



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

**CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA CAPTADA EN UNA
EDIFICACIÓN PARA SU APROVECHAMIENTO CON FINES DE
SUSTENTABILIDAD HÍDRICA**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERIA

INGENIERIA AMBIENTAL - AGUA

P R E S E N T A :

BEATRIZ GARCIA VILLEGAS

TUTOR:
DR. PEDRO MARTINEZ PEREDA

ENERO 2013



JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Humberto Bravo Álvarez

Secretario: Dr. Enrique Cesar Valdez

Vocal: Dr. Pedro Martínez Pereda

1^{er} Suplente: Dr. Oscar González Barceló

2^{do}. Suplente: Dra. Sofía E. Garrido Hoyos

FACULTAD DE INGENIERÍA

TUTOR DE TESIS:

DR. PEDRO MARTINEZ PEREDA

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por mi formación académica

A la Facultad de Ingeniería por permitirme cursar el Posgrado en Ingeniería Ambiental

Al pueblo de México que por medio de CONACyT me apoyo económicamente durante esta investigación

Mi sincero agradecimiento al Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM y en particular al Laboratorio de Contaminación Atmosférica por el apoyo incondicional en el análisis químico de las muestras a cargo de la M. Ana Luisa Talarcon.

Agradezco a los miembros del jurado:

Dra. Sofía E. Garrido Hoyos

Dr. Pedro Martínez Pereda

Dr. Humberto Bravo Álvarez

Dr. Oscar González Barceló

Dr. Enrique Cesar Valdez

Por el tiempo dedicado en la revisión de esta tesis, así como por sus correcciones y sus valiosas sugerencias, las cuales contribuyeron sin duda a mejorar la calidad de este trabajo.

Este trabajo se lo dedico de corazón y con mucho amor a mi familia gracias por su apoyo y todo su amor, a mis amigos TODOS porque estuvieron conmigo apoyándome siempre, los quiero mucho.

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Hipótesis	5
1.3 Objetivo general	5
1.3.1 Objetivos específicos	5
1.4 Alcances del trabajo de investigación	5
CAPÍTULO II MARCO TEORICO	6
2.1 Antecedentes de la captación de agua pluvial	7
2.2 Componentes del sistema de captación	10
2.2.1 Área de captación	23
2.2.2 Sistema de conducción	25
2.2.3 Almacenamiento	25
2.2.4 Tratamiento de agua de lluvia	26
CAPÍTULO III LAS EDIFICACIONES VERDES O SUSTENTABLES EN EL RUBRO DE AGUA	29
3.1 La sustentabilidad en el mundo	29
3.2 El proceso de sustentabilidad en México	31
3.3 La importancia de la sustentabilidad en la ciudad de México	33
CAPÍTULO IV ZONA DE ESTUDIO, CARACTERÍSTICAS ATMOSFÉRICAS E HIDROLÓGICAS	36
4.1 Características Atmosféricas del sitio	36
4.2 Distribución temporal y espacial de la contaminación del aire	39
4.3 Contaminantes de la fuente	40
4.3.1 Acidez de las precipitaciones	40
4.3.2 Dióxido de azufre SO ₂	43
4.3.3 Óxidos de nitrógeno NO _x	45
4.3.4 Emisión de metales a la atmósfera	47
4.4 Características hidrológicas del sitio	48

4.4.1 Exportación del agua de la cuenca	48
4.4.2 Sobreexplotación de los acuíferos de la cuenca	49
4.4.3 Importación de agua de cuencas externas	50
4.4.4 Desalojo hídrico	51
4.4.5 Precipitación	52
CAPÍTULO V METODOLOGÍA	55
5.1 Ubicación de sitio de muestreo	55
5.2 Muestreo	55
5.3 Número de muestras	57
5.4 Metodología utilizada en la toma de muestra	57
5.5 Preservación de la muestra	58
5.6 Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad del agua de lluvia	60
5.7 Caracterización del agua de lluvia	60
5.7.1 Parámetros físicos	60
5.7.2 Parámetros químicos	63
5.7.3 Parámetros bacteriológicos	66
CAPÍTULO VI RESULTADOS Y ANÁLISIS	68
6.1 Parámetros Físicos	68
6.2 Parámetros Químicos	70
6.3 Parámetros Bacteriológicos	75
CAPÍTULO VII BALANCE HIDRÁULICO	77
7.1 Por medición de volúmenes	77
7.2 A partir de la dotación de agua	78
7.3 A partir de la captación de agua pluvial	79
CONCLUSIONES	81
RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFÍA	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 “La Domus” y sus componentes del sistema de captación de agua de lluvia. (IICA, 1998)	8
Figura 2 Vista en planta del sistema de recolección de “la Domus” (Gallardo-Cornejo).	9
Figura 3 Izquierda, Zona arqueológica de Xochicalco. Derecha, Cisterna construida con piedra para almacenamiento de agua de lluvia (Garrido, 2006).	10
Figura 4 Sistemas de captación “La Domus” (a la izquierda), “un ejemplo actual” (a la derecha).	11
Figura 5 El área de captación y sus diferentes usos de acuerdo a la calidad del agua de lluvia.	12
Figura 6 Canaletas utilizadas en la captación del agua de lluvia sin alterar el diseño arquitectónico de la estructura.	13
Figura 7 Filtro Filtro rainus de 3P Technik, partes del filtro y su funcionamiento.	15
Figura 8. Canalización temporal de primeros escurrimientos (rain-harvesting, Magnemart).	16
Figura 9 Adaptado de Michael Pidwirry, Physical Geography.net – Fundamentals of Physical Geography.	26
Figura 10 Distribución temporal de los contaminantes atmosféricos en la Ciudad de México.	27
Figura 11 Comportamiento espacial del pH en muestras de depósito húmedo.	29
Figura 12 Concentraciones de SO_4^{2-} registradas en las estaciones de monitoreo atmosférico.	30
Figura 13 Distribución espacial del depósito total de sulfatos SO_4^{2-} en el depósito húmedo para los años 2004 a 2009.	31
Figura 14 Concentraciones de NO_x registradas en las estaciones de monitoreo atmosférico.	32
Figura 15 Distribución espacial del depósito total de nitrato NO_3^- en el depósito húmedo para los años 2004 a 2009.	33

Figura 16 “Sistema hidrológico de Valle de México” Organismo de la Cuenca del Valle de México, CONAGUA.	38
Figura 17. Mapa de distribución de la precipitación acumulada en la ZMVM durante el año 2005.	40
Figura 18 Estadística Geografía e Informática 2009; Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente <i>et al.</i> , 2003; Secretaría del Medio Ambiente, 2000.	41
Figura 19 Edificio de Posgrado "Bernardo Quintana Arrijoja" (Google maps).	42
Figura 20 Diagrama de la recolección de la muestra a partir del sistema acondicionado a la bajada de agua pluvial.	45
Figura 21 Adaptación creada para la toma de muestras de agua de lluvia del proyecto de tesis.	44
Figura 22 Toma de muestra y protocolo de preservación de la misma.	46
Figura 23 Comportamiento de sólidos disueltos a lo largo del proyecto.	55
Figura 24 Comportamiento del pH en las muestras.	56
Figura 25 Equipo de cromatografía del Centro de Ciencias de la Atmósfera en donde se lleva a cabo el análisis de las muestras <i>HPLC</i> .	57
Figura 26 Comportamiento de los aniones presentes en las muestras.	58
Figura 27 Comportamiento de los cationes en las muestras.	59
Figura 28 Espectrofotómetro de Absorción Atómica (GBC AVANTA Σ).	60
Figura 29 Placas incubadas para su análisis microbiológico posterior a 24 horas.	62
Figura 30 Charola o placa de experimentación con la muestra bajo luz ultravioleta.	63
Figura 31 Balance hidráulico	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Déficit de aguas subterráneas y volumen concesionado.	36
Tabla 2 Periodo de muestreo del proyecto, del mes de julio a septiembre de 2011.	43
Tabla 3 Resultados obtenidos de análisis de metales pesados.	61
Tabla 4 Valores máximos recomendados por la OMS y valores máximos permitidos en diez países de América (mg/l).	62
Tabla 5 Dotación mínima de agua potable para edificaciones educativas	65
Tabla 6 Estimación de la captación de agua pluvial, para la sustitución de agua potable en temporada de lluvias	66

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El agua se ha considerado desde siempre como un derecho humano fundamental, es uno de los recursos naturales más importantes que se relaciona directamente con la calidad de vida de la población y es determinante para el funcionamiento del sistema económico. Sin embargo, al comenzar este milenio, la mitad de la humanidad reside en ciudades y metrópolis y un tercio de la población urbana, vive sin servicios sanitarios u otros servicios básicos adecuados. Las ciudades son centros de oportunidad, pero cuando carecen de agua limpia, servicios sanitarios y servicios básicos aceptables, se encuentran en los entornos peligrosos, amenazando la vida misma de sus habitantes (Kajumulo, 2003).

Desde las primeras ciudades hasta nuestros días, el crecimiento poblacional ha sido progresivo y al relacionarlo con la delimitación geográfica toma relevancia el concepto de sustentabilidad. Díaz (2007), señala que la concepción de sustentabilidad está estrechamente vinculada al concepto de supervivencia que Thomas Malthus identificó como capacidad de carga de los ecosistemas.

En este contexto la ecología y sus aportaciones señalan que el ser humano ha traspasado los límites de la naturaleza por la sobrevivencia; en este proceso, uno de los papeles más importantes lo ha desarrollado el recurso agua; bajo este marco, se señala que el concepto de sustentabilidad está basado en la disponibilidad del agua, donde este factor actúa como un regulador de la ocupación territorial de las poblaciones (Díaz, 2007).

La disponibilidad de agua depende de las condiciones que presente el ciclo hidrológico y de la velocidad con que son extraídos para cubrir los requerimientos de las actividades económicas y de la población, por lo que para garantizar su preservación es necesario realizar una gestión racional e integral del agua.

La gestión integral del recurso tiene como base natural un sistema de límites geográficos denominado cuenca hidrológica, en la que se ubica el caudal de los cuerpos de agua superficiales y los acuíferos. La presencia de agua en una cuenca depende de las lluvias y de lo que se disponga de su entorno para la recarga de acuíferos para mantener la disponibilidad

del agua que asegure los procesos productivos y consumo básico de la población (Padrón y Cantú, 2009).

El informe de Naciones Unidas in the Hábitat sobre agua y servicios sanitarios en las ciudades del mundo (Water and Sanitation in the World's Cities) calcula que hasta 150 millones de residentes urbanos en Africa, (50% de la población urbana) carecen de adecuado suministro de agua, mientras 180 millones (60%) carecen de servicios sanitarios adecuados. En las zonas urbanas de Asia, 700 millones de habitantes (la mitad de la población) carecen de agua adecuada, mientras 800 millones de habitantes (aproximadamente un 60%) no disponen de servicios sanitarios adecuados. En América Latina y el Caribe, las cifras correspondientes son 120 millones y 150 millones de residentes urbanos, lo cual representa 30% y 40% de la población urbana, respectivamente (Water and Sanitation in the World's Cities, 2003).

México se encuentra con problemas de esta índole, por razones históricas y políticas es un país muy centralizado, por ejemplo: en la Ciudad de México se localiza el 45% de la actividad industrial nacional y junto con la zona conurbada, se concentra el 20% de la población del país (Water and Sanitation IN THE Word's Cities, 2003).

La ciudad capital, el Distrito Federal alberga casi todas las oficinas de gobierno, los centros de negocios nacionales e internacionales, actividades culturales, universidades e institutos de investigación y salud más importantes del país (Sistema de Aguas de la Ciudad de México, 2007).

Por tal motivo, la Ciudad de México es un caso paradójico, citado por muchos expertos. Una ciudad construida sobre cinco grandes lagos, donde la precipitación anual excede los 750 mm, causando inundaciones y encharcamientos frecuentes, pero que al mismo tiempo sufre una severa escasez, con al menos 1 millón de personas sin acceso regular a agua entubada (Adler I, 2005).

1.1 Planteamiento del problema

El Valle de México es una cuenca cerrada. Se han construido obras costosas para desalojar las aguas residuales y de lluvia en un sistema de drenaje que es común para ambas descargas. Originalmente, los escurrimientos pluviales iban a concentrarse a los lagos del Valle pero en la medida que éstos han sido ocupados por el área urbana, se ha vuelto necesario desalojar tanto

el agua de lluvia como la residual fuera de la ciudad para evitar inundaciones (Sistema de Aguas de la Ciudad de México, 2007).

La Ciudad de México se localiza en una Cuenca cerrada a una altitud de 2,220 metros sobre el nivel del mar, a lo largo de los años las fuentes de abastecimiento subterráneas y superficiales se agotan cada día a una velocidad descontrolada, por tal motivo, se han creado fuentes alternas de abastecimiento, tal es el caso del Sistema Cutzamala, el cual hoy aporta casi el 30% del agua que abastece a la ciudad, dichas fuentes requieren de un alto costo de funcionamiento, además de generar problemas sociales ya ocurridos por la oposición de los habitantes del origen de la fuente.

Una propuesta para satisfacer parte de la demanda de agua en la ciudad es la captación de agua de lluvia. Esta alternativa resulta ser sustentable ya que no se explota ningún cuerpo de agua (ecológicamente factible), no interfiere en el abasto para otra localidad (socialmente viable) y solo requiere contar con un sistema de captación y el tratamiento, a la largo plazo, puede ser económicamente factible.

La propuesta es una alternativa, aunque se tiene la incógnita al no saber si es una desventaja es su composición química debido a la contaminación atmosférica, ya que la precipitación pluvial realiza el lavado atmosférico y ésta contiene diversos contaminantes; el estudio de la composición química del agua de lluvia en las áreas urbanas es una herramienta para estimar el grado de contaminación que existe en ésta y determinar si cubre los lineamientos para ser utilizada en actividades de uso directo.

La lluvia es un mecanismo natural de limpieza debido a la remoción de compuestos atmosféricos solubles y junto con la deposición seca, son los únicos mecanismos que retiran en forma definitiva los gases y partículas de la atmósfera.

El agua de lluvia es ligeramente acida con un pH de 5.6 debido a la presencia de bióxido de carbono (CO_2) disuelto en el aire, su composición se ve afectada debido a la presencia de dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x) emitidos de diversas fuentes, los cuales interactúan con la radiación solar, la humedad atmosférica y la lluvia; estos gases reaccionan formando ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3), los cuales son transportados a grandes distancias de sus fuentes de emisión, generando en algunas áreas la presencia de la llamada lluvia ácida (García, 2007).

De igual manera, la evacuación de las aguas residuales generadas ha rebasado la capacidad del sistema de evacuación principalmente en temporada de lluvias, debido a que el drenaje de la Ciudad es combinado.

Sin embargo, no son los únicos problemas que enfrenta la cuenca, los problemas atmosféricos se agravan por la falta de dispersión de los gases generados por la contaminación tales como dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x), cuya fuente principal es la industria que se encuentra ubicada al norte de la Ciudad de México y que debido a los vientos dominantes son arrastrados al sur de la Ciudad.

La importancia de generar de nuevos conocimientos, por medio de este tipo de estudios con e objetivo de obtener información que evalúe en cuanto a su concentración, características químicas y físicas que permita crear un marco de referencias para el uso adecuado del agua de lluvia sin que genere problemas tanto sociales como de salud en el ser humano.

1.2 Hipótesis

La captación de agua de lluvia puede ser una fuente alterna para el abastecimiento en época de lluvia en sitios donde el suministro no es continuo o en aquellas edificaciones que buscan la sustentabilidad hídrica en sus instituciones.

1.2 Objetivo General

Cuantificar y caracterizar el agua de lluvia en el Edificio de la Secretaria de Posgrado e Investigación de la Facultad de Ingeniería en Ciudad Universitaria, Ciudad de México; para determinar la factibilidad de captación de agua pluvial para su aprovechamiento dentro de la edificación, a partir de un análisis químico que indicará el grado de contaminación que ésta presenta.

1.4 Objetivos específicos

- Obtener la caracterización del agua de lluvia captada en el edificio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería.
- Se analizar la calidad del agua de lluvia con fines de aprovechamiento como agua para contacto directo con el ser humano.
- Realizar el balance hídrico en el edificio para estimar el ahorro de agua potable con la sustitución de agua de lluvia.

1.4 Alcances

- Caracterizar el agua de lluvia en el edificio de la Sección de Posgrado e Investigación de Ingeniería por medio de la medición de los aniones y cationes (Cl^- , F^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^+), pH, coliformes fecales, sólidos disueltos totales y iones metálicos (Cr, Cd, Pb, Al, Fe, Mn).
- Realizar un muestreo del agua de lluvia colectada de la azotea por medio de un muestreador adaptado a las bajadas del edificio.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

LA CAPTACIÓN DE AGUA PLUVIAL

Desde los inicios de la civilización, los seres humanos han desarrollado sus sociedades en torno a las aguas superficiales disponibles de la zona, utilizándolas como medio de transporte, consumo y demás actividades.

La alta disponibilidad de aguas superficiales siempre limitó los usos del agua de lluvia, siendo indispensable únicamente en la agricultura. Pero debido al gran crecimiento demográfico, muchas civilizaciones se vieron obligadas a ocupar regiones de baja o nula disponibilidad de aguas superficiales (zonas áridas y semiáridas), en donde el aprovechamiento de agua de lluvia para los usos domésticos se vuelve una necesidad.

Es así como desarrollaron mecanismos de almacenamiento de agua de lluvia que hoy son encontrados en los rescates arqueológicos que datan de 4000 años a.C, y que demuestran la alta importancia que tenía su aprovechamiento en siglos pasados, como por ejemplo los hallazgos en Israel, Jordania, Yemen, Roma, China, Irán, y algunas culturas indígenas de Centroamérica.

Todas estas experiencias coincidían en dirigir las aguas de escorrentía, de patios y techos hacia lugares de almacenamiento para luego ser aprovechadas en la agricultura y en usos domésticos. (FAO), (Ballén y Galarza y Ortiz,).

En la actualidad, muchas de esas prácticas siguen siendo utilizadas, en especial en regiones áridas o semiáridas, y su principal función es el almacenamiento del agua de lluvia para usos agrícolas y domésticos.

2.1 Antecedentes de la captación de agua pluvial

Cuando las civilizaciones crecieron demográficamente y algunos pueblos ocuparon zonas áridas o semiáridas del planeta, el desarrollo de formas de captación de agua de lluvia comenzó como alternativa para el riego de cultivos y el consumo doméstico.

En el Oriente, actual Jericó, antes del surgimiento de las primeras ciudades en el período, anterior a 8000 a 4000 a.c., en el Valle del Río Jordán se establecieron grandes comunidades para desarrollar una arquitectura en sus construcciones de piedra.

En estos primeros sitios habitados estuvo el origen del trigo y la cebada, cuya característica fue el crítico índice de precipitación de 300 mm/año, justo lo necesario para la agricultura, aunque menos fueron las planicies aluviales y oasis donde era posible el establecimiento de cultivos. Pero el área cultivada del Oriente estuvo restringida a la presencia de lluvias y nacimientos de agua natural (UNEP, 2000).

Arqueólogos encontraron un sofisticado sistema de colección y almacenaje de aguas de lluvia en la isla de Creta, mientras trabajaban en la reconstrucción del Palacio de Knossos (1700 a.c.). En Yemen donde las lluvias son escasas, se encuentran edificaciones (templos y sitios de oración) que fueron construidas antes del año 1.000 a.c., que cuentan con patios y terrazas utilizadas para captar y almacenar agua de lluvia (Ballen S, *et al*; 2006).

En el desierto de Negev, Israel, en cuyas laderas se colectaba y conducía la escasa precipitación de los pequeños lomeríos hasta un recipiente construido con arcilla, el cual funcionaba como filtro de basuras y sedimentos que el agua arrastraba a su paso; posteriormente el líquido caía en cisternas de capacidades de 200 a 300 m³, donde se almacenaba para ser utilizado por el ganado y en las labores domésticas.

Probablemente la cisterna más grande en el mundo se encuentra en Estambul, construida bajo César Justiniano (527-565 DC), que medía 140x70 metros, pudiendo almacenar 80 mil metros cúbicos de agua. Y existe otra cisterna en el mismo lugar llamada Binbirdik, con una capacidad de 50 mil metros cúbicos y construida bajo César Constantino (329-337 DC), (Ballen S, *et al*; 2006).

En Balaton, en Hungría, en la era del emperador Galerio (305-311 años d.c.); utilizaron la captación y almacenamiento del agua de lluvia proveniente de los techos y patios de las casas.

Los sistemas de captación de agua de lluvia eran considerados al diseñar y construir las casas-habitación, complementandolas con la construcción de cisternas para el almacenamiento de agua con fines de uso doméstico (UNEP,2000).

En Loess Plateau, en la provincia de Gansu, en China, existían pozos y jarras para la captación de agua de lluvia desde hace más de 2000 años. En Irán se encuentran los “abarbans”, que eran los sistemas tradicionales locales para la captación y almacenamiento de agua de lluvia.

En la Antigua Grecia, en la Acrópolis de Atenas, su capacidad de almacenar el agua de lluvia y de manantial, originó diversas fuentes de abasto de agua, incluyendo cisternas y pozos, lo que hizo posible su asentamiento y la convirtió en el emplazamiento lógico para los grupos dominantes de la región.

La próspera burguesía de la antigua Roma tenía generalmente una casa con una docena de habitaciones, con una abertura de forma cuadrada en el tejado para que entrase la lluvia y una cisterna debajo para almacenar el agua. El agua era utilizada para consumo y la instalación para refrescar el ambiente de la casa (Gallardo y Cornejo, 2008).

Durante la República Romana (siglos III y IV a.C.) la ciudad de Roma en su mayoría estaba ocupada por viviendas unifamiliares denominadas “la Domus” (ver figura 1) que contaba con un espacio principal a cielo abierto (“atrium”) y en él se instalaba un estanque central para recoger el agua de lluvia llamado “impluvium”, el agua de lluvia entraba por un orificio en el techo llamado “compluvium” (Gallardo y Cornejo, 2008), ver figura 1.

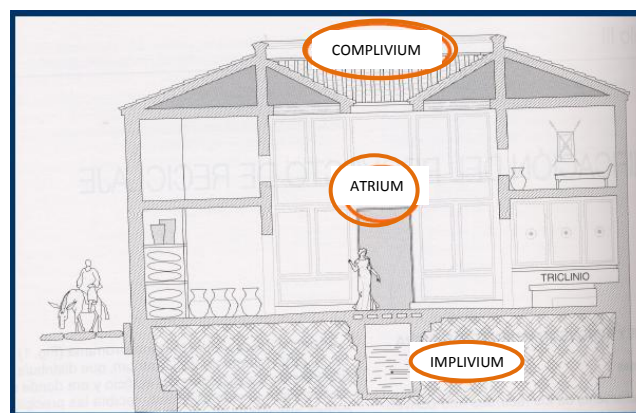


Figura 1 “La Domus” y sus componentes del sistema de captación de agua de lluvia.
(Gallardo y Cornejo, 2008)

Los romanos llegaron a ser maestros en cosecha de aguas de lluvia y la construcción de recipientes (cisternas) para su almacenamiento, especialmente en lugares donde el agua era limitada.

Estos sistemas tenían un doble propósito: la evaporación del agua en las lagunas mejoraba el microclima acondicionando el aire y por otra se usaba para propósitos domésticos. Posteriormente, debido al aumento de la población, aumentó el consumo de agua, lo que impulsó a desarrollar cisternas cubiertas, (ver figura 2).



