



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Sistema de captación de agua de lluvia.
Dimensionamiento del depósito de agua
pluvial**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

César Quintana Rios

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Luis Aragón Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

Resumen

La escasez del agua en México, particularmente en zonas urbanas, se ha abordado con la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento del líquido cada vez más alejas de los núcleos de población, dichas soluciones resultan cada vez más difíciles de implementar por diversas razones que van desde, conflictos con pobladores, desequilibrio ambiental e inversiones económicas importantes.

Por lo anterior, se han propuesto soluciones que buscan mitigar la problemática de la escasez del agua, así, surge la idea de ver el agua de lluvia como fuente de abastecimiento endémica temporal y su aprovechamiento con sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL). En México, particularmente en la cultura Maya, se han encontrado registros de sistemas de captación de agua de lluvia y en la actualidad dichos sistemas continúan desarrollándose. En este sentido, resulta relevante conocer el comportamiento hidrológico de la lluvia y su comportamiento hidráulico en un sistema de captación con la finalidad de comprender y desarrollar sistemas que atiendan a la naturaleza del sistema.

Una de las dificultades de los SCALL ha sido el dimensionamiento del depósito de agua pluvial; particularmente, el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), propone que dicho dimensionamiento se realice empleando curvas de intensidad de precipitación, duración y periodo de retorno (IDT), dicha propuesta de dimensionamiento resulta en depósitos de almacenamiento no adecuados, pues considera que la precipitación es constante durante la vida útil del depósito y esto no atiende a la naturaleza de la lluvia, además, no considera la variable del consumo del agua pluvial que depende de cada proyecto en particular.

Como respuesta, el presente documento busca dar solución a las dificultades del dimensionamiento del depósito de agua pluvial propuesto por el SACMEX, empleando estimaciones de lluvia con la simulación de Monte Carlo y la teoría del funcionamiento de vasos. Dichos procedimientos se aplicaron en una zona de estudio “tipo” con problemas de abastecimiento de agua potable localizada en la zona oriente de la Ciudad de México.

Los resultados obtenidos de las simulaciones de lluvia y el funcionamiento de vasos indican que un depósito de agua pluvial depende de las variaciones de precipitación al día y de la demanda de cada proyecto en particular.

Agradecimientos

A la energía superior que gobierna todo aquello que existiese, sus manifestaciones en el universo infinito, el tiempo, la vida del ser humano, la naturaleza y todo aquello que me ha permitido vivir.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme las puertas a un mundo de conocimiento y experiencias que recordaré con gran cariño.

Al Dr. José Luis Aragón Hernández por su paciencia y guía en esta etapa de mi formación académica, así mismo, a todas las y los profesores que me han compartido su conocimiento a lo largo de mi trayectoria escolar.

Con gran cariño a mi familia, en especial a mi madre Azalia Rios Eguiluz y mi padre Faúl Quintana Terán por su admirable esfuerzo e incondicional apoyo, sin ellos no sería capaz de concluir esta etapa de mi vida.

A mi gran amigo Iván por enseñarme las bondades de los sistemas informáticos, por su amistad y las experiencias vividas.

Por último, a las personas que me han apoyado, compartido parte de su tiempo, su cariño, su escucha y paciencia.

Gracias

Índice

Introducción	1
Problemática	1
Objetivo	3
Objetivos específicos	3
Descripción del trabajo	3
I. Antecedentes y conceptos básicos	5
I.1 México y el agua	5
I.1.1 La CDMX y el agua	9
I.2 El agua pluvial: fuente de abastecimiento endémica temporal	14
I.3 Marco jurídico	17
I.3.1 Marco jurídico de la CDMX	18
I.4 Sistema de captación de agua de lluvia	20
I.4.1 Proyectos relacionados	21
I.5 Conceptos hidrológicos	24
I.5.1 Ciclo hidrológico	24
I.5.2 Precipitación	25
I.5.3 Curvas de Intensidad-Duración-Periodo de retorno	32
I.5.4 Pérdidas de precipitación	35
I.5.5 Escurrimiento	39
I.5.6 Proceso lluvia-escurrimiento	40
I.5.7 Funcionamiento de vasos	40
I.5.8 Simulación de Monte Carlo	41
I.6 Aspectos hidráulicos	42
I.6.1 Clasificación de fluidos	42
I.6.2 Ecuaciones de gobierno: flujo permanente	43
I.6.3 Ecuaciones de gobierno: flujo variable	44
I.6.4 Equipos de bombeo	47
II. Dimensionamiento de un SCALL	57
II.1 Observaciones a la guía del SACMEX	57

II.2	Criterios generales	59
II.3	Recopilación y procesamiento de datos	60
II.3.1	Ubicación	60
II.3.2	Características generales del proyecto	60
II.3.3	Clasificación de superficies de captación	61
II.3.4	Precipitación	62
II.4	Caudal de aportación	63
II.5	Separación de inicio de tormenta	63
II.6	Pre-filtro	64
II.7	Filtrado	65
II.8	Depósito de almacenamiento de agua pluvial	65
II.8.1	Demanda de agua pluvial	65
II.8.2	Volumen de almacenamiento de agua pluvial	69
II.8.3	Depósitos más económicos	69
II.8.4	Depósitos comerciales	71
II.9	Volumen del sistema de retención e infiltración pluvial	72
II.10	Conducción de agua pluvial	72
II.10.1	Verticales	72
II.10.2	Horizontales	73
II.11	Volumen de demasías/excedencias	74
II.12	Tren de tratamiento	74
II.13	Red de abastecimiento de agua	79
II.13.1	Datos preliminares	79
II.13.2	Selección de los equipos de bombeo	81
III.	Caso de estudio	83
III.1	Ubicación	83
III.2	Características generales	83
III.3	Precipitación característica	85
III.4	Simulación del funcionamiento de vasos	90
III.4.1	Caudal de aportación	90

III.4.2	Demanda de agua pluvial	91
III.4.3	Consideraciones, cálculos y resultados	93
III.5	Análisis de resultados	100
IV.	Conclusiones	105
	Ilustraciones	107
	Tablas	109
	Gráficas	111
	Referencias	113
	Anexo	117
	Guía de elaboración de sistemas alternativos del SACMEX	117
	Estructura general de la guía.	117

Introducción

El ser humano, desde sus orígenes, ha encontrado la manera de subsistir gracias a la búsqueda de satisfacer sus necesidades básicas, refugio, alimento y agua. La manera de proveer dichas exigencias ha evolucionado a lo largo de la historia, desde la vida del ser humano nómada, hasta la aparición de las civilizaciones sedentarias; con el desarrollo de la agricultura y domesticación de animales, el ser humano comienza a modificar su entorno buscando la supervivencia y posterior comodidad.

Como consecuencia del crecimiento de las civilizaciones, la conducción, el almacenamiento y la distribución del agua se convirtieron en temas importantes para la permanencia de los sitios habitados, por lo anterior, el ser humano inició el desarrollo de grandes obras hidráulicas que ayudaron a satisfacer las demandas de la población. En Mesoamérica existieron obras hidráulicas que ayudaron a más de una función y se vincularon con más de un tipo de agua (pluvial, manantial, manejo de cuerpos de aguas, etc.); estas obras hidráulicas fueron empleadas principalmente en usos domésticos e irrigación agrícola.

En la actualidad, el uso del recurso hídrico sobrepasa la aplicación en entornos domésticos y agrícolas pues las exigencias de las civilizaciones han evolucionado e incrementado, por ejemplo, el uso en procesos industriales, generación de energía, recreación etc. Lo anterior ha exigido una sobreexplotación de los cuerpos de agua y en general del recurso hídrico.

La sobreexplotación de los recursos naturales, en particular el agua, ha provocado la búsqueda de nuevas soluciones que satisfagan las necesidades del ser humano y que al mismo tiempo atiendan los temas económicos, sociales y ambientales.

La problemática que se vive a nivel global con respecto al abastecimiento y la calidad del agua, en parte es resultado de las acciones emprendidas desde la perspectiva de los sectores de gobierno involucrados, pero trabajando por separado, sin promover soluciones integrales con la participación de gobierno, sociedad civil y la academia (Espinosa, 2014).

En este sentido, en el año 2012 la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM) reconoce el agua como un derecho humano expresado en el artículo 4º de la siguiente manera *“Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines.”*. Pero la ineficaz gestión del agua por parte de las autoridades encargadas de la administración del recurso, la falta de cultura del cuidado del agua y el exponencial crecimiento poblacional ha provocado su escasez.

