



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Planeación de un sistema domiciliario de  
tratamiento de agua de lluvia en la  
CDMX. Caso de estudio: VIS CASA UNAM**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Rodrigo Chinchilla Cornejo

**DIRECTOR DE TESIS**

M.I. Cristian Emmanuel González Reyes



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019**



## *Agradecimientos*

Quiero agradecer a...

... Gaby y a “El Chino”;

por siempre estar presentes, pendientes y atentos, por brindarme todo su amor y su apoyo incondicional de padres. Porque ser padre o madre no es por dar la vida, lo son porque te dan su amor, su tiempo y su esfuerzo diario.

... Lalo y a Diana;

que con su ejemplo he aprendido a vivir y a tomar decisiones. Porque a ellos les tocó equivocarse para enseñarme a no cometer los mismos errores. Porque es maravilloso crecer con alguien de quien aprender, de quien apoyarse, alguien con el que siempre vas a contar.

... mi Familia;

porque siempre he tenido a los tíos, los primos, los abuelos que no te dejan ni respirar hasta cumplir tus sueños y tus obligaciones. Y que siempre están para darte un consuelo, un abrazo e invitarte a sentarte en su mesa y siempre compartir lo que tengamos, porque de un plato sale para dos.

... los Amigos;

que siempre han estado y siempre estarán presentes sin importar el día, la hora, el lugar o la situación. Porque siempre habrá una risa, un abrazo, un partido de fútbol, un gesto de unión y compañerismo para crecer juntos. Y porque siempre habrá un “Pack” que compartir.

... mis Maestros;

“Yeyo”, “Chus”, “El Güero”, Takashi; que no se limitaron a enseñarme lo mejor en sus clases, siempre se esforzaron para que creyéramos moral y profesionalmente como persona. Y un especial agradecimiento a los maestros del Centro de Ciencias de la Atmósfera: Guillermo Montero y Rocío García por su apoyo y su tutoría para lograr los objetivos del presente documento.

... Cristian González;

director de la presente Tesis, por su apoyo para desarrollar este tema en conjunto, por su tiempo, dedicación, paciencia, y sus consejos siempre presentes para mejorar como ser humano y como profesional de la Ingeniería.

... el CONACYT;

en conjunto con el proyecto “Vivienda Industrializada Sustentable, VIS” por la oportunidad de pertenecer al proyecto, por el apoyo económico y por los conocimientos adquiridos durante el desarrollo de este.



# Índice

Resumen.....	10
Abstract.....	10
Introducción.....	12
Objetivo general.....	12
Objetivos particulares.....	12
Alcances.....	12
Limitaciones.....	13
Justificación.....	13
Capítulo 1. El Agua en la evolución del hombre.....	14
1.1. Importancia del Agua en la historia del hombre.....	14
1.1.1. Usos del Agua.....	17
1.1.2. La escasez del Agua, tendencia a nivel mundial.....	17
1.2. El Agua en México.....	20
1.2.1. Disponibilidad de Agua en México.....	20
1.2.2. Consumo de Agua en México.....	22
1.3. Agua en el Valle de México.....	22
1.3.1. Balance hídrico.....	24
1.3.2. Consumo habitacional.....	27
1.4. La vivienda de la Ciudad de México.....	30
Capítulo 2. Marco jurídico.....	37
Constitución política de los Estados Unidos Mexicanos.....	37
Ley de Aguas nacionales.....	37
Ley de Agua del Distrito Federal.....	37
Ley de mitigación y adaptación al cambio climático y desarrollo sustentable del Distrito Federal.....	38
NOM 127 SSA1 2000.....	39
Capítulo 3. Estado del Arte del aprovechamiento pluvial.....	43
3.1. Aprovechamiento de Agua pluvial en el mundo.....	43
3.1.1. África.....	43
3.1.2. Asia.....	43
3.1.3. Europa.....	44
3.1.4. Oceanía.....	45
3.1.5. Islas del Caribe.....	45

3.1.6. América del Norte .....	45
3.1.7. América del Sur .....	46
3.1.8. América Central.....	46
3.1.9. México .....	46
3.2. Tratamiento doméstico de Agua pluvial .....	47
Capítulo 4. Marco conceptual del aprovechamiento pluvial .....	51
4.1. Las Soluciones Basadas en la Naturaleza .....	51
4.2. Sistema de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) .....	52
4.2.1. Superficie de Captación.....	52
4.2.2. Sistema de Conducción .....	52
4.2.3. Separador de Primeras Lluvias .....	52
4.2.4. Filtro y Desinfección .....	53
4.2.5. Tanques de Almacenamiento.....	53
4.2.6. Ventajas y Desventajas de un SCALL .....	53
4.3. Propiedades Físicas, Químicas y Biológicas del Agua .....	54
4.3.1. Parámetros Físicos .....	54
4.3.2. Parámetros Químicos.....	55
4.3.3. Parámetros Biológicos.....	55
4.4. Procesos y Operaciones unitarias .....	56
4.4.1. Filtros de arena.....	56
4.4.2. Filtro de carbón activado .....	56
4.4.3. Filtro KDF .....	56
4.4.4. Intercambio Iónico .....	56
4.4.5. Luz Ultravioleta .....	57
4.4.6. Cloración.....	57
4.4.7. Procesos de membrana.....	58
Capítulo 5. Características de la calidad del Agua de Lluvia .....	59
5.1. En la Ciudad de México .....	59
5.1.1. Características Atmosféricas .....	59
5.1.2. Origen del Agua de Lluvia en la CDMX.....	66
5.1.3. Estudios de caracterización de Agua de Lluvia en la zona de interés.....	71
Capítulo 6. Análisis para determinar el Tren de Tratamiento óptimo .....	75
6.1. Procesos y operaciones unitarias en función de los parámetros encontrados.....	75
6.1.1. pH .....	75

6.1.2. Color Verdadero .....	75
6.1.3. Turbiedad .....	75
6.1.4. Coliformes totales y Coliformes fecales .....	76
6.1.5. Metales Pesados.....	76
6.1.6. Iones.....	76
6.2. Análisis financiero, técnico, social y ambiental de los procesos y operaciones unitarios a contemplar para el diseño.....	77
6.2.1. Filtro de arena .....	77
6.2.2. Filtro de Carbón Activado (antracita).....	77
6.2.3. Filtro de Intercambio iónico .....	78
6.2.4. Desinfección con Cloro.....	78
6.2.5. Desinfección con Ozono.....	79
6.2.6. Desinfección con Luz Ultravioleta .....	79
6.2.7. Filtro de ósmosis inversa .....	79
6.3. Definición de la calidad necesaria del Agua en función del uso deseado.....	82
6.4. Propuesta de Trenes de tratamiento para Agua de Lluvia .....	84
6.4.1. Tratamiento Primario.....	84
6.4.2. Tratamiento Secundario.....	85
6.4.3. Tratamiento Terciario.....	86
6.5. Elección del Tren de Tratamiento óptimo para mejorar la calidad de Agua de Lluvia, en función de las características propias de la CDMX.....	86
6.5.1. Indicador beneficio-costos.....	87
6.5.2. Indicador beneficio-costos desde la perspectiva del gasto en agua potable embotellada .....	89
Capítulo 7. El beneficio de aprovechar Agua de Lluvia sobre el Acuífero del Valle de México .....	91
Capítulo 8. Vivienda Industrializada Sustentable, VIS.....	93
8.1. ¿Qué es?.....	93
8.2. Aplicación del sistema de tratamiento de Agua de Lluvia .....	94
Capítulo 9. Conclusiones y reflexiones.....	97
9.1 Conclusiones .....	97
9.2 Reflexiones.....	98
Bibliografía .....	101
Anexo .....	106



***“La transformación del mundo por parte del sabio surge de la solución al problema del agua. Si el agua está unida al corazón del hombre se corregirá. Si el agua es limpia y pura, el corazón de la gente se unificará y mostrará su deseo de limpieza.”***

**LAO-TSE**



## Resumen

Al inicio del presente documento, se establecen los objetivos a desarrollar en esta tesis, siendo el principal: planear y diseñar el tren de tratamiento capaz de mejorar la calidad del agua de lluvia para su aprovechamiento doméstico en el contexto de la Ciudad de México. Y se describe, a modo de introducción, la justificación del trabajo realizado junto con una breve descripción de la información que se desarrolla en dicha tesis.

Para llegar al diseño del dispositivo, es necesario reiterar la importancia del Agua en la vida humana, y como ha sido factor clave durante la evolución misma. Es por ello que el capítulo 2 se titula “El Agua en la evolución del hombre”, en el que se hace mención del estado actual del recurso hídrico a nivel mundial y se particulariza hasta su disponibilidad y usos en la Ciudad de México.

Seguido del capítulo 3, referente al Marco Jurídico, el cual representa la base para la planeación de un dispositivo capaz de entregar la calidad establecida en las normas vigentes, y como fundamento de que el aprovechamiento domiciliario del recurso pluvial es de uso público y no se cometerá ninguna falta legal.

En el capítulo 4, se describe el estado actual del aspecto técnico del aprovechamiento y tratamiento de Agua de lluvia, tanto en el mundo como en México. Donde a pesar de ser una tecnología emergente, ya hay bastante aplicación a nivel mundial y hay registro de su uso en muchas culturas prehispánicas. Pero, en general, no hay tanto mercado en el tratamiento del recurso pluvial para conseguir agua para consumo o uso humano.

Es importante definir los conceptos y los elementos que integran el diseño y funcionamiento de un dispositivo para tratamiento de Agua de lluvia. Por ende, en el capítulo 5, se definen los conceptos relacionados con la captación y aprovechamiento pluvial, así como una descripción de las características del Agua, dando claridad a la elección de sus posibles tratamientos.

Si bien el presente documento está enfocado en la planeación del dispositivo y no en el muestreo o caracterización de recurso pluvial, es de suma importancia conocer las propiedades y los posibles contaminantes que se presentan en el Agua de lluvia. En virtud de lo anterior, en el capítulo 6 “Características del Agua de lluvia”, se recopilaron los resultados de diferentes estudios a nivel mundial, nacional y de la región, para inferir las características de calidad presentes en el líquido y, con base en éstas, proponer el tren de tratamiento, considerando un análisis de costos e impacto, en función del proyecto para el que se va a diseñar el prototipo.

Como ya se mencionó, el dispositivo a diseñar se implementará en un prototipo de vivienda industrializada sustentable que está en construcción, elaborado por la Facultad de Arquitectura en conjunto con la Facultad de Ingeniería, y el Centro de Investigaciones de Diseño Industrial, con apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Dicho prototipo es un espacio para uso habitacional de máximo dos personas que se pretende construir en serie, por lo que su elaboración y sus complementos tecnológicos deben de ser comerciales o de fácil construcción e instalación, dicho proyecto lleva por nombre: *Vivienda Industrializada Sustentable (VIS)*.

## Abstract

At the beginning of this document, the objectives to be developed in this thesis are established, being the Main: to plan and design the treatment train able to improve the quality of the rainwater to be consumed by humans in residential use with the conditions of Mexico City. And describes, as an introduction, the justification of the work done together with a brief description of the information that is developed in this thesis.

To achieve the design of the device, it is necessary to mention the importance of water in human life, and how it has been a key factor during the evolution. For this, Chapter 2, The water in the evolution of Man, it is developed and it mentions the current state of the water resource worldwide and up to its availability and uses in Mexico City.

Followed by Chapter 3, concerning the legal framework which is the one to be based on to design the device able to be deliver the quality established in these standards in order to assure that the rainwater application and use are for public use and no legal foul will be committed.

In Chapter 4, it is described the current technological state of use and treatment of rainwater, worldwide and in Mexico. Where, despite being an emergent technology, there is already a lot of global application and in many pre-Hispanic cultures, actions were already practiced for their recruitment and use. But in general, there is not so much market in the treatment of the pluvial resource to get water of consumption or human use.

It is important to define the concepts and elements that integrate the design and operation of a rainwater treatment device. Therefore, in Chapter 5, we will define the concepts related to the capture and use of rainwater, as well as describe the characteristics of the water and, thus, to know its properties and possible treatments.

Although this thesis is focused on Planning and Design conceptual of the device and not in the sampling or characterization of pluvial resource, it is of paramount importance to know the properties and the possible contaminants that occur in rainwater. For this, in Chapter 6, rainwater characteristics, different global, national and regional studies were collected to know the characteristics that are present in the liquid and on these generate the design the optimal treatment train to improve water quality, proposed in the next chapter, together with a cost and convenience analysis, depending on the project for which the prototype will be designed.

As mentioned, the device to be designed will be implemented in a project that is under construction, developed jointly with the Architecture Faculty, the Center for Industrial Design Research and the Engineering Faculty, with support from the National Council of Science and Technology (CONACYT). It is a space for residential use of maximum two people that is intended to build in series, so that its elaboration and its technological complements must be commercial or easy construction and installation, this project is called: *Vivienda Industrializada Sustentable (VIS)*.

# Introducción

## Objetivo general

Llevar a cabo la planeación de un sistema doméstico de tratamiento de agua pluvial con fines de aprovechamiento en casa habitación en la Ciudad de México.

## Objetivos particulares

- Definir la importancia del agua en el desarrollo de los centros urbanos en el mundo y describir la optimización histórica de su aprovechamiento en el siglo XXI;
- Describir los elementos que integran a un sistema de captación y aprovechamiento pluvial;
- Identificar los posibles constituyentes del agua de lluvia con base en la bibliografía; análisis de la procedencia de la precipitación y de su interacción con el medio, además de los resultados de estudios realizados por otros investigadores;
- Determinar, con base en la evaluación de distintas alternativas, el tren de tratamiento de agua de lluvia óptimo para condiciones de la CDMX. Considerando aspectos financieros, técnicos, sociales y ambientales.
- Identificar los impactos ambientales benéficos por la implementación del sistema de tratamiento con fines de aprovechamiento de agua de lluvia.

## Alcances

El diseño de un sistema para tratamiento de agua de lluvia conlleva varios procesos previos, entre los que destacan: análisis de características atmosféricas y antropogénicas del sitio; caracterización de muestras pluviales; determinación del tren de tratamiento óptimo según condiciones propias; pruebas técnicas de procesos y operaciones unitarias en laboratorio para comprobar la eficiencia del tratamiento; diseño ejecutivo del sistema para mejorar la calidad del recurso, elaboración del dispositivo, puesta en marcha, optimización y mantenimiento.

Actualmente existen diversos estudio que incluyen caracterización de agua pluvial, por lo que la presente tesis se apoyará en dichos documentos para obtención de las características y contaminantes presentes en el Agua de lluvia, lo cual se complementará con la búsqueda de información y análisis de las características atmosféricas y antropogénicas del sitio de interés.

El alcance del presente documento es el análisis social, financiero, ambiental y técnico de los posibles trenes de tratamiento para mejorar la calidad del recurso pluvial y, con lo anterior, proponer la secuencia de procesos y operaciones que involucre sistemas accesibles y fáciles de manejar. Posteriormente, como consecuencia de lo concluido en la presente tesis y como parte de lo planteado en la línea de investigación del tutor, se podrá retomar esta información para el diseño ejecutivo de los dispositivos necesarios.

## Limitaciones

El trabajo actual solo llegará a un diseño conceptual, incluyendo materiales, procesos y operaciones necesarias para remover contaminantes del agua pluvial. No se elaborará el diseño de un dispositivo definitivo porque para lograr este último es necesario realizar pruebas de factibilidad y eficiencia técnica, de los procesos y operaciones propuestos para optimizar el diseño de los reactores y poder concluir con las cantidades y dimensiones necesarias para alcanzar la tratabilidad óptima del recurso.

El presente documento no incluye la realización de pruebas de caracterización, se considerará exclusivamente la información documental de otros estudios. Se contempla como parte de la línea de investigación del tutor, en el futuro asentar estos estudios y análisis en un diseño ejecutivo y en la manufactura del mismo.

## Justificación

Hoy en día, para cualquier aspecto de la vida humana, es indispensable implementar soluciones que se rijan por los criterios de la sustentabilidad. Aunque para muchos el indicar que sus proyectos son sustentables les genera plusvalía, la sustentabilidad debe de ser un requisito para el desarrollo de infraestructura. Se tiene que dejar de ser tan invasivo con el ecosistema, solo por desarrollar la infraestructura para la actividad humana. Es momento de ser inclusivos, no invasivos.

El abastecimiento de agua irregular en algunas zonas del valle de México y la sobreexplotación de los acuíferos de los cuales se abastece la ciudad, son las principales razones de esta búsqueda de tecnologías para aprovechamiento de Agua pluvial. Es de dominio de todos los habitantes de la Ciudad de México, que en alcaldías como Iztapalapa, Iztacalco, Tlalpan, Tláhuac, Magdalena Contreras y en zonas altas, el abastecimiento de recurso por la red es deficiente, predominando el suministro en bloque, o solo durante algunas horas del día. Esto, aunado a la sobrepoblación, y el efecto del mantenimiento periódico al sistema Cutzamala o a los pozos; incide en un desabasto general en la Zona del Valle de México, lo que afecta a cientos de miles de habitantes, no solo por la falta del recurso, si no por las enfermedades que esto conlleva (Noticieros Televisa, 2018).

El segundo motivo de desarrollar la presente tesis es acorde con la sobreexplotación que sufre el acuífero del Valle de México. Actualmente la CDMX y el área metropolitana se abastecen con Agua del Sistema Cutzamala, pozos de extracción y el mínimo de reúso de agua tratada y de fuentes superficiales; pero la mayoría del recurso se obtiene del subsuelo. Y al estar sobrepoblados, generamos que los servicios se vean superados y se tengan que buscar nuevas fuentes o sobreexplotar las actuales, el último caso es el más crítico y más cuando la recarga del acuífero no llega ni al 50% de la extracción.

# Capítulo 1. El Agua en la evolución del hombre

## 1.1. Importancia del Agua en la historia del hombre

Desde sus inicios, el ser humano buscó la manera de encontrar su alimento, agua y abrigo conforme a las características de los hábitats en los que se ha vivido a lo largo de los años. Los primeros estilos de vida subsistieron gracias a la caza, recolección y pesca; en una vida nómada, pero siempre buscando su movimiento alrededor de cuerpos de agua -por naturaleza, todo ser vivo busca agua- para encontrar alimento animal y vegetal. Hasta que empezaron a asentarse cerca de estos sistemas hídricos y con ello implantar un sistema de agricultura, fundamentada en la producción natural de alimentos, abastecimiento de agua y manejo de ganadería. Actualmente se tiene el sedentarismo como forma de vida; donde la producción de alimento en su mayoría es procesada o de origen natural complementado con procesos industriales. Y junto con el cambio de las modalidades de vida, el cambio de los usos para consumo y aprovechamiento de agua se desarrollaron. Iniciando con técnicas en las que el agua se usó directamente de las fuentes, sin tratamiento alguno, hasta los modernos y elaborados sistemas de captación, tratamiento y aprovechamiento; distribuyéndola mediante miles de kilómetros de tuberías para distribuirla a las viviendas, comercios, industrias, oficinas, parques y sitios recreativos. El crecimiento y comportamiento de vida humana en Mesoamérica se observa muy apegado a los modos del resto del mundo, mencionados anteriormente. “La primera domesticación de una planta y el inicio del cultivo tuvo lugar hace más de 10 mil años (*Cucubita pepo*, calabaza).” Como todo desarrollo tecnológico en la historia de la humanidad se va optimizando con el paso del tiempo y de esa misma manera las tecnologías de aprovechamiento para el recurso hídrico se han ido mejorando. A continuación, se comentan algunas obras hidráulicas pertenecientes a la historia de Mesoamérica y las fuentes de agua ocupadas: (RAE: Mesoamérica, 2005; y CONAGUA, 2000)

- Captación, conducción, almacenamiento y distribución de agua para usos domésticos; de aguas pluviales, perenes superficiales y subterráneas,
- Conducción, control y drenaje de aguas pluviales para evitar inundaciones,
- Conducción y drenaje de aguas de desecho de poblaciones rurales y urbanas,
- Provisión de agua para riego,
- Control, aprovechamiento y desagüe de zonas lacustres y pantanosas; y
- Recreación y utilidad.

La práctica de la captación de Agua pluvial comenzó por la necesidad de mayor suministro a causa del crecimiento demográfico y el asentamiento en zonas altas; áridas y semiáridas, esta para uso doméstico y de riego de cultivos. Su primer uso registrado aparece en el oriente, en el actual Jericó, en el periodo del 8000 al 4000 a.C. en el Valle del Río Jordán; donde la intensidad de lluvia de la región, aproximadamente 300 mm/año, era la suficiente para sustentar el riego de sus cultivos -trigo y cebada- (UNEP, 2018). Los primeros sistemas de colección y almacenaje pluviales se encuentran en la Isla de Creta, dentro del Palacio de Knossos -utilizado cerca del 1700 a.C.-. En Yemen, zona de lluvias escasas, se encuentran dentro de templos y sitios de culto, construidos antes del año 1000 a.C., patios y terrazas de captación y almacenaje pluvial (Ballen, 2006).

Cercano a Israel, en el desierto de Negev, se colectaba y conducía por las laderas la poca precipitación hasta un recipiente de arcilla, el cual funcionaba como uno de los primeros tratamientos de filtración para residuos y sedimentos arrastrados con el caudal, para posteriormente depositarse en cisternas con capacidad máxima de 300 metros cúbicos; esta fue para uso ganadero y labores domésticas. Junto a esta práctica se suman las construcciones de Balaton, Hungría, durante la era del emperador Galerio (305-311 d.C.), desde su diseño se proyectaba la construcción de cisternas para el almacenamiento de agua de lluvia captada en los techos y patios de sus casas; también para uso doméstico (UNEP, 2000).

La cisterna más grande construida en el mundo se encuentra en Estambul, Turquía, Cisterna Basílica, construida por el César Justiniano, alrededor del año 600 d.C., con 80 mil metros cúbicos de capacidad. Junto a ésta se encuentra otra cisterna de 50 mil metros cúbicos de capacidad, construida por su padre, el César Constantino. Ambas hechas para abastecer de Agua el Gran Palacio de Constantinopla y la zona del capitolio, ante la vulnerabilidad del acueducto en la temporada de estiaje (García, 2013).

Se tienen registrados más usos del Agua pluvial a lo largo de la historia humana en diferentes regiones y culturas, por ejemplo; en la Antigua Grecia, se abastecían de Agua de lluvia y de manantial, almacenada en cisternas y pozos; en China se encontraron pozos y jarras para la captación de esta, y otro ejemplo es en Irán, donde se ocupaban los “*abarbans*”, sistemas locales para captación y aprovechamiento pluvial (García 2013).

Durante el Imperio Romano se aplicaron sistemas más sofisticados para el aprovechamiento doméstico del recurso pluvial, utilizado para consumo y como instalación para refrescar el ambiente de la casa. En su mayoría las casas de burgueses, en la antigua Roma (Siglos III y IV a.C.), se construían bajo un concepto definido como “*la Domus*” o vivienda romana. Estas se diseñaban con un vestíbulo a cielo abierto -*atrium*-; en el que se construía un depósito superficial para Agua de lluvia -*impluvium*-, captada en los tejados de la casa -*compluvium*- y al final se conducía por medio de una pequeña obra de excedencias hacia cisternas subterráneas para su almacenamiento y aprovechamiento continuo después de las lluvias, o en algunos casos de la captación era conducida por tuberías directo a las cisternas (García, 2013).



Ilustración 1 La Domus Romana. Fuente: Wordpress

Pero no solo en el viejo continente se aprovechaba el recurso pluvial, en Mesoamérica el imperio Maya, una de las civilizaciones más desarrolladas hacia el siglo X a.C., pese a que contaba con mucha disponibilidad de agua superficial, aprovechaba el Agua de lluvia para riego y abastecimiento para sus poblaciones. Pero el crecimiento demográfico y el asentamiento en zonas áridas o con baja disponibilidad de Agua superficial, obligó a la especie humana a iniciar con los sistemas de captación y aprovechamiento del recurso pluvial. Respecto a la práctica mencionada, la captación y el almacenamiento de Agua de lluvia fue una de las prácticas comunes de ciertas culturas prehispánicas. Este sistema funcionaba en las faldas de la Montaña Puuc, en el Estado de Yucatán, el Agua era captada en una superficie de hasta 200 metros cuadrados y almacenada en recipientes de barro, pilas o piletas de barro, cal y canto, piedra, excavaciones en el suelo, recubiertos con piedra o argamasa, sinónimo de mortero, y estuco. También se almacenó en depósitos subterráneos como los *chultunes* o cisternas mayas; vitales para asentamientos que persisten hasta nuestros días. En relación con depósitos pluviales a cielo abierto, se destaca a los *Jagüeyes*, en especial en zonas áridas y semiáridas

con el nivel freático muy bajo o el suelo muy rocoso y dicho nivel se podría alcanzar con una excavación de pozos someros. A los Jagüeyes artificiales se les canalizaba el agua de corrientes pluviales o de escurrimientos de cerros y techos cercanos. Dentro de la misma cultura se han encontrado, en Belice y en Campeche, canales y diques poco profundos pero largos y con dimensiones de hasta 50 metros de ancho para la captación y almacenamiento de Agua pluvial; misma que sería aprovechada en riego y consumo humano.

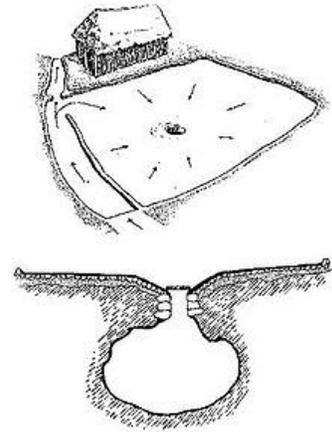
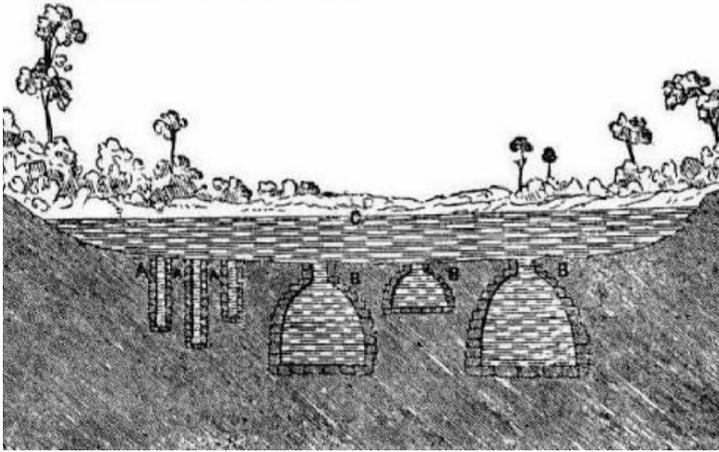


Ilustración 2 Representación de los Chultunes. Fuente: reed.edu

Dentro de la cultura Mexica, en Xochicalco, actualmente Morelos, se han encontrado sistemas de drenaje, con tuberías prefabricadas similares a las que existen actualmente en la Ciudad de México, que posterior a la captación conducían el Agua a cisternas subterráneas para utilizar el recurso pluvial durante la temporada de estiaje; ya que es una zona muy seca y no había manera de aprovecharla superficialmente.

En la actualidad la superficie de la Tierra se compone por 75% de Agua, de esta 97.5% se encuentra en mares y océanos y es Agua salada; por lo que sólo el 2.5% es Agua dulce, siendo este último el porcentaje de Agua que teóricamente podríamos consumir los humanos. Pero del recurso que es dulce el 70% es inaccesible, ya que está dispuesta en glaciares y capas polares, mientras que el 30% no es de aprovechamiento inmediato ya que se encuentra de manera subterránea; entonces solo uno de cada cien litros se encuentra directamente disponible en la superficie para consumo humano, en ríos, lagos, humedales y en la atmósfera. Y a ese uno por ciento de Agua dulce disponible hay que darle tratamiento para asegurar que sea apta para para consumo humano.



Ilustración 3 Disponibilidad de Agua en el Mundo. Elaborados con datos de las fuentes: Arreguín, 1991 y CONAGUA, 2009

### *1.1.1. Usos del Agua*

La agricultura representa aproximadamente el 70% de las extracciones de agua a nivel mundial, en su mayoría para riego. Si consideramos que para el año 2050 se estima un aumento del 60% de la demanda alimenticia, se requerirá expansión en tierras de cultivo, lo que propiciará aumento en la demanda, pero este podría evitarse si la producción agrícola se basara en tecnologías ecológicas que impliquen la optimización de los servicios ecosistémicos para reducir los insumos externos (ONU, 2018).

El uso del agua por parte de la industria representa aproximadamente el 20% de las extracciones globales. De este, el 75% es destinado únicamente a la producción de energía y el restante a producción industrial. La tendencia para la demanda de agua con fines industriales se eleva hasta casi ocho veces la demanda actual, para el periodo del 2010 al 2050. Durante el periodo ya mencionado también se espera un aumento en la demanda de agua para consumo doméstico casi en todas las regiones del mundo. Lo anterior debido al crecimiento demográfico mundial, pero con su excepción en Europa Occidental, donde el crecimiento de la población se ha detenido e inclusive en algunos casos la tendencia demográfica es decreciente (ONU, 2018).

Por lo que se espera, en general, un continuo aumento en la demanda de agua a nivel mundial durante las próximas 3 décadas. Y aunque se prevé que el aumento industrial y el doméstico crezcan con mayor velocidad, el uso agrícola seguirá siendo el de mayor consumo (Consejo Consultivo del Agua, 2017).

En México el 76% de recurso hídrico se utiliza con fines agropecuarios, pero para dicho uso el servicio es gratuito; lo que impulsa la sobreexplotación y promueve la ineficiencia de los sistemas de servicio públicos (CONAGUA, 2018).

### *1.1.2. La escasez del Agua, tendencia a nivel mundial*

El tan mencionado crecimiento de la demanda del Agua a causa del crecimiento demográfico también ha provocado que ecosistemas costeros, marinos y depósitos de agua dulce estén desapareciendo. Resultado de lo anterior es la desecación de lagos, disminución del caudal de ríos, pérdida de zonas pantanosas y extinción de flora y fauna; causando mayor frecuencia de inundaciones y la escasez de agua dulce.

Se pronóstica que la disponibilidad de los recursos hídrico-superficiales a nivel continental permanecerá relativamente constante, a diferencia del crecimiento exponencial de la población. A nivel subregional, los cambios serán pequeños, disminuyendo máximo 5%. Donde se tendrán cambios considerables será a nivel nacional; en la actualidad casi todos los países que se ubican en la franja de los 10 a 40 grados de latitud norte, desde México hasta China y el sur de Europa; junto con Australia, Sudamérica Occidental y África Meridional; se ven afectados por la poca disponibilidad de agua. Actualmente 3,600 millones de personas -casi la mitad de la población mundial- ya vive en zonas con escasez por lo menos un mes al año. Y esto podría alcanzar de 4,800 a 5,700 millones de personas para el año 2050 (ONU, 2018).

El uso del Agua subterránea a nivel mundial es principalmente para la agricultura y representa un 67% del total de las extracciones globales. La extracción de agua para regadío se ha identificado como el principal motor del agotamiento de estas y se pronostica un aumento del 39% de extracción para estos fines hacia el año 2050 (ONU, 2018).

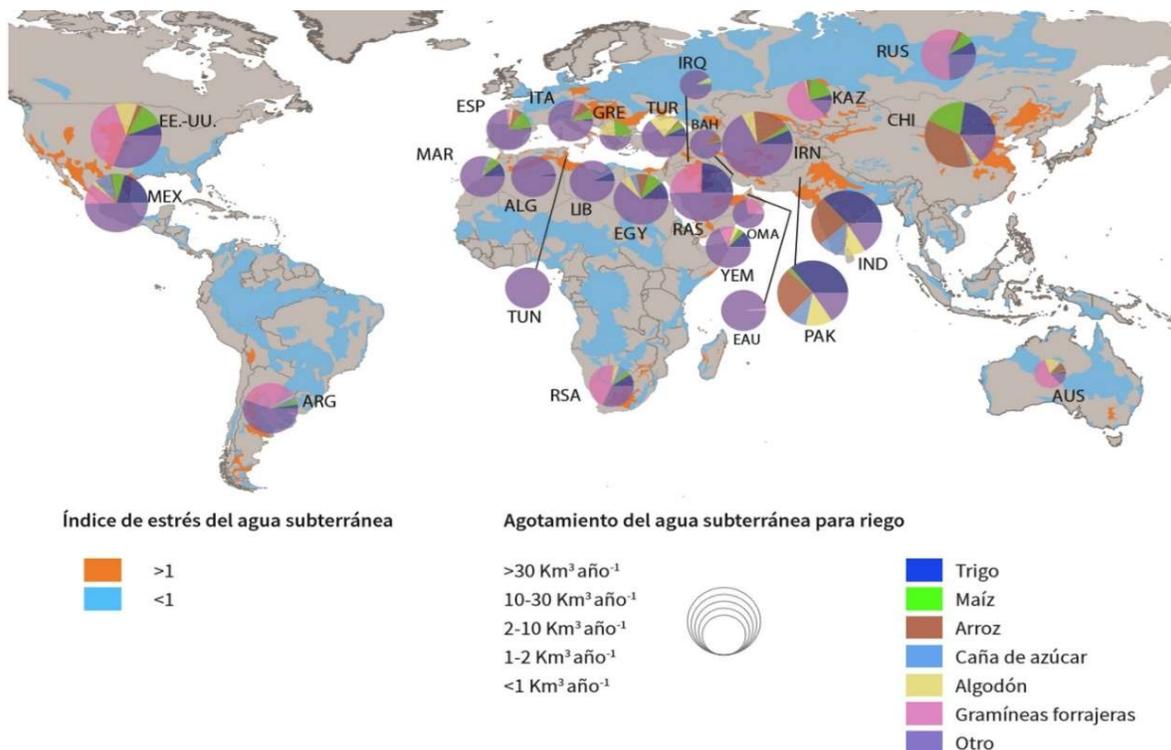


Ilustración 4 Uso de Agua en cultivos. Fuente: ONU, 2018

En los últimos siglos la humanidad ha alterado los paisajes, principalmente para la producción agrícola, originando cierta degradación en la base natural superficial; lo que conlleva a pérdida de capacidad productiva de la tierra y desertificación; que termina generando abandono de esas tierras y búsqueda de nuevos territorios donde desarrollarse.

A continuación, se representa gráficamente la extracción de Agua subterránea a nivel mundial en el año 2010, y durante el periodo del 2010 al 2050. Proyectando el escenario de explotación del recurso hídrico.

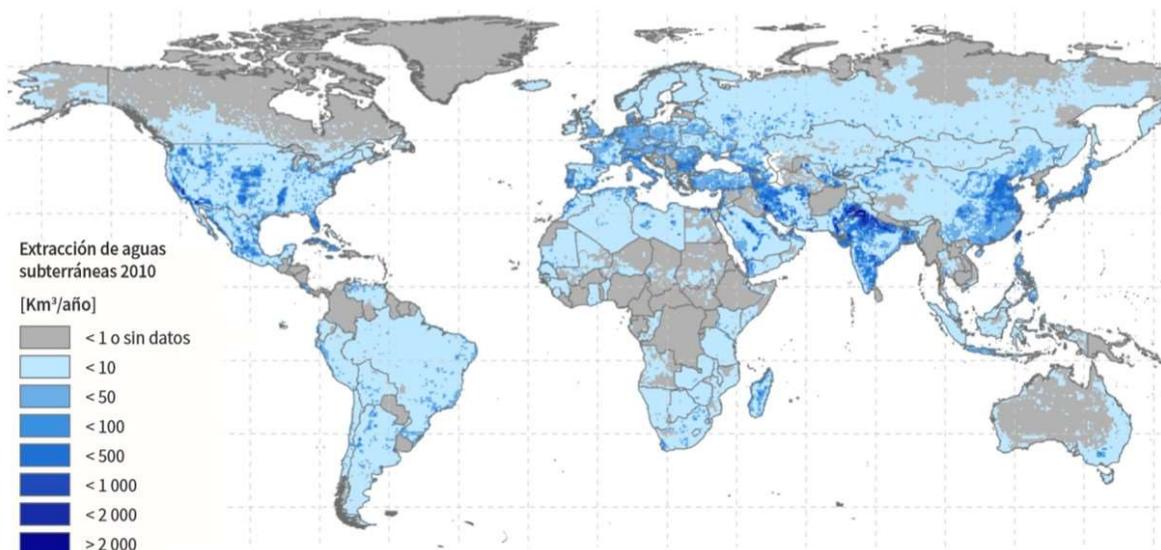


Ilustración 5 Extracción de Aguas subterráneas en 2010 en el Mundo. Fuente: ONU 2018

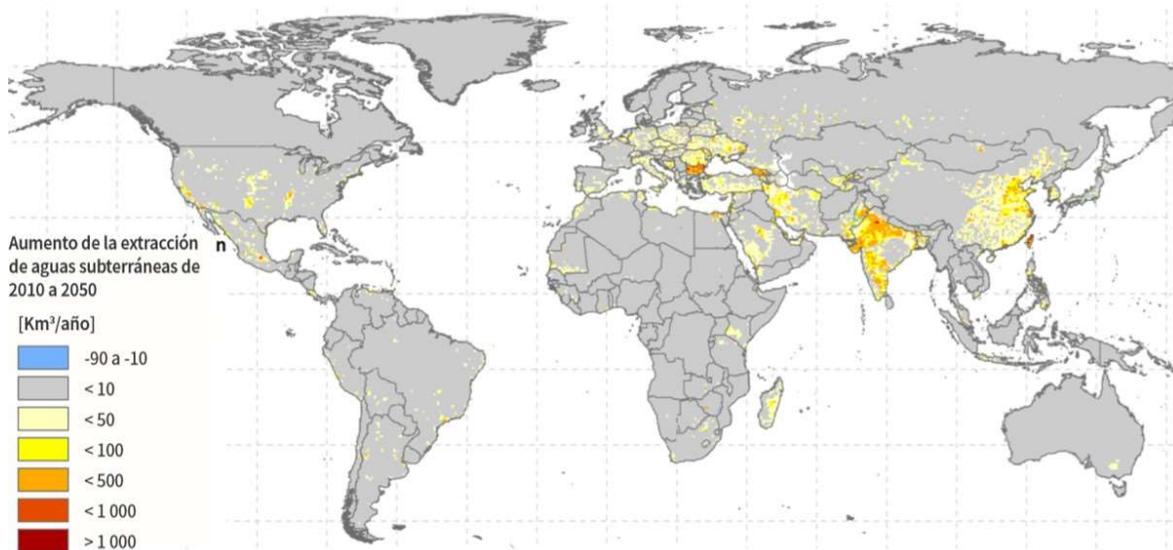


Ilustración 6 Proyección de la extracción de Aguas subterráneas del 2010 al 2050 en el Mundo. Fuente: ONU, 2018

Se considera que el agua está contaminada cuando su composición natural se encuentra alterada con materia orgánica e inorgánica como: microorganismos, químicos, metales y residuos industriales o domésticos. Dicha contaminación es consecuencia de fenómenos naturales y antropogénicos; los primeros pueden ser caso de la erosión y desprendimiento de minerales. A juicio del autor en la actualidad el peor enemigo del ambiente es la especie humana: su crecimiento demográfico exponencial genera un aumento día con día de la demanda del recurso hídrico; el desarrollo tecnológico, lejos de implementar soluciones para disminuir la demanda, solo propicia mayor explotación de cuerpos superficiales y subterráneos, así como la contaminación de los mismos.