Figura 2 Vista en planta del sistema de recolección de “la Domus” (Gallardo-Cornejo 2008)

En Centroamérica se conoce el caso del Imperio Maya donde sus reyes sostenían a sus pueblos de modos prácticos, ocupándose de la construcción de obras públicas.

Al sur de la ciudad Oxkutzcab (estado de Yucatán) en el pie de la montaña Puuc, en el siglo X a.C. el abastecimiento de agua para la población y el riego de los cultivos se hacía a través de una tecnología para el aprovechamiento de agua de lluvia, el agua era recogida en un área de 100 a 200 m² y almacenada en cisternas llamadas “Chultuns”; estas cisternas tenían un diámetro aproximado de 5 m, y eran excavadas en el subsuelo e impermeabilizadas con yeso.

En Cerros, una ciudad y centro ceremonial que se encuentra en el actual Belice, los habitantes cavaron canales y diques de drenaje para administrar el agua de lluvia y mediante un sistema

de depósitos, estos permitían que la gente permaneciera en la zona durante la estación seca cuando escaseaba el agua potable (año 200 d.C.).

En otras zonas de las tierras bajas, como en Edzná, en Campeche, los pobladores precolombinos de esta ciudad construyeron un canal de casi 50 m de ancho y de 1 m de profundidad para aprovechar el agua de lluvia, este canal proporcionaba agua para beber y regar los cultivos. (Ballen S, *et al*; 2006).

En el México prehispánico existen evidencias de estos sistemas, tales como en la zona arqueológica de Xochicalco, Morelos, 650 a 900 d.C., en donde no existía ninguna fuente de abastecimiento de agua, por lo que se practicaba un uso eficiente del agua. La plaza central y los patios fueron diseñados para canalizar el agua de lluvia hacia las cisternas, las cuales almacenaban el agua por siete meses aproximadamente, Figura 3 (Garrido 2006).



Figura 3 Izquierda, Zona arqueológica de Xochicalco. Derecha, Cisterna construida con piedra para almacenamiento de agua de lluvia (Garrido, 2006).

Situación actual

A la fecha los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia son el resultado de las necesidades (demanda), de los recursos disponibles y las condiciones ambientales en cada región. Sólo cuando no existe red de agua potable, el suministro es deficiente o el agua tiene un costo muy alto, se piensa en buscar sistemas alternativos de abastecimiento, por ello la documentación

sobre sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias, se limita a las acciones realizadas en las últimas décadas en zonas del planeta con las deficiencias mencionadas anteriormente.

África

La problemática del abastecimiento de agua potable es de carácter global, pero es una situación muy crítica en el continente Africano debido a la alta concentración de pobreza que imposibilita la obtención de la cantidad de recursos y la tecnología necesaria para construcción y operación de un sistema de acueducto y alcantarillado adecuado, además la escasez de fuentes apropiadas en cuanto a calidad y seguridad del suministro, ha hecho de este un problema aún mayor. (Ballén *et al.*, 2006)

Las prácticas convencionales en muchos países de África de aprovechamiento de agua lluvia son de carácter informal lo que permite tener costos reducidos; obteniendo también una muy baja calidad del agua y una eficiencia del sistema muy baja. Los sistemas formales son promovidos por agencias subsidiarias o adoptadas por familias de clase media con grandes volúmenes de almacenamiento que intenta satisfacer toda la demanda de la casa. (Ballén *et al.*, 2006)

Sin embargo, la recolección de agua lluvia es muy difundida en África con grandes proyectos en Botswana, Togo, Mali, Malawi, Sudáfrica, Namibia, Zimbabwe, Mozambique, Sierra Leona y Tanzania, uno de los proyectos adelantados es el de “Sistemas de Aprovechamiento de Agua Lluvia de Muy Bajo Costo” el cual se desarrollo con el concurso de varias organizaciones Africanas y el apoyo de Development Technology Unit (Inglaterra). (Ballén *et al.*, 2006)

Asia

La *India* es el segundo país con mayor población después de China. Por ello el gran problema que enfrenta el gobierno es suministrar los servicios básicos a 1.000 millones de personas. La solución que se ha tomado para enfrentar estos problemas son las técnicas de aprovechamiento de agua lluvia. El monzón es un diluvio breve, allí se dan aproximadamente 100 horas de lluvia por año. En estas 100 horas debe captar y almacenar el agua para las otras 8,660 horas que constituyen un año. (Ballén *et al.*, 2006)

En *Bangladesh*, la recolección de agua lluvia se ve como una alternativa viable para el suministro de agua segura en áreas afectadas por contaminación con arsénico. Desde 1977, cerca de 1.000 sistemas de aprovechamiento de agua lluvia fueron instalados en el país por la ONG Forum for Drinking Water Supply & Sanitation. Los tanques utilizados para el almacenamiento de agua lluvia en Bangladesh: tanques de concreto reforzado, tanques de mampostería, cisternas y tanques subterráneos; el agua lluvia almacenada se usa para beber y cocinar, esta es aceptada como segura y cada vez es más utilizada por los usuarios locales. (Ballén *et al.*, 2006)

China ha estado enfrentando serios problemas de escasez de agua que han causado grandes pérdidas económicas y medioambientales. La peor condición de escasez de agua se da en la meseta de Loess de Gansu, localizada en el noroeste del País, esta es una de las áreas más pobres de China donde el escurrimiento y el agua superficial son muy escasos. (Ballén *et al.*, 2006)

La única fuente de agua potencial en esta área es la lluvia, debido a esto desde 1988, se han probado eficientes técnicas de captación de agua lluvia y de 1995 a 1996, el gobierno local ha implementado el proyecto llamado "121" para captación de agua lluvia, apoyando económicamente a cada familia para construir un campo de recolección de agua, dos almacenamientos y un terreno adecuado para captar, suministrando agua a 1.2 millones de personas (260,000 familias) y 1.18 millones de cabezas de ganado. (Ballén *et al.*, 2006)

Singapur cuenta con recursos naturales limitados y una creciente demanda de agua, esto ha llevado a la búsqueda de fuentes alternativas y métodos innovadores para el aprovechamiento del recurso agua. Alrededor del 86% de la población de Singapur vive en edificios de departamentos. Los techos de estos edificios son utilizados para la captación de aguas lluvias, el agua lluvia es almacenada en cisternas separadas del agua potable para darle usos diferentes al de consumo humano. (Ballén *et al.*, 2006)

En *Tokio* el aprovechamiento de agua lluvia es promovido para mitigar la escasez de agua, controlar las inundaciones y asegurar agua para los estados de emergencia. A nivel comunitario se están implementando instalaciones que están introduciendo a la población en la

utilización del agua lluvia, éstas son llamadas “Ronjinson” (ver figura 4), se les encuentra la vía pública del distrito de Mukojim.

Está instalación recibe el agua lluvia del techo de la casa, la cual es almacenada en un pozo subterráneo, para extraer el agua se utiliza una bomba manual como se ilustra en la Figura 4, el agua colectada es utilizada para el riego de jardines, aseo de fachadas y pisos, combatir incendios y como agua de consumo en situaciones de emergencia.

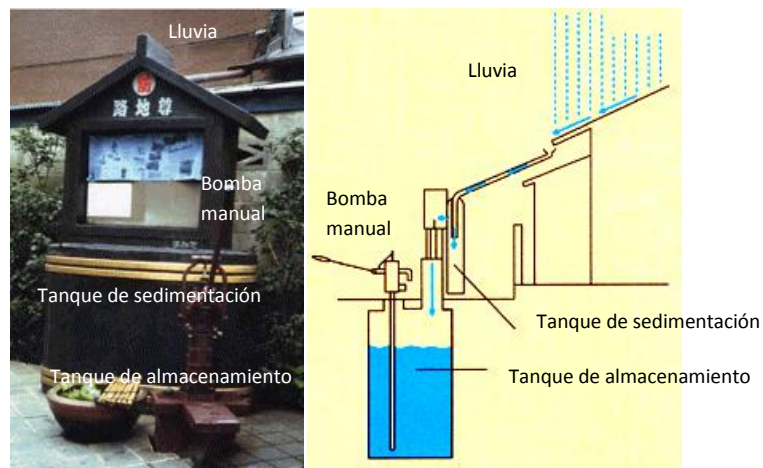


Figura 4 “Rojison”, instalación para la utilización de agua lluvia a nivel comunitario en Tokio, Japón, Fuente: UNEP, 2000

Europa

En octubre de 1998, los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia fueron introducidos en Berlín, Alemania como parte de un redesarrollo urbano a gran escala, Daimler Chrysler Potsdamer Platz, con el fin de controlar las inundaciones, utilizar racionalmente el agua de la ciudad y crear un mejor micro clima. El agua lluvia cae en las cubiertas de 19 edificios (32.000 m²), se recoge y almacena en un tanque subterráneo de 3500 m³. Esta agua es usada para la descarga de inodoros, el riego de zonas verdes (incluyendo techos verdes) y llenar un estanque artificial. (Ballén *et al.*, 2006)

En otro proyecto Belss-Luedecke-Strasse Building State en Berlín, el agua lluvia de todas las cubiertas (7.000 m²) es descargada a una cisterna con capacidad de 160 m³, junto con el agua de escurrimiento de las calles, espacios de estacionamiento y vías peatonales (área de 4.200

m2). El agua es tratada en varios pasos y usada en la descarga de sanitarios y el riego de jardines. El sistema está diseñado para que la mayoría de los contaminantes del flujo inicial sean evacuados al alcantarillado de aguas lluvias. (Ballén *et al.*, 2006)

El sistema retiene aproximadamente el 58% del agua lluvia que cae dentro del perímetro de las instalaciones. A través de un modelo basado en 10 años de simulación se estimó que el ahorro de agua potable con la utilización de agua lluvia es de 2.430 m³ por año, con este volumen se puede preservar el reservorio de agua subterránea de Berlín. (Ballén *et al.*, 2006)

Oceanía

En Australia se utiliza el aprovechamiento de agua lluvia se como una solución muy común al problema de suministro de agua. En 1994 el Australian Bureau of Statistics (Oficina Australiana de Estadística) realizó un estudio mostrando que el 30.4 % de los hogares australianos ubicados en las zonas rurales y el 6.5% de los hogares en las ciudades utilizan algún sistema de aprovechamiento de agua lluvia, también se indica en el estudio que el 13 % de las casas donde se ha implementado un sistema de aprovechamiento de agua lluvia, el agua se utiliza para beber y cocinar. (Ballén *et al.*, 2006)

Sur América

Brasil

En la década pasada en Brasil, muchas ONG y organizaciones ambientales se enfocaron en trabajar en el suministro de agua para consumo humano usando sistemas de aprovechamiento de agua lluvia.

En la región noroeste de Brasil de clima semiárido, en promedio anual de lluvia varía desde 200 hasta 1.000 mm. Las comunidades nativas tradicionalmente han recogido agua lluvia en pozos excavados a mano en rocas, pero este sistema no logra satisfacer las necesidades de la población, por ello una ONG y el gobierno de Brasil iniciaron un proyecto para construir un millón de tanques para la recolección de agua lluvia en un periodo de 5 años, para beneficiar a 5 millones de personas. La mayoría de estos tanques fueron hechos con estructuras de concreto prefabricado o concreto reforzado con mallas de alambre. (Ballén *et al.*, 2006)

Centro América

Honduras

Los habitantes de las comunidades del municipio de Orocuina, hasta 1992 tenían que recorrer diariamente distancias de hasta 2.5 km para abastecerse de agua de baja calidad, situación que se hacía más difícil en la temporada seca.

En respuesta a este problema, la Universidad Nacional Autónoma de Honduras diseñó e instaló cinco sistemas basados en pilas recolectoras para almacenamiento de agua de lluvia. Los sistemas consistían en colocar canaletes alrededor del techo de las viviendas y estos se conectaban a las pilas recolectoras construidas con materiales locales como arena, grava o piedra. (Ballén *et al.*, 2006)

La capacidad de almacenamiento podía ser de 1.03 m³ hasta 4.40m³, los tamaños de las estructuras dependían de las posibilidades económicas de la población y de las necesidades de consumo según el tamaño del grupo familiar. El periodo de utilización del agua fue de alrededor de 40 días considerando el consumo diario de 25 litros por persona. (Ballén *et al.*, 2006)

Muchos de estos sistemas utilizan materiales reciclables y algunos prototipos muestran grandes niveles de iniciativa e ingenio.

Nicaragua

En 2004 las organizaciones Georg Fischer y Mercy Ship implementaron un proyecto para construir sistemas de captación pluvial en las áreas de acceso más limitado al agua. El ejemplo más claro se vivió en el departamento de León, en donde fueron instalados 7 tanques con capacidades que variaron entre los 14m³ y los 71 m³, los cuales permitieron a los habitantes abastecerse de agua durante la temporada seca para distintas actividades, todas ellas relacionadas con el consumo humano. (Ballén *et al.*, 2006)

Islas del Caribe

Los sistemas de captación del agua de lluvia para uso doméstico son una solución común para el abasto de agua. La mayoría de los países de la región utilizan las tecnologías de captación del agua de lluvia en techos y pisos. Algunos cuentan con legislación y normatividad para captar la lluvia logrando la autosuficiencia como: Islas Vírgenes, Barbados y las Islas Turcos y Caicos. (Ballén *et al.*, 2006)

Norte América

Se estima que más de medio millón de personas en los Estados Unidos utilizan sistemas de aprovechamiento de agua lluvia abasteciéndose de agua para usos doméstico o propósitos agrícolas, comerciales o industriales. Existen más de 50 compañías especializadas en el diseño y construcción de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias.

Texas es el estado donde más se utilizan los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia. Una casa típica en Texas tiene un área de 200 m² de cubierta y puede producir más de 150.000 litros de agua al año con una precipitación anual media de 850 mm. (Ballén *et al.*, 2006)

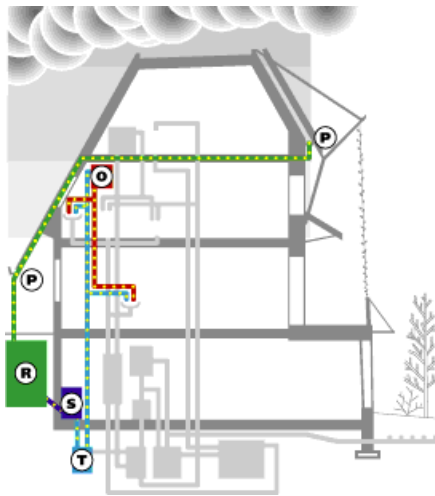
En Vancouver, Canadá se provee de un subsidio para la compra de barriles para el aprovechamiento del agua lluvia, como parte de un programa piloto para la conservación del agua. Los barriles de agua lluvia son tanques plásticos de 75 galones (284 litros) que se entregan por U\$ 40 incluidos los impuestos.

El barril se utiliza para recolectar agua lluvia proveniente de los techos, siendo utilizada para regar los jardines y el césped, estas actividades demandan más del 40% del agua total que llega a las viviendas durante el verano. Las proyecciones indican que cada barril podría ahorrar cerca de 1.3000 galones (4.920 litros) de agua durante los meses de verano donde la demanda de agua es más alta.

“HEALTHY HOUSE” es una casa familiar de tres habitaciones con un área de 158 m² ubicada en Riverdale área metropolitana de Toronto, Canadá. Esta edificación es totalmente autosuficiente, no depende del sistema de acueducto municipal.

En la Figura 5 se muestra el esquema general del funcionamiento del sistema de aprovechamiento de agua lluvia.

El agua para consumo humano se suministra por medio de un sistema de canales que conducen el agua lluvia hacia un tanque de almacenamiento donde se le adiciona cal, esta es utilizada para reducir la acidez del agua y darle un sabor fresco, posteriormente el agua pasa a través de un filtro de arena fina y carbón activado para remover todas las impurezas y por último es sometida a un proceso de desinfección mediante luz ultravioleta. (Ballén *et al.*, 2006)



- O:** Tanque de Agua caliente de consumo, abastece la cocina y baños.
- P:** Tragantes, el agua lluvia es pasa a través de un filtro de pantalla y luego va a la cisterna
- R:** Tanque de almacenamiento de agua lluvia de 20 m3.
- S:** Filtro Combinado. El agua pasa a través de una combinación rugosa, arena fina y un filtro de carbón, luego pasa a través de un sistema de desinfección de luz ultravioleta, después es almacenada para consumo.
- T:** Tanque de agua fría para beber, abastece la cocina y los baños, el exceso es traído nuevamente hacia el tanque de agua fría.

Figura 5 Esquema de funcionamiento del sistema de aprovechamiento de agua lluvia en “Healty House”, Toronto, Canadá. Fuente: <http://www.cmhc-schl.gc.ca/popup/hhtoronto/suppl.htm>

México

En México como en muchos países existen infinidad proyectos de captación de agua de lluvia en donde el principal factor “la falta de agua potable” obliga a recurrir a otras prácticas de usos y consumo del agua con la que se cuenta.

Un ejemplo rural de estos proyectos es el que se realiza el International Rice Research Institute *IRRI* (Instituto Internacional de Recursos Renovables) que en Colaboración con el Proyecto Concentrarte AC y el Instituto Nacional de Desarrollo Social (INDESOL), llamado “Ha Tatukari” o “Agua es Vida” en Wírrarika es un proyecto integral de instalación de sistemas de captación de lluvia, transferencia de tecnología apropiada, y educación ambiental, de salud, y de uso de agua para la comunidad Huichol de “La Cebolleta”, en Mexquitic, Jalisco.

Ésta comunidad, 100% indígena Wírrarika (Huichol) tradicional, vive en un estado de extrema pobreza, careciendo de todos los servicios básicos como luz, agua, saneamiento y recolección de basura.(pagina web IRRI)

Esta comunidad subsiste con cantidades de agua que se encuentran por debajo de los niveles promedios nacionales e incluso muy por debajo de los límites inferiores establecidos por la ONU y la OMS como mínimos para el digno desempeño de la vida.

La comunidad depende al 100% de fuentes de agua silvestre que deben acarrear largas distancias, y que pueden presentar contaminación biológica peligrosa para la salud. Además su dificultad de obtención resulta en un abastecimiento insuficiente para mantener niveles adecuados de higiene para la comunidad.

Ha Tatukari busca enseñar técnicas sustentables y económicas para captar agua de lluvia. Esto incluye técnicas para un suministro de agua potable como parte de un trabajo integral con la comunidad, cuyo objetivo es instalar sistemas de captación de agua de lluvia en todas las casas, y a la vez dejar el conocimiento necesario para que la comunidad pueda mantener y replicar dichos sistemas de manera independiente.(pagina web IRRI)

En la urbe se lleva a cabo un proyecto llamado “Isla Urbana” es un proyecto mas de IRRI AC, y Fundación Temo dedicado a desarrollar una solución al problema de agua en México.

En el cual se diseña y ponen sistemas de captación de agua de lluvia en casas de bajos ingresos y donde la escasez de agua ya es un problema serio.

El proyecto tiene como objetivo asegurar un abastecimiento sustentable de agua para la ciudad de México y que sea accesible a personas de todo nivel económico.

Cuando una familia empieza a cosechar la lluvia con los sistemas de Isla Urbana, su cisterna está llena hasta seis meses del año con esta agua. Esto significa que la ciudad no tiene que bombear agua a grandes distancias, ni agotar ríos y acuíferos, para mantener abastecida a esa casa.

En el año 2003 se constituyó el Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia del Colegio de Postgraduados de la Universidad Autónoma Chapingo (CIDECALLI-CP). Algunas de sus actividades han sido:

- Elaboración y ejecución de proyectos sobre SCALL para consumo humano y uso doméstico, en las comunidades Mazahua y Purépecha, en el Estado de Michoacán, en la Mixteca Oaxaqueña y Guadalajara, entre otros.
- Ha diseñado y construido cinco diferentes modelos de SCALL; se encuentran en el Campus Montecillo, del Colegio de Posgraduados de la Universidad Autónoma Chapingo y los ha denominado COLPOS 1 a COLPOS 5, (CIDECALLI, 2008).

Dada la relevancia de las investigaciones efectuadas por el CIDECALLI, se describen algunos de los sistemas COLPOS (del 1 al 5).

COLPOS 1. Cisterna para uso doméstico (ver figura 6):

- Capacidad de dotar a una familia de 4 personas.
- Consumo per cápita de 100 litros diarios durante todo el año.
- Área de captación 120 m².
- Precipitación pluvial anual 610 mm.
- Tanque de almacenaje 73 m³.

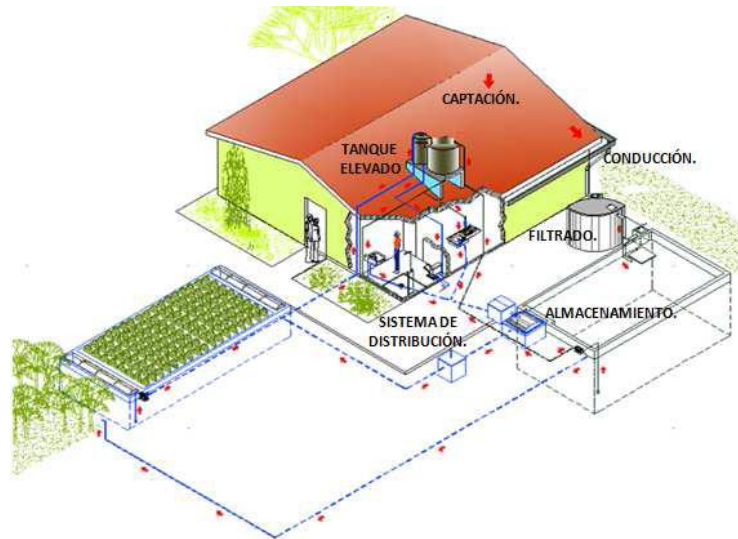


Figura 6. Sistema de captación Colpos 1.

COLPOS 2. Estanque para peces de ornato y comestibles en sistemas de producción libre y de jaulas flotantes. Un uso alternativo del agua es en el cultivo de hortalizas en huerto familiar con capacidad de 70 m³ (ver figura 7)



Figura 7. Sistema de captación Colpos 2.

COLPOS 3. Cisterna para planta purificadora de agua de lluvia (ver figura X):

- Abastecimiento del agua de lluvia purificada a nivel comunitario.
- Capacidad de la cisterna: 1,980 m³.
- Beneficia a 2,300 personas.



Figura 8. Sistema de captación Colpos 3.

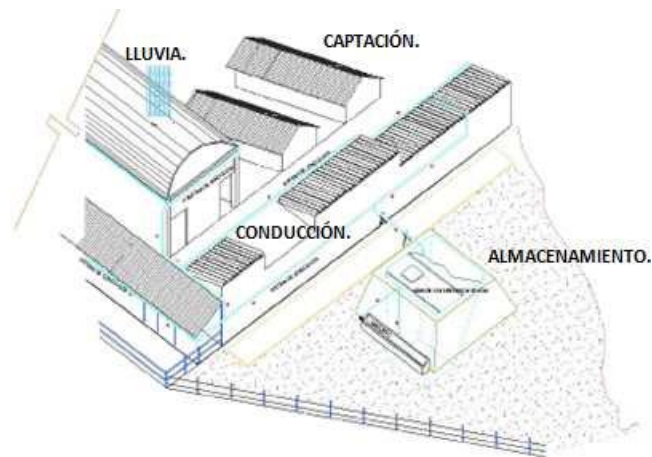


Figura 9. Sistema de captación Colpos 4

COLPOS 5. Cisterna para riego en invernaderos (ver figura 10):

- Capacidad de 2,000 m³
- El agua de lluvia captada por la cubierta es almacenada y conservada en condiciones adecuadas para el riego de cultivos bajo el sistema hidropónico.