Problemática

En la actualidad, la mayoría de los centros urbanos de México existe un déficit en el abastecimiento de agua potable, por lo anterior, los organismos operadores de la gestión han considerado necesaria la conducción de mayor volumen de agua desde otras fuentes naturales, dichas fuentes, cada vez más apartadas de los sitios

donde se solicita el recurso. Esta visión en la solución del abastecimiento de agua resulta cada vez más difícil de implementar por diversas razones, que van desde la oposición de los pobladores de las zonas donde se proyectan nuevas fuentes de suministro, el impacto ecológico que genera el almacenamiento y conducción del agua y la disposición de recursos económicos que se destinan a estos proyectos.

Por otra parte, la gestión actual encargada de la distribución del agua resulta deficiente ya que va en contra de las contemporáneas visiones de integración de proyectos. En este sentido, Torres (2017) indica que una adecuada gestión del agua requiere instrumentos que generen conocimiento para el sector hídrico, los cuales deben ayudar a la resolución de problemas, necesidades y oportunidades en materia del agua y del medio ambiente, al mismo tiempo debe fortalecer la capacidad científica y tecnológica del sector con la finalidad de orientar un desarrollo de sociedad sustentable.

Lo anterior sugiere un cambio en la ética del ejercicio de la gestión pública del agua, al mismo tiempo conduce a un cambio en el entorno social; ya el artículo 4to de la CPEUM expresa que el tema del agua no solo compete al Estado, sino, a una relación entre dos partes, el Estado y la ciudadana; el Estado como el proveedor de las garantías y obligaciones y la ciudadanía como usuaria consciente del recurso hídrico, lo anterior propone un estado de responsabilidad mutua.

Esta forma de responsabilidad tiene como finalidad la preservación del líquido, entonces, es necesario que el agua forme parte de la relación Estado-ciudadanía, pero ésta a su vez como parte de un ecosistema, es así como el medio ambiente se convierte en un tercer actor, tal que, la relación Estado-ciudadanía-medio ambiente tenga como objetivo la preservación y uso responsable del agua como recurso intrínseco del ser humano. Tomando en cuenta lo anterior se revela la importancia de generar formas de aprovechamiento del recurso y que, al mismo tiempo, sean compatibles con una visión generacional.

Por lo tanto, pensar en una visión generacional obliga a buscar soluciones sostenibles y no sustentables como lo menciona la CPEUM, entendiendo el desarrollo sostenible como *“la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades... trata de lograr, de manera equilibrada, el desarrollo económico, el desarrollo social y la protección del medio ambiente”* (AGNU, 1987). El enfoque sostenible se distingue del sustentable en la búsqueda y solución de necesidades sociales, políticas y culturales, además de atender el cuidado del medio ambiente; de esta forma, el enfoque pretende ser integral.

Con lo anterior, la búsqueda de soluciones a la escasez del agua debe enfocarse en todos los términos que comprenden la sostenibilidad y al mismo tiempo la generación de herramientas para lograr un adecuado y consciente uso del agua.

Una de las alternativas para atender la problemática expuesta, sobre escasez del agua, y que pareciera seguir los lineamientos de una solución sostenible, es el aprovechamiento de agua de lluvia en asentamientos humanos. En los entornos urbanos el ser humano ha bloqueado el contacto natural precipitación-suelo lo que genera que los acuíferos no tengan capacidad y el tiempo adecuado de recarga, esto obliga a las ciudades a la búsqueda de nuevas fuentes de explotación alejadas del usuario, a la par, los entornos rurales han padecido de la sobreexplotación de sus recursos hídricos. Por lo anterior, se ha propuesto el agua de lluvia como una fuente de abastecimiento de agua endémica temporal.

Objetivo

Proponer una metodología técnica-descriptiva para el dimensionamiento de sistemas de captación de agua de lluvia.

Objetivos específicos

- Realizar una descripción del funcionamiento del sistema de captación y conducción de agua pluvial.
- Brindar las herramientas técnicas suficientes para el dimensionamiento de sistemas de captación de agua de lluvia.
- Aplicar la simulación de Monte Carlo para la estimación de lluvia en un año.
- Aplicar el funcionamiento de vasos para el dimensionamiento del depósito de agua de pluvial.

Descripción del trabajo

Para atender los objetivos del presente trabajo, el capítulo I aborda la problemática del agua en México y las particularidades sobre la escasez del agua en la Ciudad de México; además, se expone la teoría existente que caracteriza a la lluvia y el movimiento del agua.

En el capítulo II se exponen las dificultades de la guía de implementación de sistemas alternativos del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, se plantea el uso de la simulación de Monte Carlo y funcionamiento de vasos para atender dichas dificultades, con lo anterior se da pie a la propuesta de metodología para el dimensionamiento de captación de agua de lluvia.

Para evaluar las propuestas realizadas en el capítulo II, en el capítulo III se plantea un caso de estudio cuyo objetivo es dar solución a problemas de abastecimiento de agua potable, dicho caso de estudio se localiza en una de las zonas donde existe problemas de suministro por tandeos, falta de agua, fugas y servicio intermitente. Se expone el procedimiento para obtener la demanda de agua pluvial de cada proyecto en particular, la precipitación característica que se presenta en cada día de todo un año y las consideraciones necesarias para ejecutar el funcionamiento de vasos. En el mismo capítulo, se presentan los resultados de los volúmenes de almacenamiento de agua pluvial y los volúmenes de retención e infiltración, tanto de la metodología propuesta como la del SACMEX; con los resultados obtenidos, se realiza un análisis de los mismos y se plantean características de la metodología propuesta.

En el capítulo IV se concluye sobre lo expuesto en el documento.

I. Antecedentes y conceptos básicos

La problemática del agua en México está relacionada con la distribución espacio-temporal del recurso en el territorio, potenciada por las aglomeraciones de la población en centros urbanos; por lo anterior, los esfuerzos en los últimos años se han concentrado en estos, especialmente en la Ciudad de México.

En este capítulo se aborda el tema del agua pluvial como fuente de abastecimiento de agua endémica temporal y la descripción de algunos proyectos que buscan el aprovechamiento de agua de lluvia; además, se ahondará en el marco jurídico sobre el cual se fundamenta el sistema alternativo de agua pluvial propuesta por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) y el concepto general de un sistema de captación de agua pluvial.

Para dar sustento técnico al sistema de captación de agua de lluvia se abordarán los temas hidrológicos e hidráulicos necesarios para entender el comportamiento físico que gobiernan el movimiento del agua, así mismo, se expondrá la teoría del funcionamiento de vasos para modelar el comportamiento del depósito de almacenamiento de agua pluvial.

I.1 México y el agua

México cuenta con una superficie de 1,964 millones de km^2 dividido en 37 regiones hidrológicas y que son administradas en 13 regiones hidrológico-administrativas (Ilustración 1); en cuanto a las aguas subterráneas, el país está dividido en 653 acuíferos. Anualmente, México recibe aproximadamente 1,449,471 millones de m^3 de agua en forma de precipitación; de este total, se estima que el 72.1% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.4% escurre en ríos y arroyos y el 6.4% se infiltra al suelo de forma natural y recarga los acuíferos (CONAGUA, 2018).

La precipitación normal anual en México en el periodo de 1981-2010 fue de 739.8 milímetros y en el año 2017 la precipitación media anual fue de 781.9 milímetros (CONAGUA, 2018). La mayor precipitación se concentra en los meses de mayo a octubre con un acumulado de 684.4 milímetros en 2017 y de 615.7 milímetros en el periodo 1981-2010.

Durante el periodo 2011-2013 México se vio afectado por una sequía que cubrió el 90% del territorio; una sequía ocurre cuando los niveles de precipitación son menores a los niveles normales registrados; esto ocasiona desequilibrio ecológico, afectaciones sociales y de la misma forma al sector agrícola; la Comisión Nacional del Agua ha identificado 106 municipios con alta vulnerabilidad de sequía, estos municipios se localizan en la región Noreste, Centro y vertiente del Pacífico que comprende a los estados de Baja California, Sonora, Coahuila, Chihuahua, Zacatecas, Jalisco, Michoacán, Querétaro, Ciudad de México y Guerrero (CONAGUA, 2018).

Las aguas subterráneas resultan relevantes ya que el 39.1% del volumen total concesionado de usos consuntivos proviene de agua subterránea que es extraída de 448 acuíferos, de los cuales se han detectado 105 como acuíferos sobreexplotados; en la región hidrológica-administrativa VIII Lerma Santiago Pacífico existen 128 acuíferos y de ellos 32 están identificados como sobreexplotados, siendo esta la región que cuenta con el mayor número de acuíferos y el mayor número de estos sobreexplotados (CONAGUA, 2018).