A nivel mundial, uno de los grandes desafíos con relación a la calidad del agua es el contenido de nutrientes, asociado con la carga de patógenos en el Agua. Potenciado principalmente por la descarga de agua residuales puntuales sin tratamiento, la esorrentía de nutrientes provenientes del uso excesivo en la agricultura; esta última es la fuente principal de nitrógeno y fósforo que se vierte al medio ambiente. Junto con los nutrientes, la agricultura incrementa el uso de productos químicos, como: insecticidas, fungicidas y herbicidas; los cuales terminan contaminando el recurso hídrico.

El aumento de los niveles de salinidad y el aumento de las temperaturas del agua y el aire también pueden tener impactos significativos. Junto con la pérdida global de humedales de Agua dulce, ya que tienen gran capacidad para filtrar y mejorar la calidad del agua, es motivo de particular preocupación; se estima que entre el 64% y el 71% de la extensión de humedales se ha perdido desde 1900 (ONU, 2018).

De acuerdo con publicaciones de la OMS se redactan las siguientes aseveraciones:

1. Para el año 2025, poco más de la mitad de la población mundial vivirá en zonas con escasez de agua. En India, la mayoría de su población dejará de recibir agua, de los 2700 pozos existentes, 2300 se habrán secado para esas fechas.
2. El agua contaminada puede transmitir enfermedades como la diarrea, el cólera, la disentería, la fiebre tifoidea y la poliomielitis. Se calcula que la contaminación de agua potable provoca más de 800 000 muertes solo por diarrea al año (en su mayoría en niños menores de 5 años). Y el consumo de agua contaminada en países subdesarrollados es la causa del 85% de las enfermedades y de más de 33% de las muertes.
3. Asimismo, en países subdesarrollados, el 38% de los centros sanitarios carecen de fuentes de agua, el 19% de saneamiento eficiente y el 35% de agua y jabón para lavarse las manos.

Por otra parte, el cambio climático afecta la calidad del agua en ciertas maneras, como lo es el cambio en los patrones de precipitación; disminuye el caudal de ríos o el volumen en los cuerpos de agua exteriores y por tanto los efectos de dilución; sumándole el aumento de temperatura, que provoca mayor evaporación de aguas superficiales y de los suelos. La tendencia marca que los mayores aumentos de contaminantes ocurrirán en países subdesarrollados, debido al gran incremento continuo de su población y a la falta de gestión de aguas residuales.

## 1.2. El Agua en México

### 1.2.1. Disponibilidad de Agua en México

Es una realidad que la distribución geográfica del Agua en México no coincide con la distribución de la población. Estadísticamente el volumen de Agua renovable per cápita es de 4,028 metros cúbicos por habitante por año. Sin embargo, existen grandes diferencias entre sur y norte del país. Se pueden encontrar zonas con escasez de Agua y en contraste regiones con alta frecuencia de actividad hidrometeorológica, lo que genera grandes inundaciones y pérdidas humanas y económicas. En números esto se resume a que en el centro y norte del país se concentra el 27% de la población, que genera 79% del PIB y cuenta con sólo 32% del Agua; y en la zona sur, donde existe el 68% de Agua, reside sólo el 23% de la población, que a su vez genera el 21% del PIB.

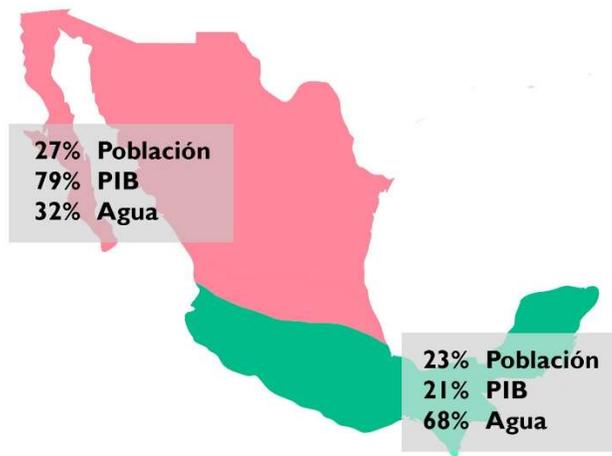


Ilustración 7 Comparación de la población con el PIB producido y el Agua disponible en México. Elaboración propia

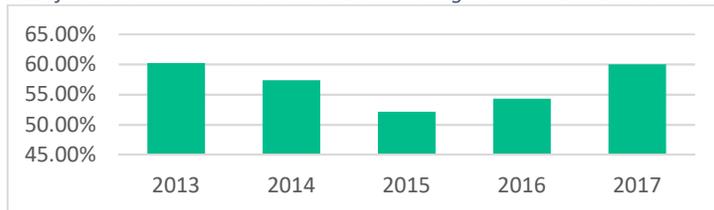
A pesar de la “mala” distribución ya mencionada, la cobertura nacional es “buena”. Se cubre el 95% en zonas urbanas y el 78% de zonas rurales (localidades menores a 2,500 habitantes). Oficialmente en México el 92% de la población tiene acceso al servicio público de Agua potable, pero dicha estadística se ve mermada al considerar la deficiente calidad de entrega de dicho recurso, que en conjunto con la mala calidad del agua en las fuentes, limita el aprovechamiento de recurso hídrico en el país, lo cual se refleja en las siguientes cifras:

- 22.7% del Agua superficial se encuentra contaminada;
- 33.2% del Agua superficial tiene calidad aceptable;
- 44.1% del Agua superficial se observa con calidad buena o excelente.

En conjunto con la contaminación del recurso hídrico, se espera un futuro previsible de agotamiento, ya que actualmente de los 653 acuíferos existentes, 106 se encuentran sobreexplotados. Si además se incluye, que, en su gran mayoría, los organismos operadores de sistemas de Agua para servicio público son: ineficientes, trabajan bajo tintes políticos, no están debidamente profesionalizados y no son transparentes en sus procesos económico y administrativos, el panorama se torna aún más desfavorable si contemplamos la falta de educación de los ciudadanos para el cuidado y el poco

compromiso con el pago de los servicios públicos. Lo anterior genera un mal servicio, poco o nulo mantenimiento y falta de capacitación de los operadores. Todo esto se puede fundamentar cuantitativamente con la cantidad de pérdida de Agua por fugas en redes de distribución y en tomas domiciliarias; lo cual presente un valor promedio a nivel nacional de 40% de pérdidas en nuestros sistemas (PIGOO, 2018). Según Forbes (2018), en la Ciudad de México, uno de cada cinco personas no cuenta con agua corriente en sus hogares, por lo que reciben Agua solo un par de horas al día, y muchas ocasiones el líquido que sale del grifo es un fango inútil.

Gráfico No. 1 Eficiencia en el sistema de suministro de Agua en la CDMX. Fuente: PIGOO, 2018



La principal fuente de abastecimiento proviene de bombeo desde cuencas vecinas al poniente de la ciudad, recorriendo más de 10 kilómetros y superando los 1000 metros de diferencia de altura. Se estima que las zonas ubicadas al poniente de la urbe reciben el líquido con presión y calidad adecuada, pero las delegaciones del lado oriente y las zonas altas de la ciudad son las afectadas con un 20% de deficiente abastecimiento. Lo anterior causa que los habitantes de las delegaciones afectadas tengan que buscar alternativas para conseguir recurso potable. La más práctica y recurrida es el suministro con pipas, pero eso genera que los más necesitados y con menos recursos económicos terminen pagando más que los habitantes con mayor capacidad económica.

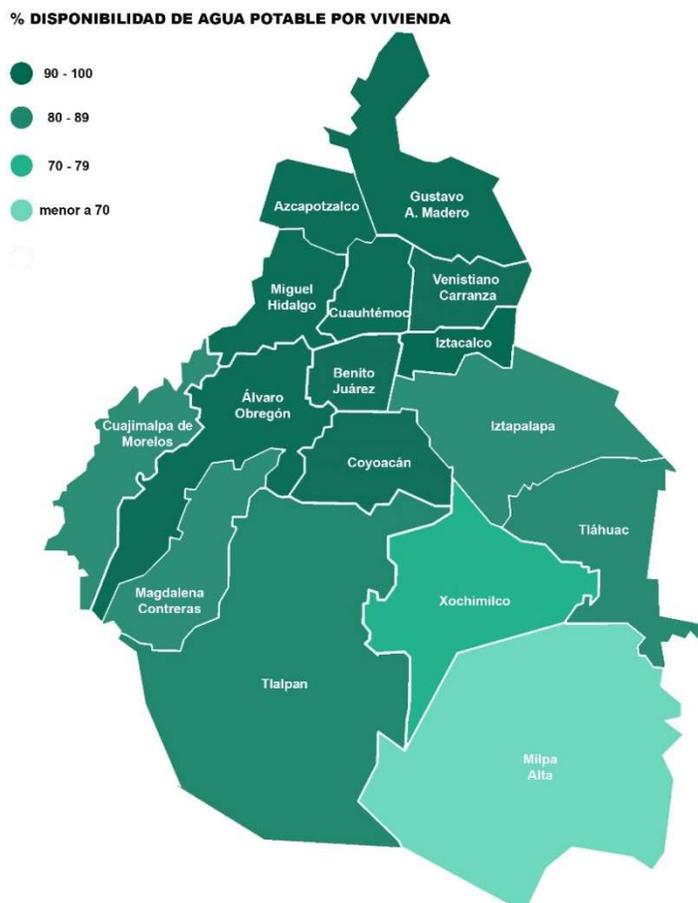


Ilustración 8 Disponibilidad de Agua en la CDMX. Elaboración propia con datos de INEGI, 2015

Actualmente, la entrega de Agua potable mediante la red de distribución se hace de manera ininterrumpida a la mayoría de la población que habita dentro del centro y la zona poniente de la ciudad. Sin embargo, en colonias de las alcaldías de Iztacalco, Iztapalapa, Tláhuac y Milpa Alta, además de las zonas altas de Xochimilco, Tlalpan y la Magdalena Contreras, el abastecimiento del recurso potable es discontinuo (en algunos casos solo les llega servicio una o dos veces por semana), razón por la cual los habitantes están en una búsqueda constante de alternativas para contar con el recurso. Una de las estrategias más recurridas es el aprovechamiento pluvial, sin embargo, suele suceder que en estos casos el máximo tratamiento alcanzado es el de la separación de primeras lluvias e inmediatamente se almacenan para su uso. Lo anterior es riesgoso desde el punto de vista sanitario, ya que podría conllevar epidemias o pandemias.

### 1.2.2. Consumo de Agua en México

El uso del agua se divide en dos grandes grupos: los de uso *consuntivo*, referidos aquellos en que hay consumo y, por lo tanto, existe diferencia entre el volumen de agua extraído y el descargado; y el uso *no consuntivo*, en el que la actividad no modifica el volumen captado con respecto al descargado. Dentro de los usos consuntivos se agrupan los destinados a abastecimiento público, uso agrícola, para generación eléctrica y en uso industrial. En México el volumen concesionado para el 2015, según el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), estuvo distribuido primordialmente para el uso agrícola con 65,359 hm<sup>3</sup> al año, seguido por el abastecimiento público con 12,480 hm<sup>3</sup>, más 3,676 hm<sup>3</sup> destinados para uso industrial y 4,149 hm<sup>3</sup> para generación eléctrica, este último sin considerar el Agua destinada para las hidroeléctricas, únicamente en este último uso se consumen más de 180 mil hectómetros cúbicos de Agua. El uso consuntivo queda distribuido como se muestra en la siguiente ilustración.

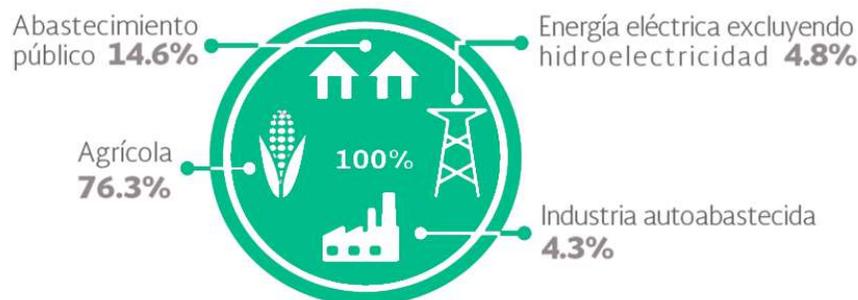


Ilustración 9 Uso consuntivo agrupado. Fuente: CONAGUA, 2016

Hasta el 2016 el volumen concesionado para usos consuntivos proviene de fuentes superficiales y subterráneas, la primera de estas con un 61.1% y la segunda con 38.9%; según el Registro público de derechos del Agua (CONAGUA, 2016).

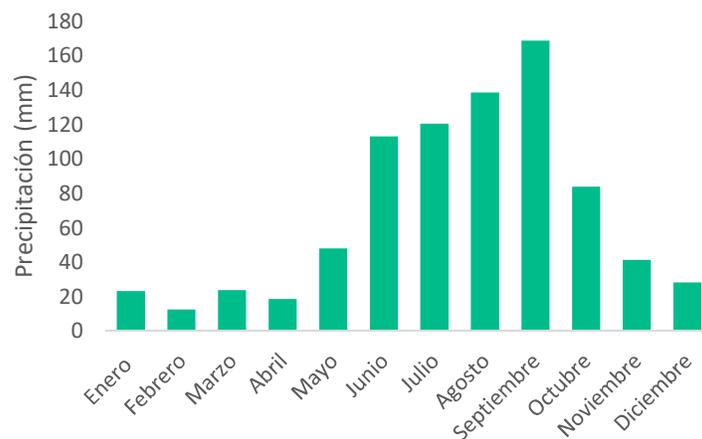
### 1.3. Agua en el Valle de México

El tema del agua ha ocupado siempre un papel central en la historia de la Ciudad de México y hoy más que nunca representa un desafío para su funcionamiento presente y desarrollo futuro. Además de los graves rezagos en infraestructura, deterioro en la calidad de los servicios y aumento de los costos económicos y ambientales que representan el funcionamiento del sistema de agua y drenaje, en los últimos 10 años se han incrementado los conflictos de orden institucional, político y social entre los distintos actores que conforman el sistema. Se observa con preocupación una tendencia al aumento de las pugnas y una disminución en las relaciones y acciones de colaboración. Esta situación tiene que ver, en gran medida, con la existencia de un modelo hidráulico basado en la importación y transferencia injusta y desigual de grandes caudales de agua para las distintas regiones, el cual ha llegado a sus límites y ha provocado la formación de una vasta región hidráulica cuya gestión se

organizó para una realidad que ha sido completamente rebasada. Este núcleo de problemas se expresa con particular fuerza al analizar las relaciones institucionales entre los gobiernos del Distrito Federal y del Estado de México” (Perló Cohen, 2005).

El clima del Valle de México se puede clasificar como subtropical de altura, templado, semiseco, con un invierno no bien definido. La temperatura media es de 20°C y el periodo de lluvias comprende de mayo a octubre, el resto de los meses estas son muy esporádicas (Gráfico No. 1). La precipitación media anual es de 700 mm, distribuida irregularmente en el valle. Dicha precipitación anual tiene gran influencia topográfica y aumenta con la elevación, incrementándose del noroeste al suroeste. Debido a esto las laderas más bajas son más secas que las cumbres de las montañas y esto se puede observar en la vegetación propia del lugar (Academia de la Investigación Científica AC, 1995).

**Gráfico No. 2** Distribución Mensual de la Lluvia



*Fuente: Sistema meteorológico nacional, 2018*

El recurso hídrico en la Ciudad de México y la zona metropolitana tiene dos problemáticas, por una parte, la precipitación mal gestionada genera inundaciones y daños periódicos en ciertas zonas y, por otro lado implica una superficie con baja disponibilidad.

La CDMX se encuentra en una cuenca cerrada, también denominada cuenca endorreica; con aproximadamente 9600 kilómetros cuadrados, de los cuales 1600 son mancha urbana, rodeada de sierras, montañas y volcanes, como el Popocatepetl, el Iztaccíhuatl, el Ajusco, La Sierra de las Cruces, la Sierra Nevada y el Eje Neovolcánico Transmexicano. Previo al desarrollo urbano moderno poseía sobre su superficie cinco grandes lagos: Xochimilco, Texcoco, Chalco, San Cristóbal-Xaltocán y Zumpango, alimentados por 48 ríos, en su mayoría corrientes efímeras salvo Río Magdalena, Río Mixcoac, Río Churubusco, Tacubaya, Hondo y Tlalnepantla, los cuales en la actualidad forman parte del sistema de drenaje de la ciudad y se encuentran confinados. Con el paso del tiempo la cuenca se transformó a una artificialmente endorreica, al entubar algunos ríos y expulsar el agua de los mismos junto con el agua del drenaje de la Ciudad de México hacia el norte.

Además de riqueza lacustre de la cuenca derivada de sus lagunas y ríos, habrá que agregar que es uno de los territorios del planeta donde más llueve; en promedio seis meses al año (de mayo a octubre), con una precipitación pluvial de 5380 a 6050 millones de metros cúbicos al año, aunque la mayor parte, alrededor del 75 por ciento, se evapora; se infiltran aproximadamente 780 millones de metros cúbicos y se consumen alrededor de 300. La precipitación media anual de las aguas pluviales que caen sobre la cuenca es de 670 mm, considerada de las más elevadas del mundo” (Legorreta, 2006).

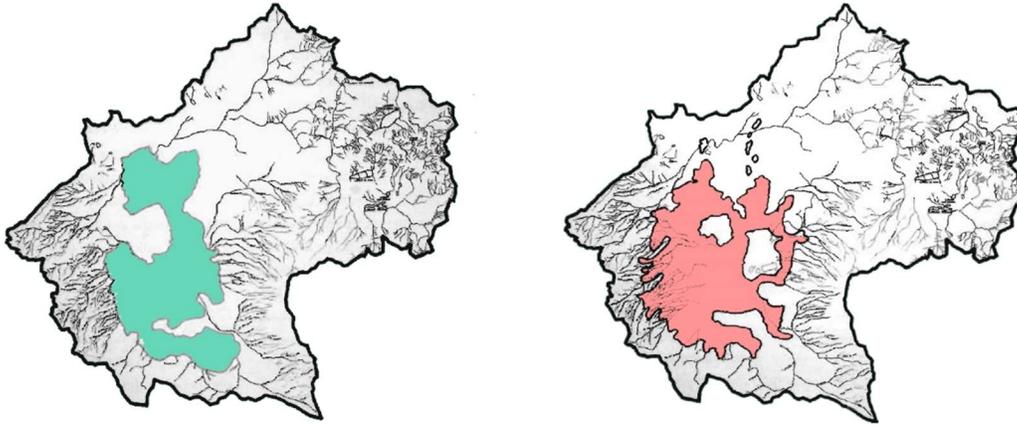


Ilustración 10 Comparación de la superficie de la Cuenca del Valle de México en 1519 (lado izquierdo) con 1100 m2 de Agua (color azul) y la misma en 2006 con 1600 m2 de mancha urbana (Color rojo). Fuente: Legorreta, 2006

### 1.3.1. Balance hídrico

Originalmente la Cuenca del Valle de México, era una cuenca endorreica. Hoy en día para satisfacer la demanda por parte de la población, en cuando a abastecimiento y desagüe, se ha obligado a tener una cuenca exorreica. Con dos entradas principales; una subterránea, explotada en su cuenca misma y otro porcentaje de la Cuenca de Lerma; y el suministro superficial, tomado principalmente de la cuenca del Cutzamala. La salida del recurso es hacia el norte de la región con destino a la Cuenca de Tula, tal como se representa en la ilustración 11.



Ilustración 11 Sistema de Abastecimiento y de Drenaje para el Valle de México. Fuente: Aguirre, 2012

Para atender la demanda de Agua potable en la Ciudad de México y la zona metropolitana se le abastece por diferentes medios: el 68% por fuentes subterráneas, del acuífero del Valle de México; 5% se obtiene del Sistema Lerma (ubicado en el Estado de México a 70 kilómetros de la Ciudad de México); 17% se obtiene del sistema Cutzamala (ubicado entre el Estado de México y Michoacán, a 124 kilómetros de la gran Ciudad), 3% de manantiales ubicados en la Zona sur-poniente de la Ciudad de México y el 7% restante de reúso del Agua (CONAGUA, 2017).

El sistema Lerma inició su construcción en 1951 para abastecer la cuenca del Valle de México, siendo la primera obra para suministro de Agua potable desde una cuenca vecina. Se incluyen: captación de Agua superficiales en Almoloya del Río, Texcaltenango y Alta Empresa, cajas empotradas en las rocas de Ameyalco, y captación de Agua subterráneas mediante una galería filtrante en la ladera de una laguna en Almoloya y 5 pozos con profundidades entre 50 y 308 metros. Distribuye el Agua hasta el México por un acueducto de 2.5 metros de diámetro y 62 kilómetros de longitud, diseñado para llevar 15 metros cúbicos por segundo. Actualmente se ha disminuido el caudal pico a 5 metros cúbicos por segundo debido a hundimientos derivados por la explotación de Agua subterránea (Aguirre, 2012).

El incremento de la mancha urbana y el objetivo de disminuir la explotación de Agua subterránea llevó al diseño y construcción de otro sistema de abastecimiento de Agua para el Valle de México desde una cuenca vecina: el sistema Cutzamala. Uno de los grandes retos para este proyecto de Ingeniería Civil fue el bombeo del líquido para superar el cambio de la altura desde 1,600 metros sobre el nivel del mar, hasta los 2,702 metros sobre el nivel del mar en su punto más alto, durante un recorrido de 127 kilómetros; desde Michoacán hasta la Ciudad de México. Integrado por siete presas derivadoras y de almacenamiento. Hoy en día el caudal máximo que entrega el sistema es de 15 metros cúbicos de agua por segundo, pese estar diseñado para abastecer 20 m<sup>3</sup>/s (Burns, 2009).

El abastecimiento del Agua al Valle de México es dependiente de la extracción de agua subterránea por medio de los pozos. Actualmente esta actividad involucra una sobreexplotación de los acuíferos, en un grado de hasta tres veces mayor la extracción que la recarga. Según registros de hace diez años, el volumen extraído era de 59,5 metros cúbicos por segundo y el de recarga sólo alcanzaba hasta 19 metros cúbicos por segundo. Estas acciones han ocasionado el hundimiento diferencial en la cuenca (Burns, 2009).

El desagüe de Aguas residuales de la cuenca del Valle de México, ha sido un trabajo constante desde la época de la Colonia. Se inició con el Túnel de Huehuetoca junto con el Tajo de Nochistongo (1607) y el Gran canal del Desagüe (1900). Pero con la creciente urbanización, se ha visto superada la capacidad de exportación de agua de la cuenca, por lo que en el siglo pasado se inició el proyecto del drenaje profundo, obra maestra que debería resolver el desagüe con un gran periodo de vida útil, este último consiste en un sistema de emisores: emisor poniente, emisor central, túnel emisor oriente y el gran canal de desagüe. Actualmente todos operan menos el túnel emisor oriente, que está en construcción desde el 2008. Exportan 32 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales más 20 m<sup>3</sup>/s de Agua de lluvia captada en la ciudad hacia Cuenca de Tula (Burns, 2009).

Se entiende como balance hídrico la relación de volumen o porcentaje de agua que ingresa a cierta región en contraste con lo que se extrae o se aprovecha, para el de la ciudad de México se expresa en la ilustración 12. Las fuentes de ingreso más aprovechadas son el sistema Cutzamala (15m<sup>3</sup>/s) y la extracción de agua del acuífero (59 m<sup>3</sup>/s), de la cual solo el 32% es de extracción sostenible. Del agua de lluvia que precipita durante el año, el 74% se evapora para volver a condensar y el resto es aprovechado para riego, recolectado y transportado hacia Tula o se infiltra al subsuelo. Podemos concluir con la siguiente imagen que del total de agua que ingresa a la cuenca del valle de México, se consume un 20% de recurso y solo el 80 tiene un destino para darle tratamiento y poderse reutilizar como agua tratada (CONAGUA, 2017; Domínguez, 2011 Y Burns, 2009).

## BALANCE HÍDRICO, CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO

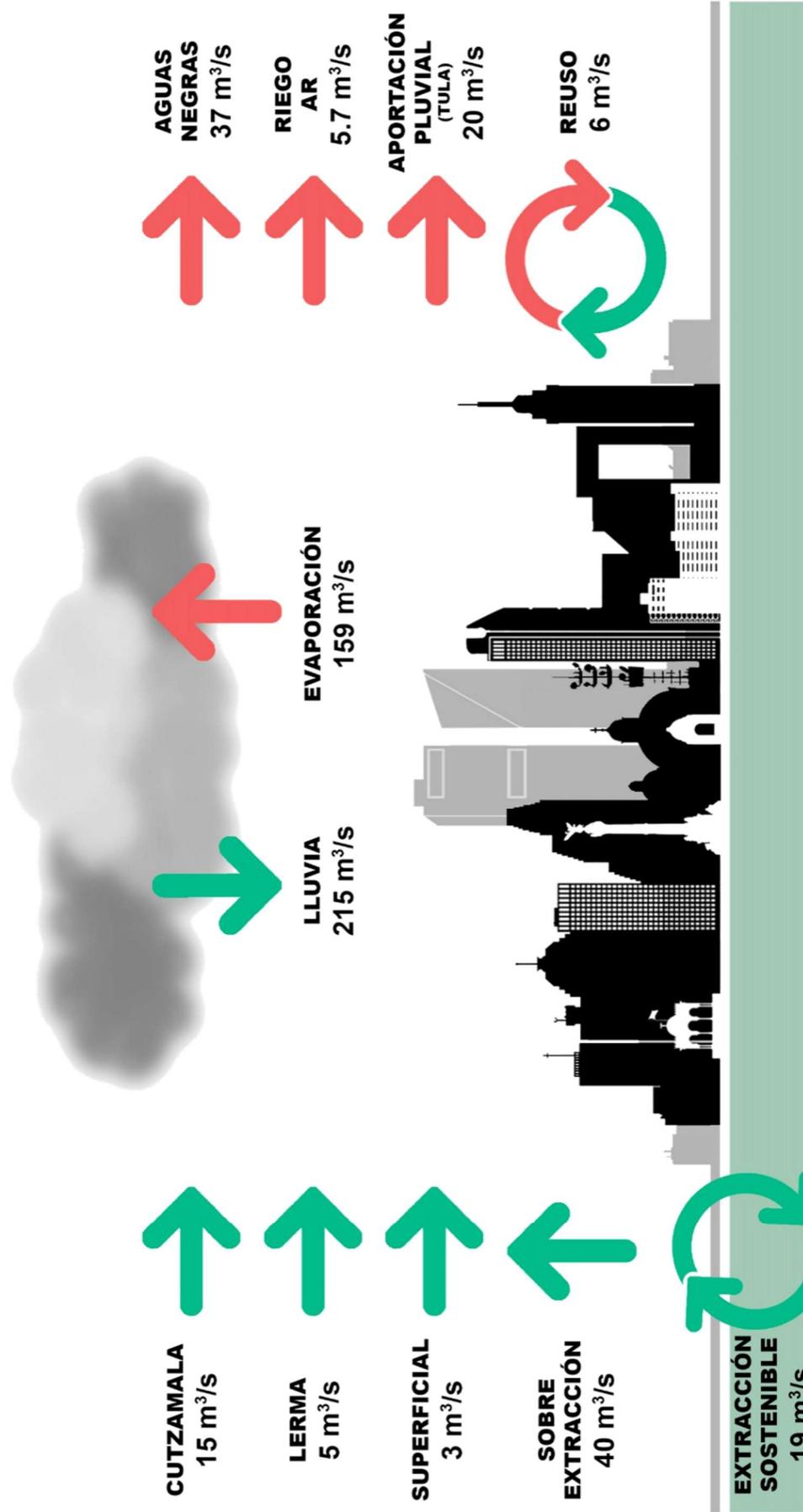
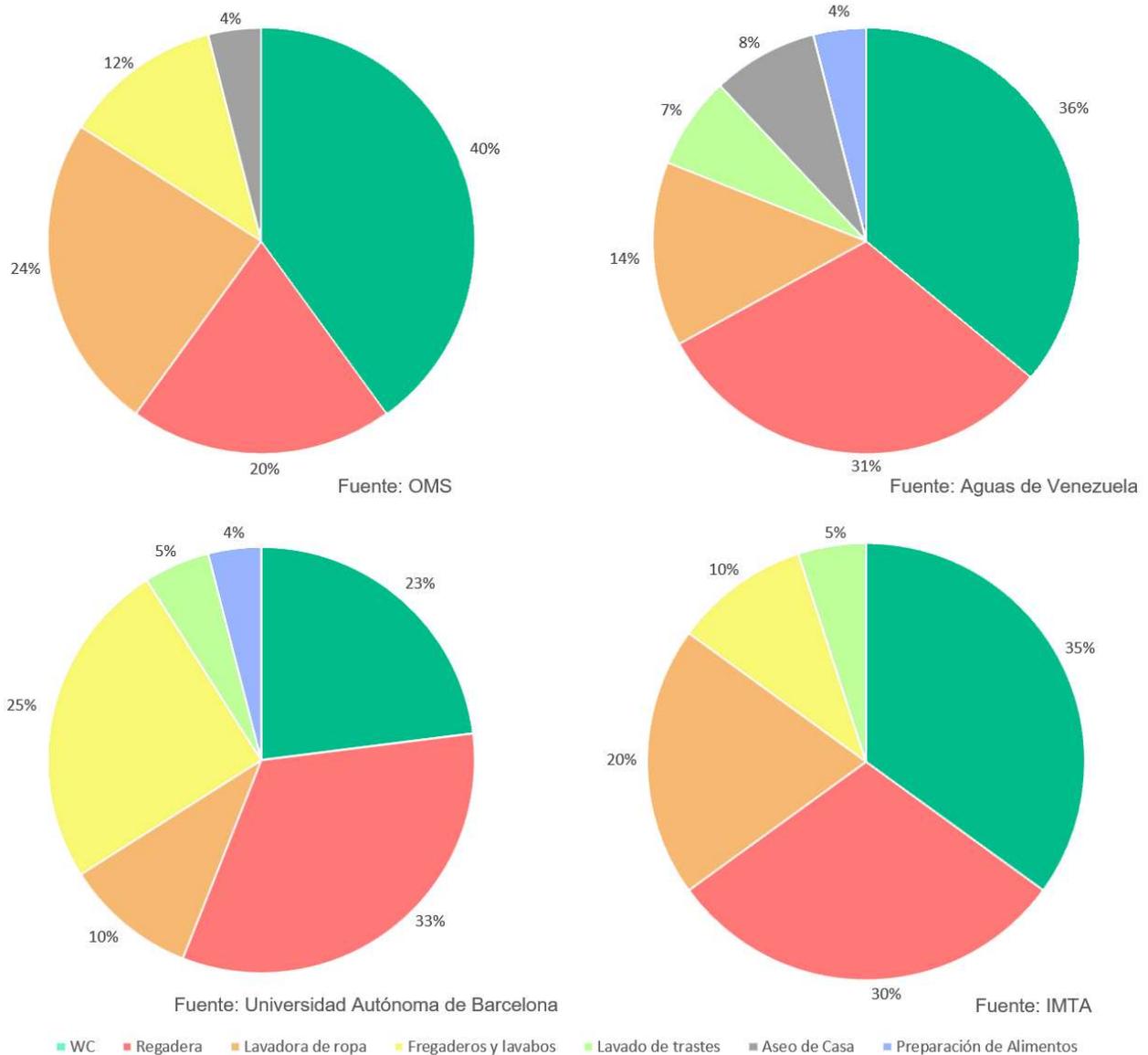


Ilustración 12 Balance Hídrico, Cuenca del Valle de México. Elaborado con datos de las Fuentes: CONAGUA, 2017; Domínguez, 2011 y Burns, 2009

### 1.3.2. Consumo habitacional

Se conoce como consumo a la cantidad de Agua que utilizan los usuarios. El consumo varía dependiendo de la zona, si es rural o urbana, el clima, las condiciones hidrológicas y climatológicas, costumbres locales, la actividad de los usuarios y su nivel socioeconómico. Dentro del consumo habitacional, se le da diferentes usos al Agua. En su mayoría se ocupa para aseo personal, en específico el uso del WC y en la regadera; seguido del lavado de ropa y el uso en lavabos y fregaderos; el uso menor es en la cocina, para lavado de trastes y preparación de alimentos, junto con la limpieza de la casa. Lo anterior se representa con porcentajes, según 4 fuentes en la siguiente gráfica.

Ilustración 14 Consumo doméstico de Agua



Con base en la información anterior, se concluyó en un esquema resumen, donde se muestran las principales actividades realizadas con el Agua dentro de una casa habitación. Para este se promedió el uso de cada destino y se considera como uso de lavabos el de tarja, fregaderos, lavado de trastes y los propios lavabos. Se observa como principal uso en el baño: 30 por ciento al WC y 28 a la consumida en la regadera; la tercera actividad con mayor consumo es la lavadora; y las actividades como el aseo de la casa y la preparación de alimentos son las que menos Agua consumen.

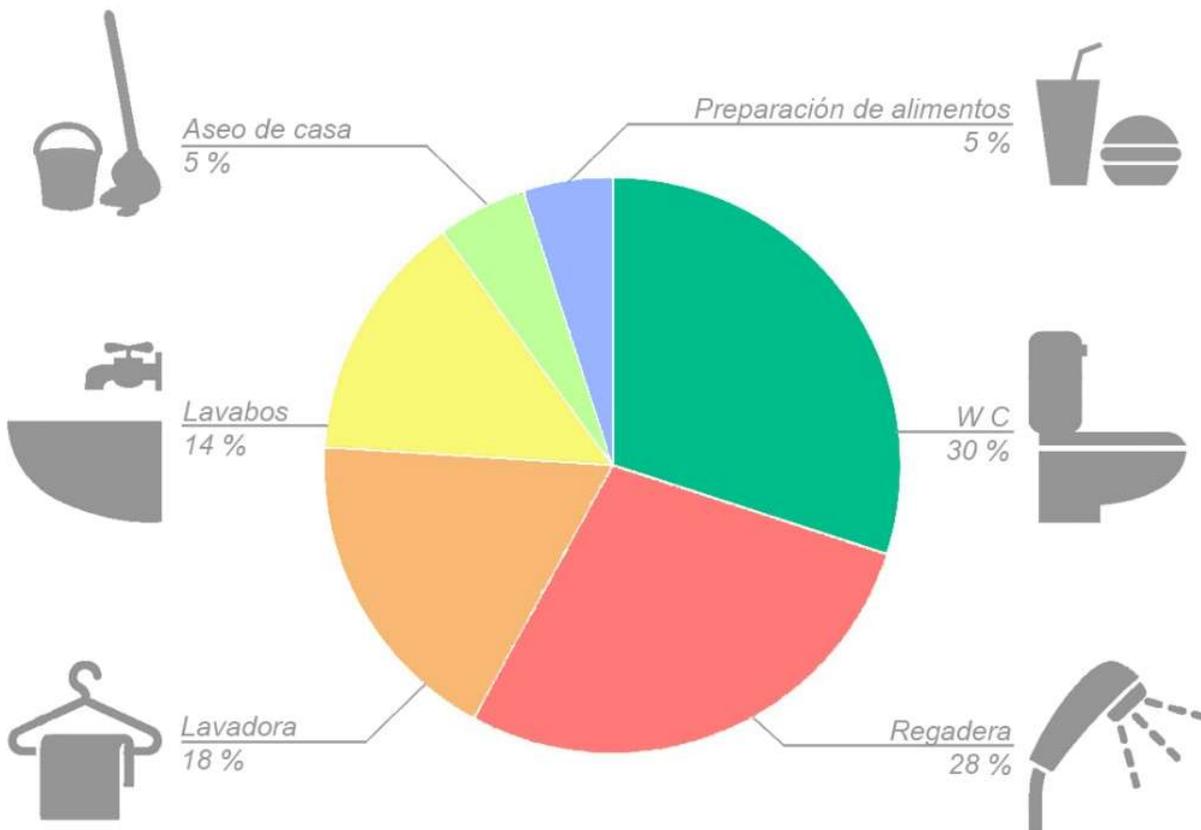


Ilustración 15 Consumo habitacional resumen

El uso directo al que se puede destinar el Agua pluvial sin tratamiento es el riego, limpieza de áreas exteriores y en el WC. Para darle los otros usos, es necesario mejorar la calidad del agua para evitar enfermedades. Para las actividades que se llevan a cabo en casa, tanto de contacto como para el consumo humano, se deben cumplir los límites máximos que se especifican en la NOM-127-SSA1-2000, mismos que se indican de la tabla número 4 a 6, del capítulo 2 Marco Jurídico.

Si sólo involucra contacto humano será necesario remover partículas suspendidas y disueltas, metales pesados y neutralizar el Agua, para no ocasionar reacciones químicas con los productos de limpieza o perjudicar los objetos que serán aseados. Pero para el consumo humano es importante cumplir la normatividad.

Tabla 1 Usos domésticos del Agua. Fuente: García, 2012

<b>Clasificación</b>	<b>Usos</b>	<b>Calidad que se requiere según el Uso, con base en la NOM-127-SSA1-1994</b>	<b>Tratamiento</b>
<i>Primario</i>	Lavado de ropa WC Limpieza del hogar Limpieza del auto Jardinería	Turbiedad: 5 UTN Color verdadero: 20 UCV Características Organolépticas: Aceptables	Separación de primeras lluvias, Cribado/Filtración, Sedimentación, Conservación
<i>Secundario</i>	Ducha Higiene Personal Lavado de trastes	Además de las anteriores, pH: 6.5 - 8.5 Coliformes Totales: ND Coliformes Fecales: ND	Además de las anteriores, eliminación de coliformes, filtración menor a 50 micrómetros, remoción de contaminantes orgánicos.
<i>Terciario</i>	Agua para beber y cocinar	No debe de superar ningún parámetro establecido en la norma	Además de las anteriores, filtración menor a 10 micrómetros, remoción de metales pesados, remoción de contaminantes orgánicos y purificación.

Para el aprovechamiento pluvial el porcentaje de uso está en función de su calidad y nivel de tratamiento. En uso primario se aprovecharía el 35% del recurso cosechado; para darle uso secundario el 95% del Agua captada y sólo en caso de querer llegar a nivel terciario, cumpliendo los tratamientos necesarios y la calidad establecida en la norma, se podría aprovechar el total del volumen captado.

## 1.4. La vivienda de la Ciudad de México

Hoy en día el tema de la vivienda en México es motivo de controversia y polémica en los ámbitos sociales, políticos y económicos del país. Dada la dinámica demográfica de la región y la falta de planeación, los servicios son cada vez más limitados y, junto a eso, la demanda de vivienda también aumenta. Cabe mencionar que desde el momento en que evolucionamos a consecuencia del establecimiento de nuestra especie en aglomeraciones y con el fin de obtener refugio y descanso surgió la necesidad de vivienda, y con ello la consecuente explotación de los recursos existentes. Por ello es obligación para los futuros ingenieros civiles explorar y desarrollar vivienda respetando y cuidando los ecosistemas, es decir, implementar soluciones o tecnologías incluyentes con la sociedad y el medio ambiente. Se podrían aprovechar tecnologías sustentables y ecotecnias<sup>1</sup> existentes, hoy en día estas suelen ser muy costosas por lo que se debe de proponer método y productos manufacturados con el objetivo de abaratar dichas soluciones y materiales, volviéndose más accesible para los usuarios y así lograr beneficiar más gente y al micro-ecosistema de la ciudad de México, disminuyendo la sobreexplotación del acuífero.

