



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Sistema doméstico de captación de
agua de lluvia para consumo humano:
alternativa de suministro de agua
potable en el Valle de México**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Jaime Agredano Zermeño

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Marcos Trejo Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

Contenido

Introducción	6
Exposición de la materia de la tesis	6
Justificación del tema	7
Exposición de las preguntas centrales de la tesis	8
Técnicas de investigación	9
Objetivos de la tesis	9
Desarrollo de la tesis (contenido de cada capítulo)	9
1 El agua de lluvia: fuente de agua potable	10
1.1 El ciclo hidrológico	10
1.1.1 Etapas	10
1.1.2 Distribución del agua.....	11
1.1.3 Calidad del agua	12
1.2 Agua potable	15
1.2.1 Aspectos que determinan la potabilidad del agua	15
1.2.2 Parámetros de evaluación de la calidad	19
1.2.3 El caso de México	23
1.3 Potabilidad del agua de lluvia	26
1.3.1 Introducción	26
1.3.2 Viabilidad.....	26
1.3.3 Comentarios finales.....	28
2 Déficit de agua potable en el Valle de México	28
2.1 Valle de México	30
2.1.1 Ubicación geográfica	30
2.1.2 Crecimiento demográfico.....	30
2.2 Servicio de agua potable.....	31
2.2.1 Cobertura	31
2.2.2 Balance hídrico	32
2.2.3 Áreas de oportunidad	36
2.3 Déficit.....	38
3 Sistema doméstico de captación de agua de lluvia para consumo humano, una alternativa de suministro de agua potable en el Valle de México	38
3.1 Agua de lluvia en el Valle de México	38
3.1.1 Región Hidrológico–Administrativa XIII: Aguas del Valle de México	38
3.1.2 Agua de lluvia	39
3.2 Sistema doméstico de captación de agua de lluvia para consumo humano.....	45
3.2.1 Definición	45
3.2.2 Componentes	46
4 Modelos aplicados a sistemas domésticos de captación de agua de lluvia: dimensionamiento y simulación de la operación del tanque de almacenamiento	69
4.1 Modelos	69
4.1.1 Justificación	69
4.1.2 Nociones básicas	70
4.1.3 Enfoques.....	72

4.1.4 Indicadores	73
4.1.5 Algunos modelos aplicados.....	75
4.1.6 Recomendaciones	82
5 Conclusiones	84
5.1 Descubrimientos más importantes.....	84
5.2 Exposición sucinta de la propuesta	85
5.3 Nuevas preguntas que pueden plantearse.....	85
6 Referencias	85

Lista de figuras

Figura 1 El ciclo hidrológico, adaptada de Bonnier	11
Figura 2 Distribución global del agua en las distintas etapas del ciclo hidrológico, adaptada de Bonnier	12
Figura 3 Comparación del tamaño de gotas de lluvia (<1 mm), pequeñas gotas de agua (<0.02 mm) y núcleos de condensación (<0.001 mm)	13
Figura 4 Resumen de la sostenibilidad y eficiencia del agua potable en el Valle de México	29
Figura 5 Delimitación hidrológica y administrativa de la cuenca del Valle de México	30
Figura 6 Evolución de la cobertura de agua potable en el Valle de México	31
Figura 7 Balance de fuentes y usos para el Valle de México.....	32
Figura 8 Mapa de la RHA XIII, Aguas del Valle de México	39
Figura 9 Precipitación pluvial mensual, 1981-2010 (mm).....	39
Figura 10 Agua de lluvia captada en las estaciones de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, 2002-2016	40
Figura 11 Concentración de amonio en el agua de lluvia captada en las estaciones de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, 2002-2016 ...	41
Figura 12 Concentración de cloruro en el agua de lluvia captada en las estaciones de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, 2003-2016 ...	41
Figura 13 Concentración de nitrato en el agua de lluvia captada en las estaciones de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, 2002-2016 ...	42
Figura 14 pH del agua de lluvia captada en las estaciones de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, 2002-2016.....	43
Figura 15 Concentración de sodio en el agua de lluvia captada en las estaciones de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, 2002-2016 ...	43
Figura 16 Concentración de sulfato en el agua de lluvia captada en las estaciones de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, 2002-2016 ...	44
Figura 17 Elementos básicos de un sistema doméstico de captación de agua de lluvia para consumo humano.....	45
Figura 18 Volumen teórico de agua de lluvia captada por i) metro cuadrado de área de captación del techo, y ii) milímetro de lluvia	47
Figura 19 Esquema de una red de conducción típica para un tanque de almacenamiento de agua de lluvia bajo tierra	49
Figura 20 Eficiencia de captura de agua por las canaletas para distintas secciones transversales.....	50
Figura 21 Rejilla en forma de cúpula en la entrada de una bajante de agua de lluvia	52
Figura 22 Desviador de primer flujo de bola flotante	55
Figura 23 Filtro de bajante con malla inclinada, adaptada de Fred Smotherman.....	57
Figura 24 Filtro tipo cesta, adaptada de Fred Smotherman	57
Figura 25 Funcionamiento de un filtro centrífugo, adaptada de Fred Smotherman.....	58
Figura 26 Funcionamiento de un filtro tipo cascada, adaptada de Fred Smotherman	59
Figura 27 Componentes típicos del almacenamiento, adaptada de Fred Smotherman	63
Figura 28 Componentes típicos de la distribución, adaptada de Fred Smotherman.....	63

Figura 29 Bomba sumergible con filtro flotante integrado, adaptada de Rainwater Management Solutions	64
Figura 30 Configuración de tratamiento (sin tanque de presión) de una bomba bajo demanda, filtro de 5 micras, filtro de carbón activado de 3 micras y lámpara ultravioleta	66
Figura 31 “Huella” del área de captación de tres techos distintos	71
Figura 32 Precipitación pluvial mensual promedio 2004–2016 en la RHA XIII Aguas del Valle de México	77
Figura 33 Comparación mensual del agua de lluvia captada y la demanda de la vivienda .	78
Figura 34 Predicción acumulada de agua de lluvia captada y demanda de la vivienda	78
Figura 35 Disponibilidad de suministro de agua de lluvia como una fracción del año	82

Tablas

Tabla 1 Dosis de radiación promedio de fuentes naturales, adaptada de UNSCEAR	18
Tabla 2 Límites permisibles de características microbiológicas	23
Tabla 3 Límites permisibles de características químicas	24
Tabla 4 Límites permisibles de características radiactivas	25
Tabla 5 Límites permisibles de características físicas y organolépticas	25
Tabla 6 Concentración de compuestos químicos en el agua de lluvia	27
Tabla 7 Distribución de las fuentes de abastecimiento del Valle de México	32
Tabla 8 Balance hídrico de los acuíferos locales que abastecen al Valle de México	33
Tabla 9 Condición geohidrológica de los acuíferos de la subregión Alto Lerma en el Estado de México	35
Tabla 10 Sostenibilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable del Valle de México	36
Tabla 11 Eficiencia en el consumo de agua potable en el Valle de México	37
Tabla 12 Ancho de la canaleta para distintas áreas del techo	51
Tabla 13 Desempeño de las canaletas para distintas pendientes	52
Tabla 14 Diámetro de las bajantes para distintas áreas del techo	53
Tabla 15 Coeficiente de escurrimiento por tipo de material	70
Tabla 16 Resumen de los indicadores operativos utilizados para describir el funcionamiento de los sistemas de captación de agua de lluvia	74
Tabla 17 Precipitación pluvial mensual 2004–2016 en la RHA XIII Aguas del Valle de México	76
Tabla 18 Hoja de cálculo para dimensionar el tanque de almacenamiento	79

Introducción

Exposición de la materia de la tesis

El agua es vida. De acuerdo con el Diccionario de la Real Academia Española (2017), el agua constituye el componente más abundante de la superficie terrestre y el mayoritario de todos los organismos vivos. Tal es el caso del ser humano en el que hasta 60% del cuerpo de un adulto es agua (U.S. Geological Survey, 2016). Sin embargo, el papel del agua en el ser humano va más allá de ser el componente más abundante en el cuerpo. El agua cumple con muchas funciones esenciales para el cuerpo humano como nutrir las células, regular la temperatura, metabolizar y transportar nutrientes, eliminar los desechos, entre otros. En promedio, un hombre adulto necesita aproximadamente 3.0 l/día de agua mientras que una mujer adulta necesita cerca de 2.2 l/día (U.S. Geological Survey, 2016). Por otro lado, el ser humano también utiliza el agua para actividades cotidianas tales como cocinar, aseo personal y saneamiento. Es así que de acuerdo a un estudio del CIDE para México en (2012), las personas que viven en el país requieren entre 140 y 243 l/día de agua (dependiendo de su nivel socioeconómico y el clima del sitio donde habitan) para satisfacer sus necesidades. Es por ello que el agua es considerada como el líquido vital para el ser humano.

Si bien es cierto que el agua es un requisito indispensable para la vida humana, el ser humano no está capacitado para consumir cualquier tipo de agua. La Tierra es un planeta abundante en agua; $\frac{3}{4}$ partes de la superficie terrestre están cubiertas de agua. Por su parte, el ser humano únicamente puede consumir y utilizar agua dulce por lo que, del total de agua en el planeta, sólo una fracción es potencialmente apta para consumo humano (2.69%). El resto es agua salada localizada principalmente en los océanos del planeta (97.31%). Más aún, gran parte del agua dulce del planeta (76.40%) se encuentra alrededor de los polos en forma de hielo y glaciares por lo que no constituye una fuente viable de abastecimiento de agua para el ser humano. En consecuencia, tan sólo el 0.63% del agua total del planeta es una fuente potencial de abastecimiento (Salvato, Nemerow, & Agardy, 2003). Sin embargo, sólo una fracción de dicho potencial puede ser aprovechada por el ser humano.

Adicional a que el agua sea dulce, existen parámetros que el agua debe de cumplir para que sea catalogada como apta para uso y consumo humano (potable). Dado que es un tema estrechamente relacionado con la salud de las personas, dichos parámetros (límites permisibles) están establecidos en las normas emitidas por las agencias gubernamentales encargadas del sistema de salud del país del que se trate. En México, la “Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994” establece los lineamientos básicos para que el agua sea considerada apta para uso y consumo humano.

Hoy en día es difícil encontrar cuerpos de agua dulce que no requieran tratamiento (potabilización). En muchos casos los cuerpos de agua dulce han sido contaminados por la propia naturaleza o por acción del ser humano. En cuanto a las cuestiones naturales,

algunos cuerpos de agua dulce presentan niveles superiores de algún indicador (microbiológico, químico, radiactivo u organoléptico) respecto al límite permisible establecido por la norma. Esto debido al clima, flora, fauna, geología, entre otros; del lugar. Por otro lado, existen cuerpos de agua dulce que han sido contaminados por la actividad humana, por ejemplo, la agricultura, la industria, entre otros; y en consecuencia el agua rebasa alguno de los límites permisibles establecidos en las normas aplicables. Al respecto, de acuerdo a datos de la Comisión Nacional del Agua en 2015 fueron monitoreados en el territorio mexicano 2,766 sitios de cuerpos de agua superficiales, de los cuales, 8.5%, 32.4% y 6.6% estaban contaminados de acuerdo a los indicadores DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno), DQO (Demanda Química de Oxígeno) y SST (Sólidos Suspendidos Totales), respectivamente. Ya sea que la contaminación sea de origen natural o antropogénica, en ambos casos es necesario aplicar el tratamiento adecuado para cumplir con los límites permisibles de potabilidad establecidos en la norma. Sin embargo, la contaminación de cuerpos de agua dulce por el ser humano es un problema que disminuye la fracción de agua en el planeta considerada como potencialmente potable.

Adicional a la baja disponibilidad de agua dulce en el planeta y la contaminación de los cuerpos de agua dulce por la actividad humana, hoy en día el crecimiento demográfico de las grandes ciudades ha promovido el manejo insostenible del agua potable. Es decir, los operadores de agua en estos sitios han optado por la extracción de agua a tasas más altas que las de recarga del cuerpo de agua de que se trate (acuífero, pozo, presa, entre otros). De continuar así, en el futuro dichos cuerpos se quedarán sin agua. Al respecto, en México existen 653 acuíferos de los cuales 105 están catalogados como sobreexplotados (Comisión Nacional del Agua, 2016).

En resumen, la baja disponibilidad de agua dulce en el planeta, la contaminación de los cuerpos de agua dulce por la actividad humana y la extracción insostenible de agua para fines potables son problemas que afectan la gestión del agua. Para hacer frente a tal problemática es que han sido desarrolladas alternativas de suministro de agua potable. Una de las soluciones desarrolladas, y que es el tema del presente trabajo, es el sistema doméstico de captación de agua de lluvia para consumo humano. Éste es un grupo integrado de elementos que trabajan juntos para captar y potabilizar agua de lluvia. Los elementos fundamentales del sistema son: captación, conducción, prefiltración, almacenamiento y distribución.

Justificación del tema

El servicio de agua en el Valle de México se caracteriza por la alta presión que se ejerce sobre los recursos hídricos existentes debido a la baja disponibilidad de agua natural, las extracciones de agua por encima de los niveles de recarga y una población en crecimiento (Banco Mundial, 2013). De acuerdo al mismo estudio del Banco Mundial, en 2013 el volumen inyectado de agua potable al Valle de México ascendió a 64.7 m³/s proveniente en su mayoría de acuíferos. Lo anterior es muy preocupante cuando se tiene un uso de fuentes insostenible del orden de 21.1 m³/s, por lo que se plantea un reto importante

para el sector del agua en el Valle de México; especialmente cuando lo que está en juego es el desarrollo sostenible de la región.

La CONAGUA está desarrollando obras que incrementarán las fuentes de producción para cubrir dicho déficit, tales como la ampliación y rehabilitación del sistema Cutzamala (que aumentará su capacidad en 5.0 m³/s); la ampliación de la capacidad de tratamiento de aguas residuales (para remplazar el agua de primer uso por aguas residuales para su utilización en los sectores agrícolas e industriales en el Valle de México); otros proyectos como la presa de Guadalupe (2.0 m³/s), la presa de Madín (0.5 m³/s), el proyecto Zumpango (2.5 m³/s), y otras fuentes (5.0 m³/s). A futuro, ni en un escenario tendencial ni en un escenario optimista se podría llegar con esas fuentes a cerrar completamente la brecha con el nivel sostenible de producción de las fuentes existentes. Se mantendría una brecha amplia del orden de 21.0 m³/s para la cual sería necesario identificar aún más fuentes.

La fuente propuesta para hacer frente al déficit de agua potable que existe, y está previsto que continúe en el futuro, en el Valle de México son los sistemas domésticos de captación de agua de lluvia para consumo humano. En tal caso, la presión sobre la infraestructura de drenaje del Valle, afectada por inundaciones recurrentes, podría ser disminuida. Asimismo, generaría las condiciones para la regeneración de los niveles de agua de las fuentes de abastecimiento tradicionales.

Exposición de las preguntas centrales de la tesis

Algunas de las preguntas más importantes que pretende responder el presente trabajo son las siguientes:

- ¿Cuáles son los parámetros que determinan la potabilidad del agua en México?
- ¿Cuál es el déficit de agua potable en el Valle de México?
- ¿Cuáles son las fuentes de abastecimiento de agua potable del Valle de México?
- ¿Qué cantidad de agua de lluvia recibe el Valle de México cada año?
- ¿Cuál es la calidad del agua de lluvia del Valle de México con base en la norma mexicana?
- ¿Qué es un sistema doméstico de captación de agua de lluvia para consumo humano?
- ¿Cuáles son los componentes de un sistema doméstico de captación de agua de lluvia para consumo humano?

- ¿Cuáles son los componentes que comúnmente se modelan de un sistema de captación de agua de lluvia?
- ¿Cuáles son los indicadores que determinan el desempeño de un sistema de captación de agua de lluvia?
- ¿Qué modelos están disponibles para el diseño de un sistema doméstico de captación de agua de lluvia?
- ¿Cuáles son las recomendaciones más importantes al diseñar un sistema de captación de agua de lluvia?

Técnicas de investigación

El presente estudio no pretende basarse sobre datos nuevos, sino recopilar y articular datos existentes a nivel internacional y nacional. En el cuerpo del documento se señala de manera detallada la fuente de cada información o dato. Una lista completa de las referencias bibliográficas y electrónicas se presenta al final del documento.

Objetivos de la tesis

Describir los componentes e indicadores operativos (modelos) más relevantes al diseñar un sistema doméstico de captación de agua de lluvia para consumo humano y señalar la pertinencia de estos sistemas como alternativa de suministro de agua potable en el Valle de México.

Desarrollo de la tesis (contenido de cada capítulo)

El capítulo I describe los fundamentos teóricos del ciclo hidrológico así como los aspectos que determinan la potabilidad del agua. Con ello concluye la viabilidad del agua de lluvia como una fuente de agua potable.

El capítulo II hace un diagnóstico de la situación del agua potable en el área de estudio: la región conocida como Valle de México. En él se realiza un balance hídrico con base en las fuentes de abastecimiento y la demanda de agua potable en la región. Finalmente, se presentan los resultados del balance hídrico que demuestran la existencia de un déficit de agua potable en la región debido al nivel de producción insostenible de las fuentes existentes.

El capítulo III presenta las cifras de cantidad y calidad del agua de lluvia en el Valle de México. Asimismo, describe los elementos que componen un sistema doméstico de captación de agua de lluvia para consumo humano y su funcionamiento. Con ello es posible observar la pertinencia de los sistemas domésticos de captación de agua de lluvia

para consumo humano como alternativa de suministro de agua potable para reducir el déficit que existe en el Valle de México.

El capítulo IV presenta la necesidad de utilizar modelos analíticos en el diseño de sistemas de captación de agua de lluvia y cuáles son los elementos que comúnmente se modelan. Asimismo, describe algunos de los indicadores más importantes para evaluar el funcionamiento de dichos sistemas y señala algunas de las recomendaciones a considerar al modelar este tipo de sistemas.

1 El agua de lluvia: fuente de agua potable

1.1 El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico constituye el medio de transporte de agua, energía y materia (químicos, material biológico, sedimentos, etc.) más importante en la Tierra a nivel local y global. El ciclo hidrológico puede ser entendido como una bomba, la cual es impulsada principalmente por dos fuerzas i) energía solar, y ii) gravitación. A lo largo de la historia el ser humano ha sabido utilizar dicha bomba para obtener agua de riego para sus cultivos y realizar trabajo mediante el aprovechamiento de la energía contenida en ella (Ojha, Berndtsson, & Bhunya, 2008).

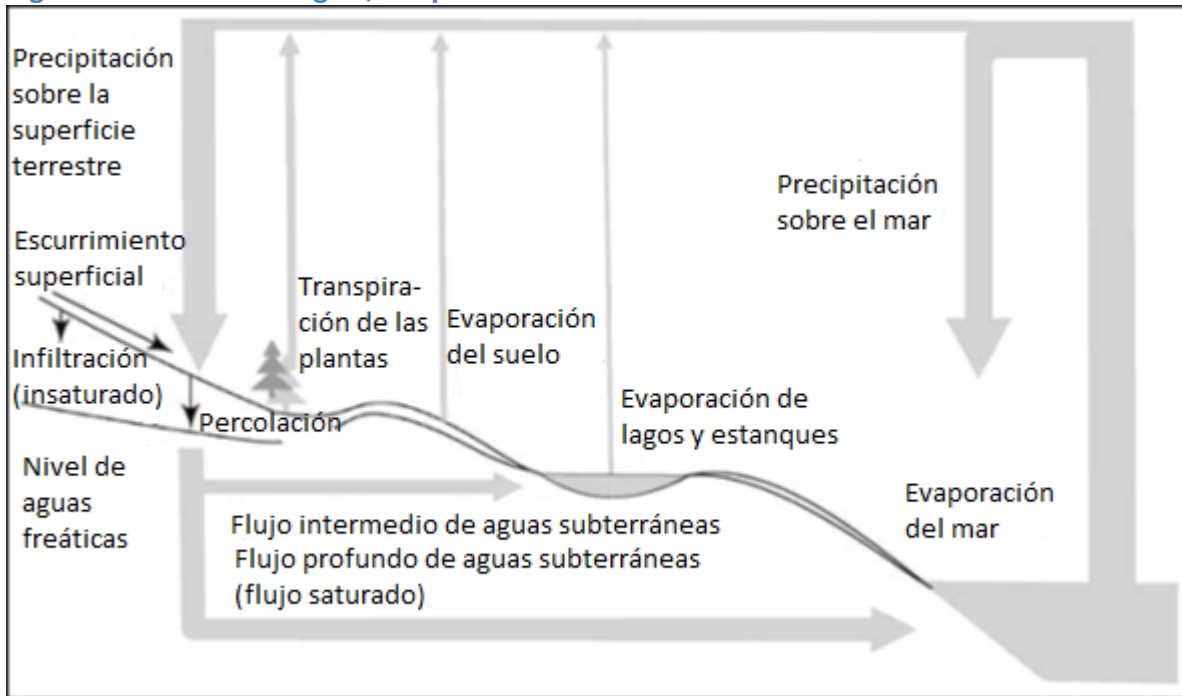
1.1.1 Etapas

En la Figura 1 es posible observar cada una de las etapas del ciclo hidrológico. Dada su naturaleza, el ciclo hidrológico no tiene principio ni fin por lo que es posible explicarlo iniciando en cualquier etapa del mismo:

- La energía solar es la responsable de que el agua, tanto en tierra como en el mar, se evapore.
- Gran parte de dicho vapor se condensa y vuelve a caer en forma de lluvia sobre la superficie del mar. A nivel global, 7/8 del agua de lluvia cae sobre los océanos (Ojha, Berndtsson, & Bhunya, 2008).
- El resto del agua de lluvia cae sobre la superficie terrestre en forma de precipitación (lluvia, nieve y/o granizo). Esto trae como resultado el surgimiento de escurrimientos que a su vez dan lugar a la formación de cuerpos de agua superficiales como arroyos, ríos y lagos. Sin embargo, gran parte del agua que escurre se infiltra a través de la superficie del suelo hasta las capas superiores (por encima del nivel freático), que posteriormente puede infiltrarse a una mayor profundidad hasta llegar al agua subterránea o nivel freático (Ojha, Berndtsson, & Bhunya, 2008).

- El agua en el suelo puede ser absorbida por las raíces de las plantas y evaporada hacia la atmósfera mediante la transpiración (evaporación a través de las hojas de las plantas por la respiración de las mismas) o puede ser evaporada directamente desde el suelo. Al total de la evaporación del agua del suelo y las plantas se le conoce como evapotranspiración.

Figura 1 El ciclo hidrológico, adaptada de Bonnier



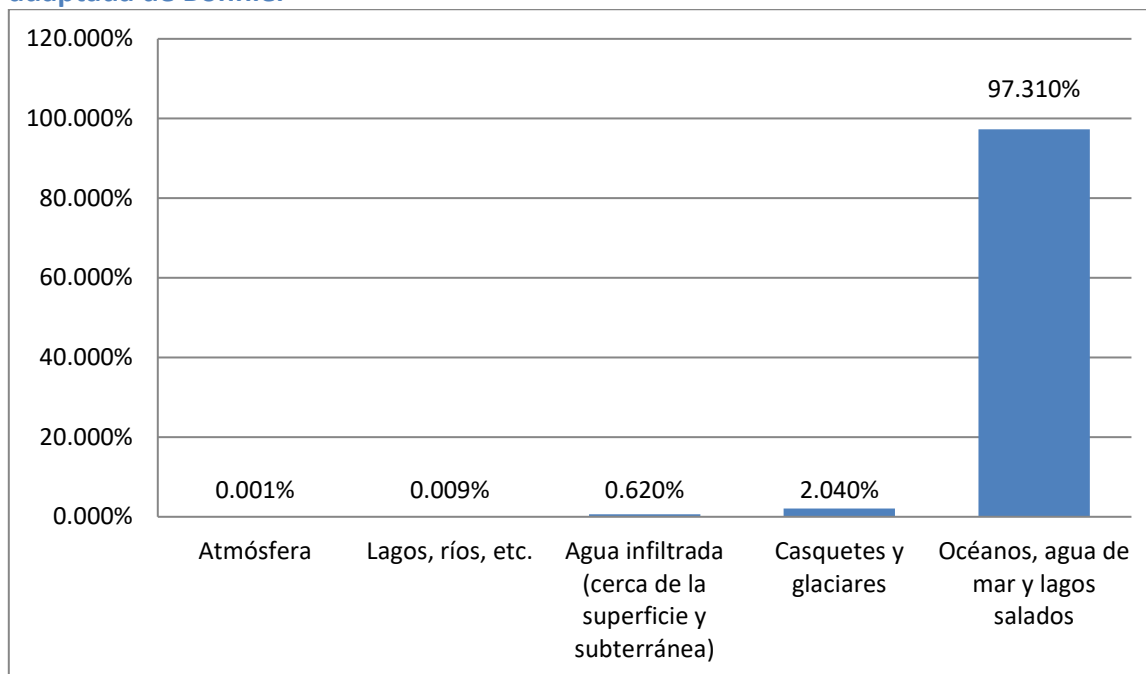
Fuente: citado en Ojha, Berndtsson, & Bhunya, 2008

1.1.2 Distribución del agua

Como se observa en la Figura 2, el agua está distribuida en diferentes proporciones en cada una de las etapas del ciclo hidrológico. De manera general, el agua puede ser dividida en dos grupos i) agua salada, y ii) agua dulce. El agua salada, en su mayoría, se encuentra en los océanos y representa 97.31% del agua total en el planeta. Por otro lado, el agua dulce se encuentra en una gran variedad de lugares como i) la atmósfera, ii) lagos, iii) ríos, iv) corrientes infiltradas en el suelo (cerca a la superficie y subterráneas), v) casquetes polares, y vi) glaciares; y representa 2.69% del agua total en el planeta. Por su parte, el ser humano requiere de agua potable para realizar actividades básicas como beber, cocinar y lavar (higiene personal y saneamiento). En la mayoría de los casos el agua potable es producida a partir de agua dulce. Sin embargo, de la fracción de agua dulce en el planeta (2.69%), el 76.40% está localizada alrededor de los polos en forma de hielo y glaciares por lo que no constituye una fuente viable de abastecimiento. Es así que las fuentes de abastecimiento de agua dulce para el ser humano están limitadas al 0.63% del agua total

en el planeta, en tanto que la desalinización del agua de los océanos sigue siendo un proceso caro¹ (Salvato, Nemerow, & Agardy, 2003).

Figura 2 Distribución global del agua en las distintas etapas del ciclo hidrológico, adaptada de Bonnier



Fuente: citado en Ojha, Berndtsson, & Bhunya, 2008

1.1.3 Calidad del agua

Teóricamente el 100% del agua dulce que no está localizada alrededor de los polos en forma de hielo y glaciares, que representa 0.63% del total de agua en el planeta, podría ser potabilizada. Sin embargo, la actividad humana y la propia Naturaleza contaminan el agua de tal forma que esta potabilización no es una opción viable. Algunos fenómenos que solían ocurrir de forma natural en el ciclo hidrológico han sido alterados a raíz de la actividad humana, incrementando el contenido de químicos, material biológico y sedimentos en el agua.

Las fuentes de abastecimiento de agua se dividen en dos categorías principales: agua subterránea y agua superficial. Las fuentes de abastecimiento de agua subterránea incluyen pozos, manantiales y galerías de infiltración. Las fuentes de abastecimiento de agua superficial incluyen lagos, arroyos, estanques, ríos y riachuelos (Salvato, Nemerow, & Agardy, 2003).

¹ De acuerdo con un reporte al Congreso de Estados Unidos, los costos de desalinización de agua en Estados Unidos son alrededor de 4.00 USD para el agua de mar y 1.00 USD para el agua salobre (por cada 1,000 galones), comparado con 0.40 USD para las fuentes convencionales (citado en Salvato, Nemerow, & Agardy, 2003).

1.1.3.1 Ser humano

La actividad humana repercute en el funcionamiento general del ciclo hidrológico. Más aún, la composición química del agua en las distintas etapas del ciclo es modificada por actividades tales como la agricultura, la industria y la vida en la ciudad. Por otro lado, el agua en el planeta es un recurso finito el cual está en constante cambio entre sus distintas fases (sólida, líquida y gaseosa); el agua no se crea ni se destruye, sólo se transforma. Sin embargo, el contenido de químicos, material biológico, sedimentos, etc., sí varía y depende de la etapa del ciclo en que el agua se encuentre.