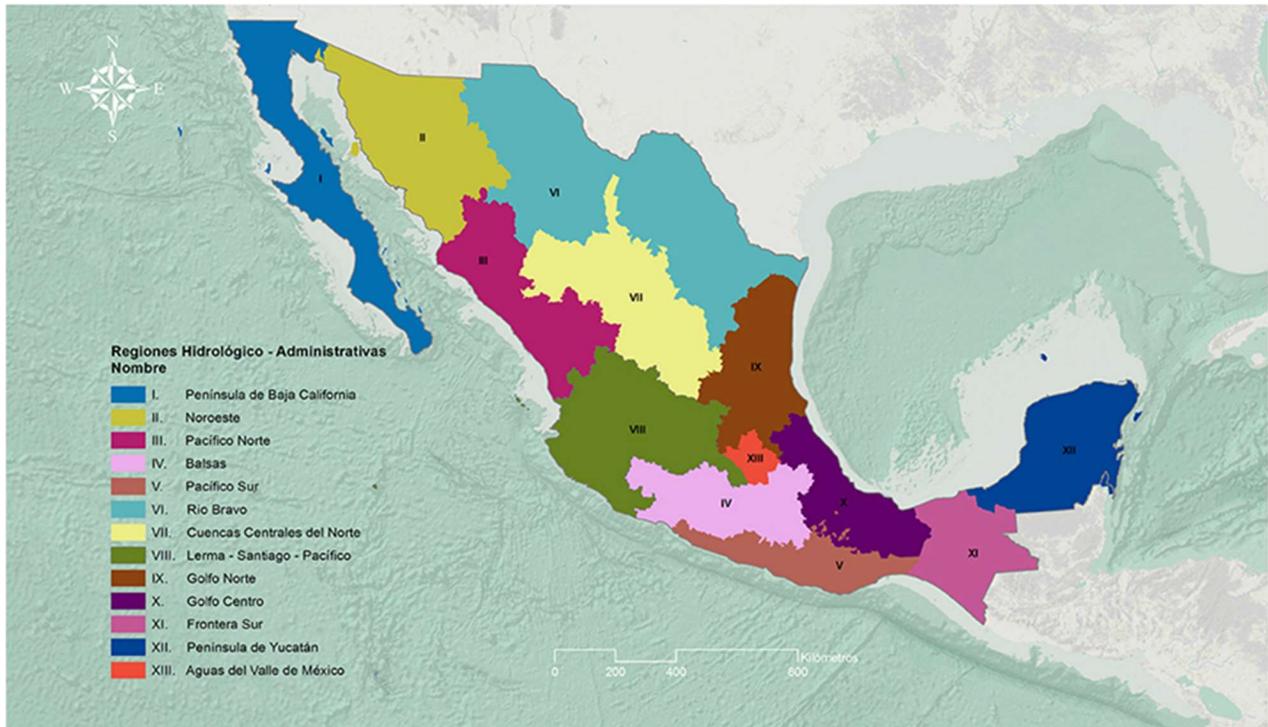
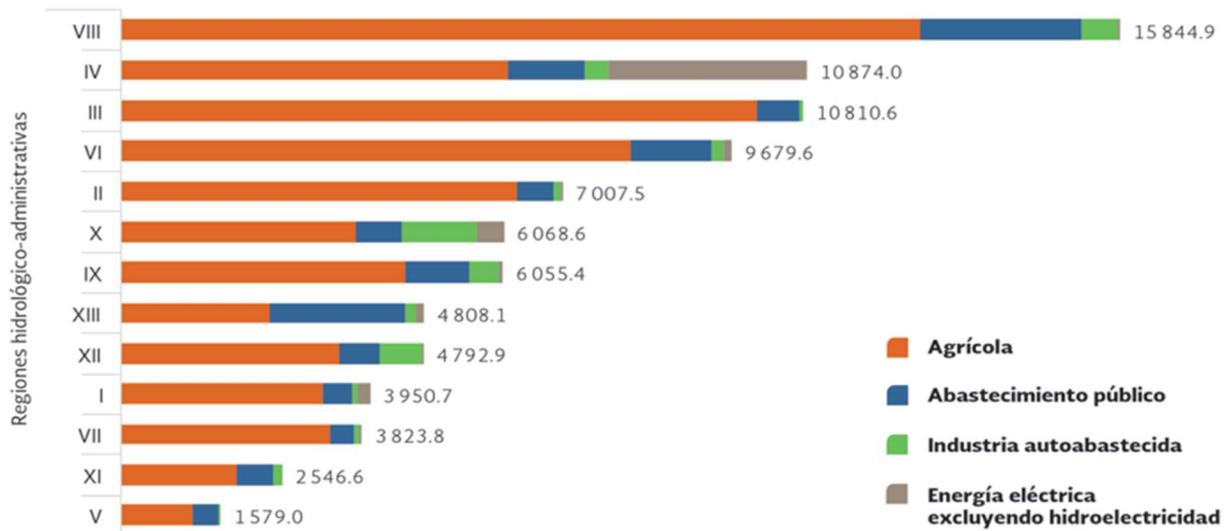


Ilustración 1 Regiones hidrológicas-administrativas (SEMARNAT, 2015)

Según datos de la CONAGUA, en 2018 el 14.4% del volumen total concesionado fue destinado al abastecimiento público, doméstico y público urbano y el 4.9% es destinado al uso industrial, agroindustrial, servicios y comercio (Gráfica 1).



Gráfica 1 Volumen concesionado para usos consuntivos (CONAGUA, 2018)

En 2015 las regiones hidrológicas-administrativas que más agua de abasto público concesionaron fueron la región XIII Aguas del Valle de México con un 44.7% respecto a su total concesionado, V Pacífico Sur con 26.8% y XI Frontera Sur con 20.7% (SEMARNAT, 2018).

Se puede identificar que la región hidrológica-administrativa XIII Aguas del Valle de México es la región con mayor solicitud de abastecimiento de agua pública y al mismo tiempo la más poblada; esta región es donde mayormente se han concentrado los esfuerzos para mantener niveles adecuados de abasto de agua.

La región hidrológica-administrativa XIII Aguas del Valle de México tiene una superficie total de 18,229 km^2 y está conformada por 105 municipios de tres entidades federativas (Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala) y las 16 alcaldías de la Ciudad de México (CDMX); la región hidrológica administrativa XIII es la más poblada y al mismo tiempo es la región de menor extensión territorial (Ilustración 2). Así mismo, se divide en dos subregiones de planeación, Valle de México y Tula. La subregión Valle de México está integrada de las 16 alcaldías de la CDMX, 50 municipios del Estado de México, 15 municipios de Hidalgo y 4 de Tlaxcala. La región de Tula se conforma por 12 municipios del Estado de México y 24 de Hidalgo.