Como se puede observar en la ilustración 16, la comparativa de disponibilidad de Agua por alcaldías en la Ciudad de México se podría asociar con el nivel socioeconómico de la misma. La ilustración 17 expresa los rangos de pobreza patrimonial por alcaldía, la cual se define como la incapacidad para adquirir o sustentar su alimento, educación, transporte y salud (Centro de Estudio de las Finanzas Públicas, 2009).

En complemento al párrafo anterior, las ilustraciones 17 y 18, muestran el porcentaje de ingresos por persona en cada alcaldía. Como se observa, las alcaldías con menor disponibilidad de Agua distribuida por la red son las mismas que tienen los menores ingresos o que no tienen ingreso alguno. Las alcaldías con mayor población que reciben menos de un salario mínimo, son: Milpa Alta, Tláhuac y Venustiano Carranza; en las que reciben ingresos mayores a cinco salarios mínimos, en mayor medida: Cuajimalpa, Miguel Hidalgo y Benito Juárez y en menor Xochimilco, Tláhuac, Iztapalapa, Venustiano Carranza y Gustavo A. Madero. Con lo anterior se puede definir que las regiones que necesitan con mayor urgencia el implementar sistemas de aprovechamiento pluvial, que son las alcaldías con menor disponibilidad de Agua, son las mismas que *per cápita* reciben menos de un salario mínimo, es decir: Milpa Alta, Xochimilco, Tláhuac, Iztapalapa; y las zonas altas de Tlalpan y la Magdalena Contreras. Pero de forma general como ciudad o como zona metropolitana, se necesita empezar a implementar los sistemas de aprovechamiento pluvial, lo que permitirá disminuir la explotación de aguas subterráneas y el trasvase entre cuencas.

Actualmente existen en el mercado sistemas de aprovechamiento y tratamiento de agua pluvial. Muchos de estos son poco asequibles, lo que podría incidir en la decisión de los ciudadanos de preferir invertir ese dinero en otros aspectos, p. ej. en acabados lujosos de su vivienda, más que en soluciones sustentables. Por ello, es deseable considerar a la asequibilidad como criterio para el desarrollo de estos sistemas, a la par de concientizar a la ciudadanía del impacto de su aplicación.

<sup>1</sup>Todo aquel emprendimiento [plan, acción, actividad] técnico que tenga como objetivo reducir, reciclar y reutilizar sin crear dependencia tecnológica o económica; que sea fácil de apropiar, que fomente la emancipación, que sea de baja o muy baja tecnología, que este dirigido a los estratos sociales más vulnerables, que ahorre recursos de cualquier índole, incluyendo los económicos (Montiel, 2011)

### % DISPONIBILIDAD DE AGUA POTABLE POR VIVIENDA

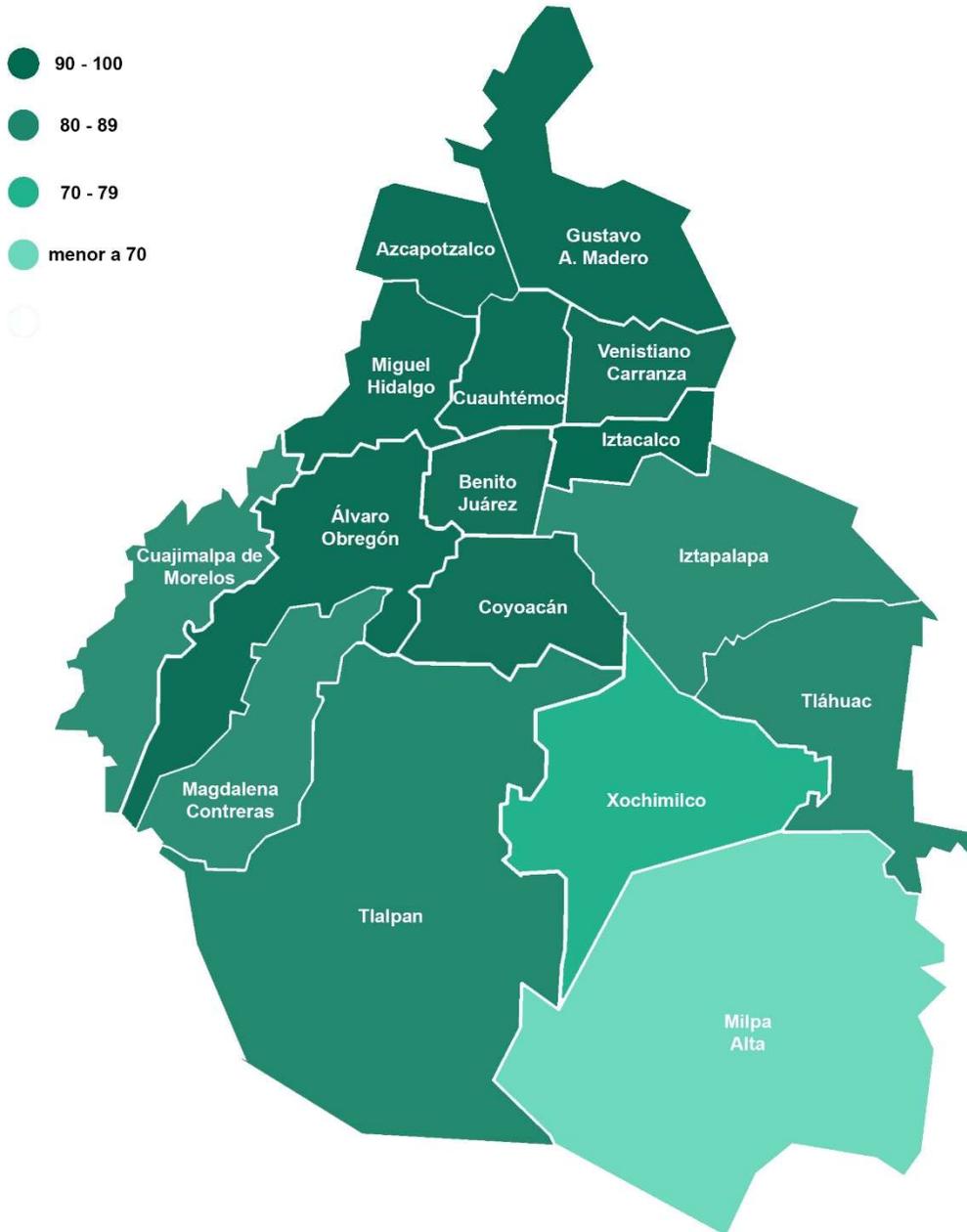


Ilustración 16 Disponibilidad de Agua en la CDMX. Elaboración propia con datos de INEGI, 2015

Elaborada con datos de INEGI (2015), la disponibilidad de agua potable por alcaldía está calculado como el porcentaje de la relación que existe entre el número de viviendas particulares a las que reciben agua potable (no hace diferencia por la regularidad con la que les llega el servicio) y el número total de viviendas particulares habitadas (solo se consideran las establecidas, no se toman en cuenta las de tipo local, refugio, móviles o improvisadas). Como se menciona este indicador no diferencia si la disponibilidad del servicio es intermitente o constante; y aún así ya se destaca Xochimilco y Milpa Alta como las alcaldías con menor abastecimiento de agua potable (INEGI,2015).

### % POBREZA PATRIMONIAL

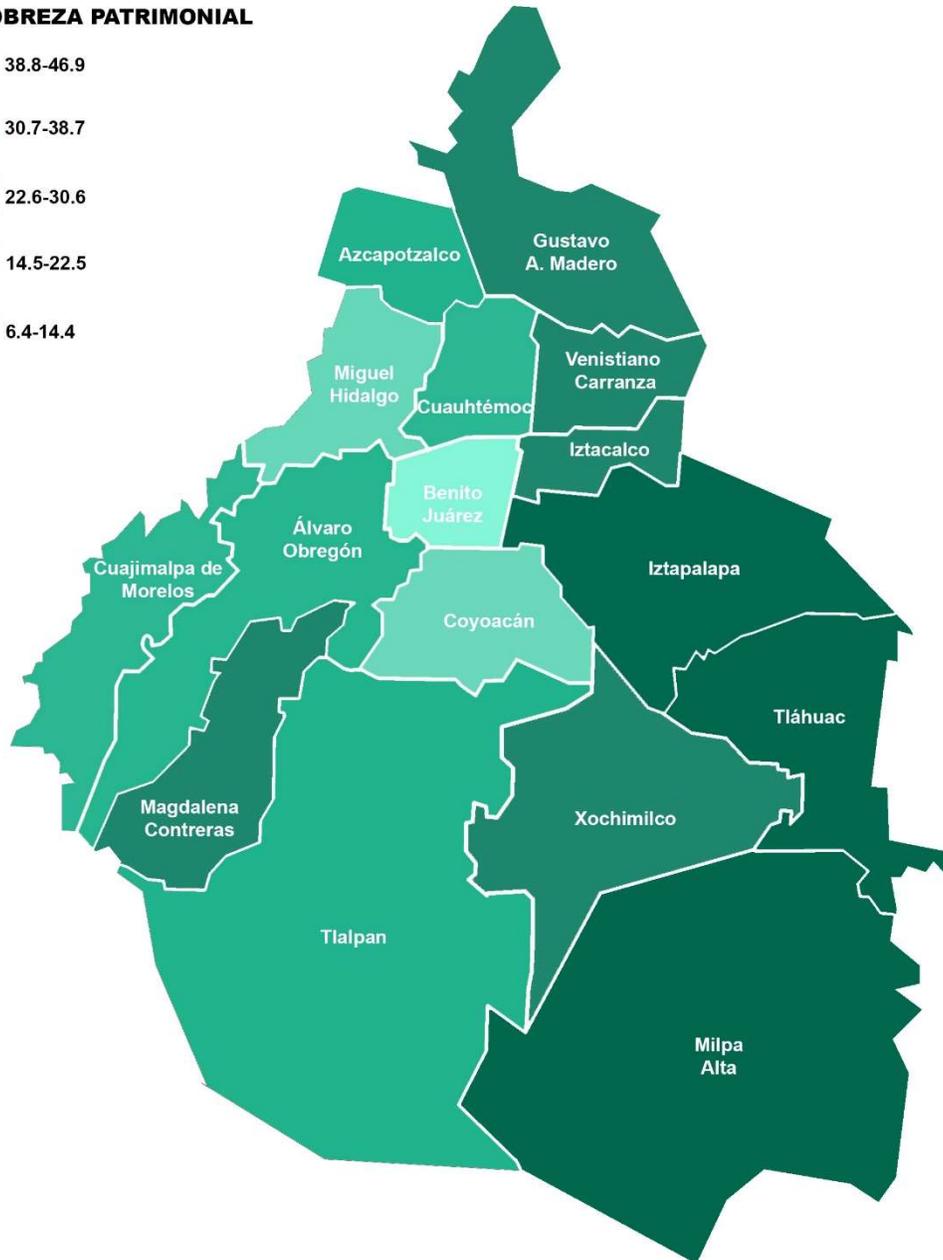
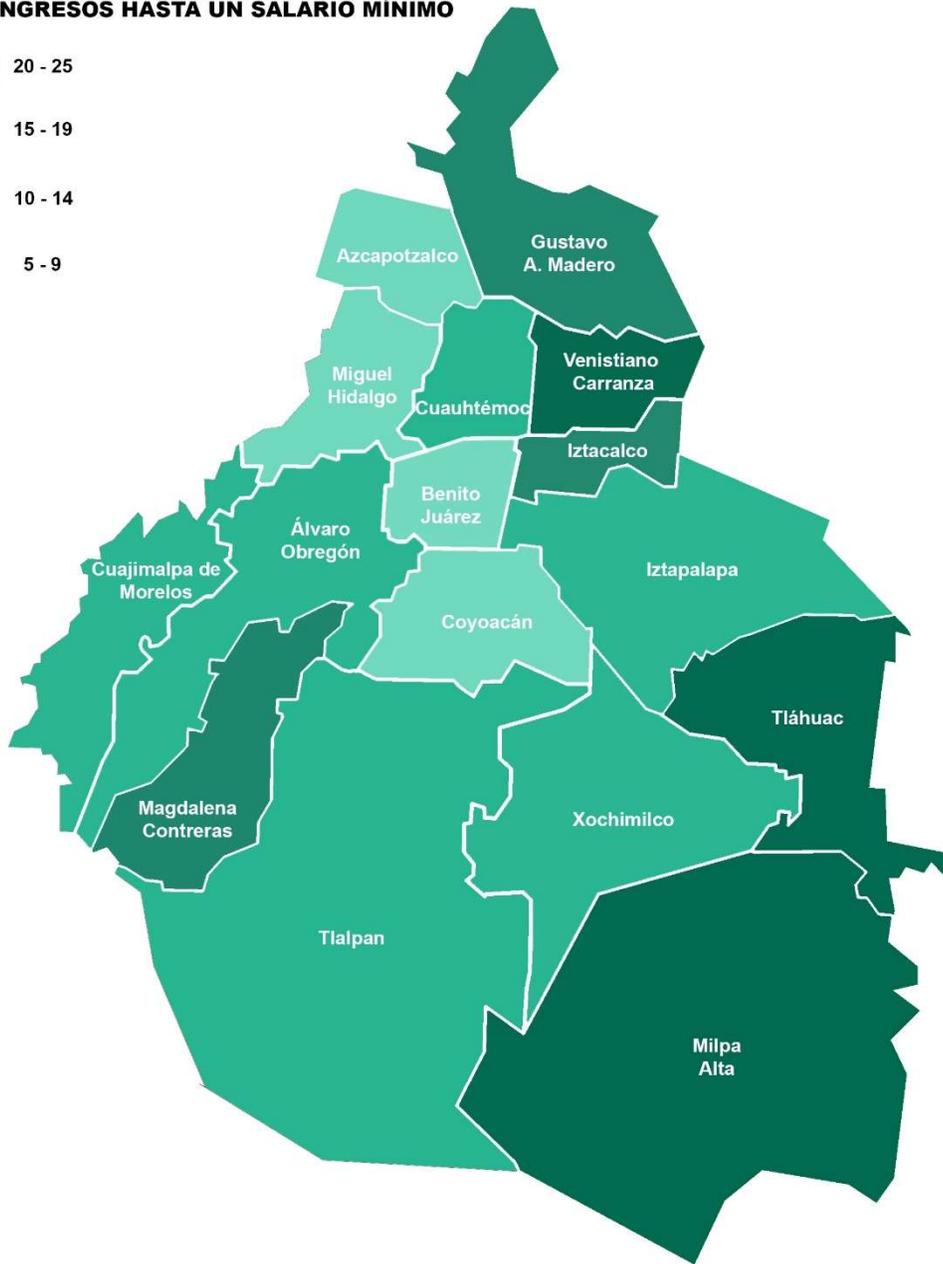


Ilustración 17 Pobreza Patrimonial en la CDMX. Elaboración propia con datos del Centro de Estudios de las Finanzas Públicas (2009)

La pobreza Patrimonial se define como la insuficiencia de ingreso disponible en un hogar para adquirir la canasta básica alimenticia, realizar los gastos de salud necesarios, vestimenta, transporte y educación, aún considerando que el ingreso total del hogar se destinará exclusivamente para estos gastos. Se puede observar en el mapa indicativo de la ilustración 17, que en ocho de las dieciséis alcaldías superan la pobreza patrimonial en mínimo 30% de sus hogares. Siendo las más afectadas Iztapalapa y Tláhuac, con 41.6 y 46.9 por ciento respectivamente (CEFP, 2009).

**% INGRESOS HASTA UN SALARIO MÍNIMO**



*Ilustración 18 Ingresos menores a un salario mínimo en la CDMX. Fuente: INEGI, 2018*

En la ilustración 18 y 19 se representa el porcentaje de viviendas que perciben los ingresos mencionados, menor a 1 salario mínimo y mayor a 5 salarios mínimos. Así como en la ilustración 16, se identifica que de las alcaldías con mayor porcentaje de hogares que tienen ingresos menores al salario mínimo están Milpa Alta, Tláhuac y Venustiano Carranza; siendo estas mismas las de menor porcentaje que reciben más de 5 salarios mínimos, agregándose Xochimilco, Iztapalapa y Gustavo A. Madero. En contraste las de mayor porcentaje que reciben más de 5 salarios mínimos están: Benito Juárez, Miguel Hidalgo y Cuajimalpa.

**% INGRESOS MAYORES A CINCO SALARIOS MÍNIMOS**

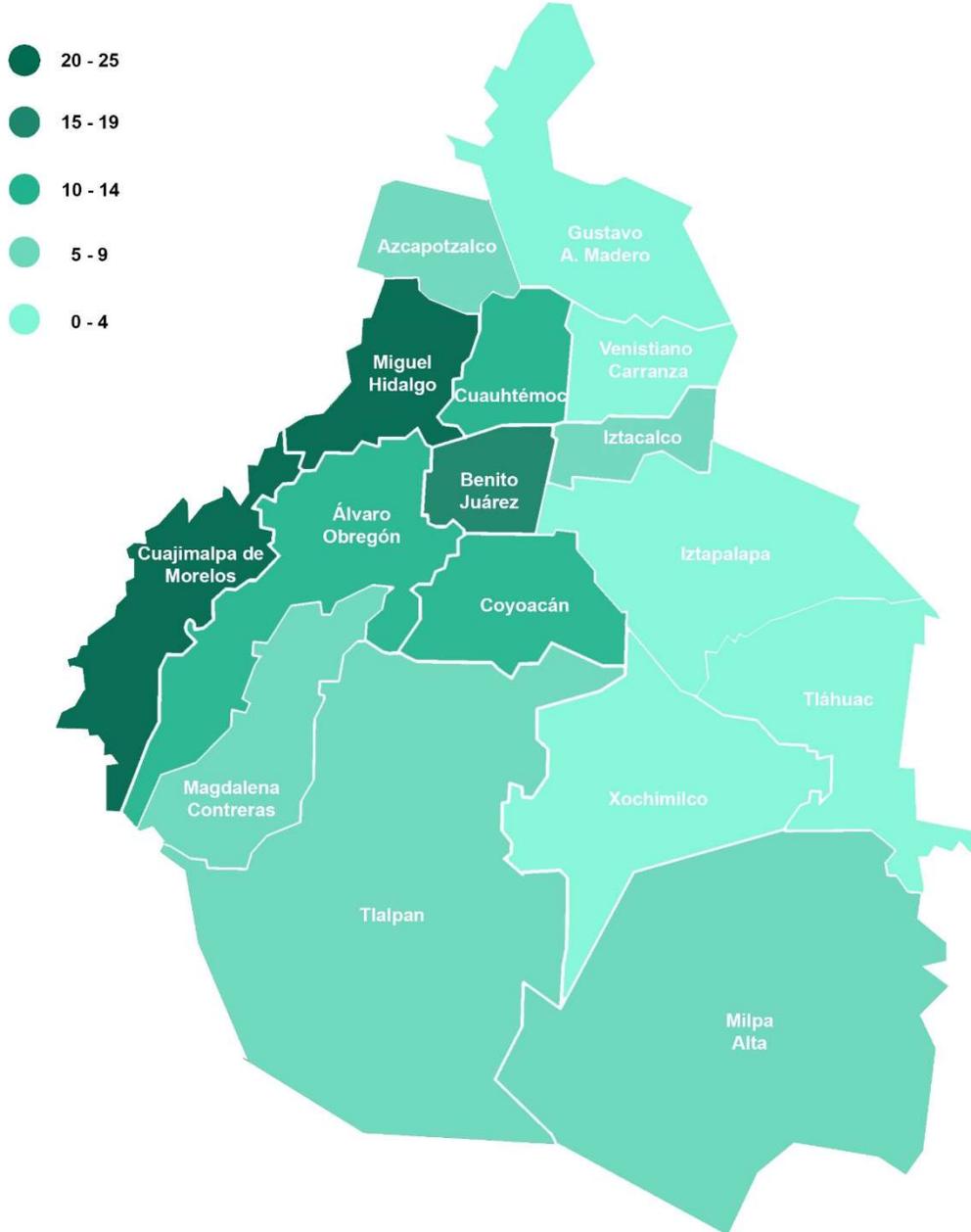


Ilustración 19 Ingresos mayores a cinco salarios mínimos en la CDMX. Fuente: INEGI, 2018

Tabla 2 Perfil por alcaldía. Elaborada con datos de INEGI (2018, 2015, 2010) y García (2012)

Alcaldía	Habitantes	Viviendas	Habitantes por Vivienda	Disponibilidad de Agua	Ingreso promedio por habitante activo	Precipitación en Zonas Habitadas	Superficie Habitacional
	Hab.	Unidades	Hab.	%	\$	mm	Km <sup>2</sup>
Álvaro Obregón	749,982	214,895	4	94	4,922	800 - 1000	23.88
Azacapotzalco	400,161	119,027	3	95	5,370	600 - 700	11.94
Benito Juárez	417,416	159,700	3	98	5,346	600 - 700	7.46
Coyoacán	608,479	186,317	3	94	4,431	600 - 800	21.93
Cuajimalpa de Morelos	199,224	55,478	4	87	6,166	800 - 1000	5.18
Cuauhtémoc	532,553	188,135	3	96	4,720	< 700	4.80
Gustavo A. Madero	1,164,477	324,587	4	90	3,953	< 700	30.48
Iztacalco	390,348	110,174	4	94	4,124	< 600	12.04
Iztapalapa	1,827,868	495,665	4	86	3,992	< 700	53.67
Magdalena Contreras	243,886	66,676	4	87	4,471	800 - 1000	10.10
Miguel Hidalgo	364,439	128,042	3	97	4,682	600 - 800	6.37
Milpa Alta	137,927	34,086	4	56	4,617	700 - 1000	14.98
Tláhuac	361,593	94,678	4	80	3,242	600 - 700	9.72
Tlalpan	667,104	190,591	4	80	4,652	800 - 1000	32.77
Venustiano Carranza	427,263	126,002	3	95	4,016	< 600	11.36
Xochimilco	415,933	107,270	4	70	3,802	600 - 1000	21.46
<b>Ciudad de México</b>	<b>8,908,653</b>	<b>2,601,323</b>	<b>3.6</b>	<b>87</b>	<b>4,532</b>	<b>869</b>	<b>278.14</b>

Con el fin de realizar la planeación y diseño conceptual del sistema domiciliario para tratamiento de Agua de lluvia como primer paso se integraron los datos de la tabla número 3, ello permitirá definir el perfil de vivienda representativo y que potencialmente aprovecharía el agua pluvial. Este análisis consideró la cobertura de agua por alcaldía, el número de habitantes por vivienda y el nivel de ingresos promedio. Las características de la vivienda más representativa se muestran en la tabla 3.

*Tabla 3 Perfil de Vivienda CDMX. Elaborada con datos de INEGI (2015) y CONAGUA (2017)*

<b>Características</b>	<b>Cantidad</b>	
<i>Habitantes por vivienda</i>	3.6	hab.
<i>Habitantes activos por vivienda</i>	2	hab.
<i>Ingreso promedio mensual</i>	9,064	M.X.N
<i>Número de cuartos</i>	4	pzas.
<i>Número de dormitorios</i>	3	pzas.
<i>Superficie de vivienda</i>	48	m <sup>2</sup>
<i>Consumo por habitante al día</i>	191	L/hab/día
<i>Consumo por vivienda al día</i>	688	L/día

Para definir el número de cuartos y dormitorios se consideraron los datos que se encuentran en las crestas de la campana de Gauss, según la Encuesta Nacional de Vivienda 2010, consultada en el portal de INEGI y para el consumo de agua, según CONAGUA (2016), se estiman en función del clima de la CDMX. Para obtener el promedio de consumo por vivienda al día se obtiene el producto de los habitantes por vivienda por el consumo personal diario.

En la tabla número 3, se definió la superficie total de vivienda con base en la investigación del Arquitecto Javier Sánchez Corral en su libro “La vivienda social en México” y con un artículo del periódico *Excelsior*, “Las condiciones óptimas de la vivienda en México”, donde se realizó un análisis a las viviendas de interés social, contrastando las condiciones básicas para vivienda.

## Capítulo 2. Marco jurídico

Como toda actividad que se realiza bajo normativa, existe una ponderación sobre la cual se deben de ejecutar las acciones de personas físicas o morales. Para el caso de la presente tesis y como tema de Agua en México se enumeran dichos documentos en orden de importancia:

1. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos;
2. Ley de Aguas Nacionales;
3. Reglamentos;
4. Normas técnicas, oficiales y complementarias;
5. Programas y Manuales.

### Constitución política de los Estados Unidos Mexicanos

Diario Oficial de la Federación, a 15 de septiembre del 2017. Según lo estipulado en el artículo 4to de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos: “Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de Agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines.” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2017).

En el mismo artículo 4to se establece que el Agua pluvial que precipite sobre la superficie que se encuentre dentro de propiedad privada puede ser utilizada por los habitantes de estos, sin ninguna obligación con el Estado. Caso contrario a aguas superficiales, esteros o agua del subsuelo, que, en caso de ser necesario, pueden ser exigidas por el interés público (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2017).

### Ley de Aguas nacionales

En esta se describe el uso de las Aguas nacionales. Especifica que el recurso, tanto superficial como el subterráneo, es de uso público; en caso de tener acceso a estos en una propiedad privada, mientras no se perjudiquen los servicios públicos, se podrá aprovechar a sabiencia de que el Estado puede hacer uso del recurso en cualquier momento. Además, no limita ni privatiza el uso del Agua de lluvia, pues ésta puede ser aprovechada por los habitantes de manera libre y sin obligación alguna con el estado. Sólo habría que limitar su uso en caso de querer aprovecharla para consumo humano, ya que la calidad del Agua pluvial suele rebasar algunos de los límites máximos de contaminantes; como lo son color, turbiedad, pH, partículas suspendidas, coliformes y algunos metales pesados; lo que limita actividades como el aseo personal y la preparación de alimentos. A ésta se le deberá aplicar cierto tratamiento, el suficiente para no rebasar los límites permisibles establecidos por la Secretaría de Salud en su Norma Oficial Mexicana 127, descrita a continuación.

Con lo anterior, se concluye que uso del Agua de lluvia en México es libre y no se necesita cumplir obligaciones con el estado, a diferencia de explotar acuíferos, agua superficiales o subterráneas.

### Ley de Agua del Distrito Federal

Publicada en Gaceta Oficial del Distrito Federal el 27 de mayo del 2003. Establece la gestión de recurso hídrico y sus instrumentos dentro de la capital del país, junto con el manejo y aprovechamiento sustentable del Agua y de la cosecha de Agua de lluvia. En cuanto al aprovechamiento sustentable, recomienda que el uso del recurso debe ser optimizado, utilizar el Agua lo más posible antes de

regresarla al ciclo natural. Para lograr el objetivo anterior se establece el uso y el desarrollo de instalaciones y muebles más eficientes. Esta ley también hace mención de las obligaciones del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) para incrementar los niveles de los mantos freáticos.

Sobre la cosecha de Agua de lluvia dentro del Distrito Federal, Ciudad de México, el título noveno tiene por objetivo organizar e incentivar el aprovechamiento del recurso pluvial; otorgando derechos a todos los habitantes, dependencias y entes públicos o sociales para (según en el artículo 124 de la presente ley):

- I. Cosechar agua de lluvia, individual o colectivamente;
- II. Ser reconocidos como cosechador(a) individual o colectivo de Agua de lluvia del Distrito Federal e inscritos en el padrón;
- III. Obtener los incentivos del Programa General y subprogramas;
- IV. Gestionar y obtener apoyo, asistencia y capacitación de técnicos y profesionales, así como atención, orientación, asesoría y los beneficios viables y posibles que se establezcan en las políticas, estrategias, programas, presupuestos y acciones del Gobierno del Distrito Federal en materia de cosecha de agua de lluvia en esta entidad; y
- V. Ser informados; debatir con seriedad, rigor y tolerancia; proponer; y, decidir democráticamente las políticas gubernamentales en materia de cosecha de agua de lluvia en el Distrito Federal.

Asimismo hace mención que para las nuevas edificaciones y obras que se construyan dentro de la CDMX será obligatoria la cosecha de Agua de lluvia o, en su caso, contar con instalaciones para permitir la recarga de recurso pluvial al subsuelo por infiltración.

Para todo lo anterior promueve un fondo general de apoyo a la cosecha de agua de lluvia, el cual es administrado por el SACMEX, integrado con los montos anuales autorizados en el decreto de presupuesto de egresos del Distrito Federal. El apoyo se podrá destinar para adquirir, construir, mantener o realizar cualquier actividad relacionada con implementar sistemas de cosecha y aprovechamiento de Agua de lluvia, dentro de la CDMX.

## Ley de mitigación y adaptación al cambio climático y desarrollo sustentable del Distrito Federal

Publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal el 16 de junio del 2011. Tiene como objetivo el establecimiento de políticas públicas que permitan propiciar la mitigación de gases de efecto invernadero, adaptación al cambio climático, así como coadyuvar al desarrollo sustentable. Este es el principal documento jurídico que menciona la captación y el aprovechamiento pluvial como solución ante el cambio climático. También exige su utilización de manera obligatoria en las nuevas construcciones. Lo describe como “fomento a las edificaciones sustentables que incluyan sistemas de eficiencia energética, captación de agua pluvial, reúso y descarga de aguas residuales, reducción de emisiones contaminantes al aire y manejo de residuos sólidos sustentable”. A continuación, se mencionan los puntos más relevantes.

- IX. Preservación y aprovechamiento de recursos hídricos, así como la recarga de mantos acuíferos;
- X. La ejecución de sistemas de captación y recargas de agua pluviales al subsuelo, mediante la colocación de zanjas de absorción o cualquier otra tecnología que permita la infiltración al subsuelo.
- XI. Promover que las nuevas construcciones o edificaciones, deberán implementar sistemas de captación, tratamiento y aprovechamiento de agua pluvial para las áreas de sanitarios y reúso y tratamiento de aguas grises para riego de áreas verdes.

XII. Las nuevas construcciones o edificaciones deberán contar con redes separadas de agua potable, de agua residual tratada y cosecha de agua de lluvia, debiéndose utilizar esta última en todos los usos que no requieran agua potable.

## NOM 127 SSA1 2000

Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de junio del 2000, tiene como objetivo establecer los límites permisibles de calidad y tratamientos de potabilización dl agua para uso y consumo humano.

La Norma Oficial Mexicana **NOM-127-SSA1-2000**; “Salud Ambiental, Agua para uso y consumo Humano-Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe someterse el Agua para su Potabilización”; dicha norma establece límites permisibles de las características físicas, químicas, microbiológicas y radiactivas para el agua para uso y consumo humano. Debe interpretarse que son aquellas que deben de cumplir los sistemas públicos y privados o personas físicas y morales que distribuyan el recurso hídrico, junto con las alternativas de tratamiento en función de los parámetros que caracterizan el agua a tratar. “El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras. Con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la estrega al consumidor, se debe someter a tratamientos de potabilización” (NOM-127-SSA1-2000). A continuación se presentan las tablas donde se definen los límites permisibles para los diferentes tipos de contaminante: biológicos, químicos y físicos u organolépticos.

Límites permisibles de características bacteriológicas; el contenido de organismos resultante del examen de una muestra simple de Agua, debe cumplir lo establecido en la

Tabla 4 Límites permisibles de características bacteriológicas

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
<i>Organismos coliformes Totales</i>	Ausencia
	No detectable
<i>Organismos coliformes Fecales</i>	Ausencia
	No detectable

Fuente: NOM-127-SSA1-2000

*Nota:* Los resultados de los exámenes bacteriológicos se representan en NMP/100 ml (Número más probable por 100 ml), si se utiliza la técnica del número más probable y si se utiliza la técnica de filtración por membrana, se representa en UFC/100 ml (Unidades formadoras de colonias por 100 ml).

“En agua abastecida por el sistema de distribución no debe de contener *E. Coli*, coliformes fecales u organismos termotolerantes en ninguna muestra de 100 ml. Los organismos coliformes totales no deben ser detectables en ninguna muestra de 100 ml; en sistemas de abastecimiento de localidades con una población mayor de 50 000 habitantes; estos organismos deberán estar ausentes en el 95% de las muestras tomadas en un mismo sitio de la red de distribución, durante un periodo de doce meses de un mismo año” (NOM-127-SSA1-2000).

Límites permisibles de características físicas y organolépticas; estas deberán ajustarse a lo establecido en la tabla número 5.

Tabla 5 Límites permisibles de características físicas y organolépticas

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
<b>COLOR</b>	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobre
<b>OLOR Y SABOR</b>	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 y químico.
<b>TURBIEDAD</b>	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método

Fuente: NOM-127-SSA1-2000

Límites permisibles de características químicas; el contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla No. 3; cabe mencionar que los límites permisibles de metales se refieren para su concentración total en el agua, incluyendo sólidos suspendidos y los disueltos.

Tabla 6 Límites permisibles de características químicas

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE (MG/L)
<b>ALUMINIO</b>	0.2
<b>ARSÉNICO</b>	0.05
<b>BARIO</b>	0.7
<b>CADMIO</b>	0.005
<b>CIANUROS (CN-)</b>	0.07
<b>CLORO RESIDUAL LIBRE</b>	0.20-1.50
<b>CLORUROS (CL-)</b>	250
<b>COBRE</b>	2
<b>CROMO TOTAL</b>	0.05
<b>DUREZA TOTAL (CACO3)</b>	500
<b>FENOLES O COMPUESTOS FENÓLICOS</b>	0.3
<b>FIERRO</b>	0.3
<b>FLUORUROS (F-)</b>	1.5
<b>BENCENO</b>	10
<b>ETILBENCENO</b>	300
<b>TOLUENO</b>	700
<b>XILENO</b>	500
<b>MANGANESO</b>	0.15
<b>MERCURIO</b>	0.001
<b>NITRATOS (N)</b>	10
<b>NITRITOS (N)</b>	1

<b>NITRÓGENO AMONIACAL (N)</b>	0.5
<b>PH</b>	6.5 - 8.5 unidades de pH
<b>PLAGUICIDAS: ALDRÍN Y DIELDRÍN</b>	0.03 microgramos/l
<b>CLORDANO</b>	0.20 Total de Isómeros
<b>DDT</b>	1.00 Total de Isómeros
<b>GAMMA-HCH (LINDANO)</b>	2
<b>HEXACLOROBENCENO</b>	1
<b>HEPTACLORO Y EPÓXIDO DE HEPTACLORO</b>	0.03
<b>METOXICLORO</b>	200
<b>2,4 - D</b>	30
<b>PLOMO</b>	0.01
<b>SODIO</b>	200
<b>SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES</b>	1000
<b>SULFATOS (SO4)</b>	4000
<b>SUSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO (SAAM)</b>	0.05
<b>TRIHALOMETANOS TOTALES</b>	0.2
<b>YODO RESIDUAL LIBRE</b>	0.2-0.5
<b>ZINC</b>	5

Fuente: NOM-127-SSA1-2000

En el caso donde el proceso de desinfección se realice mediante otro sistema que no incluya cloro o sus derivados, la autoridad sanitaria debe determinar en qué caso adicionalmente se tendrá que dosificar cloro al agua distribuida, para mantener la concentración de cloro residual dentro del límite permisible establecido en la Tabla No. 6.

El tratamiento para la potabilización: de “agua proveniente de una fuente en particular, debe justificarse con estudios de calidad y pruebas de tratabilidad a nivel de laboratorio para asegurar su efectividad.” Cuando los contaminantes microbiológicos, características físicas y organolépticas o los constituyentes químicos excedan los límites permisibles establecidos en las tablas número 4, 5 y 6; se tiene que aplicar los tratamientos específicos mencionados en la Tabla No. 7 Tratamientos para la potabilización del agua.

Tabla 7 Tratamientos para potabilización del Agua

<b>CONTAMINANTE</b>	<b>TRATAMIENTO</b>
<i>Microbiológica</i>	
Bacterias, helmintos, protozoarios y virus	Deben desinfectarse con cloro, compuestos de cloro, yodo, ozono, luz ultravioleta, plata iónica o coloidal y filtración en múltiples etapas.
<i>Características Físicas y Organolépticas</i>	
Color, olor, sabor y turbiedad	Adsorción en carbón activado

### Constituyentes Químicos

Arsénico, Aluminio, Bario, Cadmio, Cianuros, Cobre, Cromo total y plomo	Intercambio iónico u ósmosis inversa
Cloruros	Intercambio iónico, ósmosis inversa o evaporación
Dureza	Ablandamiento químico o intercambio iónico
Fenoles o Compuestos Fenólicos	Adsorción en carbón activado u oxidación con ozono
Fierro y/o manganeso	Intercambio iónico u ósmosis inversa
Fluoruros	Alúmina activada, carbón de hueso u ósmosis inversa
Hidrocarburos aromáticos	Adsorción en carbón activado
Mercurio	Adsorción en carbón activado granular u ósmosis inversa cuando la fuente tenga hasta 10 microgramos/l. Adsorción activado en polvo cuando la fuente contenga más de 10 microorganismos/l
Nitratos y nitritos	Intercambio iónico
pH	Neutralización
Plaguicidas	Adsorción en carbón activado granular
Sodio	Intercambio iónico
Sólidos Disueltos Totales	Intercambio iónico
Sulfatos	Intercambio iónico u ósmosis inversa
Sustancias activas con azul de Metileno	Adsorción en carbón activado
Trihalometanos	Oxidación con aireación u ozono y adsorción en carbón activado granular
Zinc	Evaporación o Intercambio iónico

## Capítulo 3. Estado del Arte del aprovechamiento pluvial

### 3.1. Aprovechamiento de Agua pluvial en el mundo

Hoy en día se utilizan los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia más por necesidad -muchas demanda y poca disponibilidad- que por tendencia, avance tecnológico o sustentable. Suelen utilizarse cuando hay deficiencia en las condiciones de entrega del agua potable en la región, como suministro, calidad o altos costos. Por ende, las tecnologías aplicadas actualmente están documentadas en las últimas décadas y optimizadas en función de los materiales y características disponibles en las zonas de interés. A continuación, se establece su aplicación en diferentes zonas del globo terráqueo; desde la necesidad de aprovechamiento, sistema de captación y el tratamiento en cada una de ellas.

#### 3.1.1. África

Región en la que la falta del Agua no es el único problema, el verdadero problema reside en la alta concentración de pobreza, que imposibilita la implementación de tecnología necesaria para la construcción de infraestructura destinada al tratamiento y abastecimiento del recurso a su población, por lo que la falta de recursos ha convertido la falta de Agua en un problema mayor (Ballén, 2006).

El aprovechamiento de Agua pluvial en su mayoría es de carácter informal, por la escasez de recurso económico; lo que genera sistemas de poca eficiencia y Agua de mala calidad. Aunque las familias con mayor fluidez de dinero sí invierten en sistemas con cisternas de suficiente capacidad de almacenaje para la subsistencia de la vivienda. En el continente se encuentra el proyecto vigente “Sistemas de Aprovechamiento de Agua de Lluvia de Muy Bajo Costo”, promovido por organizaciones africanas con apoyo de Development Technology Unit (Ballén, 2006).

#### 3.1.2. Asia

India es el segundo país con mayor población a nivel mundial, cerca de mil millones de habitantes. La gran cantidad de recursos demandada demográficamente en la región no es posible de abastecerse con los recursos hídricos de la misma. Por lo anterior, se han empezado a implementar técnicas de aprovechamiento pluvial. Pero no solo se tiene un problema de sobrepoblación, India es una región con lluvias de monzón -lluvias fuertes pero breves- y solo les llueven cien horas, aproximadamente, en un año (Ballén, 2006).