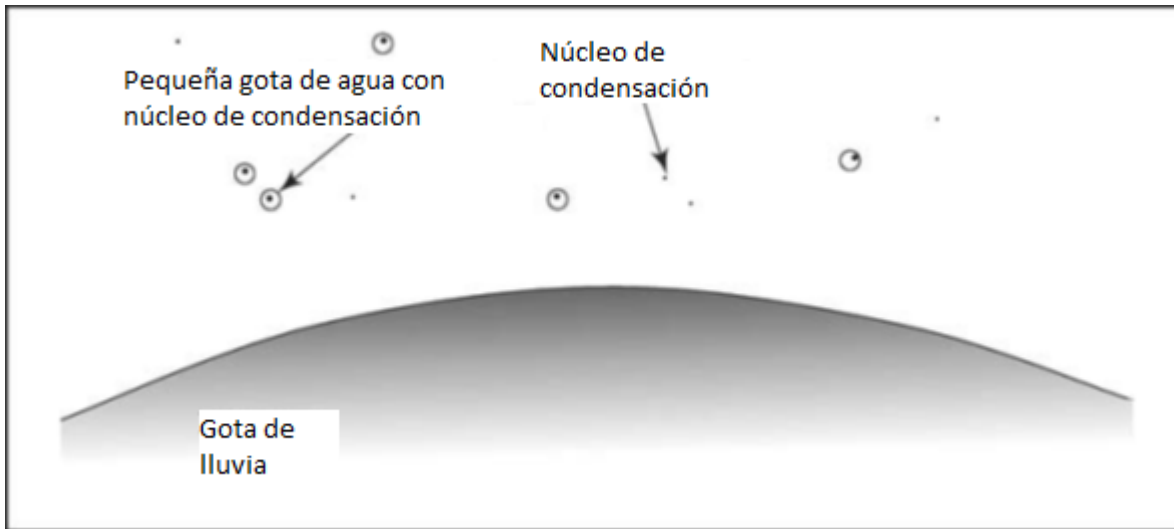
En el caso de las aguas subterráneas, la principal causa de contaminación son los productos químicos orgánicos como tricloroetileno, benceno, perclorato, aditivos de gasolina, gasolina, pesticidas, fumigantes del suelo y nitratos. Otras fuentes de contaminación son los vertederos industriales y municipales, aceites usados, fugas de tanques de almacenamiento, derrames accidentales, vertederos ilegales, etc.,(Salvato, Nemerow, & Agardy, 2003).

1.1.3.2 Naturaleza

1.1.3.2.1 Precipitación

Para que se forme precipitación, el vapor de agua en el aire debe ser transformado en gotas líquidas. Esto es posible gracias a la presencia de núcleos de condensación. Un núcleo de condensación es una partícula de polvo microscópica en la que el vapor de agua puede precipitar y crear pequeñas gotas de agua. Estas pequeñas gotas de agua tienen un tamaño (radio) inferior a 20×10^{-6} m (Figura 3). Sin embargo, para que esto ocurra también se requiere el enfriamiento de la masa de aire húmedo (Ojha, Berndtsson, & Bhunya, 2008).

Figura 3 Comparación del tamaño de gotas de lluvia (<1 mm), pequeñas gotas de agua (<0.02 mm) y núcleos de condensación (<0.001 mm)



Fuente: Ojha, Berndtsson, & Bhunya, 2008

Al caer a través de la atmósfera la lluvia recoge partículas de polvo, semillas de plantas, bacterias, gases disueltos, radiación ionizante y sustancias químicas tales como azufre, nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono y amoníaco. Por lo tanto, el agua de lluvia no es pura; sin embargo, es muy suave² (Salvato, Nemerow, & Agardy, 2003).

1.1.3.2.2 Agua superficial

El agua que llega al suelo y fluye sobre la superficie lleva cualquier material que pueda mover o disolver. Esto puede incluir desechos, bacterias, limo, suelo, vegetación, plantas y animales microscópicos y otras materias orgánicas naturales. Posteriormente, el agua se acumula en arroyos o lagos. El agua que llega a lagos o embalses permite que bacterias, materia en suspensión y otras impurezas se asienten. Por otro lado, tanto la vida (vegetal y animal) microscópica como macroscópica crece y muere, eliminando y aportando impurezas en el ciclo hidrológico (Salvato, Nemerow, & Agardy, 2003).

1.1.3.2.3 Agua subterránea

Parte del agua que llega y fluye sobre el suelo se infiltra y percola³ hasta formar y recargar el agua subterránea. En la filtración a través del suelo, el agua disolverá los materiales dependiendo de i) tipo y composición de los estratos a través de los cuales ha pasado, ii) calidad (acidez) del agua, y iii) cantidad de agua. Por consiguiente, las aguas subterráneas

² Para fines prácticos, la dureza del agua puede representarse como la suma de las concentraciones de calcio y magnesio expresadas en miliequivalentes por litro. En términos de dureza, el agua se clasifica típicamente de la siguiente manera: suave 0<50 mg/l como CaCO₃, moderadamente dura 50<100 mg/l como CaCO₃, dura 100<150 mg/l como CaCO₃ y muy dura >150 mg/l como CaCO₃ (Crittenden, Trussell, Hand, Howe, & Tchobanoglous, 2012).

³ Dicho de un líquido; moverse a través de un medio poroso (Real Academia Española, 2017).

contienen normalmente más minerales disueltos que las aguas superficiales (Salvato, Nemerow, & Agardy, 2003).

1.2 Agua potable

Todas las actividades domésticas usuales tales como beber, cocinar alimentos e higiene personal, requieren de agua potable. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), el agua potable es aquella que “...no ocasiona ningún riesgo significativo para la salud cuando se consume durante toda un vida...” (World Health Organization, 2017). En México, la Norma Oficial Mexicana (NOM) “Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.” define agua potable como el “... agua que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causa efectos nocivos para la salud.” (Secretaría de Salud, 2000). Con ambas definiciones es posible establecer que el agua potable es aquella que es apta para consumo humano.

1.2.1 Aspectos que determinan la potabilidad del agua

1.2.1.1 Microbianos

Las enfermedades infecciosas causadas por bacterias patógenas, virus y parásitos (por ejemplo, protozoos y helmintos) son el riesgo sanitario más común y extendido asociado con el agua potable (World Health Organization, 2017).

1.2.1.1.1 Características de los patógenos

De acuerdo con la OMS (2017), los agentes patógenos transmitidos por el agua tienen varias propiedades que los distinguen de otros contaminantes del agua potable:

- Pueden causar efectos agudos y crónicos en la salud.
- Pueden crecer en el medio ambiente.
- Suelen agregarse o adherirse a los sólidos en suspensión en el agua, y las concentraciones de patógenos varían en el tiempo, de modo que la probabilidad de adquirir una dosis infecciosa no puede predecirse a partir de su concentración media en el agua.
- La exposición a un patógeno que resulta en una enfermedad depende de i) la dosis, ii) cuan invasivo es, iii) la virulencia del patógeno, y iv) el estado inmunitario del individuo.
- Si se establece la infección, los patógenos se multiplican en su huésped.

- Algunos patógenos transmitidos por el agua también pueden multiplicarse en alimentos, bebidas o sistemas de agua caliente, aumentando la probabilidad de infección.
- A diferencia de muchos agentes químicos, los patógenos no presentan un efecto acumulativo.

1.2.1.1.2 Desinfección

La desinfección tiene gran importancia en el suministro de agua potable. La destrucción de microorganismos patógenos es esencial y típicamente implica el uso de agentes químicos reactivos como el cloro. La desinfección es una barrera eficaz para muchos patógenos (especialmente bacterias) durante el tratamiento del agua potable y debe utilizarse para aguas superficiales y subterráneas sujetas a contaminación fecal. La desinfección residual se utiliza como protección parcial contra la contaminación de bajo nivel y el crecimiento de microorganismos patógenos dentro del sistema de distribución (World Health Organization, 2017).

El uso de desinfectantes químicos en el tratamiento del agua generalmente da lugar a la formación de subproductos químicos. Sin embargo, los riesgos para la salud de estos subproductos son despreciables en comparación con los riesgos asociados con una desinfección inadecuada. Es importante que la eficacia de la desinfección no se vea comprometida en el intento de controlar tales subproductos (World Health Organization, 2017).

1.2.1.2 Químicos

Los problemas de salud asociados con los componentes químicos en el agua potable difieren de los asociados con la contaminación microbiana y surgen principalmente de la capacidad de los componentes químicos para causar efectos adversos para la salud después de períodos prolongados de exposición. Hay pocos componentes químicos en el agua que pueden conducir a problemas de salud como resultado de una sola exposición, excepto en los casos en los que ocurre una contaminación accidental masiva del suministro de agua potable. Por otra parte, la experiencia demuestra que en muchos de esos incidentes el agua se vuelve no potable debido a que es inaceptable para los sentidos (sabor, olor y aspecto) (World Health Organization, 2017).

En los casos en los que es poco probable que la exposición a corto plazo conduzca a un deterioro de la salud, con frecuencia es más eficaz concentrar los recursos disponibles en la detección y eliminación de la fuente de contaminación en lugar de instalar costosos tratamientos de agua potable para la eliminación de dicho componente químico (World Health Organization, 2017).

1.2.1.3 Radiactivos

El agua potable puede contener sustancias radiactivas (radionucleidos) que pueden presentar un riesgo para la salud humana. Estos riesgos son normalmente pequeños comparados con los riesgos de microorganismos patógenos y productos químicos que pueden estar presentes en el agua potable. Excepto en circunstancias extremas, la dosis de radiación resultante de la ingesta de radionucleidos en el agua potable es mucho menor que la recibida de otras fuentes de radiación (World Health Organization, 2017).

1.2.1.3.1 Fuentes

La radiactividad de varias fuentes naturales y de origen humano está presente en todo el medio ambiente. Algunos elementos químicos presentes en el ambiente son naturalmente radiactivos. Estos se encuentran en cantidades variables en los suelos, el agua, el aire e incluso dentro de nuestros cuerpos, por lo que la exposición a ellos es inevitable. Además, la Tierra es bombardeada constantemente por partículas de alta energía provenientes del Sol y del exterior del Sistema Solar. Colectivamente, estas partículas se denominan radiación cósmica. Todo el mundo recibe una dosis de radiación cósmica que está influenciada por la latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar (World Health Organization, 2017).

Hoy en día, el uso de la radiación en la medicina para el diagnóstico y tratamiento de cáncer es la mayor fuente de radiación producida por el hombre. Las pruebas de armas nucleares, las descargas rutinarias de instalaciones industriales y médicas y los accidentes como Chernobyl han añadido radionucleidos hechos por el hombre a nuestro medio ambiente (World Health Organization, 2017).

El Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR, 2008) ha estimado que la dosis anual promedio por persona de todas las fuentes de radiación en el medio ambiente es de aproximadamente 3.0 mSv/año⁴ (*citado en World Health Organization, 2017*). El 80.0% (2.4 mSv) se debe a fuentes naturales de radiación, el 19.6% (casi 0.6 mSv) se debe al uso de radiación para el diagnóstico médico y el 0.4% restante (alrededor de 0.01 mSv) se debe a otras fuentes de radiación producida por el ser humano (World Health Organization, 2017).

⁴ Cuando la radiación interactúa con los tejidos y órganos del cuerpo, la dosis de radiación recibida es una función de factores tales como el tipo de radiación, la parte del cuerpo afectada y la vía de exposición. Esto significa que 1 Bq de radiactividad no siempre entrega la misma dosis de radiación. Se ha desarrollado una unidad denominada "dosis efectiva" para tener en cuenta las diferencias entre los diferentes tipos de radiación de modo que sus impactos biológicos puedan compararse directamente. La dosis efectiva se expresa en unidades del Sistema Internacional (SI) llamadas Sieverts (Sv). El sievert es una unidad muy grande, con frecuencia es más práctico hablar en términos de milisieverts (mSv). Hay 1,000 mSv en 1 Sv (World Health Organization, 2017).

1.2.1.3.2 Riesgos

La protección contra la radiación se basa en el supuesto de que cualquier exposición a la radiación representa cierto nivel de riesgo. Para exposiciones prolongadas, como es el caso de la ingesta de agua potable que contiene radionucleidos durante largos períodos de tiempo, la evidencia de un mayor riesgo de cáncer en humanos está disponible en dosis superiores a 100 mSv (Brenner *et al.*, 2003). Por debajo de esta dosis no se ha identificado un mayor riesgo a través de estudios epidemiológicos. Se supone que existe una relación lineal entre la exposición y el riesgo, sin un valor umbral por debajo del cual no hay riesgo (*citado en World Health Organization, 2017*).

La Tabla 1 muestra el promedio anual a nivel mundial de dosis efectiva de radiación. En promedio al año el ser humano recibe una dosis de radiación por ingerir alimentos y agua potable de 0.29 mSv. Dicha dosis es significativamente menor, e incluye la ingesta de alimentos, a aquella que representa un riesgo de cáncer en humanos tras largos periodos de tiempo ingiriéndola (100 mSv).

Tabla 1 Dosis de radiación promedio de fuentes naturales, adaptada de UNSCEAR

Fuente	Promedio (mundial anual) de dosis efectiva mSv	Rango típico (anual) de dosis efectiva mSv
Externa		
Rayos cósmicos	0.39	0.3–1.0 ¹
Radiación terrestre	0.48	0.3–1.0 ²
Interna		
Inhalación (principalmente Radón)	1.26	0.2–10.0 ³
Ingesta (alimentos y agua potable)	0.29	0.2–1.0 ⁴
Total	2.42	1.0–13.0

¹ Varía desde el nivel del mar hasta la elevación del terreno.

² Depende de la composición de radionucleidos en el suelo y el material de construcción.

³ Depende de la acumulación de Radón en el interior de las edificaciones.

⁴ Depende de la composición de radionucleidos en los alimentos y el agua potable.

Fuente: *citado en World Health Organization, 2017*

1.2.1.4 De aceptabilidad

La provisión de agua potable que no sólo sea segura sino también aceptable en apariencia, sabor y olor es de alta prioridad. El agua que es estéticamente inaceptable disminuirá la confianza de los consumidores, dará lugar a quejas y, lo que es más importante, podría conducir al uso de agua de fuentes menos seguras.

En general, los consumidores no tienen ningún medio para juzgar la calidad del agua potable, pero su actitud hacia el suministro de agua potable y sus proveedores de agua

potable se verá afectada en gran medida por los aspectos de la calidad del agua que puedan percibir con sus propios sentidos. Es natural que los consumidores observen con sospecha el agua que parece sucia o colorida o que tiene un sabor u olor desagradable, aunque estas características, en sí mismas, no tienen consecuencias directas para la salud.

Algunas sustancias que tienen efectos adversos para la salud tienen influencia sobre el sabor, el olor o la apariencia del agua potable. Normalmente esta situación conduciría al rechazo de dicha agua aún cuando las concentraciones de tales sustancias fueran significativamente inferiores a las que resultan en efectos adversos para la salud. La concentración en la que los componentes son objetables para los consumidores es variable y depende de factores individuales y locales, incluyendo la calidad del agua a la que está acostumbrada la comunidad y una variedad de consideraciones sociales, ambientales y culturales (World Health Organization, 2017).

El sabor y el olor en el agua potable pueden ser indicadores de alguna forma de contaminación o de un mal funcionamiento durante el tratamiento o distribución del agua. Por lo tanto, puede ser un indicador de la presencia de sustancias potencialmente nocivas. El color, las partículas y los organismos visibles también pueden ser notados por los consumidores y pueden crear preocupaciones sobre la calidad y aceptabilidad del suministro de agua potable.

1.2.1.4.1 Procedencia

El sabor y el olor pueden provenir de i) contaminantes químicos naturales inorgánicos y orgánicos, ii) fuentes o procesos biológicos (por ejemplo, microorganismos acuáticos), iii) contaminación por productos químicos sintéticos, iv) corrosión, o v) problemas con el tratamiento del agua (por ejemplo, cloración); por mencionar algunos. El sabor y el olor también pueden desarrollarse durante el almacenamiento y la distribución como resultado de la actividad microbiana (World Health Organization, 2017).

1.2.2 Parámetros de evaluación de la calidad

Existen distintos microorganismos y sustancias químicas, así como características físicas de aceptabilidad del agua que definen su calidad. Algunas sustancias y organismos ejercen un impacto profundo en la salud, otras sustancias pueden provocar el rechazo del agua por los consumidores, mientras que otras sustancias pueden afectar la eficiencia operativa del suministro (Howard, 2002).

Debido a la amplia gama de contaminantes potenciales, es necesario establecer prioridades. La mayor prioridad es la calidad microbiológica del agua potable ya que la contaminación del agua potable con organismos patógenos es la que representa el mayor riesgo para la salud y conduce a brotes de enfermedades infecciosas. Por otro lado, los parámetros físico-químicos que causan el rechazo del suministro de agua, como el color o

el sabor, son también una alta prioridad. En general, la contaminación química es siempre de menor prioridad (Howard, 2002).

De acuerdo con Howard (2002), la selección de los parámetros incluidos en un programa de análisis de la calidad del agua usualmente es específica para cada país (y posiblemente región) y para ciertos tipos de agua.

1.2.2.1 Microbianos

De acuerdo a Allen, Clancy y Rice (2000), las aguas residuales tratadas y no tratadas probablemente contienen algún nivel de patógenos humanos la mayoría si no es que todo el tiempo. Sin embargo, la presencia de patógenos en los desechos fecales del ser humano, efluentes de tanques sépticos o residuos animales (no humanos) puede ser esporádica. Además, pueden estar presentes diferentes patógenos en diferentes momentos y muchos patógenos son difíciles o imposibles de crecer en cultivos de laboratorio. Actualmente casi todos los patógenos pueden ser detectados por pruebas moleculares pero muchas de estas pruebas son tales que la viabilidad o infectividad del patógeno detectado es desconocida. Más aún, muchos de estos métodos no son capaces de detectar concentraciones bajas pero infecciosas. Por último, muchas pruebas de patógenos son difíciles, costosas y requieren mucho tiempo. Por todas estas razones, la prueba de las muestras de agua para detectar la presencia de organismos patógenos es problemática (*citado en* American Water Works Association, 2011).

Es por ello que la calidad sanitaria del agua se determina mediante la prueba de uno o más organismos indicadores o grupos de organismos. La presencia de estos organismos indica que el agua sometida a ensayo contiene o puede contener contaminación fecal y, por tanto, la posible presencia de organismos patógenos (American Water Works Association, 2011).

El principal indicador estándar para la contaminación microbiológica es la bacteria *Escherichia coli* (*E. coli*), o coliformes termotolerantes⁵ como un sustituto. Si bien es cierto que la *E. coli* no es un indicador perfecto, la evidencia sugiere que sigue siendo la mejor opción disponible. La *E. coli* se encuentra en las heces de animales de sangre caliente, incluidos los seres humanos. Tiene una resistencia ambiental razonable en los suministros de agua superficial y subterránea y es abundante en heces frescas. Sin embargo, la *E. coli* es más susceptible a la cloración que otros organismos, por lo tanto, un cierto grado de precaución se aplica cuando se interpretan los datos basados en la ausencia de estas

⁵ El término "coliformes fecales", aunque frecuentemente empleado, no es correcto: la terminología correcta para estos organismos es "coliformes termotolerantes". De estos organismos, sólo la *E. Coli* se considera específicamente de origen fecal, estando siempre presente en grandes cantidades en las heces de seres humanos, otros mamíferos y aves; y rara vez, si alguna vez, se encuentra en el agua o el suelo en climas templados que no han sido objeto de contaminación fecal (aunque existe la posibilidad de rebrote en ambientes calientes, Fujioka *et al.*, 1999) (*citado en* World Health Organization, Organisation for Economic Cooperation and Development, 2003).

bacterias. Además de las mediciones de las bacterias indicadoras, también se analizan un conjunto de otros parámetros clave para determinar el riesgo de contaminación microbiológica. Estos son i) turbiedad, ii) subproductos de la desinfección, y iii) pH. Estos parámetros de análisis de *E. coli* o coliformes termotolerantes constituyen los parámetros críticos de la OMS que son los parámetros prioritarios a ser probados en todos los suministros de agua apoyados por una inspección sanitaria (Howard, 2002).

1.2.2.2 Químicos

Existen muchos compuestos químicos que pueden estar presentes en el agua potable; sin embargo, sólo unos pocos son importantes en cualquier circunstancia dada. Son de particular importancia los efectos adversos para la salud relacionados con la exposición prolongada a ciertos compuestos químicos presentes en el agua potable. Dado que no es física ni económicamente factible ensayar todos los componentes químicos en el agua potable, los esfuerzos y recursos de monitoreo deben ser cuidadosamente planeados y dirigidos a parámetros significativos o clave (Thompson, Fawell, & Kunikane, 2007).

Al evaluar la calidad química del suministro de agua es importante incluir los cuatro compuestos químicos prioritarios (fluoruro, arsénico, selenio y nitrato) antes de evaluar el sistema de suministro de agua para los productos químicos de interés local. Una amplia experiencia internacional a través de numerosos suministros de agua en todo el mundo ha demostrado que estos cuatro productos químicos producen efectos adversos para la salud como consecuencia de la exposición. Otros dos componentes comunes, el hierro y el manganeso, son de alta prioridad porque pueden dar lugar a una decoloración significativa del agua potable, lo que la hace inaceptable para los consumidores, que pueden recurrir a suministros más aceptables desde el punto de vista estético pero que pueden estar microbiológicamente contaminados (Thompson, Fawell, & Kunikane, 2007).

1.2.2.3 Radiactivos

Los niveles de detección y referencia para la radiactividad adoptados por las “Guías para la calidad del agua potable” publicadas por la OMS se basan en las últimas recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, 2008). El enfoque propuesto se basa en situaciones de exposición prolongada del público a la radiación. La dosis individual se basa en niveles de detección de 0.5 Bq/l para la actividad alfa bruta y 1 Bq/l para la actividad beta bruta (*citado en* World Health Organization, 2017).

1.2.2.4 De aceptabilidad

Existe un conjunto de parámetros que pueden provocar el rechazo del agua por razones de aceptabilidad; más aún, algunos de ellos pueden influir en la calidad microbiológica del agua. Los principales parámetros de aceptabilidad de importancia para la evaluación de la calidad del agua son los siguientes:

1.2.2.4.1 Turbiedad o sólidos suspendidos

La turbiedad es una medida de los sólidos suspendidos presentes en el agua y habitualmente se utiliza como un sustituto simple de los sólidos en suspensión. La turbiedad puede causar el rechazo del agua por los consumidores pero también está asociada con la supervivencia bacteriana, ya que la adsorción en sólidos suspendidos por los microorganismos es común (Howard, 2002).

1.2.2.4.2 Residuos de la desinfección

Los tres productos químicos comúnmente utilizados como desinfectantes primarios son el cloro, el dióxido de cloro y el ozono (Thompson, Fawell, & Kunikane, 2007).

El cloro es el desinfectante primario más utilizado y también se utiliza con frecuencia para proporcionar desinfección residual⁶ en el sistema de distribución. El cloro reacciona con la materia orgánica natural en el agua cruda para formar una gama de subproductos no deseados. Se han establecido valores guía para una serie de estos subproductos. Los compuestos más representativos considerados como subproductos de la cloración para efectos de establecer estándares y monitoreo son los trihalometanos (THM) que incluyen cloroformo, bromodichlorometano, clorodibromometano y bromoformo (Thompson, Fawell, & Kunikane, 2007).

Es importante mencionar que, a fin de garantizar la seguridad microbiana del agua potable, la desinfección nunca debe ponerse en peligro al tratar de cumplir con los estándares para cualquier subproducto de la desinfección (Thompson, Fawell, & Kunikane, 2007).

1.2.2.4.3 pH

El pH del agua es importante principalmente porque es un factor que controla la eficiencia de la cloración. Cuando el pH está por encima de 8.5 el rendimiento de la cloración disminuye ya que gran parte del cloro se usa en reacciones ácido-alcalinas. El pH óptimo para la cloración está entre 6.5 y 8.5 (Howard, 2002).

1.2.2.4.4 Color

El monitoreo del color también es importante ya que el agua con un alto nivel de color puede causar quejas y rechazo de los consumidores. El color puede ser provocado por i) presencia en el agua de sólidos en suspensión o material orgánico, ii) disolución de colorantes y cementos, o iii) corrosión de tubos de hierro (Howard, 2002).

⁶ La monocloramina, usualmente denominada cloramina, se usa como desinfectante residual para la distribución del agua potable (Thompson, Fawell, & Kunikane, 2007).

1.2.2.4.5 Olor y sabor

Los problemas de olor y sabor conducirán a quejas de los consumidores y posiblemente rechazo del agua en favor de fuentes de agua alternativas, probablemente con mayor contaminación microbiana.

1.2.3 El caso de México

En México, el 22 de noviembre del 2000 fue publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la “Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.” En ella⁷, la Secretaría de Salud establece los límites permisibles en cuanto a sus características i) microbiológicas, ii) químicas, iii) radiactivas, y iv) físicas y organolépticas, con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor (Secretaría de Salud, 2000).

1.2.3.1 Características

1.2.3.1.1 Microbiológicas

Se deben a microorganismos nocivos para la salud humana. Para efectos de control sanitario se determina el contenido de indicadores generales de contaminación microbiológica, específicamente organismos coliformes totales y *Escherichia coli* o coliformes termotolerantes (Secretaría de Salud, 2000). La Tabla 2 presenta los límites permisibles establecidos en la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

Tabla 2 Límites permisibles de características microbiológicas

Característica	Límite permisible
Organismos coliformes totales	Ausencia o no detectables
<i>E. coli</i> o coliformes termotolerantes	Ausencia o no detectables

Nota: El agua abastecida por el sistema de distribución no debe contener *E. coli* o coliformes 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.

Fuente: Secretaría de Salud, 2000

⁷ Dicha NOM entró en vigor a los noventa días de su publicación en el DOF (22 de noviembre del 2000) y es la que está vigente a la fecha.

1.2.3.1.2 Químicas

Se deben a elementos o compuestos químicos que como resultado de investigación científica se ha comprobado que pueden causar efectos nocivos a la salud humana (Secretaría de Salud, 2000). La Tabla 3 presenta los límites permisibles establecidos en la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

Tabla 3 Límites permisibles de características químicas

Característica	Límite permisible
Aluminio	0.20
Arsénico ¹	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN ⁻)	0.07
Cloro residual libre	0.20-1.50
Cloruros (como Cl ⁻)	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO ₃)	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.30
Fierro	0.30
Fluoruros (como F ⁻)	1.50
Hidrocarburos aromáticos en microgramos/l:	
Benceno	10.00
Etilbenceno	300.00
Tolueno	700.00
Xileno (tres isómeros)	500.00
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	1.00
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.50-8.50
Plaguicidas en microgramos/l:	
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.20
DDT (total de isómeros)	1.00
Gamma-HCH (lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	1.00
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20.00

2.4 D	30.00
Plomo	0.01
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00
Sulfatos (como SO ₄ ⁻)	400.00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50
Trihalometanos totales	0.20
Yodo residual libre	0.20-0.50
Zinc	5.00

Nota: Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad. Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

¹ El límite permisible para arsénico será de 0.025 a partir del año 2005.

Fuente: Secretaría de Salud, 2000

1.2.3.1.3 Radiactivas

Aquellas resultantes de la presencia de elementos radiactivos (Secretaría de Salud, 2000). La Tabla 4 presenta los límites permisibles establecidos en la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

Tabla 4 Límites permisibles de características radiactivas

Característica	Límite permisible
Radiactividad alfa global	0.56
Radiactividad beta global	1.85

Nota: Los límites se expresan en Bq/l (Becquerel por litro).

Fuente: Secretaría de Salud, 2000

1.2.3.1.4 Físicas y organolépticas

Son aquellas que se detectan sensorialmente. Para efectos de evaluación, el sabor y olor se ponderan por medio de los sentidos y el color y la turbiedad se determinan por medio de métodos analíticos de laboratorio (Secretaría de Salud, 2000). La Tabla 5 presenta los límites permisibles establecidos en la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

Tabla 5 Límites permisibles de características físicas y organolépticas

Característica	Límite permisible
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los

	consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

Fuente: Secretaría de Salud, 2000

1.3 Potabilidad del agua de lluvia

1.3.1 Introducción

La captación de agua de lluvia se practica ampliamente a nivel doméstico, pero se utiliza cada vez más a escala comunitaria. El agua de lluvia puede proporcionar una fuente importante de agua potable en algunas circunstancias, así como una fuente útil de agua para mezclarse con otras fuentes para reducir los niveles de contaminantes de interés para la salud, como arsénico y fluoruro (World Health Organization, 2017).