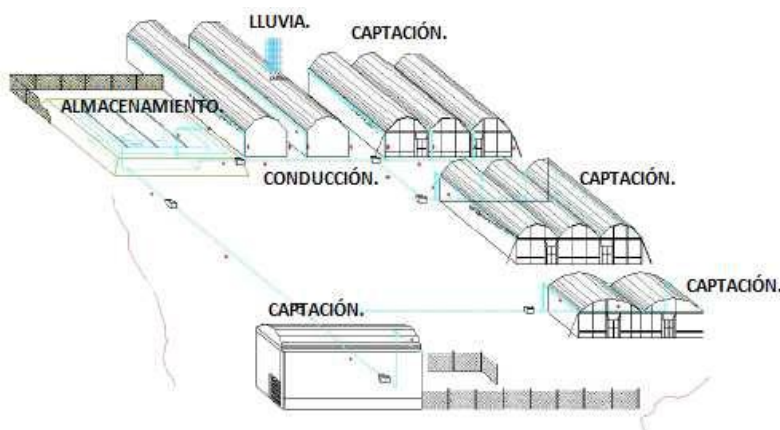


Figura 10. Sistema de captación Colpos 5.

El éxito de los proyectos que han sido impulsados por el CIDECALLI se ha visto reflejado en las comunidades que han puesto en marcha algunos de estos sistemas para captar el agua de lluvia, lo que motiva la continuidad de estos trabajos.

2.2 Componentes del sistema de captación de agua de lluvia

Los sistemas de recolección de agua de lluvia no tienen grandes variaciones entre sí, la mayoría constan básicamente de tres componentes: área de captación, conducción y almacenamiento (ver figura 11 comparación del sistema de recolección Romano y uno actual) desde los primeros sistemas.

Pero dependiendo de los usos para los cuales esté diseñado el sistema y de su complejidad, existen otros componentes adicionales, como por ejemplo el interceptor de las primeras aguas, el sistema de distribución (por gravedad o por bombeo) y el tratamiento (desinfección, cuando el agua es para consumo humano) los cuales representan mayores costos.

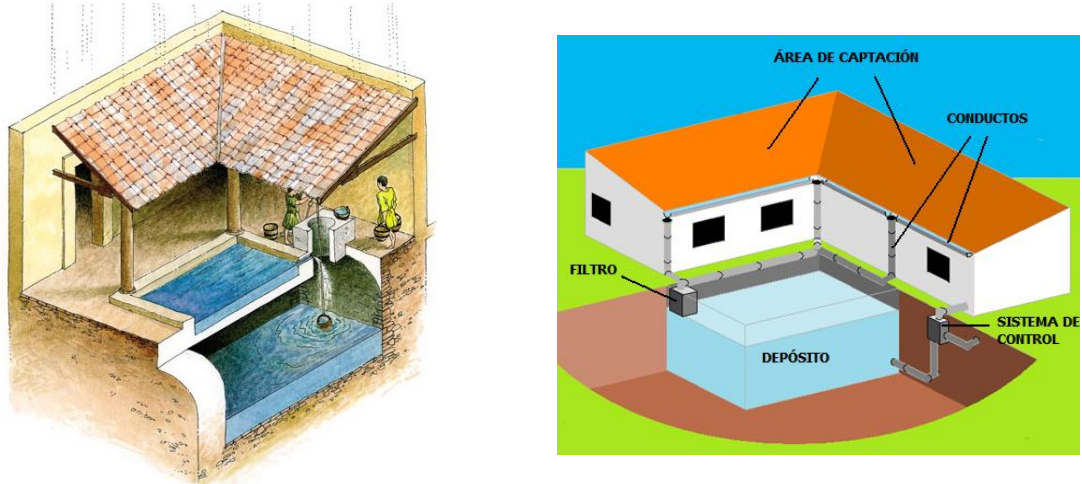


Figura 11 Sistemas de captación “La Domus” (a la izquierda), “un ejemplo actual” (a la derecha).

2.2.1 Área de captación

Son las áreas o superficies de recolección, pueden ser techos, patios, explanadas, caminos pavimentados, garajes y cualquier superficie *no permeable* por donde escurra el agua de lluvia y sea factible recolectarla. (PNUMA, 2008)

La mayoría de los sistemas utilizan la captación en los techos, los cuales deben tener adecuada pendiente y superficie, que faciliten el escurrimiento del agua de lluvia hacia el sistema de recolección y almacenamiento.

Los materiales empleados para los techos pueden ser las tejas de arcilla, madera, paja, cemento, entre otros. Los techos de cemento y de teja son los más comunes debido a su durabilidad, el precio relativamente bajo y porque proveen agua de buena calidad; los que tienen compuestos de asfalto, amianto o los que están pintados se recomienda utilizarlos sólo cuando el agua captada no es para consumo humano, ya que pueden lixiviar materiales tóxicos en el agua lluvia (Abdulla y Al-Shareef, 2006).

La superficie sobre la cual cae la lluvia debe ser de tamaño suficiente para cumplir la demanda y tener la pendiente requerida para facilitar el escurrimiento pluvial al sistema de conducción para su aprovechamiento.

El tipo de superficie de escorrentía o área de captación, será transitable o no. En tal caso, la contaminación relacionada con la actividad humana será superior en zonas pavimentadas de tráfico rodado o peatonal que en cubiertas inaccesibles, su uso para diferentes actividades dependen del grado de contaminación y de las características del sistema para los usos que se desee

En la figura 12 muestra la captación de agua de lluvia con diferentes usos dentro de la casa habitación la primera casa de lado izquierdo (del lector) se observa el área (1) , canaleta (2) filtro de salidos gruesos (3), cisterna (4), controlador de nivel (5); para los usos con este tratamiento (A,B,C,D) no requiere mayo tratamiento, si se agrega un filtro de mejor capacidad de filtración(6) que garantice un uso potable con restricción para beber; si se agrega un componente (7) que bien puede ser un sistema de UV el agua captada puede utilizarse sin restricción.

La cantidad y calidad del líquido captado varía en función de las tecnologías de tratamiento y la precipitación anual de la zona y de la superficie de captación. Esta cantidad puede verse afectada por los materiales del techo, salpicaduras fuera del área de captación, fugas, evaporación y absorción.

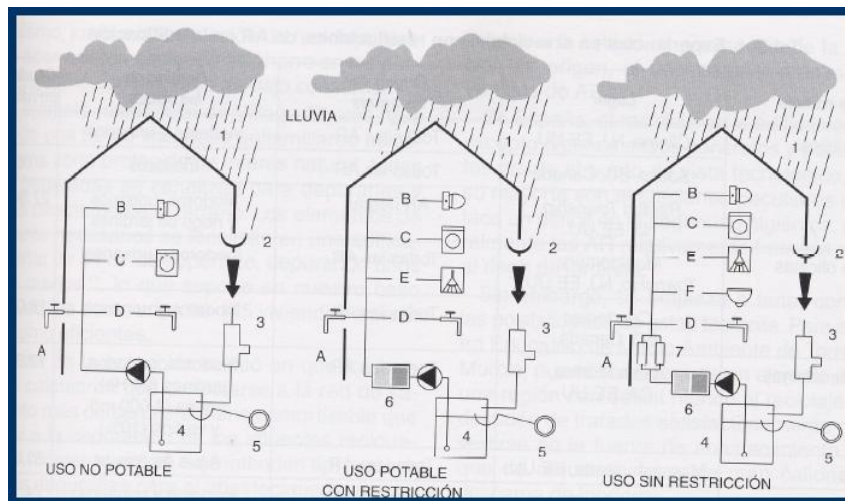


Figura 12 El área de captación y sus diferentes usos de acuerdo con la calidad del agua de lluvia (Gallardo-Cornejo 2008).

2.2.2 Sistema de conducción

El sistema de conducción es un conjunto de canaletas o tuberías de diferentes materiales y formas que conducen el agua de lluvia del área de captación al sistema de almacenamiento, a través de bajadas con tubo de PVC para edificaciones actuales o ferrocemento para las edificaciones ya construidas.

Las canaletas se instalan en los bordes más bajos del techo, en donde el agua de lluvia tiende a acumularse antes de caer al suelo; el material debe ser liviano, resistente, fácil de unir entre sí, debe combinar con los acabados de las instalaciones (zonas urbanas, ver Figura 13), que no contamine con compuestos orgánicos o inorgánicos; por lo que se recomienda se coloquen mallas que detengan basura, sólidos y hojas, para evitar la obstrucción del flujo en la tubería de conducción; así mismo, realizar en los techos labores de limpieza al inicio de la época de lluvias.



Figura 13 Canaletas utilizadas en la captación del agua de lluvia sin alterar el diseño arquitectónico de la estructura (Centro cultural Santa Tecla, El salvador)

2.2.3 Almacenamiento

La función del depósito será la de almacenar cierta cantidad de agua captada, para abastecer los destinos planteados durante un determinado período de tiempo. Su volumen se calcula según las dotaciones de las tipologías edificatorias analizadas y los destinos propuestos.

Los depósitos podrán construirse de muchos materiales, como lo demuestra la propia experiencia desde tiempos remotos.

Los materiales más utilizados para la construcción de las cisternas o tanques de almacenamiento son los siguientes:

Plásticos: Fibra de vidrio, polietileno y PVC

Metales: Barril de acero, tanque de acero galvanizado.

Concreto: Ferrocemento, piedra y bloque de concreto.

Madera: Madera roja, abeto, ciprés (es eficiente, pero cara).

Cuando ésta se llena, las excedencias van al sistema de alcantarillado. Las capacidades están en función de las áreas de captación, precipitaciones medias, duración de las temporadas de lluvia y requerimientos en las edificaciones.

Las principales variantes consisten en los materiales de construcción, la ubicación sobre o bajo superficie del suelo y dimensiones. Para un mayor almacenamiento se pueden acoplar varias cisternas.

2.2.4 Tratamiento del agua de lluvia

Los elementos para garantizar la calidad del agua captada es en el tratamiento, pueden ser los filtros que son los más utilizados actualmente.

El uso de filtros impide la introducción en la cisterna de residuos sólidos arrastrados por las precipitaciones, evitando su sedimentación o fermentación y mal olor del agua. El desagüe del filtro está conectado directamente a la cisterna.

Existe un gran número de fabricantes de filtros exteriores auto-limpiables para aguas de lluvia captadas en azoteas de edificios. La capacidad y dimensiones de los filtros están en función del área de captación.

El primer filtro puede ser una rejilla colocada en la tubería o canaletas que lleva el agua captada y que sirven para retener principalmente las hojas de los árboles u otros sólidos de gran tamaño (ver Figura 7).

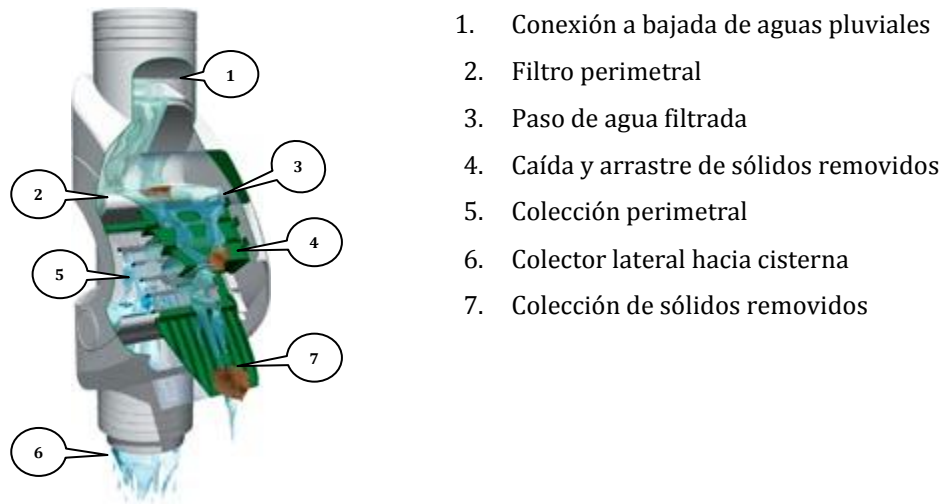


Figura 14 Filtro rainus de 3P Technik, partes del filtro y su funcionamiento.

La calidad del agua captada se logra por medio de dispositivos especiales, sobre todo cuando el agua se quiere para ser consumida directamente, es decir se quiere que sea potable.

En los primeros milímetros de lluvia puede utilizarse una trampa de desviación de primera escorrentía, para arrastrar sólidos contaminantes que se han depositado sobre las azoteas. La implantación de trampas para el primer escurrimiento permite la remoción de las partículas de mayor densidad (figura 15).

La trampa para desviación del primer escurrimiento de agua también evita la contaminación del agua del tanque con las primeras precipitaciones, que son las más contaminadas.

El dispositivo de desviación de agua puede ser instalado en cada bajada que suministre de agua a la cisterna, o de unidades más grandes, que pueden manejar múltiples tuberías de entrada (Rain harvesting, Australia).

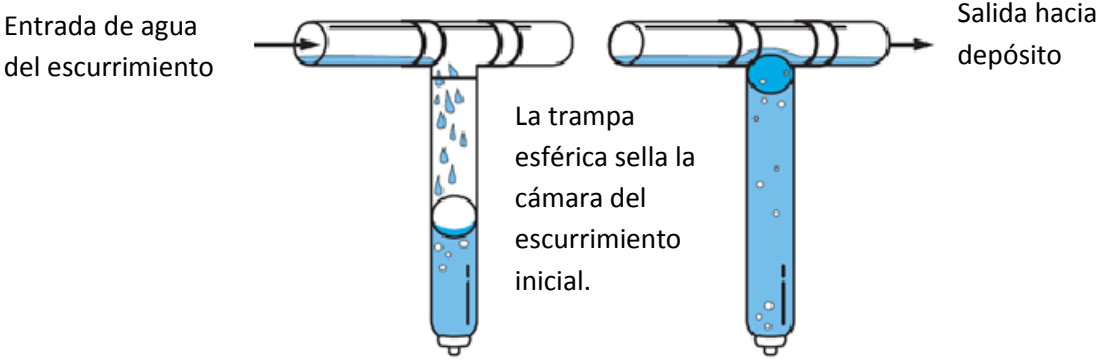


Figura 15. Canalización temporal de primeros escurrimientos (rain-harvesting, Magnemart).

CAPÍTULO III

LAS EDIFICACIONES VERDES O SUSTENTABLES EN EL RUBRO DE AGUA

La edificación sustentable es la creación de estructuras mediante el uso de procesos que son ambientalmente responsables y eficaces en el uso de los recursos a lo largo de la vida de una edificación desde su diseño, construcción, operación, mantenimiento, renovación y de construcción (Edificación sustentable en América de Norte, 2008).

En esta práctica se cuida que el diseño del edificio favorezca a la economía, utilidad, durabilidad y confort. La edificación sustentable es también conocida como un edificio de alto rendimiento sostenible o edificios verdes (Greenbuilding, EPA, 2010).

Los edificios verdes están diseñados para reducir el impacto global del entorno construido en la salud humana.

El propósito de las edificaciones sustentables es lograr:

- Uso eficiente de energía, agua y otros recursos
- Protección de la salud de los ocupantes

3.1 La sustentabilidad en el mundo

Inglaterra y Estados Unidos fueron pioneros en la creación de asociaciones y leyes en defensa de la naturaleza, ejemplo seguido después por Francia, Alemania y España. En Estados Unidos

es donde surge la idea de preservar grandes espacios en su estado original, como paisajes y “santuarios” para la vida animal y vegetal, dejando fuera la presencia humana. En 1864 el gobierno cede, con ese fin, el valle del Yosemite y el Mariposa Grove, en California; y en 1872, se crea el primer parque nacional del país y del mundo, el de Yellowstone.

Desde entonces, algunas prácticas como el uso de materiales renovables y/o el diseño de captación de energía solar, se remontan a miles de años atrás.

El movimiento contemporáneo de construcción verde surgió de la necesidad de tener más prácticas de construcción de energía eficiente y respetuosa del medio ambiente. Los aumentos del precio del petróleo de la década de 1970 impulsaron la investigación y la actividad significativa para mejorar la eficiencia energética y buscar fuentes de energía renovables. Esto, combinado con el movimiento ecologista de los años 1960 y 1970, llevó a los primeros experimentos con la construcción ecológica contemporánea (Greenbuilding, EPA, 2010).

El Consejo de Edificación Sustentable de los Estados Unidos (*USGBC*, U.S. Green Building Council) promueve la sostenibilidad de la forma en que los edificios se diseñarán, construirán y explotarán. El USGBC es mejor conocido por el desarrollo del sistema de calificación denominado LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), que promueve en la industria de la edificación materiales ambientalmente responsables, técnicas de arquitectura sostenible y las políticas públicas (Greenbuilding, EPA, 2010)

En 1995 la USGBC, y determinó crear su propio sistema de calificación debido a que el sistema de calificación para la sostenibilidad (*ASTM*, American Society for Testing Materials) se basaba en un consenso riguroso pero el proceso de evaluación resultó ser demasiado lento.

En resumen, LEED es un sistema de diseño, construcción o certificación de edificios verdes. Los edificios se clasifican como certificados, plata, oro ó platino en función del número de puntos que adquieren dentro de los seis elementos de construcción (Greenbuilding, EPA, 2010).

- . Sitio sostenible
- . Eficiencia de agua
- . Energía y atmósfera

- . Materiales y recursos
- . Calidad ambiental interior
- . Innovación y proceso de diseño

Dentro de cada una de estas categorías, hay un número específico de créditos disponibles a través de muchas subcategorías. Se convierte en puntos a favor para los propietarios ya que el valor de la propiedad certificada con LEED se eleva.

Las certificaciones tienen como objetivo transformar las edificaciones actuales y futuras bajo esquemas de sustentabilidad y eficiencia ambiental, promoviendo la salud humana, el cuidado de los recursos, la prosperidad económica, el beneficio social y la calidad de vida.

Algunas certificaciones internacionales:

LEED: EUA	Leadership in Energy and Environmental Design
BREEAM: INGLATERRA	BRE Environmental Assessment Method
DGNB: ALEMANIA	German Sustainable Building Council
BEAM: HONG KONG	Building Environmental Assessment Method
NABERS: AUSTRALIA	National Australian Built Environment Rating System
BCA: SINGAPUR	Green Mark Scheme
GBAS: CHINA	Green Building Assessment Method

3.2 El proceso de sustentabilidad en México

México cuenta desde 1988, con la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en la que el desarrollo sustentable se concibe como: “El proceso evaluable mediante indicadores de carácter ambiental, político y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección al ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras” (Nebel y Wright,1999).

En México, las iniciativas de políticas en relación con el ahorro de energía en edificios iniciaron apenas a mediados de los años noventa, cuando la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) promovió la formulación y la aplicación de normas obligatorias en materia de eficiencia energética para la iluminación y la envolvente de inmuebles no habitacionales.

En la práctica, la autoridad en reglamentos de construcción corresponde a los municipios. Sin embargo, de los 2,500 municipios del país, sólo 72 cuentan con sus propios reglamentos de construcción. Ante la falta de reglamentos locales, los municipios recurren a la reglamentación estatal. En muchas ciudades (incluso en las más grandes), no siempre se aplican cabalmente algunos aspectos de los reglamentos de construcción, como los relacionados con los sistemas de agua y electricidad, debido a su cantidad y complejidad técnica, así como a la falta de capacidad y conocimiento de los funcionarios municipales.

Un aspecto de especial relevancia en México es lo limitado de los procesos de planeación de usos de suelo y valoración catastral, pues éstos adolecen de criterios ambientales en temas como restricciones en alturas de edificación, densidades, etc., necesarios para asegurar objetivos de edificación sustentable. Los reglamentos para viviendas sustentables se han considerado como factor de impulso, pero su adopción está aún en proyecto e inicialmente se aplicaría sólo al Distrito Federal.

La Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) comenzó a trabajar recientemente en la instrumentación de un programa de calentadores solares de agua; tal iniciativa, junto con el establecimiento de lineamientos de sustentabilidad para las adquisiciones, arrendamientos y servicios del sector público, sin duda coadyuvará al fomento de una edificación más eficiente.

La industria turística, por su parte, tiene gran potencial para la introducción de numerosos productos con ventaja ambiental y la consolidación de los mercados para la edificación sustentable. El destino turístico Bahía de Loreto, actualmente en desarrollo, se propone generar más energía a partir de recursos renovables de la que consume; recolectar o producir más agua potable de la que usa, y crear más biodiversidad, biomasa y hábitat de los que había en el lugar antes de que se iniciara su desarrollo.

Sin embargo, a algunos observadores les preocupa el hecho de que en ciertas regiones de México esté aumentando considerablemente el número de casas para vacaciones y desarrollos turísticos orientados a clientes de Estados Unidos, Canadá y otros lugares, quienes seguramente buscarán inmuebles con aire acondicionado y otras características que pueden incrementar la demanda de energía.

Desde noviembre de 2008 el Distrito Federal cuenta con un programa de Certificación de Edificaciones Sustentables que promueve la reducción de emisiones contaminantes y el uso eficiente de los recursos en las edificaciones existentes y aquellas por construirse, mediante incentivos económicos a través de instrumentos de regulación voluntaria, dirigido a transformar y adaptar las edificaciones en las etapas de diseño, construcción, renovación y operación bajo esquemas basados en criterios de sustentabilidad y eficiencia ambiental.

3.3 La importancia de la sustentabilidad en la Ciudad de México

La Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal ha asumido la responsabilidad de conducir la Política Ambiental de la Ciudad de México, para el logro de la sustentabilidad de acuerdo con el Programa de Medio Ambiente 2007-2012 y con el Programa de Acción Climática de la Ciudad de México; dado que el Distrito Federal como una mega ciudad, exige políticas y acciones concretas de mediano y largo plazo para garantizar su viabilidad ecológica (Programa de certificaciones sustentables GDF,2008).

El Programa de Certificación de Edificaciones Sustentables, constituye un instrumento de planeación de política ambiental que forma parte de un conjunto articulado de políticas públicas en materia ambiental del Gobierno del Distrito Federal; asimismo, responde a la demanda global de reajustar las formas tradicionales de diseño, construcción y operación de las edificaciones, así como de patrones de comportamiento y de consumo humano.

Forma parte de un conjunto de acciones locales que permiten la reducción de emisiones contaminantes emitidas a la atmósfera, agua y suelo, así mismo contribuyen a garantizar el derecho que toda persona tiene a un medio ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar.

El Programa de Certificación de Edificaciones Sustentables (PCES) es un instrumento de planeación de política ambiental dirigido a transformar y adaptar las edificaciones actuales así como las futuras, bajo esquemas basados en criterios de sustentabilidad y eficiencia ambiental; tiene como finalidad contribuir a la conservación y preservación de los recursos naturales en beneficio social además de mejorar la calidad de vida de los habitantes del Distrito Federal.

El objetivo del programa es promover y fomentar la reducción de emisiones contaminantes además de poner en práctica el uso eficiente de los recursos naturales en el diseño y operación de edificaciones en el Distrito Federal, con base en criterios de sustentabilidad y eficiencia ambiental; a través de la implementación en un proceso de certificación y regulación voluntaria para el otorgamiento de incentivos económicos.