Bangladesh es uno de los países de Asia donde la recolección y aprovechamiento pluvial es una alternativa muy socorrida para el consumo de Agua. Su uso se exponencializó a partir de la contaminación presente en sus pozos de agua potable con arsénico, desde 1977. La mayoría de los sistemas instalados fueron donados y puestos en marcha por la ONG Forum for Drinking Water Supply & Sanitation. El recurso captado es para consumo humano: bebida y cocina (Ballén, 2006).

Al norte de China, en la localidad de Loess de Gansu, el aprovechamiento de Agua pluvial es la única fuente potencial para abastecimiento de agua, ya que tanto el escurrimiento como el agua superficial en la zona, escasea. Desde hace más de 20 años se ha implementado el “Proyecto 121”, que consiste en un apoyo económico para la construcción de una superficie para captación de agua pluvial, dos almacenamientos y con esto se suministre recurso a 1.2 millones de personas y 1.18 millones de cabezas de ganado (Ballén, 2006).

Singapur se encuentra en estado crítico al verse rebasada la capacidad de abastecimiento de Agua por el incremento demográfico de la zona, es por lo que han desarrollado métodos innovadores para el aprovechamiento pluvial. Se implementó el almacenamiento separado del recurso pluvial con el potable y aprovechándose para diferentes usos humanos (Ballén, 2006).

En Japón el aprovechamiento pluvial se basa como alternativa para la optimización del uso del recurso, además de fungir como solución para control de inundaciones y asegurar un volumen de Agua en estados de emergencia, pero no tanto por escasez. En Tokio se han instalado sistemas de captación para uso público en las calles del distrito de Mukojim. Conocidas como “Rojison”. Éstos reciben el recurso que escurre de los techos de las casas y se almacena en pozos subterráneos para su posterior extracción y uso en riego de jardines, aseo de pisos y fachadas y para combatir incendios (Ballén, 2006).

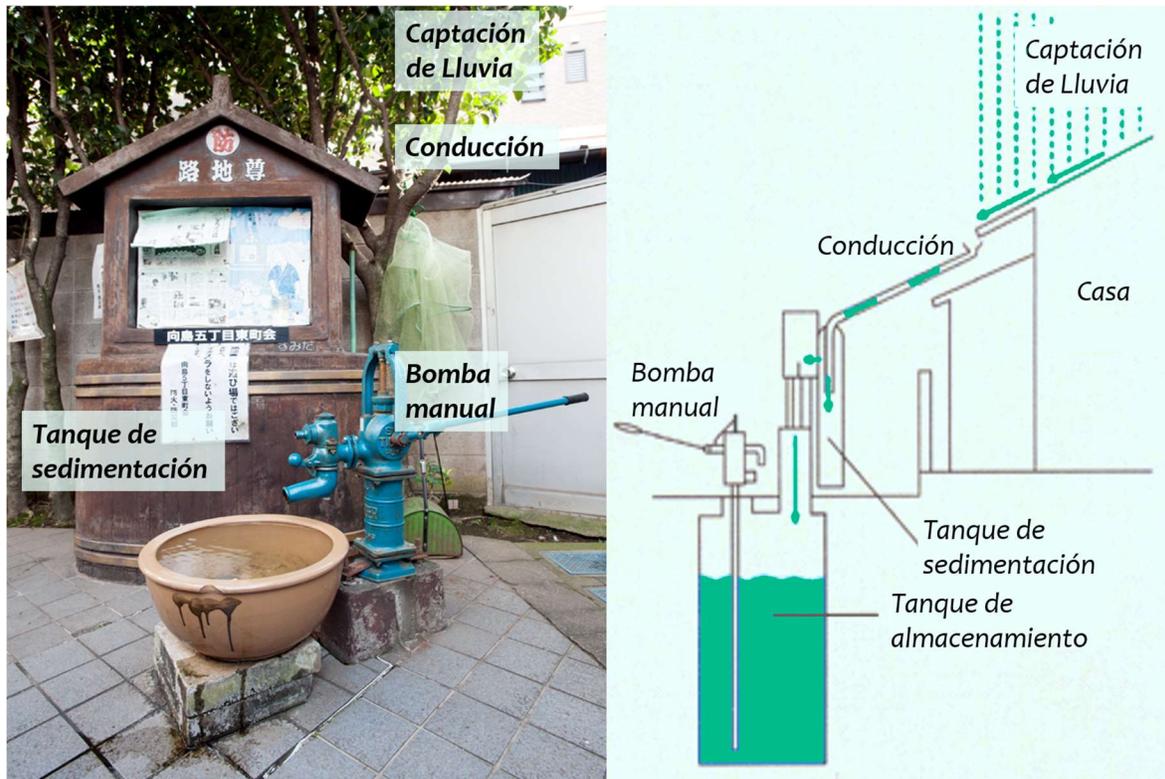


Ilustración 20 Sistema Rojinson. Elaboración propia con datos de Ballen, 2006.

### 3.1.3. Europa

Un continente con países desarrollados, donde la infraestructura y la calidad del Agua se encuentra en buen estado. Por lo que la implementación de soluciones alternas para el abastecimiento del recurso es más un tema de mejora al ecosistema y control de inundaciones que por escasez de ésta. Los sistemas de aprovechamiento pluvial se introdujeron por primera vez en el continente en Berlín, Alemania, hacía la última década del siglo pasado. Se capta aproximadamente en 19 edificios -treinta y dos mil metros cuadrados-, y se conduce hacía un tanque subterráneo con capacidad de tres mil quinientos metros cúbicos. Y se ocupa para la descarga de inodoros, riego de áreas verdes y para abastecer de agua estanques artificiales. Según un modelo a diez años, se estima que con la captación del 58% de recurso pluvial que cae dentro de las instalaciones, el ahorro de Agua potable en la región es aproximadamente de 2,400 metros cúbicos por año (Ballén, 2006).

### 3.1.4. Oceanía

En Australia la cosecha de Agua pluvial es una actividad muy utilizada para satisfacer el abastecimiento de dicho recurso. Según datos del Australian Bureau of Statistics (Oficina Australiana de Estadística) para el año 1994 el 30% de las casas ubicadas en zonas rurales y el 6.5% de los hogares en las ciudades utilizaban algún sistema de aprovechamiento pluvial, y de esas el 13% le daba uso para consumo humano (Ballén, 2006).

### 3.1.5. Islas del Caribe

En una región donde las lluvias eran abundantes, hasta hace unas décadas y, ni el abastecimiento ni la calidad del Agua satisfacen las necesidades, los sistemas de captación son la solución para el abastecimiento y consumo humano del recurso hídrico. En algunas de las islas, por legislación, la oferta de Agua debe de realizarse con captación pluvial, como es el caso de las Islas vírgenes de EUA, donde más del 80% de la población se abastece de este modo (Ballen, 2006).

“La Isla Unión es una parte del país de San Vicente y las Granadinas que se encuentra a 43 kilómetros al sur de la isla principal. Tradicionalmente sus habitantes han obtenido agua dulce de la captación de lluvia y a partir de unos cuantos pozos que se encuentran en varias partes de la isla. Sin embargo, debido a la intrusión salina el agua subterránea ya no se ocupa como fuente de agua para consumo humano. Esto sumado a las sequías que se presentan con más frecuencia, sobre todo en los últimos 15 años, implica la necesidad de una fuente confiable de agua dulce para el abastecimiento de agua potable a la población de esta isla. Además, hay que considerar la necesidad que implica el sector turismo, mismo que ha experimentado un crecimiento durante las dos últimas décadas” (Dwayne, 2014).

### 3.1.6. América del Norte

Para Estados Unidos Americanos se estima que más de medio millón de personas, en quince estados, ya utilizaban sistemas de aprovechamiento de Agua pluvial, hacía el año 2006. Abasteciéndose para consumo humano, para riego agrícola y usos comerciales e industriales. Actualmente existen más de 50 compañías especializadas en el diseño y la construcción de infraestructura para el mencionado aprovechamiento. Texas es el estado en el que más se utilizan; aproximadamente en una vivienda tipo con 200 metros cuadrados de superficie de cubierta y una precipitación media anual de 850 milímetros se pueden cosechar más de 150 mil litros de agua en un año (Ballén, 2006).

En Vancouver, Canadá, se impulsó un programa piloto que consiste en cierto subsidio para la adquisición de barriles almacenadores de agua pluvial. Cada uno de estos barriles o tanques plásticos, almacena 75 galones (284 litros). El Agua captada se aprovecha para riego de áreas verdes y se estima que puede satisfacer la demanda de consumo doméstico de hasta el 40% durante los meses de verano, lo que representa un ahorro de cerca de 5 mil litros de agua (Ballén, 2006).

En Toronto, Canadá, se encuentra una vivienda llamada “Healthy House”, sin conexión alguna a los servicios públicos municipales. Casa para una familia con 3 habitaciones y 158 metros cuadrados, independiente de servicios como: suministro de agua, gas y electricidad. El Agua y la nieve son la fuente de agua para el consumo de la familia; con ayuda de muebles sanitarios eficientes, se reduce hasta el 50% del consumo de una casa habitacional estándar. Para poder consumir dicho recurso hídrico éste se potabiliza con un filtro lento de arena y carbón activado más desinfección con luz ultravioleta, este último proceso se detalla en el punto 3.2 Tratamiento doméstico de Agua pluvial (Ballén, 2006).

### 3.1.7. América del Sur

Desde finales del siglo pasado, en Brasil, organizaciones ambientales y ONG se han dedicado a trabajar en el suministro de Agua para consumo humano aprovechando el recurso pluvial. En la región Noroeste del país la intensidad de lluvia alcanza los mil milímetros. Al ser una región con bastante lluvia se tiene registrado que las comunidades nativas tradicionalmente se dedicaron a cosechar Agua de lluvia en pozos excavados a mano en rocas, pero no satisfacen la demanda necesaria, por lo que el gobierno de Brasil en conjunto con alguna ONG inició un proyecto para construir un millón de tanques de recolección, lo que beneficiaría a cinco millones de personas (Ballén, 2006).

### 3.1.8. América Central

En la comunidad de Orocuina, Honduras, se tienen graves problemas de abastecimiento del recurso hídrico. La población tenía que hacer recorridos de dos a tres kilómetros para poder llegar a un cuerpo de Agua de baja calidad. Por esta razón, la Universidad Nacional Autónoma de Honduras, en el año 1992, diseñó e instaló un sistema de cinco pilas de recolección para almacenamiento de Agua, las cuales se abastecen del recurso pluvial captado en los techos de las casas de las familias que habitan dicha comunidad (Ballén, 2006).

Otro ejemplo de aplicación en un sitio donde el acceso al Agua es muy limitado es Nicaragua. En el 2004 las organizaciones Georg Fischer y Mercy Ship implementaron un proyecto para construir sistemas de captación pluvial. Dicho proyecto permitió que los habitantes pudieran disponer de Agua, para consumo humano, durante algunos días de la temporada de estiaje (Ballén, 2006).

### 3.1.9. México

En México no es sorpresa la escasez de Agua, a pesar de ser un país con regiones ricas en lluvias, el exagerado crecimiento demográfico en algunas regiones del país genera una gran demanda que no puede satisfacer la capacidad actual del recurso hídrico nacional; que, en algunas zonas, es sobreexplotado de los mantos subterráneos, recordemos que de los 653 acuíferos 106 son sobreexplotados. Por lo anterior, la poca accesibilidad al Agua potable en México ha impulsado a desarrollar sistemas de captación de Agua de lluvia, un campo con potencial en desarrollo en México.

En Jalisco, la localidad de Mexquitic, es una de las regiones donde se aplican estos sistemas. Se estableció para los huicholes como proyecto integral de captación pluvial y excusa para educación ambiental, de salud y de uso responsable del Agua; lleva por nombre "Ha Tatukari" (en Huichol), traducido como "Agua es vida"; es promovido por tres organizaciones internacionales: *International Research Institute (IRRI)*, en colaboración del *Proyecto Concentrarte AC* y el *Instituto Nacional de Desarrollo Social (INDESOL)*; en colaboración con *Isla Urbana*, *Concentrarte*, *Luum* y *Colectivo Wixari*. La mencionada comunidad Huichol, es 100% indígena y viven en estado de extrema pobreza, por lo que carecen de servicios básicos como luz, agua, saneamiento y gestión de residuos; y están acostumbrados a subsistir con menos de la cantidad de Agua establecida por la ONU y la OMS como mínimos para el digno desempeño de vida humana, dichos límites están establecidos entre 50 a 100 litros de Agua al día (ONU, 2018).

Actualmente existe una organización, con gran presencia en el ámbito del aprovechamiento pluvial como recurso emergente contra el insuficiente servicio de abastecimiento de Agua en la Ciudad de México y en zonas de Oaxaca, de nombre Isla Urbana. Nacen para hacerle frente a la crisis hídrica en la que nos encontramos, mencionan que al menos 250 mil personas de la capital del país ni siquiera tienen conexión a la red y si millones de litros de agua pluvial, anualmente, se van al drenaje o son causantes de inundaciones; ¿por qué no aprovecharla? Bajo esta premisa proponen un modelo de abastecimiento y uso con relación a los ciclos naturales disponibles, minimizando el daño a los

ecosistemas, y este se basa en aprovechar el recurso pluvial de la Ciudad de México; basan sus modelos en captación, un separador de primeras lluvias –“Tlaloque”-, sistemas de filtración y desinfección y conexión a la red para su posible uso.

### 3.2. Tratamiento doméstico de Agua pluvial

Actualmente en la Ciudad de México Isla Urban además de desarrollar sistemas de captación y aprovechamiento, oferta sistemas para potabilizar o mejorar la calidad del Agua de lluvia. Dichos sistemas se presentan a continuación y se observa el dispositivo, su tren de tratamiento y sus costos (precios obtenidos de su catálogo en Línea: <http://islaurbana.mx/productos/> y sin considerar instalación).

Tabla 7 Dispositivos para tratamiento d Agua, Isla Urbana

DISPOSITIVO	FUNCIONAMIENTO
<p>Filtro de 3 etapas con luz UV</p> 	<p>Consta de 3 etapas de purificación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Filtración para retener partículas suspendidas mayores a 5 micras.</li> <li>b) Cartucho de carbón activado, elimina cloro libre, detergentes, solventes y contaminantes orgánicos.</li> <li>C) Germicida Luz Ultravioleta, consta de una lámpara de 12 watts que emite radiación UV. Elimina los microorganismos presentes en el Agua.</li> </ul>
<p>FILTRO DE 4 ETAPAS CON LUZ UV</p> 	<p>Consta de 3 etapas de purificación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a y b) Filtración para retener partículas suspendidas mayores a 5 micras.</li> <li>c) Cartucho de carbón activado, elimina cloro libre, detergentes, solventes y contaminantes orgánicos.</li> <li>d) Germicida Luz Ultravioleta, consta de un</li> </ul>

Purificador Family



Un cartucho de polipropileno contiene una membrana filtrante para eliminar el 99% de las bacterias habituales del Agua y un bloque de carbón preactivado.

Purificador EOZ



Tiene una primera etapa de filtración con una tela de 200 micras, para eliminar partículas y sólidos suspendidos, posteriormente para por carbón activado y KDF para eliminar cloro, olores, sabores químicos y metales pesados; finalmente tiene una membrana de fibras huecas de 0.1 micra para eliminar microorganismos.

NOTA: Los dispositivos para mejorar la calidad de Agua diseñados por ISLA URBANA, están creados para tratamiento de Agua de la red. Para tratar Agua de lluvia se utilizan 3 elementos básicos, diseñados por ellos, un separador de primeras lluvias, Tlaloque; un filtro de partículas y otro de carbón activado y un filtro de desinfección, purificador EOZ o purificador Family.

En México, los ya mencionados no son los únicos dedicados a producir dispositivos para mejorar la calidad del Agua; la empresa *Rotoplas*; también oferta productos potabilizadores de Agua, aunque estos, son enfocados al recurso otorgado por la red municipal, por lo que consideran agua ya tratada, con mejor calidad a la cosechada de la lluvia. En la Tabla No. 8, se observan los dispositivos ofrecidos por Rotoplas y una breve descripción.

Tabla 8 Dispositivos para tratamiento de Agua, Rotoplas

**DISPOSITIVO**

Purificador sobre tarja



**Funcionamiento**

Cuenta con tecnología de carbón activado impregnando plata coloidal. Otorga Agua sin sabor, color y olor; eliminando el 99% de las bacterias.

Purificador bajo tarja



Cuenta con tecnología de carbón activado impregnando plata coloidal. Otorga Agua sin sabor, color y olor; eliminando el 99% de las bacterias.

**PURIFICADOR Y  
ALCALINIZADOR DE AGUA**



Provee Agua pura y alcalina, con un pH de 8.5, retiene sedimentos y el 99% de las bacterias, elimina el sabor a cloro.

**PURIFICADOR DE ÓSMOSIS  
INVERSA**

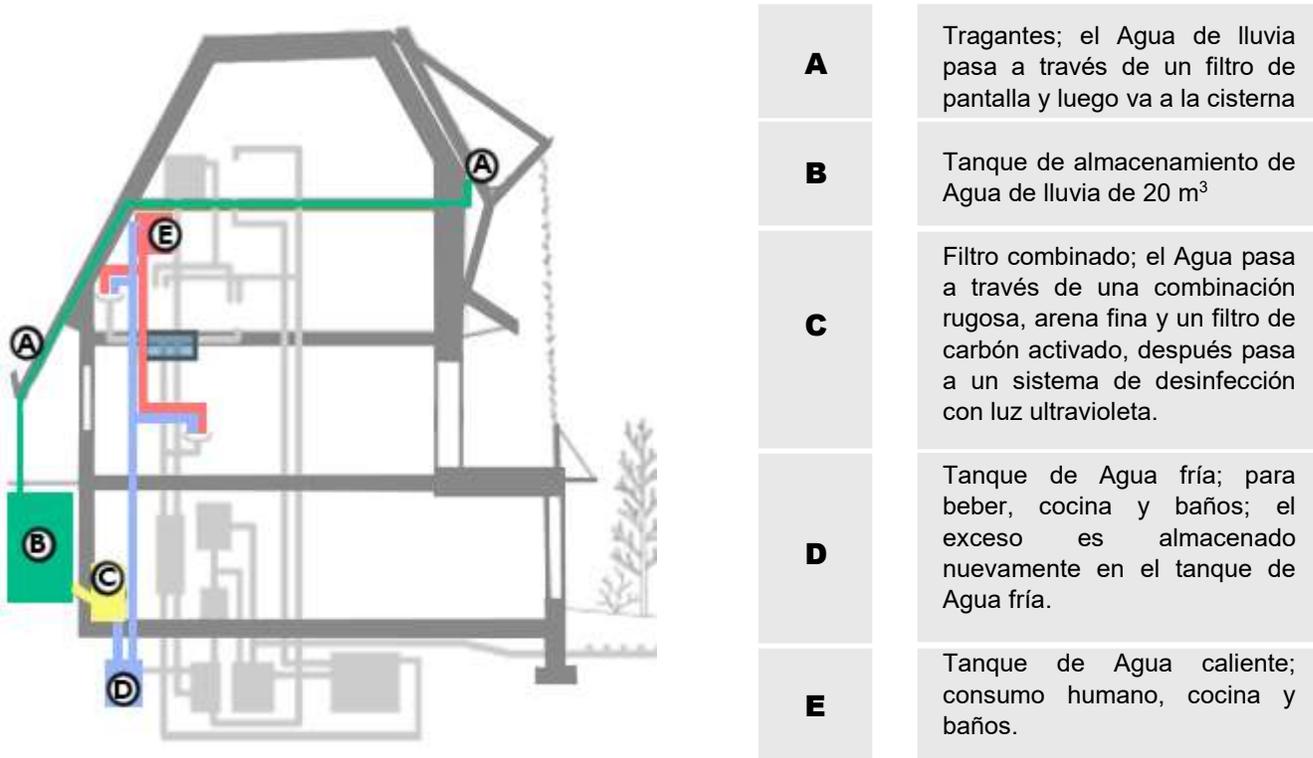


Sistema de purificación de 5 etapas; la primera etapa es una filtración con membrana de polipropileno, para eliminar sedimentos; la segunda y tercera es con carbón activado para neutralizar y eliminar sabor, olor y color del Agua; la cuarta etapa es con una membrana de ósmosis inversa y la última con carbón activado pulidor para Mejorar su calidad organoléptica.

En la Ciudad de México existe otra empresa que se dedica a potabilizar Agua de lluvia para diferentes usos llamada *Placitum*. Su dispositivo consiste en un filtro de acero inoxidable con arena para retirar partículas suspendidas y carbón activado para limpiarla; y junto con un método de desinfección que consiste en verter gotas de dióxido de cloro al recipiente de agua con el que fue captada dicho recurso pluvial.

Otro caso de tratamiento para agua pluvial a nivel habitacional es “Healthy House”; en Toronto, Canadá; se basa en una primera etapa de adición de cal para neutralizar la acidez de esta, después viene un proceso de filtración con arena y carbón activado para remover partículas sólidas e impurezas transportadas por el fluido; y el final se lleva a un método de desinfección con luz ultravioleta para inhibir la existencia de microorganismos. Y así poder conducirla hasta su disposición final dentro de tanques de almacenamiento para su posterior consumo humano.

Ilustración 21 Aprovechamiento y tratamiento pluvial en "Healthy House".



Elaborado con datos de la fuente: CMHC's

En Brasil, existe una empresa con el mismo giro que Isla Urbana que ha desarrollado un dispositivo para potabilización de Agua de Lluvia. El equipo consta de 4 etapas: la primera con un filtro para partículas visibles, arena y hojas; la segunda etapa, es con piedra caliza para neutralizar el pH del recurso captado; en la tercera etapa el Agua entra en contacto con el cloro para eliminar microorganismos y una última etapa de filtración más fina, con una membrana de polietileno para eliminar partículas e impurezas mayores a 25 micras.

Para el año 2019 se estrenó un programa por parte de SEDEMA llamado: Programa de cosecha de lluvia, Ciudad de México. En dicho se establece el objetivo de "mejorar las condiciones de acceso al agua de la población en viviendas con elevada precariedad hídrica a corto plazo y aumentar la resiliencia ante crisis puntuales de abasto en viviendas con mayor precariedad hídrica de la Ciudad de México." Particularmente este se implementará en dos alcaldías, las de menor disponibilidad de recurso hídrico potable: Iztapalapa y Xochimilco (SEDEMA, 2019).

## Capítulo 4. Marco conceptual del aprovechamiento pluvial

En el capítulo anterior se desarrolló una breve descripción de la situación actual del aprovechamiento pluvial y el tratamiento de la cosecha a nivel domiciliario. A continuación, se extiende el marco conceptual relacionado a la cosecha de agua de lluvia y el tratamiento para la misma. Explicando desde qué es un sistema de captación y sus elementos, los tipos de contaminantes posibles a encontrar y los diferentes procesos y operaciones para tratamiento.

### 4.1. Las Soluciones Basadas en la Naturaleza

“Las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) están inspiradas y respaldadas por la naturaleza y el uso o imitación de los procesos naturales para contribuir a la gestión mejorada del agua. Por consiguiente, la característica definitoria de una SbN no es si un ecosistema utilizado es *natural*, sino si los procesos naturales son proactivamente manejados para lograr un objetivo relacionado con el agua. Una SbN utiliza los servicios del ecosistema para contribuir a un resultado de gestión del Agua. Una SbN puede implicar la conservación o rehabilitación de ecosistemas naturales y/o la mejora para la creación de procesos naturales en ecosistemas modificados o artificiales. Se pueden aplicar a microescala (un inodoro seco) o a escala macro (el paisaje)” (ONU, 2018).

En concreto, hablar de la SbN es hacer referencia a “soluciones” enfocadas en optimizar la gestión del agua y los recursos naturales, integrando la relación de los ecosistemas y el bienestar humano. Y no necesariamente es para darle solución a algún problema, también tiene utilidad para ofrecer mejoras en la gestión de los recursos hídricos, como propuestas estéticas y para aumentar la productividad en los servicios. Como tal, la terminología es de este milenio, pero su aplicación abarca varios de miles de años. Sin embargo, el uso del término cada vez está más presente dentro de foros políticos como en literatura técnica.

El informe sobre el desarrollo mundial de los recursos hídricos para el 2018, presentado por la ONU, está dedicado a las SbN sobre el agua. Para fomentar la integración del bienestar humano con la hidrología y sus ecosistemas. Enfatiza la importancia de la integración ya mencionada, con base en la historia antropológica; menciona como ejemplo el colapso de grandes civilizaciones, basadas en ríos y zonas de lluvia, como lo fue la del Tigris-Éufrates, Nilo, el Indo-Ganges, el Río Amarillo y la Zona Maya; asentamientos urbanos que se instalaron en ciertos puntos donde la disponibilidad de Agua era basta y terminaron generando cambios hidrológicos y reducciones en la precipitación en hasta 30%. En algunos casos, la desertificación iniciada por cambios hidrometeorológicos puede verse acelerada por los cambios en el uso de suelo, incluyendo el pastoreo excesivo de ganado. Concluyendo que, en los últimos milenios de desarrollo de vida humana, se han alterado los paisajes, donde el principal factor es la agricultura y ha repercutido directamente en la degradación de la capital natural, llevando a una pérdida de capacidad productiva, desertificación y abandono de esas tierras en búsqueda de nuevas donde asentarse de nuevo y empezar de nuevo con el ciclo.

Hablar del aprovechamiento pluvial es un ejemplo claro de Soluciones basadas en la naturaleza. Ya que integrar estas ecotecnologías a nuestra vida diaria contribuyen en el cuidado del medio ambiente, consumiendo menos agua de la red, lo que conlleva en indirectamente a menos gasto energético y de recursos que se utilizan para potabilizar la misma, ocupando el agua de lluvia tratada en procesos que no requieren forzosamente recurso potable para poderse llevar a cabo; como lo es el regar, lavar la casa, descargas en WC o lavado de ropa. Por lo tanto el aprovechamiento pluvial impacta directamente el la mejoría del medio ambiente.

## 4.2. Sistema de Captación de Agua de Lluvia (SCALL)

Para la captación de Agua de Lluvia es necesario tener a nuestra disposición una serie de elementos o de infraestructura para poder aprovecharla y darle usos en nuestras casas; sin tratamiento alguno se podría utilizar para riego, lavado de patios o uso del WC, pero con una filtración más desinfección prácticamente sería posible tener recurso hídrico aprovechable en la mayoría de las tareas del hogar. A continuación, se describen los conceptos relacionados con la captación pluvial.

### 4.2.1. Superficie de Captación

Es el área dispuesta para captar el Agua pluvial. Por lo general se utilizan los techos de casa, escuelas, fábricas, etc. Aunque también podría captarse el recurso que escurre de las calles o estacionamientos.

### 4.2.2. Sistema de Conducción

Este respecta al conjunto de canaletas y tuberías que transportan el Agua de Lluvia desde su captación hasta su aprovechamiento final, pasando por los dispositivos de separación y desinfección, llevándola a su almacenamiento y disponiéndola para sus usos finales. El material utilizado en estas debe de ser resistente, liviano, fácil de unir entre sí e impermeable.

### 4.2.3. Separador de Primeras Lluvias

El uso de un separador de primeras lluvias es, literal, llevar a cabo lo descrito en su nombre. Esta acción es de suma importancia porque siempre las primeras lluvias arrastran los contaminantes depositados, tanto en el sistema de captación como en el de conducción, además de las concentraciones altas de contam

inantes dispuestos en la atmósfera, estas últimas se encuentran en el aire permanentemente, a causa de la erosión, producción industrial, la construcción o la rutina diaria en zonas urbanas donde se despiden hacia la atmósfera: iones, ácidos, bases y partículas químicas mencionadas en el capítulo 5 del presente documento. Por lo anterior se puede decir que los primeros volúmenes de cosecha de Agua pluvial se encuentran más contaminados, ya que arrastran todos los sólidos depositados sobre la superficie de captación, conducción y los contaminantes atmosféricos y, por ende, el volumen captado al inicio de una lluvia debería, en su caso, discriminarse para no contaminar el almacenamiento de agua limpia de lluvias previas.

Actualmente Isla Urbana en su instalación de sistemas de captación pluvial, propone el uso de un dispositivo llamado “*Tlaloque*”; este funciona con una capacidad establecida para separar un volumen al inicio de una lluvia. A juzgar por el análisis somero del dispositivo mencionado, realmente no se sabe si dicha acción conlleva a que el agua recolectada ya esté en las condiciones óptimas para su almacenamiento porque al no estar monitoreando en sitio y en tiempo real la calidad del agua, no se puede garantizar que la separación de la cantidad de primeras lluvias establecida sea la suficiente para dejar fluir agua con mejor calidad.

A la par de la realización del presente trabajo, se está llevando a cabo la planeación y diseño de un dispositivo para la separación de los primeros volúmenes de lluvia. Este dispositivo censa la calidad en tiempo real del recurso captado, por lo que no desecha una cantidad fija, es decir, depende de la calidad de cada lluvia que está siendo cosechada en ese momento. Permite su paso a los tanques de almacenamiento sin la incertidumbre de si o no las características preestablecidas para su almacenamiento y futuro uso.

#### 4.2.4. Filtro y Desinfección

Esta etapa del sistema es opcional; su instalación depende del uso del recurso captado; si sólo se tiene contemplado uso en riego, lavado de patios y para el WC, no será necesaria su implementación. Pero si se desea que el Agua pluvial cosechada se le pueda dar uso de Agua para consumo humano, este paso será necesario para mejorar la calidad del Agua y así poderla utilizar para: beber, limpieza personal, uso para preparación de alimentos, etc.

La filtración tiene como objetivo remover partículas suspendidas del caudal; puede ser con operaciones como filtros de arena, carbón activado o hasta micro membranas para remover partículas o hasta contaminantes químicos. La desinfección tiene la función de remover contaminantes biológicos, exponentes de enfermedades y plagas. Esta se puede realizar con componentes químicos con base en cloro, filtros de ósmosis inversa, tratamientos con luz ultravioleta, dosificación de ozono u operaciones de microfiltración, por mencionar solo las más comunes.

#### 4.2.5. Tanques de Almacenamiento

Estos son tinacos, cisternas o sistemas modulares donde se va a conservar el recurso captado, se pueden situar sobre la tierra o pueden estar enterrados. Deben ser de algún material resistente, impermeable y hermético para evitar pérdida o entrada de Agua o contaminación de esta, además de impedir el paso a animales e insectos. Dicho material puede ser de concreto reforzado, fibra de vidrio, polietileno o acero inoxidable.

La capacidad de un tanque de almacenamiento está en función del volumen de agua que entra en cierto intervalo de tiempo y la cantidad que es consumido. Se realiza una tabla que contenga: volumen de entrada, volumen acumulado de entrada, volumen de salida, volumen acumulado de salida y un resumen de la diferencia entre los volúmenes acumulados. Graficando los datos de la tabla anterior se obtiene la curva masa y se suman las diferencias de mayor volumen acumulado y la mayor del de salida, para obtener la cantidad total del tanque de almacenamiento.

#### 4.2.6. Ventajas y Desventajas de un SCALL

A continuación, se enlistan las posibles ventajas y desventajas del uso de un SCALL con base en Abdulla y Al-Shareef (2006), Water Texas Development Board (2006) y Romero (2017).

##### VENTAJAS

Reducir el consumo de Agua Potable de la red municipal o de otras fuentes, disminuyendo costos.

No se requiere de energía para la operación del sistema.

El uso o la disposición final del recurso captado está cerca de la fuente, por lo que no es necesario un sistema de distribución complejo, ni costoso.

Alta calidad en propiedades fisicoquímicas del Agua de lluvia.

El aprovechamiento de Agua pluvial reduce inundaciones y erosión de suelos.

La construcción, instalación y mantenimiento de estos es práctico y fácil de realizar.

##### DESVENTAJAS

Su funcionamiento depende directamente de la cantidad de Agua de lluvia que precipite en la zona y del área de la superficie de captación.

Los costos de inversión son altos, específicamente para los tanques de almacenamiento.

El costo del tratamiento depende la calidad de Agua deseada para los usos que se le dará.

Requiere mantenimiento frecuente de la superficie de captación, para evitar estancamiento de Agua.

1	Superficie de captación
2	Sistema de conducción
3	Separador de primeras lluvias
4	Filtro y Desinfección
5	Tanque de Almacenamiento



Ilustración 22 Sistema de Captación de Agua de Lluvia

### 4.3. Propiedades Físicas, Químicas y Biológicas del Agua

Como humanos requerimos de Agua en nuestro día a día; para la preparación de alimentos, hidratación, aseo personal, riego o simplemente para la limpieza de nuestro lugar de trabajo o recreación; solo por mencionar algunas. Y no necesariamente requiere la misma calidad para todos sus usos, se puede disponer de agua con ciertas características para limpieza de espacios comunes, como patios o jardines, pero probablemente podría causar problemas nocivos para nuestra salud. Dicho lo anterior, es importante la caracterización de las propiedades del Agua y, dependiendo de ésta, será el uso que se le pueda dar.

La NOM-127-SSA-1-2000 define las características físicas como aquellas perceptibles sensorialmente, con incidencia directa a las condiciones estéticas y de aceptabilidad del recurso; de estas, el sabor y el olor se calificarán por medio de los sentidos; el color y la turbiedad será mediante análisis de laboratorio. Las características químicas son las que respectan a la presencia de elementos o compuestos químicos que son determinados en laboratorio. Su detección es importante, ya que algunos de ellos son los causantes de infecciones nocivas a la salud. Y las microbiológicas son las que se enfocan en la existencia de microorganismos, indicadores de bacterias, que podrían generar enfermedades y hasta epidemias; para efectos de control sanitario se determina el contenido de coliformes totales y fecales.

#### 4.3.1. Parámetros Físicos

Los principales causantes del *color* en el Agua son la presencia de hierro y manganeso coloidal o en solución y el contacto con desechos orgánicos. El análisis cuantitativo para el color se realiza mediante su comparación visual con una escala estandarizada de platino-cobalto. (La unidad platino-cobalto es la que se produce al disolver un mg de platino/L en forma de ion cloro-platinato). Este método depende de la apreciación visual del color de la muestra por el analista en comparación con una escala

estandarizada. La percepción del color entre diferentes personas varía, por lo que se debe efectuar una selección del analista basada en su capacidad de apreciación del tono e intensidad del color (NMX-AA-045-SCFI-2001).

La *turbiedad* es la propiedad visible de una suspensión que permite el paso de la luz, causada por la presencia de partículas orgánicas suspendidas y disueltas en el Agua, como arcillas, y también por compuestos solubles coloridos, plancton y microorganismos. Esta propiedad es medida en unidades nefelométricas de turbidez (UTN).

Los *sólidos disueltos* son aquellos materiales solubles en el Agua, constituidos por materia orgánica e inorgánica, que permanecen después de haber sido evaporada y secada una muestra de 103°C a 105°C y previamente filtrada con poros de 1.5 micrómetros.

Los *sólidos suspendidos* son los sólidos sedimentables. Los suspendidos y coloidales están conformados por aquellos que son retenidos por el filtro de 1.5 micrómetros, y secados de 103°C a 105°C.

#### 4.3.2. Parámetros Químicos

El *potencial de Hidrógeno (pH)* es una medida de la concentración molar de iones de hidrógeno, medida con la cual en la naturaleza se determina que tan ácido o alcalino es una solución. El rango con el que se mide es de 1 a 14, siendo los menores a 7, ácidos, y los mayores, bases o alcalinos. En su mayoría las aguas naturales son neutras, con un pH de 6 a 8.

La *Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)* es un parámetro de contaminación que se relacionan con la cantidad de material orgánico presente en el Agua, este se basa en la oxidación química y es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por la porción de materia orgánica existente en una muestra.

Se conoce como *Agua dura* a aquella con presencia de iones de calcio y de magnesio, hecho que causa daño en tuberías, calentadores, calderas y otras unidades en las cuales se incrementa la temperatura del Agua. Una manera doméstica de detectar su presencia es en su contacto con el jabón, si se necesita de mucho jabón para producir espuma, tenemos una muestra de Agua dura.

#### 4.3.3. Parámetros Biológicos

Los *coliformes* son utilizados para medir la presencia de contaminación bacteriológica o la presencia de microorganismos, cabe mencionar que estos son los culpables de las infecciones en el tracto gastrointestinal. A su vez, se determinan en coliformes totales, y se dividen en subgrupos, que serían los coliformes fecales (termotolerantes) y la *Escherichia Coli*. Estos últimos están presentes en las heces fecales de los animales de sangre caliente y forman organismos patógenos, los cuales ponen en riesgo la salud pública al entrar en contacto con los seres humanos.

Y los organismos indicadores, como los helmintos, también son caso de estudio ya que la presencia de estos es símbolo de contaminación biológica. Los helmintos representan un elevado riesgo a la salud humana debido a que sus diversos estadios infecciosos (huevos embrionados o larvas) son altamente persistentes en el agua contaminada. Así, el agua constituye un vehículo directo o indirecto de diseminación de helmintos, aun cuando se encuentren en bajas concentraciones, dando lugar a enfermedades gastrointestinales, sobre todo cuando ésta se emplea para el riego de cultivos (NMX-AA-113-SCFI-2012).

## 4.4. Procesos y Operaciones unitarias

Los procesos y operaciones unitarias son métodos en donde se realizan fenómenos físicos y/o químicos, que se desarrollan dentro de reactores para modificar las condiciones de una determinada cantidad de materia más útil para nuestros fines. Cuando se efectúan modificaciones químicas en la muestra se le da el nombre de proceso unitario a diferencia de cuando son modificaciones físicas, se le conocen como operaciones unitarias.

### 4.4.1. Filtros de arena

El principal objetivo de estos filtros es la remoción de sólidos mayores a 10 micrómetros presentes en agua y la reducción de turbiedad, pero no remueven microorganismos de menor tamaño, por lo que no sería suficiente para una potabilización. La separación de partículas puede realizarse mediante filtros rápidos por gravedad, horizontales, a presión o filtros lentos de arena. Los filtros a presión son necesarios cuando se requiere mantener una carga de presión para la circulación del Agua (Maldonado, 2019).

La limpieza de un filtro de arena rápido o de alta tasa se realiza mediante un lavado, este consiste en hacer fluir Agua potable en el sentido contrario al flujo del tratamiento.

### 4.4.2. Filtro de carbón activado

El carbón activado es un material poroso con una afinidad alta por los compuestos orgánicos. El carbón puede producirse en forma de polvo, gránulos o pelets cilíndricos; y estos se activan mediante procesos térmicos o químicos; consisten en oxidar parcialmente el carbón, para lograr que se formen poros, evitando que se gasifique y se pierda más carbón del necesario, se efectúa a temperaturas entre 600 y los 1,100°C con una atmósfera controlada (lograda mediante inyección de vapor de agua o nitrógeno). Después de esta etapa se carboniza la muestra a 550°C y posteriormente se lava para eliminar los restos de reactivos y subproductos (Carbotecnia, 2019).

Es utilizado para eliminar sabor, olor y color e incluso para la remoción de cloro presente en el agua, los primeros tres pueden ser ocasionados por plaguicidas y sustancias orgánicas. La vida útil de un lecho de carbón activado depende de la cantidad utilizada, la fuente y la calidad del Agua, además del tiempo de contacto.