1.3.2 Viabilidad

Los sistemas de captación de agua de lluvia bien diseñados con i) superficies de captación limpias, ii) cisternas y tanques de almacenamiento cubiertos, y iii) tratamiento adecuado respaldado por una buena higiene en el punto de uso; pueden ofrecer agua potable con muy bajo riesgo para la salud (World Health Organization, 2017).

1.3.2.1 Agua de lluvia pura

El ciclo hidrológico proporciona un importante medio de purificación del agua por medio de la evaporación (proceso de destilación). La química del agua de lluvia pura sólo se ve afectada por el CO₂ en la atmósfera, lo que a su vez afecta el pH del agua de lluvia y la concentración de carbono inorgánico. El agua de lluvia pura tiene un pH de 5.6 (American Water Works Association, 2011).

1.3.2.2 Contaminantes que afectan la calidad del agua de lluvia

El agua de lluvia pura no tiene alcalinidad⁸ sino una pequeña cantidad de acidez⁹ (3.06×10⁻² meq/l o 1.5 mg/l como CaCO₃). En consecuencia, el agua de lluvia se ve afectada por contaminantes aéreos de origen i) natural, o ii) antropogénico. Los contaminantes de origen natural pueden ser aerosoles de sal marina (en su mayoría NaCl), polvo de áreas urbanas y agrícolas, y partículas y gases de erupción volcánica. Estos contaminantes pueden disolverse en el agua de lluvia. Los productos químicos antropogénicos pueden incluir compuestos orgánicos volátiles (VOC, por sus siglas en inglés) y ácidos procedentes

⁸ Capacidad de neutralización de los ácidos.

⁹ Capacidad de neutralización de las bases.

de la combustión de combustibles fósiles, en particular ácido sulfúrico y nítrico. Es importante señalar que los cationes en el agua de lluvia pueden ser sales simples derivadas de sales marinas o de partículas minerales presentes en el polvo, tales como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , o pueden ser cationes base, como Ca^{2+} proveniente de i) partículas de mineral de carbonato presentes en el polvo o, ii) polvo de cal. Los aniones en el agua de lluvia pueden ser de sales marinas (Cl^- , SO_4^{2-}) o polvo (SO_4^{2-}), y éstos no afectan el pH del agua de lluvia. Por otra parte, la lluvia ácida se debe en gran parte a la conversión de óxido de azufre y óxido nitroso en la atmósfera a ácido sulfúrico y nítrico, respectivamente. Por lo tanto, grandes fracciones de los aniones ácidos SO_4^{2-} y NO_3^- están presentes en la lluvia ácida (American Water Works Association, 2011).

1.3.2.3 Calidad química del agua de lluvia de distintas ubicaciones

La Tabla 6 muestra la concentración de componentes químicos de i) agua de lluvia pura (referencia), agua de lluvia (Costa de Washington), iii) agua de lluvia ácida (Penn State), y iv) los límites permisibles (Modificación a la NOM-127-SSA1-1994).

Los valores de todos los parámetros (Tabla 6), a excepción del pH, correspondientes a las tres ubicaciones están significativamente por debajo de los límites establecidos en la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994. El pH es el único parámetro para el cual ninguna de las tres ubicaciones estaría dentro del límite permisible (6.50-8.50) de la Norma. Sin embargo, aumentando el pH mediante tratamiento a uno dentro del rango aceptable establecido en la Norma, el agua de las tres ubicaciones podría ser catalogada como apta para uso y consumo humano (potable).

Tabla 6 Concentración de compuestos químicos en el agua de lluvia

Parámetro	Agua de lluvia pura o agua desmineralizada ¹	Agua de lluvia de la Costa de Washington ²	Lluvia ácida en Penn State, PA ²	Límites permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 ⁵
pH	5.60	5.10	4.15	6.50-8.50
H_2CO_3^1 como C	0.16	NR ³	NR	-
HCO_3^- como C	0.028	NR	NR	-
CO_3^{2-} como C	5.2×10^{-7}	NR	NR	-
Na^+	0.00	1.81	0.07	200.00
K^+	0.00	0.12	0.05	-
Ca^{2+}	0.00	0.08	0.14	-
Mg^{2+}	0.00	0.22	0.02	-
NH_4^+	0.00	0.04	0.32	0.50
Cl^-	0.00	3.49	0.24	250.00
SO_4^{2-}	0.00	0.73	3.14	400.00
NO_3^-	0.00	0.14	1.93	10.00

Acidez (mg/L CaCO ₃)	1.5	NR	NR	500.00
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	~0.00	<0	<0	500.00
Fuerza iónica ⁴ (M)	2.4x10 ⁻⁶	1.33x10 ⁻⁴	1.40x10 ⁻⁴	-

¹ En equilibrio con CO₂ (g) atmosférico a 380 ppm y 25°C.

² De Eby (2004).

³ NR: no reportado.

⁴ Calculada de concentración de anión y catión.

⁵ Se refiere a la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

Fuente: American Water Works Association, 2011 y Secretaría de Salud, 2000

1.3.3 Comentarios finales

El uso de la captación de agua de lluvia está aumentando en los países en desarrollo y desarrollados (UNEPIETC, 2002, Han, 2004). Actualmente es considerada y se utiliza como una fuente de suministro de agua potable y no potable en los países en desarrollo. En los países desarrollados el interés está en usos no potables (por ejemplo, descargas del inodoro y riego de áreas verdes) y como parte de una estrategia de uso sostenible del agua. La calidad química del agua captada depende de la química del agua de lluvia, que varía con la ubicación y el estado del tiempo. La Tabla 6 proporciona una referencia sobre las concentraciones de cationes y aniones inorgánicos que pueden estar presentes en agua de lluvia pura, agua de lluvia de un lugar costero y agua de lluvia ácida. Generalmente el agua de lluvia es baja en fuerza iónica, aproximadamente 10⁻⁴ M o menos (baja en conductividad), e incluso el agua de lluvia pura es ácida. Debido a que el agua de lluvia no contiene alcalinidad, es susceptible a reducciones en el pH con la adición de ácidos (*citado en* American Water Works Association, 2011).

Además, el agua de lluvia tiene poca acidez por lo que cualquier adición de bases aumentará su pH. Por lo tanto, en la captación de agua de lluvia, los materiales utilizados para los tanques de almacenamiento pueden afectar su composición química; por ejemplo, los materiales de concreto son susceptibles de lixiviar¹⁰ alguna cal, aumentando el pH. El agua de lluvia captada puede contener microorganismos que llegan por medio del viento o por contacto con el sistema de captación; por lo tanto, la calidad microbiológica, particularmente con respecto a la presencia de agentes patógenos, es de interés primordial para cualquier uso potable (American Water Works Association, 2011).

2 Déficit de agua potable en el Valle de México

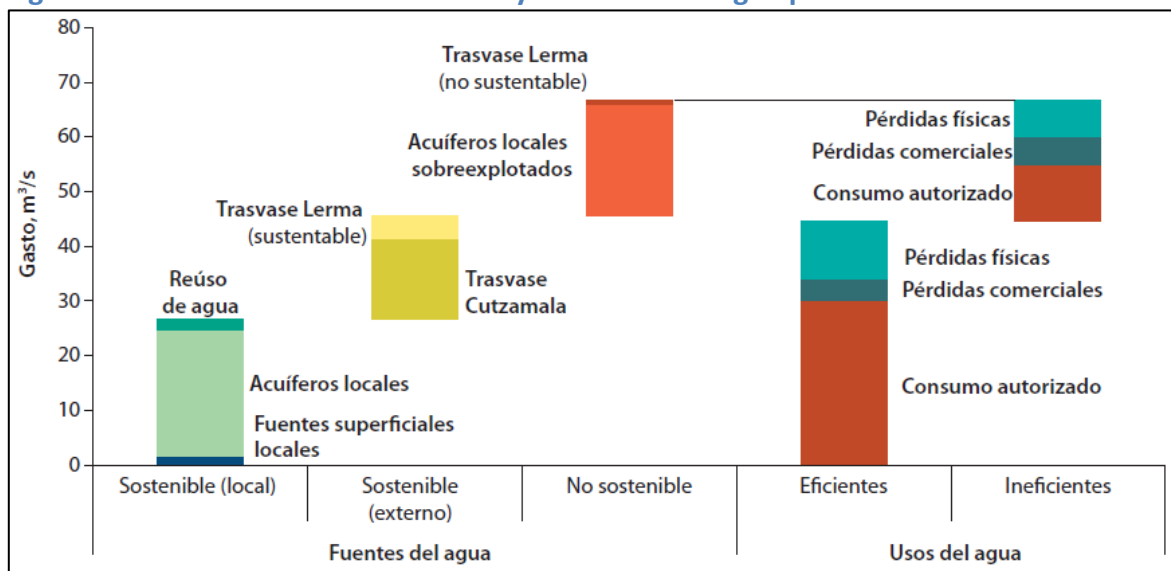
¹⁰ Tratar una sustancia compleja, como un mineral, con un disolvente adecuado para separar sus partes solubles de las insolubles (Real Academia Española, 2017).

El volumen de agua potable inyectado al Valle de México asciende a 64.7 m³/s (2,040 hm³/año) proveniente en su mayoría de acuíferos, más 2.1 m³/s (66 hm³/año) de agua para reutilización dentro de la cuenca. Sin embargo, es preocupante que existe la condición de sobreexplotación en 4 de los 7 acuíferos locales y externos, que globalmente alcanzan un déficit de 25 m³/s, cuando existen usos ineficientes de aproximadamente 19.9 m³/s (Banco Mundial, 2013).

Asimismo, las pérdidas físicas para el Valle de México representan aproximadamente 17.0 m³/s (537 hm³/año) o 26% del volumen total que se inyecta, pero este valor podría ser mucho mayor si se considera que casi todos los sistemas en esta región tienen problemas de continuidad del servicio y mal estado¹¹ de su infraestructura (Banco Mundial, 2013).

En la Figura 4 es posible observar que las prácticas actuales de gestión del agua urbana en el Valle de México son ineficientes e insostenibles. De acuerdo con el Banco Mundial (2013), 32% del agua de abastecimiento urbano en el Valle proviene de extracciones insostenibles de las fuentes, principalmente por sobreexplotación de los acuíferos del Valle. Además, cerca de 33% del agua no se usa eficientemente en comparación con buenas prácticas internacionales, ya sea porque los niveles de pérdidas físicas y comerciales en los sistemas de agua (570 a 650 litros diarios por toma) son superiores a las buenas prácticas internacionales (<25 litros diarios por toma) o porque los usuarios finales consumen volúmenes mayores (300 litros diarios por persona) a los que se consumen en otras ciudades comparables.

Figura 4 Resumen de la sostenibilidad y eficiencia del agua potable en el Valle de México



Fuente: (Banco Mundial, 2013)

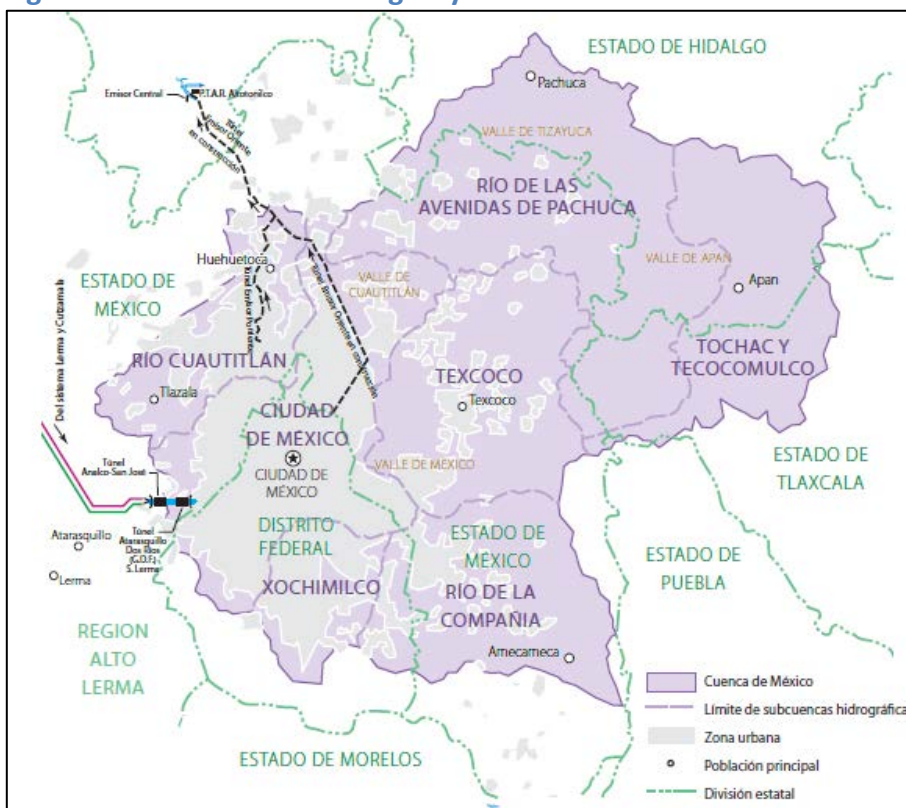
¹¹ Niveles de pérdidas físicas con valores que alcanzan los 570 a 650 litros diarios por toma; según la International Water Association (IWA) los sistemas con infraestructura en buenas condiciones de operación y mantenimiento alcanzan valores inferiores a 25 litros diarios por toma (citado en Banco Mundial, 2013).

2.1 Valle de México

2.1.1 Ubicación geográfica

El Valle de México tiene una extensión territorial de 9,739 km² que comprende 50 municipios del Estado de México, 15 municipios del Estado de Hidalgo y 4 municipios del Estado de Tlaxcala, más las 16 delegaciones políticas de la Ciudad de México (véase Figura 5). A su vez, dentro de la cuenca del Valle de México se encuentra la zona metropolitana del Valle de México, que abarca 7,854 km², incluidos la Ciudad de México (16 delegaciones políticas) y parcialmente el Estado de México (50 municipios) y un municipio del Estado de Hidalgo (Banco Mundial, 2013).

Figura 5 Delimitación hidrológica y administrativa de la cuenca del Valle de México



Fuente: Banco Mundial, 2013

2.1.2 Crecimiento demográfico

El crecimiento de la población del Valle de México ha sido uno de los más acentuados a nivel mundial. Considerando el área urbana de la zona metropolitana del Valle de México, la mancha urbana aumentó su tamaño 5.4 veces en 50 años entre 1950 y 2000 y 5.65 veces entre 1950 y 2005 (Breña-Puyol y Breña-Naranjo, 2009). Este crecimiento explica en gran medida por qué las capacidades financieras e institucionales de los municipios se han visto rebasadas, así como la propia disponibilidad de agua en la cuenca del Valle de

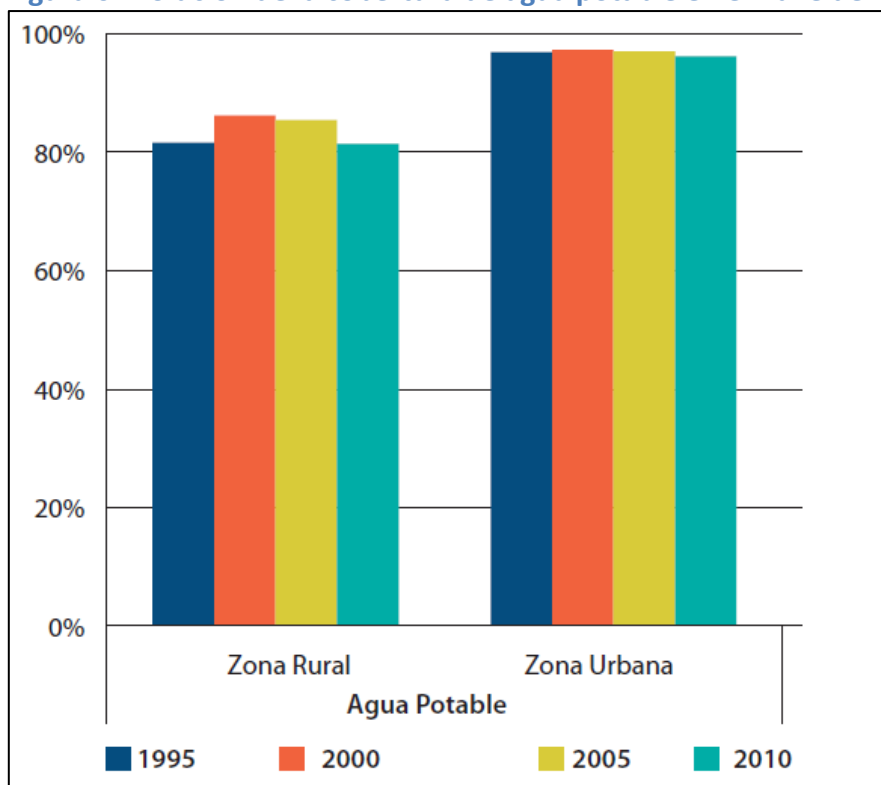
México. Por otra parte, a pesar de que se identifica a nivel agregado una disminución en el ritmo de crecimiento demográfico del Valle de México, ahora se presentan tendencias de relocalización de la población¹² que tienen un impacto importante en la capacidad de los municipios para prestar servicios de agua y saneamiento (*citado en* Banco Mundial, 2013).

2.2 Servicio de agua potable

2.2.1 Cobertura

Según el censo 2010 de población en México, el 91.6% de la población del Valle de México tiene servicio de agua potable (*citado en* Banco Mundial, 2013). Aunque la región cuenta con una alta tasa de cobertura del servicio, una fracción importante de la población no recibe el servicio de agua potable de manera continua (24 horas por día los 7 días de la semana). El servicio de agua potable discontinuo, planificado o no, es común en los municipios del Valle de México (Banco Mundial, 2013). La Figura 6 muestra la evolución de los servicios de agua potable en el Valle de México para el período 1995-2010.

Figura 6 Evolución de la cobertura de agua potable en el Valle de México



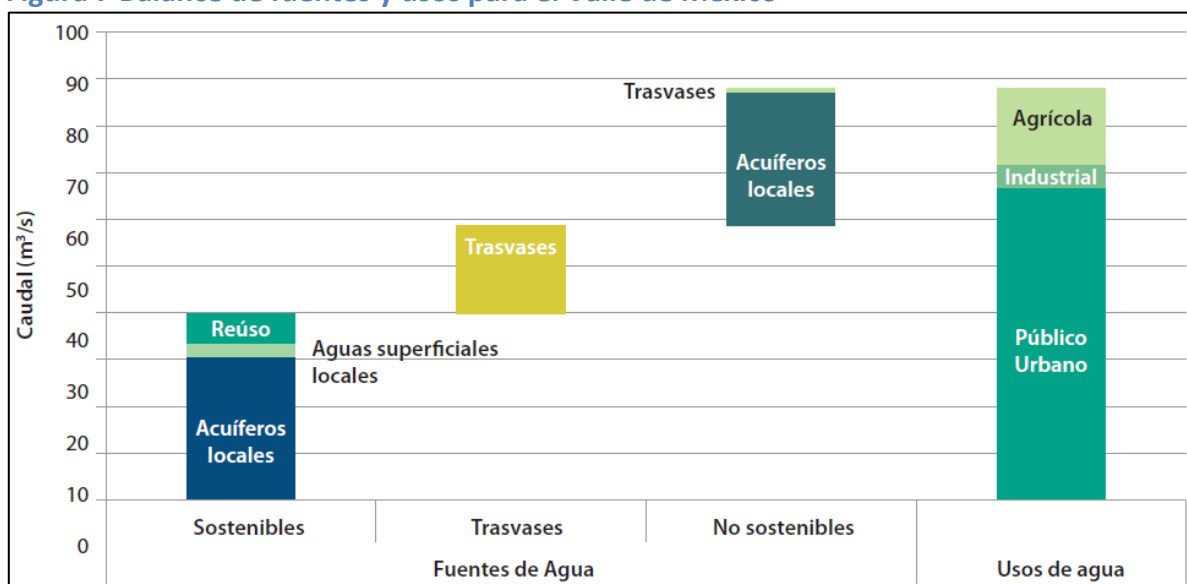
¹² Por ejemplo, el municipio de Valle de Chalco de Solidaridad ubicado a costados de la carretera de cuota a la ciudad de Puebla ha tenido un crecimiento exponencial debido a la transformación de terrenos agrícolas en zonas urbanas. De igual forma, el análisis de los datos censales de 2010 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) indica que Huehuetoca ha crecido en un 292% en los últimos 5 años. En contraste, zonas densamente pobladas como Nezahualcóyotl parecen presentar una estabilización en su población (*citado en* Banco Mundial, 2013).

Fuente: Banco Mundial, 2013

2.2.2 Balance hídrico

La Figura 7 presenta un balance de fuentes y usos del agua en el Valle de México. En particular, muestra la situación preocupante de las fuentes, un tercio de las cuales no son sostenibles; así como el hecho de que aún se usa casi una quinta parte del agua en el Valle para riego con fines agrícolas cuando el costo marginal del agua es sumamente alto (Banco Mundial, 2013).

Figura 7 Balance de fuentes y usos para el Valle de México



Fuente: Banco Mundial, 2013

2.2.2.1 Fuentes de abastecimiento

Las principales fuentes de agua del Valle de México son i) acuíferos locales, ii) embalses menores, y iii) trasvases desde otras cuencas (véase Tabla 7). Estos, de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en conjunto aportan al Valle de México 81.9 m³/s (2,583 hm³) de agua al año, a los cuales se pueden agregar 6.1 m³/s de agua de reúso dentro de la cuenca (citado en Banco Mundial, 2013).

Tabla 7 Distribución de las fuentes de abastecimiento del Valle de México

Fuente	Caudal		
	m³/s	hm³/año	%
Acuíferos locales	59.5	1,875	68%
Sostenibles	31.6	997	36%
Sobreexplotados	27.9	880	32%
Superficiales locales	2.9	91	3%
Trasvases del sistema Lerma	4.8	151	5%

Trasvases del sistema Cutzamala	14.7	464	17%
Reutilización del agua	6.1	192	7%
Total	88.0	2,775	100%

Fuente: (Banco Mundial, 2013)

2.2.2.1.1 Acuíferos locales

El abastecimiento de agua subterránea dentro del Valle de México proviene de siete acuíferos que están mayormente clasificados como acuíferos sobreexplotados por la CONAGUA. Estos acuíferos han estado bajo veda rígida desde 2003. La Tabla 8 indica que todavía existe una alta dependencia de estos recursos hídricos sobreexplotados para abastecer a la región. Cabe destacar en particular que el acuífero de la zona metropolitana de la Ciudad de México se encuentra con un déficit anual de 22.6 m³/s (713 hm³ por año) lo cual confirma la grave situación en la que se encuentra dicho acuífero (Banco Mundial, 2013).

Tabla 8 Balance hídrico de los acuíferos locales que abastecen al Valle de México

Acuíferos	Recarga media anual	Descarga natural comprometida	Volumen concesionado	Disponibilidad/déficit	
				m ³ /s	hm ³ /año
Zona metropolitana de la Ciudad de México	16.3	0.0	38.9	-22.6	-713
Tecocomulco	0.9	0.0	0.0	0.8	26
Apan	5.0	2.8	0.3	1.9	59
Chalco-Amecameca	2.5	0.1	2.9	-0.5	-16
Texcoco	5.1	0.3	6.3	-1.6	-49
Cuautitlán-Pachuca	6.4	0.0	10.5	-4.1	-129
Soltepec	2.9	1.3	0.6	1.1	33
Total	39.1	4.6	59.5	-25.0	-788

Fuente: Banco Mundial, 2013

2.2.2.1.1.1 Algunas consecuencias de la sobreexplotación de los acuíferos

Escolero, Martínez y Kralisch (2009) señalan que entre otros aspectos, la sobreexplotación de agua en los acuíferos del Valle de México causa el hundimiento de la Ciudad de México y otros municipios, el cual varía entre 6 y 28 centímetros anuales. Aunque no existen cifras confiables sobre los costos que dicho hundimiento origina, es fácil deducir que son enormes si se considera, de acuerdo al trabajo desarrollado por Jiménez y Marín, que:

- El hundimiento provoca que las redes de agua potable y de drenaje sufran fallas frecuentes: las primeras se fracturan mientras que las segundas pierden su pendiente. En el primer caso, 25% del agua potable se desperdicia en pérdidas

físicas. En tanto, para evitar las inundaciones ocasionadas por la falta de pendiente ha sido necesario construir y operar el Drenaje Profundo así como costosos sistemas de bombeo. Puesto que el hundimiento continúa, se seguirán requiriendo enormes inversiones de este tipo.

- Los costos para corregir fallas en los edificios de la ciudad son también cuantiosos. Un ejemplo es el de la Catedral de la Ciudad de México en la que se ha invertido, hasta el año 2000, 32.5 MMUSD para renivelarla.
- Las inversiones para renivelar periódicamente las vías del Metro son cada vez más importantes.

2.2.2.1.2 Agua superficial local

De acuerdo con datos de la CONAGUA, originalmente la cuenca del Valle de México estaba compuesta por un sistema lacustre (lagos) de casi 2,000 km². Al pasar los años y conforme ha avanzado la mancha urbana, los cuerpos se han reducido de manera tal que actualmente los principales embalses en el Valle abarcan una superficie de 15.6 km² (*citado en Banco Mundial, 2013*).

Gran parte de las aguas superficiales presentan altos grados de contaminación por las descargas de aguas residuales que reciben a lo largo de su cauce, como es el caso del Río de la Compañía. No obstante, a pesar de la radical transformación que ha sufrido la antigua cuenca lacustre donde se asienta la Ciudad de México, todavía prevalecen algunos ríos, como es el caso del río Magdalena y presas de las cuales se obtiene agua derivada de manantiales y corrientes pluviales que abastecen la urbe (*Banco Mundial, 2013*).

El río Magdalena abastece a la Ciudad de México y la presa Madín al Estado de México. Ambas poblaciones se benefician también de manantiales. En conjunto, estas fuentes aportan 2.9 m³/s de agua, de los cuales, de acuerdo a datos del Consejo de Cuenca del Valle de México, el 59% (1.7 m³/s) está destinado para el consumo urbano¹³ mientras que el 17% (0.5 m³/s) y el 24% (0.7 m³/s) restantes son utilizados con fines agrícolas e industriales respectivamente (*citado en Banco Mundial, 2013*).

El Gobierno de la Ciudad de México señala que el sistema de abastecimiento de la Ciudad de México también incluye el aprovechamiento de 18 manantiales que en conjunto aportan 0.8 m³/s o 25 hm³/año del agua urbana (*citado en Banco Mundial, 2013*).

2.2.2.1.3 Trasvases

Dos fuentes importantes para abastecer al Valle de México son los trasvases de agua traídos por el sistema Lerma y el sistema Cutzamala. El Consejo de Cuenca del Valle de

¹³ Se refiere a agua potable.

México señala que entre los dos sistemas proveen el 24% del agua que entra al Valle, 14.7 m³/s (151 hm³/año) del sistema Cutzamala y 4.8 m³/s (464 hm³/año) del sistema Lerma (citado en Banco Mundial, 2013). Ambas fuentes se usan exclusivamente para agua urbana.

2.2.2.1.3.1 El sistema Lerma

El sistema Lerma comenzó a operar en 1951. Por su parte, la CONAGUA cuenta con información que indica el deterioro en el servicio de dicho sistema: en el periodo 2003-08, debido a la sobreexplotación del acuífero, el caudal entregado a la Ciudad de México se redujo en 14% (citado en Banco Mundial, 2013).

La Tabla 9 muestra con mayor detalle la condición geohidrológica de sobreexplotación de los acuíferos externos que abastecen al Valle de México a través del sistema Lerma:

Tabla 9 Condición geohidrológica de los acuíferos de la subregión Alto Lerma en el Estado de México

Acuífero	Volumen concesionado (m ³ /s)	Recarga (m ³ /s)	Descarga natural comprometida (m ³ /s)	Déficit (m ³ /s)	Condición geohidrológica
Valle de Toluca	10.4	10.7	1.7	-1.5	Sobreexplotado
Ixtlahuaca-Atlacomulco	3.7	3.8	0.6	-0.5	Sobreexplotado
Total	14.1	14.4	2.3	-1.9	

Fuente: Banco Mundial, 2013

2.2.2.1.3.2 El sistema Cutzamala

El sistema Cutzamala fue construido en la década de 1970 para apoyar al sistema Lerma que se encontraba, ya en ese tiempo, con recursos hídricos agotados. De acuerdo con cifras oficiales de la CONAGUA, hoy en día el sistema Cutzamala abastece a 11 delegaciones de la Ciudad de México y una docena de municipios del Estado de México; es uno de los sistemas de abastecimiento de agua potable más grandes del mundo, no sólo por la cantidad de agua que suministra (aproximadamente 15.4 m³/s), sino por el desnivel (1,100 metros) que tiene que vencer¹⁴. Dicho sistema aprovecha los volúmenes de agua superficial del río Cutzamala y está formado por las presas Tuxpan y Bosque en Michoacán; y Colorines, Ixtapan del Oro, Valle de Bravo, Villa Victoria y Chilesdo, en el Estado de México (citado en Banco Mundial, 2013).

