siempre me ha dado consejo y apoyo, que ha sido mi cómplice y mi ejemplo a seguir, te amo carnalito.*

*A la gran Familia (Sánchez y Aguilar) que siempre me acompañará en las buenas y malas, a los tíos y tías que siempre apoyan; a los primos y primas que siempre sonríen.*

*A Dulce María Nieto, Johana López Martínez, Luis Darío Martínez, Fray Arturo Bustamante, Fray Luis Ladrón de Guevara, y a tantos llamados por el Espíritu Santo a vivir el carisma franciscano y que con el transcurrir de la vida convierten cada día en mis HERMANOS.*

***Agradecimientos:***

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y a la Facultad de Estudios Superiores Iztacala, por el apoyo académico e institucional brindado: por quienes reitero:

*Por mi raza hablará el espíritu*

A mi directora de Tesis Mtra. Esperanza del S. Robles Valderrama, que siempre me ha brindado sus conocimientos, su buen consejo, pero sobre todo que sabe esperar y comprender mis altibajos. Eternamente agradecido.

A las profesoras Biol. Blanca Martínez Rodríguez y Biol. Maria Guadalupe Sainz Morales, que estando en el laboratorio me brindaron confianza y su experiencia en las técnicas realizadas.

A: Isaac, Karina, Fernando, Pamela, Daniel, Julio, Beatriz M. Josue, Maricela, Lourdes y Aurora; por su valiosa ayuda en la colecta de muestras.

# Índice de contenido

1.- RESUMEN .....	1
2.- INTRODUCCIÓN .....	2
3.- MARCO TEÓRICO .....	4
3.1 Antecedentes en México .....	4
3.2 Antecedentes en otros países.....	5
3.3 Ciclo del agua.....	8
3.3.1 Precipitación.....	9
3.3.2 Evaporación .....	9
3.3.3 Transpiración .....	9
3.3.4 Evapotranspiración.....	10
3.3.5 Infiltración .....	10
3.3.6 Flujo de agua subterránea.....	10
3.4 Captación del agua de lluvia .....	11
3.5 Parámetros fisicoquímicos del agua. ....	11
3.6 Parámetros bacteriológicos del agua .....	15
3.7 Contaminación del Aire.....	16
3.7.1. Tipos y origen de contaminantes atmosféricos .....	17
3.7.2. Índice metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) .....	18
3.7.3. Contaminantes atmosféricos y sus efectos. ....	19
3.7.3.1 Partículas suspendidas (PS) .....	19
3.7.3.2. Monóxido de carbono (CO) .....	20
3.7.3.3. Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> ) .....	20
3.7.3.4 Óxidos de nitrógeno (NO).....	21
3.7.3.5 Oxidantes fotoquímicos (Ozono O <sub>3</sub> ) .....	21

3.7.4 Mecanismos naturales de Limpieza atmosférica .....	22
4.- OBJETIVOS.....	23
4.1 Objetivo General .....	23
4.2 Objetivos particulares .....	23
5.- JUSTIFICACIÓN .....	24
6.- ZONA DE ESTUDIO .....	25
7.- MATERIALES Y MÉTODOS .....	26
8.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
8.1 Variación espacial y temporal de los parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos. 27	
8.1.1 Coliformes Totales. (unidades UFC/100ml).....	27
El 96.9% de las muestras presentaron coliformes totales (Fig. 5) .....	27
8.1.2 Coliformes Fecales. (unidades UFC/100ml) .....	31
8.1.3 Conductividad. Eléctrica (CE) (unidades: $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) .....	33
8.1.4 pH. ....	36
8.1.5 Turbiedad. ....	40
8.1.6 Alcalinidad Total .....	42
8.1.7 Dureza Total.....	44
8.1.8 Cloruros.....	46
8.1.9 Sulfatos.....	46
8.2 Análisis de correlación .....	48
8.3 Cumplimiento con la NOM 127-SSA1-1994 para agua potable.....	49
9.- CONCLUSIONES.....	51
10.- BIBLIOGRAFIA .....	54
11. ANEXOS.....	61

## 1. RESUMEN

Se realizó un estudio bacteriológico y fisicoquímico del agua de lluvia de recolección directa (sin escorrentía) en 9 puntos de la ciudad de México y en temporada de lluvias y de secas durante 2010, 2011 y parte del 2012 para evaluar la calidad entre temporadas, así como su correlación con los valores de contaminación atmosférica (IMECA).

La calidad del agua de lluvia se comparó con los parámetros de la modificación de la norma NOM-127-SSA1-1994 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para agua potable, resultando que los valores fisicoquímicos; Dureza, Alcalinidad, Conductividad, Cloruros, Sulfatos, pH y Turbiedad; en ambas temporadas tiene valores bajos y cercanos al límite, con respecto a los parámetros microbiológicos, coliformes totales y fecales; no cumplen con los criterios de la norma, por lo que no se recomienda para uso potable, pero si para uso de limpieza doméstica, o bebida de animales domésticos.

Con respecto al modelo de correlación de Pearson con los parámetros del IMECA y los fisicoquímicos determinados en laboratorio, se encuentra una correlación significativa ( $P < 0.05$ ) en gran cantidad de los parámetros, demostrando que la contaminación atmosférica modifica la composición fitoquímica del agua de lluvia.

## 2.- INTRODUCCIÓN

La disponibilidad del recurso agua es indispensable para la vida, sin embargo, la escasez de esta, derivada del incremento en el desarrollo poblacional e industrial, se ha convertido en uno de los principales problemas en el mundo (Ahmed *et al.*, 2008).

En el caso de la Zona Metropolitana del Valle de México, contar con este valioso recurso natural se hace cada día más complicado y costoso y en la actualidad se ha convertido en un serio problema. Una alternativa para resolver esta problemática es a partir del aprovechamiento sustentable de la precipitación pluvial en los diversos tipos de edificios con sistemas colectores, eficientes y viables, tecnológica y económicamente (García y Deryck, 2006).

El aprovechamiento del agua de lluvia no es nuevo, pues esta agua ya se captaba desde hace 3 siglos en América Latina y el Caribe utilizando diversos sistemas de captación y almacenando en cisternas el agua colectada de los techos y pisos. Actualmente el manejo y almacenamiento de escurrimientos superficiales se realiza en presas de tierra, ollas, jagüeyes (zanjas) y aljibes (pozos profundos hechos sin maquinaria) (Garrido, s/a).

En la actualidad, la humanidad enfrenta serios problemas de deterioro ambiental, debido al intenso desarrollo urbano e industrial, los cuales han influido en las características químicas de la atmósfera. La contaminación atmosférica, acumula riesgos importantes para la salud y bienestar de la población humana (Garcés y Hernández, 2004; OMS 2003; Vallejo *et al.*, 2002; Lacasaña-Navarro *et al.*, 1999)

La contaminación atmosférica se define como la presencia de sustancias en el aire, en cantidades que pueden ser perjudiciales para la vida, afectar estructuras, materiales, y ocasionar cambios en las condiciones meteorológicas o climáticas (Vallejo *et al.*, 2002)

Las sustancias contaminantes pueden depositarse en la atmósfera desde fuentes naturales (emisiones volcánicas, reacciones bioquímicas de microorganismos etc.) o sintéticas. Las principales fuentes de contaminantes sintéticos incluyen la quema de combustibles fósiles

(carbón, gas y petróleo) Siendo el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), el monóxido de carbono (CO), las partículas en suspensión, el ozono ( $\text{O}_3$ ) los hidrocarburos, los aerosoles ácidos de sulfatos y nitratos y los metales pesados, los contaminantes primarios de estas fuentes de contaminación mayor (Etze y French, 2000).

El Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), es un valor de referencia utilizado para dar a conocer a la población el estado que guarda la contaminación atmosférica en una zona o ciudad. El IMECA se elabora con información de una red de monitoreo atmosférico, que incluye datos de  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , CO, y la fracción respirable (PM10) de las partículas suspendidas totales (Trejo, 2006).

Sin embargo, las consecuencias de esta contaminación no sólo se traducen en efectos directos al ser humano, sino también, en la generación de otros fenómenos dañinos que han afectado el medio ambiente a escala mundial, como el caso de las precipitaciones ácidas, (García *et al.*, 2006).

La lluvia es un mecanismo natural de limpieza del aire debido a que remueve los compuestos atmosféricos solubles y junto con la deposición seca, son los únicos que retiran en forma definitiva los gases y partículas de la atmósfera. Este tipo de deposiciones atmosféricas son las principales fuentes de constituyentes químicos para muchos ecosistemas, (Facundo *et al.*, 2009; Baez y Belmont, 1987).

Debido a que la lluvia se está convirtiendo en una alternativa de solución a la problemática del agua, pero también a la contaminación ambiental actual, es necesario realizar estudios sobre la calidad del agua de lluvia para definir sus usos o tratamientos.

## 3.- MARCO TEÓRICO

### 3.1 Antecedentes en México

Baez y Belmont en 1987 realizaron un estudio comparativo de la química de la precipitación pluvial en 3 zonas diferentes en México. La primera en un área urbana fuertemente contaminada, la segunda fue un área predominantemente agrícola y la tercera fue una región costera, donde se encuentra instalado uno de los mayores complejos petroquímicos del país. Las concentraciones de todos los iones determinados variaron de lugar a lugar. La influencia de la atmósfera fuertemente contaminada de la Ciudad de México se reflejó en la química de la lluvia, en donde se encontraron las concentraciones más altas de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . De la misma manera, las emisiones industriales de la zona costera contribuyeron a tener concentraciones más altas de los iones en el agua de lluvia, en comparación con la zona predominantemente agrícola y de aquella bajo la influencia de condiciones meteorológicas marítimas.

Saavedra-Romero *et al.*, 2003, realizaron un análisis de la precipitación pluvial en el parque Desierto de los Leones D.F. México, cuantificando el pH y los cationes básicos  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , para determinar la presencia de lluvias ácidas y la lixiviación de cationes del follaje de los árboles con dos categorías de muestreo (CB, Claros de bosque y EF, Escurrimiento foliar), se recolectó la lluvia en 3 periodos (Junio, Agosto y Octubre de 1998). La concentración de K y Mg en el agua, no presentó diferencias entre sitios, ni entre épocas del año. Sus resultados indican que en los bosques del Desierto de los Leones se presentaron lluvias ácidas, ( $\text{pH} < 5.65$ ), especialmente en el mes con mayor precipitación promedio (Agosto).

Flores *et al.*, 2006, encontraron concentraciones de Zn, Cd, Pb y Cu en muestras de aguas de lluvia, de escurrimiento y de drenaje de las áreas urbanas. Usando el método de polarografía de redisolución anódica.

### **3.2 Antecedentes en otros países**

Handia en el 2005 realizó un estudio comparativo de la calidad de lluvia de Zambia, colocando cinco sistemas de aprovechamiento para su captación en dos áreas en la periferia de la ciudad de Lusaka y la capital de Zambia. Para comparar la calidad de lluvia recogieron agua de tuberías y pozos, encontrando que el agua de lluvia fue la de mejor calidad.

Okereke *et al.*, 2006 en su trabajo encuentra que las muestras de lluvia colectadas directamente de las últimas lluvias cumplen las normas de agua potable mientras que las primeras y las colectadas de los tanques y techos se encuentran contaminadas con coliformes totales y fecales. También indica que diversas investigaciones muestran que la forma más pura del agua natural es como nieve y agua de lluvia. Así mismo que el método de colección y almacenamiento puede alterar este atributo. El mejor método de colección es el directo en donde no haya ningún contacto con ninguna superficie que no sea la atmósfera.

Ahmed *et al.*, 2008, evaluó la calidad del agua de lluvia, obtenida de los techos de casas residenciales; monitoreando la concentración de *Escherichia coli*, enterococos *Clostridium perfringens* y *Bacteroides* spp. en el agua de lluvia procedente de los tanques de almacenamiento, en el sur de Queensland, Australia. De 27 muestras de agua analizadas 17 (63%), 21 (78%), 13 (48%) y 24(89%), dieron positivo para *E. coli*, Enterococos, *C. perfringens* y *Bacteroides* spp. respectivamente. Las muestras también fueron analizadas con PCR en tiempo real para detectar la presencia de microorganismos patógenos potenciales. Utilizando el modelo de regresión logística binaria, no hubo correlación entre la presencia/ausencia de patógenos potenciales con los indicadores tradicionales (Coliformes fecales), lo que sugiere que los indicadores fecales, pueden no ser adecuados para la calidad microbiológica del agua de lluvia, siendo un riesgo para la salud.

Radaideh *et al.*, 2009, efectuó un estudio en cuatro provincias al norte de Jordania, donde la recolección de agua de lluvia la practican en forma regular para su uso. Noventa muestras de agua de lluvia fueron recolectadas de varios tanques de almacenamiento y se analizaron los

diferentes parámetros de calidad (pH, alcalinidad, dureza, turbidez, TDS, DQO, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, Pb, Fe, Cr y contaminantes biológicos). Los resultados del análisis se compararon con las directrices de calidad de agua para evaluar sus usos domésticos. Los resultados mostraron que el agua de los tanques y cisternas varía dependiendo de la ubicación. Se concluyó que el agua de lluvia recogida no es apta para beber, se recomienda ser utilizada para el riego de áreas verdes y para limpieza doméstica.

En 2009, Basak y Alagha analizaron estacionalmente las concentraciones de metales tóxicos (Cu, Zn, Pb, Cr, Ni, y Cd) en el agua de lluvia. Las muestras fueron recolectadas en dos sitios, uno en la periferia del lago Büyükçekmece y el otro ubicado en el campus de la Universidad de Fatih, Estambul. El estudio reveló que no hubo diferencias entre los dos muestreos, lo que sugiere que cualquier tipo de contaminación grave no se ha producido durante la recolección y análisis de las muestras. Méndez *et al.*, 2010, estudiaron aguas pluviales de la comunidad de Texas y el impacto del material de cubierta, (Techados) en la calidad del agua de lluvia recolectada. Colocaron equipos con dispositivos de muestreo sobre cinco tejados a escala piloto y tres techos residenciales. Colectaron la "primera descarga" y el agua después de la primera descarga. Analizando parámetros fisicoquímicos y microbianos. Encontraron que la primera descarga contiene la mayor concentración de contaminantes microbiológicos y químicos en comparación con los tanques de la segunda descarga, lo que indica que la calidad del agua de lluvia recolectada es mejor con el lavado del tejado.

Ospina-Zúñiga, Ó, E. y Ramírez- Arcila, H. en 2014 realizaron una evaluación de la calidad del agua de lluvia, caracterizando el agua pluvial recolectada sin contacto con superficie alguna, dicho trabajo consideró 12 parámetros fisicoquímicos y coliformes totales. Los análisis realizados evidencian que la composición fisicoquímica del agua es susceptible a un proceso de potabilización ya que no se tuvieron valores críticos de contaminación. El aprovechamiento del recurso deberá remover contaminantes como coliformes totales, reducción de turbiedad y neutralización de pH, que son los parámetros que no cumplen con la especificación para aguas potables.

En 2014 Gong *et al.* realizaron un estudio de la calidad del agua de lluvia de 2 métodos de recolección diferentes; escorrentía directa y techos verdes con doble capa de sustrato, en esta comparación se evidenció el beneficio de los techos verdes, en la mejora de la calidad del agua pluvial; pues redujeron los valores de la DQO y Turbidez; así como también se neutralizó el pH de las consideradas lluvias ácidas.

Gikas y Tsihrintzis en 2017 analizaron la calidad de agua de lluvia recolectada por 2 tipos de sistemas de recolección de agua pluvial, con dispositivos de desviación del primer lavado y con dos tipos diferentes de materiales en los techos (Cerámica y concreto), recolectaron muestras de agua de los tanques de almacenamiento y de los dispositivos de primer lavado, y encontraron que la calidad del agua era buena pero no potable en los estanques y en que la calidad del agua en los dispositivos de primer enjuague era de peor calidad; encontrando diferencias significativas en los parámetros de Nitratos, ortofosfatos y Carbonato de calcio. Se detectaron coliformes tanto en los estanques de almacenamiento como en los del primer enjuague, por lo que se requiere de desinfección para considerarse potable. Los tipos de materiales de los tejados tienen diferencias en los estanques de primer enjuague, debido a que en el de techo de cerámica hay mayor acumulación de materiales que en el de concreto, debido a que tiene una inclinación y permite que el aire elimine la basura de la superficie.

En 2018, Gemma *et al.* realizaron una comparación de la calidad de agua de lluvia, recolectada por escorrentía de tres tipos de tejados (Conglomerado de Madera, tejas de asfalto, pizarra sintética) tomando en cuenta la supervivencia de 3 tipos de indicadores biológicos (E. coli, Enterococos y Salmonella entérica); Los enterococos fueron el grupo de bacterias más encontrados en los tres tipos de tejados. Y el conglomerado de madera, así como las tejas de asfalto fueron los tipos de materiales con la más pobre calidad microbiológica del agua. La escorrentía de agua pluvial en 2 de 6 edificios dentro del estudio, no cumplen con los estándares de la FDA de los Estados Unidos (Administración de drogas y alimentos). Por lo tanto, el tipo de material de los tejados influye fuertemente en la calidad microbiológica del agua, siendo los materiales sintéticos los que proporcionan mejores calidades debido a la falta de supervivencia de los indicadores biológicos.

### **3.3 Ciclo del agua**

Todos los organismos vivos dependemos de forma absoluta del agua. Las reacciones bioquímicas producidas en cada célula tienen lugar en un medio acuoso, el agua constituye el medio de transporte de los nutrientes requeridos por la célula y los productos de desecho excretados por la misma.

El volumen total del agua permanece constante en todo el mundo. Lo que cambia es la calidad y la disponibilidad. El agua está constantemente reciclándose, en un sistema conocido como el ciclo del agua o ciclo hidrológico.

Los filósofos griegos desde Tales de Mileto, en el 650 a.C., se han preguntado por el origen de las aguas subterráneas, pero el primero en relacionar el agua de los manantiales con la filtración del agua de lluvia fue Aristóteles. En el siglo I a.C., el arquitecto romano Marco Vitrubio describe por primera vez el ciclo hidrológico (Fernández, 2009).

Dentro del ciclo hidrológico el agua está en constante movimiento, dirigida por la energía solar. El sol provoca la evaporación de los océanos, lo cual forma las nubes y las precipitaciones. La evaporación también ocurre en los lagos, ríos y suelo, en donde las plantas contribuyen con cantidades significativas de evapotranspiración. Aunque alrededor de un 80% de las precipitaciones vuelven a caer en los océanos, el resto cae sobre la tierra. Esta agua es la que recarga los acuíferos, alimenta las corrientes de los ríos y lagos y provee toda el agua necesaria para las plantas, animales y desde luego los humanos. Cuanto más llueva mayor será el caudal de los ríos y más altos los niveles alcanzados en las capas freáticas en las zonas de almacenamiento de aguas subterráneas (Gray, 1994). El ciclo es continuo y así el agua es una fuente renovable.

La tierra contiene más de 300 millones de m<sup>3</sup> de agua, por debajo la superficie terrestre, en la superficie y en la atmósfera. Durante el ciclo, esta enorme cantidad de agua está en constante movimiento. La Hidrología se encarga de estudiar el transporte de agua a través del aire, sobre

la superficie del suelo, y la distribución en los estratos de la tierra. El conocimiento de la hidrología es importante en prácticamente todos los problemas que implican el uso y suministro de agua. Por lo tanto, la hidrología es de un valor no sólo en el campo de la ingeniería, sino también en la silvicultura, la agricultura y otras ramas de las ciencias del medio ambiente (Ward, 2004).