Dadas las condiciones demográficas de la Ciudad de México, la presión sobre el suelo de conservación, así como la demanda creciente de agua, energía y recursos naturales a la que está expuesta, el PCES surge como una de las respuestas para atender a estos puntos, en concordancia con estrategias y acciones planteadas por el Gobierno del Distrito Federal, a través del Plan Verde para encaminar al Distrito Federal hacia la sustentabilidad de su desarrollo.

Los criterios especificados en este programa tienen que ver con energía, agua, manejo de residuos, calidad de vida y responsabilidad social, impacto ambiental y otros impactos, otorgando a cada uno una puntuación determinada con base ponderada sobre 100 puntos.

En el rubro de agua se privilegian la captación o infiltración de aguas pluviales (20% del puntaje asignado para el criterio de agua), el tratamiento y uso de aguas grises (32% del puntaje total) y el ahorro de agua potable (50% de los puntos totales), (Programa de certificaciones de edificaciones sustentables del Distrito Federal, 2008)

Para el primer caso, se podrán obtener hasta cinco puntos acreditando infraestructura construida para la captación y aprovechamiento de las aguas pluviales en usos específicos y/o

para la infiltración de aguas pluviales en los casos en donde sea posible la recarga de agua al subsuelo, según aprobación del SACM (Sistema de Aguas de la Ciudad de México).

En el caso de aguas grises se podrán obtener hasta ocho puntos, ya sea por instalación de una planta para su tratamiento, o bien por utilización del agua residual tratada de la red de distribución municipal.

Por último, para las acciones de ahorro de agua potable, se podrán obtener hasta doce puntos, divididos de la siguiente manera: cinco puntos por acreditación de eliminación de fugas, cinco puntos por uso de tecnología, dispositivos y elementos ahorradores de agua y dos puntos por campañas de culturización dirigidas a los inquilinos o usuarios del edificio.

CAPÍTULO IV

ZONA DE ESTUDIO, CARACTERÍSTICAS ATMOSFÉRICAS E HIDROLÓGICAS

4.1 Características atmosféricas del sitio

El Valle de México se ubica sobre los 19°20' de Latitud Norte y 99°05' de Longitud Oeste, formando parte de una cuenca, con una elevación promedio de 2,240 msnm y una superficie de 9,560 km²; presenta valles intermontañosos, mesetas y cañadas, así como terrenos semiplanos, en lo que alguna vez fueron los lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco; está integrada por una parte del Estado de México, el sur del Estado de Hidalgo, el sureste de Tlaxcala y casi la totalidad del Distrito Federal.

El área urbana se extiende en una cuenca semicerrada, en la porción suroeste del Valle de México, la cual está sujeta de manera natural a condiciones que no favorecen una adecuada ventilación de la atmósfera. Entre los principales factores fisiográficos y climáticos que afectan la calidad del aire destacan los siguientes:

- El entorno montañoso que rodea la cuenca constituye una barrera natural que dificulta la libre circulación del viento y la dispersión de los contaminantes. Por ello, es un medio propicio para la acumulación de los contaminantes atmosféricos. Las montañas que delimitan la cuenca alcanzan una altitud promedio de 3,200 metros, con elevaciones que superan los 5,400 metros.
- Las frecuentes inversiones térmicas que ocurren en el valle, en más del 70% de los días del año, son un fenómeno natural que causa un estancamiento temporal de las masas de aire en la atmósfera. Ello inhibe la capacidad de autodepuración de ésta y favorece la acumulación de los contaminantes. El estancamiento perdura hasta que, al transcurrir el día y de manera

gradual, la inversión térmica se rompe debido al calentamiento de la atmósfera, entonces los contaminantes se dispersan.

- La intensa y constante radiación solar que se registra en el Valle de México a lo largo de todo el año, favorece la formación del ozono. Ello es resultado de las complejas reacciones que la luz ultravioleta del sol desencadena entre los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos emitidos a la atmósfera, los cuales son precursores del ozono.

- La altitud a la que se ubica el Valle de México (2,240 msnm), determina que el contenido de oxígeno sea 23% menor que a nivel del mar, lo cual tiende a hacer más contaminantes los procesos de combustión.

Actualmente, los problemas ambientales en las grandes ciudades han alcanzado matices significativos, debido a la cantidad excesiva de material contaminante generado por el consumo intenso de combustibles, asociado al crecimiento industrial, urbano y vehicular (RAMA, 1994).

La atmósfera, como todos los sistemas ambientales no reconoce fronteras políticas, su comportamiento está dado por las condiciones naturales de las zonas de influencia. La capacidad de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) para soportar la carga de emisiones contaminantes, se relacionan directamente con sus características fisiográficas y climáticas, las cuales determinan los flujos atmosféricos y la dinámica de los compuestos contaminantes.

Las emisiones de América del Norte viajan tan lejos como Europa y las originadas en Asia afectan la salud humana y el medio ambiente de América del Norte. Los contaminantes atmosféricos, en particular las emisiones de óxidos de azufre y de nitrógeno, son precursores de la deposición ácida (CEC, 2008).

En América del Norte, el dióxido de azufre (SO₂) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) son emitidos no sólo por fuentes antropogénicas como la fundición de metales y la quema de combustible fósil en la generación de electricidad y el transporte, sino también por fuentes naturales como volcanes, incendios forestales y relámpagos. No obstante, la gran mayoría de las emisiones de

SO₂ y de NO_x que contribuyen a la deposición ácida son producto de actividades humanas (CEC, 2008).

En la atmósfera ocurren una multitud de reacciones químicas, muchas de las cuales son producto de la actividad de los seres vivos (por ejemplo la actividad bacteriana) o de la propia dinámica terrestre (por ejemplo, la actividad volcánica), lo que ocasiona de manera natural en un ambiente limpio que la lluvia sea ligeramente ácida. Un ejemplo es el dióxido de carbono CO₂ que al mezclarse con el agua de lluvia, forma ácidos débiles que originan un valor normal de pH de 5.0 a 5.6 (Gallardo y García, 1999).

Los iones nitrato (NO₃⁻) y nitrito (NO₂⁻) son aniones inorgánicos de origen natural que forman parte del ciclo del nitrógeno. Los residuos que contienen nitrógeno orgánico se descomponen en el suelo o el agua, por acción de los microorganismos, para formar amoníaco en primera instancia, posteriormente este se oxida para formar iones nitrito y éstos, a su vez, para dar nitratos (Albert, 1997).

Por otra parte, se emiten a la atmósfera gases como el dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x), por el uso de combustibles los cuales reaccionan químicamente con el vapor de agua y otras sustancias de la atmósfera para formar ácidos sulfúrico (H₂SO₄) y nítrico (HNO₃), dos ácidos fuertes que cuando caen a la superficie mezclados con el agua de lluvia producen una disminución en el pH de la lluvia por abajo de 5.0.

Tales reacciones pueden tomar horas o incluso días en llevarse a cabo, por lo que el viento puede acarrear esos contaminantes cientos de kilómetros antes de que caigan en forma líquida, ya sea como lluvia, niebla, nieve o granizo (depósito húmedo) o en forma de partículas y polvos (depósito seco) que se adhieren a las superficies. La lluvia ácida o depósito ácido es por lo tanto, una consecuencia directa de los procesos de auto limpieza de la atmósfera como lo ilustra la figura 9.

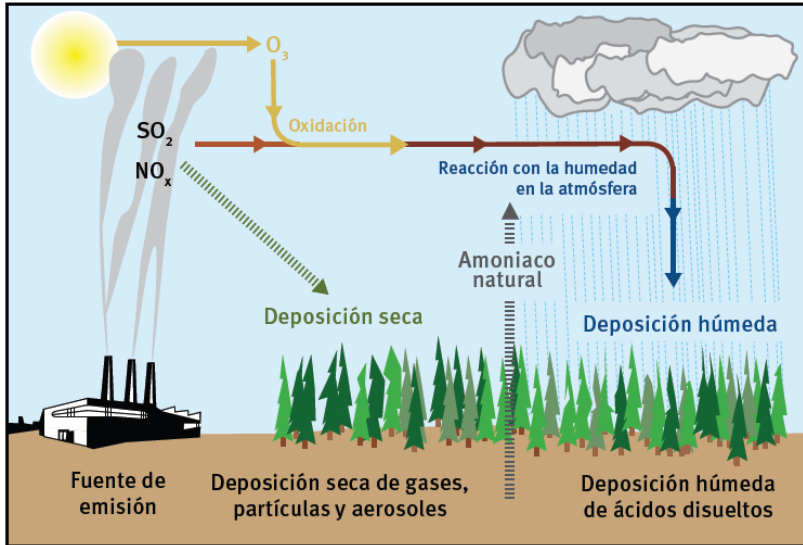


Figura 9 La química atmosférica; adaptado de Physical Geography.net – Fundamentals of Physical Geography, Michael Pidwirry.

4.2 Distribución temporal y espacial de la contaminación del aire

La cantidad de contaminantes que se emiten a la atmósfera no es constante a lo largo del año, a pesar de esto, su concentración en el aire registra variaciones espaciales y una marcada estacionalidad.

La distribución espacial de la concentración de contaminantes primarios es mayor en zonas industriales o en regiones con una mayor densidad vehicular, mientras que la concentración de contaminantes secundarios es mayor en regiones viento abajo de las fuentes de emisión. Por otra parte, el clima de la cuenca de México determina el comportamiento estacional de cada uno de los contaminantes durante el año.

La distribución temporal de los contaminantes en la Ciudad de México (figura 17) presentan un comportamiento estacional típico: mayores concentraciones en la temporada seca y menores durante la temporada de lluvia, las inversiones térmicas de superficie, frecuentes en invierno, provocaron incrementos en los contaminantes primarios; mientras que en los meses de lluvia, el lavado atmosférico redujo sus niveles.

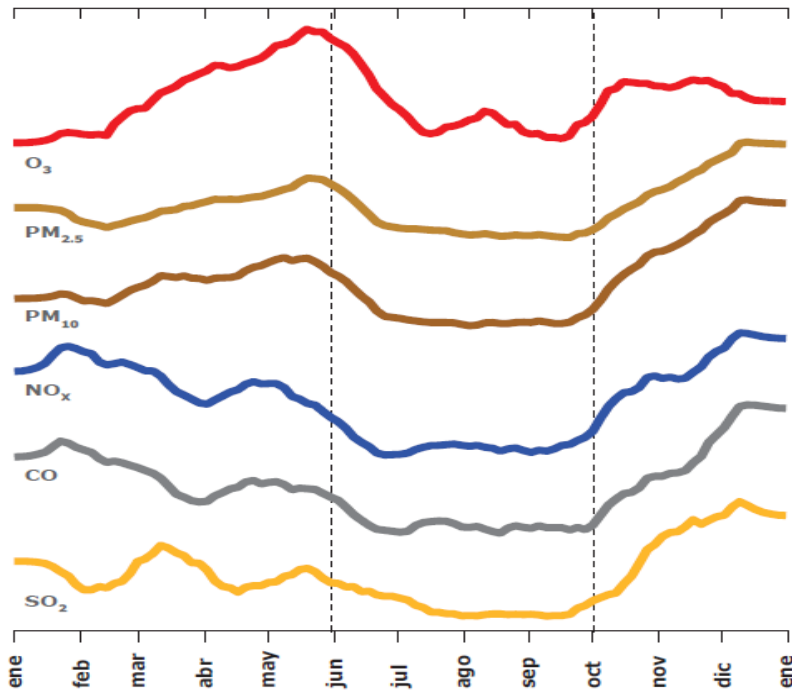


Figura 17 Distribución temporal de los contaminantes atmosféricos en la Ciudad de México; (Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2010).

En el mes de diciembre se observan las mayores concentraciones para casi todos los contaminantes. El monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno son generados por fuentes comunes, por lo que su comportamiento temporal es idéntico. En la gráfica es posible observar la influencia de las partículas secundarias entre los meses de marzo a mayo (Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2010).

4.3 Contaminantes de la fuente

4.3.1 Acidez de las precipitaciones

Para caracterizar la acidez de las precipitaciones se usa la escala de pH que indica la concentración de iones hidrógeno (H⁺) responsables de la acidez. En condiciones naturales el agua de lluvia es ligeramente ácida y tiene un pH de 5.6. Esta acidez se debe al dióxido de carbono que se encuentra en la atmósfera y que reacciona con el agua para formar ácido carbónico. Cuando el depósito húmedo tiene una mayor acidez, el valor de pH es menor a 5.6 y se considera como precipitación ácida o lluvia ácida (Informe anual Lluvia ácida GDDF, 1999).

La deposición ácida resulta principalmente de la transformación de contaminantes atmosféricos como el dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) en contaminantes secundarios como el ácido sulfúrico (H_2SO_4), el nitrato de amonio (NH_4NO_3) y el ácido nítrico (HNO_3). (Informe anual Lluvia ácida, 1999).

Las partículas y los vapores acidificantes pueden depositarse en la superficie terrestre en forma de precipitación ácida (deposición húmeda) o de partículas, sulfatos, nitratos y gases (deposición seca).

Los precursores de la lluvia ácida pueden viajar cientos de kilómetros desde las fuentes de emisión y provocar gran variedad de impactos en una amplia región geográfica (US Environmental Protection Agency, 2010). Los aerosoles y los gases solubles en agua pueden ser incorporados a las gotas en las nubes y al agua de lluvia, por lo tanto, la composición química del agua de nube y de la precipitación es muy variable (Bravo y Torres, 1996).

Las precipitaciones en la Ciudad de México y su área metropolitana, suelen ser más ácidas en el sur y poniente que en el norte y centro (Figura 18), aunado a esto, la región expuesta a eventos de lluvia ácida se ha incrementado gradualmente desde 2004 (Calidad del aire en la Ciudad de México GDDF, Informe 2010).

De acuerdo al informe del 2009 indican que la acidez de la lluvia presentó poca variabilidad espacial con valores promedio de pH entre 4.9 y 5.6. El valor promedio más ácido se obtuvo en la estación Ecoguardas Ajusco (EAJ), localizada en la Delegación Tlalpan y la muestra más ácida, con un pH de 4.3, se registró la cuarta semana de octubre en la estación Ex Convento Desierto de los Leones (EDL), ubicada en la Delegación Cuajimalpa. La figura 18 muestra el comportamiento del pH desde el 2004 al 2010 (Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe GDDF 2010).

A pesar de que los datos de pH indican cierta homogeneidad en la distribución de la acidez, en el sur del Distrito Federal son mayores los efectos de la lluvia ácida, ya que suele ser mayor el porcentaje de eventos ácidos en esta región, tal es el caso de las estaciones Parres (PAR), Milpa Alta (MPA), San Nicolás Totolapan (SNT), Ecoguardas Ajusco (EAJ), CORENA (COR) y Ex

Convento Desierto de los Leones (EDL), que presentaron valores ácidos en al menos una quinta parte de los muestreos (52, 40, 36, 32, 31 y 28% respectivamente).

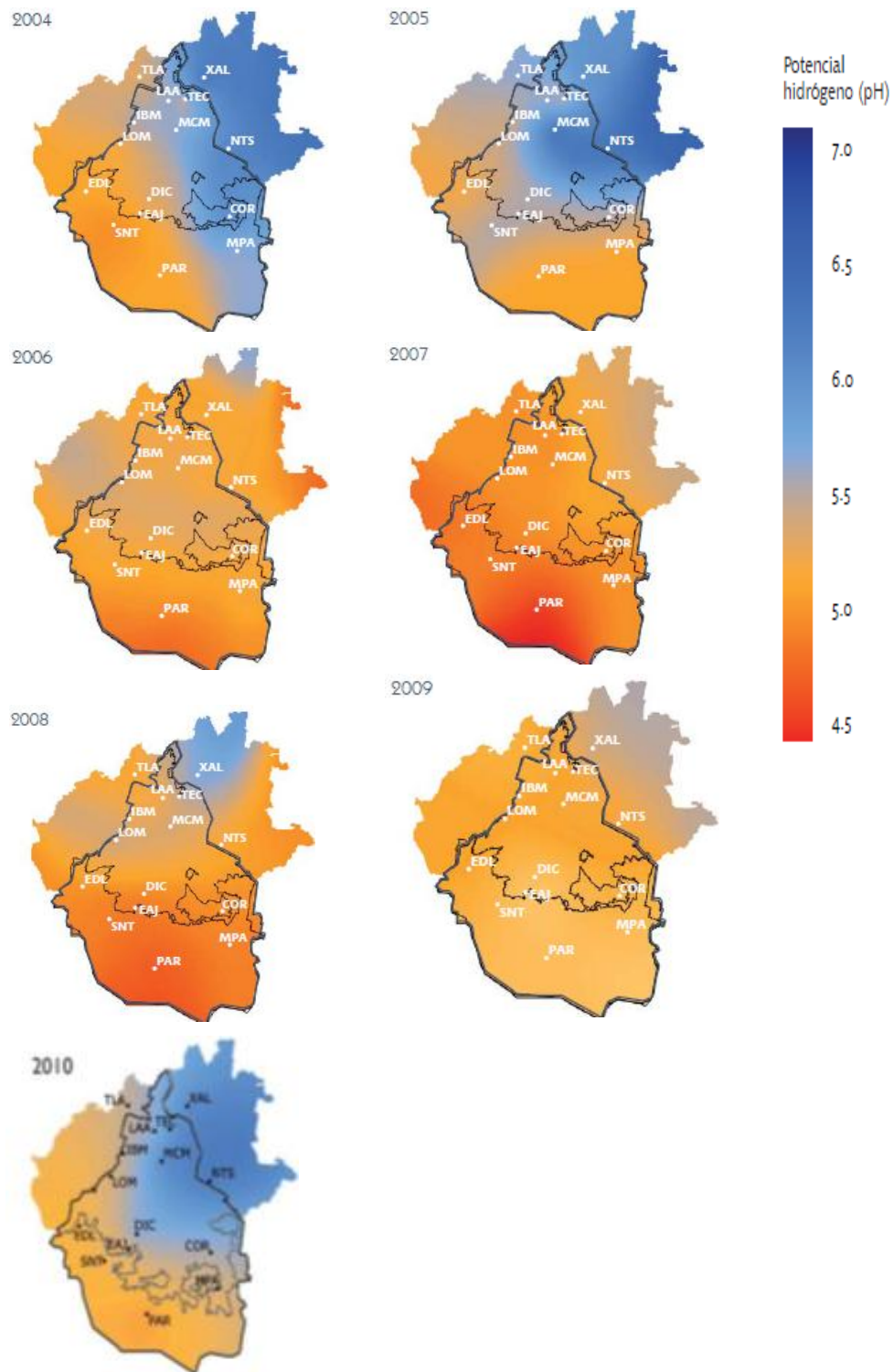


Figura 18 Comportamiento espacial del pH en muestras de depósito húmedo. (Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe SMA 2010).

4.3.2 Bióxido de azufre (SO₂)

En la Ciudad de México y su área metropolitana el Bióxido de azufre es generado principalmente por el uso de combustibles fósiles en la industria y los vehículos. Es en los municipios conurbados del Estado de México en donde se emitieron dos terceras partes de este contaminante, con 4500 toneladas anuales (Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2010).

Por esta razón, en 2010, las mayores concentraciones se registraron en las estaciones localizadas en los municipios de Naucalpan, Tlalnepantla, Atizapán y Coacalco, en el Estado de México (ver figura 19). Estas demarcaciones están caracterizadas por la presencia de grandes parques industriales e intenso tránsito vehicular, con un alto porcentaje de vehículos a diesel.

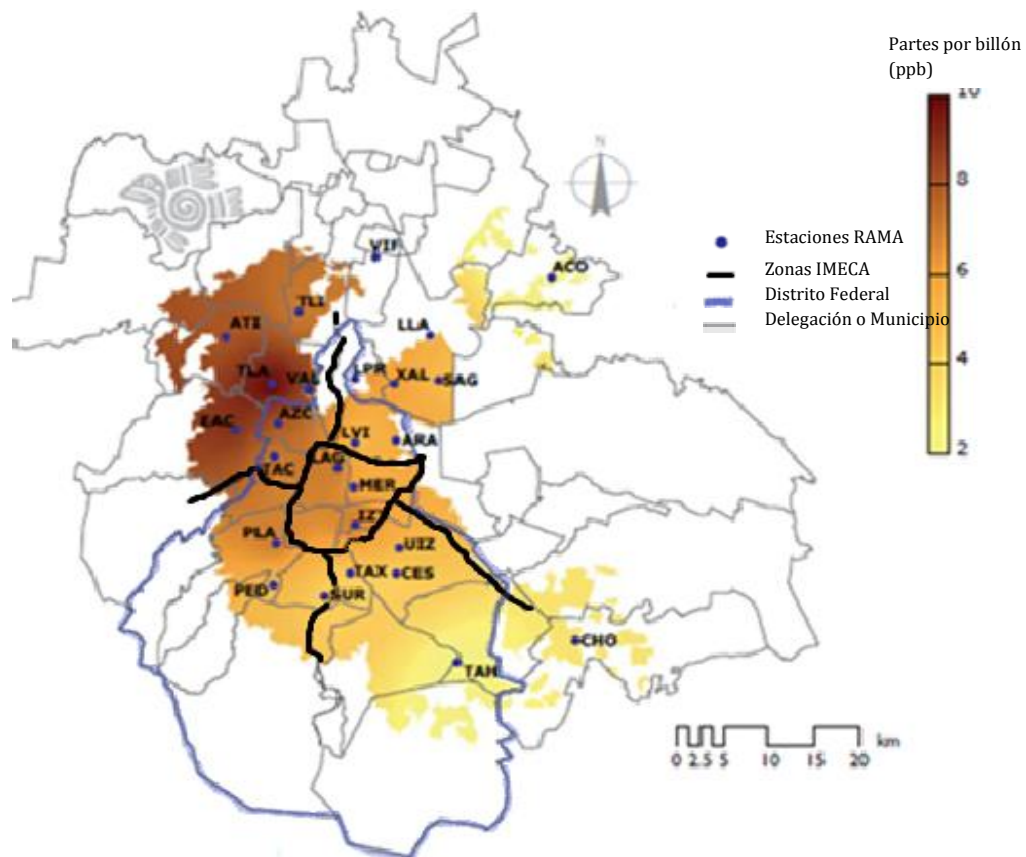


Figura 19 Concentraciones de SO₂ registradas en las estaciones de monitoreo atmosférico (Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2010).

La figura 20 muestra el comportamiento de las emisiones de SO_4^{2-} , en el periodo del 2004 al 2009, en donde se puede observar como de manera progresiva han aumentado considerablemente las concentraciones de SO_4^{2-} , así como las zonas de mayor afluencia.