¹⁴ El sistema de bombeo necesario para vencer el desnivel ocasiona un consumo significativo de energía eléctrica. En 2008, la electricidad empleada fue de 1.29 TWh, lo que representó el 0.56% de la generación total de energía eléctrica del país, y su costo fue de 1,844 MMMXN (Banco Mundial, 2013).

La CONAGUA apunta que el volumen de entrega total de agua potable del sistema Cutzamala oscila entre 14.7 m³/s (464 hm³/año) y 15.3 m³/s (483 hm³/año), el cual es aprovechado para el uso urbano (*citado en Banco Mundial, 2013*).

2.2.2.1.4 Reutilización del agua

Según estimaciones de Heath y Philippe y la CONAGUA, con una producción del orden de 52 m³/s (1,640 hm³/año) de aguas residuales en el Valle de México, el tratamiento de estas podría representar una fuente potencial de agua. A pesar de esto, actualmente sólo poco más del 12% o 6.1 m³/s (192 hm³/año) de esta cantidad es tratada y reutilizada dentro del Valle para uso público urbano (2.1 m³/s ó 66 hm³/año), industrial (0.5 m³/s ó 16 hm³/año) y agrícola (3.2 m³/s ó 101 hm³/año). Las aguas residuales son tratadas con ayuda de 102 plantas de tratamiento operadas por los varios Gobiernos del Valle, con una capacidad total instalada de tratamiento de 10.9 m³/s. El resto del agua residual es transportada sin tratamiento desde la cuenca hasta el Valle del Mezquital para la irrigación de campos agrícolas (*citado en Banco Mundial, 2013*).

2.2.2.2 Usos del agua

El agua en la región se destina para múltiples usos, como el uso agrícola, público urbano e industrial. Por la creciente población de la zona metropolitana, el uso público urbano predomina en la cuenca, a diferencia de otras cuencas del país. Datos del Consejo de Cuenca del Valle de México señalan que en total se usan 88.0 m³/s (2,774 hm³/año) de agua, de los cuales 66.8 m³/s (2,105 hm³/año) corresponden al uso público urbano, 16.1 m³/s (508 hm³/año) al uso agrícola y 5.1 m³/s (161 hm³/año) al uso industrial (*citado en Banco Mundial, 2013*).

2.2.3 Áreas de oportunidad

2.2.3.1 Sostenibilidad

De acuerdo con estimaciones del Banco Mundial acerca de las fuentes de abastecimiento de agua potable del Valle de México (2013), el 32% del volumen de agua que le es proveído a la región está catalogado como no sostenible.¹⁵ La Tabla 10 muestra en detalle la condición de sostenibilidad del agua extraída de las distintas fuentes de abastecimiento del Valle de México.

Tabla 10 Sostenibilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable del Valle de México

Fuente	Caudal (m ³ /s)
--------	----------------------------

¹⁵ Se refiere al déficit de agua generado por tener una tasa de extracción más rápida que la tasa de recarga correspondiente.

	Sostenible	No sostenible	Total	
Acuíferos locales	22.9	20.5	43.4	65%
Aguas superficiales	1.7	-	1.7	3%
Trasvases Lerma	4.2	0.7	4.8	7%
Trasvases Cutzamala	14.7	-	14.7	22%
Reúso del agua	2.1	-	2.1	3%
Total	45.6	21.1		
	68%	32%		

Fuente: Banco Mundial, 2013

2.2.3.2 Eficiencia

En lo que se refiere al consumo de agua potable, 33% está catalogado como ineficiente. Consumo eficiente se refiere a la porción en la que los niveles de uso corresponden a situaciones de buenas prácticas y consumo ineficiente¹⁶ se refiere a la porción en la que los niveles de uso corresponden al sobreuso. En la Tabla 11 es posible observar con detalle la eficiencia del sistema por tipo de consumo.

Tabla 11 Eficiencia en el consumo de agua potable en el Valle de México

Consumo	Caudal (m³/s)			
	Eficiente	Ineficiente	Total	
Consumo autorizado	30.2	10.4	40.6	61%
Pérdidas físicas	10.4	6.6	17.0	25%
Pérdidas comerciales	4.0	5.2	9.2	14%
Total	44.6	22.2	66.8	
	67%	33%		

Fuente: Banco Mundial, 2013

2.2.3.2.1 Consumo autorizado

De acuerdo con la definición de Alegre *et al.*, los consumos autorizados corresponden al volumen de agua medido o no medido, consumido por los usuarios registrados como activos en la base de datos comercial de la empresa, por la misma empresa y por otros usuarios quienes están implícita o explícitamente autorizados por el operador del sistema para uso doméstico, comercial e industrial; incluye también el agua exportada (*citado en Banco Mundial, 2013*).

2.2.3.2.2 Pérdidas físicas

¹⁶ No toda pérdida de agua, ya sea física o comercial, es catalogada como ineficiente; existen niveles de pérdidas por debajo de los cuales no es técnicamente factible o económicamente viable estar, y los mismos no se cuantifican como ineficientes (Banco Mundial, 2013).

Las pérdidas físicas están asociadas con las fugas y reboses en los tanques de almacenamiento, las fugas visibles y no visibles en redes de conducción y las fugas visibles y no visibles en redes y tomas de servicio (Banco Mundial, 2013).

2.2.3.2.3 Pérdidas comerciales

Como señala Alegre *et al.*, las pérdidas comerciales se presentan cuando el agua que está siendo utilizada o consumida no es satisfactoriamente medida o facturada e incluyen todos los tipos de inexactitudes asociadas con la información de los clientes, los medidores y los procesos de lectura y facturación; además, incluye los consumos no autorizados (fraudes y clandestinos) (*citado en* Banco Mundial, 2013).

2.3 Déficit

De acuerdo con datos de la propia dependencia, la CONAGUA está desarrollando obras que incrementarán las fuentes de producción tales como la ampliación y rehabilitación del sistema Cutzamala (que aumentará su capacidad en 5 m³/s), la ampliación de la capacidad de tratamiento de aguas residuales (para remplazar el agua de primer uso por aguas residuales para su utilización en los sectores agrícolas e industriales en el Valle de México), otros proyectos como la presa Guadalupe (2 m³/s), la presa Madín (0.5 m³/s), el proyecto Zumpango (2.5 m³/s), y otras fuentes (5 m³/s). Sin embargo, y de acuerdo a las proyecciones realizadas por el Banco Mundial (2013), ni en un escenario tendencial¹⁷ ni en un escenario verde¹⁸ se podría llegar con esas fuentes a cerrar completamente la brecha con el nivel insostenible de producción de las fuentes existentes. Se mantendría una brecha amplia del orden de 21 m³/s para la cual sería necesario identificar aún más fuentes fuera del Valle de México (Banco Mundial, 2013).

3 Sistema doméstico de captación de agua de lluvia para consumo humano, una alternativa de suministro de agua potable en el Valle de México

“En el caso concreto del Valle de México se podría señalar, entre otras, las grandes oportunidades ofrecidas por la definición de exigencias de aprovechamiento de aguas pluviales en nuevas urbanizaciones...” (Banco Mundial, 2013).

3.1 Agua de lluvia en el Valle de México

3.1.1 Región Hidrológico–Administrativa XIII: Aguas del Valle de México

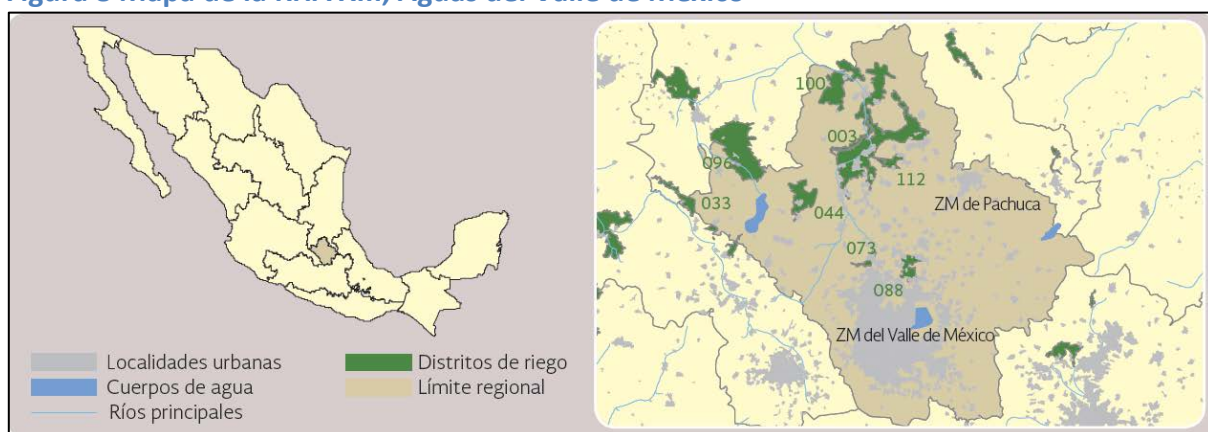
¹⁷ De manera general, este escenario asume que no se han reunido las condiciones políticas, económicas y sociales que generen los incentivos adecuados (tanto a nivel de organismos operadores como de los usuarios finales) para concientizar al público de que el agua es un recurso finito, con un precio suficiente para recuperar los costos de la prestación del servicio (Banco Mundial, 2013).

¹⁸ En resumen, el escenario verde considera que el agua en el Valle se llega a manejar de manera eficiente, equitativa y sostenible (Banco Mundial, 2013).

Para fines de administración y preservación de las aguas nacionales, en 1997 la CONAGUA¹⁹ dividió el país en trece Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA) formadas por agrupaciones de cuencas y consideradas como las unidades básicas para la gestión de recursos hídricos. Los límites de las regiones respetan la división política municipal para facilitar la administración e integración de datos socioeconómicos (Comisión Nacional del Agua, 2016).

En particular, para el presente trabajo el interés está centrado en la RHA XIII: Aguas del Valle de México (Figura 8).

Figura 8 Mapa de la RHA XIII, Aguas del Valle de México



Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2016

3.1.2 Agua de lluvia

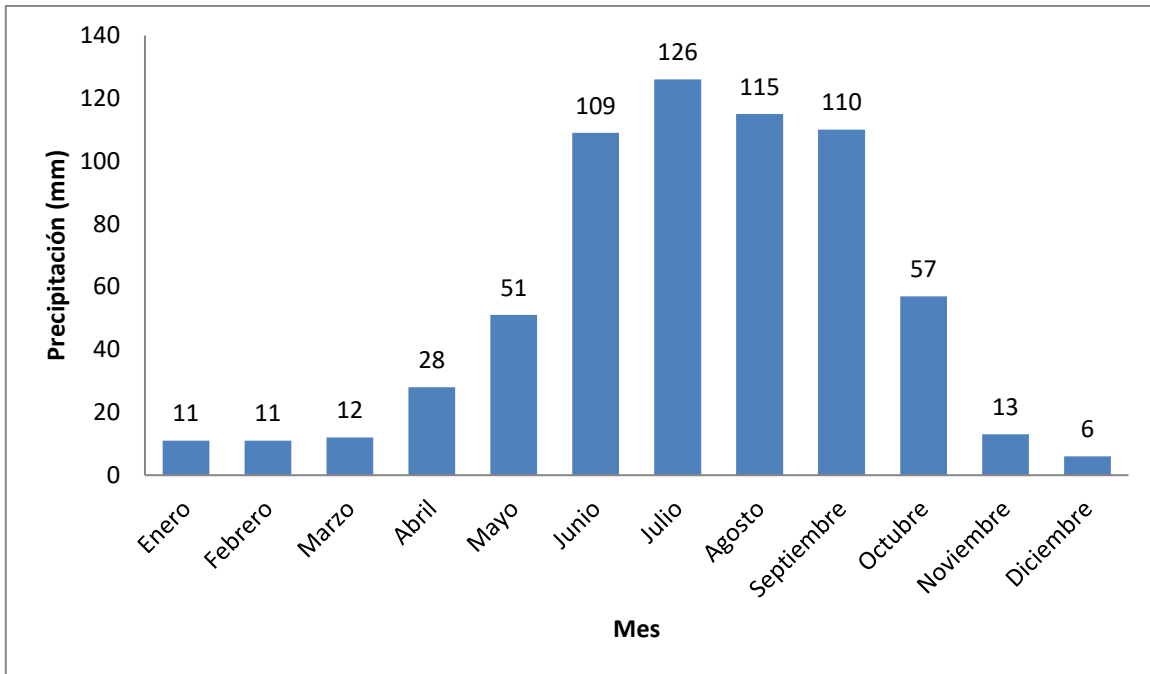
3.1.2.1 Cantidad

3.1.2.1.1 Precipitación pluvial mensual

En el periodo 1981-2010 (30 años), la precipitación promedio de la RHA XIII fue de 649 mm anuales. La distribución (normal) de la precipitación a lo largo del año para dicho periodo se muestra en la Figura 9. Cabe destacar que el 71% de la precipitación ocurre entre los meses de junio y septiembre (temporada de lluvias).

Figura 9 Precipitación pluvial mensual, 1981-2010 (mm)

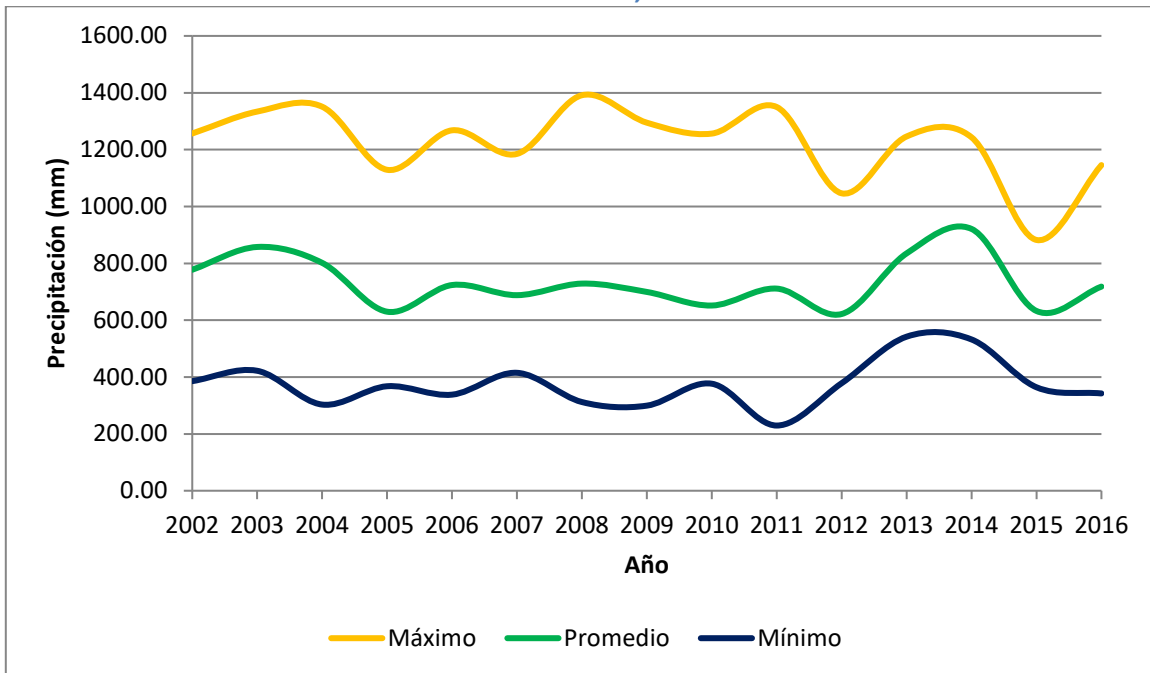
¹⁹ Órgano administrativo, normativo, técnico y consultivo encargado de la gestión del agua en México (Comisión Nacional del Agua, 2016).



Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2016

3.1.2.1.2 Precipitación anual promedio

Figura 10 Agua de lluvia captada en las estaciones de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, 2002-2016

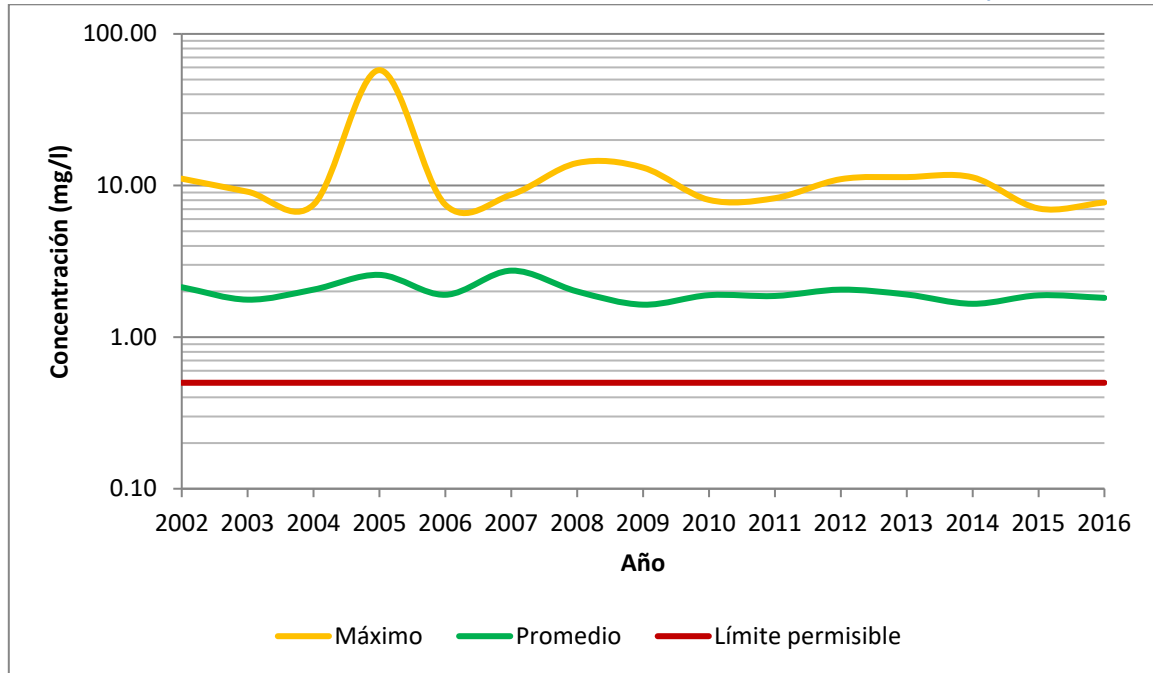


Fuente: Secretaría del Medio Ambiente

3.1.2.2 Calidad

3.1.2.2.1 Amonio (NH₄⁺)

Figura 11 Concentración de amonio en el agua de lluvia captada en las estaciones de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, 2002-2016

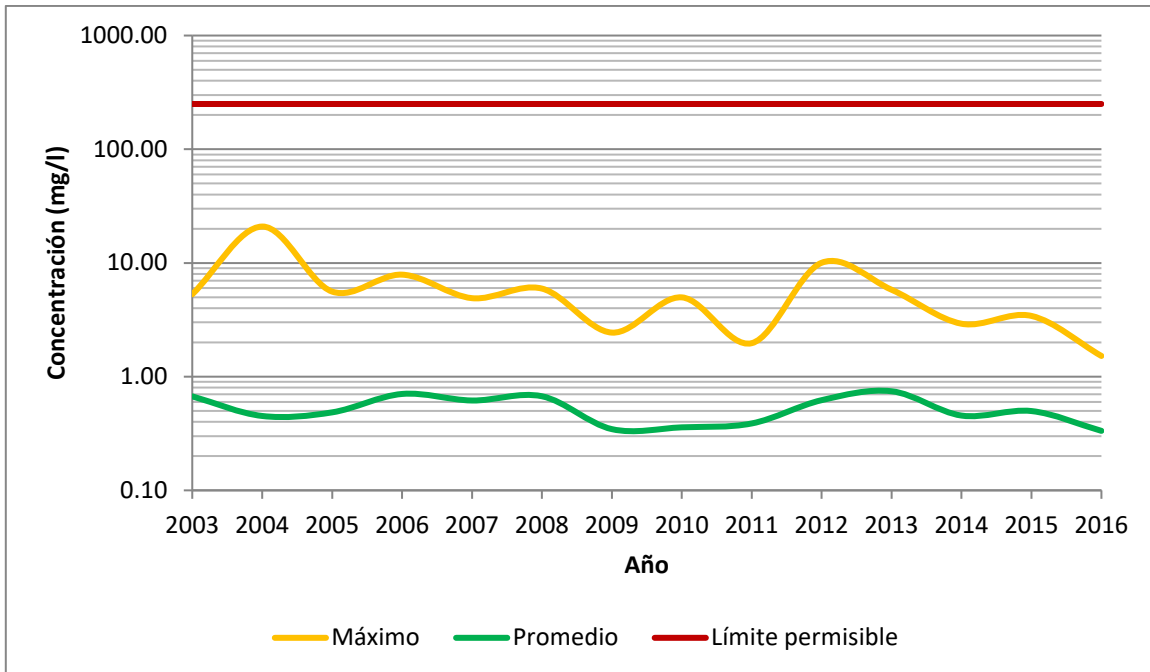


Nota: El límite permisible se refiere al que marca la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. La escala del eje vertical (concentración) es logarítmica (base 10).

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente

3.1.2.2.2 Cloruro (Cl⁻)

Figura 12 Concentración de cloruro en el agua de lluvia captada en las estaciones de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, 2003-2016

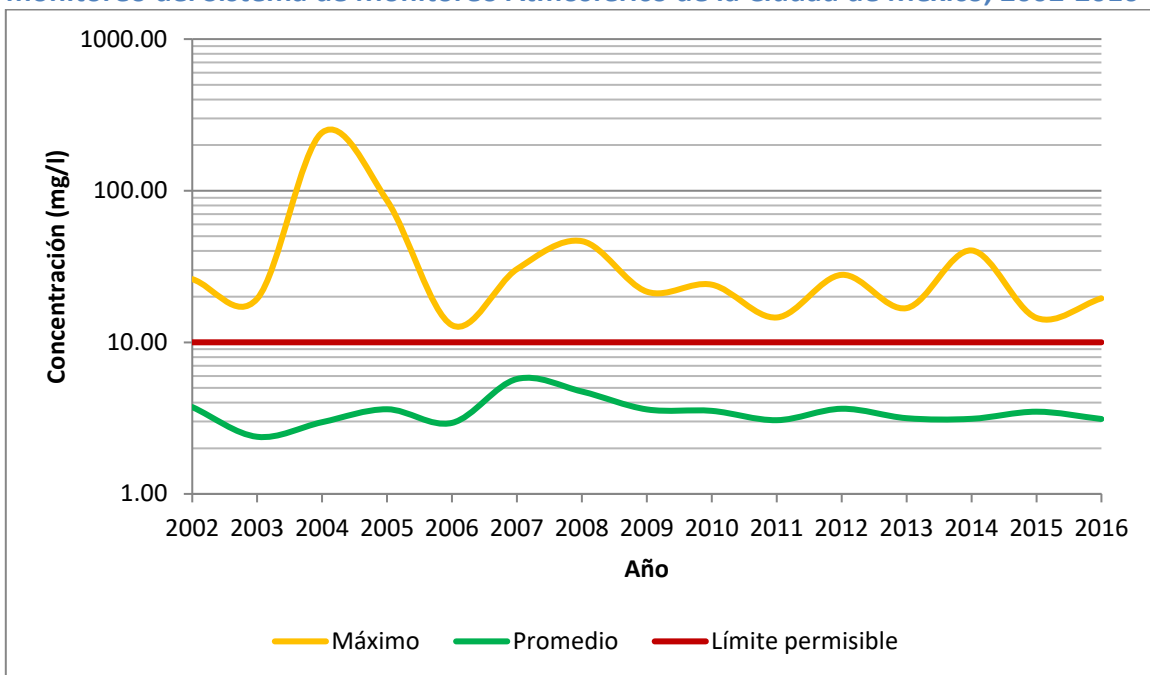


Nota: El límite permisible se refiere al que marca la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. La escala del eje vertical (concentración) es logarítmica (base 10).

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente

3.1.2.2.3 Nitrato (NO_3^-)

Figura 13 Concentración de nitrato en el agua de lluvia captada en las estaciones de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, 2002-2016

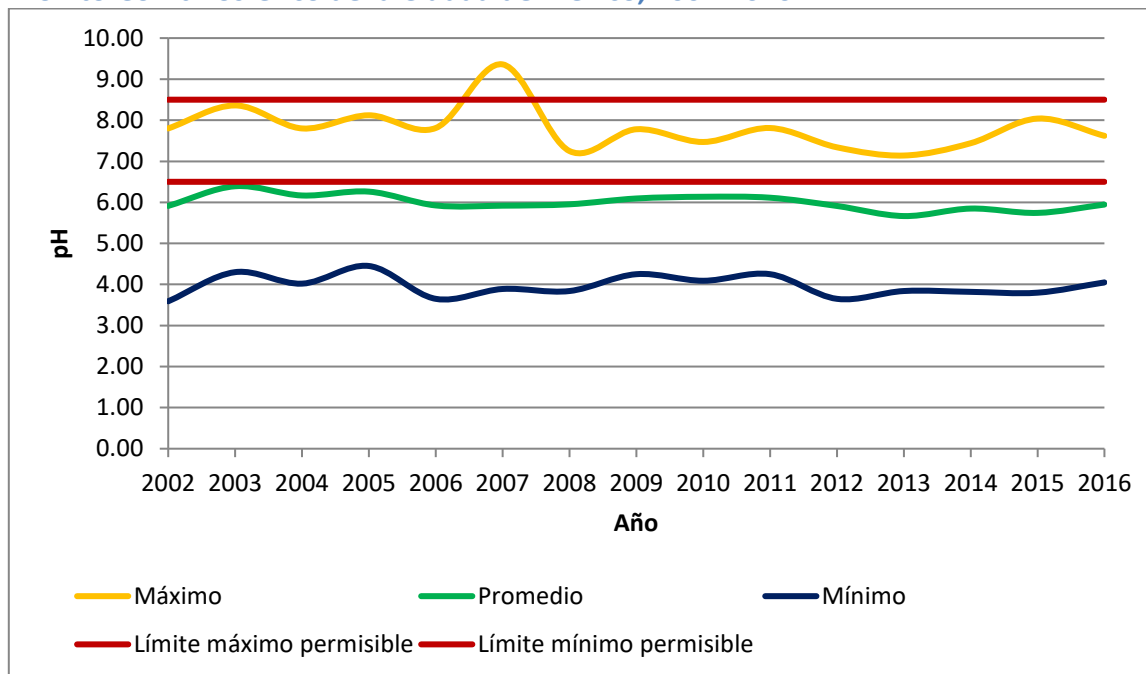


Nota: El límite permisible se refiere al que marca la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. La escala del eje vertical (concentración) es logarítmica (base 10).