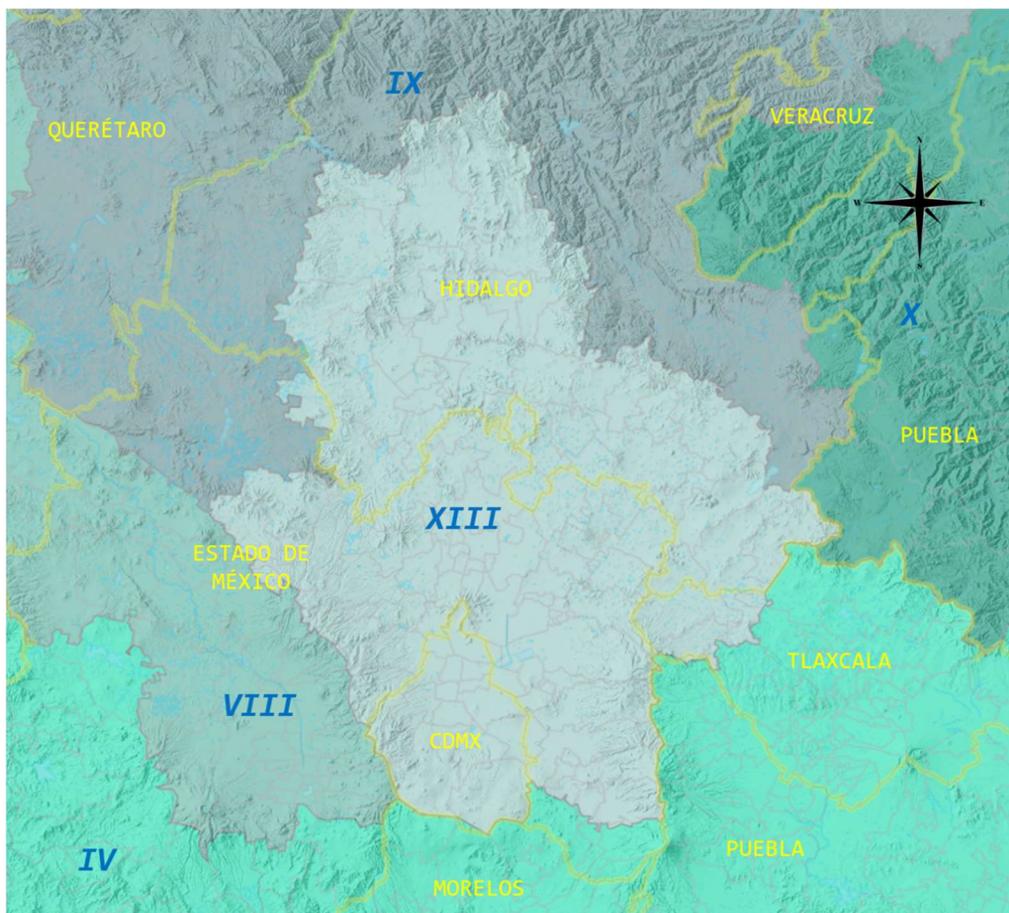


Ilustración 2 Región hidrológica-administrativa XIII, composición estatal y municipal.

Por otra parte, la cuenca del Valle de México forma parte de la región hidrológica administrativa XIII Aguas del Valle de México y alberga a la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) (Ilustración 3); la ZMVM es una de las concentraciones de población más grandes del mundo, la tercera, solo por debajo de Tokio y Seúl Incheon, y por arriba de Los Ángeles y Osaka (OCDE, 2015). La ZMVM se compone de las 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 Municipios de del Estado de México y un municipio del estado de Hidalgo. La población a nivel nacional al año 2020 era de 126,014 ,024 habitantes y tan solo el Estado de México concentra el 13.4% de la población nacional, siendo la entidad federativa con mayor porcentaje, la CDMX concentra el 7.3% de la población nacional ocupando el segundo lugar (INEGI, 2020). En cambio, la superficie de la CDMX es de 1,486 km^2 y el Estado de México de 22,357 km^2 , la suma de ambos representa el 1.22% de la superficie total del territorio nacional.

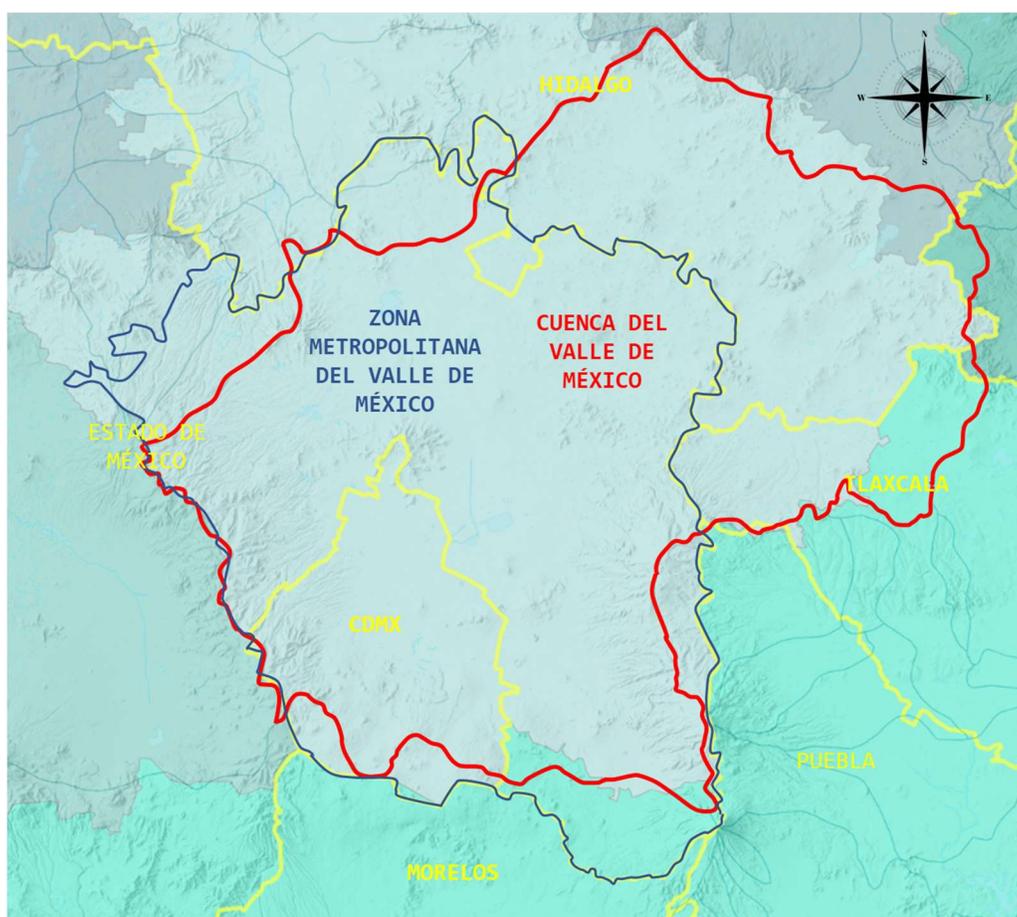


Ilustración 3 Cuenca del valle de México y Zona Metropolitana del Valle de México.

El abastecimiento público de agua a nivel nacional en 2017 se estimó en 12,628.6 hm^3 , de los cuales la Ciudad de México y el Estado de México demandaron el 19.52% (8.63% y 10.89% respectivamente); es decir 2,464.8 hm^3 de agua (CONAGUA, 2018). En otras palabras, la CDMX concentra el 7.3% de la población nacional y demanda el 8.63% del abastecimiento público del agua en tan solo el 0.08% del territorio nacional,

por lo tanto, el coeficiente de abastecimiento público de agua y población para la CDMX es 1.18 mientras que para el Estado de México es de 0.81; es decir, en la Ciudad de México se destina mayor volumen de agua para abastecimiento público per cápita respecto al Estado de México, es por esto que resulta relevante la búsqueda de soluciones que ayuden a mitigar la relación abasto público de agua-población en la CDMX.

I.1.1 La CDMX y el agua

Históricamente la Ciudad de México ha tenido estrecha relación con el agua, desde la fundación de Tenochtitlan el 13 de marzo de 1325 cuando distintas tribus indígenas llegaron de la zona de Aztlán y visualizaron lo anunciado por su deidad Huitzilopochtli (un águila sobre un nopal, devorando una serpiente) y asentaron su civilización en el Lago de Texcoco, donde hasta ahora ha permanecido la Ciudad Capital de los Estados Unidos Mexicanos (Museo Legislativo, 2021).

Actualmente el paisaje de la Ciudad de México está compuesto por grandes avenidas, edificios de oficinas, edificios habitacionales e industria que ocultan el paisaje natural sobre el cual los antiguos Mexicas edificaron su civilización y donde el manejo del recurso del agua se llevaba a cabo por medio de canales de barro que llevaban el agua hacia el núcleo de la ciudad. Desde la época prehispánica se edificaron grandes obras como el albarradón de Nezahualcóyotl (Ilustración 4) que consistía en una cerca de piedra y madera de 16 kilómetros de largo y 15 metros de ancho capaz de retener el agua y evitar inundaciones en la ciudad (IMTA, 2022), esta obra cumplió su función hasta la conquista de México en 1521 cuando fue destruida.