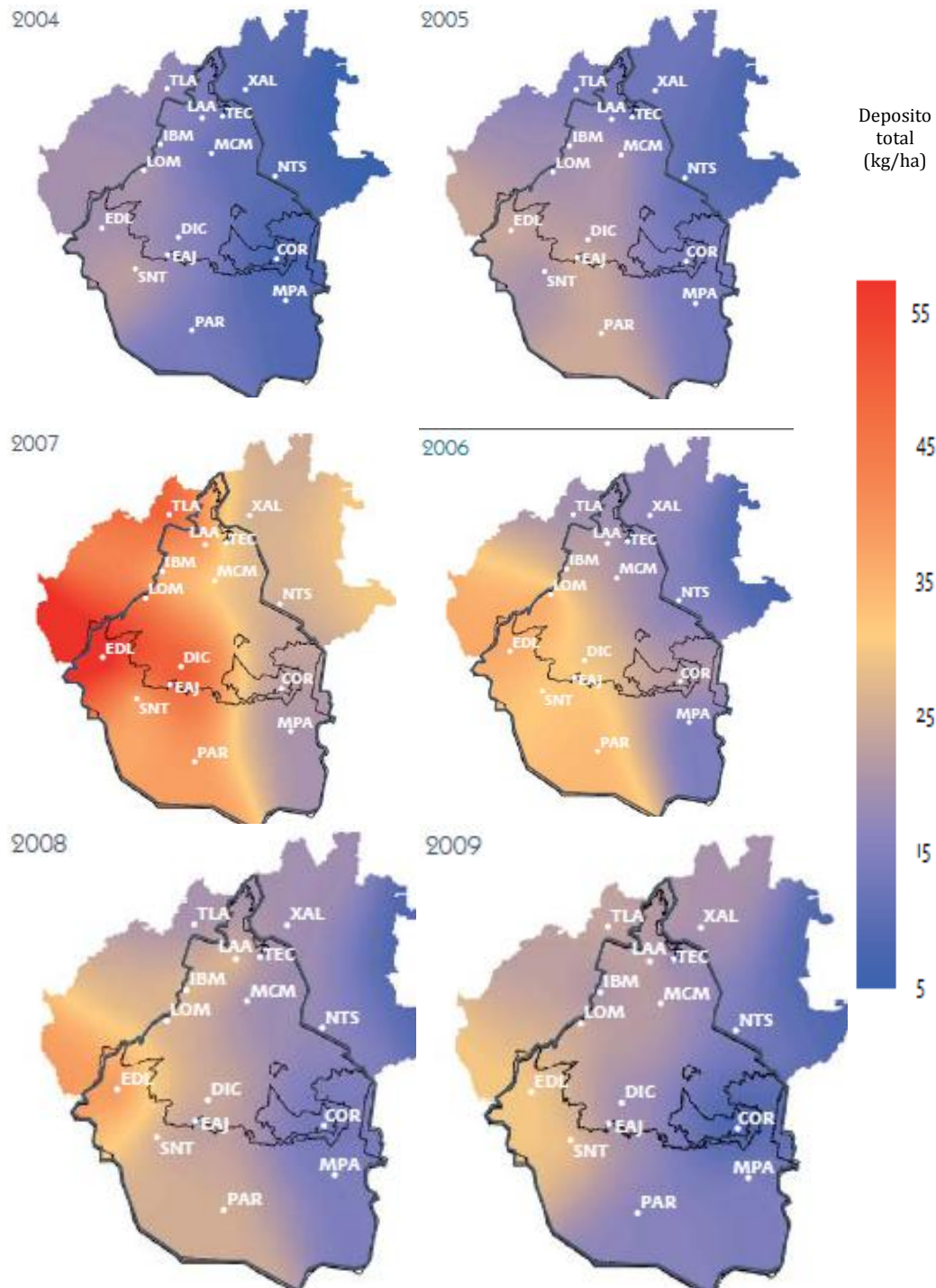


Figura 20 Distribución espacial del depósito total de sulfatos SO_4^{2-} en el depósito húmedo para los años 2004 a 2009 (Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2010).

4.3.3 Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Los óxidos de nitrógeno son emitidos principalmente por los vehículos de combustión interna, por lo que su distribución espacial depende directamente del patrón, la intensidad y el tipo de tránsito vehicular.

Las estaciones localizadas en las demarcaciones al norte de la ciudad son las que registran las mayores concentraciones del contaminante. Las estaciones Xalostoc y Taxqueña, ubicadas muy cerca de vías primarias, son un indicador de la importante contribución del tránsito vehicular (ver figura 21).

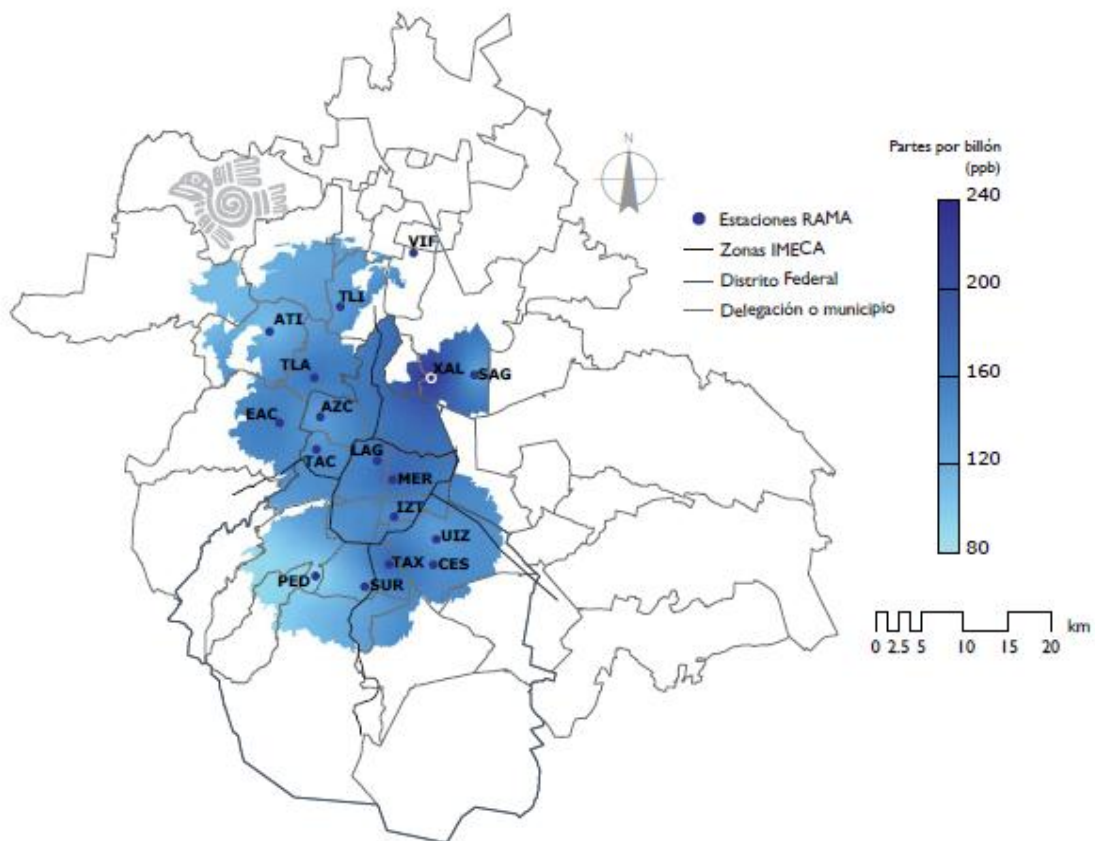


Figura 21 Concentraciones de NO_x registradas en las estaciones de monitoreo atmosférico. (Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2010).

La figura 22 muestra el comportamiento de las emisiones de NO_x , del 2004 al 2009, en donde se observa como de manera progresiva han aumentado considerablemente las concentraciones de NO_x , así como las zonas de mayor afluencia.

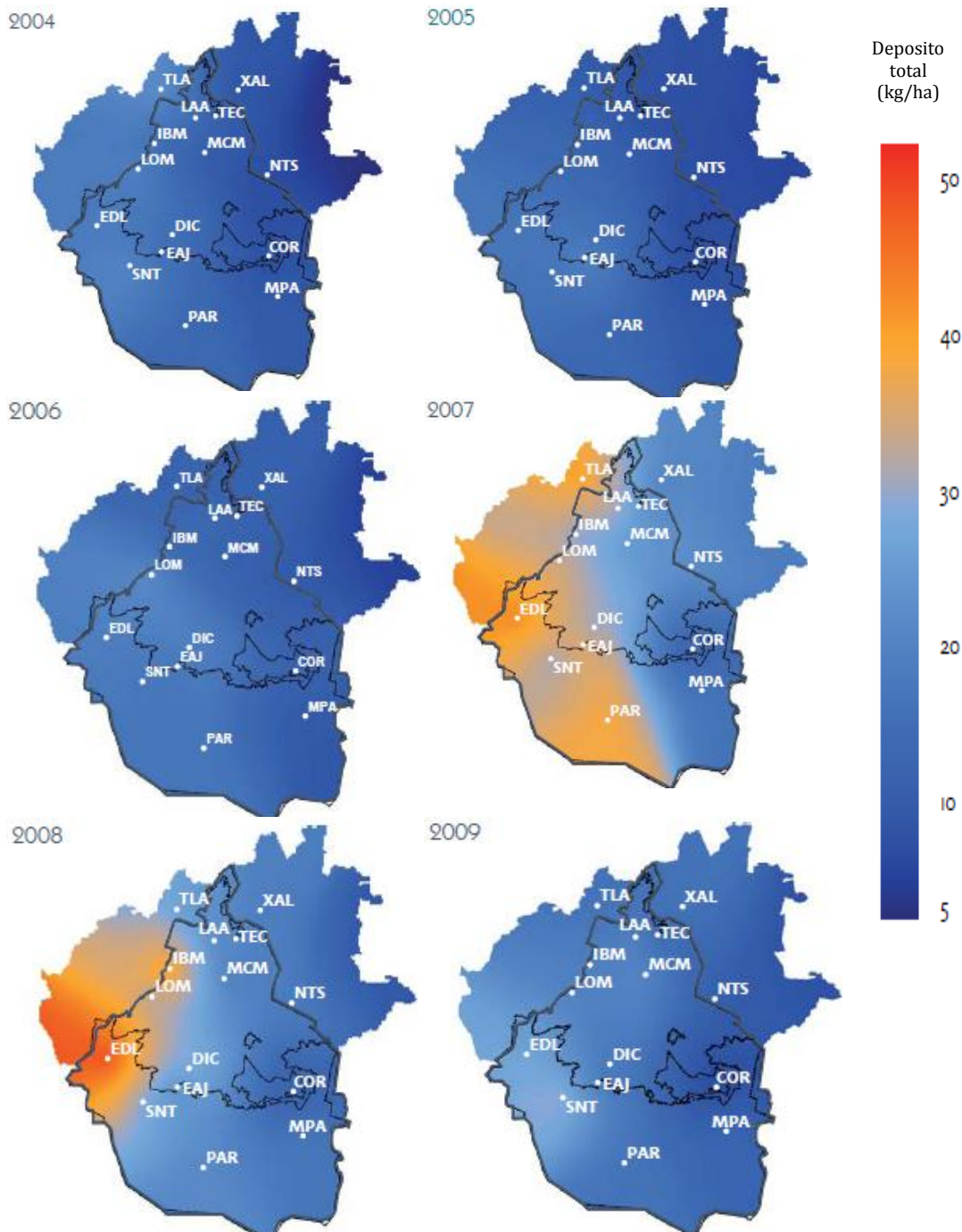


Figura 22 Distribución espacial del depósito total de nitrato NO_3^- en el depósito húmedo para los años 2004 a 2009. (Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2010).

El patrón general presenta un gradiente con valores altos en el suroeste y bajos en el noreste, similar al patrón de la precipitación pluvial. Esto se explica porque los óxidos de azufre SO_2 y de nitrógeno (NO_x) generados por la quema de combustibles fósiles en la zona urbana e

industrial, pueden ser transportados varios kilómetros en la dirección del viento predominante, antes de que concluyan las reacciones químicas que dan origen a la acidez de las precipitaciones y finalmente se depositen en forma de sulfatos y nitratos. (Calidad del aire de la Ciudad de México,2009)

De ahí que la acidez del agua de lluvia se correlacione con la cantidad de sulfatos y nitratos. El tiempo medio de permanencia en la atmósfera para el dióxido de azufre (SO_4^{2-}) es de un día, mientras que el estimado para óxidos de nitrógeno (NO_x), es de uno a cuatro días (Wallace y Hobbs, 2006).

4.3.4 Emisión de metales a la atmósfera

Los metales se asocian frecuentemente a fuentes de origen antropogénico, la contribución antropogénica de metales tóxicos a la atmósfera, puede derivarse de procesos industriales de forma directa o indirecta, debido a las actividades humanas. El problema de la contaminación por metales tóxicos, lo originan diversos factores, entre ellos, la cantidad y la variedad de las fuentes que los emiten.

La presencia en la atmósfera de elementos como arsénico (As), manganeso (Mn), mercurio (Hg) y selenio (Se), provienen en su mayoría, de fuentes naturales; sin embargo, en el plano regional, las fuentes antropogénicas pueden contribuir de manera importante a las emisiones de metales pesados a escala local (Kabatas & Pendias 1992).

Las emisiones de metales pesados que se atribuyen a las actividades humanas o fuentes antropogénicas se clasifican en cuatro categorías: la combustión y procesos industriales, emisiones de partículas de procesos industriales, fuentes de emisiones no industriales como son las partículas provenientes de calles pavimentadas y sin pavimentar, erosión eólica de áreas agrícolas, etc. y fuentes móviles (autos, camiones, etc.) (Migliavacca *et al.*, 2005).

La industrialización y la emigración de zonas rurales a centros urbanos, han dado lugar a un aumento en la contaminación atmosférica de los núcleos urbanos, además de haberse centralizado las necesidades energéticas. Sin embargo, la concentración de contaminantes no

suele permanecer localizada, sino que con frecuencia se transportan a través de fronteras nacionales o continentales.

Las emisiones de metales por fuentes naturales, provienen fundamentalmente de los volcanes, las tormentas de arena en los desiertos, las tolveneras en lugares propensos a la erosión, evaporación de aguas de superficie naturales, incendios forestales de bosques que emiten ciertas cantidades de metales y descomposición de la materia orgánica en el suelo debida a la acción de bacterias (Chandra *et al.*, 2006).

4.4 Características hidrológicas del sitio de estudio

La Cuenca de México se conformó tras un largo periodo de actividad volcánica, durante el cual se configuraron la Sierra de Las Cruces al poniente, la Sierra de Guadalupe al norponiente y las sierras de Río Frío y Nevada al oriente. Durante esa etapa geológica, la Cuenca vertía sus aguas al sur de modo natural, hacia el Pacífico. La aparición de la Formación Chichinautzin cerró el paso natural del agua, transformándola en una cuenca endorreica con una extensión de 9600 km.

A partir de entonces, los ríos y manantiales que descendían de las partes altas de sus sierras y cerros, se depositaban en la parte baja de ese vaso cerrado conformando un gran lago, el cual durante la temporada de secas quedaba reducido a cinco lagos de menor tamaño (Burns E., 2009).

4.4.1 Exportación del agua de la Cuenca

A lo largo de cuatro siglos, ha habido esfuerzos intensivos y constantes para desalojar las aguas lacustres, pluviales y residuales de la Cuenca de México a través de la construcción de salidas artificiales hacia el norte.

Las obras realizadas incluyen el Túnel de Huehuetoca (1607), seguido por el Tajo de Nochistongo (1789). Durante el Porfiriato se construyó el Gran Canal de Desagüe, que

desalojaba las aguas vía el Primer Túnel de Tequixquiac (1900), seguido por la ampliación del Gran Canal y la construcción del Segundo Túnel de Tequixquiac (1954). En 1975 se llevó a cabo la construcción del Drenaje Profundo, obra maestra que se pensó resolvería el reto del desagüe; actualmente se construye el Túnel Emisor Oriente con 60 km de longitud y 6.45 m de diámetro, con una capacidad de 120 m³/s.

Actualmente, se exporta un promedio de 52 m³/s de agua de la Cuenca de México a la Cuenca de Tula, un volumen que acerca a la sobreexplotación de los acuíferos (41 m³/s), más el agua importada de otras cuencas (19 m³/s) (Burns E.,2009).

4.4.2 Sobreexplotación de los acuíferos de la Cuenca

En 1870, la extracción de agua subterránea en la Cuenca de México fue del orden de 2 m³/s. En el año 1952, el volumen extraído de 22 m³/s rebasó el volumen recargado, 19 m³/s. En 2007, el volumen de extracción en la Cuenca de México fue 59.5 m³/s, casi tres veces el volumen recargado (Burns E. 2009).

Según los dictámenes de disponibilidad publicados en el Diario Oficial de la Federación (31/01/2003) y el Registro Público de Derechos al Agua, los cuatro principales acuíferos de la Cuenca padecen de las siguientes tasas de sobre extracción.

Tabla 1 Déficit de aguas subterráneas y volumen concesionad (Burns E. 2009).

Acuífero	Recarga hm ³ /año	Extracción hm ³ /año DOF 31/1/03	Volumen concesionado y/o registrado (hm ³ /año) REPDA 31/12/07	Relación concesionada (hm ³ /año) Recarga 31/12/07	Déficit aguas subterráneas (hm ³ /año) al 31/12/07
Zona Metropolitana de la Cd. De México	279	507	1248	4.47	-969
Chalco- Amecameca	74	128	92	1.24	-18
Texcoco	49	465	189	3.89	-140
Cuautitlán – Pachuca	203	483	337	1.66	-134
Total (hm ³ /año)	605	1583	1866	3.08	-1261
Total (m ³ /s)	19.1	50	59		40

La tasa de recarga de los cuatro principales acuíferos, según sus dictámenes de disponibilidad, publicadas en el DOF, es de sólo 19.1 m³/s, sin contar la recarga en tres acuíferos menores, lejanos del área urbana.

4.4.3 Importación de agua de cuencas externas

Con el propósito de reducir los niveles de sobreexplotación de los acuíferos de la Cuenca de México, se construyeron dos enormes proyectos para importar agua de las cuencas del Río Lerma y del Río Cutzamala.

El Sistema Cutzamala, que trae agua desde los estados de México y Michoacán, ha disminuido su capacidad inicial de 20 m³/s a 15 m³/s. Actualmente, se está gestionando una nueva inversión de 3.5 mil millones de pesos para recuperar 3 m³/s de la capacidad perdida (Burns E. 2009).

Los sistemas Cutzamala y Lerma fueron diseñados con el propósito de sustituir el agua procedente de los acuíferos sobreexplotados con agua importada de otras cuencas. Sin embargo, al no tomar medidas para frenar el crecimiento urbano, la importación de agua de otras cuencas no disminuyó las tasas de sobreexplotación (Burns E. 2009).

El 77% de la población del D.F., usa menos de 150 litros por habitante por día. Para muchos de ellos, el agua es un recurso escaso y racionado, y en muchos casos, sumamente caro, ya que sólo es posible obtenerla mediante su transporte en pipas, además de la difícil y costosa tarea que resulta traer el agua a la Ciudad, como se puede observar en la figura 23, la distancia y los bombeos que deben realizarse para contar con el líquido vital.

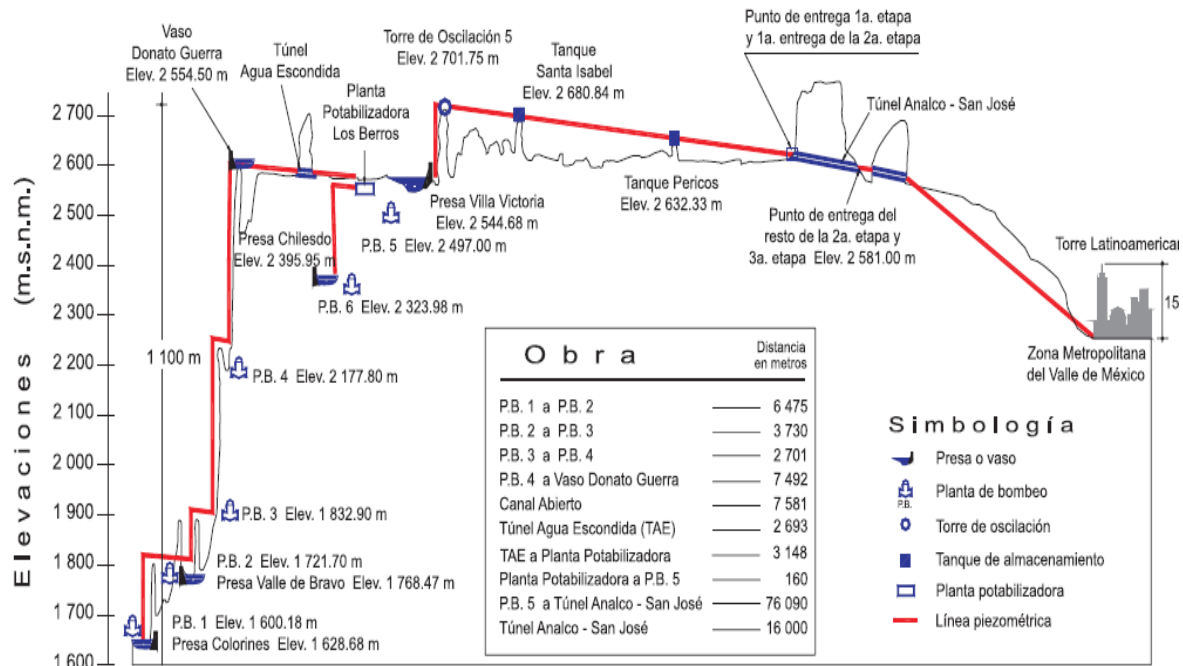


Figura 23 “Sistema hidrológico de Valle de México” Organismo de la Cuenca del Valle de México, CONAGUA. (Burns E. 2009).

4.4.4 Desalojo hídrico

La práctica histórica de desalojar las aguas pluviales y residuales de la Cuenca mediante salidas artificiales situadas al norte, hoy en día tiene cada vez menos sentido, dado que el sur de la cuenca es la parte más honda y continúa hundiéndose a una tasa de 40 cm/año (Burns E. 2009). Desalojar el agua por túneles y canales en el norte implica enormes gastos en infraestructura de bombeo y la rectificación constante de los canales de desalojo.

Un ejemplo de lo anterior, son las 21 plantas de bombeo requeridas para subir las aguas pluviales y residuales de Chalco, Ixtapaluca, Los Reyes, Chicoloapan, Nezahualcoyotl y Chimalhuacan hasta una altura de 4 a 9 metros para llevarla a los canales de desalojo.

En las zonas de salida, continúan los problemas. El Gran Canal, que originalmente desalojaba 80 m³/s de aguas residuales, debido a la contra pendiente, ahora sólo tiene una capacidad de 15 m³/s. El Emisor Central fue diseñado para desalojar por gravedad 170 m³/s de aguas residuales; Por su parte, el Emisor Poniente mantiene una capacidad de 30 m³/s.

4.4.5 Precipitación

La precipitación es considerada como cualquier forma de agua que cae a la superficie de la tierra, como parte importante del ciclo hidrológico, e incluye a la lluvia, nieve, aguanieve y el granizo. La precipitación es producida por las nubes, que cuando alcanzan el punto de saturación crecen hasta caer a la Tierra por efecto de la gravedad.

La determinación de los valores de cada una de las distintas modalidades de precipitación se efectúa mediante instrumentos estandarizados para registrar las cantidades en horarios preestablecidos, con la finalidad de que los datos puedan ser compatibles y comparables. La medición de la precipitación se efectúa por medio de pluviómetros o pluviógrafos.

Los instrumentos deben estar instalados en localidades apropiadas donde no se produzcan interferencias por edificaciones, árboles u otros obstáculos. La unidad de medida que se emplea para cuantificar la precipitación es el milímetro (mm), la cual equivale al espesor de la lámina de agua que se formaría al caer un litro de agua sobre una superficie plana e impermeable de un metro cuadrado de superficie.

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 sinópticos en las costas del Pacífico y Atlántico mexicanos.

Los otros meses son de sequía, aunque pueden tener lugar lluvias aisladas, éstas no constituyen un régimen definido. Cabe mencionar que por su gran extensión, la ZMVM presenta un esquema de precipitación no uniforme.