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente

3.1.2.2.4 pH

Figura 14 pH del agua de lluvia captada en las estaciones de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, 2002-2016

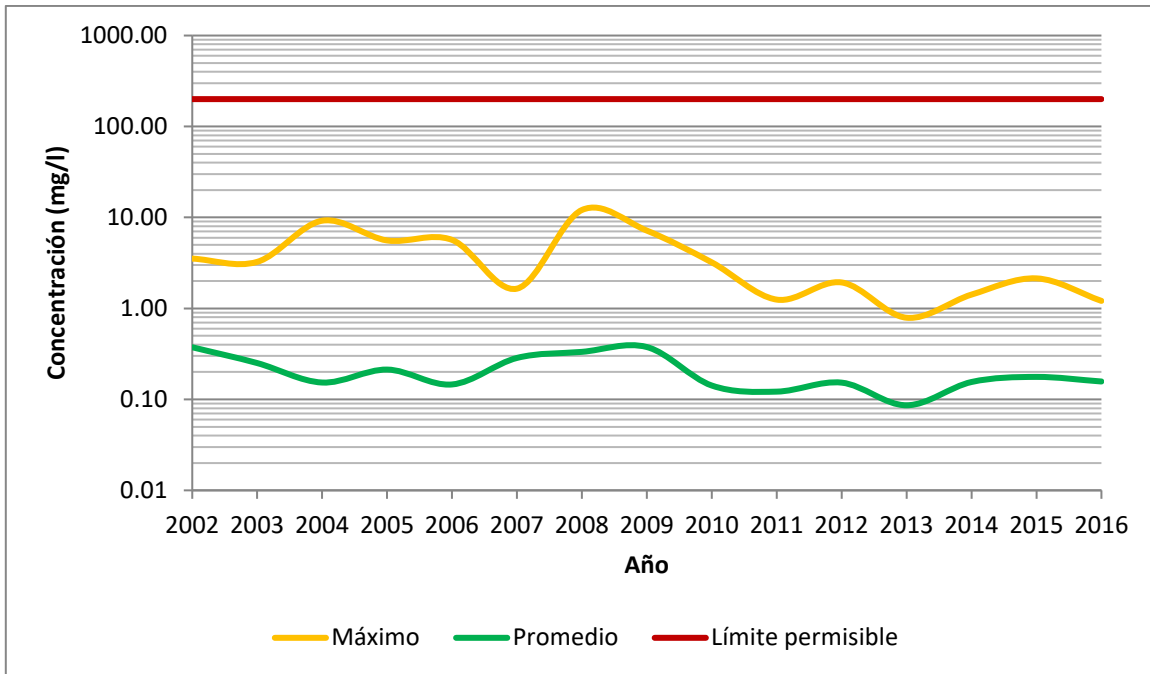


Nota: El límite permisible se refiere al que marca la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente

3.1.2.2.5 Sodio (Na⁺)

Figura 15 Concentración de sodio en el agua de lluvia captada en las estaciones de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, 2002-2016

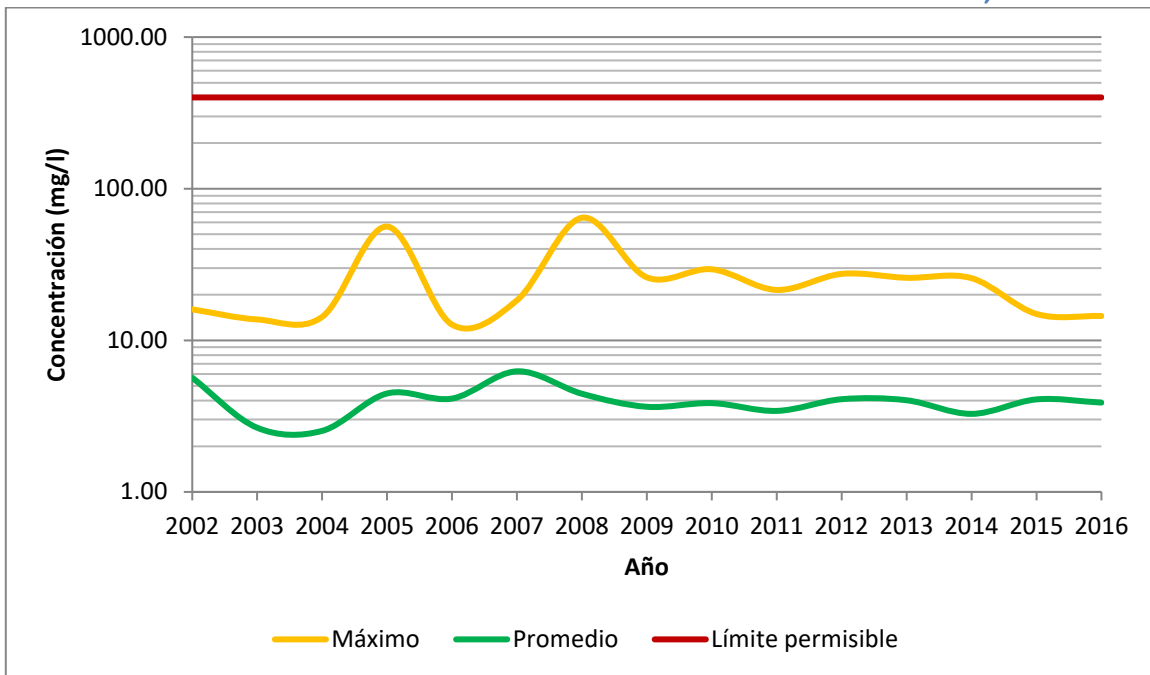


Nota: El límite permisible se refiere al que marca la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. La escala del eje vertical (concentración) es logarítmica (base 10).

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente

3.1.2.2.6 Sulfato (SO_4^{2-})

Figura 16 Concentración de sulfato en el agua de lluvia captada en las estaciones de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, 2002-2016



Nota: El límite permisible se refiere al que marca la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. La escala del eje vertical (concentración) es logarítmica (base 10).

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente

3.2 Sistema doméstico de captación de agua de lluvia para consumo humano

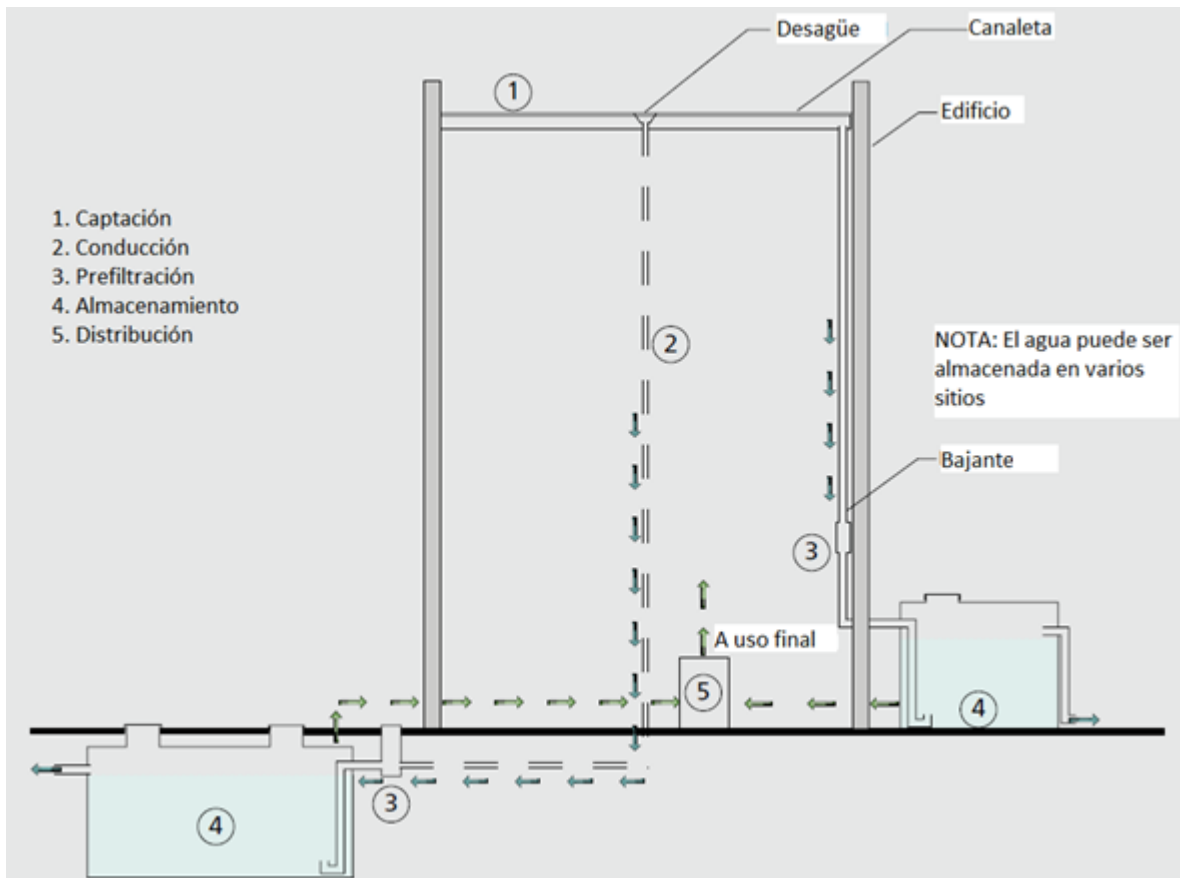
3.2.1 Definición

De acuerdo con lo señalado por Novak, Van Giesen, & DeBusk (2014), se refiere a un grupo integrado de elementos que trabajan juntos para proporcionar agua de lluvia captada para consumo humano. Los elementos fundamentales de un sistema doméstico de captación de agua de lluvia para consumo humano (véase Figura 17) son:

1. Captación: La superficie es típicamente el techo²⁰ de una casa o edificio.
2. Conducción: El escurrimiento del techo se transporta típicamente al tanque de almacenamiento de agua de lluvia a través de canaletas con bajantes.
3. Prefiltración: Los dispositivos de prefiltración se usan para eliminar los contaminantes (partículas) que se encuentran antes del almacenamiento. Asimismo, es posible usar un desviador de primer flujo para evitar que una cantidad inicial de escurrimiento del techo entre en el tanque de almacenamiento.
4. Almacenamiento: Los tanques o cisternas se utilizan para almacenar el agua de lluvia captada.
5. Distribución: El uso de agua de lluvia captada para consumo humano normalmente se requiere presurizar, filtrar, tratar, controlar el flujo, monitorear los niveles del tanque de almacenamiento y/o controlar la necesidad de cambiar a otra fuente de agua.

Figura 17 Elementos básicos de un sistema doméstico de captación de agua de lluvia para consumo humano

²⁰ En el presente trabajo sólo se hace referencia a este tipo de superficie.



Fuente: Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014

3.2.2 Componentes

3.2.2.1 Captación

3.2.2.1.1 Techo

El techo de un edificio sirve esencialmente para proteger al edificio y sus ocupantes de factores climáticos. Con los sistemas de captación de agua de lluvia el usuario puede captar y utilizar uno de esos factores (lluvia) como un recurso valioso (Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014).

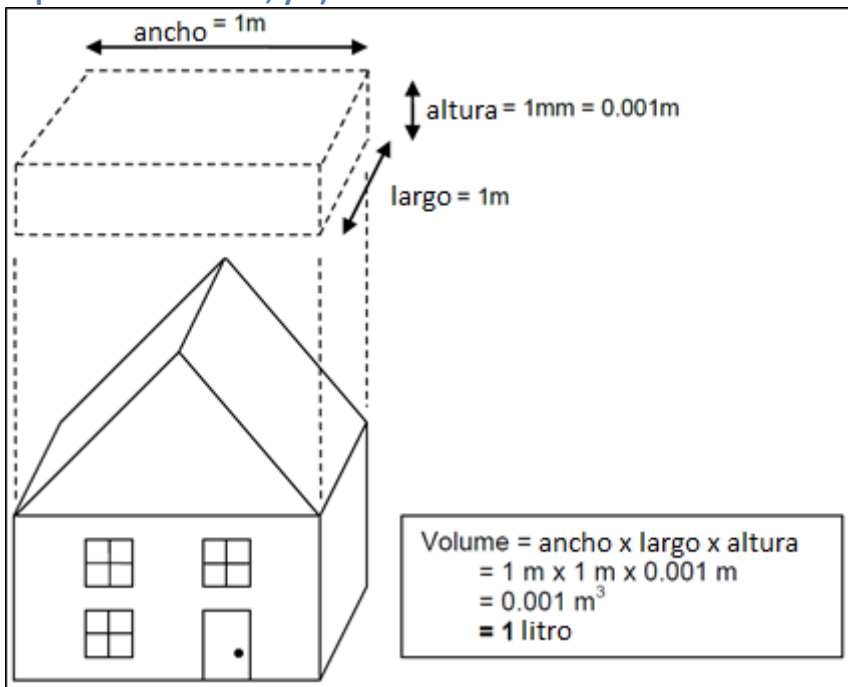
Como señala Despins (2010), si bien es cierto que es posible captar agua de lluvia de otras superficies tales como céspedes o estacionamientos, dichas superficies están fuera del alcance del presente trabajo debido a la calidad del agua de lluvia que se obtiene de ellas. Por lo tanto, este trabajo sólo se enfoca en los techos de casas o edificios como superficies de captación de agua de lluvia.

3.2.2.1.1.1 Área de captación

Teóricamente, por cada metro cuadrado de área de captación del techo es posible captar 1 litro de agua de lluvia por cada milímetro de lluvia.

La relación entre el área de captación y el volumen de agua de lluvia captado se muestra en la Figura 18. En ella se observa que cuanto mayor sea el área de captación, mayor será la cantidad de agua de lluvia que se pueda captar por milímetro de lluvia (relación directamente proporcional).

Figura 18 Volumen teórico de agua de lluvia captada por i) metro cuadrado de área de captación del techo, y ii) milímetro de lluvia



Fuente: Despíns, 2010

El área de captación tiene un impacto significativo tanto en el diseño como en la cantidad de agua de lluvia recolectada de los sistemas domésticos de captación de agua de lluvia. En general, es recomendable que el tamaño del área de captación utilizada para el sistema sea lo más grande posible para maximizar la cantidad de agua de lluvia recolectada. Para la mayoría de los sistemas que captan el agua de lluvia del techo, el tamaño del área de captación está predeterminado por el tamaño de la casa o edificio existente (Despíns, 2010).

3.2.2.1.1.2 Material

De acuerdo al trabajo realizado por Azizul (2017), la calidad del agua de lluvia de diferentes techos depende de i) tipo de material en la superficie del techo, ii) condiciones climáticas, y iii) entorno. A continuación se analizan varios tipos de materiales utilizados

en los techos, así como sus efectos sobre la calidad y la cantidad²¹ de agua de lluvia captada.

3.2.2.1.1.2.1 Azulejo de arcilla y azulejo de concreto

El azulejo de arcilla y el azulejo de concreto son adecuados tanto para el uso potable como no potable del agua de lluvia, pero pueden contribuir a una pérdida del 10% debido a su textura rugosa, fricción proporcionada durante el flujo, porosidad y evaporación. Asimismo, debido a que son porosos y tienen una superficie rugosa, la suciedad se acumula en las esquinas de los azulejos, promoviendo así el crecimiento de varios microorganismos. Para disminuir la pérdida de agua y prevenir el crecimiento de microorganismos, los azulejos se pintan o recubren con un sellador (no tóxico).

3.2.2.1.1.2.2 Cal

Generalmente, la cal se monta sobre un techo plano de concreto para protegerlo del calor y para crear una superficie inclinada (chaflán) para el drenaje de las aguas pluviales. Dicho material está formado por agregados de ladrillo unidos con cal, ambos tienen poco o ningún efecto adverso en la calidad del agua de lluvia.

3.2.2.1.1.2.3 Fibra de vidrio

Las tejas de fibra de vidrio laminadas son un material de techo popular porque duran más que las tejas de asfalto. Existe la posibilidad de que la fibra de vidrio se lixivie en el agua de lluvia, lo que hace que este material sea una mala elección desde la perspectiva de la calidad del agua de lluvia.

3.2.2.1.1.2.4 Metal

La lámina de hierro galvanizado es un material utilizado comúnmente como techo y es adecuado para la captación de agua de lluvia. Dicha lámina se puede pintar aplicando un revestimiento epoxi (debe evitarse la pintura a base de plomo) que proporciona un acabado duro, resistente a químicos y solventes en la superficie del techo. Por otro lado, el agua de lluvia captada de techos con revestimientos de cobre puede causar decoloración de los accesorios de porcelana.

3.2.2.1.1.2.5 Pizarra

La pizarra ayuda a crear una superficie muy dura y lisa, que es ideal como material de captación porque maximiza el volumen de agua de lluvia recolectado para uso potable

²¹ La cantidad de agua de lluvia que se puede captar de un techo es función de i) la textura del techo, y ii) la capacidad de absorción de agua del material del techo. Una superficie lisa y un material denso resultan en más escurrimiento y por lo tanto un mayor volumen de captación (Azizul, 2017).

(asumiendo que no se utiliza un sellador tóxico). Sin embargo, el costo de la pizarra es alto limitando así su uso como material para techos.

3.2.2.1.1.2.6 Plástico

Las láminas de plástico también se utilizan como material para techos. Es posible captar agua de lluvia de un techo hecho de láminas de plástico porque la calidad del agua de lluvia que se recolecta, particularmente el pH y la dureza total, caen dentro de los límites aceptables de las recomendaciones de la OMS.

3.2.2.1.1.2.7 Tejas de asfalto

Debido a la lixiviación de toxinas, las tejas de asfalto no son apropiadas para sistemas potables pero pueden usarse para captar agua de riego. Dichos techos tienen una pérdida aproximada del 10% debido al flujo o evaporación ineficiente.

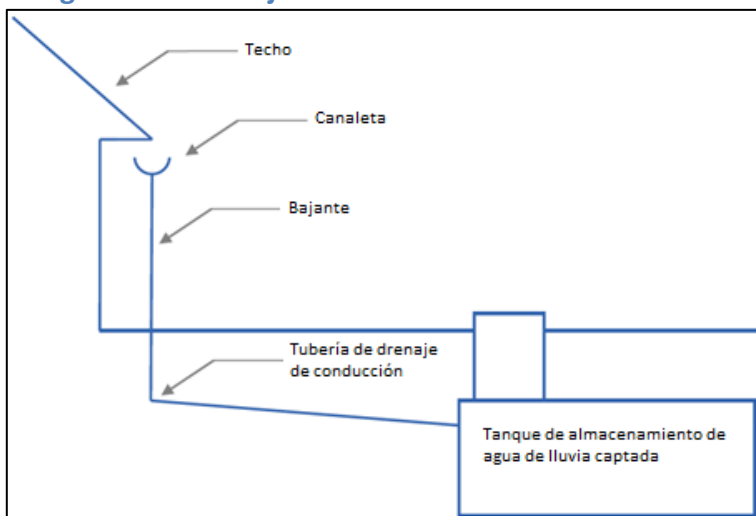
3.2.2.2 Conducción

El agua de lluvia que fluye hacia abajo en las superficies de captación (techos) debe dirigirse hacia los componentes de transporte para ser conducida al destino deseado (tanque de almacenamiento). Los componentes utilizados con frecuencia para el transporte de agua de lluvia en las casas y edificios son los siguientes:

1. Canaleta.
2. Bajante.

La Figura 19 muestra una configuración típica del arreglo.

Figura 19 Esquema de una red de conducción típica para un tanque de almacenamiento de agua de lluvia bajo tierra



Fuente: Despins, 2010

Las canaletas y bajantes de agua generalmente se fabrican con aluminio o acero galvanizado, y ambos materiales se consideran adecuados para su uso en sistemas de captación de agua de lluvia. Al seleccionar el material para la conducción (canaletas y bajantes) se deben considerar una serie de criterios: la tubería seleccionada debe clasificarse como adecuada para i) exposición a la luz ultravioleta (UV), ii) estar bajo tierra (cuando corresponda), y iii) manejo de agua potable. En general, se recomienda un tipo de cloruro de polivinilo (PVC) denominado tubería de grado de alcantarillado sanitario, o PVC SDR35, para los sistemas de captación de agua lluvia para consumo humano ya que cumple estos criterios (Despins, 2010).

3.2.2.2.1 Canaleta

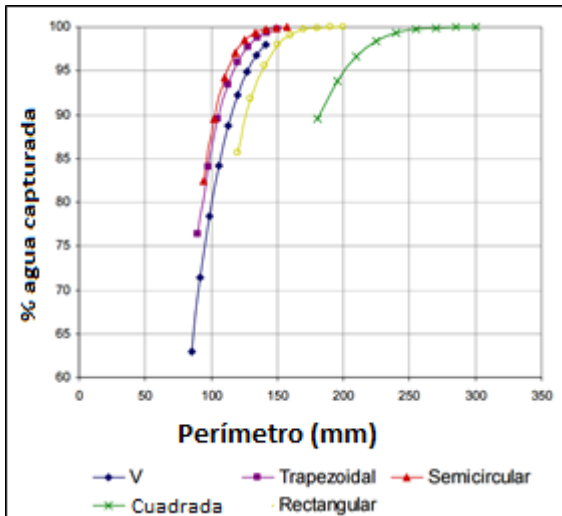
3.2.2.2.1.1 Función

Las canaletas tienen dos funciones principales: i) capturar el agua del techo, y ii) transportar dicha agua a las bajantes (Cabell Brand Center, 2009).

3.2.2.2.1.2 Sección transversal

De acuerdo al trabajo desarrollado por Still & Thomas (2002), las secciones transversales semicirculares y trapezoidales son las más recomendables (Figura 20) porque son capaces de drenar una mayor área del techo (es decir, transportar más agua) con la misma cantidad de material usado para hacer canaletas con otras secciones transversales (cuadrada, rectangular y triangular). Suponiendo que el precio de las canaletas depende de la cantidad de material utilizado para fabricarlas, las canaletas semicirculares y trapezoidales deberían ser más rentables y la velocidad del agua debería ser mayor, lo que conduciría a un drenaje y eliminación de los residuos más eficientes.

Figura 20 Eficiencia de captura de agua por las canaletas para distintas secciones transversales



Fuente: (Still & Thomas, 2002)

3.2.2.2.1.2.1 Ancho

La Tabla 12 presenta los resultados obtenidos²² de un modelo de optimización del ancho de las canaletas para techos con distintas áreas.

Tabla 12 Ancho de la canaleta para distintas áreas del techo

Área del techo para una canaleta (m ²)	Ancho de la canaleta (mm)
13	55
17	60
21	65
25	70
29	75
34	80
40	85
46	90
54	95
66	100

Fuente: Still & Thomas, 2002

3.2.2.2.1.3 Pendiente

Los estudios realizados por Still & Thomas (2002) muestran que la pendiente de las canaletas para los sistemas de captación de agua de lluvia debe ser de 0.5% para los primeros 2/3 de la longitud de la canaleta y 1% para el 1/3 restante (Tabla 13).

²² Supone que la canaleta es diseñada con las recomendaciones descritas: i) sección transversal, y ii) pendiente.

Tabla 13 Desempeño de las canaletas para distintas pendientes

Configuración	Descripción	Pendiente			Desempeño %
		Primeros 2/3	Restante 1/3	Media	
C1	Dual/baja	0.25	0.50	0.33	92
C2	Dual/media	0.50	1.00	0.66	97
C3	Dual/alta	1.00	2.00	1.33	85
C4	Constante/baja	0.50	0.50	0.50	92
C5	Constante/media	1.00	1.00	1.00	88
C6	Constante/alta	2.00	2.00	2.00	61

Fuente: Still & Thomas, 2002

3.2.2.2.2 Bajante

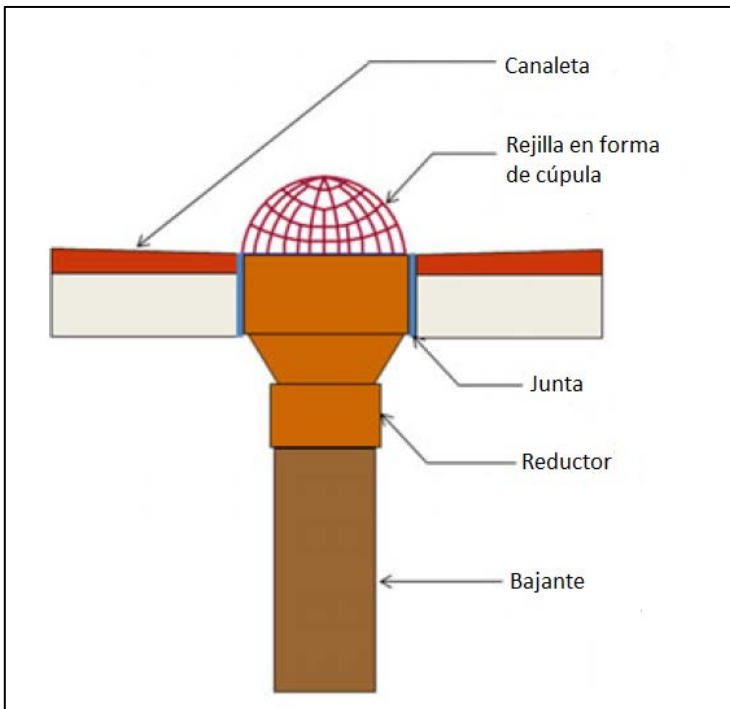
3.2.2.2.2.1 Función

Las bajantes son tuberías que dirigen el agua de lluvia desde el techo o cualquier otra superficie elevada hasta una superficie de nivel inferior o al suelo. En el caso del sistema doméstico de captación de agua de lluvia en cuestión, las bajantes conducen el agua de lluvia desde las canaletas hasta el tanque de almacenamiento.

3.2.2.2.2.2 Rejilla

Las bajantes tienen una entrada en la parte superior que se mantiene cubierta por una rejilla; el otro extremo se mantiene abierto y está conectado al tanque de almacenamiento. La entrada debe estar provista de una rejilla en forma de cúpula (Figura 21) para evitar el paso de desechos de plantas, hojas, papeles y otros sólidos que permanecen en su mayoría suspendidos o flotantes. Por otro lado, el tamaño de la entrada de las bajantes debe ser mayor que el correspondiente a la tubería, de forma que exista una reducción de la sección transversal (Azizul, 2017).

Figura 21 Rejilla en forma de cúpula en la entrada de una bajante de agua de lluvia



Fuente: Azizul, 2017

3.2.2.2.3 Diámetro

El *Housing and Building Research Institute* señala que el tamaño y número de bajantes deben basarse en el área máxima proyectada del techo de acuerdo con la Tabla 14. Sin embargo, el diámetro mínimo de las bajantes es 50 mm.

Tabla 14 Diámetro de las bajantes para distintas áreas del techo

Diámetro ²³ de la bajante (mm)	Máximo proyectado	
	Área del techo (m ²)	Flujo de agua de lluvia (lpm)
50	202	87
65	367	155
75	598	253
100	1,287	544
125	2,336	986
150	3,790	1,602
200	8,180	3,450

Fuente: Housing and Building Research Institute

²³ El diámetro equivalente de la bajante de sección cuadrada será el diámetro del círculo que se puede inscribir dentro del área de la sección transversal. El diámetro equivalente de la bajante de sección rectangular será la dimensión corta. Sin embargo, la relación entre el ancho y la profundidad de la bajante de sección rectangular no debe exceder de 3:1 (Housing and Building Research Institute).

3.2.2.3 Prefiltración

3.2.2.3.1 Desviador de primer flujo

3.2.2.3.1.1 Objetivo

En general, el techo y otras superficies de captación de agua de lluvia están sujetos a la deposición de polvo, hojas, excremento de pájaro y otros desechos. Cuando llueve después de un largo período de sequía, los elementos acumulados se lavan de la superficie del techo haciendo que el agua de lluvia se ensucie y contamine. Después de que una cierta cantidad de lluvia ha caído sobre una superficie, la cantidad de suciedad suelta y desechos disminuye y el agua de lluvia que fluye después se asume que es de una calidad mucho mejor en comparación con el agua de lluvia generada inicialmente. Por lo tanto, en los sistemas de captación de agua de lluvia se debe colocar un dispositivo en la bajante de agua de lluvia para desviar el primer flujo (primeras aguas) de la superficie de captación (techo). La calidad del agua de lluvia captada de los techos generalmente mejora con el “enjuague” de las primeras aguas a medida que avanza el evento de lluvia (Azizul, 2017).

3.2.2.3.1.2 Funcionamiento

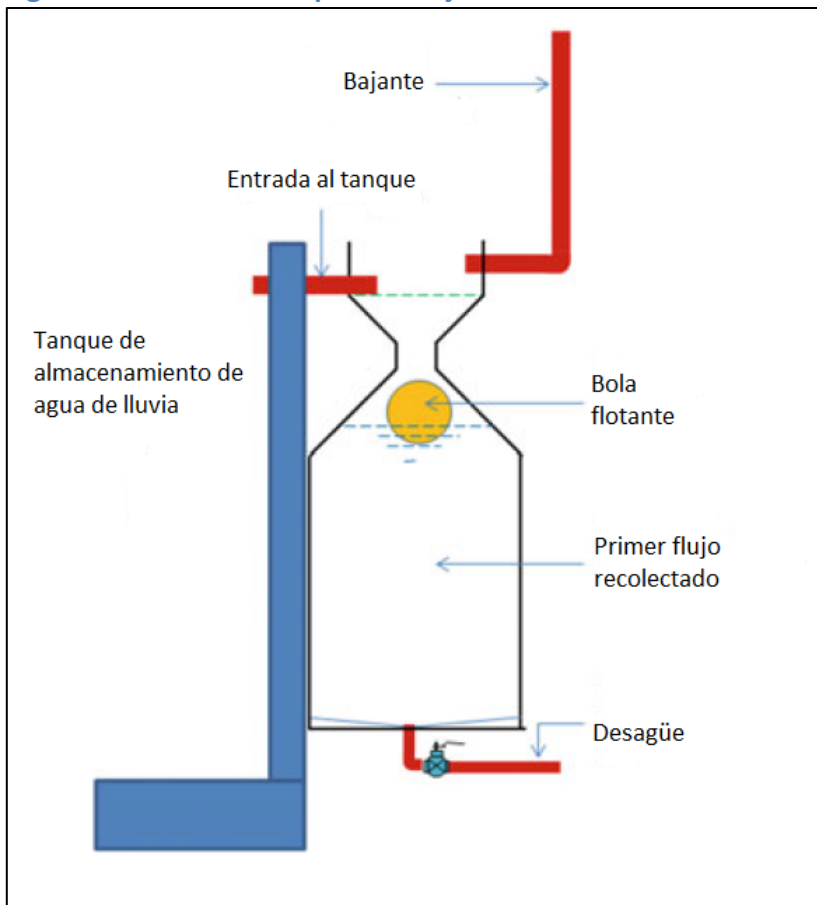
Los dispositivos adoptados para desviar la primera descarga de agua de lluvia se agrupan en dos: manual y automático. Dentro de cada grupo existen distintas variantes. Sin embargo, en el presente trabajo sólo se describen los principios básicos del desviador de primer flujo de bola flotante.