A partir del año 1555 varias inundaciones propiciaron proyectos hidráulicos, entre ellos la reconstrucción del albarradón de Nezahualcóyotl (Colegio de México, 2001); no obstante, las inundaciones persistían y en 1607 se decide abrir la cuenca del Valle de México; con la apertura del canal de Huehuetoca y su unión con el Tajo de Nochistongo se buscaba evitar las inundaciones en la ciudad; en el año 1794 se abre por segunda ocasión la cuenca del Valle de México por medio del Canal de Guadalupe, no obstante, las inundaciones siguieron presentándose. En 1867 se inician las obras del Gran Canal de Desagüe (Ilustración 4), conocido como el túnel Tequixquiac y concluyen hasta 1895 e inaugurado en 1900 por Porfirio Díaz; durante los años 1937 y 1942 se perfora por tercera ocasión la cuenca con lo que se conoce como el segundo túnel de Tequixquiac. En 1951 el centro de la ciudad quedó inundado durante 3 semanas y el agua alcanzó dos metros de altura (Legorreta, 1997). En 1975 se inician las obras del drenaje profundo que consiste de 164 km de túneles a 240 metros de profundidad y de hasta 6.5 metros de diámetro de tubería con una capacidad de conducción de 220 metros cúbicos por segundo (Colegio de México, 2001). Con el fin de reducir la vulnerabilidad de la Ciudad de México a las inundaciones y de responder a las nuevas demandas de drenaje de las zonas recientemente pobladas, se consideró la construcción de un segundo drenaje profundo conocido como Túnel Emisor Oriente (TEO) con 62 km de longitud y 7 m de diámetro con una capacidad de conducir $150 \text{ m}^3/\text{s}$ (Auvinet, Comulada, Méndez, & Rangel, 2012) (Ilustración 4).

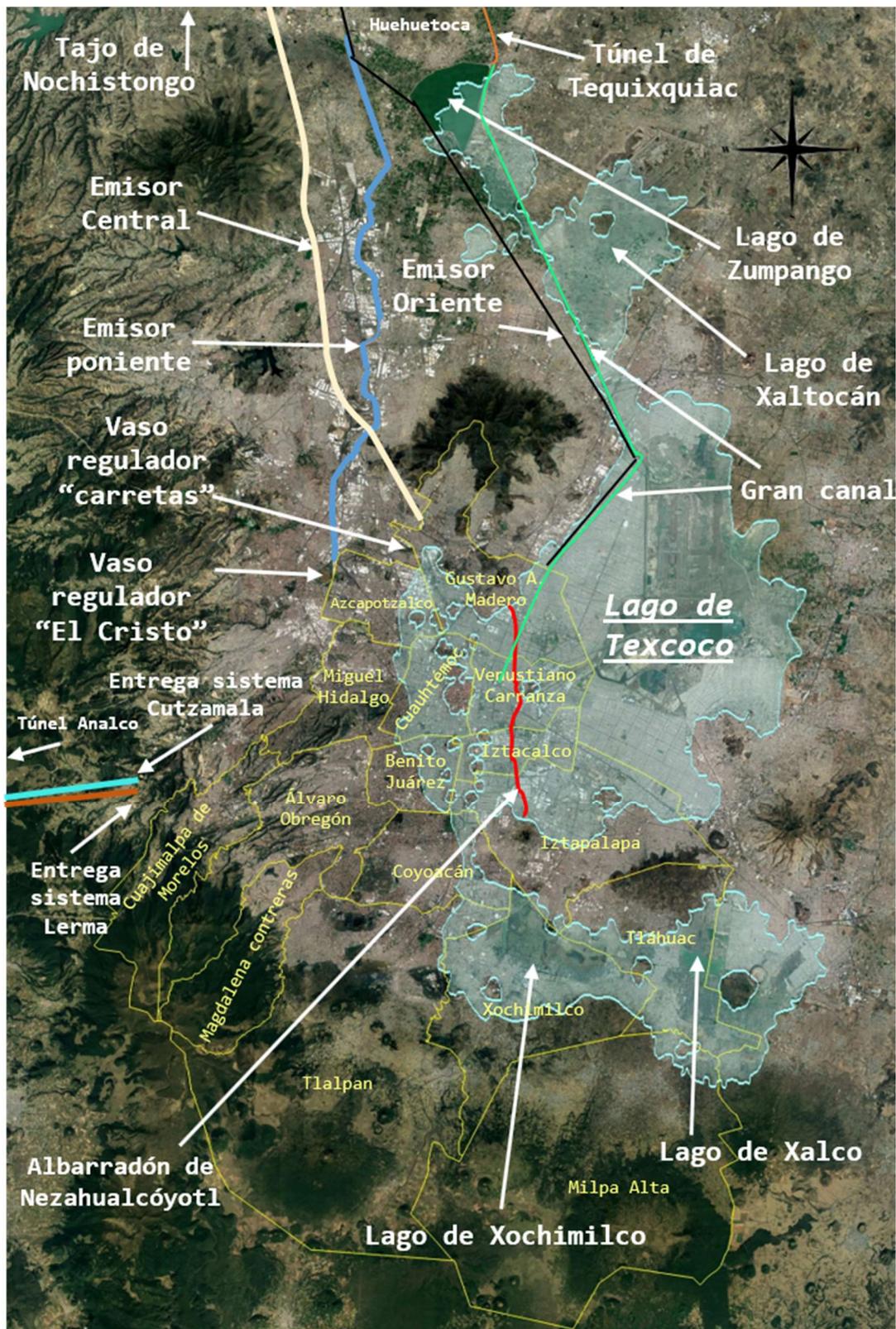


Ilustración 4 Antiguo lago de Texcoco y su huella en la CDMX

A principios del siglo XV el centro de la Ciudad de México ya dependía de manantiales alejados de ella para el suministro de agua potable: Chapultepec y Coyoacán. ya en el siglo XVII comenzó una dependencia de los manantiales de Santa Fe, al poniente de la ciudad, cuya agua era transportada en un acueducto de 6 km de longitud; un siglo después se construyeron nuevos acueductos provenientes de Tlalpan y San Ángel, al sur de la ciudad, y de Guadalupe al norte; a mediados del siglo XIX inició la explotación de agua subterránea con la construcción de pozos, y ya para el año 1902 el abasto de agua potable se estimaba en 862 litros por segundo de los cuales el 42 % provenía de pozos existentes en la ciudad.

Durante los siguientes años la demanda de agua potable se incrementó, esto debido al crecimiento demográfico, lo que obligó a la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento de agua y es así como en la década de 1940 se inician las obras para conducir el agua desde la cuenca del Lerma a través de un acueducto de 15 kilómetros sobre la sierra de las cruces y en 1951 las aguas del sistema Lerma (Ilustración 4), entran por primera vez a la Ciudad de México; desde entonces se ha recurrido a fuentes externas al territorio de la metrópoli para abastecer la demanda de agua (Colegio de México, 2001).

En la década de los setenta se presentó en la ciudad una crisis de agua lo que obligó a aumentar el caudal y se inició la construcción de 230 pozos de extracción extendiéndose hasta la región de Ixtlahuaca y Jocotitlán (al noroeste de la CDMX), lo que trajo consigo problemas en la región; estos hechos han marcado la relación entre el Estado de México y la Ciudad de México debido a los daños que causaron, lo anterior, obligó a los campesinos a tomar control de los acueductos y pozos del sistema Lerma disminuyendo el abasto de agua que llegaba a la ciudad (Torres, 2017).

En 1982 se pone en funcionamiento el sistema Cutzamala (Ilustración 4 e Ilustración 5) como respuesta a la gran demanda de la ciudad y los problemas de hundimientos provocados por la sobreexplotación de los mantos acuíferos, siendo este uno de los sistemas de abastecimiento de agua potable más grandes del mundo, no solo por los volúmenes de suministro que maneja (capacidad instalada de $19 \text{ m}^3/\text{s}$), sino por el desnivel que vence de aproximadamente $1,100 \text{ m}$ (CONAGUA, 2005). Actualmente, se estima que el Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (AZMCM) presenta un déficit de -507.236 hectómetros cúbicos al año ($\text{hm}^3/\text{año}$) con un estimado para el Derecho Humano del Agua de $83.186 \text{ hm}^3/\text{año}$ (SEMARNAT, 2020); estos datos indican que no es posible extraer más agua de los mantos acuíferos.

Por otra parte, en el año 2020 en la Ciudad de México existían 2,752,169 viviendas habitadas, de las cuales 2,491,496 (94.53%) disponían de agua entubada dentro de la vivienda, es decir, las 260,673 (4.48%) restantes no contaban con dicho servicio (GCDMX, 2021); además, tan solo en el 2019 el Sistema de Aguas de la Ciudad de México reportó más de 11,000 fugas (SACMEX, 2018); estas cifras son solo el preludeo de la problemática del agua en la CDMX aunado a la ineficacia de la gestión pública del agua debido a los volúmenes insuficientes para atender a la población y una distribución heterogénea.

Respecto a la continuidad del servicio de distribución de agua potable, el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), estima que el 26 % de los habitantes de la metrópoli no recibe la cantidad suficiente de agua y el 15% no cuenta con un servicio diario pues es dado por sistema de tandeo, esto se presenta en 10 alcaldías de la ciudad afectando a 358 colonias, ubicadas principalmente en las alcaldías de Tlalpan, Iztapalapa y Magdalena Contreras (Ilustración 6); la población sujeta a este régimen de abasto alcanza 1.8 millones de habitantes. (SACMEX, 2018).