La Figura 24 muestra una distribución anual de precipitación no uniforme. En la zona sur y poniente se registró durante el 2005 más del doble que en la región oriente, esencialmente debido al efecto orográfico. En la porción centro, el acumulado fue escaso en la medida de que se presentó un núcleo que abarca desde los 50 hasta los 250 mm.

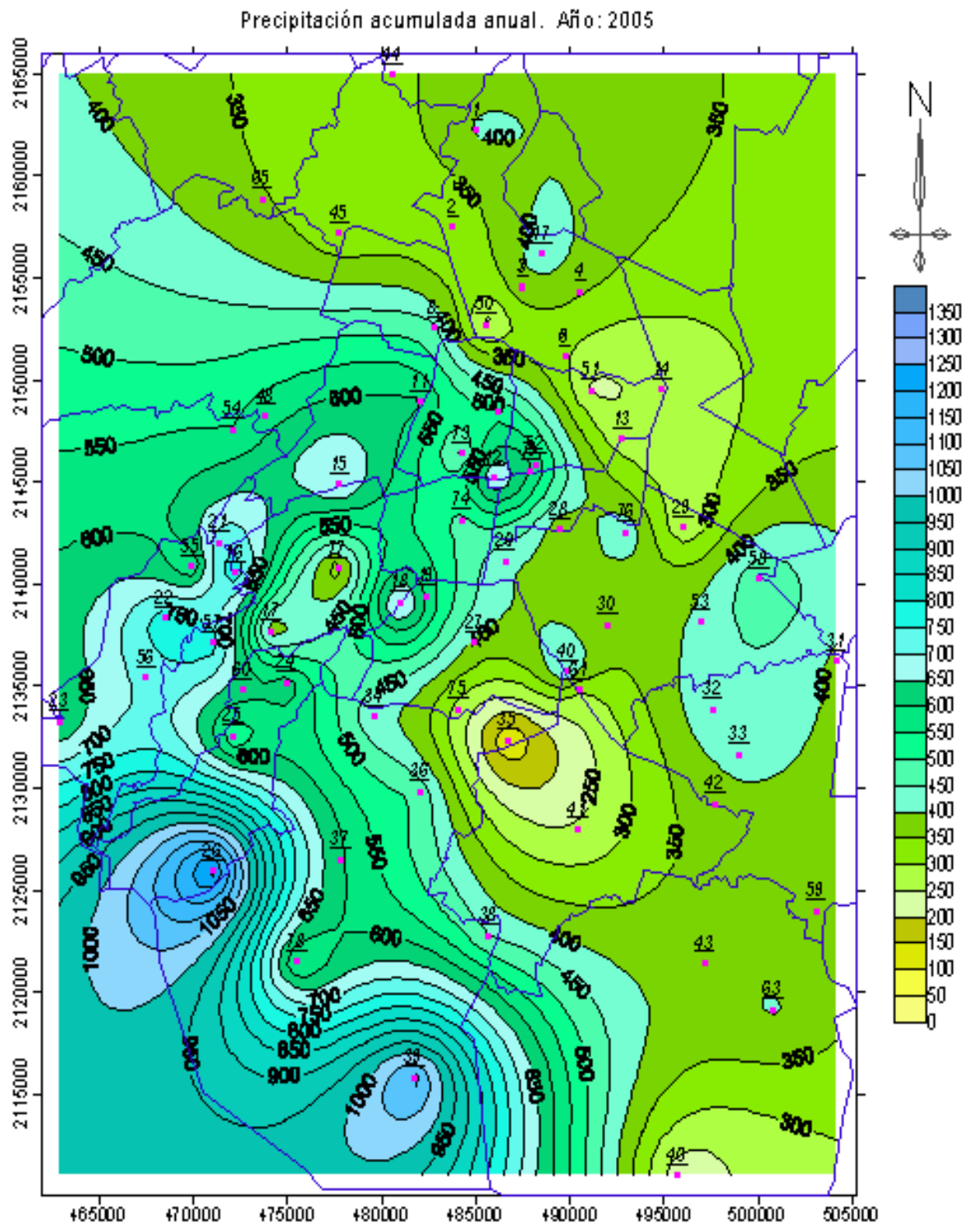


Figura 24. Mapa de distribución de la precipitación acumulada en la ZMVM durante el año 2005 (Informe Climatológico Ambiental de Valle de México, 2005)

La figura 25 presenta la intensidad de precipitación promedio para cada año, desde 2004 al 2009.

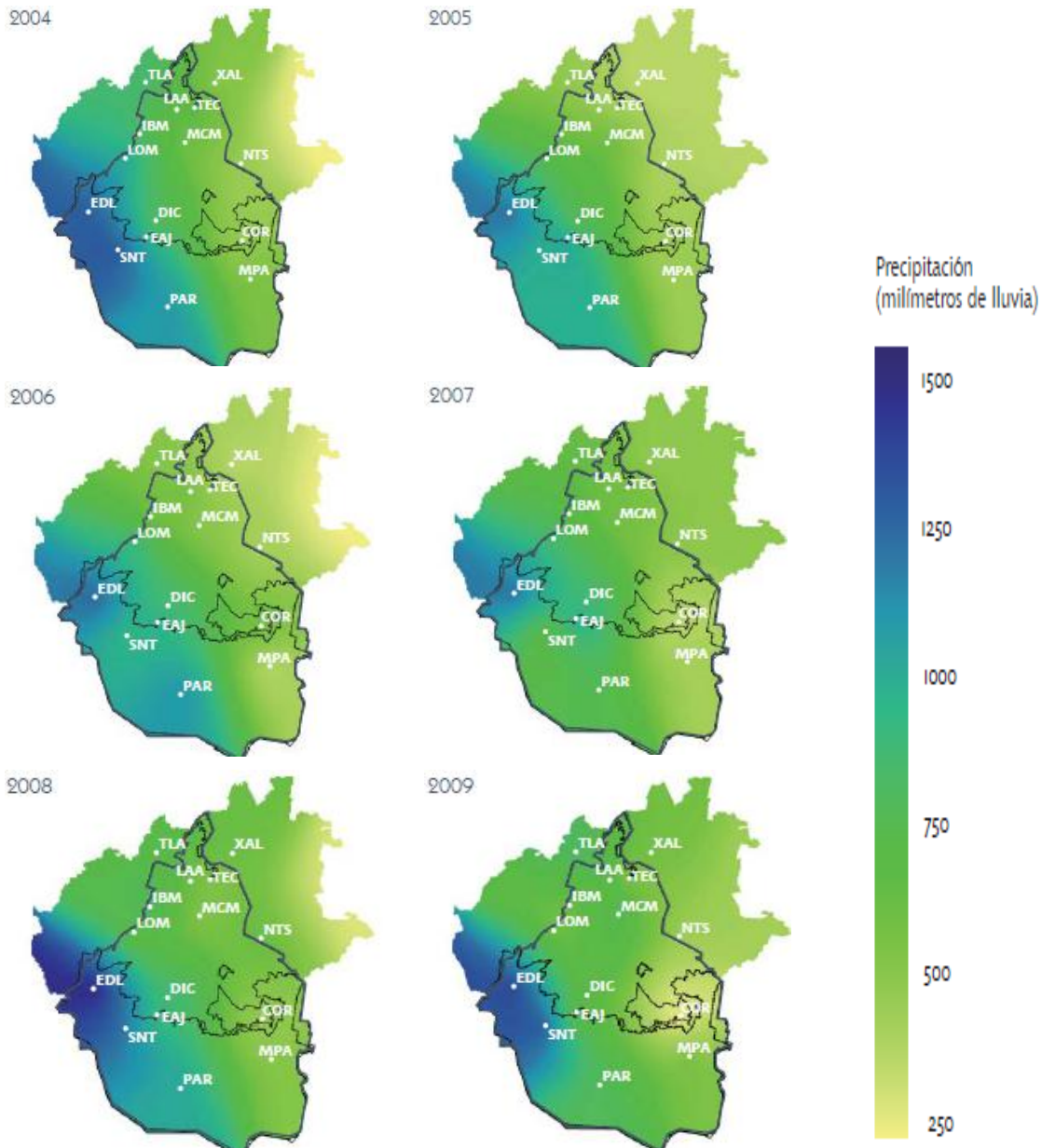


Figura 25 Estadística Geografía e Informática 2009; Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente *et al.*, 2003; Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, 2000.

La gestión del agua pluvial en el interior de la cuenca requiere contar con un sistema amplio para captar las intensas lluvias que suelen presentarse entre mayo y octubre, en cualquier dirección de la cuenca, principalmente en el sur. Los extensos lagos fueron los mejores reguladores, por su capacidad de distribuir los repentinos volúmenes de lluvia hacia una amplia superficie.

CAPÍTULO V

METODOLOGÍA

5.1 Ubicación de sitio de muestreo

El muestreo se llevó a cabo en la azotea del área correspondiente a las escaleras y elevador del edificio de posgrado "Bernardo Quintana Arrijoa" (Figura 18), Facultad de Ingeniería en Ciudad Universitaria de la UNAM.

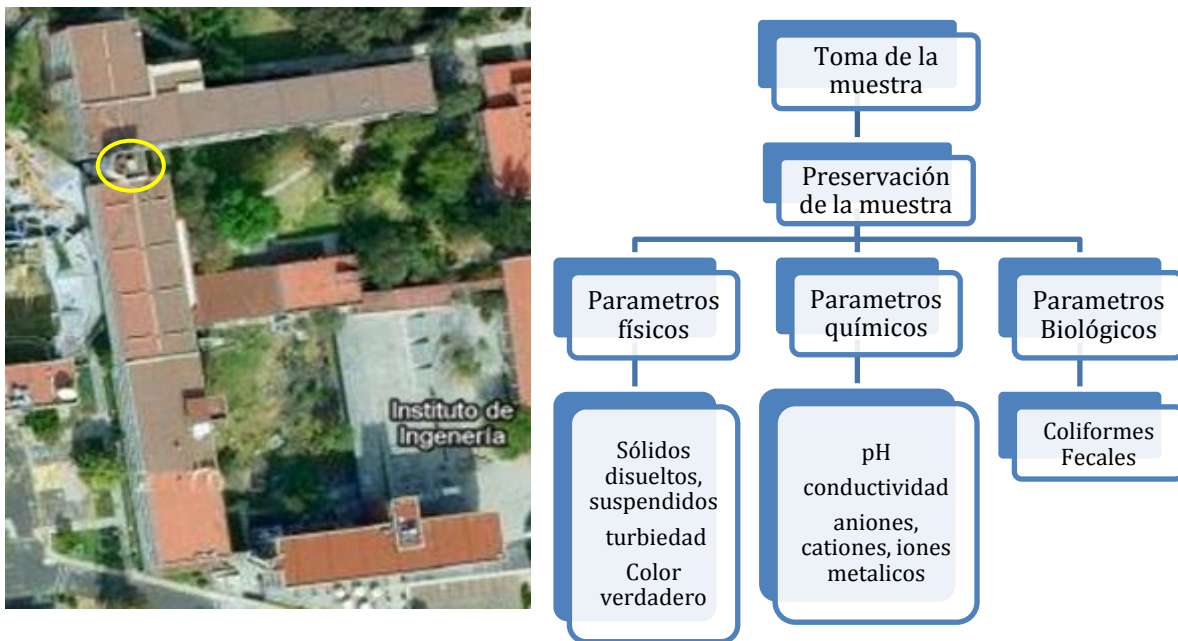


Figura 26 Edificio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, "Bernardo Quintana Arrijoa" UNAM (Google maps) y Metodología para el análisis de la muestra

5.2 Muestreo

Actualmente la normatividad nacional no incluye ninguna norma de captación de agua de lluvia, por tal motivo no se cuenta con algún protocolo de recolección de muestras para la captación y aprovechamiento del agua de lluvia. Para el muestreo se tomaron recomendaciones de acuerdo al manual del GAW (Global Atmosphere Watch) Programa de Precipitación Química.

El tipo de muestreo realizado para la experimentación fue resultado de la suma de deposición seca, más la deposición húmeda y el arrastre de los contaminantes de la azotea, los cuales se mezclaron por medio del arrastre y descendieron por la bajada de aguas pluviales, tomándose una muestra al día, los parámetros medidos se realizaron por triplicado.

Se acondicionó un sistema de recolección de agua de lluvia que permitió coleccionar una muestra compuesta del día, para su análisis fisicoquímico y microbiológico.

El muestreo se llevó a cabo durante los meses de julio a septiembre de acuerdo a la recomendación bibliográfica (Global Atmosphere Watch), la cual sugiere no prolongar el muestreo por más de siete días entre una muestra y otra.

Los cuadros en color azul de la Tabla 2 indican los días de recolección de muestra llevados a cabo generalmente los días lunes y viernes, los días que se desplazan es por la ausencia de lluvia para dicha semana.

Tabla 2 Periodo de muestreo del proyecto, del mes de julio a septiembre de 2011.

MES 2011	LUNES	MARTES	MIERCOLES	JUEVES	VIERNES	SABADO	DOMINGO
JULIO					1	2	3
	4	5	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15	16	17
	18	19	21	22	22	23	24
	25	25	28	29	29	30	31
AGOSTO	1	2	3	4	5	6	7
	8	9	10	11	12	13	14
	15	16	17	18	19	20	21
	22	23	24	25	26	27	28
	29	30	31				
SEPTIEMBRE				1	2	3	4
	5	6	7	8	9	10	11
	12	13	14	15	16	17	18
	19	20	21	22	23	24	25
	26	27	28	29	30		
TOTAL DE MUESTRAS				13			

5.3 Número de muestras

De acuerdo al manual del GAW para muestreo en fase húmeda, se recomiendan períodos de muestreo de 24 horas, procurando que la recolección de muestra sea antes de las 9:00 a.m. hora local preferentemente como lo recomienda la GAW; tomando en cuenta contar con un laboratorio que tiene recursos suficientes para analizar las muestras diarias y el apoyo a las operaciones diarias de campo.

Cuando se lleva a cabo un muestreo diario, el costo de muestreo aumenta y resulta poco práctico, por lo cual se recomienda un muestreo de hasta un máximo de 7 días.

Se tomaron 13 muestras colectadas durante un periodo de tres meses (de julio a septiembre), con un periodo interrumpido del 4 al 10 de julio y del 1 al 14 de septiembre, por ausencia de lluvias.

5.4 Metodología utilizada en la toma de muestra

En México no existe una norma que especifique el método de muestreo para la captación de agua de lluvia, la propuesta de la metodología utilizada en la toma de muestra de este trabajo se realizó de la siguiente manera.

Se acondicionó a una bajada pluvial un tubo de PVC de 6"; a este tramo se le acondicionaron dos "Y" de PVC del mismo diámetro, ambas invertidas.

En un primer tramo se colocó maya plástica para evitar que se obstruyera el muestreador con sólidos gruesos, dándole una pendiente de tal manera que dichos sólidos (hojas, ramas, insectos, concreto) salieran por el otro extremo.

El segundo tramo se adaptó con una botella de plástico PET para reducir el diámetro, colocando una manguera en el extremo reducido y ensamblándola a un garrafón para su almacenamiento como se muestra de manera explícita en la Figura 27.



- A: bajada de aguas pluviales.
- B: adaptación a la bajada.
- C: salida de sólidos gruesos.
- D: salida de la muestra.
- F: botella adaptada para la toma de muestra.



Figura 27 Adaptación realizada para la toma de muestras de agua de lluvia.

5.5 Preservación de la muestra

Cada recolección de muestra se realizó siguiendo un procedimiento para que ésta se preservara y se analizara posteriormente, como se muestra en la figura 28.

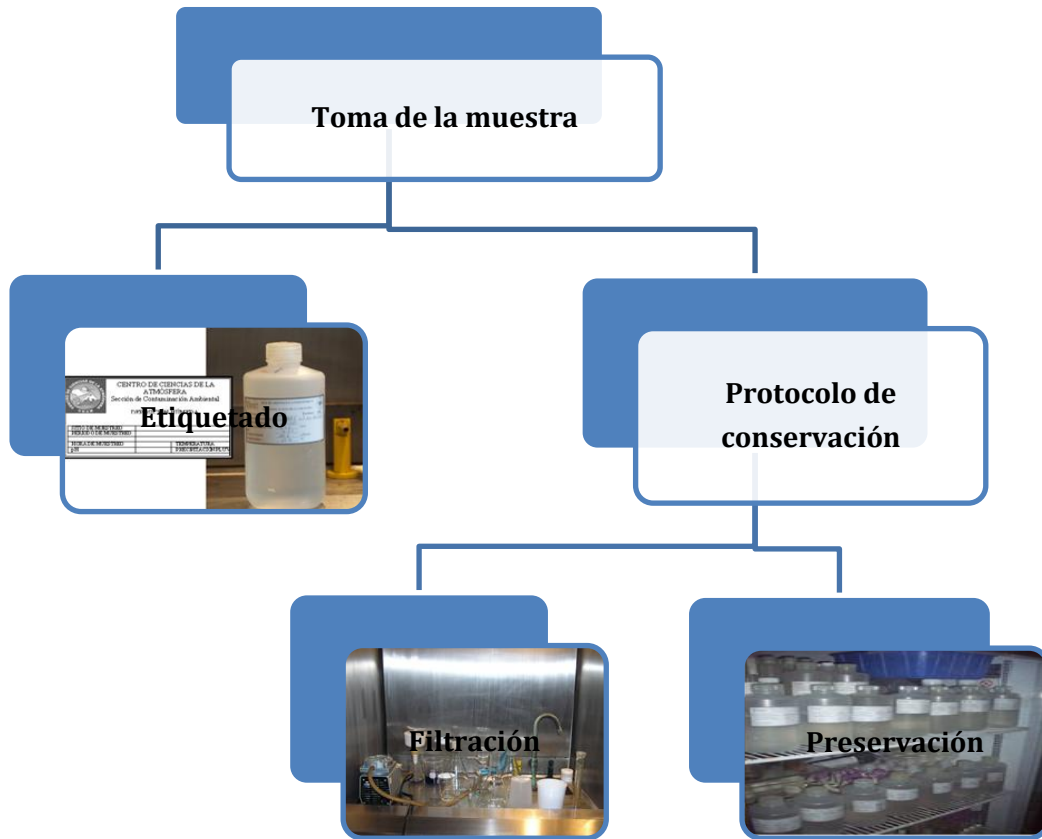


Figura 28. Toma de muestra y protocolo de preservación de la misma.

Durante el muestreo se siguió el siguiente protocolo:

1.- La muestra se recolectó en un envase de polietileno de cinco litros lavado y enjuagado con agua destilada y des-ionizada un día anterior a cada muestreo.

2.- La recolección de la muestra se llevó a cabo el día posterior al día de muestreo antes de las 9 a.m., en botellas de agua comercial (PET) de 1 litro previamente lavadas; de dicha muestra se tomaron 500 ml para análisis físicos y bacteriológicos el resto se filtró con una membrana de 0.22 μ m y se refrigeró en frascos de polietileno de alta densidad debidamente lavados y etiquetados, para su posterior análisis de parámetros químicos.

5.6 Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad del agua de lluvia

La determinación de parámetros físicos y químicos para estimar la calidad del agua de lluvia resulta difícil cuando no existe una norma de calidad específica, por lo cual el estudio se consultó a la norma para consumo humano, la Norma Oficial Mexicana Nom-127-SSA1-1994; debido a que no se tiene alguna norma para la caracterización o técnicas de muestreo sobre captación del agua de lluvia.

5.7 Caracterización del agua de lluvia

Los parámetros del agua son las características físicas, químicas y biológicas que permiten detectar cual es el grado de contaminación que presenta, con respecto a la NOM-127-SSA1-1994, aplicando los Métodos Estándar de la WEF (Water Environment Federation) y PHS (American Public Health Association).

5.7.1 Parámetros físicos

De acuerdo a la norma NMX-AA-034-SCFI-2001 para el análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, se analizaron los siguientes parámetros.

Sólidos disueltos: Los sólidos disueltos son una medida de la cantidad de materia disuelta en el agua, el origen puede ser múltiple tanto en agua subterránea como en la superficial. Para las aguas potables se fija un valor máximo deseable de 500 ppm, este dato por sí sólo no es suficiente para catalogar la calidad del agua.

Los sólidos disueltos se determinan directamente o por diferencia entre los sólidos totales y sólidos suspendidos.

Sólidos suspendidos: Se separan por filtración y son sólidos sedimentables no disueltos. Las aguas subterráneas suelen tener menos de 1 ppm, las superficiales pueden tener mucho más, dependiendo del origen y forma de captación.

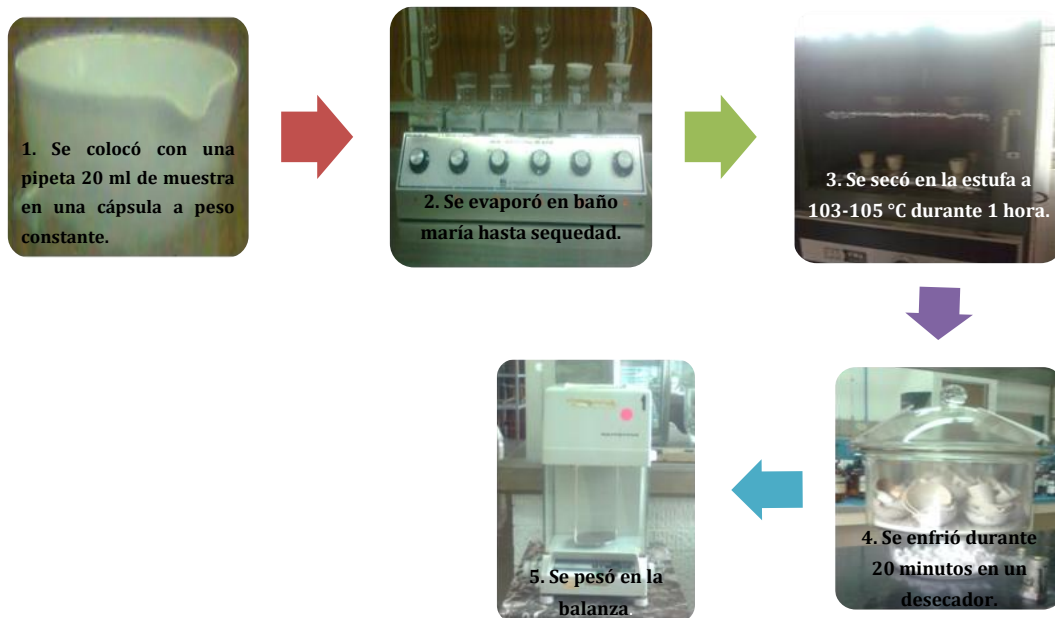
Los sólidos suspendidos son determinados por filtración a través de un filtro de fibra de vidrio de 1.45mm en un crisol Gooch previamente pesado. El crisol con su contenido se seca a

103 - 105°C; el incremento de peso, sobre el peso inicial, representa el contenido de sólidos suspendidos o residuo no filtrable.

El método para su análisis fue basado en los Métodos Estándar para el análisis de aguas residuales.

Sólidos:

Sólidos Totales (STT)



Para obtener los mg/L de los sólidos en las muestras se utilizaron las siguientes fórmulas:

Sólidos Totales

$$\frac{mg}{L} STT = \frac{mg \text{ residuo} * 1000}{ml \text{ de la muestra}}$$

Es importante que en el proceso de obtención de los sólidos se mantenga el peso constante del material, ya que pueden haber variaciones muy significativas en los resultados, por lo cual la prueba fue realizada por triplicado y se representa por el promedio de los resultados semejantes.