Existe una variante en estos filtros, consiste en impregnar el carbón activado con plata. Esto permite inhibir el desarrollo de microorganismos dentro del mismo, ya que desprenden iones de plata, proporcionando protección antimicrobiana a lo largo de la vida útil del filtro. Es importante que la plata se encuentre bien impregnada al carbón activado, ya que en caso contrario podría desprenderse hacia el Agua, por lo que incumpliría la NOM-127-SSA-1-2000 al contaminarse con iones de plata y el carbón quedaría desprotegido, por lo que perdería sus propiedades de filtración.

### 4.4.3. Filtro KDF

Un filtro de Degradación Cinética de Flujo (KDF, por sus siglas en inglés) está compuesto por gránulos de cobre-zinc que reducen la concentración de contaminantes del Agua mediante reacciones de oxidoreducción. Tiene la función de remover hierro, ácido sulfhídrico y metales pesados como el mercurio, plomo, cromo, y no permite la reproducción de microorganismos (Romero, 2017).

### 4.4.4. Intercambio Iónico

Es un proceso de separación química basada en la transferencia de fluido-sólido. Ocurre con una reacción donde los iones móviles hidratados son intercambiados por iones de igual carga en el fluido. Este proceso consiste en pasar el fluido por un intercambiador catiónico y/o aniónico sólido, reemplazar

los cationes y aniones existentes en el agua por ion hidrógeno ( $H^+$ ) y el ion hidroxilo ( $OH^-$ ), respectivamente (Manahan, 2007).

También están diseñados para el cambio de las sales de calcio y magnesio por sales de sodio solubles y disminuir la dureza del Agua. Mas que funcionar como suavizador, reduce impurezas como el hierro, sílice y otros metales. Para llevar a cabo esto se utilizan resinas catiónicas o sustancias esféricas granuladas, insolubles en Agua (Puga, 2018).

#### 4.4.5. Luz Ultravioleta

La luz ultravioleta (UV) es parte del espectro electromagnético, situado entre los rayos X y la luz visible. El uso de la luz ultravioleta se enfoca en la desinfección del Agua, es una operación física que no altera la composición de esta. Este uso se ha restringido a instalaciones pequeñas, como las de uso doméstico. Las longitudes de onda más efectivas para dicha desinfección son las comprendidas entre 240 y 280 nm, denominada región UV-C. La radiación UV es emitida por una lámpara de arco de mercurio de baja presión; tiene la propiedad de inactivar protozoos, bacterias, bacteriófagos, levaduras, virus, hongos y algas. Pero si el Agua presenta mucha turbidez, la luz ultravioleta no tendrá la misma efectividad (Romero, 2017).

#### 4.4.6. Cloración

Uno de los métodos más utilizados, si no es que el más, es con base en el cloro y sus derivados. El cloro ( $Cl_2$ ) es un gas amarillo-verdoso que pertenece al grupo de los halógenos, se percibe su presencia en el ambiente a tener un olor irritante, es más pesado que el aire, por lo que se esparce al ras de suelo. En frío no ataca a los metales, pero por el contrario en calor es un poderoso oxidante y reacciona casi con todos los elementos. En presencia de cloro, los vapores de amoníaco forman una nube de cloruro de amonio, con esta reacción se detectan las fugas de cloro, aunque sean muy débiles (AEAAS, 1984).

La solubilidad del cloro en agua es baja, depende de la temperatura y presión total. Considerando un escenario a temperatura ambiente y presión de la ciudad de México, se tienen  $20^\circ C$  y 586 mmHg, por lo que tendríamos una solubilidad aproximada de 6 gr de cloro por kilogramos de solución (AEAAS, 1984).

El cloro es un potente germicida, eficiente y seguro cuando se usa adecuadamente, además de ser el desinfectante más económico y práctico en su aplicación. El cloro remueve las bacterias, hongos, virus, esporas y algas presentes en el Agua, además destruye sulfuro de hidrógeno, amoníaco y otros compuestos nitrogenados. Importante en los sistemas tradicionales y plantas de potabilización por su propiedad residual que mantiene el agua desinfectada a la salida del tratamiento.

Los derivados del cloro son la presentación en que se comercializa, para un mejor manejo de dicho elemento, la forma más comercial son los hipocloritos, el de calcio ( $Ca(ClO)_2$ ) como producto sólido, venta en pastillas, y el hipoclorito sódico ( $NaClO$ ) como estado líquido para dosificación en el agua a desinfectar. Los hipocloritos tienen un poder oxidante equivalente al cloro gas, y pueden ser utilizados para los mismos fines en el tratamiento de Agua. La elección del producto más conveniente depende de aspectos técnicos y económicos, para plantas de potabilización menores a 2,000 personas se aconseja utilizar los hipocloritos, y para plantas municipales o de mayor magnitud, sí se recomienda el uso del gas cloro (AEAAS, 1984).

La desinfección basada en cloro y sus derivados se debe al reactivo producido por la reacción generada al entrar en contacto con el agua, esta produce ácido hipocloroso ( $HClO$ ), el factor desinfectante en esta operación (ITC, 2019).

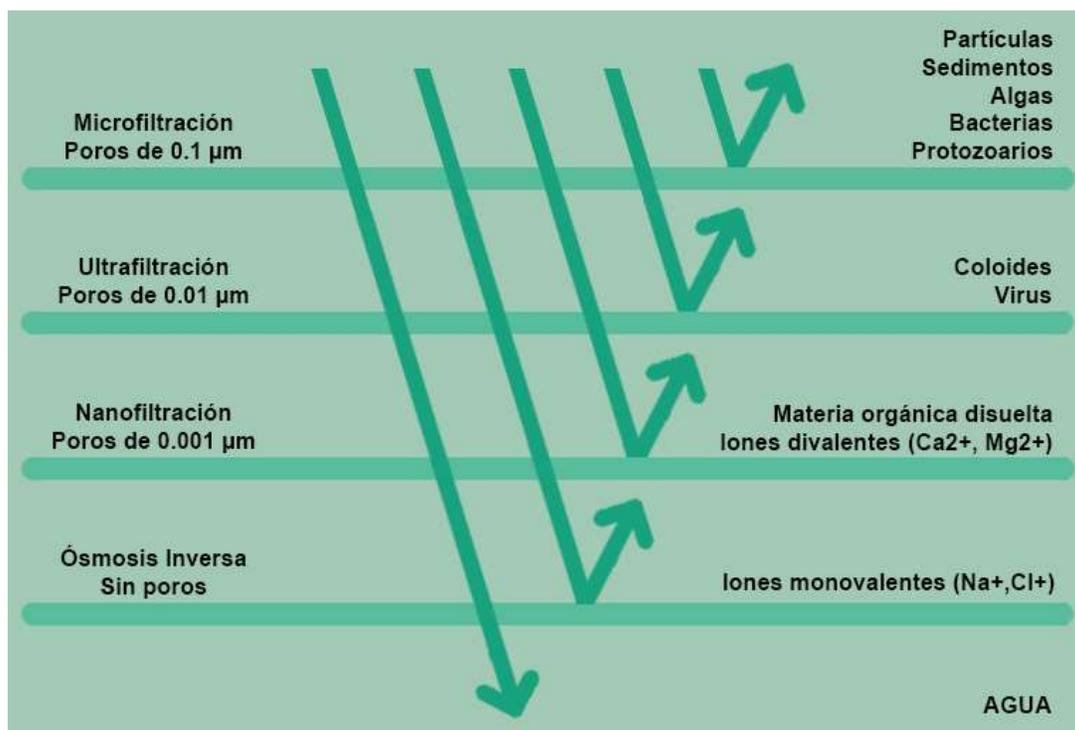
#### 4.4.7. Procesos de membrana

Los procesos de membrana son métodos físicos para separación de solutos presentes en el agua. Dicha separación se realiza con base en el tamaño de los solutos o en función de que algunos de ellos están o no ionizados. Los filtros son medios muy utilizados en el tratamiento de agua para la separación de arcillas, limos, arenas y partículas suspendidas, pero los procesos de membrana son dirigidos hacia la separación de sustancias mas pequeñas como sales y iones. En un proceso de membrana, el fluido recorre una barrera y debido a la diferencia de presión entre las dos superficies de la membrana, los contaminantes se mantienen de un lado y el agua dulce corre por el otro extremo (Fluence, 2016).

La **ultrafiltración** es otro proceso de membranas en el cual los filtros tienen aproximadamente un tamaño de filtración entre 0.1 y 0.01 micras. Esto permite retener proteínas, ácidos grasos, bacterias, sólidos suspendidos, protozoarios y algunos virus existentes en el Agua (Fluence, 2016).

Las membranas de **nanofiltración** son porosas, del orden de 10 angstroms (1 angstrom es equivalente a  $1e-4$  micras). Su desempeño está entre las membranas de ósmosis inversa y la ultrafiltración, pero es mucho más eficiente energéticamente que la primera de estas, porque opera a presiones más bajas (Sepúlveda, 2009).

La ósmosis es conocido como el proceso que utilizan las células para transportar el agua, la **ósmosis inversa** invierte este fenómeno. Se utiliza la presión para forzar un solvente a través de una membrana semipermeable, el Agua pasa por la membrana debido a que sus moléculas son de menor tamaño que los poros de esta, el tamaño de los poros en los filtros de ósmosis inversa es generalmente de 0.0001 micras. En concreto un sistema de ósmosis inversa para potabilizar Agua, consiste en una membrana a través de la cual se va a circular el recurso hídrico y esta sólo permitirá el paso de las moléculas de Agua pura, el restante con las partículas que contenía se desecha. Con este proceso se pueden remover partículas disueltas, sulfatos, fluoruros, nitratos, fosfatos, calcio, metales pesados, bacterias, virus y hongos (Fluence, 2016).



Procesos de membrana. Fuente: Sepúlveda (2009)

## Capítulo 5. Características de la calidad del Agua de Lluvia

En general se considera que el Agua de la lluvia tiene buena calidad, esta dependerá de la atmósfera en la zona en que se formen las nubes. Si hay industria, zona urbana o es una zona rural, la calidad será diferente. Por ejemplo, el Agua de lluvia en una zona rural sin industria será de mejor calidad que una en zona urbana con industrias, ya que la contaminación de estas últimas además de la emitida por el transporte de combustión son los mayores contaminantes atmosféricos. Y para afirmar esta premisa me apoyo en la doctora Rocío García Martínez, investigadora del Grupo de aerosoles atmosféricos de CCA, y cito: “El problema no es el agua de lluvia si no las condiciones atmosféricas.” “Algunos de los metales pesados que se encontraron en el agua de lluvia son aluminio, cadmio, cromo, vanado, plomo, zinc, manganeso, hierro, mercurio, arsénico, rodio, paladio, rubidio y níquel; algunos de estos muy evidentes por provenir de la gasolina y los convertidores catalíticos” (Milenio, 2019).

Por otro lado, aparte de los contaminantes recogidos en la atmósfera, la lluvia al escurrir por las superficies antropogénicas se contamina con partículas inorgánicas, orgánicas y microorganismos. Algunos de los contaminantes que se podrían presentar en el Agua de lluvia son los siguientes:

- **Parámetros físicos:** La concentración de sólidos disueltos presentes en agua de lluvia está en función de las corrientes de aire, las características físicas del sitio y de la intensidad de lluvia; se espera oscile entre 10 y 100 mg/l. En cuanto al color y la turbidez, por lo regular se tienen parámetros de medición no muy altos, valores nulos o llegan a caracterizarse hasta 100 UPC y 50 UTN, respectivamente.
- **Parámetros Químicos:** El potencial de hidrógeno se ve influenciado por la presencia de iones de calcio y magnesio; se registra un comportamiento neutro con algunos despuentes bases o alcalinos no mayores a 7.5 y ácidos no menores a 6.5. La presencia de aniones tales como fluoruros ( $F^-$ ), cloruros ( $Cl^-$ ), nitratos ( $NO_3^-$ ) y sulfatos ( $SO_4^-$ ), se deben principalmente por la emisión de contaminantes antropogénicos hacia la atmósfera y se espera encontrar presencia de nitratos y sulfatos en cantidades no mayores a 15 mg/l. De otros aniones no se esperan cantidades considerables. También se espera encontrar cationes en las muestras de agua pluvial como calcio ( $Ca^+$ ), magnesio ( $Mg_2^+$ ), potasio ( $K^+$ ), sodio ( $Na^+$ ) y amonio ( $NH_4^+$ ), se prevé encontrar parámetros máximos de calcio en 15 mg/l y los otros mencionados en cantidades menores a 5 mg/l; esto debido a las partículas de material de construcción y a las de origen natural ocasionadas por la erosión del suelo. En función de los metales pesados encontrados como partículas de polvo en el aire se espera encontrar en las muestras de agua pluvial algunos como aluminio, cadmio, cromo, vanado, plomo, zinc, manganeso, hierro, mercurio, arsénico, rodio, paladio, rubidio y níquel (Milenio, 2019).
- **Parámetros bacteriológicos:** La presencia de microorganismos o partículas biológicas que se pueden presentar en el Agua de lluvia son provocadas por los coliformes fecales y *Escherichia Coli*, que son arrastrados con el escurrimiento del agua sobre la superficie; y por proliferación de los microorganismos y bacterias que recoge la lluvia en la atmósfera y entrar a nuestros organismos de manera dérmica o por ingesta (Milenio, 2019).

### 5.1. En la Ciudad de México

#### 5.1.1. Características Atmosféricas

El Valle de México, tiene una elevación promedio de 2,240 msnm y una superficie de 9,560 kilómetros cuadrados. El área urbanizada se extiende en una cuenca semicerrada, al suroeste del valle, donde las condiciones naturales no favorecen a una adecuada ventilación de la atmósfera. Según García

(2013), algunas de las características fisiográficas y climáticas que afectan la ventilación del valle son las siguientes:

- El entorno montañoso que rodea la cuenca, con una altura promedio de 3,200 msnm y con alturas superiores a 5,400 msnm, constituye una barrera natural que entorpece la circulación del viento y por ello no se permite la dispersión de los contaminantes.
- Las frecuentes inversiones térmicas que ocurren dentro del valle, en más del 70% de los días del año, causa un estancamiento temporal de las masas de aire en la atmósfera. Ello inhibe su capacidad de autodepuración y favorece la acumulación de los contaminantes. Esto perdura hasta que, con el transcurrir del día, la inversión térmica se rompe debido al calentamiento de la atmósfera y así los contaminantes se dispersan.
- La intensa radiación solar durante todo el año favorece la formación de ozono. Resultado de las reacciones que la luz ultravioleta desencadena en los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos emitidos a la atmósfera, donde estos últimos son precursores del ozono.
- La altitud determina que el contenido de oxígeno sea 23% menor que a nivel del mar, provocando que los procesos de combustión sean más contaminantes.

Los contaminantes aerobiológicos son definidos como *polen*, “polvo muy fino”. Son partículas fecundantes masculinas, necesarias para la reproducción de las plantas, conocidos como aeroalérgenos, estos son transportados por el aire, y son capaces de producir alergias respiratorias, cutáneas o conjuntival; producida por ácaros, faneras de animales, pólenes y hongos. Al estar presentes como partículas en el aire, son arrastradas con la precipitación del Agua (REMA, 2018). Por lo general la contaminación de la atmósfera con polen se mantiene baja durante los meses con mayor precipitación (mayo a septiembre) por el fenómeno de lavado.

Tabla 9 Semáforo de polen en la atmósfera para la estación de Coyoacán, fuente: REMA, 2018

REMA Estación Coyoacan	Alergenicidad	Actualización en Base de datos							Pronóstico Del 26 al 02 de octubre de 2018	
		17-sep-18	18-sep-18	19-sep-18	20-sep-18	21-sep-18	22-sep-18	23-sep-18		
<i>Casuarina</i> (Pino australiano)	B	☉	☉	●	●	●	●	☉	●	
<i>Cupressaceae</i> (Ciprés, Junípero, Tuya)	A	●	●	●	●	●	●	●	●	
<i>Ligustrum</i> (Aligustre, Trueno)	A	☉	●	●	☉	☉	☉	●	●	
<i>Myrtaceae</i> (Eucalipto, Calistemo)	B	☉	☉	☉	●	●	●	●	●	
<i>Pinus</i> (Pino)	M	☉	●	●	●	●	●	●	●	
<i>Schinus</i> (Pirul)	B	☉	●	☉	☉	●	●	●	●	
<i>Amaranthaceae</i> (Quintonil, Cenizo, Quelite)	A	●	●	☉	●	●	●	☉	●	
<i>Asteraceae-Anthemidae</i> (Botoncillo, Camomila)	A	☉	☉	●	☉	●	●	●	●	
<i>Poaceae</i> (Pastos)	A	●	●	●	●	●	●	●	●	
<i>Urticaceae</i> (Ortiga, ortiguilla, Hierba de muro)	A	☉	●	☉	●	●	●	●	●	
Niveles de concentración para granos de polen / m3 de aire (gp/m3)										
		Nulo ☉	Bajo ●	Moderado ●			Alto ●	Muy Alto ●		
Niveles de alergenicidad										
Baja									(B)	
Moderada									(M)	
Alta									(A)	

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

Por otra parte, también se encuentran contaminantes fisicoquímicos en la atmósfera. Algunos de estos son caracterizados por el Grupo de Interacción Océano Atmosférico, del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM. Los parámetros caracterizados son las concentraciones de partículas PM10, de CO, de ozono, de los NOx y de SO<sub>2</sub>.

Las **PM10** se definen como aquellas partículas sólidas o líquidas de polvo, cenizas de carbono (hollín), metálicas, de cemento o polen, dispersas en la atmósfera y cuyo diámetro varía entre 2.5 y 10 micrómetros.

Caracterizadas por tener un pH básico; estas son emitidas en un 78% por polvo suspendido en la atmósfera, 7.6% generadas por la industria, construcción y el comercio y 6.5% representa la contaminación debida al transporte. La exposición a estas partículas generar problemas respiratorios, aunque en menor cantidad que las PM2.5, por su mayor tamaño no alcanzan los alveolos pulmonares, pero pueden generar alergias y enfermedades respiratorias (PRTR, 2017). En la ilustración 23 se observa la concentración de partículas PM10, parametrizadas en el Valle de México, el día 28 de septiembre del 2018, por el Grupo de Interacción Océano Atmósfera (GIOA) del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.

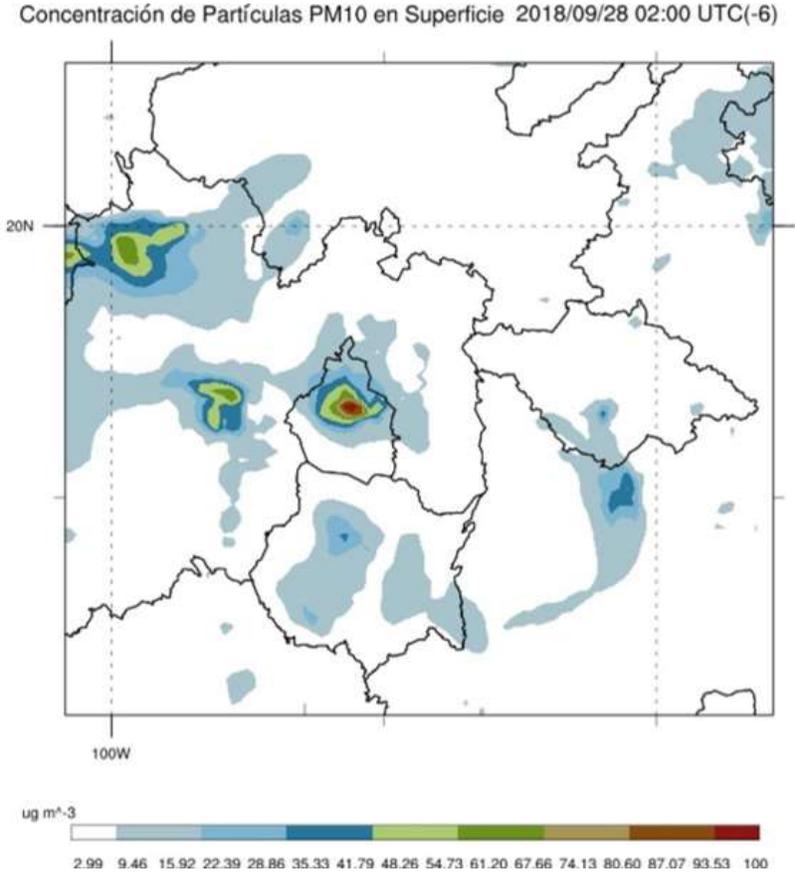


Ilustración 23 Concentración de partículas PM10, en el Valle de México. Fuente: GIOA, 2018

Las PM10 no están ligadas en su mayoría a la actividad humana, por lo que las mayores concentraciones de estas se encuentran en la madrugada, momento del día en que no hay tanta actividad antropogénica en la zona urbana, pero sí podría haber vientos fuertes que resuspendan el polvo, polen, partículas de las heces fecales, cenizas y otros materiales suspendidos en la superficie (GIOA, 2018).

El **monóxido de carbono (CO)** es un gas incoloro, inodoro y no irritante, pero sumamente tóxico. Se produce en varios procesos, pero principalmente por la oxidación de metano proveniente de descomposición de materia orgánica y por la combustión incompleta de combustibles fósiles, como

petróleo y derivados, carbón y gas natural. En una atmósfera no contaminada su concentración es muy baja y estable, alrededor de los 0.1 ppm. Las altas concentraciones de CO afectan el transporte de oxígeno en la sangre, pudiendo derivar en mareos, pérdida de coordinación muscular y capacidad intelectual, hasta la pérdida de conocimiento, convulsiones y muerte. El límite máximo permisible definido por la OMS es de 9 ppm (Moretton, 1996). En la siguiente ilustración se representa la concentración máxima observada de CO para el Valle de México, un 28 de septiembre del 2018, obtenida del GIOA.

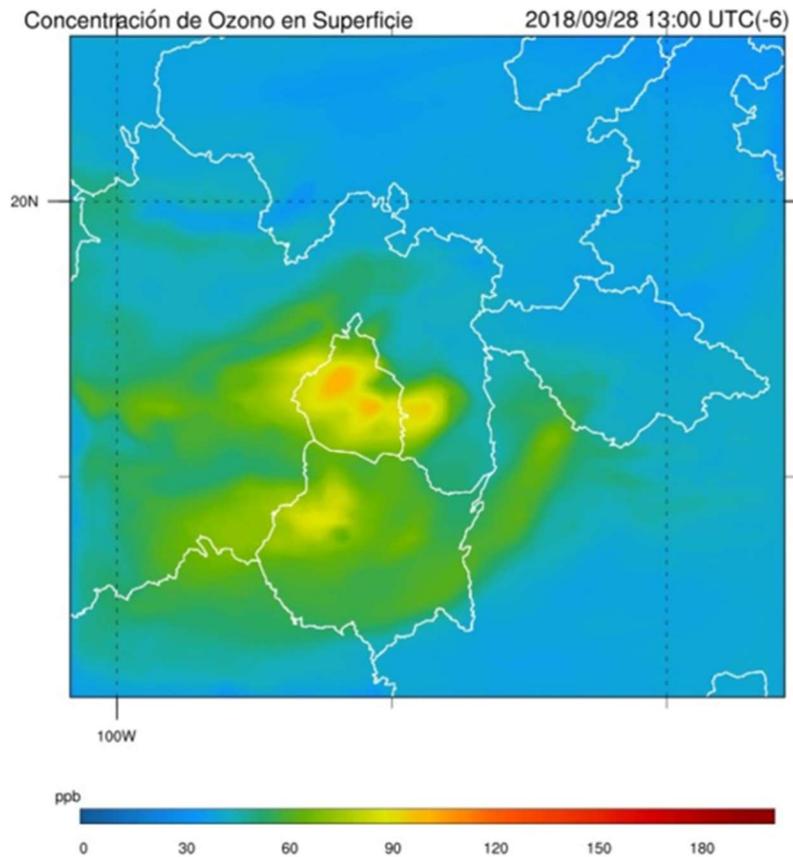


Ilustración 24 Concentración de Ozono en la atmósfera, para el Valle de México. Fuente: GIOA, 2018

El monóxido de carbono está altamente relacionado con las actividades humanas, en su mayor parte por la quema de combustibles, por ende, los mayores índices de CO en el Valle de México se encuentran en horas pico de movimiento de personas en la zona urbana.

Las actividades biológicas terrestres tienen impacto directo sobre la contaminación atmosférica, como lo es la simple actividad de respiración aeróbica, que emite dióxido de carbono  $\text{CO}_2$ , que, al mezclarse con el agua de lluvia, forma ácidos débiles que originan un comportamiento ácido de pH de 5.0 a 5.6 (Gallardo y García, 1999).

En Norteamérica, el **dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ )** y los **óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ )** son emitidos por fuentes antropogénicas, como la fundición de metales y la quema de combustible, y por fuentes naturales como volcanes, incendios forestales y relámpagos. Sin embargo, la mayoría de las emisiones de estos contaminantes que contribuyen a la lluvia ácida, son producto de actividades humanas (CEC, 2008).

La exposición a los NOx puede provocar irritación en los sistemas respiratorios y oculares. A largo plazo, pueden generar enfermedades respiratorias crónicas y cerebrovasculares. A continuación, se observa la máxima concentración de NOx en el Valle de México el 28 de septiembre del 2018, según el GIOA. A pesar de ser un contaminante producido por la combustión en procesos antropogénicos, el horario de su mayor concentración es en horas de poca actividad humana, pero podría haber procesos industriales en las zonas conurbadas y ciertos mecanismos de transporte desde esas zonas y, por ende, aumentó la cantidad de estos contaminantes.

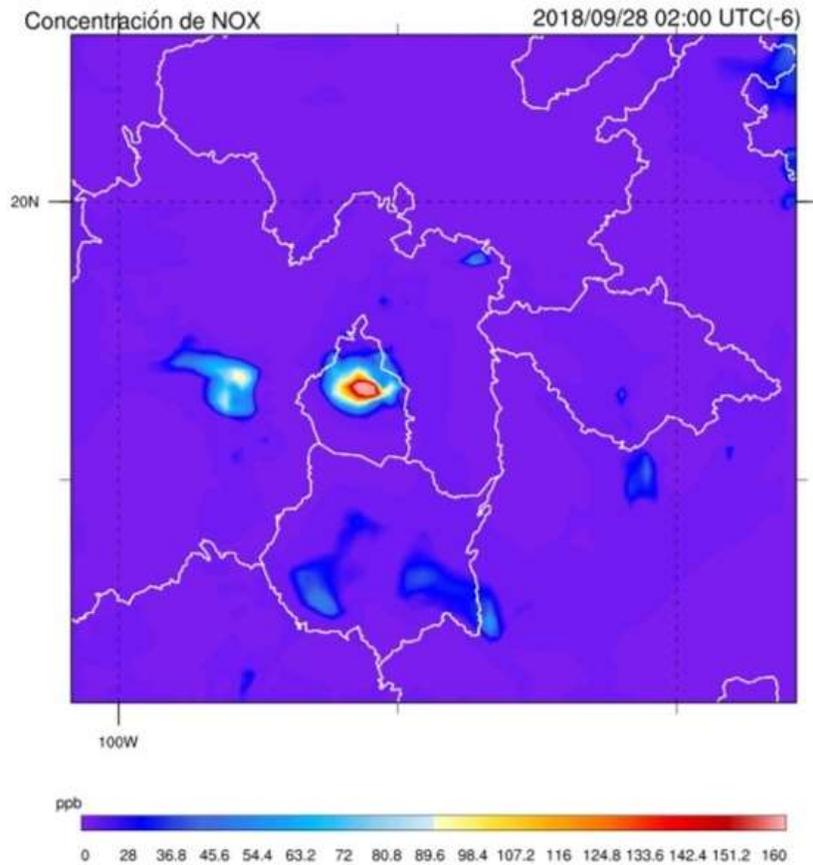


Ilustración 25 Concentración de NOx en el Valle de México. Fuente: GIOA, 2018

El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es un gas incoloro, irritante y con un aroma penetrante; no es inflamable, ni explosivo, pero si es muy soluble en agua. Es el principal responsable de la lluvia ácida. Es emitido por la quema de combustibles. A cierta concentración provoca enfermedades y deficiencias respiratorias, irritación ocular, alteraciones psíquicas, paro cardíaco y colapso circulatorio (FSG, 2013). En la siguiente imagen se observan las máximas concentraciones de SO<sub>2</sub> para el valle de México, según el GIOA, el 29 de septiembre del 2018.

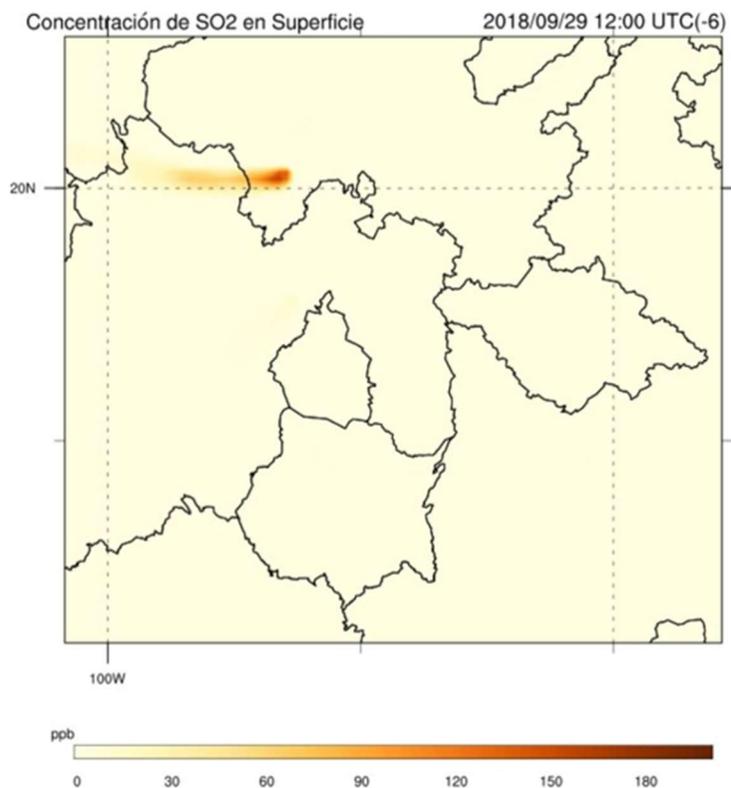


Ilustración 26 Concentración de SO<sub>2</sub> en el Valle de México. Fuente: GIOA, 2018

La concentración de SO<sub>2</sub> en la zona del Valle de México es casi nula durante todo el día, sólo se observó presencia de estos al mediodía del 29 de septiembre del 2018 en la zona norte de la cuenca, límite con el estado de Hidalgo. Por lo que no representan índices de contaminantes fisicoquímicos considerables para las lluvias de esos días y podríamos prescindir de su concentración, a menos que los estudios a consultar de calidad de Agua de Lluvia indiquen presencia de SO<sub>2</sub> en el Agua, aunque no provenga de la atmósfera local de nuestro caso estudio para el diseño del dispositivo capaz de mejorar la calidad de Agua de lluvia. Cabe mencionar que, gracias a una nota periodística de Rebeca Jiménez, para el Universal (2006) se identificó que dichas emisiones son provenientes del corredor Tula-Vito-Apaxco, donde se encuentra mucha industria y fábricas que trabajan a base de combustóleo y diesel, principalmente en los giros: textilero, metalmecánico, fundidor y químico; cuyas emisiones podrían ser la causante de los disparos de azufre.

**El ozono (O<sub>3</sub>)**, un gas inodoro e incoloro, se considera un gas benéfico para la vida humana, al absorber la radiación ultravioleta en la estratosfera y permitir la vida en el planeta. Pero cuando el ozono se concentra en las capas inferiores de la atmósfera, se le considera un contaminante, y no sólo perjudica la salud, también puede producir corrosión en edificios, rocas y tiene contribución al calentamiento global (DMA, 2016).

El ozono es producido por las reacciones fotoquímicas (las reacciones fotoquímicas son aquellas que están iniciadas o provocadas por la absorción de luz; casi siempre, visible o ultravioleta) entre los compuestos orgánicos volátiles y los óxidos de nitrógeno. Donde en condiciones de estabilidad atmosférica la concentración de ozono es proporcional a la intensidad de la energía solar, y la producción de este es menor a medida que disminuye la intensidad de la radiación y es prácticamente nula durante la noche (Solaz, 2001).

El proceso natural de formación del ozono en la estratósfera es porque el oxígeno molecular se fotodisocia por absorción de radiación ultravioleta y más adelante a mayor altura, el ozono reacciona produciendo moléculas de oxígeno. De manera general, la formación del ozono en la estratósfera ocurre en dos pasos; en el primero los rayos UV rompen fotolíticamente la molécula de oxígeno ( $O_2$ ), separándola en dos átomos de oxígeno (O). En el segundo, cada átomo de oxígeno colisiona con otra molécula de oxígeno formando una molécula de ozono ( $O_3$ ). Y este último puede separarse fotolíticamente por acción de la luz ultravioleta para generar la misma molécula de oxígeno y un átomo de oxígeno excitado, a este ciclo de formación-destrucción del ozono se le conoce como ciclo de Chapman. La mayor parte del ozono en la tropósfera, la capa más cercana a la superficie terrestre se produce cuando los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), el monóxido de carbono (CO) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) reaccionan en presencia de la luz solar; estas pueden ser de origen natural o antropogénico. Las fuentes precursoras de ozono más importantes, generadas por el hombre, son las emisiones vehiculares, industriales y químicas (DMA, 2016).

El calor y la contaminación producida por la industria y el transporte son los principales factores para la formación de ozono en la atmósfera superficial. Por eso en temporada de calor y con poco viento el ozono alcanza niveles peligrosos para la salud humana. Los principales riesgos generados por este contaminante en los humanos son deficiencias en el sistema respiratorio, irritación ocular y alteración en el sistema inmunológico. En la siguiente imagen se observa la mayor concentración de ozono en la atmósfera del valle de México para el 28 de septiembre del 2018, se puede distinguir que es mínima la presencia de este contaminante. Mientras no supere los 180 ppm, se considera que no es riesgoso para la salud (Sanitas, 2018).

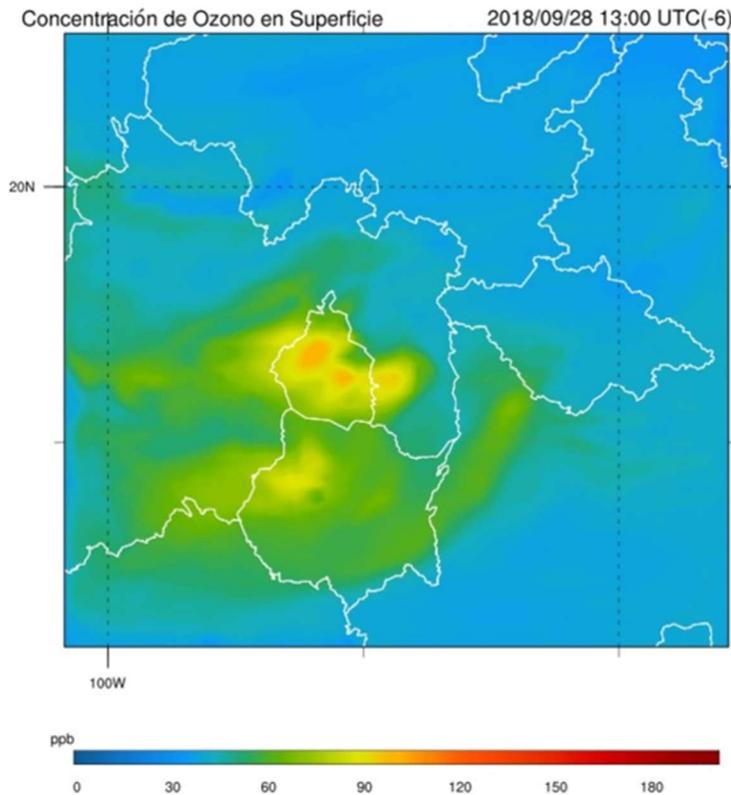


Ilustración 27 Concentración de ozono en el Valle de México. Fuente: GIOA, 2018

Las concentraciones de contaminantes atmosféricos biológicos y fisicoquímicos no son constantes a lo largo del año; e incluso estos pueden variar durante una misma lluvia, ya que conforme la lluvia se produce, esta va removiendo los contaminantes de la atmósfera por lo que al final de la lluvia encontraremos más limpio el aire que al principio de la misma.

### 5.1.2. Origen del Agua de Lluvia en la CDMX

La naturaleza siempre está en movimiento, y el Agua en circulación, recorre diferentes ecosistemas y cambia de estado durante este recorrido con ayuda de un gran cómplice, el sol. A todo el proceso anterior se le conoce como ciclo hidrológico. Se presenta en dos procesos diferentes, el ciclo corto y el ciclo geológico. El primero de estos se realiza en la región oceánica; son ciclos de 3 a 4 días donde el Agua se evapora, condensa, precipita y reinicia el ciclo. El segundo es un ciclo largo con una duración que puede alcanzar miles o millones de años, en el cual el agua se evapora, forma nubes y estas son transportadas a los continentes, donde se incrementa la humedad por la evaporación de los cuerpos de agua superficiales y después precipita para escurrir, infiltrarse y llegar a los mantos acuíferos. Posteriormente escurrirá hacia los océanos para completar el ciclo. A continuación, se describen las principales etapas del ciclo del Agua (UNEFA, 2008; Sánchez, 2019 y Renom 2019):

- A** Evaporación: Por efecto de la radiación solar la temperatura del Agua se eleva para iniciar la evaporación, la velocidad de condensación es lenta hasta llegar al equilibrio dinámico, donde se alcanza la mayor presión en el sistema, lo que se conoce como presión de vapor. El equilibrio dinámico se alcanza más rápido mientras mayor es la superficie de contacto, y mientras más vapor hay en el sistema la velocidad de condensación aumenta.  
El recurso hídrico, puede ser evaporado desde el océano, cuerpos de Agua superficiales, evapotranspiración vegetal (las raíces de las plantas absorben agua infiltrada, una parte es retenida y la otra es transpirada) o interceptación (evaporación del agua acumulada en las hojas o copas de árboles) y evaporación del escurrimiento en el suelo (Sánchez, 2019).
- B** Formación de Nubes: El vapor de Agua sube por la atmósfera por una diferencia de densidad, hasta formar nubes. Conforme este vapor escala en altura, pierde temperatura y al bajar su temperatura inicia el proceso de condensación, encargado de precipitarla en forma de gotas.  
La formación de nubes se produce por dos procesos, cuando el vapor de agua se sobrecalienta y por su mismo forma gotitas nubosas, llamado *nucleación homogénea*. Y con los núcleos de condensación, la fuente principal de estos son los aerosoles atmosféricos (partículas suspendidas en el aire producidas por procesos en la tierra, agua o la misma atmósfera), estos se clasifican en: Núcleos Aitken ( $<0.2 \mu\text{m}$ ), núcleos grandes ( $0.2\text{-}1.0 \mu\text{m}$ ) y núcleos gigantes ( $>1.0 \mu\text{m}$ ). Y se vuelven núcleos de condensación cuando estas partículas microscópicas de polvo, humo, sulfatos, polen etc., se condensan con el vapor de agua formándose gotas de nube (aproximadamente de  $0.02 \text{ mm}$ ), llamado *nucleación heterogénea* (UNEFA, 2008).
- C** Transportación: Por causa de los vientos, las nubes y el vapor de agua pueden viajar en el aire y así llegar de los océanos hacia los continentes.
- D** Precipitación: Después de que el Agua es condensada, se forman gotas y estas por su propio peso caen en forma de lluvia. Las gotas de lluvia se forman por dos procesos Bergeron y de coalescencia o colisión. *El proceso de Bergeron* ocurre cuando los cristales de hielo adquieren gotitas de agua super frías cercanas y así cuando ganan masa empiezan a caer, por la diferencia de temperaturas entre la nube y el nivel de la tierra, estos cristales de hielo pueden derretirse mientras caen y convertirse en lluvia. Y la otra manera de formación es por *Coalición o Coalescencia* es cuando las gotitas de agua se fusionan para crear otras más grandes, la resistencia del aire provoca que las gotitas de agua en una nube permanezcan inmóviles, cuando se produce turbulencia, las gotitas chocan, formando gotas más grandes para vencer la resistencia del aire y caer como lluvia (Renom, 2019).
- E** Infiltración: Gracias a la porosidad del suelo natural, el Agua puede infiltrarse al subsuelo y así llegar a los mantos acuíferos, para iniciar con el escurrimiento subterráneo.