### *3.3.1 Precipitación*

El agua que se evapora de la tierra se almacena temporalmente como vapor de agua en la atmósfera, el vapor y las pequeñas gotas de agua forman las nubes. Como la atmósfera se satura, el agua se libera de nuevo a la tierra como una forma de precipitación (lluvia, nieve, aguanieve o granizo). Alguna parte de agua puede evaporarse antes de que alcance el suelo. Las precipitaciones al llegar al suelo se evaporan desde cualquier lugar, incluidas las superficies de suelo desnudo, las superficies de las plantas, y las superficies de estanques, lagos y arroyos. La precipitación es un fenómeno natural que los humanos pueden hacer muy poco para controlar.

### *3.3.2 Evaporación*

La evaporación se produce cuando el agua cambia de estado líquido a gaseoso (vapor). Los aumentos en las temperaturas del aire y el agua, el viento y la radiación solar aumentan los índices de evaporación, Mientras que un alto porcentaje de vapor agua en el aire genera “humedad relativa alta”. En el proceso de evaporación, el agua se mueve de nuevo a la atmósfera en forma de vapor.

### *3.3.3 Transpiración*

El agua puede tomar varios caminos después de que entra en contacto con el suelo. Parte del agua se almacena en el suelo. Esta agua no es estacionaria y se mueve hacia abajo a una velocidad que depende de las propiedades diversas del suelo, tales como la conductividad hidráulica y la porosidad. Mientras que en el almacenamiento cerca de la superficie, parte de esta agua es usada por las plantas y finalmente se devuelve a la atmósfera como vapor de

agua. El proceso por el cual las plantas liberan vapor de agua a la atmósfera se llama transpiración. Este vapor de agua es un subproducto natural de la fotosíntesis (Ward, 2004).

#### *3.3.4 Evapotranspiración*

Debido a la dificultad de separar los procesos de evaporación y transpiración de las plantas, por lo general veremos estos dos procesos, como un proceso llamado evapotranspiración. Este término incluye tanto el agua que se evapora del suelo y superficies de las plantas y el agua que se mueve bajo del suelo se devuelve a la atmósfera a través de la transpiración de las plantas.

#### *3.3.5 Infiltración*

La infiltración es la entrada de agua en el suelo. La cantidad de agua que se infiltra en el suelo varía ampliamente de un lugar a otro. La velocidad a la que el agua se infiltra depende de las propiedades del suelo tales como el contenido de agua del suelo, textura, densidad, contenido de materia orgánica, la conductividad hidráulica (permeabilidad), y la porosidad. La conductividad hidráulica es una medida de cómo el agua fluye rápidamente a través de ciertos suelos o capas de roca. La infiltración y la conductividad hidráulica son mayores en los materiales porosos, tales como arenas, gravas, o roca fracturada que en suelos de arcilla o roca sólida. La porosidad es una medida de la cantidad de espacio abierto en el suelo o roca que puede contener agua (Ward, 2004).

#### *3.3.6 Flujo de agua subterránea*

El agua subterránea representa aproximadamente el 4% del agua contenida en el ciclo hidrológico y puede fluir a los cuerpos de agua superficiales, como los océanos, lagos y ríos. Este proceso crea un flujo de base para un cuerpo de agua superficial que es una importante contribución a las aguas subterráneas y aguas superficiales. Más del 50% de la población depende del agua subterránea como fuente primaria de agua potable. Aproximadamente el 75% de las ciudades estadounidenses obtienen sus suministros de agua, total o parcialmente de la forma subterránea (Ward, 2004).

### **3.4 Captación del agua de lluvia**

Antecedentes históricos: El cultivo y la ganadería, además del sedentarismo, probablemente empujarían a los pobladores de aquellos primeros asentamientos a encontrar alguna forma de recoger el agua de lluvia para su uso y el de sus animales y plantas. En el 2900 a.C., en la ciudad fenicia de Biblos o Gebal se concibe un complejo sistema de depósitos de agua de lluvia y canalizaciones para su aprovechamiento. La ciudad, además, ya dispone de alcantarillado para evacuación de aguas residuales.

En el Reino de Judea (en la actualidad, la zona de Jerusalen, Hebron, Beer'Sheva...) hacia el 2700 a.C. ya funcionaban complejos sistemas de recogida de aguas pluviales compuestos por cisternas subterráneas, canales excavados en la roca que comunicaban con el exterior y piscinas a cielo abierto. Se estima que estuvieron en funcionamiento aproximadamente 400 años y se especula con el origen Asirio de los restos arqueológicos encontrados, pero lo que es evidente es que las civilizaciones que durante milenios ocuparon esa región desarrollaron elaborados procedimientos destinados a aprovechar todos los recursos hídricos existentes. Otros ejemplos que ilustran las técnicas utilizadas por culturas muy diferentes para solucionar un mismo problema, la falta de agua, fueron la *domus* romana (la vivienda de las clases altas en Roma), los *aljibes* árabes, los *chultunes* del Imperio Maya o los milenarios *shuijiao* en China (Fernández, 2009).

### **3.5 Parámetros fisicoquímicos del agua.**

#### *Conductividad*

La conductividad es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones y su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura de medición. Dicha capacidad se expresa en ohmios o mhos. En los análisis de aguas es más conveniente la unidad micromhos. En el sistema internacional de unidades (SIU) el recíproco del ohmio es el siemens (S) o micro-siemens ( $\mu\text{S}$ ). (Robles *et al.*, 2004)

### *pH*

La medida del pH es una de las pruebas más importantes y frecuentes, utilizadas en el análisis químico del agua. A una temperatura determinada, la intensidad del carácter ácido o básico de una solución, viene dada por la actividad del ion hidrógeno o pH. Para expresar una amplia gama de actividades iónicas, es conveniente una escala logarítmica:

$$(-\log_{10} \alpha_{H^+}) + (-\log_{10} \alpha_{OH^-}) = 14$$

El pH se ha considerado como un parámetro de suma importancia en los estudios de caracterización de la lluvia ácida. En la escala del pH de 1-14, el valor 7, es un pH neutro, y los valores inferiores se consideran ácidos, mientras que los superiores a 7 son básicos.

Aunque el agua pura es neutra, pH= 7.0, el pH del agua de lluvia es ligeramente ácido, debido a su equilibrio con el CO<sub>2</sub> atmosférico. Cuando el CO<sub>2</sub> se disuelve en agua origina ácido carbónico, un ácido débil. CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O = H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. y tiene un pH entre 5.7 y 7. En lugares contaminados por ácido nítrico y ácido sulfúrico, el pH de la lluvia varía entre 5 y 3. (Garcés 2004, Watson 1995, Spiro & Stigliani 2004) Aparte del CO<sub>2</sub>, en la acidificación del agua intervienen otros compuestos atmosféricos, principalmente ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) y el ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Estos ácidos pueden formarse de forma natural: HNO<sub>3</sub> es procedente del NO formado en tormentas e incendios forestales, mientras que el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> deriva de las emisiones volcánicas y de compuestos biogénicos de azufre (Spiro y Stigliani, 2004)

El pH puede disminuirse por disolución del CO<sub>2</sub> (la concentración del CO<sub>2</sub> es alterada localmente por las emisiones industriales). Por tanto, la disminución del pH por aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> no se considera como la causa de formación de la lluvia ácida. La variación en la concentración del CO<sub>2</sub> en la atmósfera indica la presencia de variación del CO<sub>2</sub> disuelto en la lluvia de la región. De este modo, la *determinación de la alcalinidad* con respecto al punto equivalente del CO<sub>2</sub> en las lluvias es fundamental para su caracterización. (Mahendra, 1998)

Los valores extremos de pH son letales o severamente inhibitorios para los organismos vivientes y se pueden considerar un envenenamiento por iones hidrógeno o hidroxilo (Robles *et al.*, 2004)

#### *Turbiedad:*

Es la medida de obstrucción de la luz, que pasa a través de una muestra de agua, ocasionada por materia suspendida. La medida es una expresión de la propiedad óptica de una muestra de agua que hace que la luz sea absorbida, en lugar de ser transmitida, en una línea recta a través de la muestra; a medida que el número de partículas se incrementa se dispersa más luz y se obtienen mayores lecturas de turbiedad. La unidad de turbiedad es detectada por un nefelómetro, siendo estas unidades de turbiedad nefelométricas (NTU) (Robles *et al.*, 2004).

#### *Alcalinidad total*

Es una medida de la capacidad del agua, para neutralizar ácidos y está representada principalmente por los aniones OH, CO<sub>3</sub>, y HCO<sub>3</sub>.

La alcalinidad en el ser humano, produce “alcalosis metabólica; se presenta por la ingestión excesiva de bicarbonatos o sus precursores. En el agua provoca la formación de espuma y acarreo de sólidos en el vapor. Puede provocar formación de CO<sub>2</sub> en el vapor de calderas impartándole un carácter corrosivo. (Robles *et al.*, 2004)

La alcalinidad en conjunto con el pH o el CO<sub>2</sub> disuelto total en las aguas naturales, la lluvia o aguas superficiales puede usarse para determinar las especies carbónicas; por esta razón hay enormes aplicaciones de la alcalinidad en la química analítica y en la modelación química (Mahendra, 1998).

#### *Dureza total*

Originalmente, la dureza del agua se definía como la capacidad que esta tenía, para precipitar jabón, lo cual es originado por los iones de calcio y magnesio, presentes en el agua. Por lo tanto, la dureza total es la suma de la concentración de calcio y magnesio, ambas expresadas en mg/L, como carbonato de calcio.

El agua que contiene CO<sub>2</sub> de la atmósfera y de la respiración de los organismos del suelo, disuelven al magnesio y calcio de un mineral común, la dolomita (Ca CO<sub>3</sub> + MgCO<sub>3</sub>), produciendo así la dureza y alcalinidad subterráneas.

La dureza de los elementos no carbonatos, sobre todo cuando el anión es sulfato, puede dar como resultado la formación de escamas duras en calderas y en partes del equipo de intercambio de calor (Robles *et al.*, 2004).

### *Cloruros*

Es un ion de mayor importancia en el agua, incluyendo la de desecho, las aguas de los mares y océanos tienen una concentración más elevada por contener los residuos resultantes de la evaporación parcial de las aguas naturales que fluyen hacia ellos.

El cloruro de sodio es un componente común en la dieta y pasa por el sistema digestivo sin presentar cambios,

El sabor salado producido por las concentraciones de cloruros es variable y depende de la composición química del agua (Robles *et al.*, 2004).

### *Sulfatos*

Los iones sulfatos, son ampliamente distribuidos en la naturaleza. Y sus concentraciones en las aguas naturales, varía mucho. El sulfato puede derivarse de la oxidación de los sulfuros o de la lixiviación de los depósitos de yeso, anhidrita y esquistos.

En concentraciones altas actúan como laxantes y su combinación con otros iones imparte al agua sabor desagradable; en la actualidad se recomienda una concentración máxima de 250 mg/L. Cuando los sulfatos se combinan con el calcio, genera problemas de incrustaciones en calderas, equipos de enfriamiento etc. (Robles *et al.*, 2004)

## **3.6 Parámetros bacteriológicos del agua**

Para enjuiciar la calidad del agua, proveniente de diversas fuentes naturales o humanas, además de los parámetros físicos y químicos, se utilizan bacterias, y otros seres vivos vegetales y animales, como organismos indicadores de la calidad de las aguas, siendo estos

parámetros bacteriológicos, los cuales tienen mayor importancia en el dictamen higiénico de las aguas. Por lo tanto, es preciso hallar el número y tipo de gérmenes o bacterias patógenas dentro del agua.

Los organismos patógenos que pueden estar presentes en las aguas, son difíciles de aislar e identificar. Por esta razón se prefiere utilizar los Coliformes como organismos indicadores característicos de contaminación y productores de enfermedad (Rheinheimer, 1970).

#### *Coliformes totales y fecales.*

Las bacterias Coliformes son bacilos gram-negativos, aerobios y facultativos anaerobios, no formadores de esporas que fermentan la lactosa con producción de gas en 48h a 35 o 37°C. el grupo de Coliformes totales, incluye los géneros *Escherichia* y *Aerobacter*. En general, se considera el género *Escherichia*, especie E. Coli, como la población de bacterias Coliformes más representativa de contaminación fecal. El género *Aerobacter* y algunas *Escherichia* pueden crecer en el suelo, lo cual indica que la presencia de Coliformes no necesariamente representa la existencia de contaminación fecal humana.

Con excepción de algunas cepas de Coliformes fecales enteropatógenos que causan diarrea, los Coliformes no son patógenos para el hombre. Pero éstos pueden aceptar y transferir genes resistentes a las drogas (medicamentos), por lo cual deben ser eliminadas de las fuentes de contacto con el hombre (Romero, 2000).

### **3.7 Contaminación del Aire**

La contaminación del aire forma parte de la vida moderna en la que está envuelto el planeta, y aunque parece obvio entender a qué se refiere la palabra contaminación, existen algunos casos en los que no es tan evidente, convirtiéndose en un fenómeno subjetivo. Así, el vertido de disolventes orgánicos en un río, podría disgustar a todo el mundo, al pensar en los efectos derivados.

Sin embargo, cuando nos encontramos en un concierto de rock a decibeles muy altos, es un placer eufórico para algunas personas, pero para otras es un proceso de contaminación acústica.

Es por eso que resulta apremiante definir a manera genérica un contaminante, como toda materia o sustancia, combinaciones o sus derivados químicos y biológicos, que al incorporarse o adicionarse al ambiente pueden alterar o modificar sus características naturales.

Pero debido a las presiones económicas que genera la escases de los recursos energéticos, minerales, naturales etc. ejercen presión automáticamente a la búsqueda de soluciones para muchos problemas de contaminación; por lo que una definición de un contaminante más acertada sería la de: *sustancia presente en mayor concentración a la natural como resultado de la actividad humana y que ejerce un efecto pernicioso sobre el ambiente o sobre la calidad del mismo* (Figueroa y Marino, 2001)

Las unidades para expresar la concentración de diferentes especies presentes en el aire son las usuales en los sistemas de mezclas de gases, como % en volumen. En algunos casos las concentraciones de algunos contaminantes suelen ser muy pequeñas, por lo que se emplea partes en millón (ppm) o partes en billón (ppb) y en muy remotos casos, partes por trillón (ppt).

### **3.7.1. Tipos y origen de contaminantes atmosféricos**

Los contaminantes están clasificados como primarios y secundarios de acuerdo a su origen. Los primarios son aquellos emitidos a la atmósfera como resultado de un proceso natural o antropogénico. Estos están presentes en la atmósfera, en su mayor parte como fueron emitidos, por ejemplo, CO y SO<sub>2</sub>. Los secundarios son formados en la atmósfera como producto de una reacción, como el O<sub>3</sub> y los sulfatos. La reacción podría ser fotoquímica o no fotoquímica, como lo son la hidrólisis y oxidación.

De acuerdo a su estado físico se clasifican en gases y partículas, las cuales incluyen sólidos y líquidos. Los gases presentes en la atmósfera como contaminantes, se comportan de la misma manera que el aire; una vez difundidos no tienden a depositarse. Refiriéndonos a partículas, las de mayor tamaño se depositan con más rapidez y producen sus efectos cerca de la fuente; las de tamaño mediano se alejan y se depositan a una cierta distancia de la fuente; mientras que las partículas más pequeñas se comportan casi igual a un gas, manteniéndose suspendidas y son transportadas por el viento a distancias mayores.

Ahora por su composición química, los contaminantes pueden ser clasificados en orgánicos e inorgánicos. Los primeros son definidos como aquellos que contienen carbón e hidrógeno, pudiendo contener además otros elementos; los inorgánicos incluyen los compuestos simples del carbono como son CO y CO<sub>2</sub>, partículas metálicas, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, etc. (Gutiérrez *et al.*, 1997)

Clases Mayores	Subclases	Contaminantes
Gases orgánicos	Hidrocarburos Etileno- metano Aldehídos, cetonas	Hexano benceno, Butano butadieno Formaldehídos, acetona.
Otros compuestos orgánicos	Hidrocarburos clorados, alcoholes	
Gases inorgánicos	Óxido de nitrógeno  Óxido de azufre  Óxido de carbono	Bióxido de nitrógeno, Óxido nítrico Bióxido de azufre Trióxido de azufre Monóxido de carbono Dióxido de carbono
Otros compuestos Inorgánicos		Ácido sulfhídrico, Ácido fluorhídrico, Amoniacó, cloro
Partículas sólidas Partículas líquidas		Polvo, humo, aerosoles Neblina, aerosoles.

Cuadro. 1: Clasificación de contaminantes atmosféricos.

### **3.7.2. Índice metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA)**

#### *Diseño del IMECA*

El índice de calidad del aire se obtiene como resultado de aplicar una función de transformación a los datos de niveles de concentración de contaminantes atmosféricos (inmisión) medidos en una determinada zona. Dicho índice es un valor o un número que indica posibles efectos de la contaminación atmosférica en la salud, lo cual está determinado por los puntos de quiebre en una recta correspondiente.

El índice metropolitano de la calidad del aire, utilizado en México, fue adoptado con ciertas características nacionales del PSI (*Pollution Standard Index*), que a su vez se originó del SUAQI (*Standard Urban Air Quality Index*), desarrollado en 1972 por Ott y Thom (Gutiérrez *et al.*, 1997).

### **3.7.3. Contaminantes atmosféricos y sus efectos.**

#### *2.7.3.1 Partículas suspendidas (PS)*

Las PS pueden estar constituidas por materias sólidas y líquidas, dispersas y arrastradas por el aire. Las partículas de origen natural se componen principalmente de suelos y en ocasiones por partículas de origen biológico (Esporas, virus, fragmentos vegetales y animales). Las que provienen de la combustión generalmente están integradas por partículas atomizadas y cenizas del combustible.

Debido a su tamaño las partículas se clasifican en:

- a) Partículas Menores a 10 micrómetros (PM10). Estas se sedimentan a una velocidad tan lenta que pueden ser inhaladas, lo cual incrementa el potencial tóxico y/o patógeno de sus componentes. La combustión de combustibles fósiles representa el proceso más relevante de la emisión de este tipo de partículas.
- b) Partículas Menores a 2.5 micrómetros (PM2.5). en esta categoría están incluidas las partículas inhalables de mayor penetración en el sistema respiratorio y, por tanto, las más dañinas a la salud y las que por su tamaño interfieren con la dispersión de la luz, contribuyendo a la disminución de la visibilidad.

c) Partículas aerobiológicas. Entre estas partículas suspendidas en la atmosfera se representan las que mantienen actividad microbiana; por ejemplo, bacterias, hongos, virus y protozoos. Por su tamaño (aproximadamente 1 a 100 micrómetros), algunas de estas partículas pueden quedar suspendidas en el aire durante largos periodos. La importancia radica en el potencial infeccioso y patógeno, que depende a la vez de las características del agente patológico, las condiciones ambientales y la resistencia de los posibles huéspedes (Quadri y Sánchez, 1992).

### 3.7.3.2. Monóxido de carbono (CO)

A pesar de que el monóxido de carbono se encuentra presente de forma natural en la atmósfera, es una sustancia tóxica que provoca asfixia, ya que desplaza el oxígeno unido a la hemoglobina. El hierro de la hemoglobina tiene más afinidad por el CO<sub>2</sub> que por el O<sub>2</sub>. Esto provoca que el 1% de los puntos de unión de la hemoglobina de la sangre estén ocupados por el CO<sub>2</sub>; este porcentaje se duplica en fumadores, debido a la inhalación del CO procedente del humo del tabaco. Cuando el CO alcanza 100 ppm el porcentaje anteriormente mencionado se incrementa a 16% ocasionando dolores de cabeza y dificultades respiratorias.