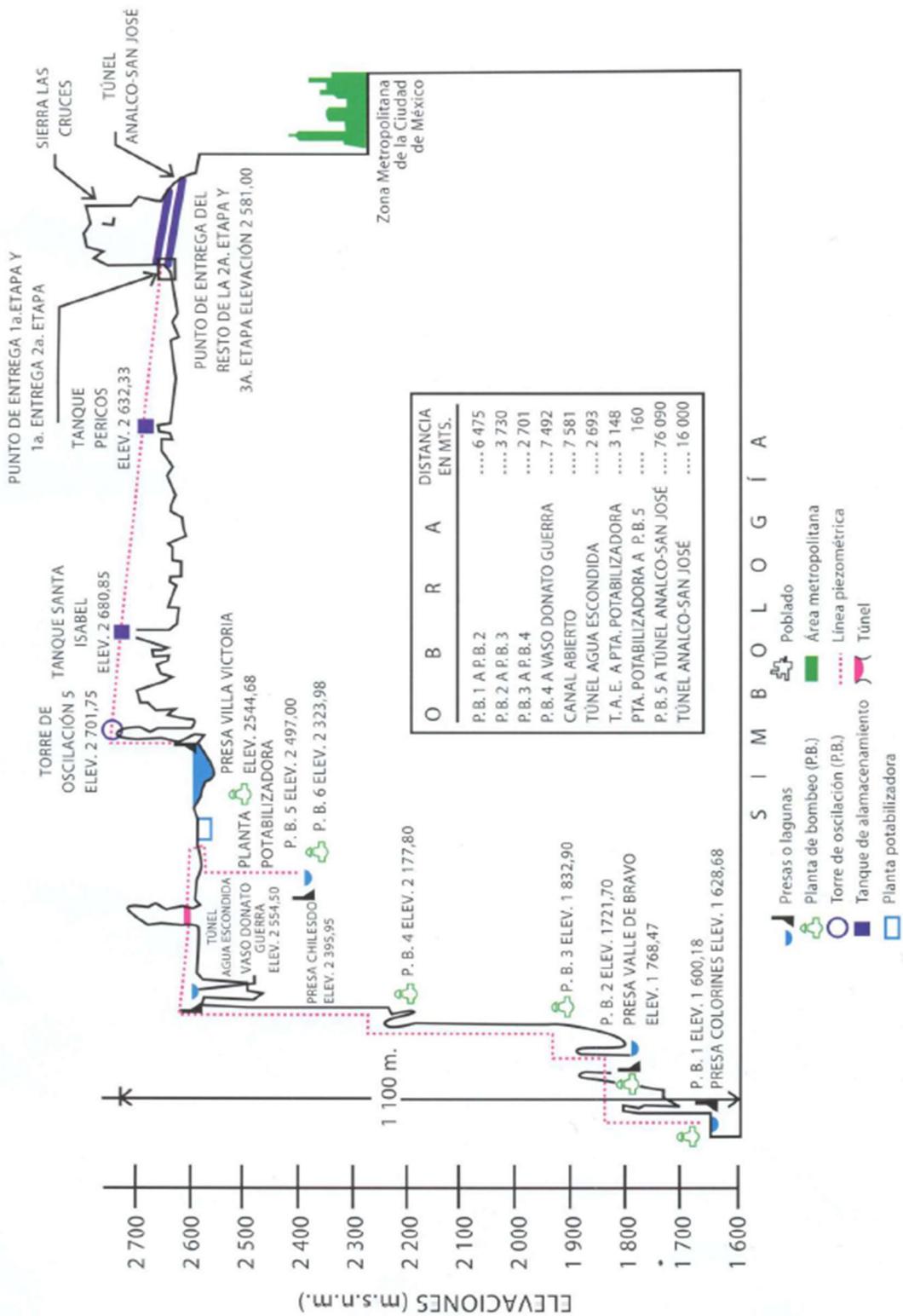


Ilustración 5. Perfil de Sistema Cutzamala (CONAGUA, 2005)

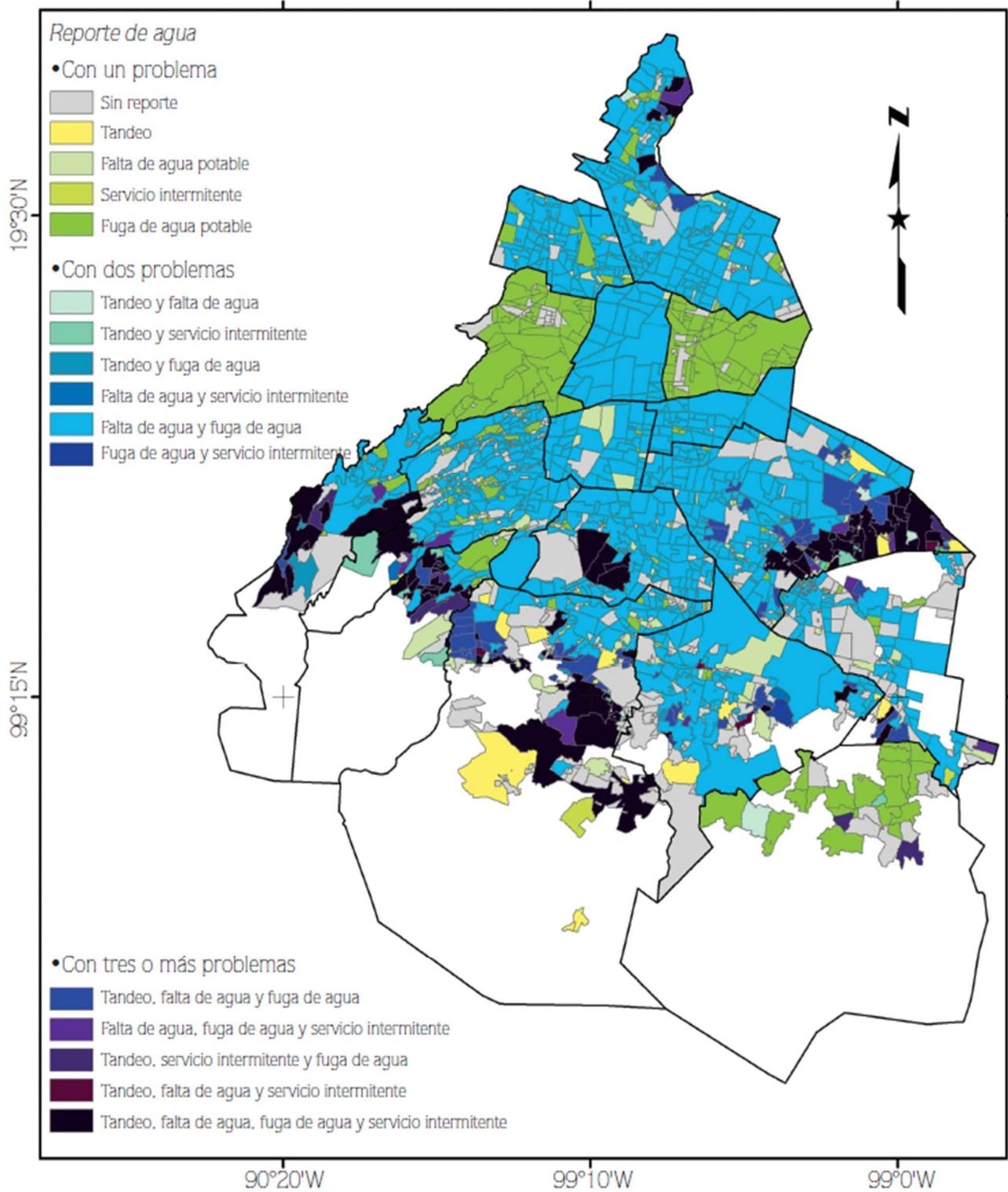


Ilustración 6 Desigualdad territorial de abastecimiento de agua en la CDMX (Flores, 2015)

Además, el crecimiento desmedido y desordenado de la CDMX ha bloqueado la interacción precipitación-suelo-infiltración encauzando el agua de lluvia y drenándola lo más rápido posible, cuando es un hecho que puede ser retenida, infiltrada, extraída, aprovechada y devuelta al medio natural. Se estima que por cada hectárea de suelo que se urbaniza en la Ciudad se reduce la recarga de acuíferos en 2.5 millones de litros de agua al año, esto trae consigo hundimientos diferenciales en la zona lacustre de la Ciudad de México (SEDEMA, 2020).