- F** Escorrentía superficial: Por la pendiente natural del terreno y las características de este, el Agua escurre por gravedad dentro de zonas urbanizadas o en zonas naturales, formando ríos, lagos y embalses; otro porcentaje se evapora y una parte importante sigue su camino hasta el mar.
- G** Escorrentía Subterránea: Después de que el Agua se infiltra en el suelo, esta llega a los mantos acuíferos, donde es transportada de vuelta al mar para reiniciar el ciclo hidrológico. En este mismo recorrido, el Agua va mejorando su calidad, al pasar por un proceso de filtración natural.

Otros conceptos fundamentales son la **escorrentía directa**, es la que llega a los cauces superficiales en un periodo de tiempo corto tras la precipitación, y engloba la escorrentía superficial y la subsuperficial; y la **escorrentía básica**, alimenta los cauces superficiales durante la temporada de estiaje, engloba la escorrentía subterránea y la superficial diferida, esta última es la que queda retenida en la superficie como hielo, nieve, lagos o embalses (Sánchez, 2019).

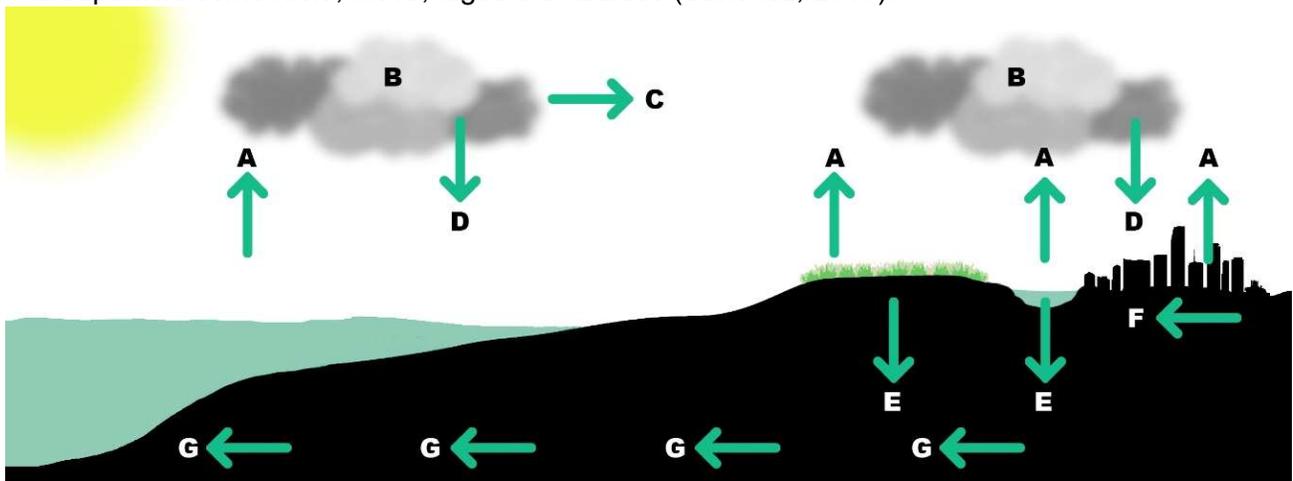


Ilustración 28 Ciclo Hidrológico

Si bien la mayor cantidad de Agua evaporada tiene origen en los océanos, no toda esta llueve en los continentes. En su mayoría cumple un ciclo hidrológico dentro de la misma región oceánica; cerca del 92% cumple un ciclo corto y la restante circula por el continente completando un ciclo hidrológico geológico. En la siguiente imagen se ilustra en qué cantidades se evapora, cuánta llueve en el mismo océano; cumpliendo con un ciclo hidrológico rápido; y cuánta entra a continente; iniciando un ciclo hidrológico geológico, que termina una vuelta cuando el agua que llueve se infiltra y de manera subterránea escurre hasta llegar de regreso a los océanos (Price, 2003).

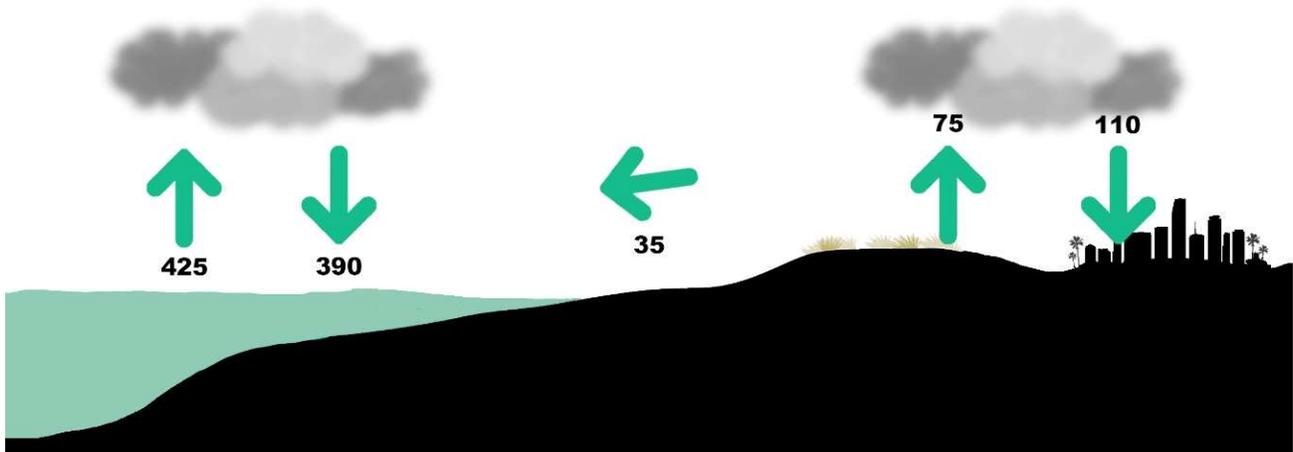


Ilustración 29 Cantidad de Agua en el ciclo hidrológico en km<sup>3</sup>/año. Elaborado con datos de Price (2003)

Para poder conocer el fenómeno de la precipitación pluvial en la zona de estudio y su potencial aprovechamiento, es importante conocer su origen, es decir, de cuál océano, lagos o río se origina la humedad que precipita sobre el Valle de México. Para responderlo primero se definirán los tipos de formación de lluvia que existen, pudiendo ser estas: orográfica, ciclónica y convectiva, las cuales se explican a continuación.

Precipitación ciclónica: se origina por el choque de masas ciclónicas, pudiendo ser frontal o no frontal, la primera por aire de frente caliente o aire de frente frío. La *precipitación no frontal* puede ocurrir en cualquier depresión barométrica, resultando en el ascenso de aire que rellena la zona de baja presión. La *precipitación frontal* se debe al levantamiento de masa de aire cálido sobre aire más denso y frío. De *frente caliente* es cuando el aire avanza hacia arriba sobre una masa de aire más frío y la *de frente frío* es de naturaleza corta, se forma cuando el aire cálido es obligado a subir por una masa de aire frío que está avanzando (Segeer, 2006).

Precipitación convectiva: esta se presenta con el calor generado por el sol, cuando este calienta el suelo o la superficie, ocasiona que el agua eleve su temperatura y suba como aire caliente, por ser más liviano, hasta formar nubes y después precipitar.

Precipitación orográfica: tiene su origen con el ascenso de una masa de aire caliente, proveniente del mar, que se encuentra con una barrera montañosa u orográfica y al chocar con aire más frío proveniente del continente. En las altas montañas la lluvia se presenta antes de superar la línea de parteaguas (haciendo de referencia al punto más alto de una montaña que separa los escurrimientos de las cuencas) y en montañas bajas se presenta después, al seguir subiendo la masa caliente después del choque orográfico.

La precipitación de la Ciudad de México, y en general del país, está definida por tres procesos de formación y transporte de nubes, directamente influenciados por los vientos dominantes, representados en la Ilustración 30 “El origen de la Lluvia en CDMX”.

En la temporada de lluvias (Mayo-Noviembre) el vapor de Agua es transportado desde el Atlántico y el Golfo de México por los vientos dominantes del este, existentes en el hemisferio norte por la rotación natural de la Tierra; otra manera de formación es por la llegada de ciclones y huracanes, donde el flujo del viento de estos es antihorario, por lo que dependiendo del océano del que provienen es cómo prevalecen los vientos y desde dónde transporta contaminantes atmosféricos, si el huracán aparece en el pacífico, se tendrán nubes transportadas del suroeste del país y si el huracán aparece desde el Atlántico o el Golfo de México los vientos que entran al territorio nacional, vendrán desde el Noreste. La última forma de producción de nubes es en temporada invernal, donde las lluvias que se presentan son las denominadas “ciclónicas, de frente frío”, provocadas por el aire frío que baja desde el norte, a causa de los frentes fríos, esta última se considera como la que arrastra más contaminantes atmosféricos, por su recorrido desde el norte del país por todas las zonas industriales del territorio y por la que sobrepasa desde Canadá y los Estados Unidos de América.

La ejemplificación de estos diferentes tipos de origen de nubes que precipitan en la CDMX se muestra con los modelos obtenidos del software “HYSPLIT”, en las ilustraciones 34 a la 37, donde se muestra un ejemplo de vientos provenientes del pacífico, provocados por el Huracán “BUD” el 15 de junio del 2018. Otro modelo con vientos desde el Atlántico, provocados por el huracán “CHRIS”, el 10 de Julio del mismo año; también se muestra para el día 31 de octubre del 2018, un evento habitual de vientos dominantes del este provocados por la rotación terrestre; y por último se muestra un caso de lluvia provocada por viento que baja desde el norte a consecuencia del frente frío No. 10, del 14 de noviembre del 2018.

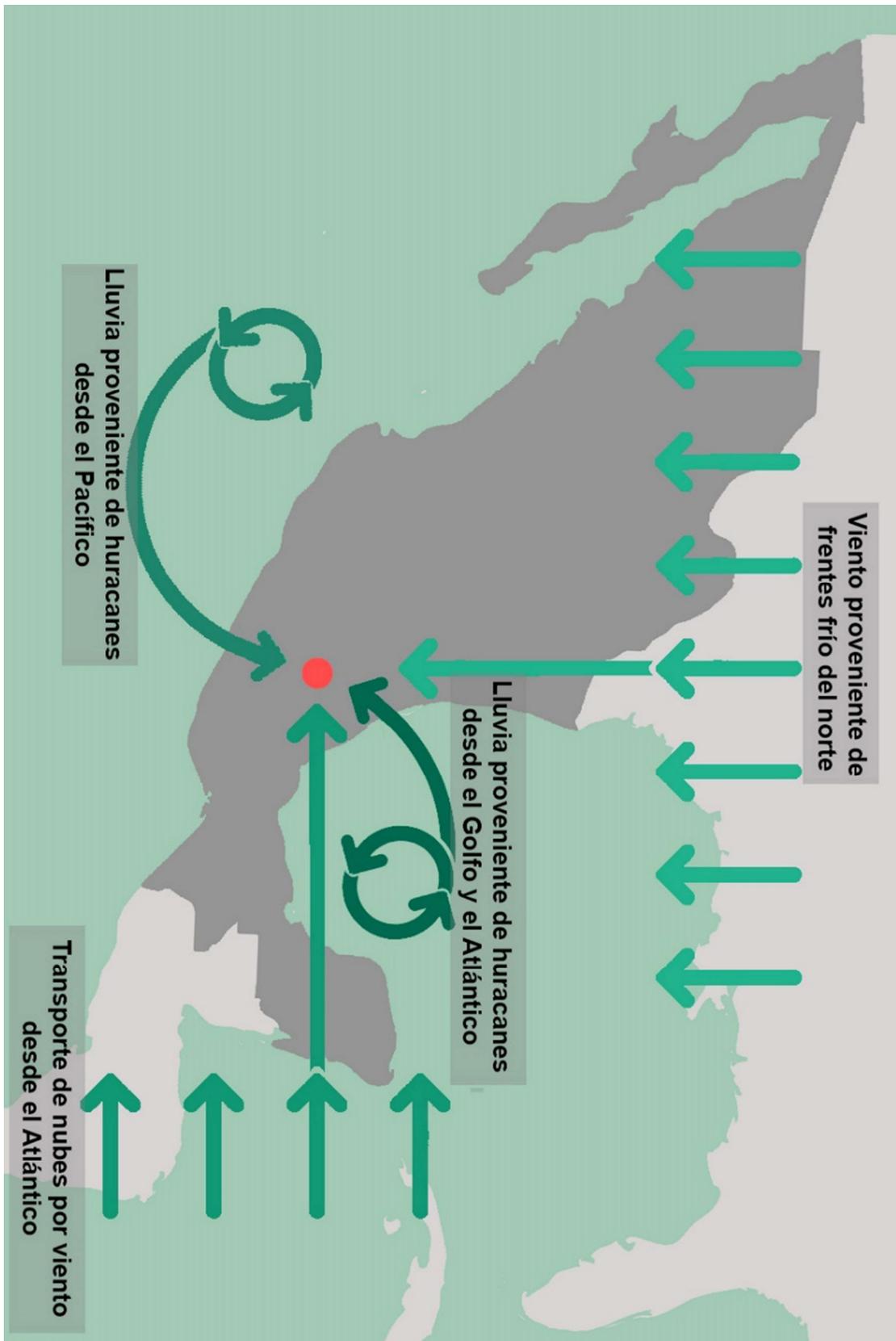


Ilustración 30 El Origen de la Lluvia en CDMX, Elaboración propia

NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 1800 UTC 15 Jun 18  
NARR Meteorological Data

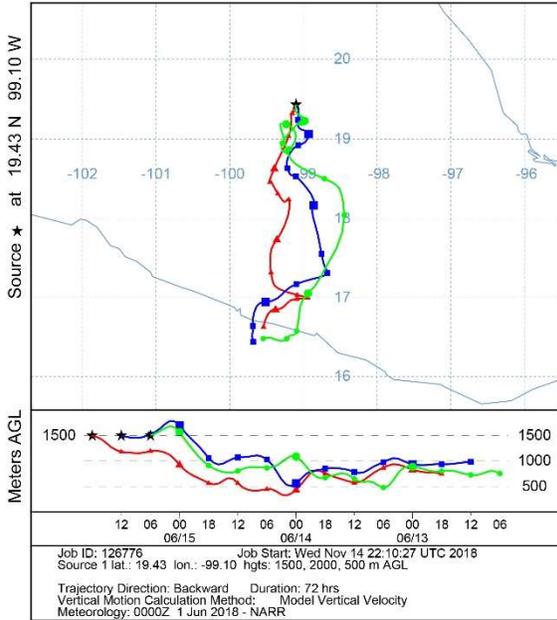


Ilustración 31 Modelo de la Trayectoria del viento provocada por el huracán Bud. Fuente: Stain et al(2015), Rolph et al(2017)

NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 1800 UTC 10 Jul 18  
NARR Meteorological Data

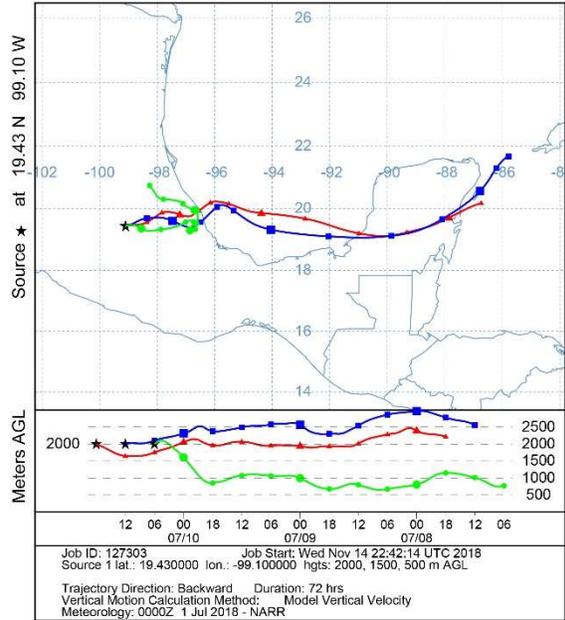


Ilustración 32 Modelo de la trayectoria del viento provocada por el huracán Chris. Fuente: Stain et al(2015), Rolph et al(2017)

NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 1800 UTC 31 Oct 18  
NARR Meteorological Data

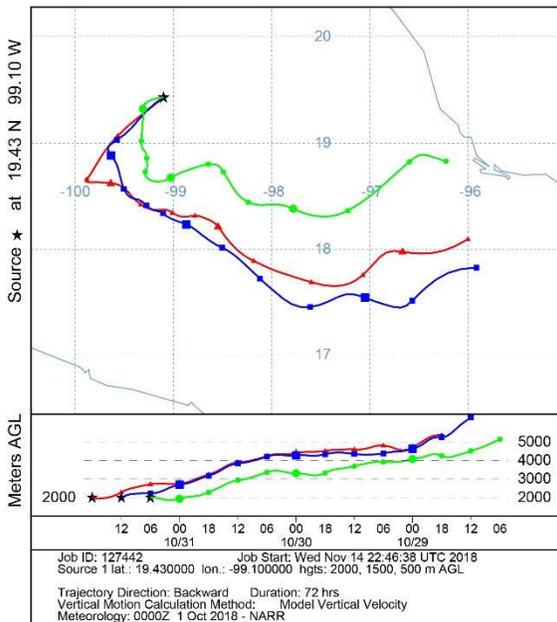


Ilustración 33 Modelo de la trayectoria del viento provocado por las corrientes dominantes del este. Fuente: Stain et al(2015), Rolph et al(2017)

NOAA HYSPLIT MODEL  
Forward trajectories starting at 0800 UTC 14 Nov 18  
12 UTC 14 Nov GFSG Forecast Initialization

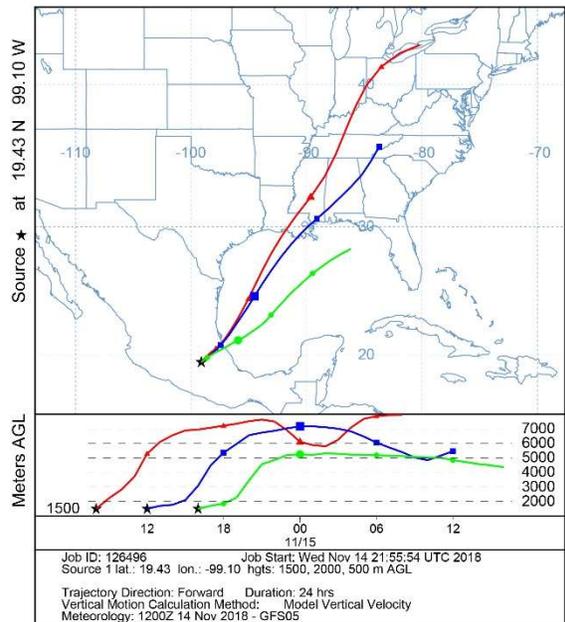


Ilustración 34 Modelo de la trayectoria del viento provocado por el frente frío No. 10 de la temporada invernal del 2018. Fuente: Stain et al(2015), Rolph et al(2017)

### 5.1.3. Estudios de caracterización de Agua de lluvia en la zona de interés

La planeación del dispositivo para mejorar la calidad de Agua de lluvia de la presente tesis se elaboró con base en datos recopilados de estudios previos sobre caracterización de recurso pluvial realizados en la zona sur de la Ciudad de México.

Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, la precipitación “limpia” la atmósfera y también las superficies de captación de los SCALL, por lo que las primeras lluvias después del estiaje tienden a tener niveles de contaminantes altos.

Los valores de contaminantes en Agua de lluvia encontrados en los estudios previos de caracterización se encuentran en las siguientes tablas; organizadas por tipo de parámetro. Estos resultados se contrastan con los límites permisibles de la NOM-127-SSA1-1994, para conocer cuáles rebasan la norma y con base en estos diseñar el tren de tratamiento óptimo para mejorar la calidad del recurso pluvial.

Tabla 10 Parámetros biológicos

Parámetro	Valores	Fuente		Límite permisible NOM 127	
		García, B (2013)	García, H (2012)		
<b>Coliformes Totales</b> <i>NMP/100 ml</i>	Máximo	ND	1		Rebasa el límite permisible de la NOM 127
	Mínimo	ND	ND	ND	
	Promedio	ND	-		
<b>Coliformes Fecales</b> <i>UFC/100 ml</i>	Máximo	ND	8		Rebasa el límite permisible de la NOM 127
	Mínimo	ND	ND	ND	
	Promedio	ND	-		
<b>Mesófilos Aerobios</b> <i>UFC/ml</i>	Máximo		24150		No especifica
	Mínimo		4		
	Promedio		7717		

Uno de los mayores problemas para aprovechar directamente el Agua pluvial es que puede presentar microorganismos, provenientes del contacto del recurso con la superficie de captación que pudo ser contaminada con heces fecales de animales o insectos, materia orgánica transportada por el viento o por el contacto del agua con la atmósfera durante su precipitación, misma en la que el viento transporta esporas, materia orgánica y fecal desde la superficie terrestre. Estos microorganismos al estar en almacenamiento pueden proliferar, provocando olor, sabor, color, turbiedad, lo que disminuye la calidad del Agua y pone en riesgo el uso de la misma, ya que algunos de estos pueden ser patógenos.

Tabla 11 Parámetros físicos y organolépticos

Parámetro	Valores	Fuente						Límite permisible NOM 127
		García, B (2013)	García, H (2012)	Báez (2014)	Cordero (2011)	Romero (2017)	Ceja (2018)	
<b>Sólidos Disueltos mg/L</b>	Máximo	90		10		126		
	Mínimo	10		2		17		1000
	Promedio	50		7		53		
<b>Sólidos Suspendidos Totales mg/L</b>	Máximo	93	35	64	10	9		
	Mínimo	17	1	10	7	1		No específica
	Promedio	64	10	24	9	2		
<b>Sólidos Sedimentables mg/L</b>	Máximo	37		55				
	Mínimo	2		6				No específica
	Promedio	15		17				
<b>Color Verdadero UC</b>	Máximo		40			10	20	
	Mínimo		15			0	5	20
	Promedio		24			4	13	
<b>Turbiedad UTN</b>	Máximo		18	5		9	38	
	Mínimo		3	2		2	2	5
	Promedio		8	3		5	14	
<b>pH</b>	Máximo	7	7	7	7	7	9	
	Mínimo	6	7	5	6	6	7	6.5 - 8.5
	Promedio	7	7	6	6	7	8	
<b>Conductividad</b>	Máximo	96	150	33			30	
	Mínimo	39	60	7			10	No específica
	Promedio	58	90	14			19	

Tabla 12 Parámetros Químicos

Parámetro mg/L	Valores	Fuente			Límite permisible NOM 127	
		García, B (2013)	García, H (2012)	Báez (2014)		
<b>SO<sub>4</sub></b>	Máximo	10	17	100	4000	
	Mínimo	3	6	50		
	Promedio	6	10	71		
<b>NO<sub>3</sub></b>	Máximo	15	6	60	10	
	Mínimo	3	1	40		
	Promedio	7	2	50		
<b>Cl<sup>-</sup></b>	México	2.0	7.0	15.0	250	
	Mínimo	0.5	0.5	5.0		
	Promedio	1.0	2.9	10.0		
<b>Na<sup>+</sup></b>	México	3	4	8	200	Rebasa el límite permisible de la NOM 127
	Mínimo	0	1	4		
	Promedio	1	2	6		
<b>F<sup>-</sup></b>	Máximo	0.2			1.5	
	Mínimo	0.1				
	Promedio	0.1				
<b>Al</b>	Máximo	0.9			0.2	Rebasa el límite permisible de la NOM 127
	Mínimo	0.1				
	Promedio	0.2				
<b>Cd</b>	México	0.0014			0.005	
	Mínimo	0.0001				
	Promedio	0.0005				
<b>Cr</b>	México	0.0013			0.05	
	Mínimo	0.0004				
	Promedio	0.0008				
<b>Fe</b>	Máximo	0.7			0.3	Rebasa el límite permisible de la NOM 127
	Mínimo	0.0				
	Promedio	0.1				
<b>Mn</b>	Máximo	0.02			0.15	
	Mínimo	0.00				
	Promedio	0.01				
<b>Pb</b>	México	0.0043			No especifica	
	Mínimo	0.0013				
	Promedio	0.0023				

Como se observa en las tablas 7, 8 y 9 del presente capítulo, el Agua de lluvia presenta límites excedidos en solo 8 parámetros. De los físicos y organolépticos serían el pH, el color verdadero y la turbiedad; para los biológicos o bacteriológicos, se presentan en algunas ocasiones coliformes totales y fecales; y para los químicos sólo se excedió en el ion nitrito (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y en los metales pesados aluminio

y hierro. Dicho resumen de parámetros excedidos se encuentra en la tabla número 10; siendo estas las características que rijan la calidad de Agua del influente para el diseño de los procesos y operaciones unitarias capaces de mejorar la calidad de recurso pluvial.

*Tabla 13 Parámetros excedidos encontrados en los estudios previos*

**Parámetros físicos y organolépticos**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor máximo encontrado</b>	<b>Límite permisible, según la NOM-127-SSA1-1994</b>
<i>Color Verdadero</i>	40	20 UC
<i>pH</i>	9	6.5 - 8.5
<i>Turbiedad</i>	38	5 UTN

**Parámetros biológicos**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor máximo encontrado</b>	<b>Límite permisible, según la NOM-127-SSA1-1994</b>
<i>Coliformes Totales</i>	1	ND
<i>Coliformes Fecales</i>	8	ND

**Parámetros químicos**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor máximo encontrado</b>	<b>Límite permisible, según la NOM-127-SSA1-1994</b>
<i>NO3</i>	60	10 mg/L
<i>Al</i>	0.9	0.2 mg/L
<i>Fe</i>	0.7	0.3 mg/L

## Capítulo 6. Análisis para determinar el Tren de Tratamiento óptimo

### 6.1. Procesos y operaciones unitarias en función de los parámetros encontrados

En el capítulo 5.1.3. se definen los parámetros característicos del Agua de lluvia y en la tabla no. 11 se resalta que índices son rebasados según la NOM-127-SSA1-2000 para poder abastecer el recurso con calidad para uso y consumo humano. En el presente capítulo se definen qué procesos y operaciones unitarias se pueden aplicar según los parámetros que exceden los límites permisibles.

#### 6.1.1. pH

El pH superior a 7 indica alcalinidad o se considera una muestra base, para la norma mencionada se establece que el límite de pH en el agua para uso y consumo humano debe de permanecer entre 6.5 y 8.5, ya que los organismos están sujetos a la cantidad de acidez del agua y funcionan mejor dentro de cierto rango. La existencia de pH alcalino en el Agua de lluvia presenta problemas de dureza, y, aunque no causa problemas a la salud, puede ocasionar formación de sarro, sabor salino o amargo y dificultad para hacer espuma en jabones, dificultando así el lavado de ropa. Por lo anterior, es necesario neutralizar el Agua de lluvia; dicho proceso puede realizarse con compuestos de carbonato de calcio.

#### 6.1.2. Color Verdadero

La presencia de color verdadero en los estudios de Agua de lluvia analizados muestra un valor máximo encontrado de 40 unidades de color. Por lo que será necesario un proceso de filtración con arenas y de adsorción en carbón activado para cumplir con el límite de color verdadero para entregar agua potable en la ciudad de México, siendo este último de 20 unidades de color. La NOM-127-SSA1-2000 establece que el tren de tratamiento óptimo para remover color, olor, sabor y turbiedad es; oxidación-coagulación-floculación-sedimentación-filtración.

#### 6.1.3. Turbiedad

La cantidad máxima encontrada fue de 38 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN), aunque en general el comportamiento de este parámetro no fluctuó arriba de las 10 UTN. Será necesario un tratamiento para la remoción de la turbiedad en el agua de lluvia, como podría ser: ósmosis inversa, coagulación o floculación, nanofiltración, etc., y con dichos procesos de tratamiento se podrá entregar agua que cumpla el límite de turbiedad, según la NOM 127, que establece como límite máximo permisible 5 UTN.

En el caso de la coagulación como parte del tren de tratamiento, solo es necesaria cuando los índices de turbiedad superan las 1000 unidades. El procedimiento consiste en agregar coagulantes o reactivos químicos, como: compuestos de aluminio y fierro, que generalmente producen hidroxilos y absorben impurezas; compuestos de arcilla, sílice, etc., los cuales provocan que las partículas sean más densas y los flóculos más firmes; o alcalinizantes como cal, hidróxido de calcio, hidróxido de sodio o carbonato de sodio que producen la alcalinidad necesaria para la coagulación.

Así mismo, junto con el color, al entregarlos cumpliendo los límites de la norma, nos aseguramos de otorgar agua que cumpla con las características físicas y organolépticas aceptables para los usuarios.

#### 6.1.4. Coliformes totales y Coliformes fecales

Los coliformes son indicadores de bacterias, estas pueden ser o no patógenas, por eso es importante detectar su presencia y en caso de que existan en las muestras, deben de ser eliminados del agua para su aprovechamiento. La diferencia entre los coliformes fecales y los totales, radica en que los totales son todos los microorganismos sin considerar su origen, y los fecales son los miembros que provienen de los tractos intestinales de los animales de sangre caliente; un ejemplo de ellos es la *Esperichia Coli*, la bacteria más presente en las heces de los seres humanos. Por lo tanto, para evitar enfermedades y prevenir epidemias, es necesario desinfectar el Agua previamente a su uso, durante su conducción y almacenamiento, para esto último es necesario dejar un poder residual de desinfección en el agua tratada, para evitar que el contacto durante su entrega hasta el consumo sea re-contaminado dicho recurso potable.

En los estudios analizados, se encontró presencia de ambos indicadores por lo que es necesario un proceso de desinfección en el dispositivo, estos pueden ser: desinfección con cloro y sus derivados, desinfección con luz UV o desinfección con ozono.

#### 6.1.5. Metales Pesados

En los estudios previos de caracterización de Agua de lluvia, solo se encontró estudio de metales en García (2012); por lo que se tomarán los datos obtenidos en dicho análisis para el diseño de los procesos y operaciones necesarias para remover metales pesados. Los únicos metales pesados que superan los límites establecidos en la NOM-127-SEMARNAT-SSA1-2000 son el Hierro y el Aluminio. Para el primero de estos se presenta un valor máximo de 0.7 mg/L contra su límite máximo permisible de 0.3 mg/L, mientras que para el aluminio se encontró 0.9 mg/L contra su límite de 0.2 mg/L establecido en la misma norma. La presencia de estos puede generar en problemas respiratorios para la salud y puede generar pérdida de eficiencia en el transporte de oxígeno y nutrientes en la sangre. Por lo que para la adsorción de dichos contaminantes químicos se pueden realizar procesos de intercambio iónico u ósmosis inversa. La NOM-127-SSA1-2000 establece como tren de tratamiento para remover aluminio el siguiente, coagulación-floculación-sedimentación-filtración; y para el Hierro, oxidación-filtración.

#### 6.1.6. Iones

El único anión que se encontró en los estudios analizados fue el nitrito ( $\text{NO}_3^-$ ). Dicho compuesto es muy peligroso para el consumo humano, ya que puede ser causante de metamoglobina (*condición de la sangre en la que no puede transportar oxígeno*), por ende su presencia debe de ser removida del Agua para poder consumirla, pero según el Departamento de servicios de salud de California (2006) , el agua con presencia de nitritos cercano a los 50 mg/L puede ser utilizada para contacto sin riesgos a la salud. Por lo que si se desea mejorar la calidad del Agua de lluvia hasta consumo humano el tratamiento para removerlo sería con intercambio catiónico y si únicamente se proyecta utilizar para contacto, podríamos prescindir de este proceso. Para remover el nitrito, la NOM-127-SSA1-2000 establece como tren de tratamiento, coagulación-floculación-sedimentación-filtración.

## 6.2. Análisis financiero, técnico, social y ambiental de los procesos y operaciones unitarios a contemplar para el diseño

### 6.2.1. Filtro de arena

La frecuencia con la que se retrolavan los adsorbedores se determina con base en uno de los dos siguientes parámetros: una máxima caída de presión permisible o un intervalo de tiempo definido. El primer caso corresponde a equipos cuya cama se obstruye con relativa rapidez. Por ejemplo: Filtros-adsorbedores. Son adsorbedores que no se encuentran precedidos por un filtro y que tratan agua con una cantidad relevante de sólidos suspendidos. Esto es típico en plantas municipales de potabilización que cambian las camas de arena de filtros existentes por camas de carbón activado granular. De esta manera, además de filtrar el agua, se retiene algún contaminante adicional como olor y sabor, sin la necesidad de cambiar el equipo. El tamaño de partícula del carbón no se escoge buscando minimizar el requerimiento de retrolavados, sino el obtener un efluente cuya turbidez o contenido de sólidos suspendidos totales cumpla con una especificación. Estos adsorbedores generan una fuerte actividad biológica, por lo que se produce una gran cantidad de biomasa. En los casos anteriores, mientras menor es el tamaño de partícula del carbón, mayor es la rapidez con la que se obstruye la cama. Si se trata de adsorbedores de flujo a presión, el retrolavado suele llevarse a cabo cuando la caída de presión alcanza 0.5 a 0.7 Kg/cm<sup>2</sup> (Carbotecnia, 2018).

En adsorbedores de flujo por gravedad, el retrolavado se realiza cuando el nivel del agua sobre la superficie de la cama aumenta alrededor de 1.0 a 1.5 m respecto al nivel que tenía cuando la cama estaba limpia y este último normalmente es de 1.0 a 1.5 m sobre la superficie de la misma. Este aumento de nivel es una medida del aumento en la caída de presión. Cuando un adsorbedor se obstruye con relativa lentitud, la caída de presión deja de ser la señal más adecuada para realizar el siguiente retrolavado. Entonces se hace necesario definir un período de tiempo entre uno y otro retrolavado, tal que se evite la cementación de la cama o el atrapamiento excesivo de burbujas. Esto se realiza con base en la observación y en la experiencia. Sin embargo, como mínimo, hay que retrolavar una vez por semana. (Carbotecnia, 2018)

Para los filtros de tratamiento es muy utilizada la zeolita y los productos de sílice, por su amigable relación con el Agua ya que no alteran el pH del recurso, retienen aproximadamente el 80% de los sedimentos antes de requerir algún retrolavado. A continuación, se enlistan los precios de estos productos:

- |                                       |                   |
|---------------------------------------|-------------------|
| • Carbotecnia: Arena sílica 20-30     | \$ 250.00 / 50 kg |
| • Mercado Libre: Arena sílica ½" - ¼" | \$ 250.00 / 25 kg |
| • Mercado Libre: Arena sílica 20-30   | \$ 200.00 / 50 kg |
| • Mercado Libre: Zeolita 12-30        | \$ 400.00 / 22 kg |
| • Mercado Libre: Zeolita 12-30        | \$ 600.00 / 50 kg |

### 6.2.2. Filtro de Carbón Activado (antracita)

Cuando se trata de un carbón que se acaba de instalar, es necesario haberlo dejado inundado el tiempo suficiente (mínimo 24 horas) para que haya desprendido la mayor parte del aire de los poros. De lo contrario, el carbón será arrastrado hacia arriba aún con un pequeño flujo de retrolavado. El flujo de retrolavado debe iniciarse poco a poco, hasta llegar al requerido para lograr la expansión de 30 a 40%. En equipos de flujo a presión, que cuentan con registro en la tapa superior, la verificación de que se está logrando lo anterior se hace retrolavando con el registro superior abierto. Aunque un carbón de mayor densidad requiere de un mayor flujo para expandirse, presenta la ventaja de que queda limpio en menos tiempo. Como resultado, aunque el flujo es relativamente alto, hay un ahorro de agua. Por ejemplo, un carbón activado de densidad aparente de 0.55 g/cm<sup>3</sup>, cuyo rango de tamaño de

partícula es 8×30, típicamente no requiere más de dos minutos para quedar listo si se retrolava expandiéndolo un 30%. Por otro lado, un carbón del mismo tamaño, pero con una densidad de 0.45 g/cm<sup>3</sup>, puede requerir hasta diez minutos (Carbotecnia, 2018).

El carbón activado se encuentra en el mercado con diferentes presentaciones; granular, con coco, con plata ionizada, entre otras; algunos de los precios de estos productos son los siguientes:

- Carbotecnia: micro carbón activado con coco \$ 1,125.00 / 25 kg
- Carbotecnia: carbón activado bacteriostático con plata \$ 1,825.00 / 25 kg
- Isla Urbana: carbón activado granular con coco \$ 100.00 / kg
- Mercado Libre: carbón activado con coco \$ 150.00 / kg
- Mercado Libre: carbón activado con coco \$ 620.00 / 13 kg
- Mercado Libre: carbón activado con coco \$ 1,050.00 / 25 kg

### 6.2.3. Filtro de Intercambio iónico

En nuestro estudio encontramos que el Agua de lluvia puede contener exceso de nitritos y algunos iones aluminio y fierro. Al tener aniones y cationes en las muestras, se propone utilizar una resina mixta para remover ambos iones presentes.

Con el uso y el paso de Agua en las resinas de intercambio iónico, estas pierden sitios de intercambio iónico activo o sufren la rotura de los enlaces transversales de la resina, disminuyendo la capacidad de intercambio. Los especialistas indican una vida útil para las resinas de 5 a 10 años, pero los fabricantes mencionan que las resinas aniónicas tienen una vida útil de 70 a 300 m<sup>3</sup> de Agua tratada por litro de resina y las resinas catiónicas de 200 a 1500 m<sup>3</sup> de Agua tratada por litro de resina; esto siempre dependerá de la calidad del Agua a tratar (Monografías, 2018).