### 3.7.3.3. Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)

Aproximadamente el 60% del azufre que llega a la atmosfera proviene de fuentes naturales: volcanes, océanos (agua finamente pulverizada) y diversos procesos biogénicos; 40% restante, principalmente en forma de SO<sub>2</sub> es consecuencia de actividades humanas. (Figueruelo, 2001)

Las principales fuentes antropogénicas de dióxido de azufre en la atmósfera son la combustión del carbón y la fundición de metales ferrosos y no ferrosos. Durante el proceso de combustión del carbón a elevadas temperaturas el azufre, contenido en el carbón, se transforma en dióxido de azufre. El SO<sub>2</sub> es un irritante pulmonar que resulta nocivo para personas con problemas respiratorios. Sin embargo, los efectos más perjudiciales no los origina el SO<sub>2</sub> sino su producto

de oxidación, los aerosoles de ácido sulfúrico. Dicho ácido irrita la región pulmonar, ocasionando inflamación y los conductos respiratorios se bloquean.

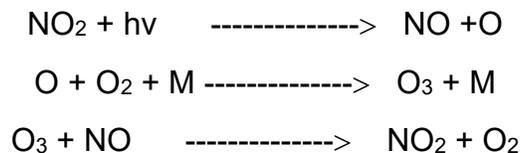
El aerosol de ácido sulfúrico es el principal componente de la lluvia ácida. Disuelve rápidamente la cal ( $\text{CaCO}_3$ ) y corroe los materiales de las construcciones y monumentos. (Spiro y Stigliani, 2004)

#### 3.7.3.4 Óxidos de nitrógeno (NO)

Los óxidos de nitrógeno, no son considerados contaminantes primarios, ya que no afectan directamente la salud. Son los ingredientes principales de la formación de *smog fotoquímico*, la neblina amarillenta que recubre la mayoría de las grandes ciudades del mundo. Los efectos más dañinos del smog son originados por el ozono y otros oxidantes, estos compuestos solo se producen por la acción combinada de los óxidos de nitrógeno y compuestos volátiles orgánicos.

#### 3.7.3.5 Oxidantes fotoquímicos (Ozono $\text{O}_3$ )

Son contaminantes secundarios, es decir que no son descargados directamente en la atmósfera, sino que se forman a través de una serie de reacciones químicas catalizadas por la radiación solar. De estos el ozono es el más abundante en las atmósferas urbanas, debido a las siguientes reacciones: (Quadri y Sánchez, 1992)



Donde: NO = Monóxido de Nitrógeno  
NO<sub>3</sub> = Bióxido de Nitrógeno  
hν = Energía radiante solar  
M = Molécula receptora de energía (hidrocarburos)  
O = Átomo libre de oxígeno

O<sub>2</sub> = Oxígeno  
O<sub>3</sub> = Ozono

Normalmente hay un ciclo en el cual el ozono reacciona con el NO y regresa a la molécula inicial de NO<sub>2</sub>. Sin embargo, en episodios con altas concentraciones de ozono el ciclo se rompe, ya que algunos hidrocarburos reaccionan con el NO impidiendo que reaccione con el ozono (Rosales, 2004).

A este grupo de reacciones forman el llamado ciclo fotolítico del óxido de nitrógeno. Figura 1.

A diferencia del ozono estratosférico, que nos protege de la radiación UV, el ozono presente a nivel del suelo, resulta perjudicial. Ablanda el caucho, destruye las plantas y en los humanos causa problemas respiratorios e irritación ocular.

Los efectos nocivos del ozono proceden de sus características como oxidante fuerte. El ozono reacciona con moléculas que tienen dobles enlaces C=C para originar epóxidos. Estas moléculas con dobles enlaces son abundantes en el caucho, en el sistema fotosintético de las plantas y en las membranas pulmonares (Spiro y Stigliani, 2004).

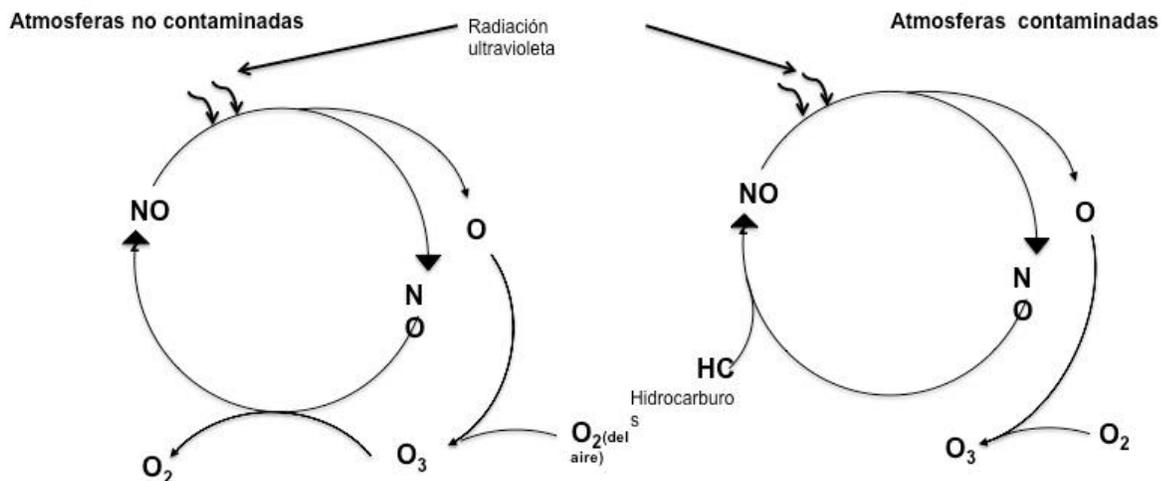


Figura 1: Ciclo fotolítico de los óxidos de nitrógeno y la formación de ozono. (Fuente: Rosales 2004)

#### **3.7.4 Mecanismos naturales de Limpieza atmosférica**

Dentro de los mecanismos de limpieza del aire se encuentra el lavado por precipitación en donde los iones contaminantes en la atmósfera son lavados por la lluvia incorporándose a los ecosistemas. Los principales iones de origen antropogénico son los sulfatos, nitratos, amonio e hidrógeno, los cuales tienen elevado poder acidificante (Pérez *et al.*, 2006).

## **4.- OBJETIVOS**

### ***4.1 Objetivo General***

- Realizar un estudio bacteriológico y fisicoquímico del agua de lluvia colectada en recipientes de almacenamiento, en la zona metropolitana de la Ciudad de México.

### ***4.2 Objetivos particulares***

- Colectar las muestras de lluvia en recipientes de almacenamiento
- Determinar los indicadores de contaminación en el agua: Coliformes totales y Coliformes fecales.
- Determinar los parámetros fisicoquímicos: pH, turbiedad, conductividad, alcalinidad total, dureza total, cloruros y sulfatos.
- Obtener los valores IMECA de las regiones, fechas y horarios en los que se muestree el agua de lluvia.
- Comparar los resultados con la NOM 127-SSA1-1994. Para Agua potable
- Correlacionar los datos ambientales del IMECA con los resultados obtenidos

## **5.- JUSTIFICACIÓN**

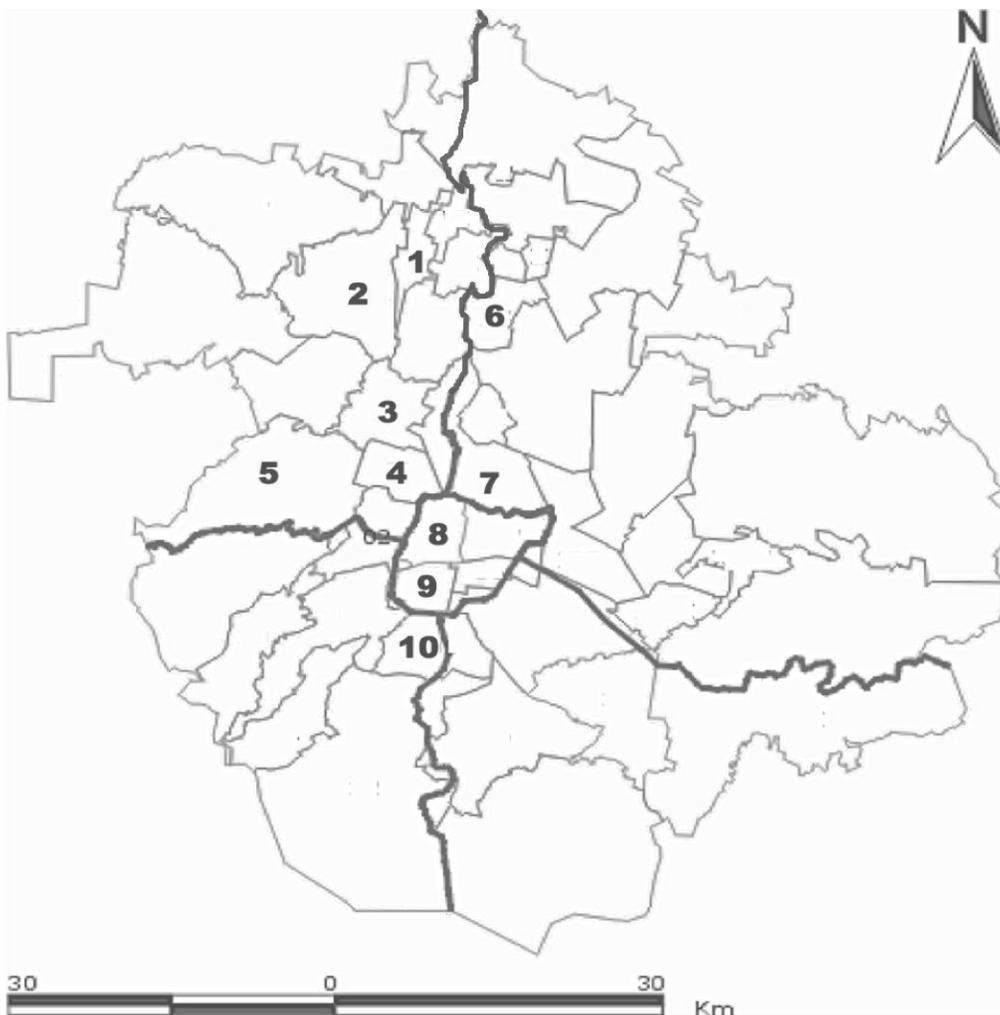
Debido a la problemática de disponibilidad de los recursos hídricos, a nivel global, sin excepción en la Ciudad de México y su Zona Metropolitana; se plantea la opción de aprovechar las precipitaciones pluviales, principalmente en aquellos lugares donde la escasez es severa como en las zonas agrícolas, ganaderas y en general en zonas rurales en las cuales las personas no cuentan con este vital recurso o lo tienen muy limitado. En las zonas urbanas también es muy importante aprovechar este recurso, ya que en los periodos de lluvia se desperdicia al mezclarse con las aguas residuales domésticas.

El presente estudio brindará información sobre la calidad del agua de lluvia de la Ciudad de México para su posterior aprovechamiento; reduciendo así la demanda de este recurso tan indispensable.

## 6.- ZONA DE ESTUDIO

La zona metropolitana de la Ciudad de México, enclavada en una cuenca endorreica, es una de las metrópolis con mayor nivel de contaminación atmosférica en el mundo. Las características físicas de la zona, impiden la dispersión de los contaminantes atmosféricos que se depositan en los ecosistemas forestales de la zona y de las áreas aledañas.

La zona de estudio comprende los siguiente municipios y delegaciones:



*Figura. 2: Localización de los puntos de muestro. Noroeste: Cuautitlán Izcalli (1), Atizapán (2), Tlalnepantla (3), Azcapotzalco (4), Naucalpan (5). Noreste: Ecatepec (6), Gustavo A. Madero (7). Centro: Cuauhtémoc (8), Benito Juárez (9). Suroeste: Coyoacán (10).*

## 7.- MATERIALES Y MÉTODOS

Se colectaron 99 muestras de agua de lluvia de diferentes sitios del área metropolitana de la ciudad de México, en contenedores limpios de aproximadamente 50cm de diámetro y con una capacidad aproximada de 15 Lts. que se expusieron solo a una descarga, o varias descargas, pero del mismo día durante 2010, 2011 y parte del 2012.

Del contenedor se tomó una muestra en bolsa estéril para el análisis bacteriológico y otra en botellas de 500ml a 1.5 L (dependiendo del volumen de agua captado) para las determinaciones fisicoquímicas. Las muestras se conservaron en refrigeración hasta su procesamiento.

En el laboratorio se determinaron los parámetros bacteriológicos coliformes totales y coliformes fecales mediante la técnica de Filtro de membrana, sembrando en medio m Endo e incubando a 35.5 °C por 24 horas para los Coliformes totales y en medio mFC e incubando en baño de agua a 44.5°C por 24 horas para los Coliformes fecales (APHA-AWWA-WEF, 1998).

Los Parámetros fisicoquímicos efectuados se presentan en el cuadro 2 y las técnicas se hicieron de acuerdo a los métodos estandarizados (APHA-AWWA-WEF, 1998).

Parámetro	Técnica
Conductividad	Conductimetría
pH	Potenciométrica
Alcalinidad total	Titulación con indicador
Dureza total	Titulación con EDTA
Sulfatos	Turbidimétrico
Cloruros	Argentométrico
Turbiedad	Turbidímetro

*Cuadro. 2: Parámetros fisicoquímicos y técnica por la cual se determinaron*

Para establecer la variación espacial y temporal se utilizó el software Minitab Statistical versión 5. Se hizo un análisis estadístico descriptivo, usando los diagramas de cajas. Aplicando los datos del Anova y el coeficiente de correlación de Pearson (Dalas 2000).

## 8.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### **8.1 Variación espacial y temporal de los parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos.**

En México el 68% de la precipitación normal mensual, ocurre entre Junio y Septiembre (CONAGUA 2011). Sin embargo, la ZMVM presenta un régimen anual definido de precipitación entre los meses de mayo a octubre, debido a la intensidad y frecuencia de fenómenos meteorológicos en las costas del Pacífico y Atlántico mexicanos. Los otros meses son de sequía, aunque pueden tener lugar lluvias aisladas (SMAdf 2005) por consiguiente en este trabajo el periodo tomado como estación de “LLUVIAS” se consideró de mayo a octubre y el periodo de “SECAS” de noviembre a abril.

Para conocer la variación de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos analizados de las muestras del agua de lluvia, así como de los parámetros del IMECA, se hicieron diagramas de cajas por ubicación y por estación (Figuras 3 y 4). También se hizo un análisis de varianza por cada parámetro.

#### **8.1.1 Coliformes Totales. (unidades UFC/100ml)**

El 96.9% de las muestras presentaron coliformes totales -CT- (Fig. 5)

Para manejar los datos bacteriológicos, a los valores (n) se les saco raíz cuadrada de  $n + 0.5$  En coliformes totales, aunque el valor máximo en lluvias fue de 334 el 75% de las muestras están en un rango de 0.7 a 19; mientras que en secas el valor máximo fue de 200 y el 75 % de las muestras cayeron entre 0.7 y 17.

En general el diagrama de caja muestra simetría (Fig. 4)

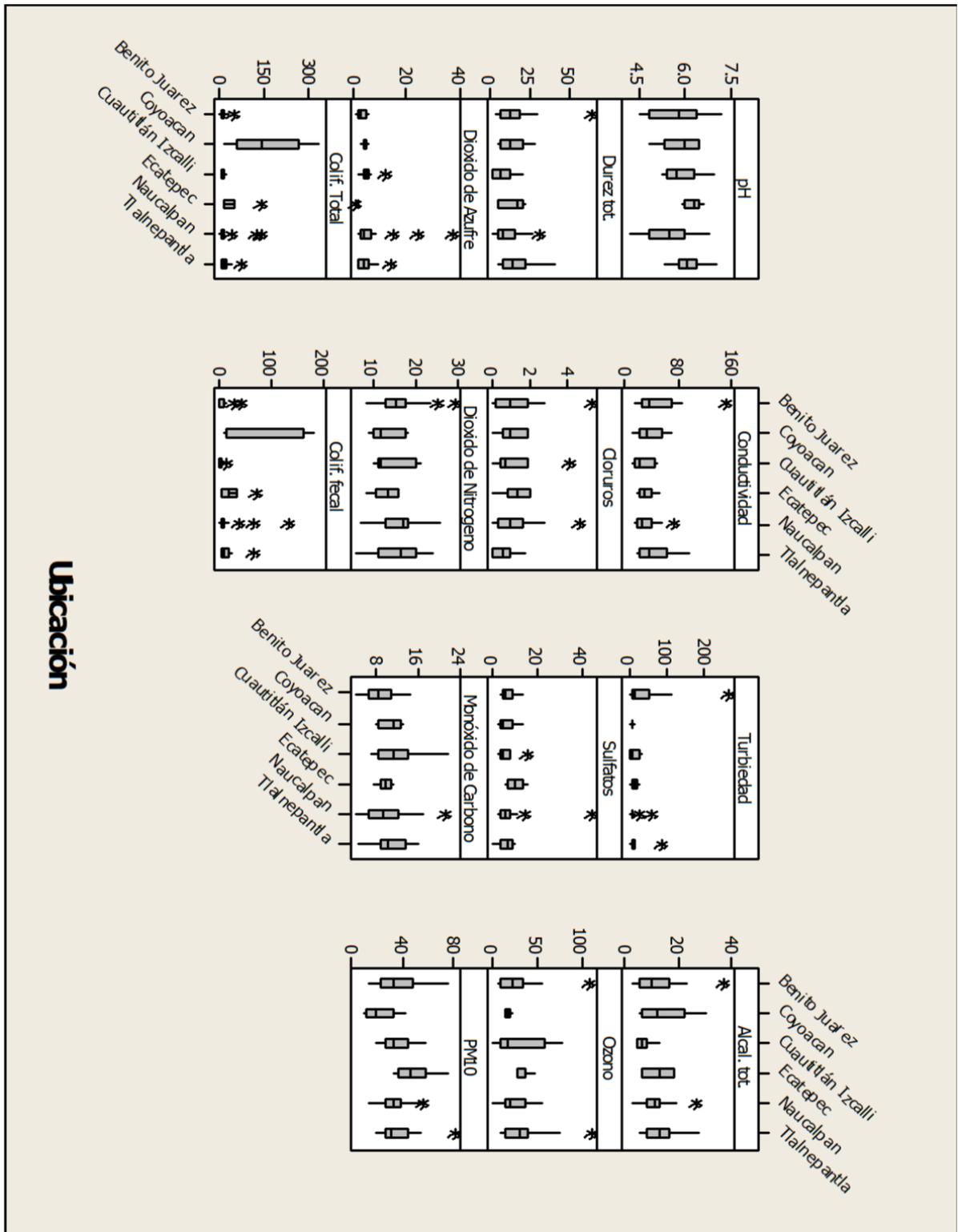


Figura. 3: Diagrama de caja por ubicación, de acuerdo a la estadística descriptiva

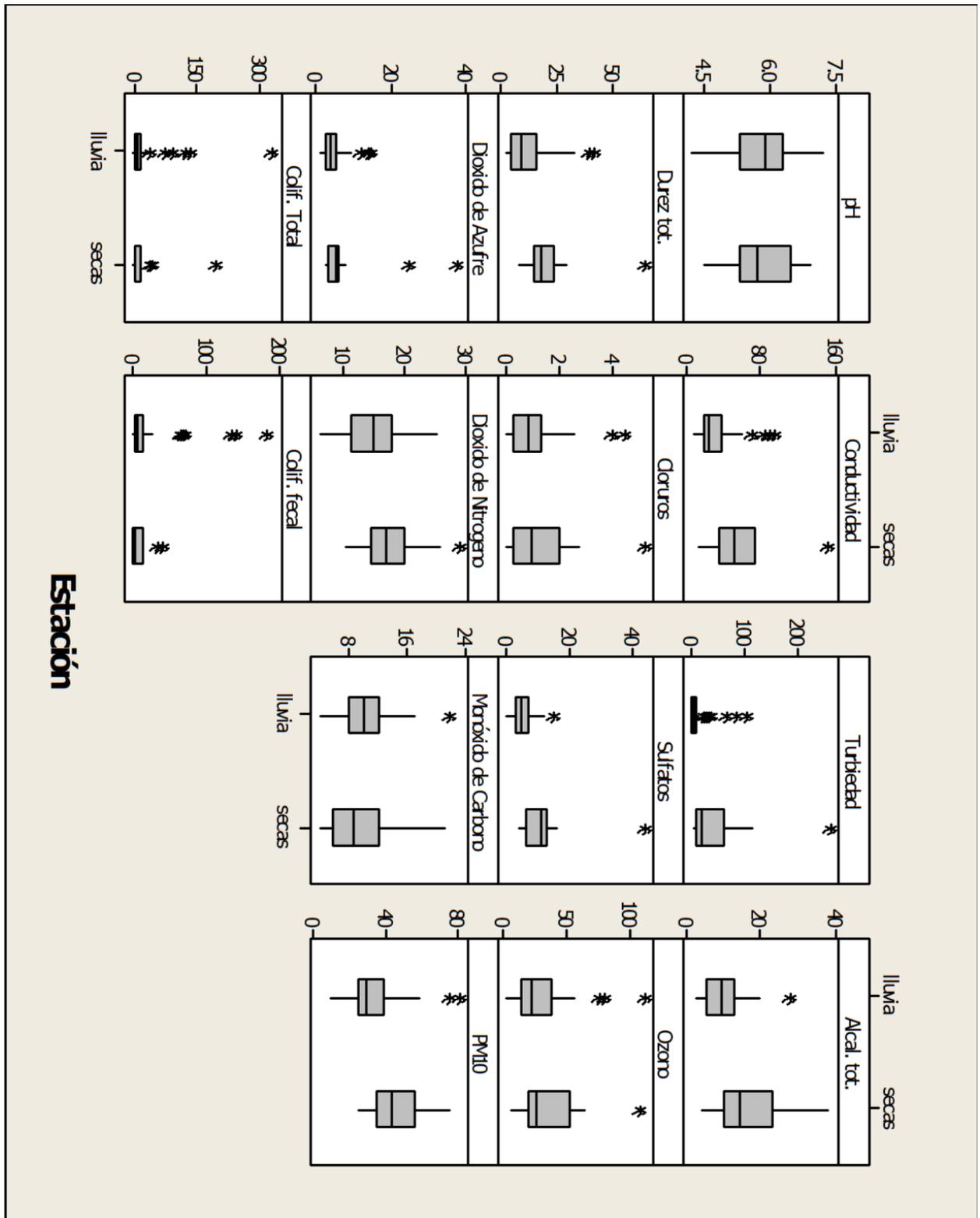


Figura. 4: Diagrama de caja por estación, de acuerdo a la estadística descriptiva.