Según lo anterior, la Ciudad de México posee un coeficiente de abasto público de agua-población del 1.18, demandando el 8.63% del volumen total concesionado del país, si bien la participación de la CDMX en el Producto Interno Bruto (PIB) para el año 2020 fue la mayor con un 15.7% seguido por el Estado de México con el 9.0% (INEGI, 2021); esto no exime a la Ciudad de México de tomar responsabilidad y conciencia en su población sobre el uso del agua. De igual forma, la problemática debe ser extrapolada al territorio nacional pues existen entidades federativas, como Nuevo León y otras, que presentan dificultades en temporadas de secas para abastecer de agua potable a su población.

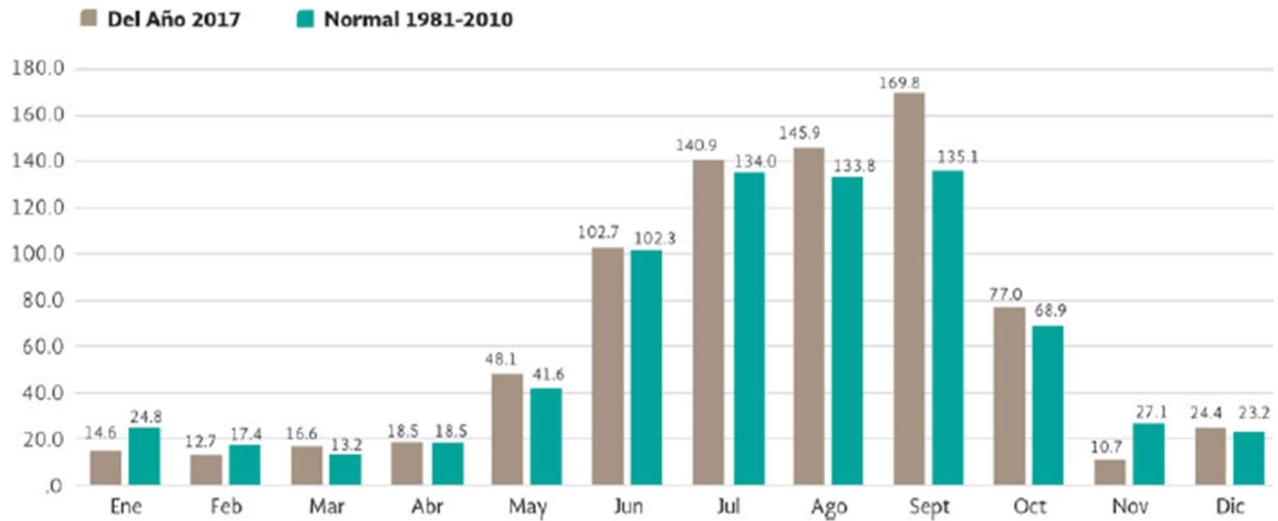
Son varios los factores que intervienen en la problemática de la escasez del agua en la Ciudad de México, entre ellos la gestión del agua, la falta de cultura del agua y el crecimiento demográfico cuya consecuencia es la sobreexplotación del recurso.

Para dar respuesta a la problemática del abastecimiento han surgido propuestas en las que se busca que la Ciudad de México aproveche el agua de lluvia en los meses de mayor precipitación (mayo-octubre), estas, buscan ser una alternativa que ayude a mitigar el desabasto de agua potable, disminuir inundaciones y al mismo tiempo recargar los mantos freáticos.

I.2 El agua pluvial: fuente de abastecimiento endémica temporal

La precipitación pluvial normal entre los años 1981- 2010 y del año 2017 de la región hidrológica administrativa XIII Aguas del Valle de México (Ilustración 1), fue de 648.9 mm y 451 mm respectivamente. La región hidrológica administrativa que mayor precipitación pluvial normal presentó en los mismos periodos fue la región XI Frontera Sur (Ilustración 1), con 1,841.9 mm y 1,986.7 mm respectivamente y la menor precipitación pluvial normal se presentó en la región I Península de Baja California (Ilustración 1), con 168.1 mm y 149.9 mm respectivamente; la precipitación pluvial nacional anual en 2017 alcanzó los 782 mm, mayor en un 5.6 % respecto al periodo 1981-2010 (CONAGUA, 2018).

El territorio nacional presenta lluvias bien definidas en la mitad del año iniciando en el mes de mayo y concluyendo en el mes de octubre a esto se le que se conoce como temporada de lluvias (Gráfica 2), a los meses que no conforman dicho periodo se le conoce como temporada de secas.



Gráfica 2. Precipitación normal a nivel nacional en el periodo 1981-2010 y el año 2017 (mm) (CONAGUA, 2018).

La precipitación es una variable que cambia espacialmente en función de la altitud, temperatura y la orografía; según la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) presenta el comportamiento espacial de la precipitación media anual en la Ciudad de México (Ilustración 7). De esta forma en la CDMX se podrían almacenar de 400 a 1,500 litros por metro cuadrado (l/m^2) al año; ello implica que si se cuenta con una superficie de captación de al menos $50 m^2$, se podrían almacenar de 20 a $75 m^3/año$.

Por lo tanto, el aprovechamiento del agua de lluvia, es posible en la CDMX mediante la implementación de un sistema de captación de agua pluvial, mismo sistema, solo puede ser viable como una alternativa de suministro, es por esto que el Sistema de Aguas de la Ciudad de México lo ha llamado *Sistema Alternativo* (SA).

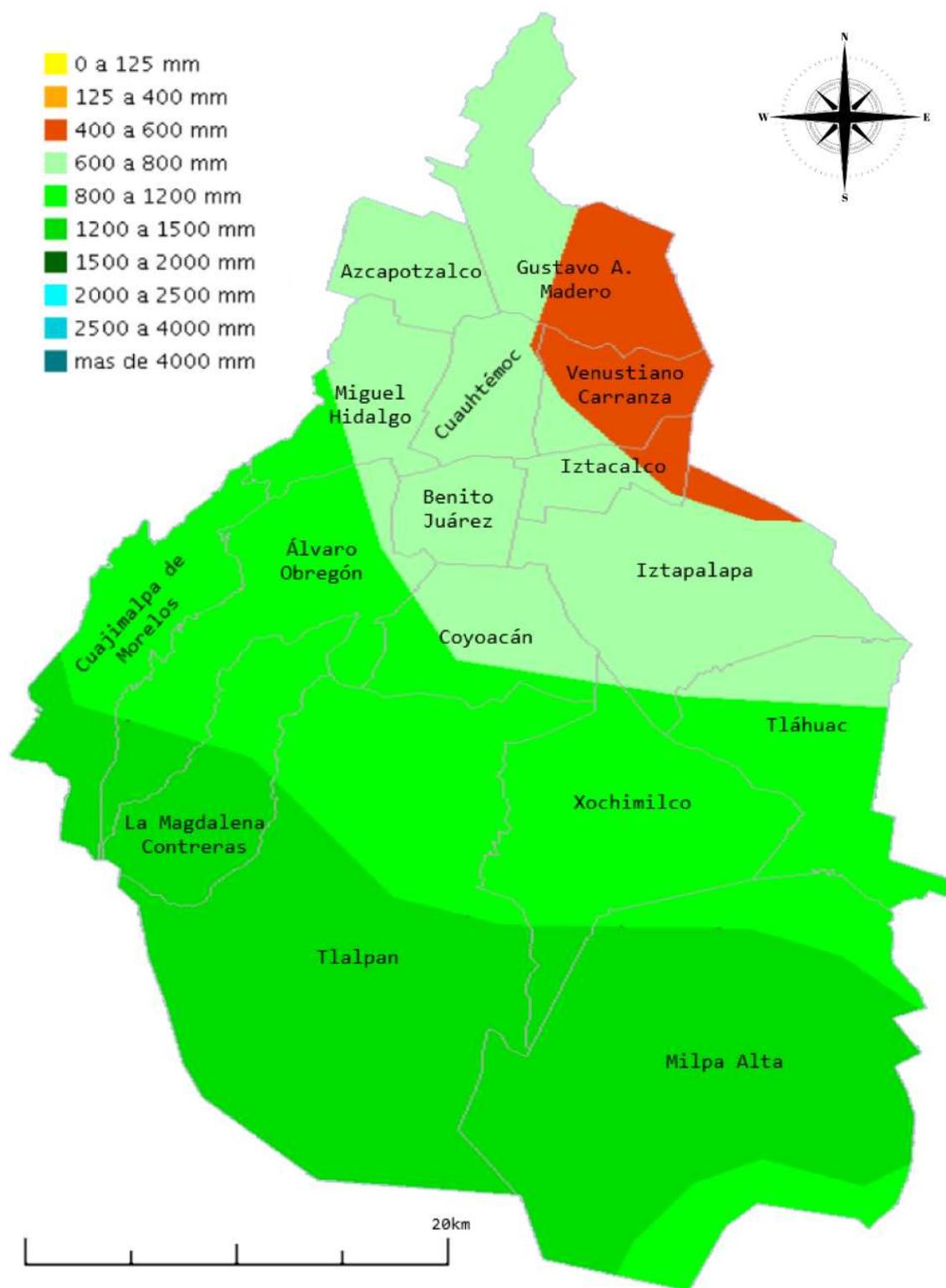


Ilustración 7 Precipitación media anual de la CDMX (CONABIO)