Sólidos Suspendidos (SST)

Se analizó la parte filtrable como lo indica la NMX-AA-034-SCFI-2001 para análisis de agua.



Sólidos Suspendidos fueron calculados de la siguiente manera:

$$\frac{mg}{L} SS = \frac{mg \text{ del residuo} * 1000}{ml \text{ de la muestra}}$$

La variación de concentración de sólidos en suspensión es debido a las características de la muestra ya que las características atmosféricas varían día a día.

Características físicas y organolépticas

De acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994, deberán ajustarse a lo establecido en la Tabla 3.

TABLA 3 Características organolépticas de acuerdo a la NOM-127-SSA-1994

Características	Límite Permisible
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

Turbiedad

La NMX-AA-038-SCFI-2001 para determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas indica que la turbiedad en agua se debe a la presencia de partículas suspendidas y disueltas. Materia en suspensión como arcilla, cieno o materia orgánica e inorgánica finamente dividida, así como compuestos solubles coloridos, plancton y diversos microorganismos.

La transparencia del agua es muy importante cuando está destinada al consumo del ser humano, a la elaboración de productos destinados al mismo y a otros procesos de manufactura que requieren el empleo de agua con características específicas, razón por la cual, la determinación de la turbiedad es muy útil como indicador de la calidad del agua.

1. Se Tomaron 25 ml de la muestra recolectada y se colocaron en el tubo del tubidímetro de la marca Hach para su medición.
2. Seleccionó la escala de medición.
3. Ya calibrado el aparato con el estándar específico, se tomó la lectura.

Color verdadero

La NMX-AA-017-1980 para la determinación de color especifica que el término color tal como se aplica en aguas, se refiere al valor numérico expresado en por ciento de luminancia y pureza, longitud de onda dominante y tono; obtenido de la medición de la luz transmitida, después de eliminar los sólidos suspendidos y las partículas pseudocoloidales.

- 1.- Se realizó la medición por medio de la comparación visual con la escala platino cobalto.

5.7.2 Parámetros químicos

pH (potencial de hidrógeno): El pH es una medida de la concentración de iones hidrógeno, y se define como $pH = \log(1/H^+)$. Es la medida de la naturaleza ácida o alcalina de la solución acuosa que puede afectar a los usos específicos del agua. La mayoría de aguas naturales tienen un pH entre 6 y 8.

Su medición se realiza fácilmente con un potenciómetro previamente calibrado; el valor del pH debe ser referido a la temperatura de medición, pues varían con ella.

Concentraciones de aniones y cationes

La técnica analítica instrumental para la identificación y cuantificación de los iones de nuestro interés, se basó en el Método EPA 300.1, el cual utiliza como técnica de separación la Cromatografía de Líquidos de Alta Eficiencia (CLAE O HPLC, por sus siglas en inglés), adecuando el equipo y las condiciones cromatográficas al laboratorio del Centro de Ciencias de la Atmósfera en la Sección de Contaminación Ambiental.

Se llevó a cabo en el laboratorio y equipo de cromatografía de la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (Figura 25), la identificación de los iones (cationes y aniones) que comúnmente se encuentran en una muestra de lluvia.



Figura 25 Equipo de cromatografía del laboratorio de contaminación ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera, en donde se lleva a cabo el análisis de las muestras *HPLC*.

Iones Metálicos: La preparación de las muestras colectadas, es el principal paso en los análisis por Espectrofotómetro de Absorción Atómica (E.A.A.).

Preparación de la muestra

El análisis químico de metales pesados en las muestras de lluvia se realizó en el Centro de Ciencias de la atmósfera en el laboratorio de Química Atmosférica empleando un Espectrofotómetro de Absorción Atómica GBC AVANTA Σ (Figura 28) con un horno de grafito acoplado a una fuente de poder y un auto-muestreador automático, modelo PAL3000, ambos controlados por una computadora.

Se utilizó una lámpara de deuterio, con corrección de fondo, tubos de grafito pirolíticamente recubiertos y lámparas de cátodo hueco (Photron Super lamp). Los metales pesados estudiados fueron: Al, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb y V; los cuales se analizaron con su correspondiente lámpara y a la longitud de onda característica de la línea de emisión de cada metal.

La calibración se realizó empleando estándares certificados, que se prepararon dentro del intervalo de concentración esperado de las muestras trazables a NIST, Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de los Estados Unidos (National Institute of Standard and Technology, NIST).

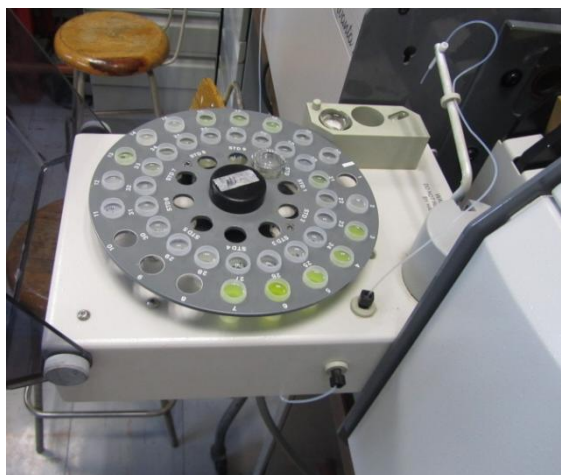


Figura 28 Espectrofotómetro de Absorción Atómica (GBC AVANTA Σ),

Las muestras de lluvia, se filtraron a través de una membrana de policarbonato de 0.4 μm . El filtrado se acidificó a un pH = 1.8 con HNO_3 0.016N y 60 mL de la muestra se transfirieron a botellas de polietileno de alta densidad (HDPE), a fin de evitar contaminación con los iones que puede liberar el vidrio (Keller *et al.*, 1988), obteniéndose la fracción soluble de las muestras de lluvia. Las muestras se mantienen en refrigeración (4 °C) hasta su análisis.

Existen diferentes técnicas analíticas para la determinación de metales pesados, entre las más comunes se encuentran la Espectrofotometría de Absorción Atómica (E.A.A.), Plasma acoplado Inductivamente con Espectrometría de Emisión Atómica (ICP-AES por sus siglas en inglés).

La técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica (E.A.A) por horno de grafito, trabaja en el intervalo de partes por billón (ppb), su sensibilidad la hace ideal para aplicaciones en análisis de ultra-traza. Además, se puede aplicar esta técnica, en situaciones en las que se dispone de una pequeña cantidad de muestra.

Las soluciones de las muestras son introducidas en tubos de grafito. El análisis se desarrolla en tres pasos (secado, calcinado y atomizado).

- Volumen de muestra 3 ml
- Se pueden obtener datos exactos para la determinación y réplicas de cada muestra.
- Costos de mantenimiento y operación (30 % menos que el Plasma).

5.7.3 Parámetros bacteriológicos

Estos parámetros son indicativos de la contaminación biológica; tanto la actividad natural como la humana contribuyen a la contaminación del agua la NMX-AA-42-1987 para la calidad del agua, determinación del número más probable (nmp) de coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli* presuntiva, la presencia y extensión de contaminación fecal es un factor importante en la determinación de la calidad de un cuerpo de agua.

Las heces contienen una variedad de microorganismos y formas de resistencia de los mismos, involucrando organismos patógenos, los cuales son un riesgo para la salud pública al estar en contacto con el ser humano. El examen de muestras de agua para determinar la presencia de microorganismos del grupo coliforme que habitan normalmente en el intestino humano y de otros animales de sangre caliente, da una indicación. Dada la limitada capacidad de algunos

miembros del grupo de organismos coliformes para sobrevivir en agua; sus números también pueden emplearse para estimar el grado de contaminación fecal.

Esta Norma Mexicana establece un método para la detección y enumeración en agua de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli* presuntiva (*E. coli*) mediante el cultivo en un medio líquido en tubos múltiples y el cálculo de sus números más probables (NMP) en la muestra.

Este método es aplicable para todo tipo de agua, incluyendo aquellos que contienen una cantidad apreciable de materia en suspensión. El análisis del agua se realizó con el método de los tubos múltiples y se expresa en términos de el "número más probable" (índice NMP) en 100 ml de agua. Las aguas con un NMP inferior a 1, son potables según la NOM-127-SSA1-1994

CAPÍTULO VI

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Parámetros físicos

Los parámetros físicos se analizaron en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería, ubicado en el edificio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería en Ciudad Universitaria.

Sólidos Disueltos

Fueron determinados por diferencia entre los sólidos suspendidos y los sólidos totales.

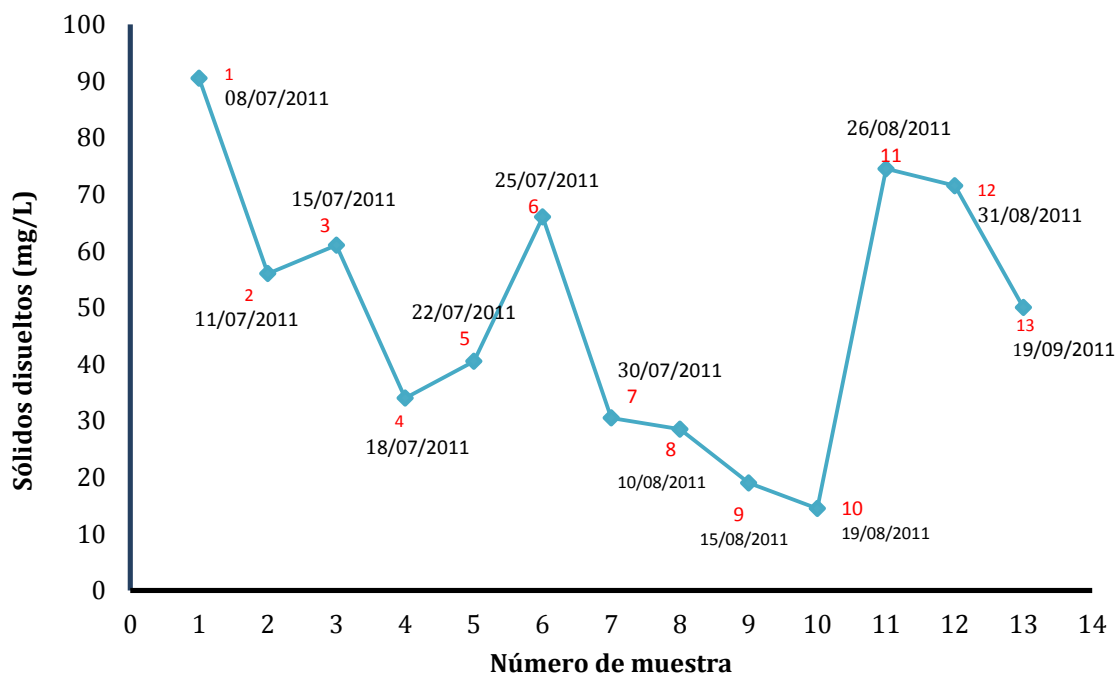


Figura 23 Comportamiento de sólidos disueltos a lo largo del estudio.

El comportamiento de los sólidos disueltos que se presenta la grafica es oscilante debido a que las corrientes de aire, las características físicas del sitio y la presencia e intensidad de la lluvia son las causantes de la concentración de la deposición seca, la cual se almacena en el área de captación.

Como se muestra (Figura 23) la concentración de sólidos disueltos en las muestras oscila entre 10 mg/l y 90 mg/l; la muestra 1 corresponde a la primera lluvia del día 8 de julio de 2011, esta realiza el lavado atmosférico y el arrastre de los polvos depositados en la azotea durante la temporada de estiaje, por tal motivo los sólidos disueltos de dicha muestra representan la mayor concentración.

La concentración de sólidos disueltos sigue un patrón ya que cuando los periodos de ausencia de lluvia son largos estos aumentan cuando vuelve a llover, si la frecuencia de lluvia es mayor estos disminuyen por lo que a mayor intensidad y frecuencia disminuirá la concentración de los sólidos disueltos presentes en las muestras recolectadas para su análisis.

Medición de pH

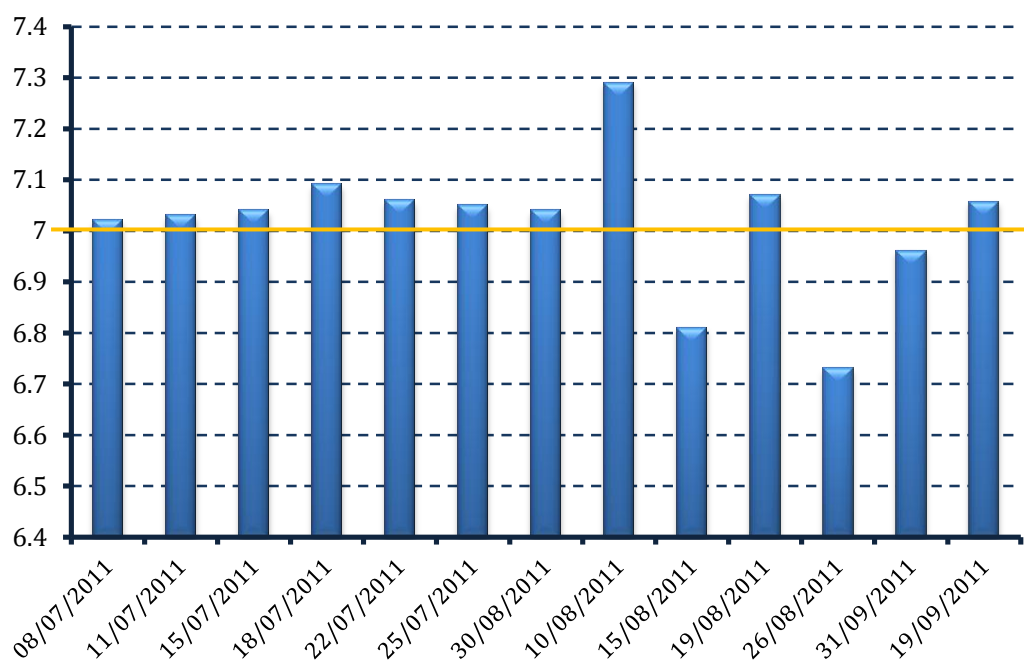


Figura 24 Comportamiento del pH en las muestras

Los valores de pH resultaron en su mayoría neutros con valores de 7 y 7.1 (Figura 24) a excepción de la muestra con fecha del 10/08/2011 que es de 7.3 y las muestras con fecha 15/08/2011 y 26/08/2011 con valores de 6.8 y 6.7 respectivamente.

Las reacciones químicas que experimenta la lluvia al caer en la superficie de experimentación explican el comportamiento del pH en las muestras, las partículas catiónicas tales como Ca^+ y

Mg⁺ se encuentran en la tierra, con los vientos son depositadas en forma de polvos en las azoteas, el material de construcción contiene también dichas partículas, por tal motivo puede explicarse el comportamiento del pH en las muestras.

Se considera una lluvia ácida aquella con valores ≥ 5.6 , generalmente las lluvias en la Ciudad de México y principalmente la zona de estudio (ver figura 11, cap. 4) tienen presencia de lluvia ácida; el método de muestreo que se aplica para medir el pH del agua de lluvia es diferente totalmente al que se aplicó en esta investigación puesto que no entra en contacto con una superficie para que realice una reacción que modifique o altere las características propias del agua de la nube.

6.2 Parámetros químicos

Análisis de aniones y cationes por cromatografía de líquidos

Aniones y cationes

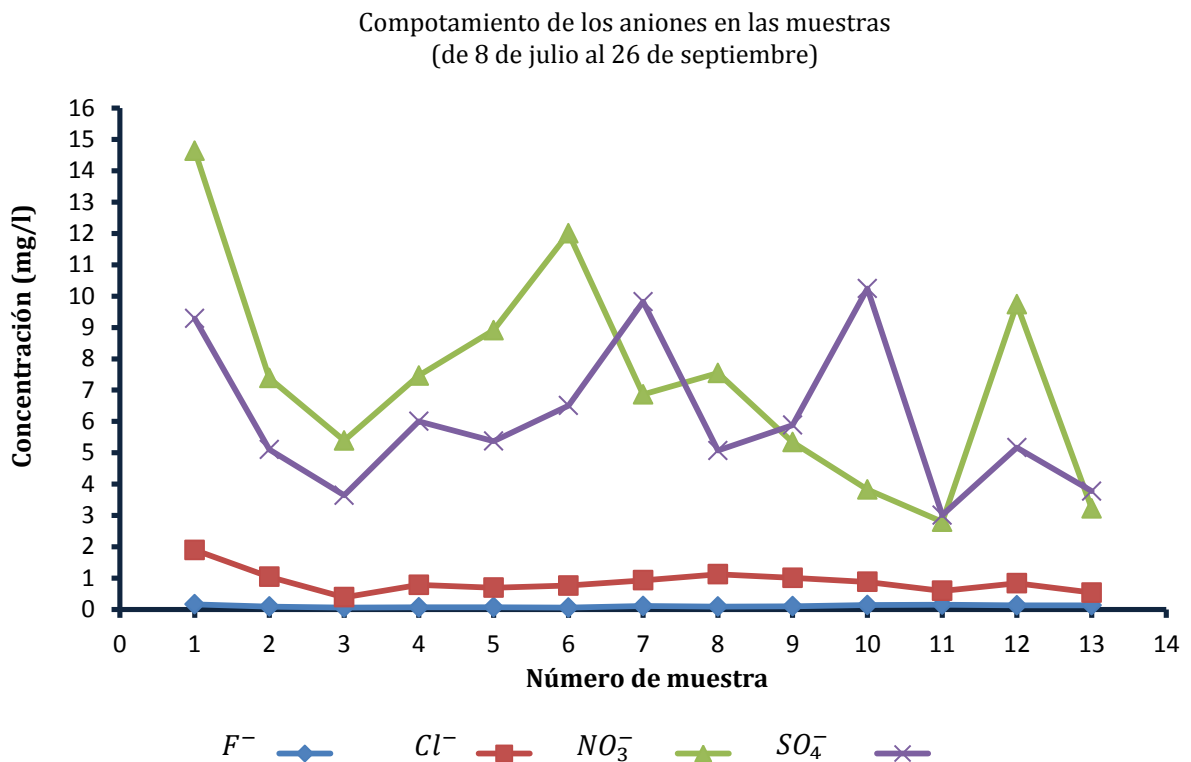


Figura 26 Comportamiento de los aniones presentes en las muestras

El comportamiento de los aniones se presenta en la figura 26 se observó que los iones NO_3^- y SO_4^{2-} , la presencia de estos explica que existe mayor presencia en el ambiente de dichos iones las concentraciones pueden ser el resultado de:

- La emisión de contaminantes antropogénicos derivados de la combustión, que pueden ser emitidos desde una fuente fija como la zona industrial ubicada al norte de la Ciudad de México y que de acuerdo a los vientos dominantes estos contaminantes son arrastrados de Norte a Sur.
- La emisión de fuentes móviles como lo son los automóviles, camiones u otro móvil con un motor de combustión. El punto de muestreo para esta investigación está ubicado muy cerca de avenidas (Insurgentes y Periférico Sur) con problemas viales.

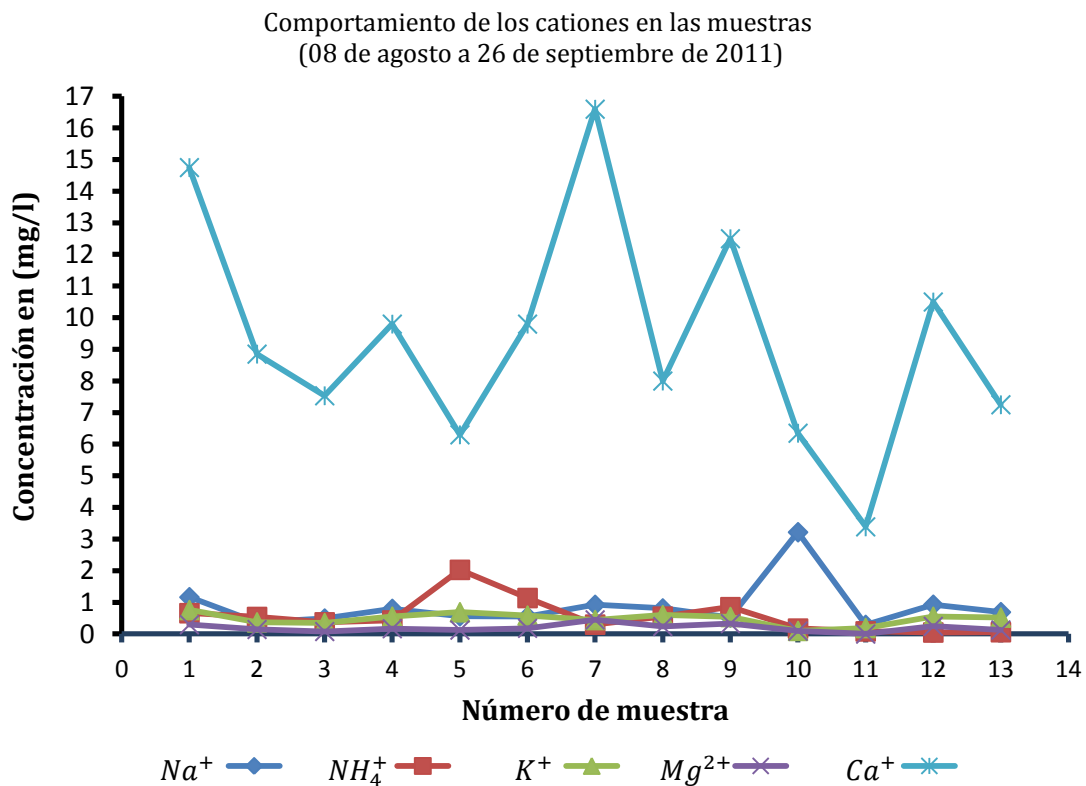


Figura 27 Comportamiento de los cationes en las muestras

La figura 27 muestra el comportamiento de la parte catiónica de las muestras, los factores principales por los cuales se supone que se obtuvieron altas concentraciones del ion Ca^+ son:

1. Debido a las partículas de material de construcción.
2. Al origen natural ocasionado por la erosión del suelo, áreas sin cubierta vegetal, campos deportivos.

De acuerdo con los resultados de las mediciones de pH y con los resultados de los cationes se puede corroborar porque el comportamiento y la tendencia a la neutralidad en las muestras.

Tabla 4 Resumen de resultados de laboratorio

CLAVE DE NUESTRA	ST	SS	SD	pH	Conductividad	UTN	UC	F ⁻	CL ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁼	Na ⁺	NH ₄ ⁻	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ⁺	HCO ₃ ⁻
	mg/L				(μs/cm)			(mg/L)									
1	93	2.5	90.5	7.02	96.8	85	28	0.164	1.90	14.64	9.29	1.17	0.66	0.76	0.30	14.75	163.28
2	90	34	56.0	7.03	54.4	50	16	0.093	1.04	7.39	5.11	0.37	0.54	0.37	0.14	8.85	188.81
3	62.5	1.5	61.0	7.04	44	60	18	0.061	0.39	5.39	3.64	0.49	0.37	0.35	0.08	7.54	189.56
4	50	16	34.0	7.09	66.22	25	7	0.065	0.78	7.46	6.01	0.80	0.43	0.55	0.17	9.80	117.21
5	47	6.5	40.5	7.06	52.2	30	9	0.074	0.70	8.91	5.38	0.56	2.03	0.69	0.13	6.30	179.12
6	80	14	66.0	7.05	64.6	60	17	0.057	0.76	12.01	6.51	0.55	1.14	0.59	0.18	9.80	185.65
7	56	25.5	30.5	7.04	52.8	25	8	0.107	0.93	6.86	9.82	0.92	0.30	0.44	0.45	16.60	247.00
8	65	36.5	28.5	7.29	56.2	20	6	0.091	1.12	7.55	5.07	0.81	0.55	0.60	0.24	8.00	146.53
9	46	27	19.0	6.81	78.3	15	5	0.103	1.01	5.34	5.89	0.52	0.85	0.54	0.33	12.50	305.96
10	16.5	2	14.5	7.07	39.3	10	3	0.138	0.88	3.83	10.24	3.22	0.17	0.10	0.10	6.35	133.46
11	78	3.5	74.5	6.73	44.3	70	18	0.150	0.60	2.80	3.01	0.29	0.08	0.19	0.03	3.39	41.11
12	82	10.5	71.5	6.96	62.07	60	16	0.130	0.84	9.74	5.17	0.93	0.05	0.55	0.25	10.50	182.81
13	65	15	50.0	7.06	44.6	45	10	0.132	0.53	3.22	3.77	0.69	0.06	0.52	0.13	7.25	196.63

Nota: Las muestras se realizaron por triplicado, se presentan los valores promedio, excepto color verdadero (UC).