El desviador de primer flujo de bola flotante es un sistema automático. En este sistema las “primeras aguas” de lluvia que fluyen a través de la bajante se acumulan en un depósito de recolección que tiene en la parte superior una forma cónica (Figura 22). Cuando el depósito se llena de agua de lluvia la bola flota sobre el agua de lluvia recolectada. A medida que el nivel del agua de lluvia recolectada aumenta la bola también sube. Eventualmente la bola queda atascada en el paso de entrada entre la parte superior cónica y el depósito de recolección cerrando así el depósito de recolección. Cuando el paso del depósito de recolección está cerrado por la bola el agua de lluvia entrante se pasa a la salida de derivación que conduce al tanque de almacenamiento de agua de lluvia. El volumen del depósito de recolección debe ser lo suficientemente grande para almacenar el primer flujo de agua de lluvia que se desechará. El tamaño del depósito de recolección del desviador de primer flujo se basa en la cantidad deseada de escurrimiento a desviar (Azizul, 2017):

Ecuación 1

$$\begin{aligned} & \text{Volumen del desviador de primer flujo (l)} \\ & = \text{Altura a desviar (mm)} \times \text{Superficie de captación (m}^2\text{)} \end{aligned}$$

Figura 22 Desviador de primer flujo de bola flotante



Fuente: Azizul, 2017

3.2.2.3.1.3 Cantidad

Se requieren desviadores de primer flujo para cada bajante.

3.2.2.3.1.4 Volumen a desviar

Existe una amplia variación en las estimaciones debido a que no hay un cálculo exacto para determinar cuánta agua inicial necesita ser desviada ya que hay muchas variables que determinan la efectividad del lavado de los contaminantes de la superficie de captación, al igual que hay muchas variables que determinan la composición de los propios contaminantes. Por ejemplo, la pendiente y la suavidad de la superficie de captación, la intensidad de lluvia, el tiempo transcurrido entre los acontecimientos (que se suma a la cantidad de contaminantes acumulados) y la naturaleza de los contaminantes mismos aumentan la dificultad de determinar cuánta lluvia debe ser desviada.

3.2.2.3.1.4.1 Algunos ejemplos en la literatura

- La desviación recomendada del primer flujo oscila entre uno y dos galones de desviación por cada 100 pies cuadrados de área de captación (Texas Water Development Board, 2005).
- Cunliffe (1998) recomendó que el volumen mínimo de agua de primer flujo que debería desviarse para una casa australiana de tamaño promedio fuera de 20 a 25 litros (*citado en Zhu, Gould, Li, & Ma, 2015*).
- Según Thomas y Martinson, se recomienda desviar un máximo de 8.5 mm de las “primeras aguas” para pasar de un nivel de turbidez de 2,000 UTN a 5 UTN y un mínimo de 1 mm de las “primeras aguas” para pasar de 100 UTN a 50 UTN (*citado en Azizul, 2017*).

3.2.2.3.2 Filtro previo al almacenamiento

Conocida como filtración de entrada, el filtro previo al almacenamiento es el responsable de eliminar una serie de contaminantes del agua de lluvia antes del almacenamiento. Algunos en la industria consideran este dispositivo como el más importante en el sistema (Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014).

Algunos de los contaminantes típicos que afectan la calidad del agua de lluvia son los siguientes:

- Hojarasca, ramas y otros desechos de plantas.
- Excremento y carcasas de aves, roedores e insectos.
- Basura.
- Suciedad y polen.
- Partículas de la contaminación.
- Materiales degradantes del techo.

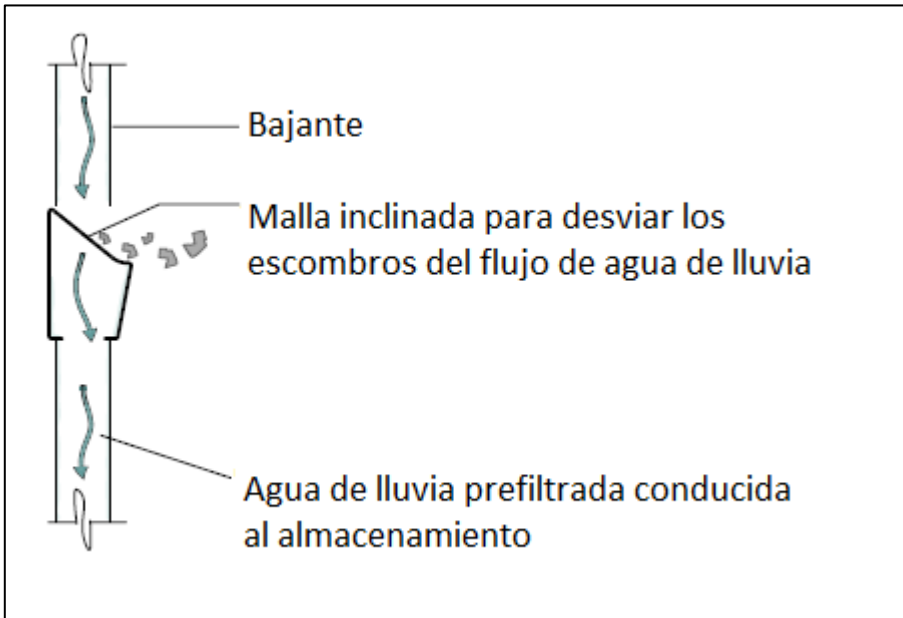
Al reducir la cantidad de contaminantes con una prefiltración eficaz es posible lograr un nivel más alto de calidad del agua en el tanque de almacenamiento.

Hoy en día existen muchos dispositivos de filtración previos al almacenamiento que tienen diferentes ubicaciones en el sistema, diferentes escalas y diferentes niveles de eficacia. Los principales tipos de dispositivos incluyen los siguientes: bajante, cesta, centrífugo y cascada (Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014).

3.2.2.3.2.1 Bajante

Los filtros de bajante están situados típicamente en las etapas más tempranas de la conducción y paralelos con la bajante; dichos filtros deben ubicarse en cada bajante. Muchos filtros de bajante están diseñados para ser instalados en ángulo para permitir que los residuos salgan automáticamente y no lleguen al sistema (véase Figura 23).

Figura 23 Filtro de bajante con malla inclinada, adaptada de Fred Smotherman



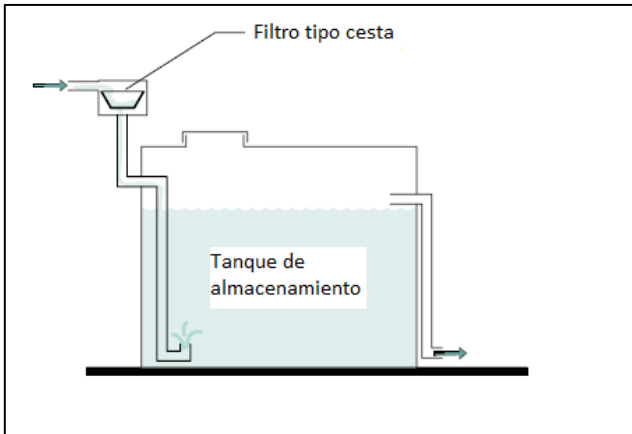
Fuente: *citado en* Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014

Si varias bajadas de agua conducirán el agua de lluvia hacia el almacenamiento, se necesitará un filtro de bajante para cada bajante o se pueden combinar varias bajantes en una sola tubería (Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014).

3.2.2.3.2.2 Cesta

Generalmente, el filtro tipo cesta se sitúa en la vía de acceso al tanque de almacenamiento y evita que los desechos, animales y vectores más grandes entren en el tanque. Si bien es cierto que el filtro tipo cesta es fácil de instalar y limpiar, a diferencia de muchos diseños de filtros de bajante, el filtro tipo cesta no tiene un mecanismo de autolimpieza. Por lo tanto, se puede obstruir fácilmente haciendo que el agua de entrada rebose la cesta y nunca llegue al tanque (Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014). En la Figura 24 es posible observar un ejemplo de este tipo de filtro.

Figura 24 Filtro tipo cesta, adaptada de Fred Smotherman

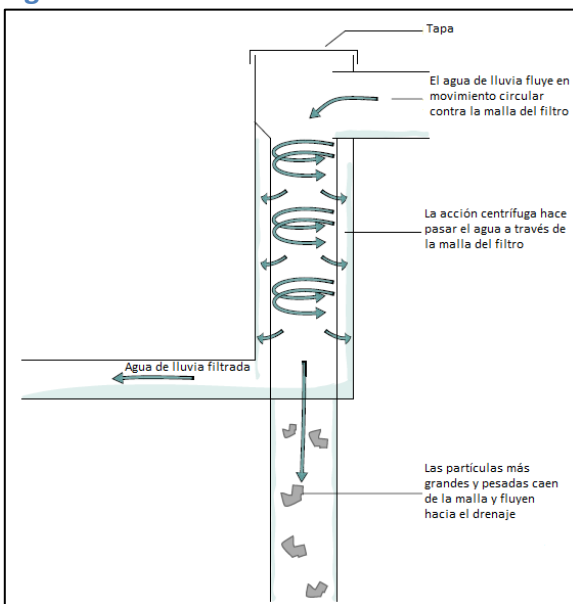


Fuente: citado en Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014

3.2.2.3.2.3 Centrifugo

Su funcionamiento se basa en el principio de que el agua es pasada a través de una malla por la acción de la fuerza centrífuga. Los escombros y la basura se dirigen hacia abajo y pasan a la trayectoria normal del drenaje (véase Figura 25); y, si bien es cierto que las mallas deben ser inspeccionadas regularmente, este tipo de filtro es mucho menos susceptible de obstrucción que los filtros tipo cesta (Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014).

Figura 25 Funcionamiento de un filtro centrifugo, adaptada de Fred Smotherman



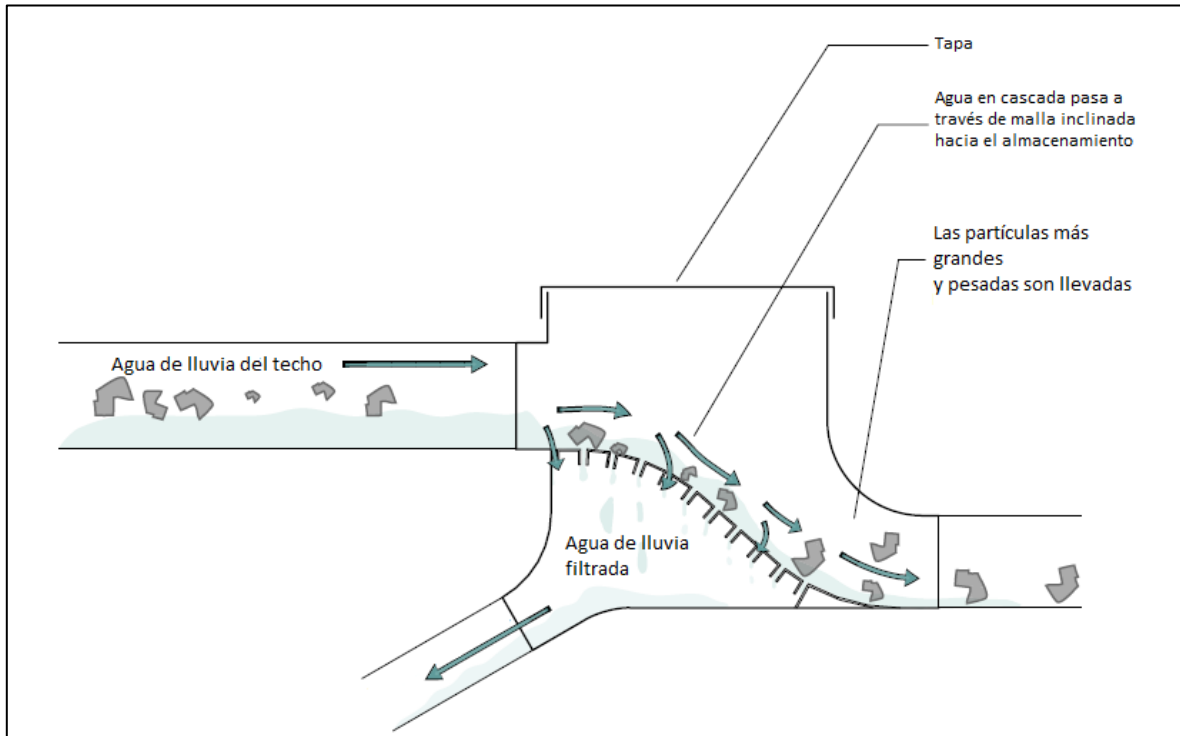
Fuente: citado en Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014

Estos filtros están disponibles en una amplia gama de tamaños y la calidad del agua resultante es muy alta; sin embargo, con este tipo de filtros para flujos pequeños no hay suficiente acción centrífuga para forzar el agua a través de la malla del filtro (Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014).

3.2.2.3.2.4 Cascada

Estos dispositivos permiten, por efecto de la fuerza de gravedad, pasar agua en cascada a través de una malla inclinada. Las partículas son llevadas más allá de la malla del filtro mientras que el agua de lluvia pasa a través de la malla y hacia el almacenamiento (véase Figura 26).

Figura 26 Funcionamiento de un filtro tipo cascada, adaptada de Fred Smotherman



Fuente: *citado en* Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014

Generalmente, estos filtros tienen un mecanismo de autolimpieza. Algunos de los dispositivos más sofisticados tienen la opción de agregar boquillas de inyección de agua que se pueden configurar para rociar agua sobre la malla para mantenerla limpia entre los eventos de lluvia. Esto es especialmente importante en las zonas que experimentan largos períodos entre los eventos de lluvia ya que las superficies pueden endurecerse con materia orgánica seca y sedimentos y, sin una limpieza regular, no permitirán que el agua pase por la malla (Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014).

3.2.2.4 Almacenamiento

Mientras que el tanque es el componente más grande del almacenamiento, hay numerosos componentes de soporte que son fundamentales para su funcionamiento (véase Figura 27).

3.2.2.4.1 Tanque

Los tanques de almacenamiento varían en tamaño y pueden estar sobre el suelo (superficiales), debajo del suelo (subterráneos), fuera o dentro de la casa o edificio (Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014).

3.2.2.4.1.1 Color

Los tanques de almacenamiento deben ser opacos para inhibir el crecimiento de algas.

3.2.2.4.1.2 Localización

Los tanques deben estar situados lo más cerca posible de los puntos de suministro y demanda como sea posible para reducir la distancia de conducción del agua. Asimismo, para reducir la carga de la bomba, los tanques deben colocarse lo más alto posible (Texas Water Development Board, 2005).

Si bien es cierto que no existe una regla de cálculo para elegir entre tanque subterráneo o superficial; en general, una vez que el volumen de almacenamiento excede los 10,000 galones o existen múltiples bajantes del techo en el sistema, el almacenamiento subterráneo es a menudo la opción más viable. Sin embargo, la colocación de tanques subterráneos incrementa los costos de instalación y puede ser limitada en áreas donde el suelo es especialmente rocoso o áreas con un nivel freático elevado (Cabell Brand Center, 2009).

3.2.2.4.1.3 Material

Los criterios de selección de los materiales del tanque de almacenamiento deben basarse en los siguientes tres aspectos: económico, durabilidad y posibilidad de contaminación del agua (Azizul, 2017):

3.2.2.4.1.3.1 Concreto reforzado o mampostería

Típicamente, los tanques con capacidades de almacenamiento superiores a 50,000 l están hechos de concreto reforzado. Por otro lado, los tanques con capacidades entre 15,000 y 50,000 l pueden fabricarse de ladrillo (mampostería). Ambos materiales permiten construir tanques de cualquier forma y tamaño; sin embargo, es difícil construir tanques de mampostería impermeables.

3.2.2.4.1.3.2 Ferrocemento

El ferrocemento es un material de construcción compuesto que a diferencia del concreto reforzado, utiliza malla en vez de varilla. Los tanques de ferrocemento se pueden encontrar preensamblados y también en partes para su montaje en sitio.

Si la lluvia es ácida y contiene muy pocas sales minerales, el agua de lluvia almacenada en un tanque de concreto reforzado, mampostería o ferrocemento se vuelve neutra o levemente alcalina (pH entre 7.5 y 8.5).

3.2.2.4.1.3.3 Acero galvanizado

Estos tanques están fabricados con placas de acero galvanizado (calibre 16-18) y su capacidad máxima es de 1,800 l. También existen en el mercado tanques de placas de acero galvanizado corrugado. Con este tipo de placa (calibre 20) es posible construir tanques de hasta 300,000 l de capacidad. Este tipo de tanques tiene las siguientes características: resistencia al fuego, calidad inalterada de agua almacenada y durabilidad.

3.2.2.4.1.3.4 Acero inoxidable

Estos tanques están hechos de placas de acero inoxidable con espesores que varían de 0.6 a 3 mm, dependiendo del tamaño que va de 200 l a 1,000,000 l. Dichos tanques son duraderos, altamente resistentes a la corrosión y casi libres de mantenimiento; sin embargo, son más costosos.

3.2.2.4.1.3.5 Plástico

Estos tanques están hechos de plástico reforzado con fibra de vidrio, polietileno de alta densidad u otros materiales plásticos. Los tanques son relativamente ligeros, fáciles de transportar y fáciles de instalar; sin embargo, no son duraderos debido al deterioro de la calidad del plástico por efecto de los rayos del sol.

El tanque de plástico más grande hasta ahora fabricado tiene una capacidad de 45,000 l. Todos los tanques de plástico utilizados para almacenar agua de lluvia para ser utilizados para fines potables deben estar hechos de plástico de calidad alimentaria.

3.2.2.4.1.4 Tamaño

El tamaño del tanque de almacenamiento está determinado por varias variables: el suministro de agua de lluvia (precipitación local), la demanda, la duración proyectada de períodos secos (sin lluvia), la superficie de captación y el presupuesto (Texas Water Development Board, 2005).

3.2.2.4.2 Entrada de agua de lluvia desde la conducción

- Puede entrar en el tanque desde la parte superior, lateral o inferior.

3.2.2.4.3 Tranquilizador

- Minimiza la alteración del sedimento en el fondo del tanque mediante la reducción de la agitación del agua entrante.

3.2.2.4.4 Admisión (extractor)

- Proporciona la extracción de agua desde una ubicación debajo de la superficie del agua. Generalmente, existe una mayor calidad del agua por debajo de la superficie del agua y por encima del fondo del tanque. Una toma flotante con malla reduce el vórtice y la introducción de aire en el sistema de bombeo.

3.2.2.4.5 Distribución

- Las bombas sumergibles típicamente son usadas en tanques subterráneos.
- Las bombas de succión inundada son preferidas en tanques sobre el suelo.

3.2.2.4.6 Indicador de nivel de agua

- Dispositivo para monitorear el nivel de agua en el tanque y comunicarse con los componentes del sistema de distribución.
- Los tipos incluyen flotante o electrónico.

3.2.2.4.7 Rebosadero

- El exceso de agua fluye fuera del tanque hacia el sistema de alcantarillado de aguas pluviales, dispositivos de control de aguas pluviales u otra ruta apropiada por requisitos locales.
- El rebosadero debe tener al menos el mismo diámetro que el tubo de entrada al tanque para evitar que el agua regrese al tubo de recolección de las bajantes y a las propias bajantes.

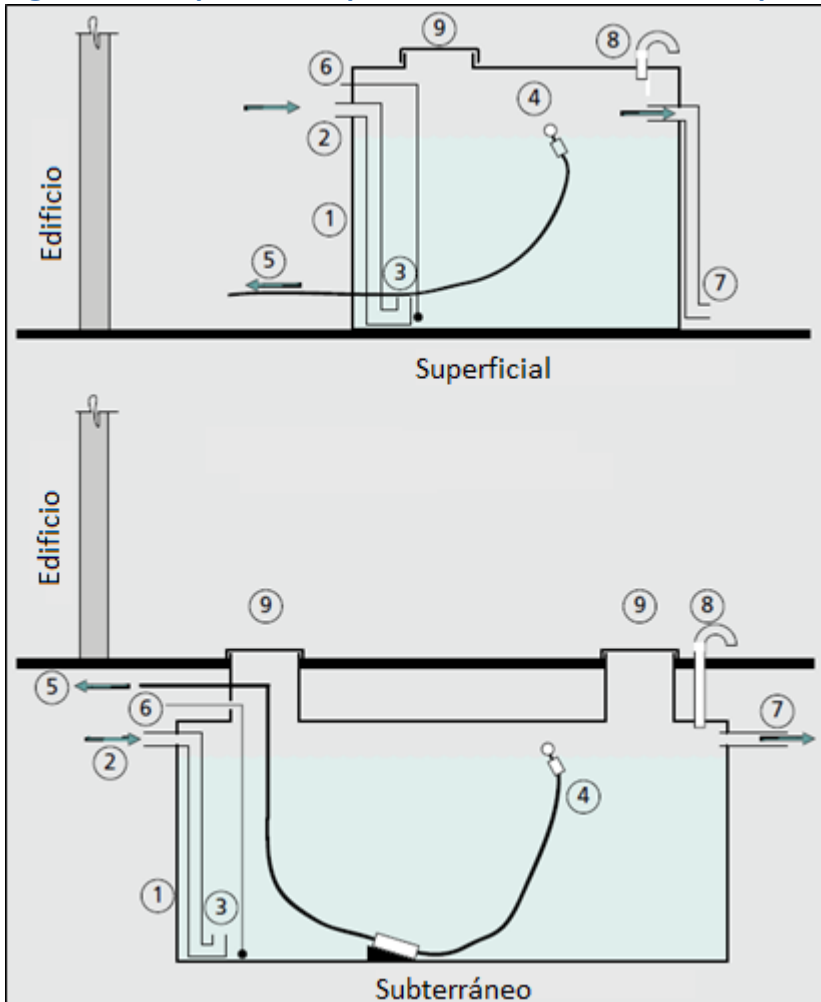
3.2.2.4.8 Ventila

- Proporciona ventilación para el agua almacenada y alivio de presión del agua entrante.

3.2.2.4.9 Acceso al tanque

- Debe estar asegurado para evitar el acceso de personal no autorizado.
- El acceso a los tanques subterráneos debe estar mínimo 4 pulgadas por encima de la rasante de los alrededores.

Figura 27 Componentes típicos del almacenamiento, adaptada de Fred Smotherman

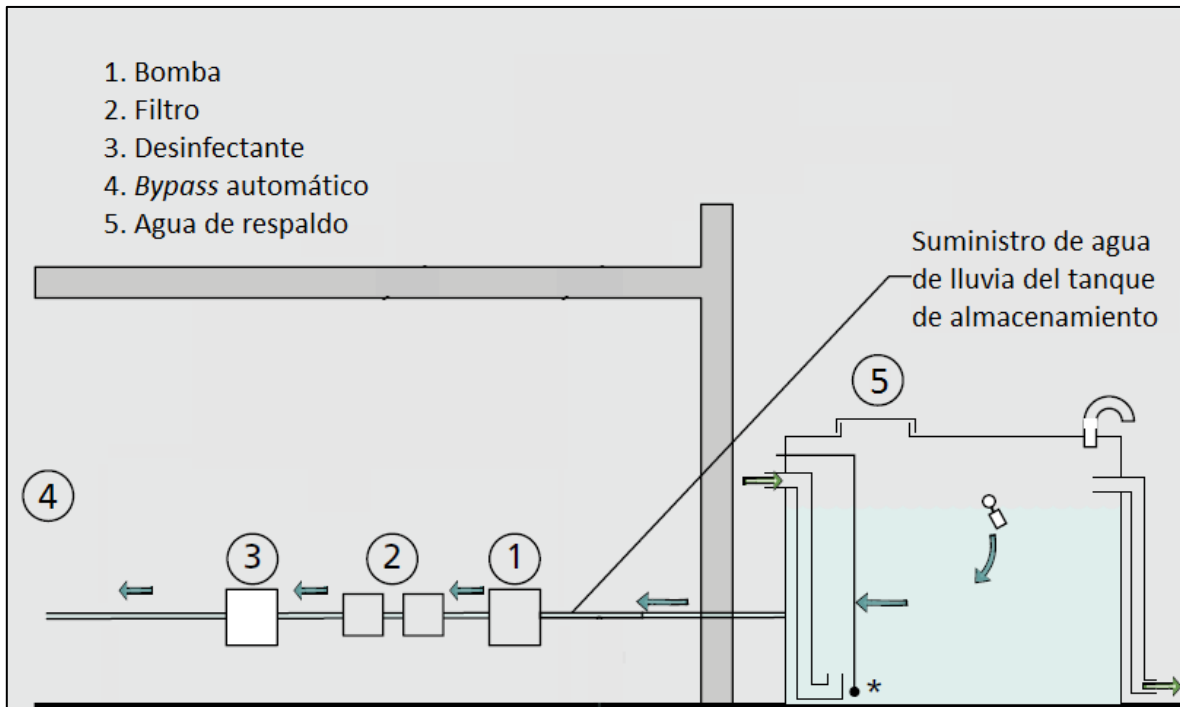


Fuente: citado en Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014

3.2.2.5 Distribución

La distribución es el elemento responsable de suministrar el agua con la calidad y presión adecuadas; la Figura 28 muestra sus componentes típicos.

Figura 28 Componentes típicos de la distribución, adaptada de Fred Smotherman



Fuente: citado en Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014

3.2.2.5.1 Bomba

La bomba proporciona presurización en el lado aguas abajo del almacenamiento. Para los tanques subterráneos se recomienda una bomba sumergible en el tanque, para tanques superficiales se recomienda una bomba de succión inundada ubicada fuera del tanque (Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014).

3.2.2.5.1.1 Filtro flotante

Para extraer el agua del tanque es recomendable colocar un filtro flotante en el extremo de la manguera de succión de la bomba (véase Figura 29). De acuerdo con estudios de Gumbs y Coombes, los sedimentos, bacterias y otros contaminantes generalmente se depositan en el fondo del tanque, con concentraciones de contaminantes más altas en el fondo del tanque que en la superficie del agua. Los estudios también han demostrado que los niveles de bacterias pueden ser más altos en la superficie del agua del tanque que en otras partes del tanque. Para evitar estas dos áreas, el filtro flotante toma agua del tanque a unas pocas pulgadas por debajo de la superficie del agua (citado en Cabell Brand Center, 2009).

Figura 29 Bomba sumergible con filtro flotante integrado, adaptada de *Rainwater Management Solutions*



Fuente: *citado en Cabell Brand Center, 2009*

3.2.2.5.1.2 Presurización aguas abajo del tanque de almacenamiento

Al igual que el sistema general de distribución de agua potable en una casa o edificio, el agua de lluvia también puede ser distribuida siguiendo los mismos principios hidráulicos. Es así que el sistema de distribución de agua de lluvia potabilizada puede funcionar por gravedad o a presión (Azizul, 2017).

3.2.2.5.1.2.1 Tinaco (por gravedad)

En este sistema el agua de lluvia almacenada en el tanque de almacenamiento es bombeada a otro tanque (tinaco) colocado en el nivel más alto del techo de la casa o edificio. Desde el techo de la azotea el agua es suministrada por gravedad a través de la red de tuberías.