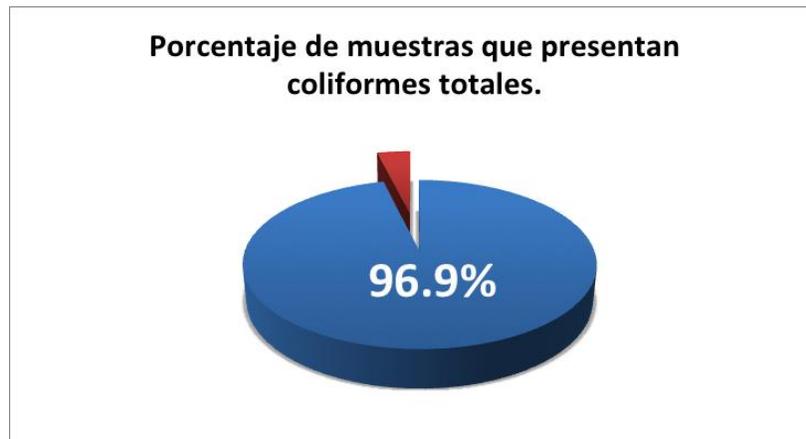


Figura. 5: Porcentaje de muestras que presentan coliformes totales.

De acuerdo al ANOVA no se encuentran diferencias significativas entre los dos periodos de lluvias y secas ( $F=0.03$ ,  $P=0.871$ ).

El lugar que tuvo las concentraciones más altas fue Coyoacán con una distribución asimétrica positiva (en donde la media suele ser mayor que la mediana y los valores tienden a concentrarse hacia la parte inferior de la distribución y se extienden más hacia la derecha). Lo que nos indica que la zona suroeste de la ciudad, mantiene sus calores de contaminación por

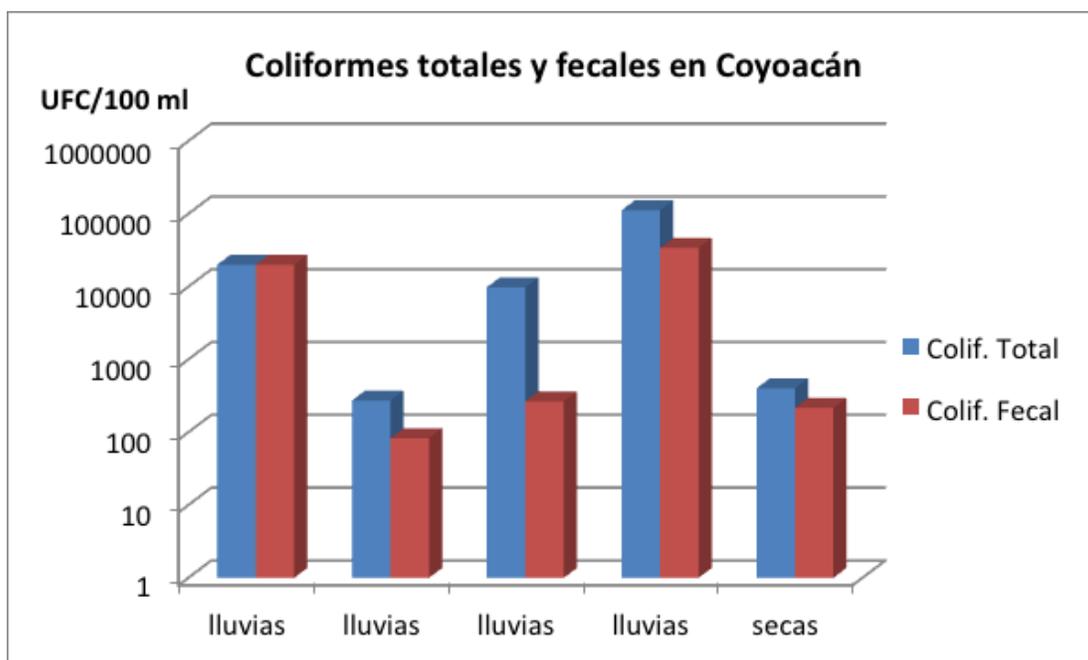


Figura. 6: Coliformes totales y fecales en delegación Coyoacán

CT en un rango de dispersión. La media fue de 158, la mediana de 141 y el valor máximo de 334, sin embargo, el 75 % de las muestras oscilaron entre 16 y 267 (Fig.6)

En general las demás delegaciones y municipios presentaron concentraciones bajas con distribuciones casi simétricas y una dispersión de los datos muy baja ya que la media y mediana presentaron valores similares (Fig. 3). El menos contaminado fue el municipio Cuautitlán Izcalli con media de 9 y mediana de 6, seguido de la delegación Benito Juárez con media de 11 y mediana de 9 (Fig. 7).

El ANOVA por ubicación mostró diferencias significativas ( $F = 13, p = 0.000$ )

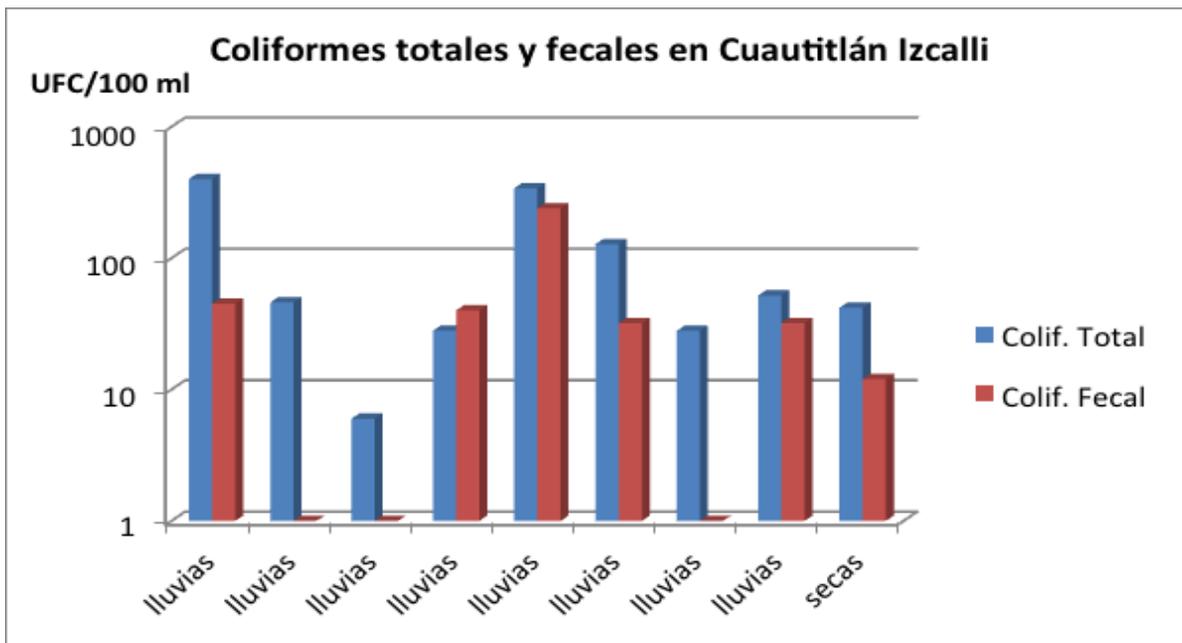


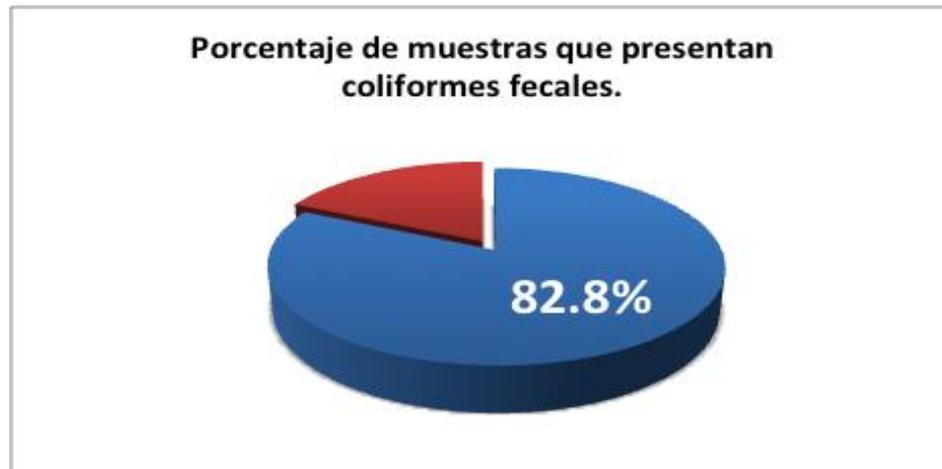
Figura. 7: Coliformes totales y fecales del municipio Cuautitlán Izcalli

### 8.1.2 Coliformes Fecales. (unidades UFC/100ml)

El 82.8% de las muestras presentaron coliformes fecales (Fig. 8)

Los coliformes fecales registran valores menores a las totales, presentando el valor más alto con 184.4, pero teniendo el 75% de las muestras dentro de un rango de 0.707 a 15.39 para la estación de lluvias y entre 0.707 y 14.16, con un valor máximo de 42.4 para la estación de secas.

El diagrama de caja en general también muestra simetría (Fig. 4)



*Figura. 8: Porcentaje de muestras que presentaron coliformes fecales.*

El ANOVA por estación mostró que no hay diferencias significativas (( $F= 0.68$ ,  $p= 0.411$ )

En coliformes fecales el comportamiento de los datos fue igual que en los coliformes totales siendo también la delegación Coyoacán quien presentó las concentraciones más altas con una asimetría positiva (media de 73.2 y mediana de 16,3), el 75 % de los valores están entre 9.14 y 162,9 y con un valor máximo de 184.4

Las delegaciones y/o municipios con las concentraciones más bajas fueron Cuautitlán Izcalli (Fig 7) y Benito Juárez con medias de 5 y 8 y medianas de 5 y 7 respectivamente (Fig 9).

EL ANOVA por ubicación mostró diferencias significativas ( $F = 4.86$ ,  $p= 0.001$ )

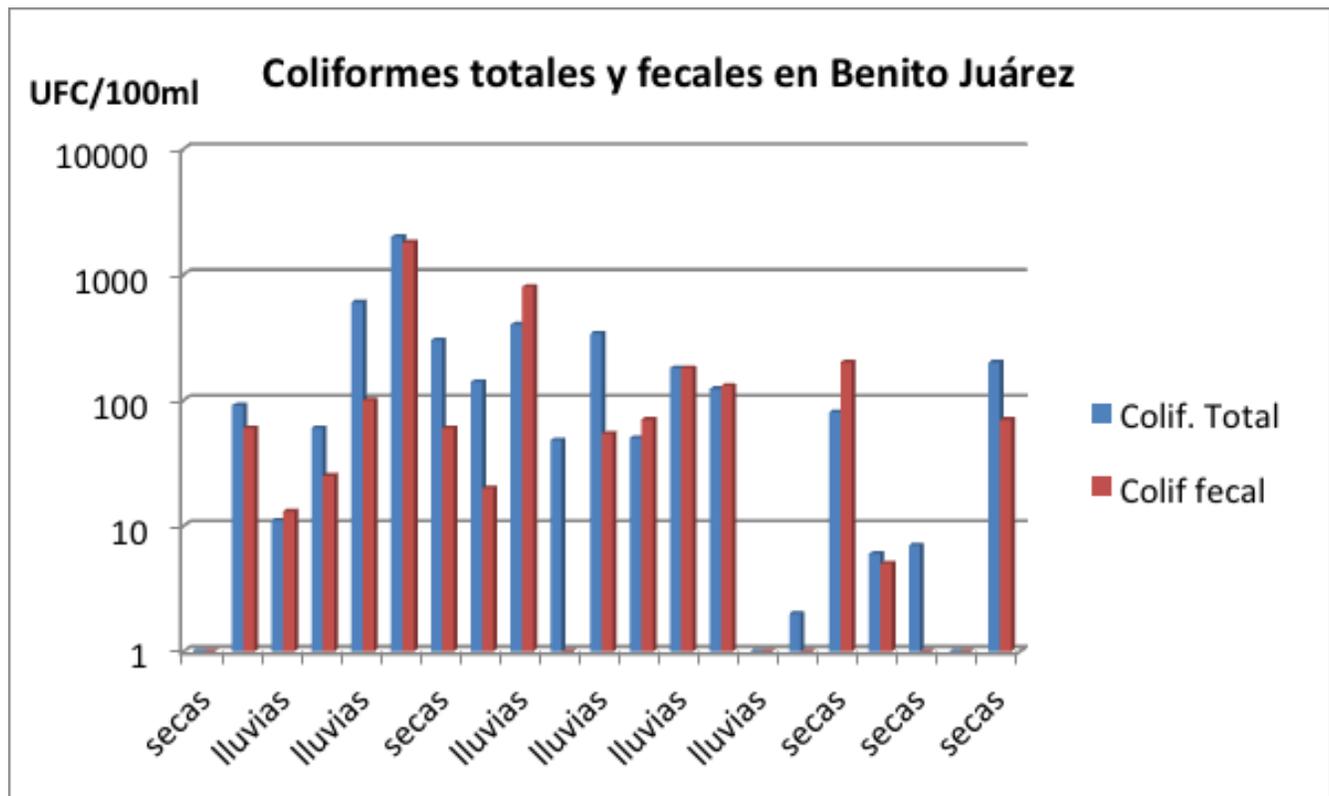


Figura. 9: Coliformes totales y fecales de la delegación Benito Juárez.

Por otro lado, la presencia de coliformes en el aire es preocupante, pues la idea de captación de agua de lluvia para ayudar a solucionar el problema de escasez de la misma, ha hecho que en muchos lugares se capte la lluvia para el uso doméstico e incluso hay campañas para que la gente lo haga. El problema es que muchas veces la gente cree que el agua de lluvia es limpia y en este estudio y los revisados en la literatura nos indican lo contrario. Así que, además de captar el agua de lluvia hay que enseñar a la gente, a darle el uso más adecuado.

### 8.1.3 Conductividad. Eléctrica (CE) (unidades: $\mu\text{s}/\text{cm}$ )

Por estación la estadística descriptiva nos refiere que en la temporada de secas, hay un incremento en los valores de CE con medias de 31.03 y 56.51 y medianas de 24.5 y 51.50 para lluvias y secas respectivamente. La distribución de los datos indica asimetría positiva pero la dispersión es más grande en lluvias que en secas. El incremento en la CE, en época de

secas, puede explicarse a que a menor frecuencia de las lluvias, hay mayor deposición de iones en la atmósfera, los cuales son arrastrados por el agua al precipitarse.

Aunque los valores máximos fueron de 94.9 en lluvias y 15.1 en secas, el 75% de las muestras estuvieron en el ámbito de 8.9 a 37.15 (lluvias) y 12.5 y 71.8 (secas)

Aplicando el análisis de varianza por estaciones sí hubo diferencias significativas ( $F=14.83$ ,  $P=0.000$ ).

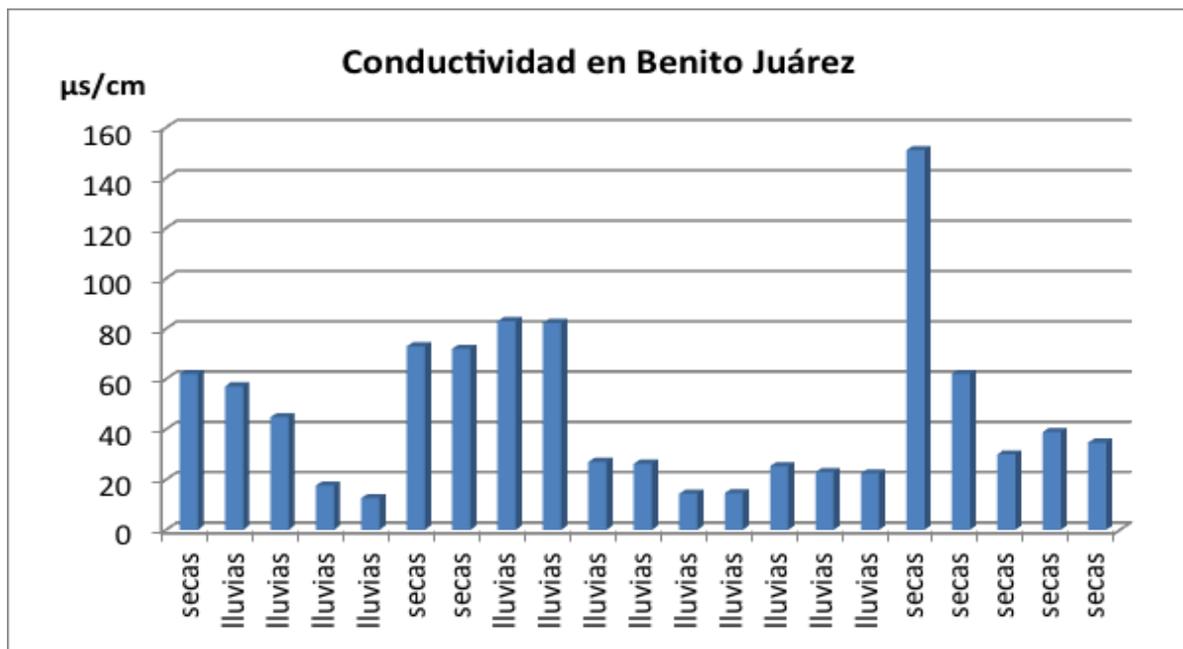


Figura. 10: Valores de la conductividad eléctrica en la delegación Benito Juárez

La mayor variabilidad en la distribución de los datos la tuvo Benito Juárez y Tlalnepantla con distribuciones asimétricas positivas, con medias de 46.39 y 42.06 mayores que las medianas 34.7 y 20.35 respectivamente.