Para el tratamiento de intercambio iónico se utilizan resinas catiónicas, aniónicas o mixtas. A continuación, se presentan precios de estas resinas:

- Carbotecnia: Resina DOWEX MB \$ 6,725.00 / 22 kg
- Carbotecnia: Resina DOWEX Marathon MR3 \$ 7,628.00 / 22 kg
- Carbotecnia: Resina Purolite MB400 \$ 8,530.00 / 22 kg
- Mercado Libre: Resina DOWEX Marathon MR3 \$ 7,370.00 / 22 kg

### 6.2.4. Desinfección con Cloro

Normalmente se utiliza cloro, hipoclorito de sodio o hipoclorito de calcio; pero estos reaccionan con materia orgánica, en caso de que esta se encuentre presente en el Agua; además del gas cloro, el cual es tóxico. Por esto, algunas plantas han sustituido el uso de dichos desinfectantes por dióxido de cloro, ya que no forma trihalometanos en cuerpos de Agua con materia orgánica, pero puede producir ion clorito y clorato (Carbotecnia, 2018). El cloro se tiene que aplicar constantemente y tiene que estar en tiempo de contacto para que la desinfección sea eficiente. Hoy en día se puede aplicar en forma líquida con dosificadores o en pastillas de cloro. El costo de los productos de cloro y sus derivados se enlista a continuación:

- Mercado Libre: Dosificador de tricloro (pastillas 3") \$ 750.00
- Mercado Libre: Pastillas de Tricloro 3" \$ 1,350.00 / 10 kg
- Mercado Libre: Pastillas de Tricloro 3" \$ 1,200.00 / 10 kg
- Mercado Libre: Pastillas de Tricloro 3" \$ 741.00 / 5 kg
- Carbotecnia: Dosificador de Tricloro (pastillas 3") \$ 570.00
- Carbotecnia: Pastillas de Tricloro 3" \$ 1,368.00 / 4 kg

### 6.2.5. Desinfección con Ozono

Los métodos más comunes para producir ozono es la descarga de corona y con lámpara UV, el primero de estos es comúnmente utilizado en el sector industrial y privado. Aprovecha el ozono disponible en el ambiente, para este proceso se utiliza un secador para educir el ácido nítrico y un concentrador de oxígeno para generar ozono. Y con luz UV necesitan una fuente de luz ultravioleta de banda estrecha. Pero en uso con luz UV, si el movimiento del agua es rápido, la eficiencia de desinfección se verá mermada por el flujo del Agua, por lo que no es un método tan conveniente para producir ozono. El mantenimiento de estos equipos con jornadas diarias de 8 horas, se estiman en 2 A 3 años, para el cambio de cartuchos e insumos (Carbotecnia, 2018).

- Aquasoft: Generador de Ozono 1gr/hr \$ 7,841.00
- Carbotecnia: Generador de Ozono 0.3 gr/hr \$ 8,000.00
- Carbotecnia: Generador de Ozono 0.3 gr/hr \$ 7,500.00

### 6.2.6. Desinfección con Luz Ultravioleta

La desinfección con luz ultravioleta funciona gracias a la radiación emitida por las lámparas UV, esta se deteriora con el tiempo y uso, se estima que la vida útil estos dispositivos es de casi 8,000 horas, por lo que en jornadas de 8 horas al día se tendrían que cambiar aproximadamente cada 3 años. Por esta razón se recomienda revisar periódicamente la intensidad de radiación que emite la lampara, para buscar siempre estar ubicados en la zona UV-C, que comprende de los 240 a los 280 nm; lo anterior con ayuda de un radiómetro (Carbotecnia, 2018).

El costo de dichas lámparas está en función del tamaño del bulbo necesario para cumplir con el gasto que tendremos en nuestro sistema. Se puede instalar el bulbo dentro de un tubo de PVC, pero para hermetizarlo y que no se dañe el bulbo con Agua es necesario instalarle una manga de cuarzo impermeable. El costo de estos materiales son los siguientes:

- Isla Urbana: Bulbo 2 y 4 pin 12 W \$ 400.00 MXN
- Isla Urbana: Bulbo 2 y 4 pin 16 W \$ 500.00 MXN
- Carbotecnia: Bulbo Polaris V8 \$ 780.00 MXN
- Carbotecnia: Bulbo Polaris V12 \$ 950.00 MXN
- Carbotecnia: Manga de Cuarzo \$ 500.00 MXN

### 6.2.7. Filtro de ósmosis inversa

Las membranas para ósmosis inversa al funcionar como filtro retienen las partículas suspendidas, quedándose impregnadas en las paredes de las mismas; por ende, se recomienda limpiarlas cada que estas muestran evidencias de ensuciamiento y antes de que la mugre sea tanta que ocasionen un cambio completo de filtro. Otro signo que señala necesidad de limpieza sin que se vea suciedad en las paredes es cuando disminuye el flujo permeado, disminución de la calidad del permeado o caída de la presión entre la alimentación y la concentración. La frecuencia de lavado está en función de la calidad del Agua, por lo que la variación de limpieza debe de ser cada 3 a 12 meses, si se necesitará limpieza, recurrente una vez al mes, probablemente habría que mejorar el pretratamiento y la vida útil sería de hasta 5 años (Carbotecnia, 2018). Los precios de estos elementos son los siguientes:

- Carbotecnia: Membrana de ósmosis inversa 50 gpd \$ 370.00
- Carbotecnia: Membrana de ósmosis inversa 100 gpd \$ 700.00

Tabla 14 Catálogo de materiales, según procesos y operaciones unitarias

	PROCESO/OPERACIÓN UNITARIA	UNIDAD	PROVEEDOR	CANTIDAD	COSTO	PRECIO UNITARIO
FILTRACIÓN	Arena Sílica	kg	Carbotecnia	50	\$ 250.00	\$ 5.00
	Arena Sílica	kg	Mercado Libre	25	\$ 250.00	\$ 10.00
	Arena Sílica	kg	Mercado Libre	50	\$ 200.00	\$ 4.00
	Zeolita	kg	Mercado Libre	22	\$ 400.00	\$ 18.18
	Zeolita	kg	Mercado Libre	50	\$ 600.00	\$ 12.00
	Grava Sílica	kg	Carbotecnia	50	\$ 246.00	\$ 4.92
	Grava Sílica	kg	Mercado Libre	5	\$ 50.00	\$ 10.00
	Grava Sílica	kg	Mercado Libre	45	\$ 260.00	\$ 5.78
	Carbón activado granular concha de coco	kg	Carbotecnia	25	\$ 1,125.00	\$ 45.00
	Carbón activado granular concha de coco	kg	Isla Urbana	1	\$ 100.00	\$ 100.00
	Carbón activado granular concha de coco	kg	Mercado Libre	1	\$ 150.00	\$ 150.00
	Carbón activado granular concha de coco	kg	Mercado Libre	13	\$ 620.00	\$ 47.69
	Carbón activado granular concha de coco	kg	Mercado Libre	25	\$ 1,050.00	\$ 42.00
	Carbón activado impregnado con plata al 0.1%	kg	Carbotecnia	25	\$ 1,825.00	\$ 73.00
	INTERCAMBIO IÓNICO	Resina mixta DOW MB (H+/OH-)	kg	Carbotecnia	22	\$ 6,725.00
Resina mixta DOWEX Marathon MR3		kg	Carbotecnia	22	\$ 7,628.00	\$ 346.73
Resina mixta MB 400		kg	Carbotecnia	22	\$ 8,530.00	\$ 387.73
Resina mixta DOWEX Marathon MR3		kg	Mercado Libre	22	\$ 7,370.00	\$ 335.00

DESINFECCIÓN	Dosificador de pastillas de Tricloro de 3"	pza	Carbotecnia	1	\$ 570.00	\$ 570.00
	Dosificador de pastillas de Tricloro de 3"	pza	Mercado Libre	1	\$ 750.00	\$ 750.00
	Pastillas de Tricloro de 3"	kg	Carbotecnia	4	\$ 1,368.00	\$ 342.00
	Pastillas de Tricloro de 3"	kg	Mercado Libre	10	\$ 1,350.00	\$ 135.00
	Pastillas de Tricloro de 3"	kg	Mercado Libre	10	\$ 1,200.00	\$ 120.00
	Pastillas de Tricloro de 3"	kg	Mercado Libre	5	\$ 741.00	\$ 148.20
	Generador de Ozono 1 gr/hr	pza	Aquasoft	1	\$ 7,841.00	\$ 7,841.00
	Generador de Ozono Apel 0.3 gr/hr	pza	Carbotecnia	1	\$ 8,000.00	\$ 8,000.00
	Generador de Ozono Clear Water 0.3 gr/hr	pza	Carbotecnia	1	\$ 7,500.00	\$ 7,500.00
	Bulbo Luz UV 12w	pza	Isla Urbana	1	\$ 400.00	\$ 400.00
	Bulbo Luz UV 16w	pza	Isla Urbana	1	\$ 500.00	\$ 500.00
	Bulbo Luz UV v8	pza	Carbotecnia	1	\$ 780.00	\$ 780.00
	Bulbo Luz UV v12	pza	Carbotecnia	1	\$ 950.00	\$ 950.00
	Manga de Cuarzo	pza	Carbotecnia	1	\$ 500.00	\$ 500.00
ÓSMOSIS	Membrana de Ósmosis Inversa 50 gpd (200 L/día)	pza	Carbotecnia	1	\$ 370.00	\$ 370.00
	Membrana de Ósmosis Inversa 100 gpd (400 L/día)	pza	Carbotecnia	1	\$ 700.00	\$ 700.00
MICROFILTRA	Filtro Amiad	pza	Isla Urbana	1	\$ 1,600.00	\$ 1,600.00
	Malla de Nylon 48 µm	pza	Merck	1	\$ 3,085.00	\$ 3,085.00
COAGULANTE	Sulfato de Aluminio (coagulante)	kg	CEETA	22	\$ 609.30	\$ 27.70
	Cloruro Férrico (coagulante)	kg	CEETA	22	\$ 624.30	\$ 28.38

### 6.3. Definición de la calidad necesaria del Agua en función del uso deseado

Como ya se ha mencionado, el aprovechamiento del Agua de lluvia está en función del uso que deseamos. De antemano conocemos que el recurso pluvial cosechado en las viviendas se encuentra contaminado y supera los valores de color verdadero, turbiedad pH, presencia de coliformes y algunos compuestos y metales pesados como Nitrito, Aluminio y Hierro; por lo que el único uso inmediato sería en WC y lavado de exteriores. Para definir el uso y por lo tanto el tratamiento necesario hay que analizar la ilustración 34, donde se muestra el porcentaje de consumo en una vivienda en función del uso de la misma, y la tabla 13, que contiene información sobre calidad y tratamiento necesario en función del uso deseado.

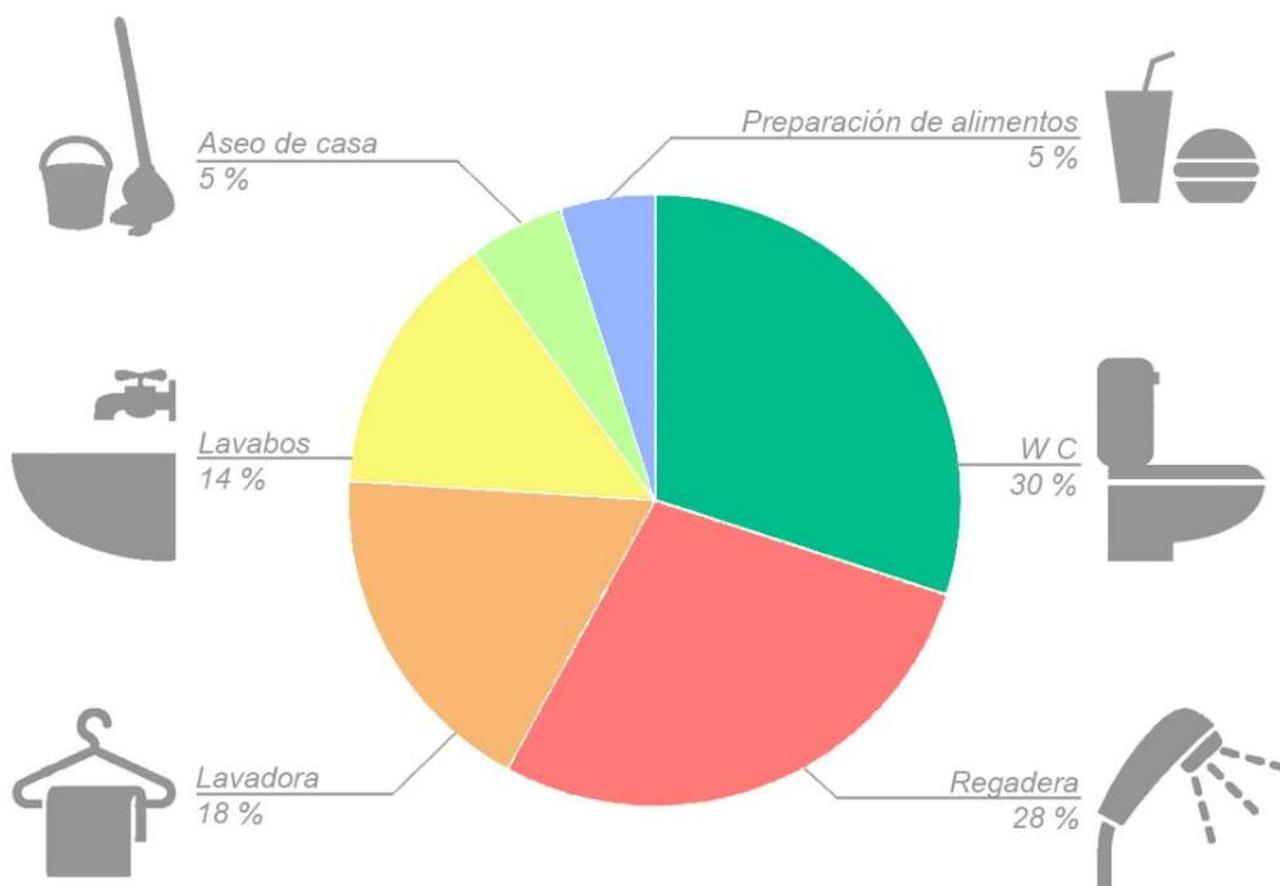


Ilustración 35 Consumo habitacional resumen

Tabla 15 Uso, calidad, tratamiento y porcentaje del consumo en vivienda. Elaborado con datos de García (2012)

CLASIFICACIÓN	USOS	CALIDAD QUE SE REQUIERE SEGÚN EL USO, CON BASE EN LA NOM-127-SSA1-1994	TRATAMIENTO	PORCENTAJE DE CONSUMO DE AGUA EN UNA VIVIENDA
<b>PRIMARIO</b>	Lavado de ropa WC Limpieza del Hogar Limpieza del Auto Jardinería	Turbiedad: 5 UTN Color verdadero: 20 UCV Características Organolépticas: Aceptables	Separación de primeras llluvias, Cribado/Filtración, Sedimentación, Conservación	53%
<b>SECUNDARIO</b>	Ducha Higiene Personal Lavado de trastes	Además de las anteriores, pH: 6.5 - 8.5 Coliformes Totales: ND Coliformes Fecales: ND	Además de las anteriores, eliminación de coliformes, filtración menor a 50 micrómetros, remoción de contaminantes orgánicos.	53 + 42 95 %
<b>TERCIARIO</b>	Agua para beber y cocinar	No debe de superar ningún parámetro establecido en la norma	Además de las anteriores, filtración menor a 10 micrómetros, remoción de metales pesados, remoción de contaminantes orgánicos y purificación.	53 + 42 + 5 100%

En la última columna de la tabla No. 15 se expresa el porcentaje de la posible cantidad aprovechable de Agua de lluvia en función del uso al que se desea destinar. Por lo que, si se desea darle uso primario, se tendría que aplicar un tren de tratamiento “primario”, donde únicamente se necesitaría de operaciones unitarias para obtener Agua que cumpla con los límites para turbiedad de 5 UTN y color verdadero de 20 UC, junto con características organolépticas aceptables; y así el 53% del consumo de Agua en la vivienda se aprovecharía con recurso pluvial. Consecuentemente, si se desea darle uso secundario, con su respectivo tratamiento, se podría utilizar aproximadamente el 95% del Agua de una vivienda con recurso proveniente de cosecha pluvial.

## 6.4. Propuesta de Trenes de tratamiento para Agua de Lluvia

### 6.4.1. Tratamiento Primario

Como se muestra en la tabla 15, del capítulo 6.3, para la clasificación primaria se requiere de Agua con calidad que cumpla turbiedad por debajo de 5 UTN y color verdadero menor a 20 UC, junto con características organolépticas aceptables. Y con esta calidad podría aprovecharse el recurso pluvial en: uso de WC, lavado de ropa, lavado de exteriores y jardinería; lo que equivaldría aproximadamente al 53% de Agua consumida en un hogar. Para lograr lo anterior se proponen los siguientes trenes de tratamiento:



Ilustración 36 Tren de tratamiento primario 1



Ilustración 37 Tren de tratamiento primario 2



Ilustración 38 Tren de tratamiento primario 3

Para la remoción de color y turbiedad en el Agua de lluvia se proponen los trenes anteriores, los dos primeros compuestos por un sistema de coagulación-floculación-sedimentación más filtración, para poder llevar a cabo y darle mayor velocidad de coagulación a las partículas se sugiere añadir sulfato de Aluminio o Cloruro Férrico, ambos como coagulantes. Con una calidad de lluvia con altos niveles de turbiedad, cercanos a 1000 UTN, sería el tratamiento óptimo para remover este parámetro, pero como nuestros estándares no superar las 100 unidades y la accesibilidad a estos productos no es tal como que se pueda conseguir en una tienda de conveniencia o autoservicio, se propone el tercer tren de tratamiento primario. Para esta última propuesta se emplearían productos disponibles en el mercado y en tiendas de autoservicio, siendo estos mismos asequibles para los usuarios potenciales. Por lo anterior se determina que el último tren de tratamiento, que consiste en una etapa preliminar de separación de primeras lluvias y dos etapas de filtración, una con arena-grava y la otra con carbón activado-grava, sería el más conveniente de implementar.

### 6.4.2. Tratamiento Secundario

Si el objetivo es aprovechar en más usos doméstico el Agua de lluvia, es necesario cumplir con las características del tratamiento primario junto con los siguientes parámetros: mantener un pH de 6.5 a 8.5, que tanto los coliformes fecales como los coliformes totales sean indetectables y una microfiltración de hasta 50 micrómetros, para cumplir con esta última se propone utilizar un filtro comercial de marca “Amiad”, que cumple con el grado de filtración requerida y es de fácil instalación. Cumpliendo con esa calidad, la clasificación secundaria será aprovechable en los usos de la anterior y también se podría utilizar para el aseo personal, en la ducha y para lavado de trastes; equivalente al 95% del Agua que se consume en casa. Cumplir con lo anterior, requerirá de contemplar el tratamiento primario sugerido, más algunos procesos y operaciones unitarias necesarias para lograr la calidad deseada; por lo que se proponen los siguientes trenes de tratamiento:



Ilustración 39 Tren de Tratamiento Secundario 1



Ilustración 40 Tren de tratamiento secundario 2



Ilustración 41 Tren de tratamiento secundario 3

Para cumplir con la calidad de la clasificación secundaria, se considera el tratamiento primario sugerido, más una operación de microfiltración con un Filtro “Amiad”, ya que para impedir el paso de partículas mayores a 50 µm se cotizaron dos alternativas: una malla de nylon y el filtro elegido. Este último es el propuesto ya que es más económico y con mayor facilidad de conseguirse; más un proceso de desinfección, para el cual se proponen tres alternativas: dosificador de Tricloro, desinfección con luz ultravioleta o generador de Ozono.

### 6.4.3. Tratamiento Terciario

El último nivel de tratamiento es para entregar recurso de consumo humano, por lo que podríamos tener agua para beber y para cocinar, con esto para el consumo de Agua domiciliaria se podría aprovechar con el 100% de la captación pluvial. Para conseguir lo anterior es necesario entregar Agua con la calidad mencionada en la NOM-127-SSA1-2000, por lo que no debe de superar ningún parámetro establecido en dicha norma, en específico para lograr la microfiltración de hasta 10 micrómetros se plantea cumplirla con el uso de ósmosis inversa. Para asegurar la calidad deseada, será necesario considerar el tratamiento secundario más los procesos y operaciones más especializados para obtener Agua de clasificación terciaria, por lo que se propone el siguiente tren de tratamiento:

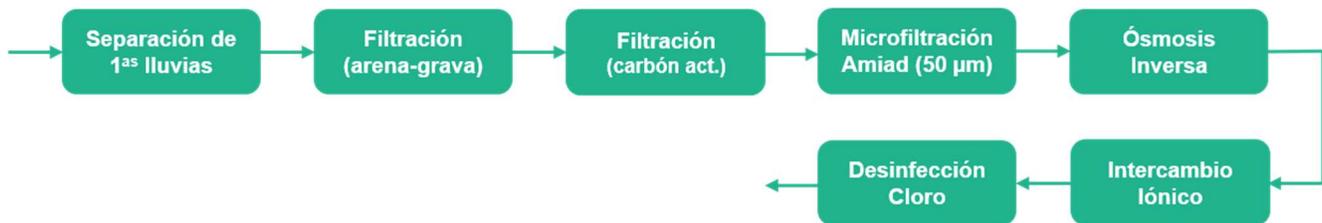


Ilustración 42 Tren de Tratamiento terciario

### 6.5. Elección del Tren de Tratamiento óptimo para mejorar la calidad de Agua de lluvia, en función de las características propias de la CDMX

La elección del tren de tratamiento más conveniente para un sistema domiciliario se hará en función de los siguientes criterios y las siguientes variables:

El porcentaje de consumo en una vivienda, según el uso posible dependiendo de la calidad. Esto es que, para el tratamiento primario, sólo se aprovecharía en el 53% del consumo en casa; para el tratamiento secundario, podríamos aprovechar hasta el 95% del consumo habitacional con Agua de lluvia; y respecto al terciario se aprovecharía totalmente el recurso pluvial captado.

El costo inicial para implementar el sistema de tratamiento, contemplando la materia prima y los dispositivos para cada reactor, así como los reactivos necesarios para llevar a cabo los procesos unitarios.

El mantenimiento, relacionado en función del tiempo y costos de insumos. Dependiendo para cada tren de los procesos u operaciones: el tiempo de limpieza, cambio de insumos o recarga de cartuchos y pastillas.

La disponibilidad de material, se propone que el dispositivo a diseñar se pueda manufacturar con materiales de fácil accesibilidad para los habitantes de la Ciudad, por ejemplo material disponible en

ferreterías, tiendas de autoservicio, casas constructoras o tiendas que estén al alcance de todos, así como mercado de productos en línea (por internet).

Y la disponibilidad de espacio, para lo anterior habrá que considerar el espacio de una vivienda para proponer dispositivos y reactores que se adapten al espacio disponible.

Para sustentar cuantitativamente la elección, se propone desarrollar un indicador con base en las tres primeras variables. Siendo este el cociente de la cantidad de Agua que se podría aprovechar entre el producto del costo de inversión.

El indicador de mantenimiento se basa en el costo de recarga de consumibles y el tiempo entre cada retrolavado o cada que haya que abastecerse de material para cambiar repuestos y materia prima.

### 6.5.1. Indicador beneficio-costo

Para desarrollar el indicador beneficio costo, como ya se mencionó el valor del costo será el que respecta a la inversión inicial del sistema. Para obtener el valor de la inversión inicial en función de las dimensiones del dispositivo sería necesario realizar pruebas de laboratorio para obtener tiempos de retención y efectividad de remoción, dichas pruebas no son parte del objetivo del presente trabajo pero sí serán evaluadas posteriormente para continuar con la línea de trabajo de Mtro. Cristian Emmanuel González Reyes. Entonces, para poder obtener el valor de inversión inicial, se propone (en modo de suposición) las dimensiones para los filtros con materiales disponibles en cualquier ferretería, lo que incluiría: tubo de PVC sanitario de 4", conexiones para tubería de conducción de 1/2", tuercas unión de ambos diámetros para futuro mantenimiento y recarga; con el uso de esos materiales se construirían los filtros de arena y grava; el de carbón activado y para la resina de intercambio iónico más grava. Estos serían en el tubo de 4", y quedarían con las siguientes dimensiones de 4" de diámetro (119 mm=11.9 cm) y 50 cm de altura. El costo de los materiales mencionados, fueron cotizados en la tlapalería "El cajoncito", en la calle Emilio Castelar, Polanco; dando un total para el filtro con las características mencionadas de \$80.00 MXN. Para el filtro de arena y grava, junto con el de resina para intercambio iónico y grava, se realizará el cálculo para los generados suponiendo 2/3 de capacidad para la arena y la resina y el restante para la grava; en el caso del filtro para carbón activado se considera toda la capacidad del filtro para el carbón activado. Y para aterrizar cuantitativamente el beneficio, se realizó un análisis del costo de cada litro de agua abastecido por la red de agua potable de la Ciudad de México y multiplicado con la posible cantidad de agua captada en un año, en un hogar estándar de la ciudad de México como el descrito en el capítulo 1.4 del presente trabajo.

Para el Tratamiento primario se tiene la propuesta de tres trenes (ilustración 36 a 38), para los cuales se descartan los dos primeros debido a que la disponibilidad de los reactivos para coagulación es poca y son económicamente de alto costo. Por lo que para el indicador de tratamiento primario se utilizará sólo la propuesta 3.

En el Tratamiento secundario se evaluará con el indicador para los tres trenes propuestos ya que solo varía entre ellos el proceso de desinfección.

Y para el Tratamiento terciario se evaluará el método de desinfección más accesible y económico más las operaciones para ósmosis inversa e intercambio iónico.

En la “Tabla no. 16” se muestra el valor de inversión, el costo anual por mantenimiento y el posible ahorro en el pago del agua al aprovechar recurso pluvial; para obtener el índice beneficio-costos de los trenes de tratamiento propuestos.

El costo de inversión y el costo anual de mantenimiento considera los insumos necesarios para su correcto funcionamiento, dichos precios se encuentran en el capítulo 6.2.7 y en el anexo del documento, en las tablas 21 a la 24.

El posible ahorro anual se obtuvo mediante un análisis de la cantidad aprovechable de Agua pluvial con base en la superficie de una vivienda estándar en la ciudad (48m<sup>2</sup>) y con el precio de m<sup>3</sup> de agua en la CDMX (aproximadamente \$25 por m<sup>3</sup>) con base en los comprobantes de agua recopilados, promediando el costo por m<sup>3</sup> de agua menos el promedio de subsidio en la CDMX (el promedio del porcentaje subsidiado en la CDMX es del 58%, aproximadamente \$10.37 por m<sup>3</sup>). Así se obtuvieron que al año se podrían aprovechar en 48 m<sup>2</sup> de superficie: 21,885 Litros; que al obtener el producto por el costo del m<sup>3</sup> del agua subsidiado, resultan \$227 posibles de ahorro al año.

Y así con los datos anteriores, se obtuvo la relación del posible ahorro anual con el costo de inversión más un año de mantenimiento y se obtuvo el beneficio-costos para cada tren de tratamiento.

Tabla 16. Indicador beneficio-costos

Clasificación	Tren de Tratamiento	Costo de Inversión	Costo por mantenimiento anual	Posible ahorro anual con subsidio promedio	Índice Beneficio-Costo	Índice Beneficio-Costo 2do año
		\$	\$	\$		
Primario	<i>Propuesta 3</i>	302	47.22		0.75	1.30
Secundario	Propuesta 1	2592	287.22		0.09	0.16
Secundario	Propuesta 2	2802	547.22		0.08	0.14
Secundario	Propuesta 3	9402	47.22	227	0.02	0.05
Terciario	Propuesta 1	3875	688.33		0.06	0.10
<b>Óptima</b>	<b>Propuesta Final</b>	<b>992</b>	287.22		0.23	0.35

*Nota 1: Para el costo de inversión no se consideró el costo de inversión del dispositivo de separación de primeras lluvias, se omitió porque al ser un dispositivo necesario en todos los niveles de tratamiento para aprovechar agua de lluvia no impera mucho en el índice propuesto.*

*Nota 2: El detalle de la presupuestación de cada tren de tratamiento, junto con los generadores para calcular cuánto material de arena, grava, carbón activado y resina se necesitaría, se encuentra desarrollada en las Tablas 18, 19, 20 y 21 del Anexo del presente trabajo.*

Se puede concluir de manera cuantitativa, con la “Tabla no. 16”, que el tren de tratamiento conveniente en función del posible ahorro anual sobre el recibo del agua y el costo de inversión mas mantenimiento para un sistema domiciliar de tratamiento de Agua de lluvia es la propuesta del tercer tren de la clasificación primaria. Si bien sólo se podría utilizar en WC, lavadora, y limpieza de pisos y exteriores, pero para dicho tren el aprovechamiento debería de ser inmediato, porque si lo almacenamos en estas condiciones se podrían desarrollar microorganismos biológicos.

Como bien se concluyó, la propuesta resaltada en negritas y cursiva de la “Tabla no. 16” sería la mas conveniente según nuestro indicador, sin embargo, para el almacenamiento de Agua hay que

considerar una desinfección para no permitir el crecimiento de colonias microbiológicas durante el almacenaje. Por lo anterior se propone como tren de tratamiento óptimo, el ya seleccionado más una operación de desinfección basada en Cloro (ilustración 43 , ya que el dosificador de tricloro con pastillas opera de manera mecánica, por lo que no habría necesidad de electricidad para su operación, y con ellos menos contaminación indirecta al ambiente. Con lo anterior el costo de inversión para el tren de tratamiento óptimo sería de \$ 992.00 (sin considerar el dispositivo para separación de primeras lluvias) más mantenimiento anual de \$ 287.22 y con ello un índice **beneficio-costo de 0.18**, el cual sigue imperando sobre los demás de clasificación secundaria y terciaria. Por lo que el tren de tratamiento óptimo para un sistema a nivel domiciliario de tratamiento de Agua de lluvia sería el siguiente:

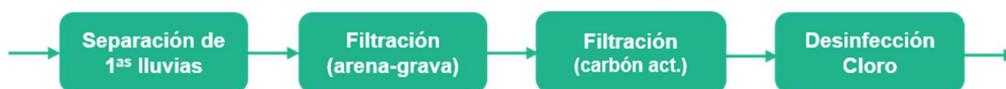


Ilustración 43 Tren de Tratamiento óptimo

### 6.5.2. Indicador beneficio-costo desde la perspectiva del gasto en agua potable embotellada

Si bien el capítulo anterior se enfocaba en analizar el beneficio-costo desde el punto de vista del aprovechamiento pluvial para el uso y consumo a nivel domiciliario, incluyendo uso de lavadora, WC, riego, cocina, aseo personal, consumo, etc. Este capítulo se destina únicamente a la relación del costo de inversión y mantenimiento de un tren de tratamiento terciario que te otorga agua potable, con el gasto anual por vivienda estandar en agua potable.

Es de dominio público que el mexicano gasta grandes cantidades de dinero por agua potable embotellada, por un litro y medio de agua van desde los 6 hasta los 12 pesos por una cantidad de líquido que cuesta su tratamiento menos de \$1 por litro. Según un análisis realizado por la revista digital FINERIO, el mexicano es el mayor consumidor de agua potable embotellada, con 234 litros al año, lo que representa el 6% de su gasto. (El Universal, 2015; Finerio, 2018). Entonces para determinar el gasto anual de una familia con vivienda estandar en la ciudad de México, se obtuvieron datos de análisis y reportes periódicos, mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 17 Gasto anual por persona en agua embotellada

Fuente	Número de personas habitantes	Gasto anual \$	Gasto por persona \$/habitante
El Universal	3	2,880	960
El Universal	4	3,744	936
Finerio	1	780	780
Finerio	3	2,135	712
Finerio	5	3,558	712
Forbes	3.6	2,704	751
<b>Promedio de gasto anual por persona</b>			<b>808</b>

Considerando que una vivienda estándar en la Ciudad de México está compuesta por 3.6 habitantes, se determina que el gasto anual en una vivienda por adquisición de agua potable embotellada es de \$2,910. Con base en el gasto anual en agua embotellada y el costo de inversión del tren de tratamiento terciario que garantice agua potable para consumo humano, se obtiene el siguiente indicador beneficio-costo:

Tabla 18 Indicador Beneficio-costo del tratamiento para potabilizar agua pluvial, contrastado con el gasto en agua potable embotellada

Clasificación	Tren de Tratamiento	Costo de Inversión \$	Costo por mantenimiento anual \$	Gasto anual por vivienda \$	Índice Beneficio-Costo 1r año	Índice Beneficio-Costo 2do año
Terciario	Propuesta 1	3,875	688.33	2,910	0.75	1.28

Se observa que, centrándonos únicamente en el agua potable, el BC del tratamiento terciario es mayor que el obtenido en el capítulo anterior para el uso a nivel domiciliario, contrastando 0.75 sobre el 0.23 del tratamiento óptimo a nivel habitacional. Y mucho mayor si sacamos el beneficio por dos años consecutivos de uso, ya que será menor el gasto y mantenimiento, a el gasto por consumo de agua potable embotellada; comparando el BC del tratamiento para potable y el óptimo a nivel domiciliario es mucho más contundente el beneficio generado por un tratamiento terciario contra el gasto promedio en una casa estándar de la CDMX. Cabe mencionar que se descarta la comparación con el BC de la propuesta 3 del tratamiento primario, porque no es favorable almacenar agua sin previamente haber pasado por una desinfección.

Lo anterior conlleva a suponer que vale más la pena invertir en un tratamiento que potabilice el agua a un tratamiento que es barato pero solo genera ahorros en el consumo habitacional y no en el consumo humano.

Tabla 19. Comparativa de Índice Beneficio-Costo para uso domiciliario y contra agua potable embotellada

Clasificación	Tren de Tratamiento	Costo de inversión \$	Costo por mantenimiento anual \$	Posible ahorro anual con subsidio promedio \$	Índice Beneficio-Costo	Índice Beneficio-Costo 2do año
Primario	Propuesta 3	302	47.22		0.75	1.30
Secundario	Propuesta 1	2592	287.22		0.09	0.16
Secundario	Propuesta 2	2802	547.22		0.08	0.14
Secundario	Propuesta 3	9402	47.22	227	0.02	0.05
Terciario	Propuesta 1	3875	688.33		0.06	0.10
Óptima	Propuesta Final	992	287.22		0.23	0.35
<b>Terciario</b>	<b>Propuesta 1</b>	<b>3875</b>	<b>688.33</b>	<b>2910</b>	<b>0.75</b>	<b>1.28</b>

## Capítulo 7. El beneficio de aprovechar Agua de lluvia sobre el Acuífero del Valle de México

Como ya es conocido, suministrar agua al Valle de México es muy costoso; económica y energéticamente. Por lo que aprovechar Agua de lluvia para algunas labores de la casa puede ser solución o apoyo para disminuir gastos de extracción y traslado del recurso potable. Pero cabe hacerse la pregunta: ¿realmente aprovechar el recurso pluvial es la solución? Para indagar la respuesta, cabría realizar un análisis de costo y el volumen de agua que podríamos sustituir.

En cuanto al costo, ya se analizó que el tratamiento para aprovechamiento del agua pluvial como agua para consumo humano necesita gastos de inversión de hasta \$4,000.00, más los debidos mantenimientos, y, según el índice de beneficio-costo, obtenido en la Tabla no. 16 del Capítulo 6, esto no es rentable. Ya que el indicador es mínimo a comparación de su valor por la inversión de un sistema primario en relación con la cantidad de agua aprovechable. Por lo anterior con base en los datos de la tabla mencionada y el índice beneficio-costo propuesto, el tratamiento óptimo para aprovechar Agua de lluvia en relación a sus costos de inversión, sería el tratamiento primario más una proceso de desinfección para asegurar inocuidad en el agua a almacenar.

Solo restaría realizar una revisión de cuánto volumen de Agua de lluvia al año podríamos aprovechar en la CDMX y su beneficio en la sobreexplotación del acuífero de esta. Para dar inicio al mencionado análisis, es necesario conocer la cantidad de Agua de lluvia que hay anualmente en la región; para lo anterior, en la tabla no. 20, según CONAGUA, se observa la cantidad de precipitación durante todo el año desde el año 2014 hasta el 2018, para este último el único dato faltante era la cantidad de lluvia en el mes de diciembre, por lo que se promedió con la lluvia de ese mes en los otros años. Para obtener la cantidad de precipitación anual se promedió la total de cada uno de estos años, obteniendo que cada año en la Ciudad de México se tienen 607.92 mm de lluvia.

Tabla 20 Precipitación en la CDMX, desde el año 2014 hasta el 2018. Fuente: CONAGUA

MES	PRECIPITACIÓN (MM)					Promedio
	2014	2015	2016	2017	2018	
<b>ENERO</b>	0.4	0.3	6.7	0	7.9	3.06
<b>FEBRERO</b>	1.4	2.9	0.8	0	7.7	2.56
<b>MARZO</b>	10.9	19.5	27.8	18.1	12.2	17.7
<b>ABRIL</b>	21.8	8.3	19	12.9	44.5	21.3
<b>MAYO</b>	60	69.6	51.8	48.9	59.1	57.88
<b>JUNIO</b>	96.4	74.1	113	86.2	127.4	99.42
<b>JULIO</b>	99	94.1	131.9	101.7	85.9	102.52
<b>AGOSTO</b>	108.2	79.2	128.4	101.3	198.2	123.06
<b>SEPTIEMBRE</b>	98.3	114.3	113.7	86.8	120.7	106.76
<b>OCTUBRE</b>	92.6	20.2	14.6	31.4	86.8	49.12
<b>NOVIEMBRE</b>	7.1	5.4	45.5	0.6	31.1	17.94
<b>DICIEMBRE</b>	19.6	4.1	2.7	0	6.6	6.6
<b>ANUAL</b>	615.7	492	655.9	487.9	788.1	<b>607.92</b>

Para realizar el cálculo del volumen de Agua de Lluvia que se podría aprovechar, vamos a considerar: el promedio de precipitación anual de la Tabla no. 20 del presente capítulo, la cantidad de superficie habitacional mencionada en la Tabla no. 2 del capítulo 1 y un coeficiente de escorrentía, según Aparicio (1999), de mínimo 0.3 para zonas residenciales espaciadas y de 0.75 en zonas residenciales densas, por lo que el volumen calculado sería el producto de todas las anteriores y quedaría de la siguiente manera:

Tabla 21 Cálculo del Volumen de Agua de Lluvia aprovechable

<b>Precipitación anual CDMX</b>		<b>607.92</b>	<b>mm</b>
<b>Superficie habitacional CDMX</b>		278.14	Km <sup>2</sup>
<b>Coeficiente de escorrentía</b>	<i>mín.</i>	0.3	
	<i>máx.</i>	0.75	
<b>Agua de lluvia aprovechable</b>	<i>mín.</i>	50,726,808	m <sup>3</sup>
	<i>máx.</i>	126,817,021	m <sup>3</sup>
<b>Caudal de agua pluvial aprovechable</b>	<i>mín.</i>	1.61	m <sup>3</sup> /s
	<i>máx.</i>	4.02	m <sup>3</sup> /s

Como se puede observar, el volumen máximo aprovechable de Agua de Lluvia al año es de casi 127 millones de metros cúbicos, lo que representa el 10 % del volumen sobreexplotado del acuífero del Valle de México (el volumen total sobreexplotado del acuífero es de 1,261 millones de metros cúbicos).

Con base en los datos anteriores podemos concluir que si bien aprovechar a nivel vivienda el Agua de Lluvia no es la solución al problema de la sobreexplotación del acuífero. Si genera una disminución en el volumen que se extrae de más del subsuelo del 21%. Pero si esto lo llevamos a mayor magnitud y se aprovechara toda el Agua de Lluvia que precipita sobre la Ciudad de México y el área metropolitana; considerando 235,987.29 Hectáreas de superficie urbana y la precipitación anual mencionada en la tabla No. 21 del presente capítulo; tendríamos un aprovechamiento de 1,075,960,450 m<sup>3</sup> de Agua de lluvia al año en la Ciudad de México, lo que representa el 85 % del volumen sobre extraído (INEGI, 2017).