3.2.2.5.1.2.2 Tanque de presión (a presión)

En un sistema bomba–tanque de presión el agua es i) extraída del tanque de almacenamiento, ii) presurizada, y iii) almacenada en un tanque de presión hasta que es requerida. La configuración típica de un sistema bomba–tanque de presión consta de una bomba de $\frac{3}{4}$ o 1 hp, generalmente una bomba de chorro (pozo poco profundo) o una bomba centrífuga (varias etapas), una válvula de retención y un interruptor de presión. La válvula de retención unidireccional entre el tanque de almacenamiento y la bomba evita que el agua presurizada regrese al tanque. El interruptor de presión regula el funcionamiento del tanque de presión. El tanque de presión, con una capacidad típica de 40 gal, mantiene la presión en todo el sistema. Cuando el tanque de presión alcanza un nivel preestablecido el interruptor de presión corta la energía a la bomba. Cuando hay demanda, el interruptor de presión detecta la caída de presión en el tanque y activa la bomba, extrayendo más agua para el tanque de presión (Texas Water Development Board, 2005).

Un sistema bomba–tanque requiere de i) un sistema de control sofisticado, y ii) personal calificado para la operación.

3.2.2.5.1.2.2.1 Control

Las múltiples relaciones entre los distintos componentes presurizados posteriores al almacenamiento deben ser manejadas en un sistema operativo de agua de lluvia. Los sistemas más simples pueden emplear una estación de control que sólo tiene interruptores de presión de encendido/apagado, arrancadores de motor e interruptores de flotado (Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014).

3.2.2.5.1.2.3 Sin tanque de presión (a presión)

Existen en el mercado bombas bajo demanda las cuales eliminan la necesidad del tanque de presión. Estas bombas combinan bomba, motor, controlador, válvula de retención y la función del tanque de presión en una sola unidad. Dichas bombas son autocebantes y tienen una válvula de retención incorporada en el orificio de succión. La Figura 30 muestra una configuración de una bomba bajo demanda, filtro de 5 micras, filtro de carbón activado de 3 micras y una lámpara ultravioleta. A diferencia de las bombas convencionales, las bombas bajo demanda están diseñadas para activarse en respuesta a una demanda, eliminando la necesidad del tanque de presión.

Figura 30 Configuración de tratamiento (sin tanque de presión) de una bomba bajo demanda, filtro de 5 micras, filtro de carbón activado de 3 micras y lámpara ultravioleta



Fuente: Texas Water Development Board, 2005

3.2.2.5.2 Filtro

Los principales tipos de filtros, posteriores al almacenamiento, utilizados en sistemas domésticos de captación de agua de lluvia para consumo humano son filtros de malla fina, bolsas filtrantes, cartuchos filtrantes y filtros de membrana. El propósito es eliminar las partículas en el agua incluyendo sedimentos, arcillas, partículas orgánicas, microorganismos y diversos compuestos que pueden haberse formado durante el almacenamiento (Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014).

Es importante eliminar estos contaminantes debido a sus posibles efectos negativos para la salud y/o los equipos y materiales en el sistema. También es importante eliminar las partículas para que no oculten a los microorganismos que son objeto de la desinfección UV ya que es necesaria la exposición completa a la luz UV para desinfectar el agua almacenada (Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014). La *Environmental Protection Agency* (EPA) recomienda colocar dos filtros antes de la desinfección: un filtro de sedimentos de mínimo 3 micras en serie con un filtro de carbón activado de mínimo 3 micras (Kloss, 2008).

3.2.2.5.2.1 Sedimentos

La filtración de sedimentos elimina partículas finas que pueden transportar contaminantes y disminuir la efectividad de la desinfección. De acuerdo con los lineamientos emitidos por la EPA para la captación de agua de lluvia para usos potables los filtros de sedimentos deben ser de 3 micras o más pequeños (Kloss, 2008).

3.2.2.5.2.2 Carbón activado

El carbón activado es eficaz en la eliminación de compuestos orgánicos tales como plaguicidas y algunos hidrocarburos. El filtro atrapa mecánicamente partículas microscópicas mientras que las moléculas orgánicas más pequeñas son absorbidas por la superficie activada (Texas Water Development Board, 2005). El carbón activado también mejora frecuentemente la calidad estética del agua (olor y sabor). De acuerdo con los lineamientos emitidos por la EPA para la captación de agua de lluvia para usos potables, todos los sistemas deben incluir un filtro de carbón activado de 3 micras o menos posterior al filtro de sedimentos (Kloss, 2008).

3.2.2.5.3 Desinfectante

La desinfección se logra principalmente mediante los siguientes métodos:

3.2.2.5.3.1 Físico

3.2.2.5.3.1.1 Luz ultravioleta

El agua fluye en una cámara sellada que contiene bombillas UV. La luz UV desinfecta el agua mediante la aplicación de una cierta intensidad de luz durante un período de tiempo (Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014).

De acuerdo con la *National Drinking Water Clearinghouse*, la dosis apropiada de luz ultravioleta para la desinfección del agua de lluvia captada es de 40,000 uw-s/cm² (citado en Cabell Brand Center, 2009).

3.2.2.5.3.2 Químico

3.2.2.5.3.2.1 Cloro

El cloro es introducido en el agua y mata a los microorganismos. El agua mantiene una cantidad residual del producto químico que ayuda a mantener la calidad del agua en el sistema de distribución (Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014).

Existen en el mercado sistemas de dosificación automática en los cuales una bomba de cloro inyecta el químico en el agua cuando esta ingresa en la casa o edificio. En este sistema el tiempo de contacto apropiado es crítico para matar las bacterias. Usualmente el tiempo de contacto con el cloro es de 2 a 5 minutos con cloro residual libre de 2 ppm (Texas Water Development Board, 2005).

3.2.2.5.3.2.2 Ozono

Químicamente el ozono es O₃; una forma más reactiva de oxígeno molecular formada por tres átomos de oxígeno. El ozono actúa como un poderoso agente oxidante para reducir el color, eliminar los malos olores y reducir el carbono orgánico total en el agua (Texas Water Development Board, 2005).

Si bien es cierto que el ozono es extremadamente activo como desinfectante y mata una mayor variedad de organismos que el cloro, algunas de sus desventajas son que debe generarse antes de ser usado, sus costos de operación pueden ser bastante altos y es venenoso por lo que se requiere de ventilación adecuada (Azizul, 2017).

3.2.2.5.4 Bypass automático

El suministro de agua de respaldo puede ser activado por una variedad de medios. Generalmente si el nivel de agua en el tanque de almacenamiento de agua de lluvia llega a ser bajo, se activará un interruptor de flotador que desconectará la bomba correspondiente al agua de lluvia y activarán una válvula que permita que fluya agua de la fuente de reserva (Cabell Brand Center, 2009). Existen varios métodos que se pueden utilizar para lograr este objetivo. Las válvulas de solenoide, las válvulas de tres vías y las válvulas de presión (no controladas eléctricamente) son ejemplos de cómo se lleva a cabo (Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014).

3.2.2.5.5 Agua de respaldo

Cuando se utilizan tanto el agua de lluvia como el suministro de agua potable municipal, puede haber momentos en que se agoten los suministros de agua de lluvia; por lo tanto, el agua potable municipal puede considerarse como una reserva para las necesidades de agua potable.

Hay dos maneras de suministrar agua de respaldo al sistema de captación de agua de lluvia: el agua de respaldo del municipio es llevada al tanque de almacenamiento principal o al tinaco. En cualquiera de los casos, el suministro de agua de respaldo (potable) está protegido a través de un “espacio de aire”. El “espacio de aire” evita que el agua en el tanque regrese de nuevo (efecto de sifón) al suministro de agua potable municipal en una posible situación de desbordamiento del tanque. Esto se debe a que el rebosadero en el tanque está por debajo de la tubería que suministra el agua de respaldo al sistema (Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014). El “espacio de aire” debe ser equivalente a 3 veces el diámetro del tubo de suministro de agua municipal (Cabell Brand Center, 2009).

4 Modelos aplicados a sistemas domésticos de captación de agua de lluvia: dimensionamiento y simulación de la operación del tanque de almacenamiento

4.1 Modelos

Los modelos pueden ser una herramienta valiosa para los diseñadores, permitiéndoles determinar las características óptimas de diseño de un sistema de captación de agua de lluvia. El uso de un modelo puede resultar en mejoras significativas en la eficiencia hidrológica y económica de un sistema cuando se compara con los enfoques menos rigurosos de dimensionamiento; por ejemplo, reglas generales. Existen numerosos modelos e indicadores que combinados proporcionan a los diseñadores incontables métodos para evaluar el rendimiento del sistema. Para cada combinación de área de captación, volumen de almacenamiento, demanda de agua, etc., existen numerosas soluciones óptimas de diseño (Imteaz *et al.*, 2011a); sin embargo, el uso de varios modelos puede ayudar a los diseñadores a elegir la solución que mejor cumpla con las metas y objetivos generales del sistema; por ejemplo, ahorro de agua potable, reducción de escurrimiento de aguas pluviales o suministro de agua de reserva durante periodos de escasez (*citado en* DeBusk & Hunt, 2012).

4.1.1 Justificación

Generalmente, el almacenamiento es la parte más cara del sistema de captación de agua de lluvia. Por lo tanto, el dimensionamiento del tanque de almacenamiento debe ser realizado cuidadosamente para evitar gastos innecesarios (Azizul, 2017).

Asimismo, debido a las dificultades y costos asociados con el monitoreo de los sistemas de captación de agua de lluvia, con frecuencia se utilizan modelos para simular el

comportamiento, evaluar los beneficios asociados y. determinar la viabilidad del sistema (DeBusk & Hunt, 2012).

4.1.2 Nociones básicas

4.1.2.1 Variables de entrada

4.1.2.1.1 Coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento (C) para cualquier superficie de captación es la relación entre el volumen de agua escurrida por la superficie de captación y el volumen de precipitación que cae sobre dicha superficie (Zhu, Gould, Li, & Ma, 2015).

Ecuación 2

$$C = \frac{\text{Volumen escurrido}}{\text{Volumen de agua de lluvia}}$$

La Tabla 15 muestra los coeficientes de escurrimiento para distintos materiales utilizados en la construcción de techos de casas y edificios.

Tabla 15 Coeficiente de escurrimiento por tipo de material

Material	Coeficiente de escurrimiento
Cubiertas metálicas o plásticas (PVC, polietileno)	0.95
Techos impermeabilizados o cubiertos con materiales duros (p. ej., tejas)	0.90
Concreto hidráulico	0.90
Lámina metálica corrugada	0.80

Fuente: SEMARNAT, CONAGUA, 2016

Todos los cálculos relacionados con el rendimiento de los sistemas de captación de agua de lluvia implican el uso del coeficiente de escurrimiento para tomar en cuenta las pérdidas ocasionadas por derrames, fugas, infiltración, absorción por parte de la superficie de captación y evaporación, que contribuirán a reducir la cantidad de agua de lluvia que realmente entra en el tanque de almacenamiento. Sin embargo, el coeficiente de escurrimiento del sistema en el largo plazo probablemente será menor debido a pérdidas ocasionales (sustanciales) derivadas de los desbordamientos de las canaletas durante tormentas torrenciales o bloqueos temporales por escombros tales como hojas. Por esta razón, Zhu, Gould, Li, & Ma (2015) consideran apropiado utilizar un coeficiente de escurrimiento de 0.8 como estándar en el diseño de sistemas de captación con el techo como superficie de captación.

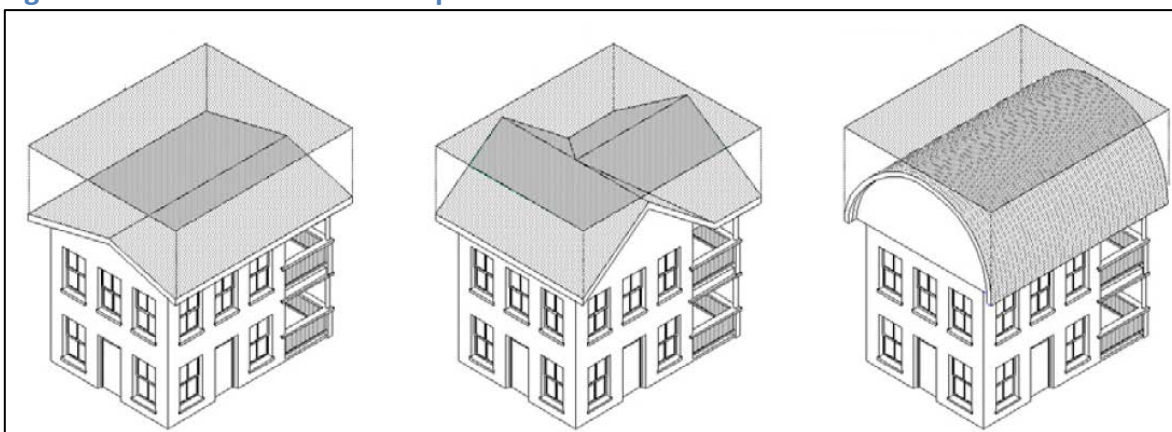
4.1.2.1.2 Precipitación histórica

Para determinar el suministro de agua de lluvia potencial para una superficie de captación determinada se requieren datos confiables de precipitación durante un período de al menos 10 años. En climas propensos a la sequía es preferible un historial de precipitaciones más largo y una serie de 20 años es recomendable; sin embargo, una serie de datos pluviométricos más larga puede dar una imagen falsa de las condiciones actuales de lluvia si se han producido cambios climáticos regionales (Zhu, Gould, Li, & Ma, 2015).

4.1.2.1.3 Huella del área de captación

La fórmula, presentada más adelante, para el cálculo del suministro de agua de lluvia potencial para un área de captación determinada utiliza el área total de la “huella” del techo utilizada para captar el agua de lluvia independientemente de la pendiente del techo (véase Figura 31). Los techos más inclinados arrojarán agua a velocidades más altas y como resultado un poco del agua podría salir de las canaletas y nunca llegar al tanque de almacenamiento. En consecuencia, es posible utilizar un coeficiente de escurrimiento que tome en cuenta, además del material del techo, estas y otras pérdidas (Novak, Van Giesen, & DeBusk, 2014).

Figura 31 “Huella” del área de captación de tres techos distintos



Fuente: Texas Water Development Board, 2005

4.1.2.2 Cálculo del suministro de agua de lluvia potencial para un área de captación determinada

La cantidad del suministro de agua de lluvia depende de la cantidad de lluvia, el área de la superficie de captación y su coeficiente de escurrimiento. Para un techo inclinado, es el área del plano horizontal la que debe tomarse. El coeficiente de escurrimiento toma en cuenta las pérdidas debidas a fugas, evaporación y desbordamiento y se toma normalmente como 0.8 para un sistema de captación con techo. La lluvia es la variable más impredecible en el cálculo ya que en muchas áreas hay una variación considerable de un año a otro. Es posible obtener una estimación aproximada del escurrimiento medio anual de un área de captación determinada utilizando la Ecuación 3 (Zhu, Gould, Li, & Ma, 2015).

Ecuación 3

$$S = R * A * C$$

Donde:

S = Suministro medio anual de agua de lluvia (m³)

R = Precipitación media anual (m/año)

A = Área de captación (m²)

C = Coeficiente de escurrimiento

Ejemplo 1

$$S = 0.7 \text{ (m/año)} * 75 \text{ (m}^2\text{)} * 0.8$$

$$S = 42 \text{ (m}^3\text{/año)} = 42,000 \text{ (l/año)}$$

4.1.3 Enfoques

Existen numerosos enfoques para modelar sistemas de captación de agua de lluvia, aunque los más utilizados incluyen modelos de comportamiento/simulación, métodos estadísticos y/o teorías de probabilidad (Zhu, Gould, Li, & Ma, 2015).

4.1.3.1 Modelos de comportamiento/simulación

Los modelos de comportamiento "simulan la operación del tanque de almacenamiento con respecto al tiempo mediante el enrutamiento de flujos de masa simulados a través de un algoritmo que describe el funcionamiento del tanque" (Fewkes y Warm, 2000). Este tipo de modelo imita el comportamiento físico del sistema, lo que lo convierte en uno de los enfoques de modelado más fáciles de comprender (Fewkes y Butler 2000; Palla *et al.* 2011). Usualmente, los modelos de comportamiento son utilizados con datos históricos de precipitación para producir simulaciones continuas de balance de masas (Palla *et al.* 2011; Basinger *et al.* 2010). Aunque este enfoque puede requerir una gran cantidad de datos y cálculos, es uno de los enfoques de modelado más exactos para sistemas de captación de agua de lluvia (Kim *et al.*, 2012). De acuerdo con Basinger *et al.*, (2010) para obtener la máxima exactitud, el registro histórico de precipitaciones utilizado debe ser al menos tan extenso como la expectativa de vida del sistema y la cantidad de datos faltantes debe ser mínima (*citado en* DeBusk & Hunt, 2012).

Los modelos que simulan el comportamiento hidrológico de los sistemas de captación de agua de lluvia deben utilizar un método para estimar el llenado, desbordamiento y extracción de agua del tanque de almacenamiento. En condiciones naturales estas actividades pueden ocurrir simultáneamente; sin embargo, es imposible reflejar dichas actividades con precisión en un entorno de modelado (Mitchell *et al.*, 2008). Para ello, usualmente se utilizan dos métodos de estimación: i) rendimiento antes del

desbordamiento (*YBS*, por sus siglas en inglés, *yield before spillage*) y, ii) rendimiento después del desbordamiento (*YAS*, por sus siglas en inglés, *yield after spillage*). En el escenario de *YBS*, se extrae agua del tanque (debido a la demanda) después de que se agrega la precipitación y antes de que se determine el volumen de desbordamiento (Islam *et al.*, 2010b; Liaw y Tsai 2004). Por el contrario, en el escenario de *YAS* la demanda se extrae del tanque de almacenamiento después de calcular el volumen de desbordamiento (Islam *et al.*, 2010b; Liaw Tsai 2004). Cuando Islam *et al.* (2010b) compararon estos dos métodos de estimación para un sistema de captación de agua de lluvia dado, determinaron que el método *YAS* tiende a producir estimaciones más bajas para la cantidad de agua de lluvia utilizada y la confiabilidad volumétrica (es decir, es más conservador) que el método *YBS*, que tiende a sobreestimar estos valores. Palla *et al.* (2012) también encontraron que el método *YAS* produjo resultados conservadores para las variables de rendimiento del sistema y fue menos sensible a los cambios en los volúmenes de almacenamiento. Mitchell (2007) recomienda calcular el promedio de los resultados de las simulaciones *YAS* y *YBS* para mejorar la exactitud, aunque la mayoría de los modelos usan uno u otro (*citado en* DeBusk & Hunt, 2012).

4.1.3.2 Métodos estadísticos y/o teorías de probabilidad

Algunos modelos se basan en una distribución de probabilidad para predecir variables dependientes dentro del sistema, como el desbordamiento o el volumen de almacenamiento. La distribución de probabilidad seleccionada se basa en las relaciones hidrológicas entre las funciones de distribución meteorológica y las variables dentro del sistema (Kim *et al.*, 2012). La aplicación de estos modelos puede ser bastante limitada ya que las características de precipitación de un lugar determinado deben coincidir con los supuestos estadísticos de la distribución del modelo para asegurar resultados precisos (Basinger *et al.*, 2010). Kim *et al.*, (2012) señalan que si bien estos modelos pueden ser útiles para los análisis preliminares de diseño y la estimación de la sensibilidad de los parámetros, carecen del nivel de detalle proporcionado por los modelos de simulación de balance de masa continuos (*citado en* DeBusk & Hunt, 2012).

4.1.4 Indicadores

Generalmente, los modelos de sistemas de captación de agua de lluvia se usan durante el proceso de diseño para determinar el volumen óptimo de almacenamiento de un sistema dadas las condiciones locales de lluvia y las demandas de agua. Los indicadores de desempeño (operativos) se usan típicamente para evaluar el rendimiento relativo de los sistemas con parámetros de diseño variables (DeBusk & Hunt, 2012).

4.1.4.1 Dimensionamiento

Varios estudios han desarrollado criterios para determinar el volumen de almacenamiento óptimo para los sistemas de captación de agua de lluvia. Ghisi (2010) definió el volumen óptimo del tanque de almacenamiento como el volumen para el cual un aumento de

1,000 l resulta en menos de un aumento del 2% en el ahorro potencial de agua. Imteaz *et al.* (2011b) identificó el volumen de almacenamiento óptimo como aquel para el cual el volumen de desbordamiento acumulado se aproxima a cero y/o el ahorro acumulado de agua se aproxima a un valor constante. Una tercera definición fue aportada por Su *et al.* (2009) que indicó que un diseño óptimo debería equilibrar la confiabilidad volumétrica y el costo del sistema (*citado en* DeBusk & Hunt, 2012).

4.1.4.2 Operativos

La Tabla 16 resume los indicadores operativos²⁴ utilizados para describir el comportamiento de los sistemas de captación de agua de lluvia. Ejemplos de estos indicadores incluyen confiabilidad (relativa al tiempo y volumétrica), reducción de escurrimiento causado por lluvias, periodo de retorno, volumen de desbordamiento anual, eficiencia de uso de agua de lluvia, frecuencia de tanque de almacenamiento seco y probabilidad de falla (Palla *et al.* 2011; Basinger *et al.* 2010; Mitchell *et al.* 2008; Briggs and Reidy 2010; Ghisi 2010; Jones and Hunt 2010; Su *et al.* 2009; Kim and Yoo 2009; Zhang *et al.* 2010b; Zhang *et al.* 2009b; Ghisi *et al.* 2007a; Imteaz *et al.* 2012; Fewkes and Warm 2000; Farreny *et al.* 2011b; Fewkes and Butler 2000; Guo and Beatz 2007; Gires and de Gouvello 2009; Imteaz *et al.* 2011a; Liaw and Tsai 2004; Lee *et al.* 2000; Mun and Han 2011; Palla *et al.* 2012) (*citado en* DeBusk & Hunt, 2012).

Tabla 16 Resumen de los indicadores operativos utilizados para describir el funcionamiento de los sistemas de captación de agua de lluvia

Referencia	Indicador operativo
Basinger <i>et al.</i> , 2010	<p>Confiabilidad relativa al tiempo:</p> $1 - \frac{\text{no. de pasos de tiempo en que la demanda excede el almacenamiento}}{\text{no. de pasos de tiempo en el periodo de evaluación}}$ <p>Confiabilidad volumétrica:</p> $\frac{\text{volumen de agua de lluvia suministrado}}{\text{demanda total durante el período de evaluación}}$
Briggs and Reidy, 2010	<p>Reducción de escurrimiento causado por lluvias:</p> $\frac{\text{volumen de agua de lluvia captado}}{\text{precipitación total}} \times 100\%$

²⁴ Múltiples modelos pueden utilizar el mismo término para describir un indicador dado pero calcularlo de maneras diferentes; por lo tanto, al comparar el rendimiento de múltiples sistemas de captación de agua de lluvia es importante revisar que los indicadores estén definidos de la misma manera (DeBusk & Hunt, 2012).

Jones and Hunt, 2010	Periodo de retorno: No. de años de uso del sistema requerido para que el ahorro monetario sea igual al costo del sistema
Guo and Baetz, 2007	Volumen de desbordamiento anual: Volumen de agua que desborda del sistema durante un año
Mun and Han, 2011	Eficiencia de uso de agua de lluvia: $\frac{\text{volumen total de agua de lluvia usado para satisfacer la demanda}}{\text{volumen de agua de lluvia captada}}$
Jones and Hunt, 2010	Frecuencia de tanque de almacenamiento seco: $\frac{\text{días en que no se pudo satisfacer la demanda con agua de lluvia}}{\text{días en el periodo de evaluación}}$
Lee et al., 2010	Probabilidad de falla: $\frac{\text{tiempo en que el tanque está vacío}}{\text{tiempo en el periodo de evaluación}}$

Fuente: citado en DeBusk & Hunt, 2012

Estos indicadores pueden usarse para evaluar hasta qué punto un diseño cumple con los objetivos o para determinar qué modificaciones de diseño pueden implementarse para cumplir mejor con los objetivos. Dado que estos indicadores pueden variar entre los sistemas dependiendo del clima, los patrones de lluvia, las características de uso del agua, las características de diseño y los objetivos principales del usuario, no existen reglas que sugieran valores o rangos apropiados (DeBusk & Hunt, 2012).

4.1.5 Algunos modelos aplicados

4.1.5.1 De oferta

En áreas de baja precipitación o donde la lluvia tiene una distribución irregular, es necesario tomar las precauciones correspondientes para dimensionar el tanque de almacenamiento adecuadamente. Durante algunos meses del año puede haber un exceso de agua mientras que en el resto habrá un déficit. Si hay suficiente agua durante todo el año para satisfacer la demanda será necesario un tanque de almacenamiento suficientemente grande para poder suministrar en los períodos de escasez.

A continuación se presenta un ejemplo (hipotético) para una casa en el Valle de México. Los datos de precipitación corresponden a la RHA XIII (Aguas del Valle de México) para el

periodo 2004-2016 (13 años de muestra). Las cifras promedio de los datos pluviométricos se utilizaron para simplificar el cálculo.

Ejemplo 2

Demanda:

- Usuarios: 2 hab
- Consumo: 145 l/hab/día²⁵
- Demanda total: 2 hab * 145 l/hab/día = 290 l/día = 8,820.83 l/mes = 105.85 m³/año

Oferta:

En la Tabla 17 están los datos históricos de precipitación con los cuales fue calculado el promedio utilizado en el ejemplo.

Tabla 17 Precipitación pluvial mensual 2004–2016 en la RHA XIII Aguas del Valle de México

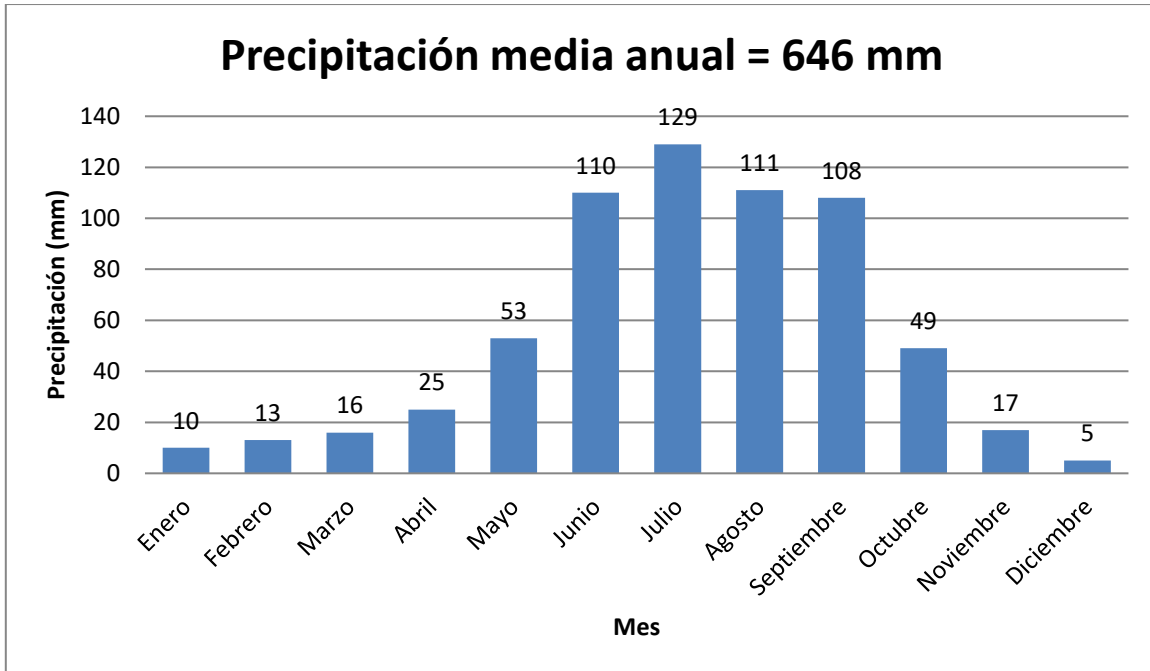
Año/mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
2004	21	1	29	42	77	160	116	110	120	61	11	3	750
2005	7	6	9	15	32	48	115	125	54	98	9	2	519
2006	5	2	22	37	93	71	123	157	120	66	36	4	734
2007	6	24	17	27	43	102	164	151	124	54	17	2	730
2008	2	4	2	26	31	96	129	116	88	29	2	0	525
2009	10	8	7	5	53	93	71	98	190	90	5	7	635
2010	40	70	1	25	23	55	198	90	73	6	1	0	582
2011	8	3	5	31	19	201	201	90	73	37	26	3	695
2012	10	39	16	17	25	103	139	118	65	9	10	0	552
2013	3	2	3	16	62	95	114	100	163	54	33	11	655
2014	3	1	13	21	72	167	104	89	111	81	11	13	686
2015	5	8	68	33	96	119	97	80	119	34	15	10	683
2016	6	2	18	33	71	124	112	117	98	20	42	6	650

Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua, 2016

La Figura 32 muestra la precipitación pluvial mensual promedio 2004–2016 en la RHA XIII Aguas del Valle de México elaborada con los resultados obtenidos de la Tabla 17.