La localidad con mayor CE fue la delegación Benito Juárez (Fig. 10) teniendo una media de 46.4 y mediana de 34.7, valor más alto de 151 y el 75% de las muestras en un ámbito entre 12.6 y 67; seguido de Tlalnepantla (Fig. 11) con media de 43.1 y mediana de 33.2, valor más alto 94.9 y el 75 % de las muestras en un ámbito entre 15 y 60.9. Contrastando con los valores más bajos del municipio de Naucalpan (Fig. 12), media 12.5 y mediana 37.1, valor más alto de

71.8 y 75 % de las muestras entre 12.5 y 37.1 La distribución de los datos es asimétrica positiva en todas las localidades, presentando la mayor dispersión Benito Juárez y Tlalnepantla. El ANOVA entre ubicaciones indica que no hay diferencias significativas ( $F=1.83$ ,  $p= 0.117$ ).

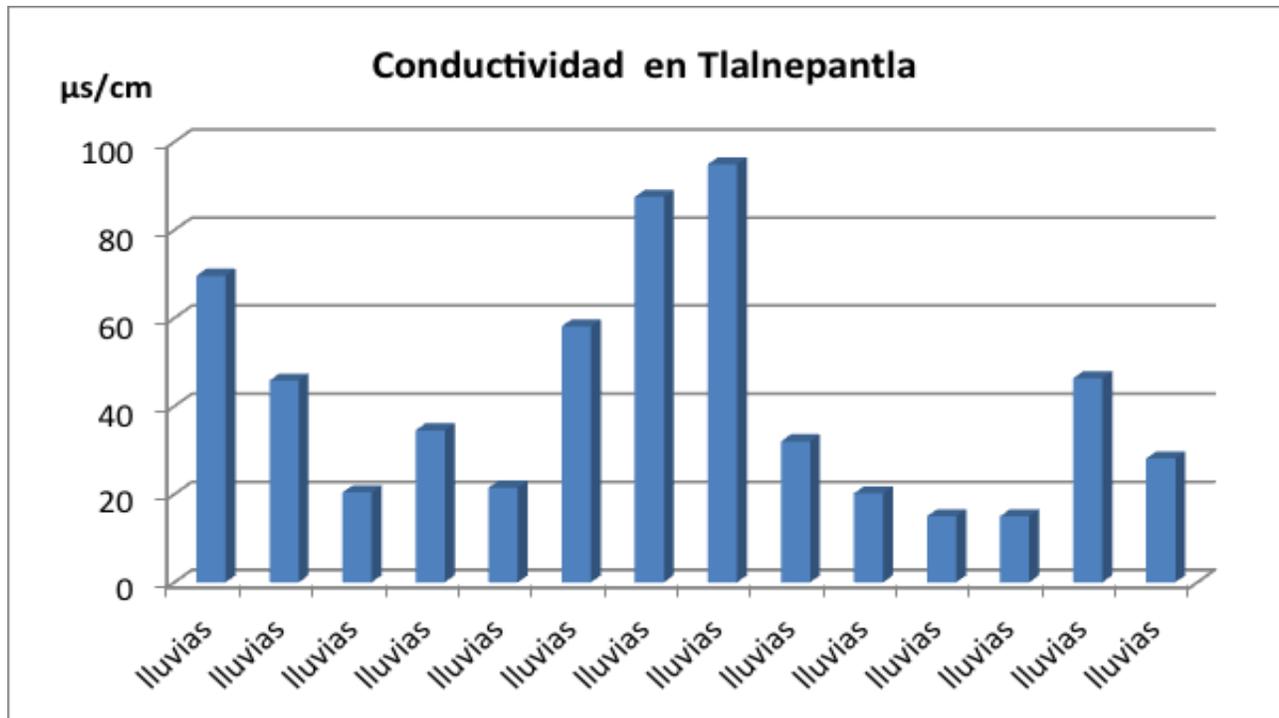


Figura. 11: Valores de la Conductividad eléctrica en el municipio de Tlalnepantla.

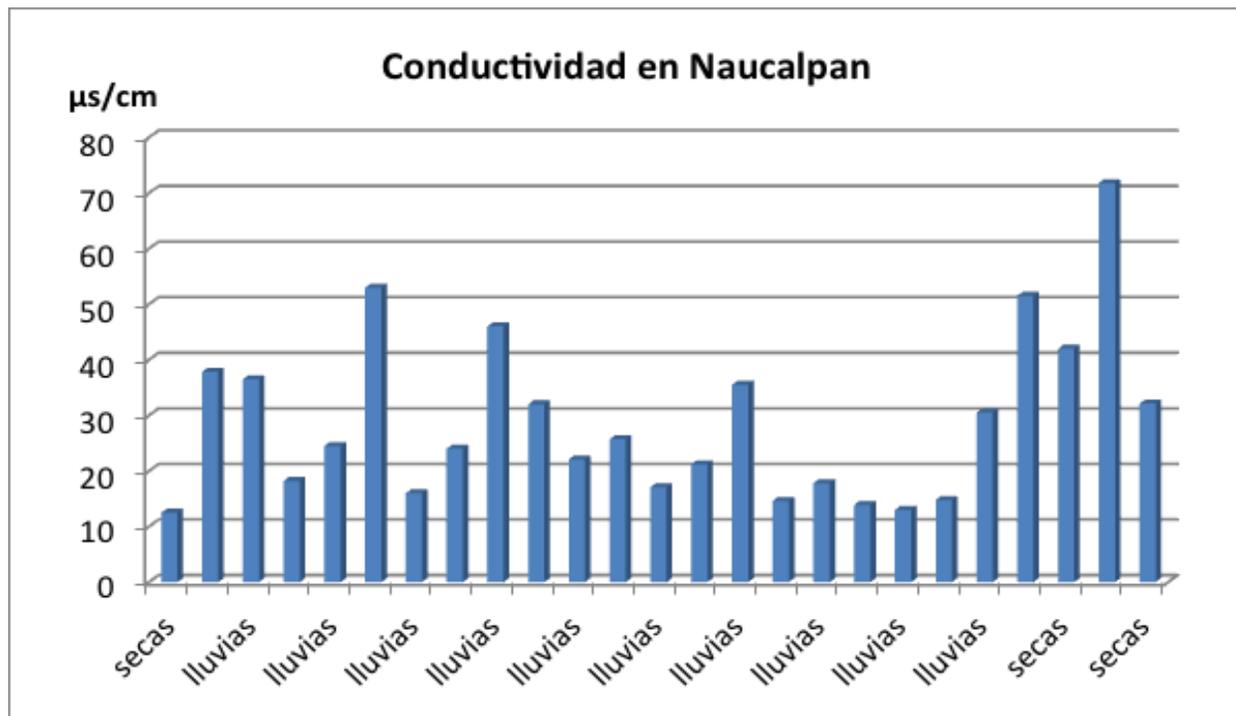


Figura. 12: Valores de la conductividad eléctrica en el municipio de Naucalpan.

#### 8.1.4 pH.

La media y mediana en lluvias fue de 5.7 el valor máximo de 7.2 y el 75 % de los datos estuvo entre 4.1 y 6.3. En secas media igual que en lluvias, mediana 5.7, valor máx. 6.9 y 75 % de las muestras, se encuentran en un rango de 4.47 y 6.4.

La distribución de los datos es muy simétrica.

Con el análisis de varianza, se tiene que, entre lluvias y secas, no hay diferencias significativas ( $F=0.74$ ,  $p= 0.391$ ).

Por ubicación el pH más alto lo tuvo Ecatepec (Fig. 13) con media y mediana de 6,2 y el más bajo Benito Juárez y Cuautitlán Izcalli con 5.7 y 5.8 de media y 5.8 y 5.7 de mediana respectivamente (Fig. 14 y 15). La distribución de los datos es simétrica.

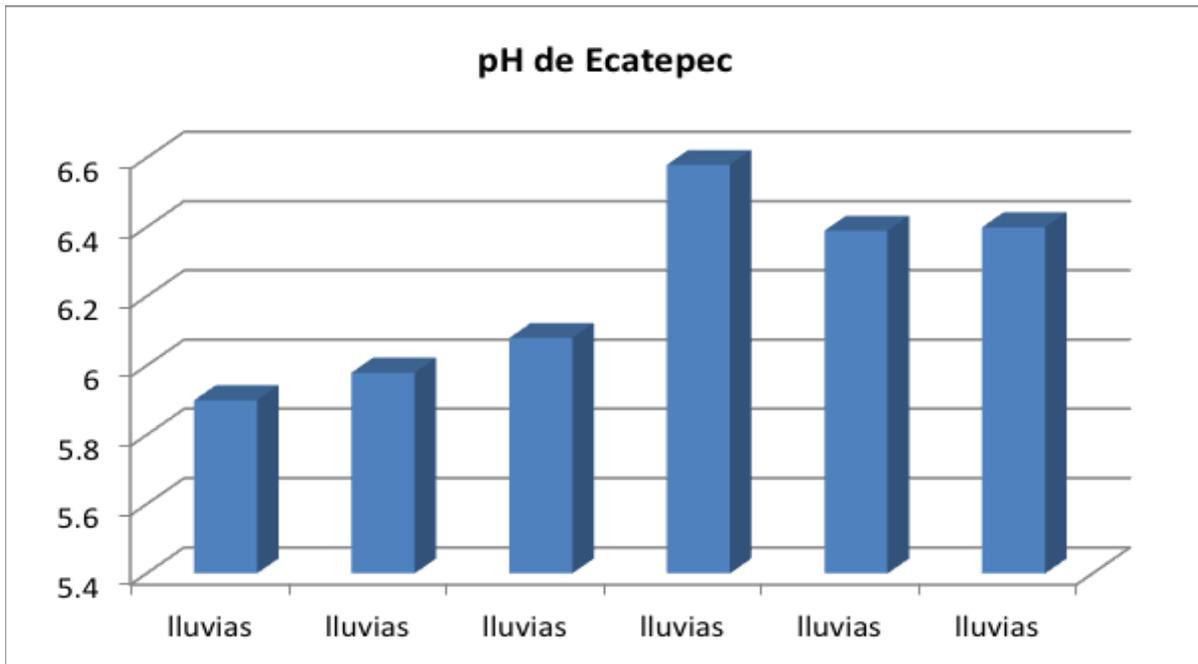


Figura. 13: Valores de pH en el municipio de Ecatepec.

El ANOVA por ubicación indica que si hay diferencias significativas ( $F=3.04$ ,  $P=0.015$ ).

En condiciones naturales el agua de lluvia es ligeramente ácida y tiene un pH de 5.6, esta acidez se debe a las pequeñas cantidades de dióxido de carbono que se encuentran en la atmósfera y que reaccionan con el agua para formar ácido carbónico. Cuando la lluvia tiene una acidez mayor que la normal (es decir un pH menor a 5.6) se considera como lluvia ácida (SMAdf 2008).

Por lo anterior en este estudio el pH se ha mantenido en general en un rango aceptable para el agua de lluvia, tanto en secas como en lluvias, pero entre las ubicaciones si hubo diferencias significativas.

De acuerdo al pH la lluvia ácida se presentó en el 34.1 % de las muestras en época de lluvia (Fig. 16) y el 28.57% en secas (Fig. 17)

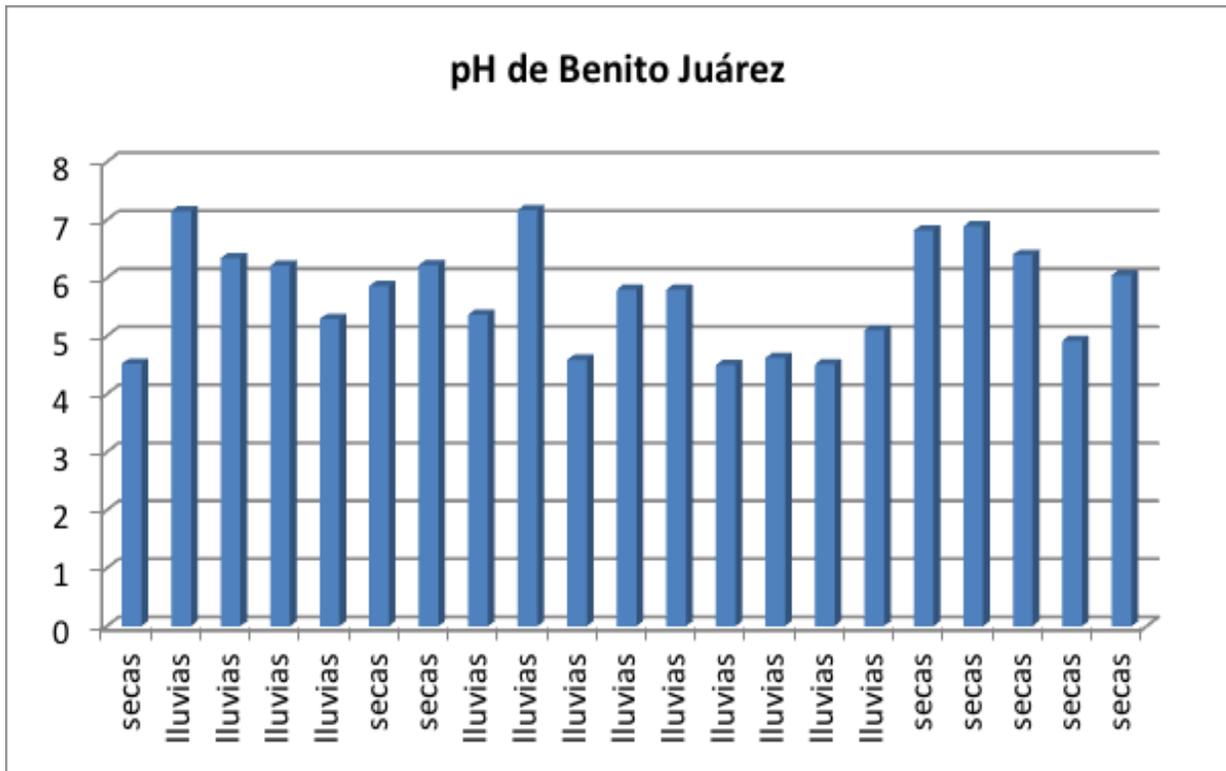


Figura. 14: Valores de pH en la delegación Benito Juárez.

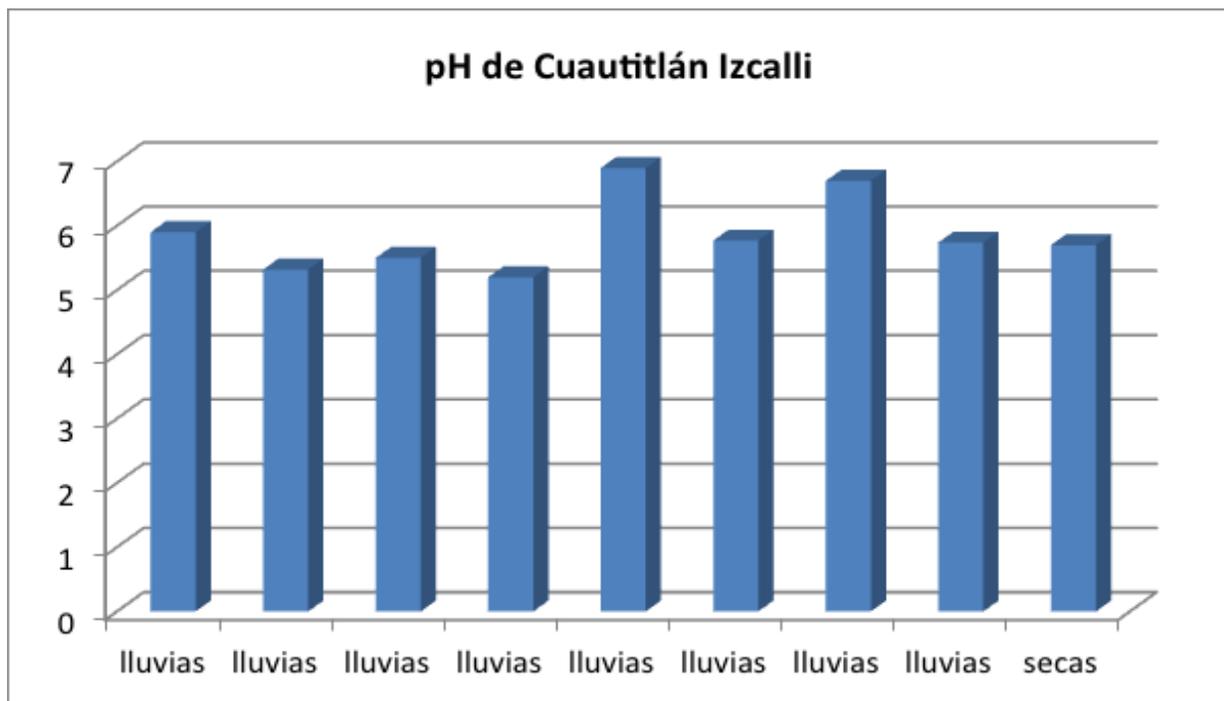


Figura. 15: Valores de pH en el municipio de Cuautitlán Izcalli.



*Figura. 16: Porcentaje de muestras que presentan lluvia ácida durante la estación de lluvias.*



*Figura. 17: Porcentaje de muestras que presentan lluvia ácida durante la estación de secas.*

### 8.1.5 Turbiedad.

Las partículas suspendidas en el agua, posiblemente arrastradas de la atmósfera al momento de la lluvia, son representadas con el parámetro de la turbiedad del agua. Con el análisis encontramos una mayor turbiedad en las muestras, durante la estación de secas con respecto a la de lluvias (media y mediana de 44.1 y 16.7 en secas y de 10 y 3.75 en lluvias).

La distribución de datos en lluvias fue muy simétrica, pero en secas fue asimétrica positiva.

El ANOVA mostró diferencias significativas entre las épocas ( $F=8.36$ ,  $p=0.005$ ).

Benito Juárez tuvo la turbiedad más alta (media de 38 y mediana de 14.2), valor más alto 260 pero el 75 % de las muestras estuvieron entre 1.04 y 50. Con una distribución asimétrica positiva. (Fig. 18).

Los valores más bajos los presentó Coyoacán con media de 4.3 y mediana de 4.2 y una distribución de datos muy simétrica (Fig. 19).

El ANOVA no mostró diferencias significativas entre las ubicaciones ( $F= 1.56$ ,  $p=0.183$ ).