Metales pesados

Resultados de metales pesados

Se presenta los resultados (Tabla 3) de las 13 muestras analizadas comparando los valores de éstas con los máximos permisibles de la NOM-127-SSA-1994 de agua para consumo humano (en color verde) y el límite de detección del equipo de análisis para cada metal en la parte superior (amarillo).

Tabla 5 Resultados obtenidos de análisis de metales pesados.

LIMITE DE DETECCIÓN	0.00603	0.00007	0.00038	0.00204	0.00046	0.00114
MUESTRA	Al (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Pb (mg/L)
	0.20 *	0.005 *	0.05 *	0.30 *	0.50 *	0.025 *
M-1	0.50	0.0012	0.0021	0.35	0.009	0.0032
M-2	0.06	0.0010	< LD	0.05	0.001	< LD
M-3	0.06	0.0014	< LD	0.02	0.001	< LD
M-4	0.88	0.0009	0.0007	0.66	0.016	0.0043
M-5	0.10	0.0003	< LD	0.03	0.003	< LD
M-6	0.11	0.0001	0.0013	0.06	0.008	< LD
M-7	0.23	0.0003	0.0005	0.06	0.006	0.0021
M-8	0.14	0.0003	< LD	0.10	0.006	0.0015
M-9	0.26	0.0001	0.0007	0.17	0.004	0.0018
M-10	0.05	0.0002	< LD	0.07	0.003	0.0030
M-11	0.05	0.0002	0.0008	0.03	0.004	< LD
M-12	0.08	0.0001	< LD	0.09	0.002	0.0013
M-13	0.14	0.0001	0.0004	0.21	0.005	0.0013
VALORES DE LA NOM-127-SSA *			BAJO LA NORMA		REBASA LA NORMA	

Los niveles de aluminio en el aire generalmente oscilan entre 0.005 y 0.18 microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de aire, dependiendo de la localidad, las condiciones climáticas y del tipo y nivel de actividad industrial en el área.

El aluminio es el elemento más abundante en suelos y si bien está unido a los minerales que lo constituyen, la acidez de la precipitación pluvial, favorece en gran parte la solubilidad del Al y su incorporación a la atmósfera (Cyrus et al., 2003; Chandra et al., 2006).

La mayor parte del aluminio en el aire se encuentra suspendido en forma de pequeñas partículas de polvo. Los niveles de aluminio en áreas urbanas e industriales pueden ser más altos y pueden oscilar entre 0.4 y 8.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Los resultados fueron analizados considerando los parámetros recomendados por la OMS (Tabla 6), en la Guía de Valores para Calidad de Agua Potable y comparados con los valores reglamentados en la legislación de Canadá, Estados Unidos y de ocho países latinoamericanos como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 6 Valores máximos recomendados por la OMS y valores máximos permitidos en diez países de América (mg/l)

Norma	Elemento					
	Plomo	Cadmio	Aluminio	Zinc	Cobre	Cromo
OMS (1995) ,Valores Guía	0,010	0,003	0,2	3,00	2,00	0,05
BRASIL (1990) , Portaria 36-GM	0,050	0,005	0,2	5,00	1,00	0,05
ARGENTINA (1994) ,Código Alimentario	0,050	0,005	0,2	5,00	1,00	0,05
CHILE (1984) ,NCH 409/1	0,050	0,010	--	5,00	1,00	0,05
MEXICO (1988), NOM 127-SSA	0,050	0,005	0,2	5,00	1,50	0,05
URUGUAY (1999) ,Dto: 27335	0,050	0,005	0,5	5,00	1,00	0,05
BOLÍVIA (1999), IBNORCA NB 512	0,010	0,005	0,2	5,00	0,50	0,05
COLOMBIA (1998) , RAS-98	0,010	0,003	0,2	5,00	1,00	0,01
CANADA (1995) , HE EHD	0,010	0,005	--	5,00	1,00	0,05
USA (1998) , NP- DWR	0	0,005	0,2	5,00	1,30	0,10

Fuente: Normas Internacionales para la Calidad del Agua de Bebida, CEPIS/ OPS-OMS , 1995.

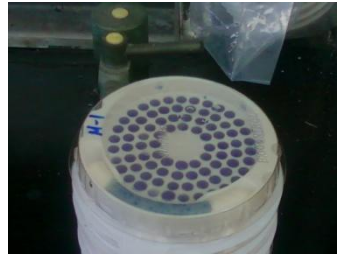
6.3 Parámetros bacteriológicos

La medición de este parámetro se llevó a cabo por medio de sistema de biocontrol (marca comercial Sim Plate) que es una prueba rápida para el conteo de microorganismos.

El método para el recuento de microorganismos tales como *coliformes totales* y *E. coli* se llevo a cabo a través de una placa como medio de cultivo,



1.- Preparación de la muestra.



2.- Preparación en el medio de cultivo.



3.- Incubación de las muestras por 24 horas.

Figura 29 Placas incubadas para su análisis microbiológico posterior a 24 horas.

Se colocó la muestra en la placa (Figura 30) y se incubó por 24 horas y se observaron las placas a luz UV (Figura 29) para apreciar la presencia de coliformes.

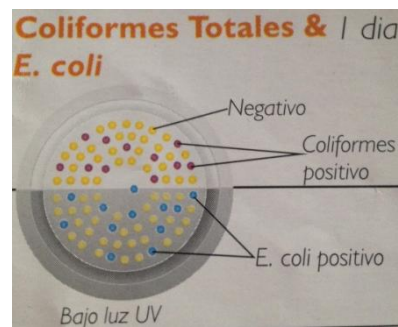
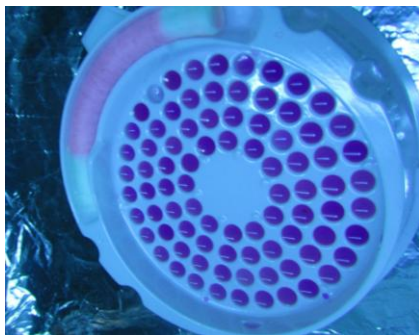


Figura 30 Charola o placa de experimentación con la muestra bajo luz ultravioleta

El cambio de color en los orificios de la placa observada con luz UV indica la presencia de coliformes.

Por las pruebas elaboradas no se observó presencia de coliformes fecales en las muestras.

CAPÍTULO VII

BALANCE HIDRÁULICO

7.1 Por medición de volúmenes

Un balance es la cuantificación y comparación del volumen de los ingresos con el volumen que resulta de sumar los egresos, que ocurren en un periodo determinado. Ambas cantidades deben ser, teóricamente, idénticas (PUERA, 2003).

En un balance, tanto las entradas (ingresos), como las salidas (egresos), deben estar bien identificadas; esto quiere decir que se debe saber con precisión de dónde proviene cada cantidad del total, así como el uso que se le dió a cada una de las cantidades que conforman el egreso total, respectivamente; de tal manera que el ingreso total debe ser igual al egreso total más la variación en el almacenamiento (esta variación puede ser positiva o negativa) (PUERA, 2003).

La realización de un balance tiene como finalidad analizar si existen pérdidas, cuáles fueron sus causas y de qué manera se pueden reducir algunos gastos para maximizar las utilidades o el beneficio.



Figura 31 Balance hidráulico

Volumen de agua suministrado: se realiza a partir de la lectura de medidores, un programa de lectura de medidores y estimación de consumos asegura que todos los usos del agua del inmueble han sido adecuadamente identificados y cuantificados.

Volumen de salida: es el caudal de las descargas (determinado mediante aforos).

7.2 A partir de la dotación de agua

El balance hidráulico calculado a partir de la dotación de agua designado por los reglamentos de construcción es un cálculo estimativo, dicho cálculo puede ser realizado cuando no se cuenta con un medidor de entrada, así como para los edificios en construcción.

En relación con lo que establece el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal en su artículo 1 y para apoyar lo estipulado en sus Títulos Quinto, Sexto, Séptimo y Noveno, el Gobierno del Distrito Federal emite las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Ejecución de Obras e Instalaciones Hidráulicas dentro del Distrito Federal.

De acuerdo a lo estipulado en el párrafo anterior, se indica la dotación mínima para las edificaciones dedicadas a la educación (Tabla 7).

Tabla 7 Dotación mínima de agua potable para edificaciones educativas

Tipología	Dotación
<i>III.5 Educación, ciencia y cultura</i>	
III.5.1 Educación preescolar	20 l/alumno/turno
III.5.2 Educación básica y media	25 l/alumno/turno
III.5.3 Educación media superior y superior	25 l/alumno/turno
III.5.4 Institutos de investigación	50 l/persona/día
III.5.5 Museos y centros de información	10 l/asistente/día

De esta manera se puede hacer una estimación del volumen de agua que se consume en el edificio, de acuerdo a la dotación con la cual fue diseñada.

7.3 A partir de la captación de agua pluvial

Para realizar el balance a partir de la captación de agua de lluvia en la edificación, se tomó en cuenta la población fija y flotante de acuerdo a datos registrados por el personal encargado del edificio. Se estima una población de 600 persona al día, aproximadamente el 60% de la población son hombres y el 40% mujeres.

Se obtuvieron datos pluviométricos del sistema más cercano al lugar de captación, por lo que al relacionar los datos pluviométricos y la población se obtiene un volumen de captación, el cual entraría al balance hidráulico para sustituir uso de agua potable por agua de lluvia.

La Tabla 8 se realizó en Excel en donde pueden capturarse datos pluviométricos área de captación y consumo, para realizar los cálculos para cualquier mes, población y área.

Tabla 8 Estimación de la captación de agua pluvial, para la sustitución de agua potable en temporada de lluvias.

BALANCE HIDRÁULICO A PARTIR DE LA CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA							
Alumnos³:	500	Mujeres:	200	Hombres:	300		
Las instalaciones cuentan con muebles ahorradores de agua							
Consumos						Estimación de captación de agua pluvial	
Muebles ahorradores y servicios	Consumo (L/servicio)	Número de servicios			Gasto acumulado (L/d)	Días del mes (Julio ¹)	
		Mujeres	Hombres	Operación			
Wc	5	200	150		1750	Precipitación ² (mm/mes)	150
Mingitorio	1.5		100		150	Área de captación de agua* (m ²)	2514
Limpieza	20			3	60	Coef. de escurrimiento ¹	0.9
SUMA					1960	Captación de agua pluvial (m ³ /mes)	339
						Demanda del sistema ² (m ³ /mes)	784
¹ Datos del mes más lluvioso en la estación pluviométrica Taxqueña.							
² Demanda del sistema							
³ Consideración de población fija y flotante							

El sistema de captación de agua de lluvia puede llegar a sustituir más del 50% de agua total demandada por el sistema para el mes de julio como se observa en la tabla del balance.

El cobro del agua en la Ciudad de México se efectúa bimestralmente los costos son por uso domestico y no domestico, que a su vez éstas se subdividen de acuerdo a la zona y valor catastral.

Para este caso se utilizo el siguiente costo de acuerdo al Artículo 172 De los derechos por la prestación de servicios.

b). En el caso de tomas de agua consideradas para efectos de este Código como de uso no doméstico, se pagará una cuota fija bimestral, considerando el diámetro de la toma, conforme a la siguiente:

Tabla 9 Costo por usuarios del servicio de agua potable con no doméstico

Diámetro de la toma en milímetros	Cuota bimestral expresada en pesos
0 A 13	\$1,816.00
MAS DE 13 A 15	\$9,436.50
MAS DE 15 A 19	\$15,439.50
MAS DE 19 A 26	\$30,019.50
MAS DE 26 A 32	\$46,318.50
MAS DE 32 A 39	\$67,762.50
MAS DE 39 A 51	\$120,085.50
MAS DE 51 A 64	\$180,124.50
MAS DE 64 A 76	\$257,322.00
MAS DE 76 A 102	\$523,219.50
MAS DE 102 A 150	\$2,007,112.50
MAS DE 150 A 200	\$3,139,326.00
MAS DE 200 A 250	\$3,830,910.00
MAS DE 250 A 300	\$4,520,286.00
MAS DE 300 EN ADELANTE	\$4,794,768.00

Tabla de costos por uso no domestico, Capitulo IX De los Derechos por la Prestación de Servicios del Código fiscal del Distrito Federal 2010.

CONCLUSIONES

La captación de agua de lluvia es una actividad remota que fue una fuente alterna de abastecimiento para muchas civilizaciones y que en la actualidad puede ser una alternativa viable para abastecer en cantidad y calidad a las numerosas poblaciones rurales, periurbanas y urbanas que sufren la carencia de agua.

Un sistema de captación de agua de lluvia es variable en cuanto a sus componentes ya que estos se adaptan de acuerdo a las características de la edificación y sus necesidades; los componentes principales como lo son el sistema de conducción y el almacenamiento pueden ser de distintos materiales y características que por ende se reflejaran en el costo del sistema.

La calidad depende de las superficies de captación, el modo de almacenamiento y del tratamiento que requiera para su uso.

Las edificaciones que pretenden ser sustentables, implementar un sistema de captación de agua de lluvia es un requisito para la obtención de puntos en el Programa de Certificación de Edificaciones Sustentables, del Distrito Federal, de dicha práctica se pueden obtener ahorros directos que se ven reflejados en el pago del agua y fiscales por ser una edificación sustentable.

Se ha cuestionado la práctica de captación de agua de lluvia en la Ciudad de México ya que ésta y la Zona Metropolitana, se caracterizan por ser urbes con mayor contaminación atmosférica del país, se observo en la investigación que dichos contaminantes no exceden la norma para uso potable por tal motivo no existe inconveniente para la práctica de captación de agua de lluvia.

En México no existe una norma de calidad de agua de lluvia, la cual indique una metodología para el análisis y muestreo del agua de lluvia, en esta investigación se procedió a la toma de muestras apoyados en técnicas de manuales como la GAW (Global Atmosphere Watch) y para su análisis en laboratorio de algunos compuestos en la Nom-127-SSA1-1994 ya que estaría en contacto de uso directo con el ser humano.

La caracterización que se llevó cabo en el muestreo de agua de lluvia del periodo 2011, el agua captada puede ser utilizada en actividades que no requieran consumo directo del ser humano.

De acuerdo a las determinaciones fisicoquímicas para caracterizar el agua de lluvia, se observó que los contaminantes predominantes, como son el dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre emitidos a la atmósfera, se encontraron como iones nitrato y sulfato, estos iones en concentraciones altas son característicos de una zona urbana, específicamente en este caso la concentración de dichos contaminantes son arrastrados por los vientos dominantes; en la Ciudad de México los vientos dominantes son de Norte a Sur; en el norte de la Ciudad se encuentra la “zona industrial” por lo que los contaminantes son arrastrados de norte a sur, el sitio de muestreo se ubica al sur de la Ciudad.

De acuerdo a las características hidrográficas de la Ciudad de México que es la ciudad en donde fue ubicado el sitio de muestreo para esta investigación, la captación de agua de lluvia es importante desde el punto de vista sustentable así como una oportunidad de recuperar el agua de lluvia que en ocasiones ocasiona problemas principalmente viales e inundaciones, ya que como se observó en el balance hidráulico de ejemplo, la captación de agua de lluvia en el edificio de investigación puede cubrir más del 50% de su consumo diario.

Se planteó como hipótesis que: “La captación de agua de lluvia puede ser una fuente alterna para el abastecimiento en época de lluvia en sitios donde el suministro no es continuo o en aquellas edificaciones que buscan la sustentabilidad hídrica en sus instituciones”, la hipótesis se aprueba.

El objetivo general, los objetivos específicos y los alcances planteados fueron todos llevados a cabo, teniendo como resultado la caracterización del agua de lluvia captada en la temporada de lluvias 2011 para el edificio de Posgrado “Bernardo Quintana Arrijoja”, así como el balance hidráulico de dicha edificación.

RECOMENDACIONES

- Se propone una norma para evaluar la calidad del agua de lluvia para sus diferentes usos, ya que nuestra legislación y normas oficiales no contemplan la captación de agua de lluvia.
- Apoyar los programas que inviten a la captación de agua lluvia, ya que promueve el desarrollo sostenible y contribuyen al uso racional del agua y los recursos.
- Apoyar las instituciones e investigaciones respecto al tema así como la continuidad de los proyectos e investigaciones para ampliar un marco teórico de referencia respecto al tema.
- Crear y promover una asociación de investigadores para la creación de un monitoreo de calidad de agua de lluvia, así mismo una base de datos que especifique características y condiciones.
- Promover esta práctica de uso de agua de lluvia principalmente en edificaciones publicas debido a la concurrencia a estos, pues poseen un una mayor área de aprovechamiento.

BIBLIOGRAFÍA

Abdulla, F.A., y Al-Shareef, A.W. 2009 .Roof Rainwater Harvesting Systems for Household Water Supply in Jordan.

Adler Ilán, Carmona Gabriela, Bojalil José Antonio; Manual de captación de aguas de lluvia para centros urbanos, 2001.

Albert, A.L., Introducción a la Toxicología Ambiental. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Secretaría de Ecología. México 1997.

Alder I, El agua y la Ciudad de México: una propuesta ecológica; Revista Alternativa ciudadana Edición 21 julio-septiembre 2005.

Alvarado, F. y L. García. Estudio de la Lluvia Acida en Corteza de Árbol como Indicador de Contaminantes en el Volcán "El Pelado", D.F. Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco. 1988.

Bravo, H., y A.S. Aguilar. 1984. Acid Precipitation in the México Basin. Conferencia Técnica Sobre Climatología Urbana y sus Aplicaciones con Especial Referencia a las Zonas Tropicales. OMS, SMN, OMM. México, D.F. *Journal of Water Supply Research and Technology-AQUA*, 2006.

Bravo, H.A., R.J. Torres, J. Harris, R.M. Saavedra, P.A. Sánchez, R.C. Camacho, R.E. Sosa y M.R. Gamboa. Estudios de Caso sobre Química, Atmosférica y Lluvia Ácida. Universidad Autónoma de Campeche. 1996.

Burns E. Repensar la cuenca, la gestión de ciclos del agua en el Valle de México, 2005

CEC, Commission for Environmental Cooperation of North America; Deposition Acid, 2008

FAO, Oficina Regional de la FAO para América Latina, "Manual de Captación y Aprovechamiento del Agua de Lluvia Experiencias en América Latina, Serie: Zonas Áridas y Semiáridas N° 13". Chile, 2000.

Gaceta Oficial del Distrito Federal; Programa de certificaciones sustentables, 2008

Gallardo R. Juan. Cornejo Sánchez J. ; Sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales, Master Universidad de Sevilla, 2008

Gallardo Torres Alfredo, García Galván Lilia, *Lluvia Ácida*, Gobierno del Distrito Federal Diseño y Elaboración, 1999.

Gallardo, A.T. y L.G. García. Lluvia Ácida. RAMA. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. Secretaría del Medio Ambiente 1999.

Garrido Oyos Sofía E., Sistemas de captación, almacenamiento, tratamiento y aprovechamiento de agua de lluvia en zonas urbanas, marzo 2011.

Joao Pessoa Seminario Iberoamericano sobre sistemas de abastecimiento urbano de Agua, Brasil, 2006

John M. Wallace and Hobbes Peter V.; Atmospheric Science, Second Edition: An Introductory Survey, 2006

Jungsoo Mun y Mooyoung Han; The case study of Star-City Rainwater Harvesting System. 2009.

Kajumulo Tibaijuka Anna; Ciudades sin agua, ; 2003

Krishna, Hari, "An Overview of Rainwater Harvesting Systems and Guidelines in the United

Laureano, Pietro. "Traditional Techniques of Water Management to Fight Against Desertification" 2002.

Lee m & Thomas. 1986. "The next step: acid rain," EPA Journal, june/july 1986.

Moctezuma Pedro; Repensar la cuenca, La gestión de ciclos del agua en el Valle de México;2009.

Nebel, Bernard j. y Wright, Richard, t. *Ciencias ambientales ecología y desarrollo sostenible*. Prentice Hall, 6ª edición. México,1999.

Ojeda, Aída. "Agua y vida para saciar la sed de desarrollo" México 2009.

ONU-FAO; Manual sobre sistemas de captación y aprovechamiento del agua de lluvia para uso domestico y consumo humano experiencias en América Latina, 2000.

ONU-Habitat, Water and Sanitation in the world's cities: local action for global goals, earthscan publications 2003.

Pacheco Montes Margarita; La gestión del agua lluvia y la reducción de riesgos urbanos, 2008.

Páramo, A., Acidez de las Precipitaciones en el Distrito Federal. Ciencia y Desarrollo CONACYT 1987.

Phillips Victor D., GEM, et.al. Captación de agua de lluvia como alternativa para afrontar la escasez del recurso 2009.

Phillips Victor D., GEM, et.al. Captación de agua de lluvia como alternativa para afrontar la escasez del recurso 2009.

Pierri Naína; Historia del concepto de desarrollo sustentable 2009

Programa de manejo sustentable del agua para la Ciudad de México, sistema de aguas de la ciudad de México, Gobierno del Distrito Federal 2007.

Red Automática de Monitoreo Atmosférico., Programa Precipitaciones Ácidas en la Zona

Metropolitana de la Ciudad de México. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación, 1994.

Sánchez H. Benito; Análisis de algunas variables meteorológicas y su área de influencia, en Ciudad Universitaria D.F., Durante el periodo 1963 a 1983, 1990

Secretaria del Medio Ambiente; Informe Calidad del aire en la Ciudad de México 2010

Secretaria del Medio Ambiente; Informe Calidad del aire en la Ciudad de México 2009

States” Texas Water Development Board –TWAD-. Texas, Estados Unidos.

UNEP, United Nations Environment Program; Rainwater Harvesting and utilization, international technology centre. News letter and Technical Publications, 2000

CIDECALLI Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia. Colegio de Posgraduados. México (2008);
<http://www.colpos.mx/ircsa/cidecall/>

Informe Anual de Lluvia Ácida, Gobierno Del Distrito Federal, 1999.

<http://www.eng.warwick.ac.uk/DTU/pubs/rwh.html>.

<http://www.epa.gov/greenbuilding/>

www.sma.df.gob.mx

<http://www.rainwaterharvesting.org>, Web ONG Centre for Science and Environment-. Nueva Delhi, India.

<http://www.rainwaterclub.org>. Página de Internet de un grupo de ingenieros y arquitectos de que estudian y promueven los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia. Bangalore India, 2004.