²⁵ Promedio del consumo de agua potable estimado para i) clima templado o frío y ii) consumo alto (CONAGUA)

Figura 32 Precipitación pluvial mensual promedio 2004–2016 en la RHA XIII Aguas del Valle de México



Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua, 2016

Variables de entrada:

- Superficie de captación: 150 m²
- Coeficiente de escurrimiento (concreto hidráulico): 0.9²⁶
- Precipitación media anual: 0.65 m/año

Cálculo:

Agua de lluvia disponible anualmente: $0.65 \text{ m/año} * 150 \text{ m}^2 * 0.9 = 87.21 \text{ m}^3/\text{año} = 7,267.50 \text{ l/mes} = 238.93 \text{ l/día}$

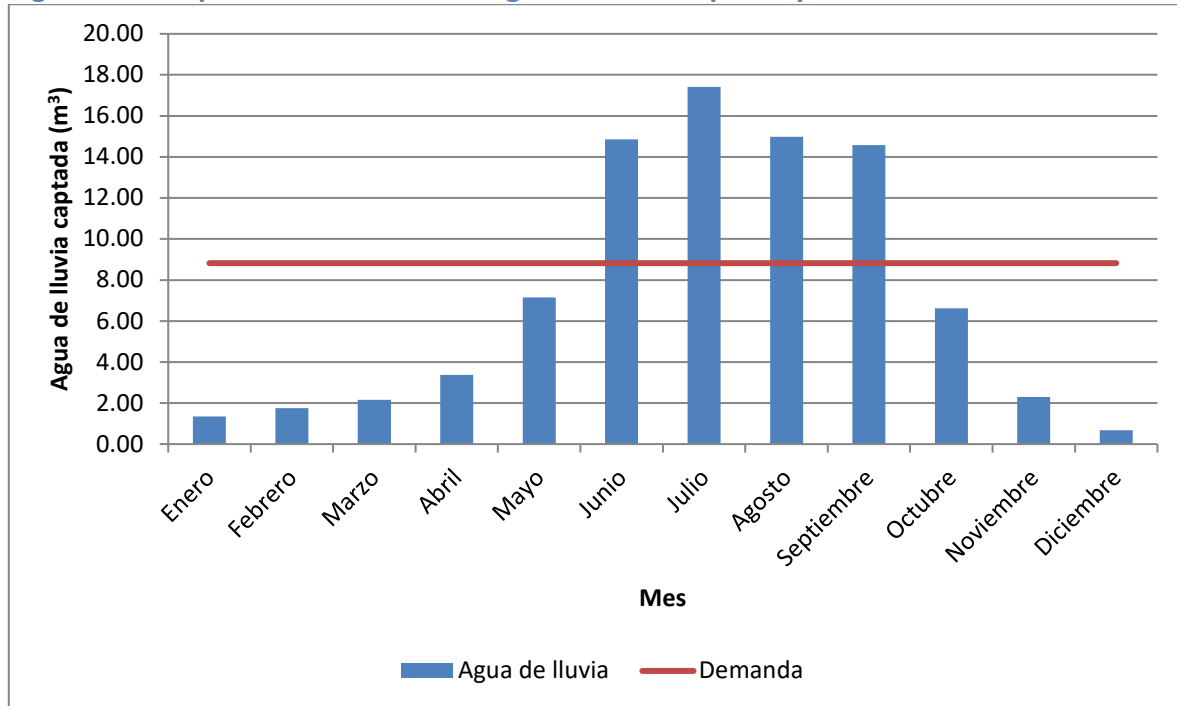
Por lo tanto, para suministrar agua todo el año para satisfacer las necesidades de la vivienda la demanda no puede superar los 238.93 l/día. La demanda esperada (290 l/día) no puede ser satisfecha por el agua captada disponible.

La Figura 33 muestra la comparación del agua demandada y la cantidad que es posible suministrar a la vivienda usando toda el agua de lluvia captada. Es posible notar que hay una sola temporada de lluvias. El primer mes que la lluvia satisface la demanda es junio.

²⁶ En este caso no fue utilizado el coeficiente de escurrimiento recomendado para tomar en cuenta pérdidas (0.8).

Asumiendo que el tanque está vacío a finales de mayo, es posible construir una gráfica de agua de lluvia acumulada y demanda acumulada y de ella calcular el requerimiento máximo de almacenamiento para la vivienda como se muestra en la Figura 34.

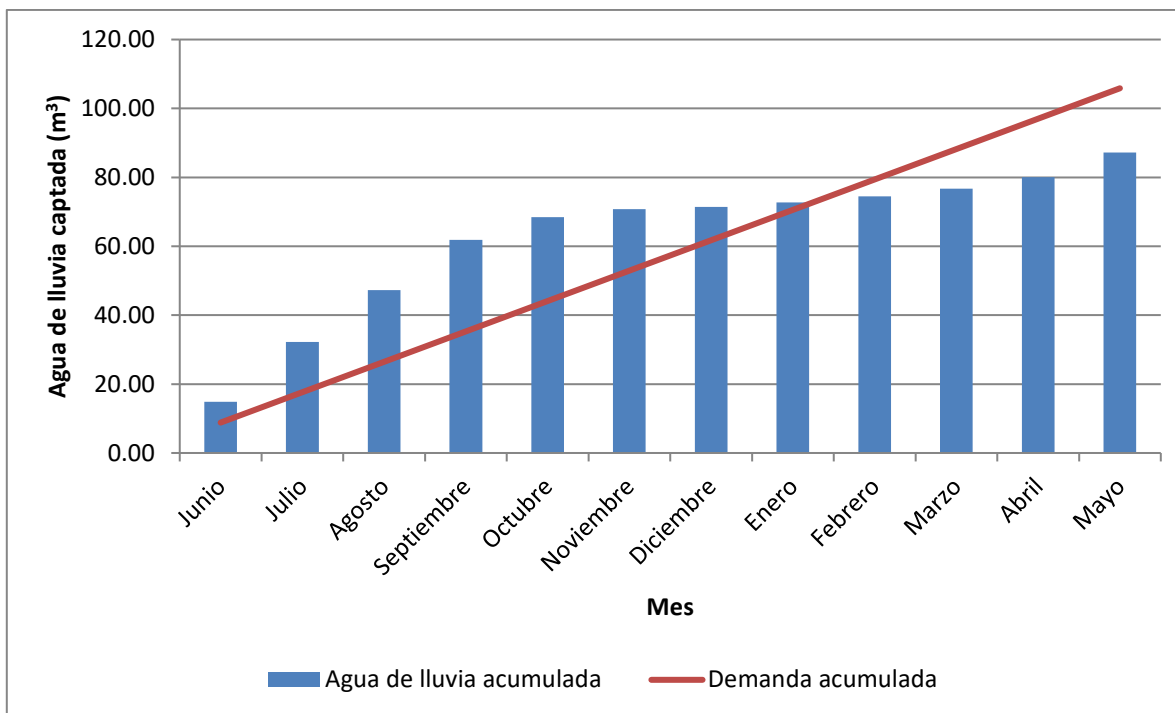
Figura 33 Comparación mensual del agua de lluvia captada y la demanda de la vivienda



Fuente: Análisis interno

La Tabla 18 muestra la hoja de cálculo para dimensionar el tanque de almacenamiento. La hoja de cálculo toma en cuenta el flujo acumulado de entrada (agua de lluvia) y salida (demanda) del tanque, y la capacidad del tanque es calculada como el mayor exceso de agua de lluvia por encima de la demanda. Esto ocurre en septiembre con un requerimiento de almacenamiento de 26.55 m³. Toda esta agua tendrá que ser almacenada para cubrir el déficit durante el período seco. Aún así, con las condiciones del sitio (precipitación, área de captación y coeficiente de escurrimiento) el agua de lluvia captada no es suficiente para satisfacer la demanda de la vivienda durante todo el año. En particular, en los meses de febrero a mayo es necesaria una fuente alterna de abastecimiento.

Figura 34 Predicción acumulada de agua de lluvia captada y demanda de la vivienda



Fuente: Análisis interno

Tabla 18 Hoja de cálculo para dimensionar el tanque de almacenamiento

Mes	Precipitación (mm)	Agua de lluvia captada (m³)	Agua de lluvia captada acumulada (m³)	Demanda (m³)	Demanda acumulada (m³)	Diferencia entre columna 4 y 6
Junio	110.00	14.85	14.85	8.82	8.82	6.03
Julio	129.00	17.42	32.27	8.82	17.64	14.62
Agosto	111.00	14.99	47.25	8.82	26.46	20.79
Septiembre	108.00	14.58	61.83	8.82	35.28	26.55
Octubre	49.00	6.62	68.45	8.82	44.10	24.34
Noviembre	17.00	2.30	70.74	8.82	52.93	17.82
Diciembre	5.00	0.68	71.42	8.82	61.75	9.67
Enero	10.00	1.35	72.77	8.82	70.57	2.20
Febrero	13.00	1.76	74.52	8.82	79.39	-4.87
Marzo	16.00	2.16	76.68	8.82	88.21	-11.53
Abril	25.00	3.38	80.06	8.82	97.03	-16.97
Mayo	53.00	7.16	87.21	8.82	105.85	-18.64
		87.21		105.85		

Fuente: Análisis interno

4.1.5.2 SimTanka

4.1.5.2.1 Introducción

SimTanka es un programa de computadora diseñado para calcular el tamaño del tanque de almacenamiento con bastante precisión. Fue escrito por una organización india y está disponible de forma gratuita en Internet (Zhu, Gould, Li, & Ma, 2015).

4.1.5.2.2 Objetivos

El programa simula el rendimiento de los sistemas de captación de agua de lluvia con tanque de almacenamiento. La idea detrás de dicha simulación por computadora es predecir el rendimiento del sistema de captación de agua de lluvia basado en el modelo matemático que rige el sistema. En particular, SimTanka simula la precipitación fluctuante de la que depende el sistema de captación de agua de lluvia (Zhu, Gould, Li, & Ma, 2015).

4.1.5.2.3 Variables de entrada

SimTanka requiere por lo menos 15 años de registros mensuales de precipitación para el lugar donde se encuentra el sistema de captación de agua de lluvia. Si no se cuenta con el registro de lluvia del lugar es posible utilizar el registro de lluvia del lugar más cercano que tenga el mismo patrón de lluvia (Zhu, Gould, Li, & Ma, 2015).

4.1.5.2.4 Resultados

Con frecuencia, los sistemas de captación de agua de lluvia son diseñados usando algún indicador estadístico de la precipitación para un lugar determinado como la precipitación media. Cuando la precipitación es escasa y muestra grandes fluctuaciones, un diseño basado en un solo indicador estadístico puede ser engañoso. SimTanka toma en cuenta las fluctuaciones de la precipitación, ponderando cada fluctuación para determinar el tamaño del sistema de captación de agua de lluvia. El resultado de la simulación permite diseñar un sistema de captación de agua de lluvia que satisfaga las demandas de forma confiable, es decir, permite encontrar el área de captación mínima y el tanque de almacenamiento más pequeño posible que satisfaga la demanda con una probabilidad de hasta 95% a pesar de las fluctuaciones de las lluvias. Asimismo, es posible utilizar SimTanka para averiguar qué fracción de la demanda total puede ser satisfecha confiablemente (Zhu, Gould, Li, & Ma, 2015).

4.1.5.3 Rainwater Tank Performance Calculator

4.1.5.3.1 Introducción

En cada sistema de captación (con techo) de agua de lluvia, existe un equilibrio entre el aumento del rendimiento del sistema y el aumento del costo del sistema. La vía de este equilibrio es normalmente el tamaño del tanque de almacenamiento; por lo tanto, en el centro del diseño del sistema está la optimización del tamaño del tanque. Han sido

publicadas muchas metodologías para el dimensionamiento de tanques. Afortunadamente, al igual que con toda optimización, la gráfica del rendimiento (por ejemplo, costo-beneficio) frente al tamaño del tanque es "plano" en el área de interés, de modo que una variación de $\pm 10\%$ en tamaño tiene poca influencia en el rendimiento económico. El costo de un tanque de un tamaño dado puede ser fácilmente evaluado, pero el rendimiento del sistema que contiene ese tanque no. Por lo tanto, fue buscada una metodología para predecir el rendimiento sobre la vida esperada de un sistema: una que se adaptara tanto a las restricciones propias (por ejemplo, la disponibilidad de datos y el acceso a herramientas de cómputo) y al uso previsto del sistema (Thomas, 2012).

4.1.5.3.2 Objetivos

El programa calcula el desempeño de un tanque de almacenamiento de agua de lluvia para poder evaluar su rendimiento. El costo de un sistema doméstico de captación de agua de lluvia depende principalmente del tamaño del tanque; por lo tanto, es importante diseñar el tanque para asegurar un rendimiento óptimo a un costo razonable (Zhu, Gould, Li, & Ma, 2015).

4.1.5.3.3 Variables de entrada

El programa calcula la confiabilidad y eficiencia aproximadas del sistema para una selección de tamaños de tanque, incluyendo aquel definido usando los datos mensuales de lluvia y el área del techo de la casa o edificio en cuestión. Con la información del rendimiento para todos los tamaños de tanque es posible cambiar el tamaño elegido, la demanda nominal y la estrategia de gestión hasta alcanzar un nivel de rendimiento aceptable.

El usuario también define cómo se utilizará el agua de lluvia al dar una demanda diaria nominal y elegir entre tres estrategias de gestión del agua:

- Demanda constante.
- Varía con el volumen del tanque de almacenamiento.
- Varía según la estación del año.

El programa requiere los siguientes datos: demanda diaria nominal, área del techo, volumen del tanque y diez años de datos mensuales de lluvia (en mm).

4.1.5.3.4 Resultados

A partir de los datos proporcionados por el usuario, el programa calcula tres medidas de rendimiento (confiabilidad, satisfacción y eficiencia) para cada uno de los cuatro tamaños del tanque de almacenamiento (Thomas, 2012).

Alta confiabilidad significa que durante la mayor parte del año el usuario no necesitará extraer agua adicional de otra fuente. Alta satisfacción significa que la mayor parte del agua de la casa puede venir del tanque de almacenamiento de agua de lluvia. Alta eficiencia significa que la mayor parte del agua de lluvia captada es utilizada y que es poca la cantidad de agua de lluvia desperdiciada por el desbordamiento del tanque (Thomas, 2012).

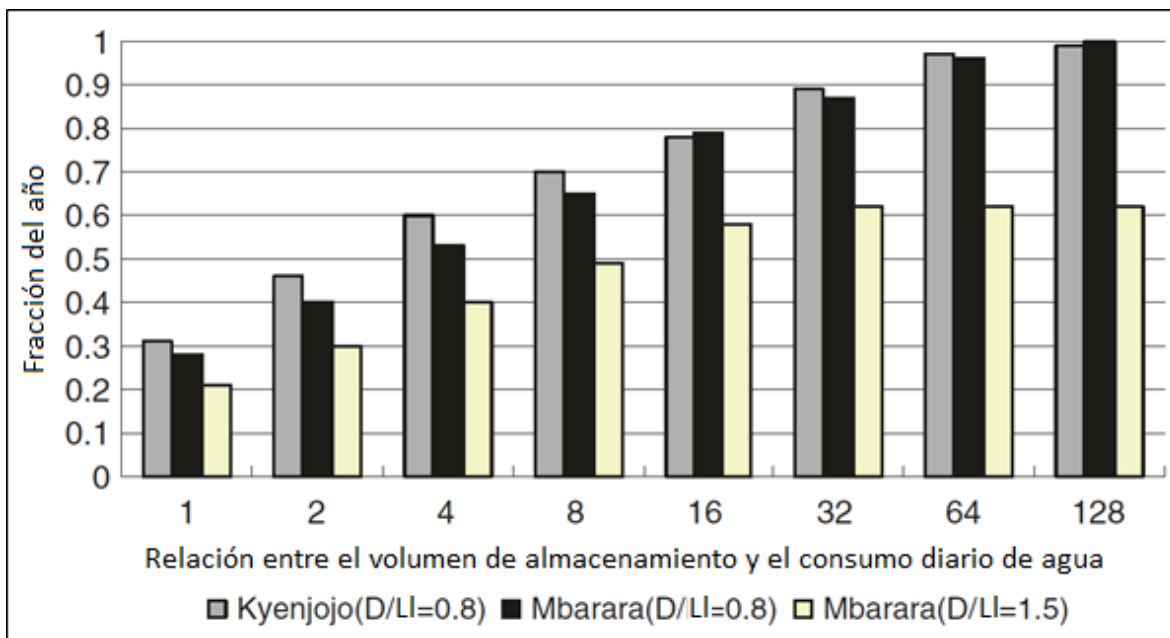
La mayoría de los propietarios de sistemas de captación de agua de lluvia tienen mayor interés en la "confiabilidad" del suministro de modo que la medida es generalmente la más útil de las tres. Los sistemas de captación de agua de lluvia no suelen brindar 100% de confiabilidad porque para hacerlo tendrían que tener un techo y un tanque extremadamente grandes (véase Figura 35). Normalmente, el rendimiento del sistema está limitado únicamente al desempeño del techo o del tanque. Para la mayoría de los hogares será más económico dimensionar el tanque para tener entre 60% y 80% de confiabilidad y comprar el resto del agua de otras fuentes (Thomas, 2012).

4.1.6 Recomendaciones

4.1.6.1 Relación tamaño del tanque de almacenamiento-confiabilidad

La Figura 35 muestra un ejemplo que detalla cómo la confiabilidad, expresada como una fracción del año, varía con el volumen de almacenamiento (expresado como un múltiplo del consumo diario) para dos ubicaciones cercanas al Ecuador; por lo tanto con dos temporadas de lluvias. Asimismo, es posible observar que el aumento del tamaño de almacenamiento, y por lo tanto el costo, resulta en rendimientos decrecientes. Por ejemplo, para la columna izquierda (Kyenjojo con techo dimensionado de tal manera que la demanda promedio anual de agua es sólo 80% del escurrimiento medio anual del techo), suponiendo una demanda de 100 l/día, el aumento del almacenamiento de 1 día (100 l) a 16 días (1,600 l) eleva la confiabilidad de 31 a 78%; sin embargo, el almacenamiento tiene que ser aumentado hasta 128 días (12,800 l) para lograr una confiabilidad del 99%. Esta alta confiabilidad tiene un costo y requerimiento de espacio tan elevado que es un objetivo de diseño poco realista para un sistema doméstico de captación de agua de lluvia (Zhu, Gould, Li, & Ma, 2015).

Figura 35 Disponibilidad de suministro de agua de lluvia como una fracción del año



Fuente: Zhu, Gould, Li, & Ma, 2015

4.1.6.2 Registros de precipitación

4.1.6.2.1 Longitud

Muchos modelos utilizan datos históricos de precipitación para simulaciones aunque la longitud de los registros utilizados ha variado. Gires y de Gouvello (2009) utilizaron registros de 5 años mientras que Su *et al.* (2009) y Rahmen *et al.* (2010) utilizaron registros de 50 y 60 años, respectivamente. Liaw y Tsai (2004) analizaron la relación entre la longitud del registro de precipitaciones utilizado y la confiabilidad resultante y concluyeron que la variabilidad asociada con la confiabilidad estimada disminuyó conforme aumentaba la longitud del registro. Palla *et al.* (2011) indicó que los registros de precipitaciones de al menos 30 años deberían utilizarse para asegurar estimaciones precisas del rendimiento mientras que Su *et al.* (2009) recomienda un mínimo de 50 años para reflejar con precisión las tendencias a largo plazo (*citado en DeBusk & Hunt, 2012*).

4.1.6.2.2 Resolución

La resolución de los datos de precipitación utilizados para el modelado de sistemas de captación de agua de lluvia ha sido tema de debate. Fewkes y Butler (2000) demostraron que la precisión con la que un modelo predijo la eficiencia del ahorro de agua disminuyó a medida que el intervalo de tiempo aumentaba de horario a diario. Coombes y Barry (2007) evaluaron el efecto de variar los intervalos de tiempo en los resultados de modelos y concluyeron que un paso de tiempo de 6 minutos permitió que la demanda de agua ocurriera durante los eventos de lluvia mientras que los pasos de tiempo diarios no lo permitieron. Liaw y Tsai (2004) también señalaron resultados más precisos con intervalos de tiempo más pequeños y mostraron que el impacto de intervalos de tiempo más largos

aumentaba a medida que los volúmenes de almacenamiento disminuían; por lo tanto, es especialmente importante utilizar intervalos de tiempo más cortos cuando se modelan sistemas pequeños. Aunque es posible que no se disponga de datos por hora, es evidente que los datos de precipitación de mayor resolución deberían utilizarse cuando estén disponibles para maximizar la precisión del modelo. Ward *et al.*, (2010b) señalan que los datos diarios de precipitación son típicamente considerados ideales (*citado en DeBusk & Hunt, 2012*).

5 Conclusiones

5.1 Descubrimientos más importantes

- El uso de la captación de agua de lluvia está aumentando en los países en desarrollo y desarrollados. Actualmente es considerada y se utiliza como una fuente de suministro de agua potable y no potable en los países en desarrollo. La tecnología está probada; con una gran variedad de sus componentes disponibles de manera comercial.
- El agua de lluvia pura cumple con todos los parámetros de calidad del agua para uso y consumo humano establecidos por la norma mexicana (Modificación a la NOM-127-SSA1-1994) excepto por el pH. El agua de lluvia pura es ácida (~4.15) y está fuera del límite permisible (6.50-8.50).
- El agua de lluvia en el Valle de México presenta contaminación antes de que toque la superficie terrestre. En su trayecto por la atmósfera desde las nubes hasta el suelo el agua de lluvia recoge gases disueltos presentes en el Valle de tal forma que los niveles de ciertos parámetros están por encima de los niveles permisibles que marca la norma mexicana. Tal es el caso del pH, amonio, cloruro y nitrato; que de acuerdo al Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México existen sitios con concentraciones superiores a los límites permisibles.
- La variabilidad en la cantidad de lluvia que cae en el Valle de México es alta: en el periodo 2002-2016, en 16 estaciones del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México cayeron entre ~1,200 mm/año y ~400 mm/año de lluvia.
- Los sistemas de captación de agua de lluvia no suelen brindar 100% de confiabilidad porque para hacerlo tendrían que tener un techo y un tanque extremadamente grandes. Para la mayoría de los hogares es más económico dimensionar el tanque para tener entre 60% y 80% de confiabilidad y comprar el resto del agua de otras fuentes.
- El diseño de sistemas de captación de agua de lluvia está enfocado en el dimensionamiento del tanque de almacenamiento (componente más costoso).

5.2 Exposición sucinta de la propuesta

Adopción en el Valle de México de sistemas domésticos de captación de agua de lluvia para consumo humano. Dichos sistemas están compuestos (cada uno) de un área de captación, conducción, almacenamiento, tratamiento y distribución. La tecnología propuesta es una alternativa de suministro de agua potable al déficit existente en el Valle ocasionado por la extracción de agua (para fines potables) de fuentes insostenibles.

5.3 Nuevas preguntas que pueden plantearse

- Existen compuestos químicos medidos por las estaciones del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México para los cuales la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994 no incluye los límites permisibles correspondientes, ¿las concentraciones en el agua de lluvia del Valle de México de tales compuestos son dañinas para la salud?
- Actualmente los recursos económicos de los gobiernos del Valle de México están enfocados en infraestructura de salida del agua de lluvia ¿sería posible destinar una parte de los recursos a la implementación masiva en el Valle de México de sistemas domésticos de captación de agua de lluvia para consumo humano?
- La implementación masiva en el Valle de México de sistemas domésticos de captación de agua de lluvia para consumo humano ¿cuántos m³/s de agua potable podría disminuir sobre las fuentes convencionales de suministro para diferentes escenarios?
- ¿Sería viable técnica y económicamente separar, para su transporte por el Valle de México, el agua de lluvia de las aguas negras?

6 Referencias

- American Water Works Association. (2011). *Water Quality & Treatment* (Sexta ed.). (J. K. Edzwald, Ed.) McGraw-Hill.
- Azizul, S. (2017). *Harvesting Rainwater from Buildings* (Primera ed.). Suiza: Springer.
- Banco Mundial. (2013). *Agua urbana en el Valle de México : ¿un camino verde para mañana?* (Primera ed.). México.
- Cabell Brand Center. (2009). *Virginia Rainwater Harvesting Manual*. Salem, Virginia, Estados Unidos.
- CIDE. (2012). *Estimación de los factores y funciones de la demanda de agua potable en el sector doméstico en México*.
- Comisión Nacional del Agua. (2016). *Atlas del Agua en México 2016*. México: Comisión Nacional del Agua.
- Comisión Nacional del Agua. (2016). *Estadísticas del Agua en México, edición 2016*. Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (s.f.). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. México.

- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's Water Treatment: Principles and Design* (Tercera ed.). Hoboken, Nueva Jersey, Estados Unidos: Wiley.
- DeBusk, K., & Hunt, W. F. (2012). *Rainwater Harvesting: A Comprehensive Review of Literature*.
- Despins, C. (2010). *Ontario Guidelines for Residential Rainwater Harvesting Systems* (Primera ed.). (C. Leidl, & K. Farahbakhsh, Edits.)
- Housing and Building Research Institute. (s.f.). *Bangladesh National Building Code 2015*.
- Howard, G. (2002). *Water supply surveillance*. Reino Unido: WEDC.
- Kloss, C. (2008). *Managing wet weather through green infrastructure: Municipal handbook: Rainwater harvesting*. Washington, D.C, Estados Unidos: U.S. Environmental Protection Agency.
- Novak, C. A., Van Giesen, G. E., & DeBusk, K. M. (2014). *Designing Rainwater Harvesting Systems*. Estados Unidos: Wiley.
- Ojha, C., Berndtsson, R., & Bhunya, P. (2008). *Engineering Hydrology*. Oxford University Press.
- Real Academia Española. (2017). *Diccionario de la lengua española*. Recuperado el 3 de Julio de 2017, de <http://dle.rae.es/?id=SXnl0kj>
- Salvato, J. A., Nemerow, N. L., & Agardy, F. J. (2003). *Environmental Engineering* (Quinta ed.). Nueva Jersey, Estados Unidos: Wiley.
- Secretaría de Salud. (2000). *Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano*. Ciudad de México, Distrito Federal, México.
- Secretaría de Salud. (2014). *PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY NOM-250-SSA1-2014, Agua para uso y consumo humano*. Ciudad de México, México.
- Secretaría del Medio Ambiente. (s.f.). *Bases de datos - Red de Depósito Atmosférico (REDDA)*. Recuperado el 07 de 07 de 2017, de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aKBk%27>
- SEMARNAT, CONAGUA. (2016). *Lineamientos Técnicos: Sistema de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda*.
- Sistema Nacional de Información del Agua. (2016). *Precipitación pluvial anual (2004-2016)*.
- Still, G., & Thomas, T. H. (2002). *Sizing and optimally locating guttering for rainwater harvesting*. Warwick, Reino Unido: Development Technology Unit, School of Engineering, University of Warwick.
- Texas Water Development Board. (2005). *The Texas Manual on Rainwater Harvesting*. Austin, Tejas, Estados Unidos.
- Thomas, T. (18 de Junio de 2012). *University of Warwick School of Engineering*. Recuperado el Junio de 2017, de Rainwater tank performance calculator: <http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/eng/research/grouplist/structural/dtu/rwh/model/>
- Thompson, T., Fawell, J., & Kunikane, S. (2007). *Chemical safety of drinking water*. Ginebra, Suiza: World Health Organization.

- U.S. Geological Survey. (2 de Diciembre de 2016). *The USGS Water Science School*. Obtenido de <https://water.usgs.gov/edu/propertyyou.html>
- World Health Organization. (2017). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating first addendum* (Cuarta ed.). Ginebra, Suiza: World Health Organization.
- World Health Organization, Organisation for Economic Cooperation and Development. (2003). *Assessing Microbial Safety of Drinking Water*. Reino Unido: IWA Publishing.
- Zhu, Q., Gould, J., Li, Y., & Ma, C. (Edits.). (2015). *Rainwater Harvesting for Agriculture and Water Supply*. Pekín, China: Springer Science, Business Media Singapore y Science Press.