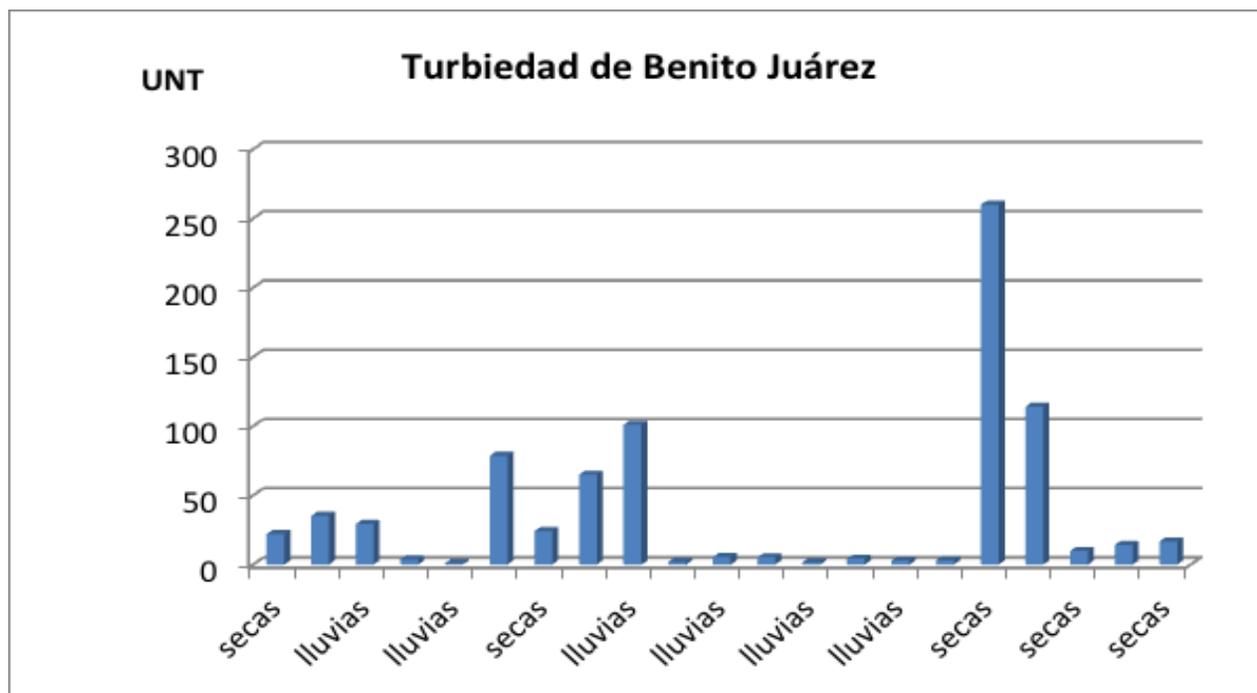


Figura. 18: Valores de turbiedad expresada en NTU, de la delegación Benito Juárez

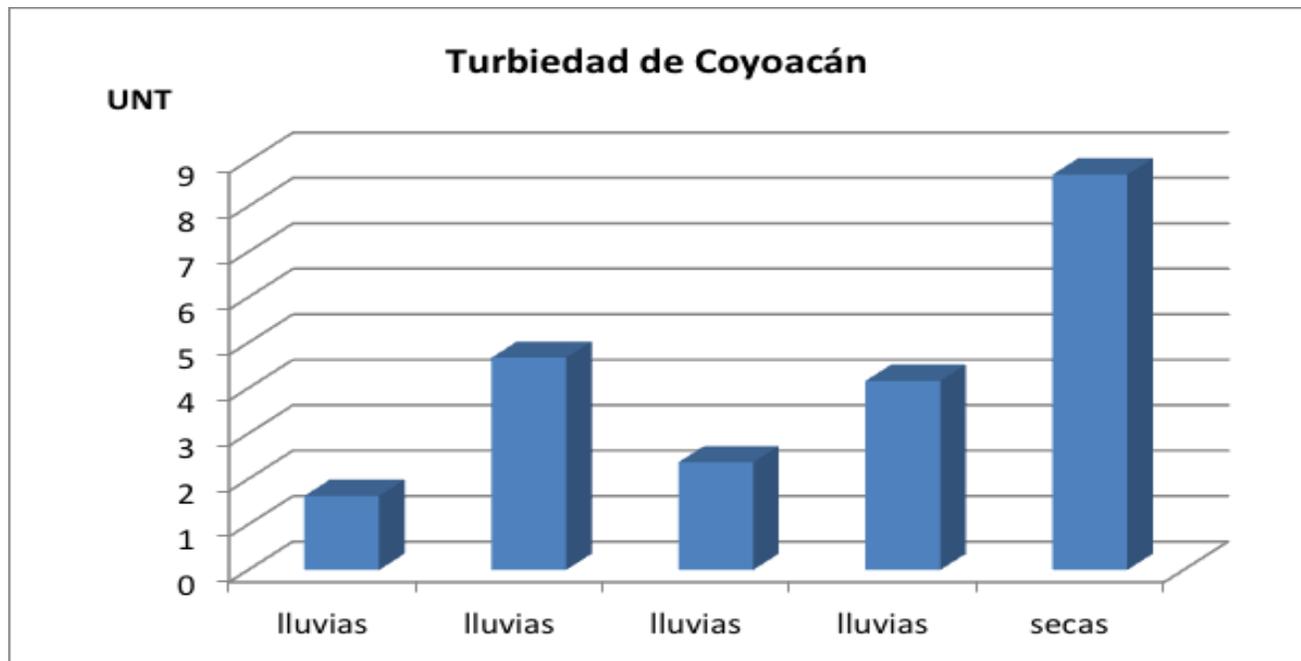


Figura. 19: Valores de Turbiedad expresada en NTU, de la delegación Coyoacán.

#### 8.1.6 Alcalinidad Total

Como es de esperarse la estación de secas, obtiene los niveles más altos de alcalinidad, con una media de 16.48 y mediana de 14 en secas y de 9.8 y 9.1 en lluvias. El 75% de las muestras entre 2.4 y 12.56 en lluvias y de 4.3 y 22.5 en secas.

En lluvias la distribución es simétrica y en secas es asimétrica positiva

El ANOVA mostró diferencias significativas entre las ubicaciones ( $F=17.01$ ,  $P=0.000$ ).

Ecatepec y Tlalnepantla registraron los valores más altos de alcalinidad, media de 12.32 y mediana de 12.55 el primero y 12.6 y 12.2 el segundo. El valor mas alto para Ecatepec fue 18.1 y el 75 % de los valores estuvieron entre 6.3 y 18.1 (Fig. 20). El valor más alto de Tlalnepantla fue 27.7 y el 75% estuvo entre 4.85 y 16.3 (Fig. 21).

C. Izcalli registraron los valores más bajos, media de 6.3 y mediana de 5.6, valor más alto 12.4 y el 75% de las muestras estuvieron entre 3.64 y 8.12 (Fig. 22).

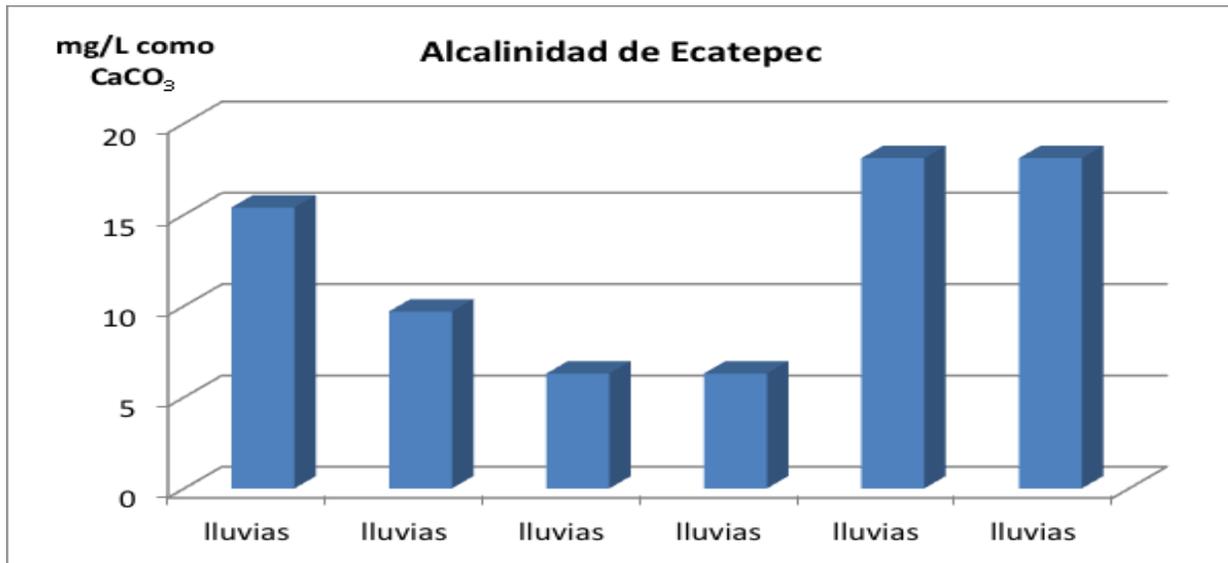


Figura. 20: Alcalinidad como mg/L CaCO<sub>3</sub>, del municipio de Ecatepec.

La distribución de los datos en los tres municipios fue muy simétrica

De acuerdo al ANOVA, no se encuentran diferencias significativas entre Ubicaciones (F= 2.03,  $p= 0.084$ ).

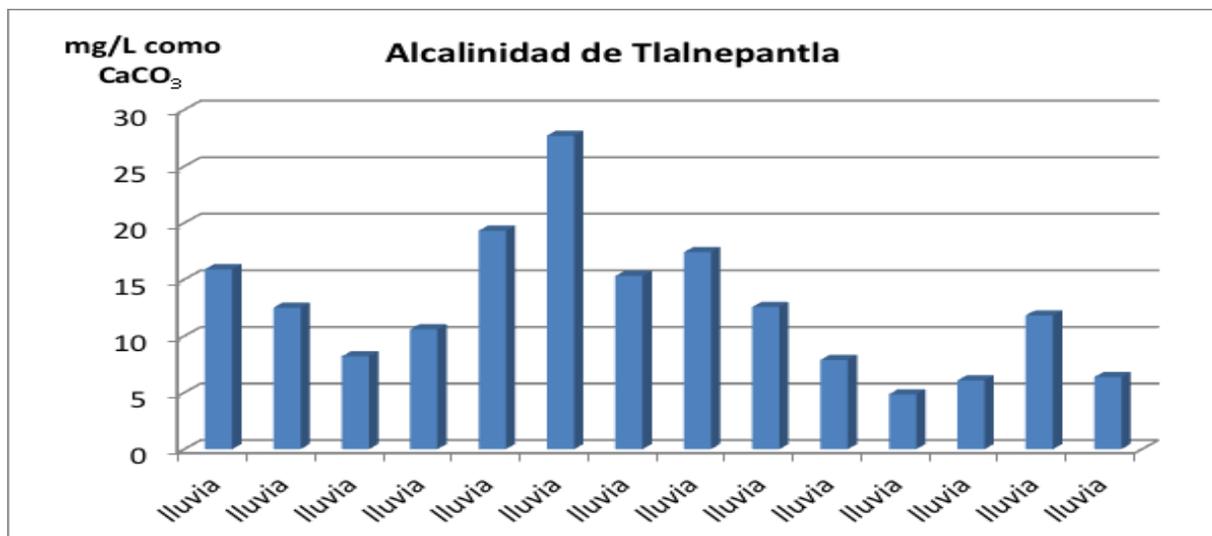


Figura. 21: Alcalinidad como mg/L CaCO<sub>3</sub>, del municipio de Tlalnepantla.

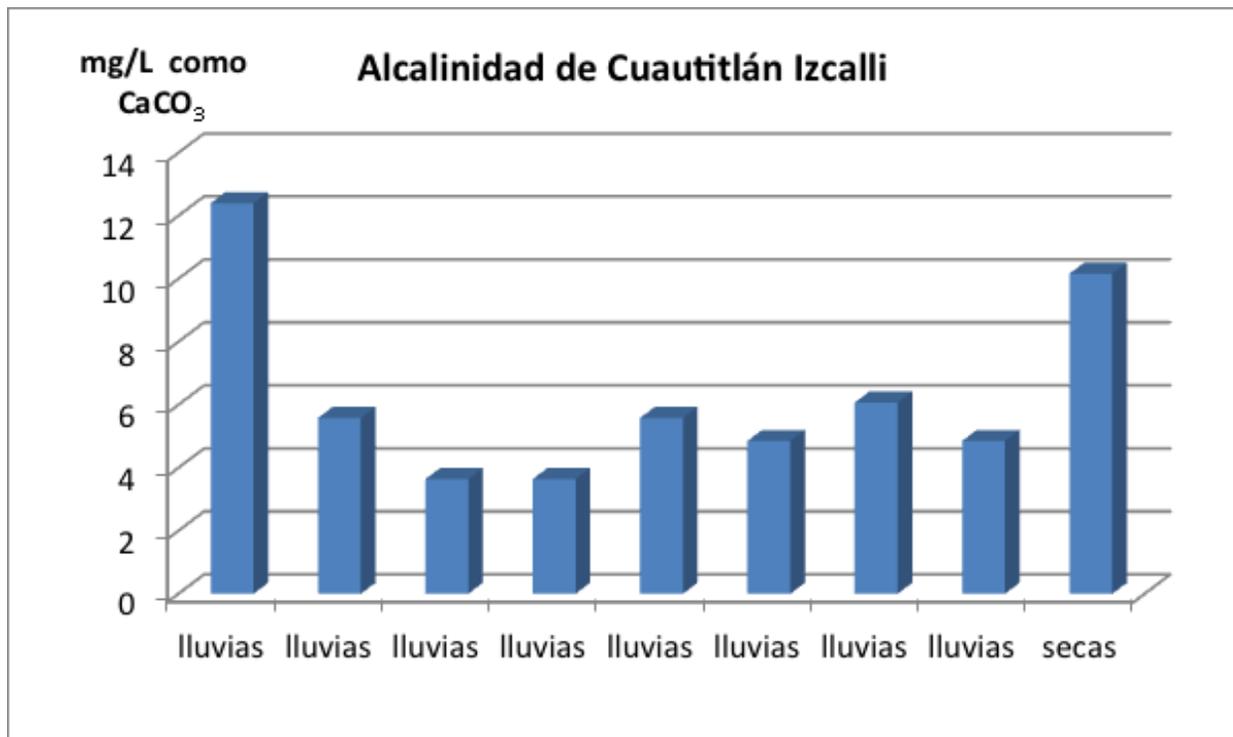


Figura. 22: Alcalinidad como mg/L CaCO<sub>3</sub>, del municipio de Cuautitlán Izcalli.

### 8.1.7 Dureza Total.

Los iones de Ca y Mg, son componentes comunes en el suelo, pero pueden existir en el agua de lluvia, debido a las partículas de suelo sopladas y enviadas a la atmosfera por efecto del viento (Baez & Belmont 1987), pasando a formar parte de los contaminantes atmosféricos, los cuales presentan un comportamiento estacional típico: mayores concentraciones en la temporada seca y menores durante la temporada de lluvia (SMAdf 2010).

Para dureza, la media y la mediana de la temporada de secas fue mayor que la de lluvias, 21.3 y 17.80 en la primera y 11.5 y 8.10 en la segunda. El valor máximo de secas fue 64.4 pero el 75 %de los valores estuvieron entre 7.9 y 23.8 y en lluvias el valor máximo fue 41.4 pero el 75 % de las muestras estuvo entre 2 y 15.5.

La distribución de los datos es muy simétrica en ambos periodos.

De acuerdo al ANOVA si hay diferencias significativas entre las dos épocas (F= 13.98, p= 0.000).

El municipio que presenta valores más bajos en relación con las demás ubicaciones, es C. Izcalli con media de 7.78 y mediana de 6,1, valor máximo de 20.2 pero el 75% de las muestras se encontró entre 2 y 12.8 (Fig. 23). Mientras que Tlalnepantla y Ecatepec tuvieron los valores más altos con medias y medianas de 16.86 y 13.5 para Tlalnepantla y 14.47 y 18.1 para Ecatepec (Fig. 24 y 25). El 75% de sus muestras dentro de un rango de 4 a 21.8 y de 4 a 20.6 respectivamente.

La distribución de datos en Tlalnepantla fue más simétrica y en Ecatepec fue asimétrica negativa (mediana mayor que media).

En el ANOVA no se encontraron diferencias significativas entre ubicaciones ( $F=1.65$ ,  $p=0.157$ )

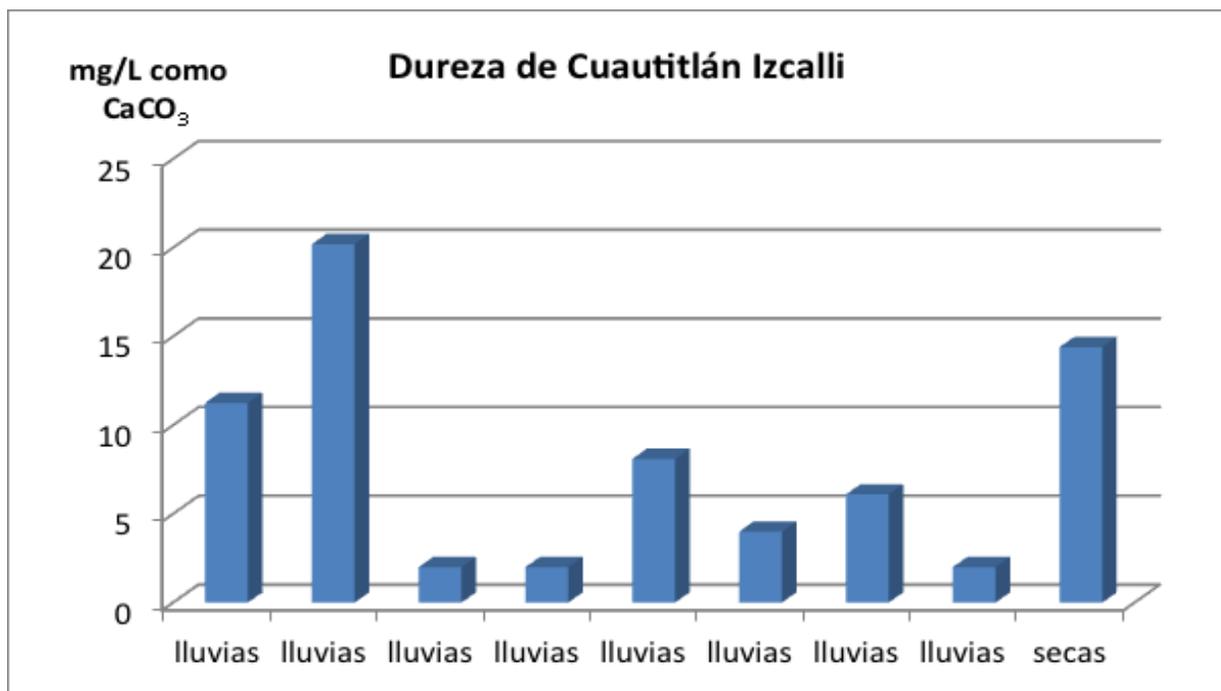


Figura. 23: Dureza en mg/L CaCO<sub>3</sub>, del municipio de Cuautitlán Izcalli.

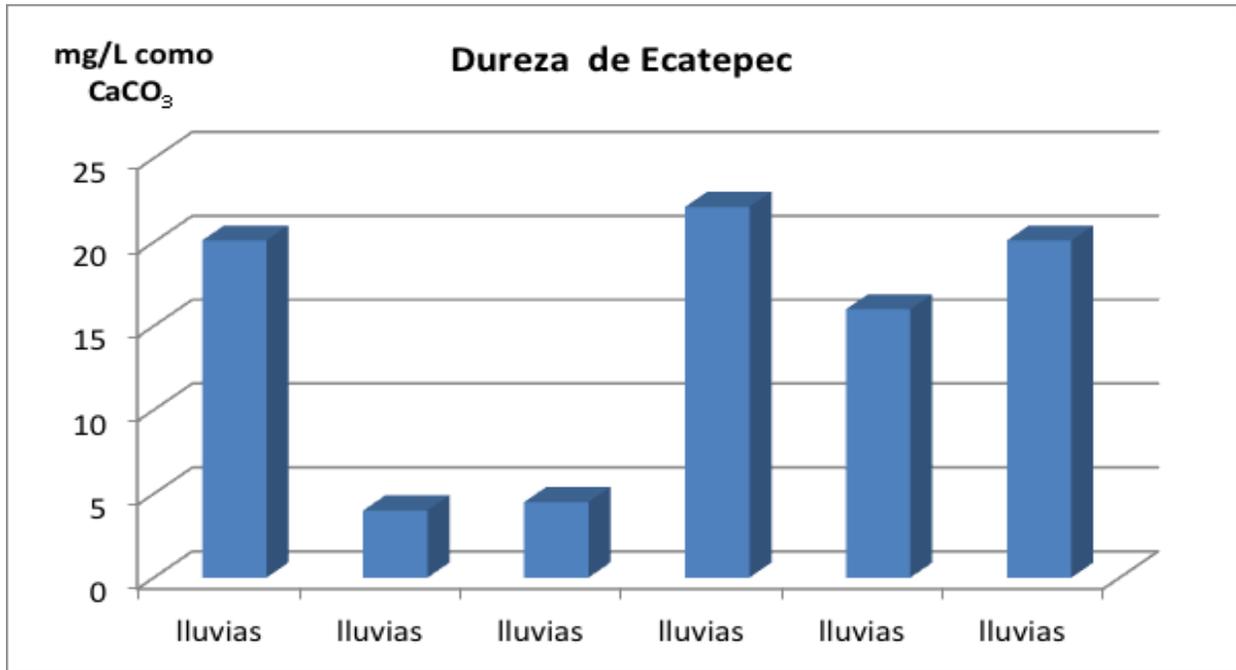


Figura. 24: Valores de Dureza como mg/L  $\text{CaCO}_3$ , del municipio de Ecatepec.