Entonces cuantitativamente el aprovechamiento pluvial a nivel domiciliario no es la solución al problema de sobreexplotación del subsuelo, pero a nivel metropolitano, si separamos el drenaje de Aguas residuales de la captación de Agua de Lluvia y para el aprovechamiento de estas últimas habría hacer un estudio de conveniencia, si se conducen a una planta de tratamiento para su posterior suministro como recurso Potable o a diversos puntos de inyección al subsuelo para permitir su infiltración directa al subsuelo y así llegar a tener el impacto de disminución de hasta 85% de sobre extracción de Agua del acuífero del Valle de México.

## Capítulo 8. Vivienda Industrializada Sustentable, VIS



*Ilustración 44 Vivienda Industrializada Sustentable*

### 8.1. ¿Qué es?

Vivienda Industrializada Sustentable (VIS) es un proyecto de colaboración entre la Facultad de Arquitectura, Centro de Investigaciones de Diseño Industrial y la Facultad de Ingeniería, con apoyo del CONACYT, para desarrollar un lugar digno de habitarse e incluyente con el medio ambiente, eficiente y asequible para ser habitada hasta por dos personas. El diseño del prototipo se diseñó con los espacios mínimos indispensables para poder desarrollar las actividades diarias de dos personas dentro de una casa, llevados a una casa móvil (tipo “camper”) y aprovechando los recursos naturales para suministrar los servicios básicos necesarios; luz y agua.

El proyecto nace a causa de la actual demanda de vivienda en el país y el aumento en la tendencia de constante movilidad; con el objetivo de otorgar un espacio digno para el desarrollo de la vida diaria unipersonal o bipersonal; integrada con los servicios básicos de un hogar: cocina, sala-comedor, servicios sanitarios, recámara, vestidor, oficina y zona de lavado). Para lograr el ambicioso objetivo y cumplir con el deseo de hacerla una vivienda móvil, se propuso un habita-mueble que se pueda transportar como remolque sobre las calles de la ciudad; para esto último se obliga a cumplir con las medidas del tamaño máximo transportable, correspondiendo a 2.60 metros de ancho (ancho de vía reglamentado), 7.20 metros de largo (radio de giro en vueltas de un carril) y 3.60 metros de altura (determinadas por las dimensiones de casetas de cobro, puentes y cableado urbano).

Al estar limitado por las dimensiones mencionadas en el párrafo anterior, el diseño de la vivienda se proyectó con dos plantas con variación de alturas en sus cortes. Generando cierta dinámica con diferentes alturas en cada nivel, en función de los usos que tiene cada espacio, así como se muestra en las siguientes imágenes, para aprovechar al máximo los espacios existentes.

Ante el actual crecimiento demográfico en la zona metropolitana, la demanda de vivienda cada vez es mayor y con menos capacidad de satisfacerse por el crecimiento de la mancha urbana, que está llegando a su límite. Y de la mano, la demanda por servicios básicos, como lo son la luz y el Agua,

también van en aumento y a nivel nacional o mundial, cada vez se torna más complicado la satisfacción de estos. Por ende, la propuesta de VIS es implementar tecnologías bioclimáticas o recursos sustentables para la vivienda, lo que serían generación de electricidad a partir de energía solar y el aprovechamiento del recurso pluvial.

Actualmente el proyecto cuenta con los elementos básicos para captar y almacenar agua de lluvia, pasando por una separación de primeras lluvias, para darle uso como agua de captación pluvial en la vivienda, lo que sería solo uso en WC, y lavado de piso o exteriores. Es por ello que en el presente proyecto se propone el diseño del dispositivo que permita mejorar la calidad del recurso pluvial captado para darle mayor aprovechamiento dentro de la vivienda.



*Ilustración 45 Modelo VIS*

## 8.2. Aplicación del sistema de tratamiento de Agua de Lluvia

La instalación hidráulica para VIS consiste en un sistema híbrido de uso de Agua de Lluvia y recurso de la red municipal de Agua potable. Actualmente el proyecto sólo utiliza el recurso pluvial para WC, ya que no cuenta con un sistema de tratamiento para Agua de Lluvia, solo tiene en uso un dispositivo de separación de primeras lluvias, el funcionamiento o la dinámica de almacenamiento y extracción del recurso líquido para el WC está basada en un tanque mixto, que se alimenta con Agua del tanque pluvial y si este no tiene Agua, con la del tanque potable.

El diseño y los espacios del prototipo VIS son muy reducidos y están en función de las dimensiones límite para poder transportarse dentro de las vías de cualquier ciudad y carretera dentro de México. Y no sólo dependemos de estos espacios, también el diseño del dispositivo para mejorar la calidad de Agua de Lluvia depende de la distribución actual de las instalaciones existentes. En la ilustración 46 se presenta, dentro de la planta, el espacio asignado al cuarto de máquinas, donde se encuentran las bombas y el calentador eléctrico; y donde se propone la instalación del sistema de filtración y desinfección, ya que en el exterior de la casa se encuentra el sistema de tratamiento preliminar, que consiste en la separación de primeras lluvias y la trampa de arenas, esta última es un sistema de operación unitaria para atrapar las partículas sólidas mayores que arrastra el Agua de Lluvia durante su escurrimiento. Consiste en un arreglo con tubería de PVC y accesorios para atrapar dichas partículas y permitir que el Agua fluya con menos arenas, ramas, hojas o todo tipo de residuos visibles que arrastró durante su recorrido.



Ilustración 46 Planta Baja VIS

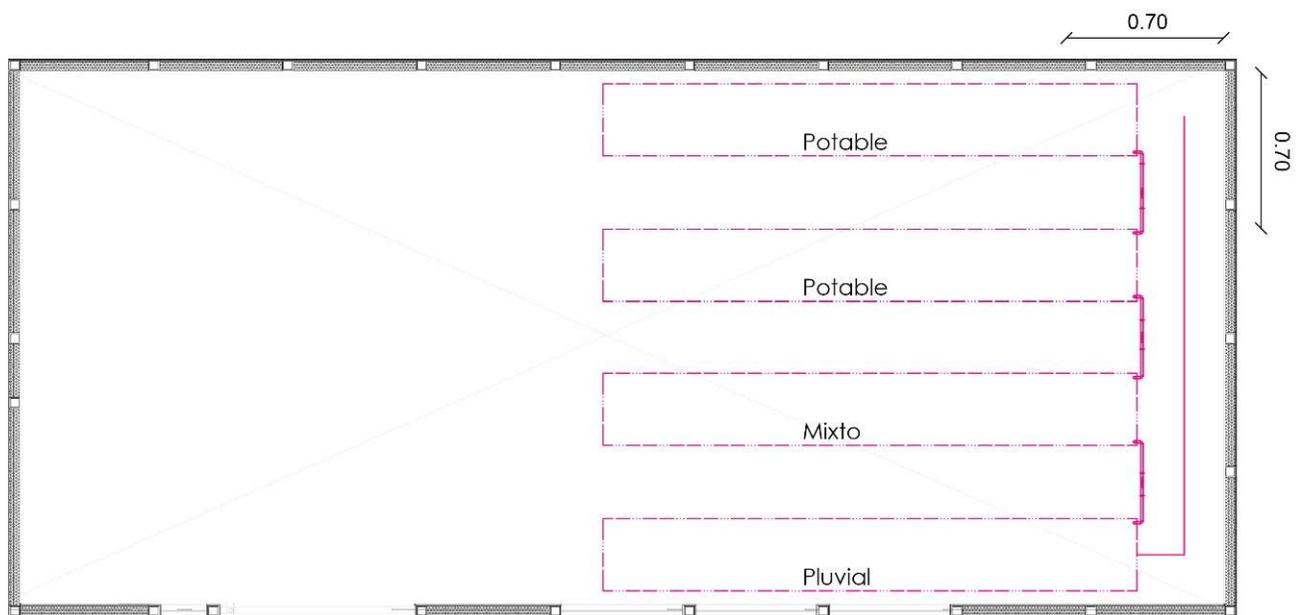


Ilustración 47 Distribución de los tanques de almacenamiento de Agua en VIS

Considerando lo anterior y que uno de los objetivos de la presente tesis es proponer el diseño conceptual del tren de tratamiento óptimo para cumplir con la calidad necesaria de nivel primario y poder aprovecharla en la lavadora y lavado del hogar, se propone que la instalación del dispositivo para mejorar la calidad del agua de lluvia, dentro del prototipo VIS, se realice en el cuarto de máquinas, en el muro izquierdo, resaltado en la ilustración 48. Por lo que según lo observado en la ilustración 46 y la ilustración 48, se tiene disposición de 70 cm de largo y aproximadamente un metro de alto para nuestro diseño. Por esta razón, se necesitará bombear el recurso desde el tanque pluvial, hacia el sistema de tratamiento, para posteriormente almacenarla en el mixto, donde ya se podría disponer de este recurso para lavadora, WC y una llave para lavado de pisos y exteriores.



*Ilustración 48 Cuarto de máquinas VIS*

En función del capítulo 6.4, el tren de tratamiento óptimo elegido para disponer de Agua para lavado de pisos y exteriores, WC y lavadora, sería el señalado en la ilustración 49. Para este proceso, considerando el tratamiento preliminar de la trampa de arenas y el discriminador de primeras lluvias, se proponen dos filtros fabricados con tubería de PVC de 50 cm de altura y 4" de diámetro, el primero de ellos para remover sólidos sedimentables sería con grava y arena sílica, mientras que el segundo con carbón activado para remover olor, color y turbiedad. La última operación sería con un dosificador de pastillas de Tricloro para desinfección y efecto residual en el Agua al momento de su almacenamiento en el tanque mixto previo a su uso. Todo esto sería instalado en el cuarto de máquinas y succionado, con una bomba, desde el tanque pluvial; posterior a haber recorrido la trampa de arenas y el discriminador de primeras lluvias.

## Capítulo 9. Conclusiones y reflexiones

### 9.1 Conclusiones

El aprovechamiento de Agua pluvial no es un descubrimiento contemporáneo, pero sí un recurso en el que estamos obligados a invertir y optimizar. Hoy en día la implementación de los sistemas para soluciones sustentables, como SCALLs, paneles fotovoltaicos, etc., no son asequibles y, por ende, sólo los vemos en viviendas de altos recursos o de alta necesidad. Pero posterior al análisis, planeación y diseño conceptual, realizados en esta tesis, se define que la implementación de un sistema de tratamiento para agua de lluvia puede ser accesible. Los elementos más “caros” que complementan un sistema de captación de agua de lluvia, serían los de almacenaje: construcción de una cisterna con tabique, considerando excavación, mano de obra, materiales y todo lo necesario para su ejecución está presupuestado aproximadamente en \$30,000.00 MXN (en función de la capacidad necesaria) y la instalación de tubería para conducción de Agua, estará hasta en \$10,000.00 (en función de la longitud necesaria). Pero el costo del sistema de tratamiento propuesto se calcula por debajo de los \$1,000.00 y con un tratamiento primario se podría aprovechar el recurso en más del 50% del consumo en vivienda o si se requiere un tratamiento terciario, aproximadamente serían \$4,000.00 de inversión inicial.

Se identificó que el Agua de lluvia que precipita sobre la CDMX y el área metropolitana supera los límites máximos permisibles, establecidos en la NOM 127 SEMARNAT, de las siguientes características: color verdadero, turbiedad, pH, Na<sup>+</sup>, Al, Fe, coliformes totales y fecales. Estas partículas son captadas por la lluvia desde la formación de nubes en la suspensión de estas en el aire, el recorrido de las nubes y al precipitar el agua y ser conducida por una superficie. Como parte de la línea de investigación, será conveniente analizar lluvias dependiendo su procedencia para identificar los contaminantes dominantes, si la lluvia es provocada por huracanes y ciclones, esperando diferencias entre la calidad en el agua dependiendo de la procedencia de la humedad que la formó; si la lluvia es provocada por un frente frío, vendría desde el norte, por lo que probablemente contenga más compuestos químicos por venir desde lugares con mucha producción industrial; y así poder identificar con mayor exactitud la contaminación de la lluvia en función de su origen.

Uno de los criterios fundamentales fue encontrar el tren de tratamiento primario que represente el mayor beneficio costo para un aprovechamiento domiciliario del agua de lluvia, y se cumplió, ya que esta relación baja al agregarle un proceso de desinfección necesario para almacenar el agua sin temor al desarrollo microbiológico (BC de 0.23 al primer año y 0.35 al segundo), ilustración 49. Por otra parte, se identificó un área en la que parece ser mayor el beneficio de un tratamiento terciario (BC de 0.75 al primer año y más de la unidad al segundo), capaz de entregar agua potable, esto si solo se compara en relación con el consumo excesivo de agua embotellada en la CDMX, siendo el gasto anual por persona en agua embotellada de aproximadamente \$808.00, donde por mucho se encuentra mayor el beneficio de invertir en un tratamiento avanzado para potabilizar agua de lluvia y dejar de consumir producto embotellado (ilustración 50) lo que beneficia la economía y ambiente, al reducir gasto y la generación de residuos de PET.

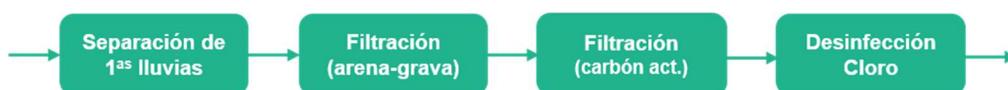


Ilustración 49 Tren de Tratamiento Óptimo

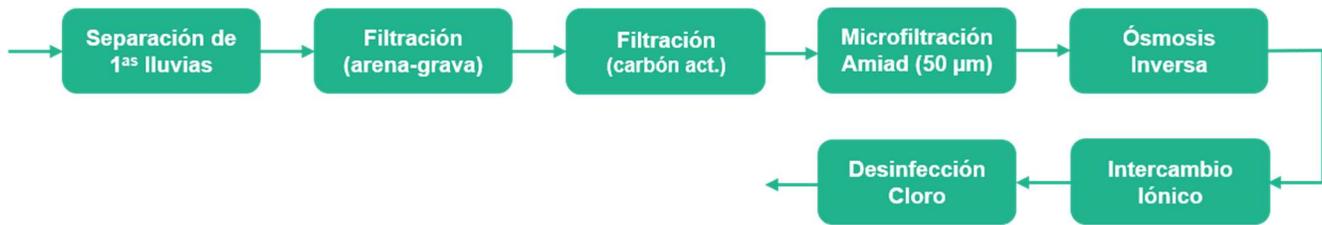


Ilustración 50, Tren de tratamiento terciario

Estandarizar la vivienda “tipo” de la CDMX, es una tarea complicada por la disponibilidad de datos y la gran diferencia de estratos sociales que existen dentro de la metrópoli, pero con base en datos de INEGI, CONAGUA y artículos periodísticos se establecieron las siguientes características por la vivienda estándar que hay en la ciudad de México: 3.6 habitantes, de los cuales dos son activos económicamente con un ingreso promedio de \$9,064 por persona y una superficie de vivienda aproximada de 48 m<sup>2</sup>, sin considerar patios, jardines y estacionamiento. Y considerando un consumo por habitante día de 191 Litros, conseguimos un consumo por vivienda de 688 Litros diarios.

Si se considera que todas las viviendas de la CDMX implementaran sistemas de captación pluvial y, como mínimo, el sistema de tratamiento primario propuesto, se aprovecharían cerca de 127 millones de metros cúbicos de Agua de lluvia al año, lo que equivale a dejar de sobreexplotar el 21% del acuífero del Valle de México. Esto esclarece que aprovechar el Agua de Lluvia en la CDMX no es la única solución para dejar de extraer excesivamente agua del subsuelo, pero si esto lo llevamos a mayor magnitud y se aprovechara toda el Agua de lluvia que precipita sobre la Ciudad de México y el área metropolitana; considerando 235,987.29 hectáreas de superficie urbana y la precipitación anual mencionada en la tabla No. 21 del presente capítulo; tendríamos un aprovechamiento de 1,075,960,450 m<sup>3</sup> de Agua de lluvia al año en la Ciudad de México, lo que representa el 85 % del volumen sobre extraído (INEGI, 2017).

Entonces cuantitativamente el aprovechamiento pluvial a nivel domiciliario no es la solución al problema de sobreexplotación del subsuelo, pero a nivel metropolitano, si separamos el drenaje de Aguas residuales de la captación de Agua de lluvia y para el aprovechamiento de estas últimas cabría hacer un estudio de conveniencia, si se conducen a una planta de tratamiento para su posterior suministro como recurso Potable o a diversos puntos de inyección al subsuelo para permitir su infiltración directa al subsuelo y así llegar a tener el impacto de disminución de hasta 85% de sobre extracción de Agua del acuífero del Valle de México.

Y lo anterior aplicándose en conjunto con: el uso de muebles economizadores, la recirculación de Agua, y la implementación; desde el sector educativo a nivel básico; de temas sobre la importancia y el uso correcto del Agua; se podría llegar a una gran cifra donde se reduzca y con esfuerzo hasta casi cero la cantidad de sobreexplotación del subsuelo.

## 9.2 Reflexiones

Considero que hemos llegado un punto de disrupción; donde nuestra participación como habitantes, pero más específico como arquitectos e ingenieros; ya no está para desarrollar proyectos invasivos con el ambiente, sólo por el egoísmo de crear desarrollos de grandes magnitudes, que seguro son magníficos e impresionantes. Hemos llegado al punto de convergencia donde tenemos que ser incluyentes con la ecología, con el ambiente; hacer uso eficiente de los recursos naturales y energéticos del planeta, necesitamos integrar nuestra vida con la dinámica ambiental de la naturaleza, dejar de construir grandes aeropuertos que destruyen la flora y fauna endémica o talar los bosques y

manglares para grandes desarrollos. Es momento de diseñar espacios donde podamos vivir dignamente, con salud, comodidad, tranquilidad, seguridad y un sinfín de características que deseamos en nuestros hogares, pero lo importante, diseñarlos abrazando a y abrazados por la naturaleza.

Es un hecho que la creciente demanda de vivienda y servicios públicos en nuestro país crece y cada vez se vislumbra menos posible la satisfacción de estos; a causa de costos, tiempo de construcción y hasta por no corrupción. En función a esto es necesaria la exploración constante de soluciones innovadoras que, utilizando diferentes tecnologías en materiales, procesos y sistemas; puedan conducirnos a soluciones sustentables en todos los aspectos de nuestra vida diaria.

Y el camino a la meta anterior se respalda con trabajos como el que hoy se presenta en este documento, hay recursos y procesos para satisfacer nuestras necesidades de Agua potable, siendo asequibles y prácticos para todos. También es necesario enfocarnos en abaratar los procesos y soluciones sustentables para nuestros proyectos, hay que cambiar ese enfoque de “moda” que le ven algunos a estos temas y dejar de verlos como un negocio, es un aspecto que debe de tomarse como indispensable en todos y cada uno de los desarrollos.

***Me gustaría despedirme con una frase que por primera vez le escuché a el  
Maestro Pablo Javier Monterrubio López (QEPD):  
“No queremos medio ambiente, lo queremos completo”.***

## Bibliografía

- 1 Academia de La Investigación Científica A.C. (1995) *“El agua y la Ciudad de México”*, México.
- 2 Aguirre, Ramón (2012); *“El gran reto del agua en le ciudad de México”*; Offset Santiago; México
- 3 Aparicio Mijares (1199); *“Fundamentos de hidrología de superficie”*, Limusa, México
- 4 Arias, et Al; *“Estudios preliminares de la calidad de agua de lluvia en la Ciudad de Guanajuato, Gto. México”*; Universidad de Guanajuato, México.
- 5 Asociación española de abastecimiento de agua y saneamiento (1984), *“Manual de la Cloración”*. Madrid
- 6 Báez, et al. (2004); *“Rainwater chemical composition at two sites in Central Mexico”*, Elsevier, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
- 7 Ballén, José (2006); *“Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia”*; Seminario iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Água, Joao Pessoa, Brasil.
- 8 Burns, E. (2009); *“Repensar a cuenca: La gestión de ciclos del agua en el Valle de México”* México
- 9 Carbotecnia (2018) <https://www.carbotecnia.info/encyclopedia> Consultado el 10 de octubre el 2018
- 10 Castañeda (2018); *“La desigualdad en la Ciudad de México”*; Nexos. En: <https://economia.nexos.com.mx/?p=894> consultado el 06 de noviembre del 2018
- 11 CEC, Commision for Environmental Cooperation of North America (2008); *“Deposition Acid”*
- 12 Centro de Estudios de las Finanzas Públicas (2009); *“Perfil socioeconómico del DF”* Palacio Legislativo de San Lázaro, México
- 13 CMHC's, *“Research Report, CMHC's Healthu House in Toronto”*, CMHC SHCL, Canadá
- 14 Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2016); *“Estadísticas del Agua en México, Edición 2016”*; México
- 15 Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2017); *“Estadísticas del Agua en México, Edición 2017”*; México
- 16 Comisión Nacional del Agua, CONAGUA (2009); *“Semblanza Histórica del Agua en México”*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- 17 CONAGUA (2016); *“Manual de Agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado”*. México
- 18 Consejo Consultivo del Agua, A.C. (2017), *“Diagnóstico del Agua; Panorama del Agua en México”* en: <http://www.aguas.org.mx/sitio/index.php/panorama-del-agua/diagnosticos-del-agua> consultado el 30 de Agosto del 2018
- 19 Coordinadores de Proyecto VIS, (2016); *“Manual de Proyecto, Vivienda Industrializada Sustentable”*, UNAM, México.

- 20 Costa, et Al. (2014); *“Calidad de las aguas meteorológicas en la ciudad de Itajubá, Minas Gerais, Brasil”*, Universidad Federal de Itajubá, Brasil.
- 21 Dávila, Joelia (2016); “Las condiciones óptimas de la vivienda en México” en <https://www.excelsior.com.mx/nacional/2016/12/05/1132258> consultado el 06 de octubre del 2019
- 22 Departamento de Servicios de Salud de California (2006); *“Posibles efectos en la salud, relacionados con nitratos y nitritos en agua de pozos privados”*; Rama de Investigaciones de Salud Ambiental; California, EUA.
- 23 Diario Oficial de la Federación; (2000) “NOM-127-SSA1-1994”, México
- 24 Dirección de Monitoreo Atmosférico (2016), *“¿Qué es el ozono?”*, consultado en <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/noticias/que-es-ozono/que-es-ozono.pdf> el día 26 de Agosto del 2019
- 25 Dwayne-Gonzales (2014), “Evaluación de alternativas para la desalinización de agua de mar aplicables en Isla Unión, San Vicente y Las Granadinas, México.
- 26 Eco Inventos, Potabilización de Agua de Lluvia en: <https://ecoinventos.com/sistema-de-captacion-de-agua-de-lluvia-para-usar-como-agua-potable/> consultado el 03 de Septiembre del 2018
- 27 Espinoza-Zúñiga (2014); *“Evaluación de la calidad del agua de lluvia para su aprovechamiento y uso doméstico en Ibagué, Tolima, Colombia”*, Ingeniería Solidaria, Colombia.
- 28 Fluence news team (2016), *“¿Qué es un proceso de membranas?”* en <https://www.fluencecorp.com/es/que-es-un-proceso-de-membranas/> consultado el 04 de agosto del 2019
- 29 Forbes (2018); “Escasez de Agua en CDMX” en: <https://www.forbes.com.mx/cdmx-entre-las-11-ciudades-que-podrian-quedarse-sin-agua-potable/> consultado el 23 de Septiembre del 2018
- 30 Fundación para la Salud Geoambiental, (2013); “SO2 en la atmósfera” en <https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-azufre-so2> consultado el 28 de septiembre del 2018
- 31 Gaceta Oficial del Distrito Federal (2003) *“Ley de Aguas del Distrito Federal”*; México
- 32 Gaceta Oficial del Distrito Federal (2011) *“Ley de mitigación y adaptación al cambio climático y desarrollo sustentable para el Distrito Federal”*; México
- 33 Gallardo A.; García L. (1999) *“Lluvia ácida”*, Gobierno del Distrito Federal, Diseño y Elaboración.
- 34 García, Beatriz; (2013) *“Caracterización del agua de lluvia captada en la una edificación para su aprovechamiento con fines de sustentabilidad hídrica”* (Tesis para obtener el grado de Maestra en Ingeniería), Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. México.
- 35 García, Hiram (2012) *“Sistema de captación y aprovechamiento pluvial para un ecobarrio de la Cd. De México”* (Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería), Universidad Nacional autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México

- 36 Grupo de Interacción Océano Atmósfera (GIOA), (2017); “Interacción Físicoquímica de la Atmósfera” en: <http://grupo-ioa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php/wrf-chem/cdmx/concentracion-de-so2> consultado el 28 de septiembre del 2018.
- 37 Hernández, S. (2018); “*Pagan hasta \$1,800 por una pipa con agua*”. El Universal, México
- 38 INEGI (2018); “*Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo. Segundo trimestre 2018*” en: <http://reporteeconomico.sedecodf.gob.mx/index.php/site/main/114> consultado el 08 de noviembre del 2018
- 39 Instituto Nacional de Estadística y Geografía ,INEGI (2017), “*Marco Geoestadístico 2017*”, en: <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/mg/>. Consultado el 19 de enero del 2019
- 40 Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI (2015); “*Panorama sociodemográfico de la Ciudad de México 2015*”. México
- 41 ITC DOSING PUMS, “Cloración del agua” en [https://www.itc.es/wp-content/uploads/article-Cloracion\\_agua\\_potable-ES.pdf](https://www.itc.es/wp-content/uploads/article-Cloracion_agua_potable-ES.pdf) consultado el 02 de agosto del 2019
- 42 Jiménez, Rebeca (2006); El universal: “*Investigan contaminación proveniente de Hidalgo*” publicado el 31 de enero del 2006 en: <http://archivo.eluniversal.com.mx/ciudad/73882.html>
- 43 Lamundi, “*Top 10 de municipios y delegaciones con mayores ingresos en el país*” en: <https://www.lamudi.com.mx/journal/top-10-de-los-municipios-y-delegaciones-con-mayores-ingresos-en-el-pais/> consultado e 06 de Noviembre del 2018
- 44 Legorreta, Jorge (2006) “*El agua y la ciudad de México; De Tenochtitlán a la megalópolis del siglo XXI*”, México, Universidad Autónoma de Azcapotzalco
- 45 López-Calva (2008); “*El ingreso de los hogares en el mapa de México*”, en: <http://www.eltrimestreeconomico.com.mx/index.php/te/article/view/421/617#ch6> consultado el 06 de Noviembre del 2018. Fondo de Cultura económica, México
- 46 Manahan (2007); “*Introducción a la química ambiental*”; Ed. Reverte, UNAM; México
- 47 Maldonado, Victor; “Filtración” en: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/nueve.pdf> consultado el 23 de junio del 2019.
- 48 Milenio (2019): “*El agua de lluvia no es saludable para beber, pero así la puedes reutilizar*” consultado en: <https://www.milenio.com/ciencia-y-salud/la-captacion-de-agua-de-lluvia-y-sus-usos> el día 17 de agosto del 2019
- 49 Monografías, Puga Bullón (2018) “Resinas de intercambio iónico” en: <https://www.monografias.com/trabajos51/intercambio-ionico/intercambio-ionico2.shtml> consultado el 10 de Octubre del 2018
- 50 Moretton, Juan (1996). “*Contaminación del aire en la Argentina*”. Ediciones Universo, Colección de Bolsillo. Argentina.
- 51 Noticieros Televisa (2018); “¿Por qué sufrimos desabasto de agua en la CDMX?”

- 52 ONU, WWAP (Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos); (2018) *“Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones Basadas en la Naturaleza”* París, UNESCO
- 53 Organización Mundial de la Salud, *“Agua para consumo”* en: <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water> consultado el 28 de Agosto del 2018
- 54 Parungo, et Al. (1989); *“The investigation of air quality and acid rain over the gulf of Mexico”*, Gran Bretaña.
- 55 Perló Cohen, Manuel; Gonzáles Reynoso, Arsenio Ernesto (2005) *“¿Guerra por el agua en el Valle de México? Estudio sobre las relaciones Hidráulicas entre el Distrito Federal y el Estado de México”*, México, Universidad Nacional Autónoma de México
- 56 Price, M (2003); *“Agua subterránea”* Limusa
- 57 PRTR-España, Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, (2017) *“Partículas PM10”* en <http://www.prtr-es.es/Particulas-PM10,15673,11,2007.html> consultado el 28 de septiembre del 2018.
- 58 Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores (2018), Eficiencia Física en: <http://www.pigoo.gob.mx/Ciudad> consultado el 21 de Abril del 2019
- 59 Red Automática de Monitoreo Atmosférico (1994); Programa de Precipitaciones ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Dirección General de Prevención y control de la Contaminación.
- 60 REMA, (2018); *“Contaminantes atmosféricos”* en: [http://rema.atmosfera.unam.mx/rema/REMA\\_POLEN\\_INF.aspx](http://rema.atmosfera.unam.mx/rema/REMA_POLEN_INF.aspx) consultado el 27 de septiembre del 2018.
- 61 Renom Madeleine; *“Nubes y procesos de precipitación”* en: <http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/El Sistema Climatico/Teorico El Sistema Climatico/Nubes.pdf> consultado el 31 de agosto del 2019
- 62 *Rolph, G., Stein, A., and Stunder, B., (2017). Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY. Environmental Modelling & Software, 95, 210-228,https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025*
- 63 Romero, Solen Magaly (2017); *“Implementación de una planta piloto para la potabilización de agua de lluvia”* (Tesina para obtener el grado de especialista en ingeniería sanitaria), Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México.
- 64 Sánchez, Javier (2012) *“La vivienda social en México”*, México
- 65 Sanitas, (2018) *“Ozono en la atmósfera”* en <https://www.sanitas.es/sanitas/seguros/es/particulares/biblioteca-de-salud/prevencion-salud/efectos-ozono.html> consultado el 28 de septiembre del 2018

- 66 Secretaria del comercio y fomento industrial (2001), Análisis de Agua-determinación de color platino cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba. NMX-AA-045-SCFI-2001, México
- 67 Secretaria del comercio y fomento industrial (2012), Medición del número de huevos de helminto en aguas residuales y residuales tratadas por observación microscópica-método de prueba. NMX-AA-113-SCFI-2012, México
- 68 Secretaria del Medio Ambiente (SEDEMA) 2019; "Sistemas de captación de agua de lluvia en la Ciudad de México, Programa de cosecha de agua de lluvia, Ciudad de México"
- 69 Segerer (2006) "*Hidrología 1*" Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería; Mendoza, Argentina.
- 70 Sepúlveda (2009) "La nanofiltración y sus aplicaciones en la potabilización y el tratamiento del agua", Tesis que para obtener el título de Ingeniero civil, UNAM, México
- 71 Solaz Portolés, Jean Josep, "*El ozono atmosférico, ¿Benefactor o malhechor*", Valencia España
- 72 Stein, A.F., Draxler, R.R, Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., and Ngan, F., (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, Bull. Amer. Meteor. Soc., 96, 2059-2077, <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110>.
- 73 UNEP; Unit Nations Environment Program (2000). "*Rainwater Harvesting and Utilization, international technology center*" News letter and Technical Publicaions
- 74 Universidad Nacional Experimental de la Fuerza Armada, UNEFA (2008); "*Presión de vapor*" en <http://ingenieros2011unefa.blogspot.com/2008/01/presion-de-vapor.html> consultado el 01 de septiembre del 2019
- 75 Wordpress, La domus Romana en: <https://casarompruebaticum.wordpress.com/las-partes-de-la-domus/> consultado el 12 de Junio del 2018

## Anexo

En el presente anexo se encuentran los generadores utilizados para la elaboración de los presupuestos para cada tren de tratamiento, junto con el desarrollo de cada presupuesto y se adjuntan las fichas técnicas utilizadas para realizar los cálculos necesarios para los generadores.

Tabla 22 Capacidad del Filtro

Capacidad del Filtro			
Diámetro interno	Área transversal	Altura	Volumen
cm	cm <sup>2</sup>	cm	cm <sup>3</sup>
11.40	102.07	50.00	<b>5103.52</b>

Tabla 23 Generador y Presupuesto Filtro de Arena

Generador Filtro de Arena-Grava				
Concepto	Densidad	Capacidad el Filtro	Cantidad	
	g/cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	g	kg
Arena Sílica (carbotécnica)	1.6	3402.34	5443.75	5.44
Grava Sílica (carbotécnica)	1.6	1701.17	2721.88	2.72

Presupuesto Filtro Arena-Grava				
Concepto	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
Arena Sílica (carbotecnia)	kg	5.44	5	\$27.22
Grava Sílica (carbotecnia)	kg	2.72	4.92	\$13.39
Filtro PVC 4"	Pza	1	80	\$80.00
			<b>TOTAL</b>	<b>\$120.61</b>

Tabla 24 Generador y presupuesto Filtro Carbón activado

Generador Filtro de Carbón Activado				
Concepto	Densidad	Capacidad el Filtro	Cantidad	
	g/cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	g	kg
Carbón Activado con concha de coco (carbotecnia)	0.44	5103.52	2245.55	2.25

Presupuesto Filtro de Carbón Activado				
Concepto	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
Carbón Activado con concha de coco (carbotecnia)	kg	2.25	45	\$101.05
Filtro PVC 4"	Pza	1	80	\$80.00
			<b>TOTAL</b>	<b>\$181.05</b>

Tabla 25 Generador y presupuesto Filtro Intercambio iónico

<b>Generador Filtro de Resina Int. Iónico-Grava</b>				
Concepto	Densidad	Capacidad el Filtro	Cantidad	
	g/cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	g	kg
Resina Intercambio Iónico (carbotecnia)	1.2	3402.34	4082.81	4.08
Grava Sílica (carbotecnia)	1.6	1701.17	2721.88	2.72

<b>Presupuesto Filtro Resina Int. Iónico-Grava</b>				
Concepto	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
Resina Intercambio Iónico (carbotecnia)	kg	4.08	120	\$489.94
Grava Sílica (carbotecnia)	kg	2.72	4.92	\$13.39
Filtro PVC 4"	Pza	1	80	\$80.00
<b>TOTAL</b>				<b>\$583.33</b>

Tabla 26 Análisis de posible ahorro anual en el recibo del agua

Mes	Precipitación (mm)	Agua lluvia aprovechable (L)		Posible ahorro subsidio	
	Promedio	mín	máx	\$/mes	\$/bimestre
Enero	3.06	44.06	110.16	1.14	\$ 2.10
Febrero	2.56	36.86	92.16	0.96	
Marzo	17.7	254.88	637.20	6.61	\$ 14.56
Abril	21.3	306.72	766.80	7.95	
Mayo	57.88	833.47	2083.68	21.61	\$ 58.73
Junio	99.42	1431.65	3579.12	37.12	
Julio	102.52	1476.29	3690.72	38.28	\$ 84.23
Agosto	123.06	1772.06	4430.16	45.95	
Septiembre	106.76	1537.34	3843.36	39.86	\$ 58.20
Octubre	49.12	707.33	1768.32	18.34	
Noviembre	17.94	258.34	645.84	6.70	\$ 9.16
Diciembre	6.6	95.04	237.60	2.46	
Anual	<b>607.92</b>	8754.05	21885.12	226.99	<b>\$ 226.99</b>
	<b>L/día</b>	23.984	59.959		



## Arena sílica



La arena de sílice se produce por trituración de piedra o arena de sílica de textura abierta, cribada a distribución de grano necesaria. La arena de sílice es producido por trituración de molienda y lavado del sílice de alta calidad.

La arena sílica se utiliza como un medio granular filtrante en el tratamiento del agua potable y residual.

Características físicas: arena de granulo duro.

El tamaño de grano de las partículas es variable, es cribable y principalmente de color marrón a gris.

Se produce en números de malla 20x30.

### Análisis químico

Especificaciones	Composición
SiO <sub>2</sub>	79%
FE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.20%
AF <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.10%
Pérdida por calcinación	3.6%

### Cono pirométrico

Especificaciones	Composición
Mineral	Silice
Humedad [%]	0.03
Densidad [g / cm <sup>3</sup> ]	1.60

Presentación: Sacos de 50 kg.

Calle B No. 2105 Int. A  
45134 Zapopan Jalisco México  
(33) 3834-0906

Revisó: RPR (may 2018)

<https://carbotecnia.info>  
[ventas@carbotecnia.com.mx](mailto:ventas@carbotecnia.com.mx)

## GRAVA SÍLICA



La grava sílica se produce por trituración de piedra de sílica de textura abierta, cribada a distribución de grano necesaria, es producida por trituración de molienda y lavado del sílice de alta calidad.

La grava sílica se utiliza como soporte de medios filtrantes, la parte cóncava de los tanques son áreas que no intervienen en la filtración, en la mayoría de los casos es recomendable rellenar con grava sílica esta área, por ser un material que no le imparte ninguna característica al agua a tratar y es mucho más económica.

Aplicaciones:

Medio de soporte para filtros multimedia, carbono activado, suavizadores, etc.

Características físicas: arena de granulo duro. El tamaño de grano de las partículas es variable, es cribable y principalmente de color marron a gris.

ESPECIFICACIONES	COMPOSICIÓN
<b>ANÁLISIS QUÍMICO</b>	
SiO <sub>2</sub>	79%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.20%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.10%
Perdida por calcinación	3.6%
<b>CONO PIROMÉTRICO</b>	
Mineral	Silice
(%) Humedad	0.03
Densidad	1.60 g/cm <sup>3</sup>
<b>PRESENTACIÓN</b>	Saco de 50 kg.

Elaboró: LAB, septiembre 2016

Revisó: LAB, septiembre 2016



Calle B No. 2105 Int. A  
45134 Zapopan, Jalisco, México  
(33) 38340906



[www.carbotecnia.info](http://www.carbotecnia.info)



[ventas@carbotecnia.com.mx](mailto:ventas@carbotecnia.com.mx)



## DOWEX™ MB

A Cost Effective, Mixed Ion Exchange Resin for Making Spot-Free Water

Product	Type	Matrix	Functional group
DOWEX™ MB	1:1 by equivalents cation:anion	Styrene-DVB, gel	Sulfonic acid Quaternary amine

Guaranteed Sales Specifications		OH <sup>-</sup> form	H <sup>+</sup> form
Total exchange capacity, min.	eq/L kgm <sup>3</sup> as CaCO <sub>3</sub>	1.0 21.9	1.6 35.0
Water content	%	68 max.	40 - 60
Fines, < 300 microns, max.	%	1	1

Typical Physical and Chemical Properties		OH <sup>-</sup> form	H <sup>+</sup> form
Mean particle size <sup>†</sup>	µm	500 - 850	500 - 950
Particle density	g/mL	1.06	1.20
Shipping weight	g/L lbs/m <sup>3</sup>	720 45	

### Recommended Operating Conditions

- Maximum operating temperature 60°C (140°F)
- pH range 0-14

### Typical Properties and Applications

DOWEX™ MB ion exchange resin is a 1:1 equivalent mixture of strong acid cation and strong base anion exchange resin. This product is a ready-to-use mixed resin for the economical production of spot free water. DOWEX MB will typically produce between 500 and 700 gal of spot free water/cubic foot [66 to 90 liters water per liter of resin] (depending on the salt load). DOWEX MB is also the ideal choice for single-use industrial applications, where conductivity of <1 µS/cm can be obtained. DOWEX MB has been optimized for single-use applications, and is typically discarded upon exhaustion.

### Packaging

5 cubic foot fiber drums

<sup>†</sup> For additional particle size information, please refer to Particle Size Distribution Cross Reference Chart (Form No. 177-01775)