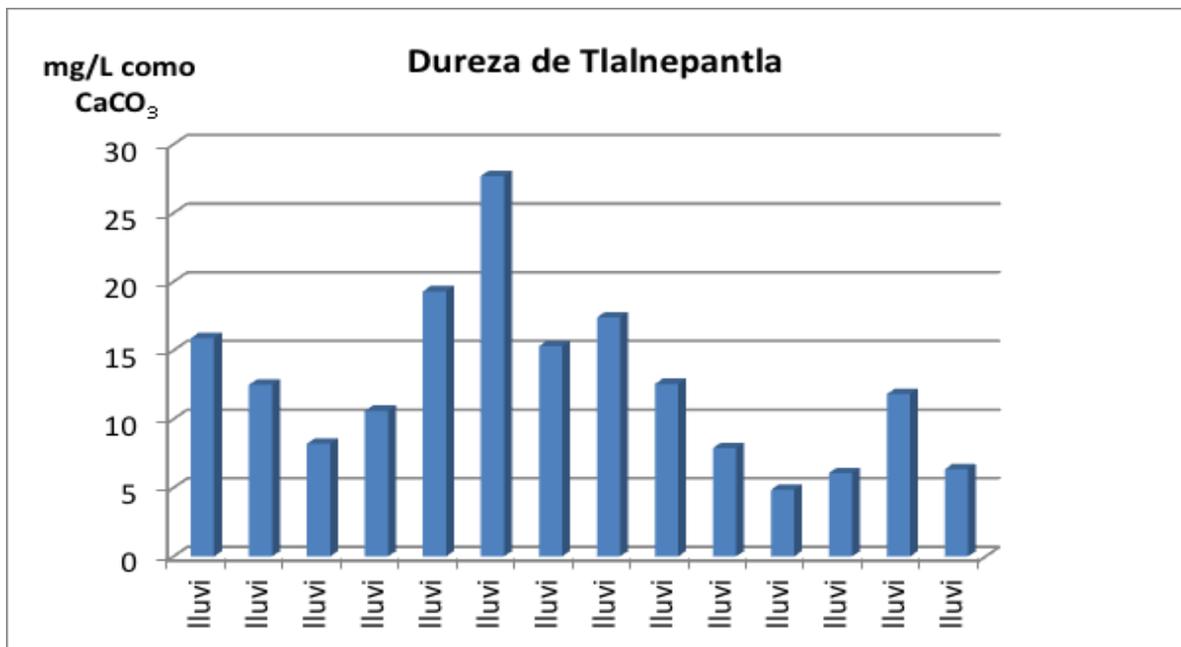


Figura. 25: Valores de dureza como mg/L  $\text{CaCO}_3$  del municipio de Tlalnepantla.

#### 8.1.8 Cloruros.

No se encuentra una gran variación entre estaciones; la estación de lluvias tiene una media de 0.907 y  $m=0.850$  y la estación de secas media de 1.4 y  $m=0.910$ ; si aplicamos el análisis estadístico de varianza, no hay diferencias significativas ( $F=2.4$ ,  $p=0.125$ ) y por ubicación tampoco ( $F = 0.54$ ,  $p = 0.746$ )

En general los valores de este parámetro fueron muy bajos e incluso en algunos casos menor del límite de detección del método tanto por estación como ubicación.

#### 8.1.9 Sulfatos.

En la estación de lluvias encontramos como en los parámetros anteriores, cantidades menores a los registrados en secas. Lluvias registra una media de 5.4 y  $m=4.790$  y secas, media de 11.82 y  $m=11.20$ . Aunque hubo valores máximos de 15.18 en lluvias y de 44.27 en secas, el 75 % de los valores estuvieron entre 0 y 7.3 para el primer caso y entre 3.47 y 12.6 para el segundo.

La distribución de datos fue simétrica para lluvias y asimétrica negativa en secas.

Con el análisis de varianza si hubo diferencias significativas entre estaciones ( $F= 26.83$ ,  $p=0.000$ ).

Por ubicación, Ecatepec tiene los valores más altos (Fig. 26) con una media y mediana de 9.99 mientras que Coyoacán y Cuautitlán Izcalli tiene los valores más bajos con media de 5.3 y  $m=3.65$  el primero y 5.7 y mediana de 3.93 el segundo (Fig. 27 y 28).

La distribución de datos fue asimétrica positiva. No se encuentran diferencias significativas entre ubicaciones ( $F=1.83$ ,  $p=0.117$ ).

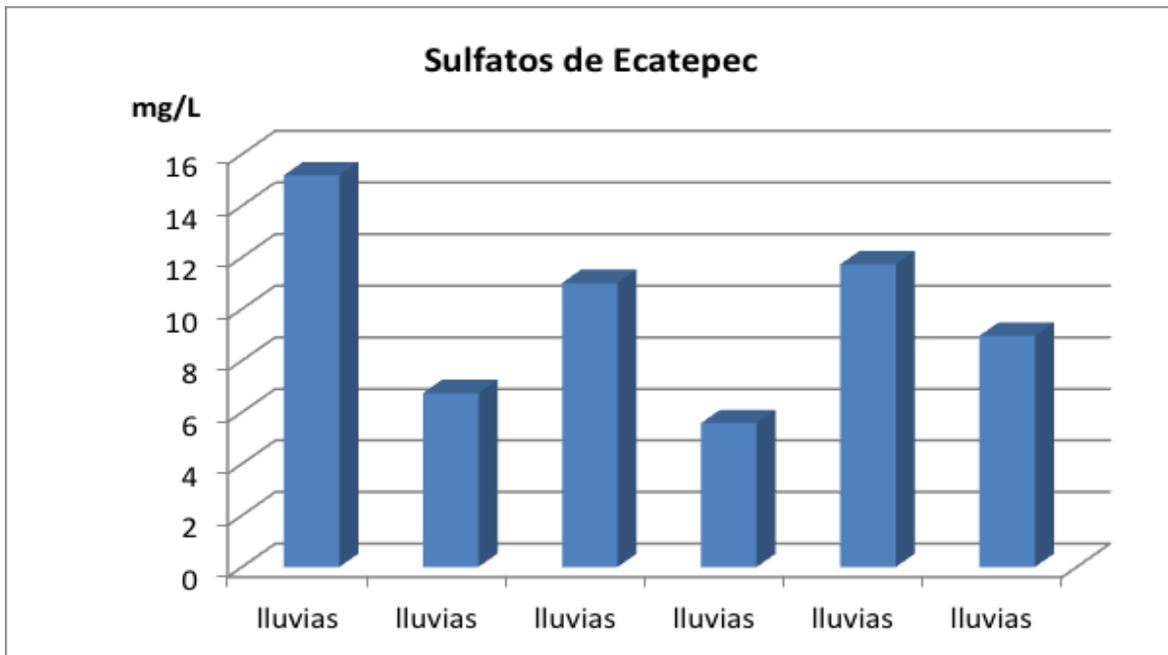


Figura. 26: Valores de Sulfatos del municipio de Ecatepec.

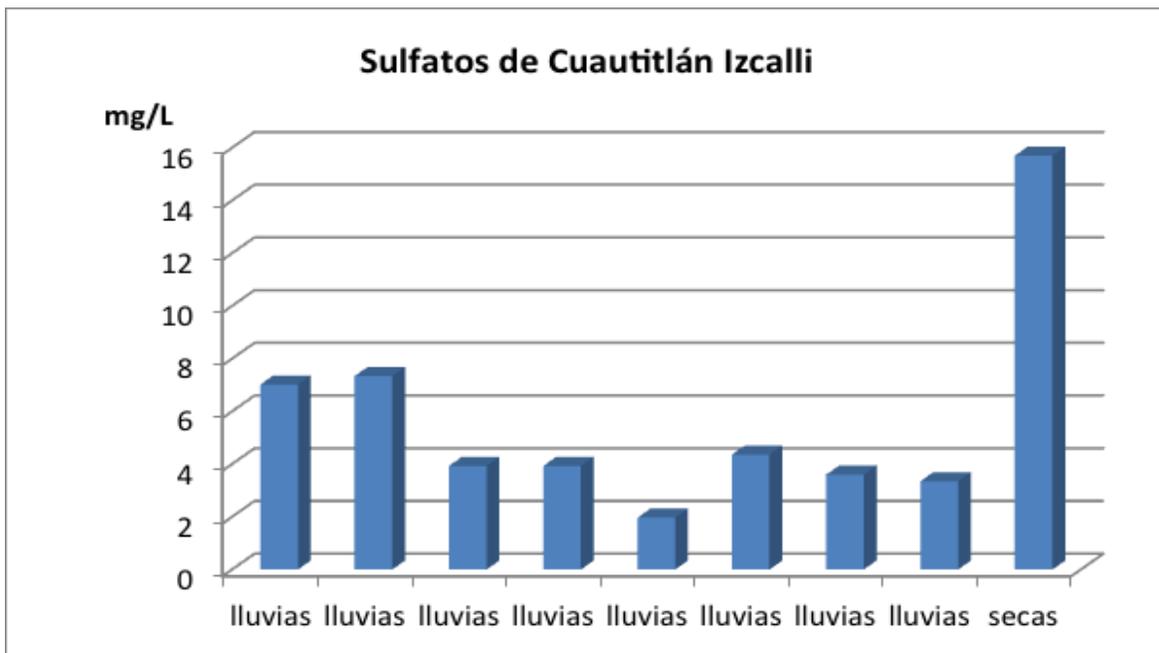


Figura. 27: Valores de sulfatos del municipio de Cuautitlán Izcalli.

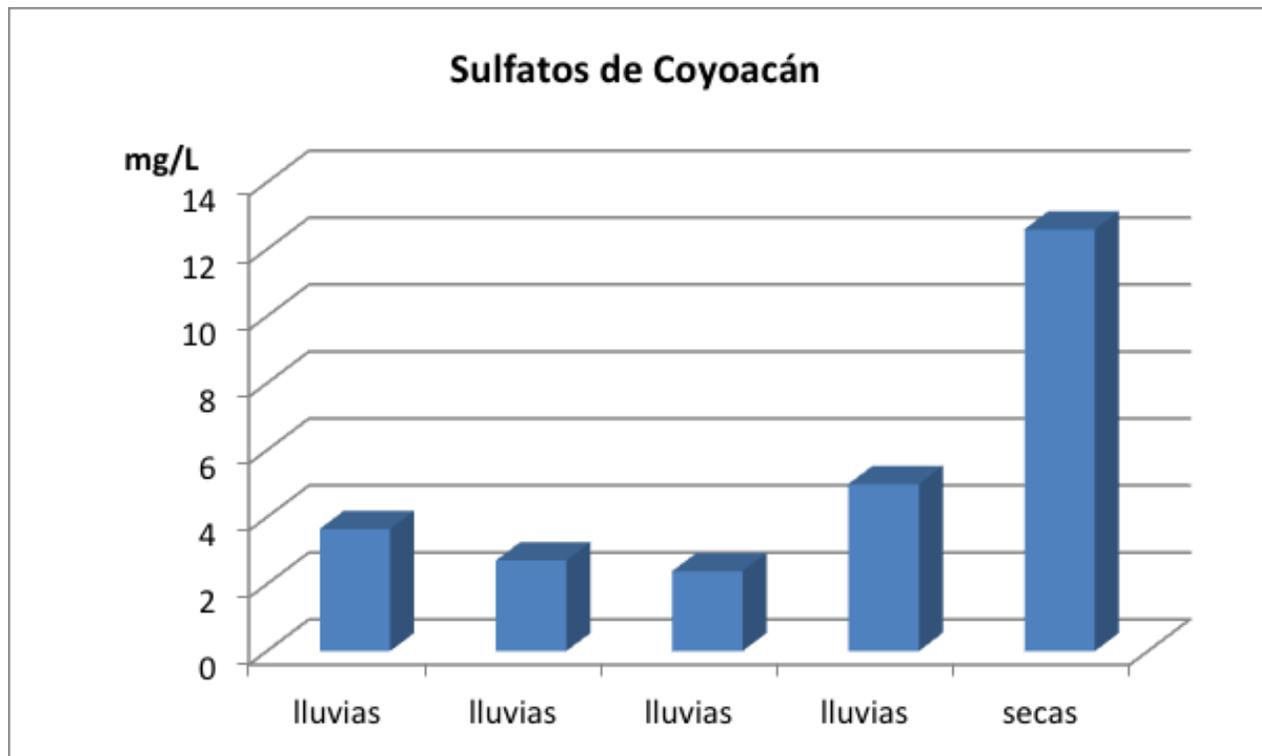


Figura. 28: Valores de sulfatos de la delegación Coyoacán.

## 8.2 Análisis de correlación

Aplicando el modelo de correlación de Pearson, en donde los niveles de  $P \geq 0.05$  se considera que no hay correlación. Y en valores de  $P < 0.05$  si hay correlación significativa. La correlación puede ser NEGATIVA ó POSITIVA, siendo la correlación 100% positiva o negativa con valores cercanos al 1.00 o al -1.00, respectivamente.

Los parámetros que presentaron correlaciones significativas ( $P < 0.05$ ) fueron:

El **pH** con conductividad, turbiedad, alcalinidad, dureza, PM10

La **conductividad** con pH, turbiedad, alcalinidad, dureza, cloruros, sulfatos, ozono, dióxido de nitrógeno, PM10.

**Cloruros** con coliformes totales, conductividad, monóxido de carbono, PM10

**Alcalinidad** con turbiedad, ph, conductividad, dureza, sulfatos, PM10.

**Dureza** con turbiedad, alcalinidad, sulfatos, PM10, ph, conductividad

**Sulfatos** con alcalinidad, dureza, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, conductividad, ozono.

**Turbiedad** con PM10, dióxido de nitrógeno, dureza, alcalinidad, ph, conductividad,

**Coliformes total** con cloruros,

**Dióxido de nitrógeno** con turbiedad, sulfatos, conductividad,

**Monóxido de carbono** con cloruros

**Dióxido de azufre** con sulfatos,

**PM10** con cloruros, dureza, alcalinidad, turbiedad, conductividad, ph.

La correlación encontrada entre la conductividad con la turbiedad, alcalinidad, dureza, cloruros y sulfatos es normal ya que la conductividad es una medida del contenido de sales disueltas y los parámetros relacionados son parte de esas sales disueltas.

El pH tiene una estrecha relación con la acidez y alcalinidad

Las PM10 del aire presentaron una relación directa con los cloruros, dureza, alcalinidad, turbiedad, conductividad y pH; lo cual nos podría indicar que estos parámetros forman parte de estas partículas en el aire y cuando llueve estas sales son arrastradas al agua de lluvia.

Como resultado de la correlación entre el dióxido de azufre del IMECA con los sulfatos determinados en las muestras de lluvia podría decirse que la presencia de sulfatos en el agua de lluvia puede deberse en parte al contenido de dióxido de azufre que hay en la atmósfera.

### ***8.3 Cumplimiento con la NOM 127-SSA1-1994 para agua potable.***

Para ambas estaciones (lluvias y seas), las Coliformes totales y fecales no cumplen con la norma encontrándose valores superiores al límite máximo especificado en la norma (Ausencia).

La turbiedad en ambas estaciones, no cumple con la norma de **5 UNT**, Únicamente la ubicación Coyoacán cumple con ella, en la estación de lluvias, con una media de 4.3 UNT y mediana de 4.2 UNT.

En cuanto al parámetro de cloruros no se obtuvieron diferencias significativas entre ubicación y estaciones, puesto que los valores fueron muy bajos. Sin alcanzar el límite permisible de la **NOM 127-SSA1-1994** de **250 mg/l**.

En dureza total los valores cumplen con los valores de la norma puesto que el valor máximo fue de 41.4 mg/l, siendo el límite de **500 mg/l**.

Los sulfatos son otro parámetro que se encuentra por debajo de los límites permisibles de la norma (**400 mg/l**) teniendo un valor máximo en la estación de secas de 44.27 mg/l.

## 9.- CONCLUSIONES

En cuanto a la calidad bacteriológica y el pH, no se encuentra una gran diferencia entre estaciones temporales; la diferencia ocurrió entre estaciones. El 96.9% de las muestras presentaron coliformes totales y el 82.8% coliformes fecales.

La presencia de coliformes puede deberse a los canales de aguas residuales abiertos (aerosoles) y al fecalismo a cielo abierto, los cuales, con las corrientes de aire hacen que las bacterias se depositen en las partículas suspendidas del aire y al llover el agua lava el ambiente arrastrando dichas partículas con bacterias y mezclándose en el agua de lluvia.

El lugar más contaminado bacteriológicamente fue Coyoacán y los menos contaminados fueron Cuautitlán Izcalli y Benito Juárez.

La calidad bacteriológica del agua de lluvia, recolectada sin escorrentía, no cumple con las especificaciones de la **NOM-127-SSA1-1994** pero tienen valores muy cercanos a los límites máximos permisibles, por lo que, con un proceso de desinfección y tratamiento, la calidad de lluvia puede ser aceptable para el consumo humano.

En general se observó que, si hay una relación entre algunos de los parámetros determinados en el agua de lluvia, con respecto a los valores del IMECA.

En cuanto a la calidad fisicoquímica de la lluvia, se encuentra una gran diferencia entre estaciones temporales, siendo la estación de lluvias cuando se recolectó el agua más limpia, con menos iones, y con un pH aceptable. La estación de secas, por tener mayor número de partículas en el aire, incrementa su composición fisicoquímica.

Parte del contenido de las sales en el agua de lluvia puede deberse en forma natural al contacto de ésta con las partículas de la atmósfera, pero si tomamos en cuenta que actualmente el aire se encuentra contaminado, en consecuencia, el agua de lluvia también se mezcla con dichos contaminantes

El 34.1 % de las muestras colectadas durante el periodo de lluvias fueron lluvias ácidas (29 de 85), mientras que en el periodo de secas el 28.71% de las muestras colectadas fueron lluvias ácidas (4 de 14).

Los pH más ácidos se presentaron en Benito Juárez y Cuautitlán Izcalli y los menos ácidos en Ecatepec.

El agua de lluvia es una alternativa para ayudar en gran medida el problema de los escasos del agua, siempre y cuando las personas estén conscientes, que su uso está limitado y que se requiere de un tratamiento previo, dependiendo del uso que se le quiera dar.

Sin tratamiento el agua de lluvia se recomienda para uso doméstico de limpieza, bebida de animales, riego de plantas, pero no para uso potable.

#### *Recomendaciones:*

La aplicación de sistemas de colecta y aprovechamiento del agua de lluvia para riego de jardines urbanos puede suponer un aporte fundamental, ya que el agua recolectada, además de aprovecharse para el riego, no se vierte a la red de alcantarillado, con lo cual no contribuye a saturarla. La única solución para paliar los problemas causados por los grandes volúmenes de escorrentía en las ciudades es, en la medida de lo posible, retener y almacenar el agua en origen (es decir, lo más cerca posible de donde ha caído), para su uso posterior.

Esta agua pudiera servir para recreación, lavar autos, pisos, regar jardines; y en poblaciones con poca contaminación atmosférica puede reusarse para lavar ropa, dar de beber a animales de cría doméstica, bañarse y el riego de hortalizas.

Ya existen proyectos rurales y urbanos así como instituciones, que ya aprovechan el agua de lluvia para diversas actividades, tal es el caso del programa de captación de agua pluvial de la Secretaría del Medio Ambiente, del Gobierno de la Ciudad de México; que consiste en la instalación de un Sistema de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) en viviendas de la ciudad y con altos índices de escasez hídrica; dicho sistema Recolecta, Dosifica de cloro, Filtra (Sedimentos y filtro de carbón activado) y Almacena el agua precipitada sobre los techos de las viviendas. No se especifica la neutralización del agua, para la regulación del pH, pero al

contener un filtro de carbón activo se espera que el pH del agua aumente y le quite la propiedad ácida, siempre y cuando se ocupe un carbón con un alto contenido catiónico, no ultrapuro, y se lleve a cabo el mantenimiento y cambio de dicho filtro en sus periodos recomendados.

Ahora los esfuerzos y las investigaciones deberán ser dirigidos al tipo de superficies por las que escurre el agua pluvial y se dirige a los SCALL, como es lo realizado por Gong et al. 2014; Gikas & Tsihrintzis 2017 y Gemma et al. 2018

## 10.- BIBLIOGRAFIA

- APHA-AWWA-WEF 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20ª ed. USA.
- Ahmed W., Huygens F., Goonetilleke A., Gardner T. 2008. Real time PCR detection of pathogenic microorganisms in Roof Harvested rainwater in southeast Queensland Australia. Applied and environmental microbiology, 74(17): 5490-5496p.
- Baez A., Belmont R. 1987. Comparative study of the chemical composition of rain of three different zones in México. Contaminación ambiental. 3: 25-36p.
- Basak B., Alagha O. 2010. Trace metals solubility in rainwater: evaluation of rainwater quality at a watershed area, Estambul. Environ Monit Assess. 167: 493–503p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2011. Estadísticas del agua en México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Etze R. A., French J. G. 2000. Contaminación del aire. En: Impacto de los desastres en la salud pública. Organización Panamericana de la Salud (OPS). Bogotá, D.C. Colombia.
- Facundo D., Ramírez E., Gracia Y., Miranda R., Gómez R., López U. 2010. Análisis fisicoquímicos del agua de lluvia en 2 zonas diferentes. Laboratorio de Ciencias de los Alimentos y Ambientales, Facultad de Ciencias Químicas UANL, Revista salud pública y nutrición. 1.
- Fernàndez P. I. 2009. Aprovechamiento de aguas pluviales, Tesis. Universidad de Cataluña. España. 86 p.
- Figueruelo J. E. & Marino-Davila M. 2001. Química Física del medio ambiente. Benemerita Universidad Autónoma de Puebla. Editorial Reverté. México. 333p.

- Flores J., Sosa A. B., Martínez D. E., Vaca M. 2006. Niveles de Zn, Cd, Pb y Cu en aguas de lluvia, de escurrimiento y de drenaje en la unidad Atzacapotzalco de la Universidad Autónoma Metropolitana. Memorias del III Simposio Internacional en Ingeniería y Ciencias para la Sustentabilidad Ambiental. Del 6 al 8 de junio de 2006. UAM Atzacapotzalco. México.
- Garcés G. L. F., Hernández A. M. L. 2004. La lluvia ácida: un fenómeno de ocurrencia local. Revista Lasallista de investigación 1(2): 67-72
- García-Guadalupe M. E. Hermes U. Ramírez-Sánchez, A. R. Meulenert-Peña, Faustino O. García C. Martha L. Espinoza Martínez y Odilia de la Torre V. 2006. Influencia de los contaminantes SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> en la formación de lluvia ácida de la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco México. e-Gnosis ISSN1665- 5745 vol. 4 Art. 7.
- García CH. J.R. y Deryck G. J.F. 2006. Potencial del aprovechamiento de la precipitación pluvial en la zona metropolitana del Valle de México. Aplicación de estrategias sustentables. Memorias del III Simposio Internacional en Ingeniería y Ciencias para la Sustentabilidad Ambiental. Del 6 al 8 de junio de 2006. UAM Atzacapotzalco. México.
- Gemma C.G.; Jamal R.; Weidhaas J. 2018. Roofing material and irrigation frequency influence microbial risk from consuming homegrown lettuce irrigated with harvested rainwater. Science of the Total Environment 651 (2019) 1011–1019.
- Garrido H. S.F. Rescatando el agua del cielo para el uso doméstico en la tierra. IMTA. [http://hypatia.morelos.gob.mx/no14/Rescatando\\_agua/aguadelcielo.html](http://hypatia.morelos.gob.mx/no14/Rescatando_agua/aguadelcielo.html) 15/09/2012
- Gone, Kena, Wu Qing, Peng Seng, Zhao Xinhua & Wang Xiaochen. 2014. Research on the characteristics of the water quality of rainwater runoff from green roofs. Water Science & Technology. 70.7
- Gikas D. Georgios, Tsihrintzis A. Vassilios. 2017. Effect of first-flush device, roofing material, and antecedent dry days on water quality of harvested rainwater. Environ Sci Pollut Res 24:21997–22006.

- Gutiérrez J.H, Romieu I, Corey G, Fortoul T. 1997. Contaminación del aire riesgos para la salud. Edit. El manual moderno México D.F.
- Gray, N. F. 1994. Calidad del agua potable. Problemas y soluciones. Ed. Acribia. Zaragoza, España.
- Lacasaña-Navarro M., Aguilar-Garduño C., Romieu I. 1999. Evaluación de la contaminación del aire e impacto de los programas de control en tres mega-ciudades de América Latina. Salud publica de México 41(3): 203-215.
- Lubinga Handia. 2005. Operational Paper Comparative study of rainwater quality in urban Zambia, Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA. 54 (1): 55-64.
- Mahendra Pal Verma. 1998.Necesidad de la determinación de la alcalinidad en la caracterización de la lluvia. Artículos Técnicos/ Boletín IIE enero-febrero 1998 En línea <http://www.iie.org.mx/publica/bolef98/tec2ef98.htm> consulta 17 jun 2011
- Méndez C. B., Afshar B. R., Kinney K., Barrett M. E., & Kirisits M. J. 2010. Effect of Roof Material on Water Quality for Rainwater Harvesting Systems. Texas Water Development Board: P.O. Box 13231, Capitol Station Austin, Texas 78711-3231.
- Okereke, J.N., Obasi, K.O., Obiekezie, S.O. Okechukwu, R.I. 2006.Bacterial Quality of rainwater in selected communities in IMO State, Nigeria. Estud. Biol. 28 (63):51-59p.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). 2003. Informe sobre la salud en el mundo Forjemos el futuro. Ginebra, Suiza. 221p.
- Organización Mundial de la Salud ( OMS) Water and Public Health. 2010. En línea [www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/dwqtraining/es/](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/dwqtraining/es/).
- Ospina-Zúñiga Ó. E y Ramírez-Arcila H. 2014. Evaluación de la calidad del agua de lluvia para su aprovechamiento y uso doméstico, en Ibagué, Tolima, Colombia. Ingeniería solidaria. 10(17):125-138p.

- Pérez S.M., Cetina A.V., Aldrete A., Fenn M.E., Landois P. L. 2006. Química de la precipitación pluvial en dos bosques de la cuenca de la CED de México. *Agrociencia* 40: 239-248p.
- Quadri de la T. G. Sánchez C. L. R. 1992. La ciudad de México y la contaminación atmosférica. Limusa. México. 316p.
- Radaideh, Al-zboon K., Harahsheh A., Adamat R., 2009. Quality Assessment of Harvested Rainwater for Domestic Uses, 2009 *Jordan Journal of Earth and Environmental Sciences*. 1(2): 26 -30p.
- Robles V. E., González A. M. E., Castillo N. P. 2004. Contaminantes físicos y químicos del agua: sus efectos en el hombre y el medio ambiente. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de estudios superiores Iztacala. Estado de México, México. 120p.
- Romero, R. Jairo A. 2000. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Ed. Escuela colombiana de ingeniería. Colombia.
- Rosales L. S. 2004. Determinación de los niveles de hidrocarburos alifáticos y aromáticos policíclicos en aerosol atmosférico del sur de la ciudad de México. Tesis de Maestría en Ciencias (Biología). UNAM Posgrado en ciencias Biológicas Facultad de Ciencias. México. 301p.
- Rheinheimer, G. 1970. Microbiología de las aguas. Ed. Acribia. Zaragoza, España. 299p.
- Saavedra Romero Luz de L, Alvarado Rosales Dionisio, Vargas Hernández Jesús, Hernández Tejeda Tomas. 2003. Análisis de la precipitación pluvial en bosques de *Abies religiosa* en el sur de la Ciudad de México. *Agrociencia* 37:57-64p.
- Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal (SMAdf). 2005. Informe Climatológico ambiental del Valle de México.  
<http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php?opcion=26&id=378>.

- Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal (SMAdf). 2008. Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe Anual. Deposito atmosférico y lluvia ácida en la Ciudad de México.  
[http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/biblioteca/flippingbooks/informe\\_anual\\_calidad\\_aire\\_2008/](http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/biblioteca/flippingbooks/informe_anual_calidad_aire_2008/)
- Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal (SMAdf). 2010. Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe Anual.  
<http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/informes/informe2010/descargas/informe2010.pdf>
- Spiro, T. y Stigliani, W. M. 2004. Química medioambiental. Ed. Pearson Prentice Hall. Madrid, España. 504p.
- Trejo V. Rodolfo. 2006. El IMECA: Indicador del grado de contaminación de la Atmósfera. Conciencia tecnológica 31: 50-53p.
- Vallejo M, Jáuregui-Renaud K, Hermosillo A G, Márquez M F, Cárdenas M. 2002. Efectos de la contaminación atmosférica en la salud y su importancia en la Ciudad de México. Gaceta médica de México 139 (1): 57-63p.
- Ward A. D. & Trimble S.W. 2004. Environmental hydrology. 2<sup>nd</sup> ed. Lewis publishers. United States of America. 775p.
- Watson I. Burnett A. D. 1995. Hydrology: an environmental approach. Editorial Taylor & Francis. United States of América. 702p.

## 11. ANEXOS

		<b>C. tot</b>	<b>C. fec</b>	<b>Ph</b>	<b>Cond.</b>	<b>Turb</b>	<b>Alcal</b>	<b>Dureza</b>	<b>Cloruros</b>	<b>Sulfatos</b>
<b>Media</b>		11.63	8.56	5.72	46.39	38	11.58	15.44	1.05	6.28
	LL	11.28	7.85	5.573	34.65	19.98	8.58	10.51	0.598	5.47
	S	11.2	9.72	5.96	65.5	67.4	16.44	23.44	1.8	7.6
<b>Desv std</b>		10.85	10.14	0.906	33.43	61.1	8.34	13.66	1.25	2.98
	LL	8.29	7.39	0.941	24.67	30.87	5.54	7.34	0.563	2.47
	S	14.76	14.05	0.848	38.5	86.2	10.13	17.95	1.7	3.43
<b>V. min</b>		0.707	0.707	4.5	12.6	1.04	2.43	3	0	2.84
	LL	0.707	0.707	4.5	12.6	1.04	2.43	3	0	2.84
	S	0.707	0.707	4.52	30	9.75	4.32	7.9	0	3.47
<b>V. màx</b>		44.7	42.4	7.17	151	260	37.27	64.4	5.24	12.6
	LL	28.3	28.3	7.17	83	101	19.3	28.3	1.75	10.06
	S	44.7	42.4	6.89	151	260	37.27	64.4	5.24	12.6
<b>Mediana</b>		9.6	7.38	5.8	34.7	14.2	9.77	12.1	0.87	4.74
	LL	9.6	7.38	7.17	25.3	4.23	7.28	8	0.49	4.11
	S	8.45	5.07	6.89	62	23.1	14.5	18.15	1.82	7.33

Tabla 1.- Análisis descriptivo de la delegación Benito Juárez de 21 muestras

		<b>C- tot</b>	<b>C. fec</b>	<b>Ph</b>	<b>Cond.</b>	<b>Turb</b>	<b>Alcal</b>	<b>Durez</b>	<b>Clorur</b>	<b>Sulfat</b>
<b>Media</b>		158.3	73.2	5.88	34.3	4.31	13.61	12.8	1.06	5.27
	LL	147.9	87.8	5.75	26.08	3.2	9.4	9.08	0.87	3.43
	S	200.1	14.7	6.41	67.2	8.7	30.48	27.7	1.82	12.6
<b>Desv. std</b>		119.1	83.3	0.65	21.12	2.76	10.02	8.98	0.74	4.22
	LL	134.8	88.5	0.68	11.9	1.44	3.91	3.87	0.71	1.16
	S	*	*	*	*	*	*	*	*	*
<b>V. min</b>		16.5	9.14	4.8	8.9	1.63	5.2	4	0	2.39
	LL	16.5	9.14	4.8	8.9	1.63	5.2	4	0	2.39
	S	200.1	14.7	6.41	67.2	8.7	30.48	27.7	1.82	12.6
<b>V. màx</b>		334.6	162.9	6.41	67.2	8.7	30.48	27.7	1.82	12.6
	LL	334.6	184.4	6.41	36.5	4.67	13.95	12.1	1.75	4.99
	S	200.1	14.7	6.41	67.2	8.7	30.48	27.7	1.82	12.6
<b>Mediana</b>		141.4	16.3	5.8	31	4.16	11.16	12.1	0.89	3.65
	LL	120.2	78.9	5.91	29.45	3.26	9.22	10.1	0.88	3.18
	S	200.1	14.7	6.41	67.2	8.7	30.48	27.7	1.82	12.6

Tabla 2: Análisis descriptivo de la delegación Coyoacán de 5 muestras

Estudio Bacteriológico y fisicoquímico del agua de lluvia  
 Sánchez-Aguilar Luis Osvaldo

		C- tot	C. fec	Ph	Cond.	Turb	Alcal	Durez	Clorur	Sulfat
<b>Media</b>		9.3	5.07	5.85	25.71	11.09	6.3	7.78	1.2	5.69
	LL	9.63	5.27	5.87	23.05	9.31	5.82	6.96	1.29	4.43
	S	6.67	3.54	5.7	47	25.3	10.16	14.4	0.45	15.7
<b>Desv std</b>		6.09	4.66	0.58	14.73	13.01	2.99	6.4	1.23	4.13
	LL	6.42	4.94	0.61	13.23	12.69	2.79	6.31	1.28	1.83
	S	*	*	*	*	*	*	*	*	*
<b>V. mín</b>		2.55	0.7	5.2	9.1	1.4	3.64	2	0	1.97
	LL	2.55	0.7	5.2	9.1	1.4	3.64	2	0	1.97
	S	6.67	3.54	5.7	47	25.3	10.16	14.4	0.45	15.7
<b>V. màx</b>		20.01	6.55	6.9	47	32.8	12.4	20.2	4.02	15.7
	LL	20.01	15.5	6.9	46.3	32.8	12.4	20.2	4.02	7.34
	S	6.67	3.54	5.7	47	25.3	10.16	14.4	0.45	15.7
<b>Mediana</b>		6.82	5.7	5.74	20.5	4.08	5.58	6.1	0.67	3.93
	LL	7.04	5.7	5.75	19.95	2.86	5.21	5.05	0.99	3.93
	S	6.67	3.54	5.7	47	25.3	10.16	14.4	0.45	15.7

Tabla 3: Análisis descriptivo del municipio de Cuautitlán Izcalli de 9 muestras

		C- tot	C. fec	Ph	Cond.	Turb	Alcal	Durez	Clorur	Sulfat
<b>Media</b>		36.6	22.7	6.22	29.13	10.75	12.32	14.47	1.25	9.87
	LL	36.6	22.7	6.22	29.13	10.75	12.32	14.47	1.25	9.87
	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Desv std</b>		51.3	25.8	0.27	11.86	9.23	5.58	8.16	0.75	3.52
	LL	51.3	25.8	0.27	11.86	9.23	5.58	8.16	0.75	3.52
	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>V. mín</b>		13.8	4.53	5.9	16.4	1.57	6.3	4	0	5.58
	LL	13.8	4.53	5.9	16.4	1.57	6.3	4	0	5.58
	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>V. màx</b>		141.4	31.5	6.58	49.4	28.1	18.1	22.1	1.94	15.18
	LL	141.4	74.2	6.58	49.4	28.1	18.1	22.1	1.94	15.18
	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Mediana</b>		16.6	16.6	6.23	26.9	8.53	12.55	18.05	1.35	9.99
	LL	16.6	16.6	6.23	26.9	8.53	12.55	18.05	1.35	9.99
	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 4: Análisis descriptivo del municipio de Ecatepec de 6 muestras

Estudio Bacteriológico y fisicoquímico del agua de lluvia  
 Sánchez-Aguilar Luis Osvaldo

		<b>C- tot</b>	<b>C. fec</b>	<b>Ph</b>	<b>Cond.</b>	<b>Turb</b>	<b>Alcal</b>	<b>Durez</b>	<b>Clorur</b>	<b>Sulfat</b>
<b>Media</b>		22.36	14.49	5.36	28.96	7.32	10.86	11.54	1.05	7.24
	LL	23.52	15.69	5.37	25.71	4.71	9.83	9.91	1.08	4.64
	S	17.71	9.69	5.29	41.98	17.8	15	18.06	0.91	17.63
<b>Desv std</b>		35.56	28.75	0.73	15.07	11.8	5.34	7.89	1.08	8.34
	LL	39.38	31.46	0.79	11.35	5.23	4.47	7.65	1.11	2.03
	S	13.62	14.97	0.48	22.06	23.1	7.04	5.44	1.115	15.12
<b>V. min</b>		0.7	0.7	4.18	12.5	1.54	2.43	2	0	1.97
	LL	0.7	0.7	4.18	13	1.54	2.43	2	0	1.97
	S	8.7	0.7	4.47	12.5	3	10.16	11.9	0	7
<b>V. màx</b>		141.4	134.2	6.79	71.8	58.65	26.42	32.3	4.56	44.27
	LL	20.01	15.5	6.79	53	25.1	19.42	32.3	4.56	9.73
	S	6.67	3.54	5.65	71.8	58.7	26.42	23.8	2.73	44.27
<b>Mediana</b>		8.97	5.1	5.45	24.5	3.62	10.16	8.1	0.87	5
	LL	7.55	5.3	5.39	23.05	3.46	9.4	8.1	0.87	4.38
	S	14.16	4.53	5.54	42	9.4	11	15.8	0.91	11.33

*Tabla 5: Análisis descriptivo del municipio de Naucalpan de 25 muestras*

		<b>C- tot</b>	<b>C. fec</b>	<b>Ph</b>	<b>Cond.</b>	<b>Turb</b>	<b>Alcal</b>	<b>Durez</b>	<b>Clorur</b>	<b>Sulfat</b>
<b>Media</b>	LL	20.61	14.6	6.1	42.06	10.42	12.6	16.86	0.57	5.75
<b>Desv std</b>	LL	18.75	16.38	0.4	26.45	20.93	6.21	12.24	0.54	2.94
<b>V. min</b>	LL	2.12	2.12	5.33	15	0.96	4.85	4	0	0
<b>V. màx</b>	LL	76.8	17.33	7	94.9	82	27.7	41.41	1.75	9.87
<b>Mediana</b>	LL	17.33	8.69	6	33.25	2.86	12.16	13.5	0.45	6.12

*Tabla 6: Análisis descriptivo del municipio de Tlalnepantla de 14 muestras*