I.3 Marco jurídico

Los problemas ambientales conciernen a las ciencias exactas, naturales y sociales, pero al mismo tiempo son problemas que involucran decisiones políticas (CEPAL, 1997). En este sentido, el agua, al ser un tema en el que interfieren asuntos sociales, ambientales, económicos, entre otros, es necesaria la intervención del Estado para brindar los medios legales en los que es posible hacer uso del recurso hídrico, en consecuencia, es de exigencia contar con un marco jurídico que contenga las normas vigentes aplicables en el territorio nacional y de manera particular en la Ciudad de México.

De esta forma, enseguida, se realiza un desglose de la normativa vigente sobre el cual se sustenta la captación de agua pluvial en el territorio nacional y en la Ciudad de México.

CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS

Artículo 4. Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines.

Artículo 27. La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada.

LEY DE AGUAS NACIONALES

Artículo 1. La presente Ley es reglamentaria del Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales; es de observancia general en todo el territorio nacional, sus disposiciones son de orden público e interés social y tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable.

Como consecuencia de lo anterior surgió el Plan Nacional Hídrico (PNH) 2020-2024 (SEMARNAT, 2020) el cual constituye un instrumento rector de la política hidráulica nacional para lograr la seguridad y la sustentabilidad hídrica del País, dentro de sus objetivos prioritarios se menciona:

- *Garantizar progresivamente los derechos humanos del agua y el saneamiento, especialmente en la población más vulnerable.*
- *Aprovechar eficientemente el agua para contribuir al desarrollo sostenible de los sectores productivos*
- *Reducir la vulnerabilidad de la población ante inundaciones y sequías, con énfasis en pueblos indígenas y afroamericanos.*
- *Preservar la integralidad del ciclo del agua a fin de garantizar los servicios hidrológicos que brindan cuencas y acuíferos.*
- *Mejorar las condiciones para la gobernanza del agua a fin de fortalecer la toma de decisiones y combatir la corrupción.*

I.3.1 Marco jurídico de la CDMX

CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Artículo 9. Ciudad solidaria

F. Derecho al agua y a su saneamiento

1. Toda persona tiene derecho al acceso, a la disposición y saneamiento de agua potable suficiente, salubre, segura, asequible, accesible y de calidad para el uso personal y doméstico de una forma adecuada a la dignidad, la vida y la salud; así como a solicitar, recibir y difundir información sobre las cuestiones del agua.

2. La Ciudad garantizará la cobertura universal del agua, su acceso diario, continuo, equitativo y sustentable. Se incentivará la captación del agua pluvial.

3. El agua es un bien público, social y cultural. Es inalienable, inembargable, irrenunciable y esencial para la vida. La gestión del agua será pública y sin fines de lucro.

LEY DEL DERECHO AL ACCESO, DISPOSICIÓN Y SANAMIENTO DEL AGUA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Artículo 77. El Sistema de Aguas está facultado para:

IV.BIS “Revisar y aprobar los proyectos de los sistemas de recolección de agua pluvial”

Artículo 86 BIS 1. Las nuevas construcciones o edificaciones deberán contar con redes separadas de agua potable, de agua residual tratada y cosecha de agua de lluvia debiéndose utilizar esta última en todos aquellos usos que no requieran agua potable; así mismo, deberán contar con la instalación de Sistemas Alternativos de uso de agua pluvial

Artículo 125 BIS 3. El sistema de captación y recarga de agua pluvial al subsuelo deberá estar indicado en los planos de instalaciones y formará parte del proyecto arquitectónico, que debe ser presentado para el trámite del registro de Manifestación de Construcción o Licencia de Construcción Especial. Dicho mecanismo deberá ser evaluado y aprobado por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, así como contar con la aprobación de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda y de las Alcaldías.

Artículo 125 BIS 4. Todos los proyectos que estén sujetos al Estudio de Impacto Urbano deberán contar con un sistema de captación y recargas de agua pluvial al subsuelo.

REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES PARA EL DISTRITO FEDERAL

Artículo 53. Para las manifestaciones de construcción tipos B y C, se deben cumplir los siguientes requisitos:

I. Presentar manifestación de construcción ante la Administración a través del formato establecido para ello, suscrita por el propietario, poseedor o representante legal, en la que se señalará el nombre, denominación o razón social del o de los interesados, domicilio para oír y recibir notificaciones; ubicación y superficie del predio de que se trate; nombre, número de registro y domicilio del Director Responsable de Obra y, en su caso, del o de los Corresponsables, acompañada de los siguientes documentos:

d) Dos tantos de los proyectos de las instalaciones hidráulicas incluyendo el uso de sistemas para calentamiento de agua por medio del aprovechamiento de la energía solar conforme a los artículos 82, 83 y

89 de este Reglamento, sanitarias, eléctricas, gas e instalaciones especiales y otras que se requieran, en los que se debe incluir como mínimo: plantas, cortes e isométricos en su caso, mostrando las trayectorias de tuberías, alimentaciones, así como el diseño y memorias correspondientes, que incluyan la descripción de los dispositivos conforme a los requerimientos establecidos por este Reglamento y sus Normas en cuanto a salidas y muebles hidráulicos y sanitarios, equipos de extinción de fuego, sistema de captación y aprovechamiento de agua pluvial en azotea y otras que considere el proyecto.

Artículo 89. Las edificaciones nuevas no habitacionales y las de más de 1000 m² sin incluir estacionamiento, así como los establecimientos dedicados al lavado de autos, deben contar con redes separadas de agua potable, agua residual tratada y agua de lluvia debiéndose utilizar estas dos últimas en todos los usos que no requieran agua potable, de conformidad con lo establecido en la Ley de Aguas del Distrito Federal, las Normas y demás disposiciones aplicables en la materia.

Artículo 124. Las edificaciones nuevas de más de tres niveles deben contar con un almacenamiento con capacidad para satisfacer dos veces la demanda diaria de agua potable y estar equipadas con sistema de bombeo.

Toda construcción nueva de más de 200 m² de azotea deberá contar con un sistema de captación y aprovechamiento de agua pluvial de la superficie construida a nivel de azotea, para lo cual deberá contarse con una cisterna para este fin, dicho aprovechamiento se dará en todos aquellos usos que no requieran agua con calidad potable como inodoros, riego de áreas jardineadas y actividades de limpieza conforme a lo establecido en la Ley de Aguas del Distrito Federal y sus Reglamentos.

NORMA GENERAL DE ORDENACIÓN 27. DE LOS REQUERIMIENTOS PARA LA CAPTACIÓN DE AGUA PLUVIAL Y DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES

El Registro de Manifestaciones de Construcción B o C, así como la Licencia Especial correspondiente estarán condicionados a que el proyecto de construcción incluya pozos de absorción para agua pluvial. El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias, señalarán las especificaciones técnicas que debe cumplir la construcción de dichos pozos de absorción.

NORMA GENERAL DE ORDENACIÓN 4. ÁREA LIBRE DE CONSTRUCCIÓN Y RECARGA DE AGUA PLUVIAL AL SUBSUELO

Deberá implementarse un sistema alternativo de captación y aprovechamiento de agua pluvial, tanto de la superficie construida, como del área libre requerida por la zonificación, mecanismo que el Sistema de Aguas de la Ciudad de México evaluará y aprobará.

Dicho sistema deberá estar indicado en los planos de instalaciones hidrosanitarias o de instalaciones especiales y formarán parte del proyecto arquitectónico, previo al trámite del Registro de Manifestación de Construcción o Licencia de Construcción Especial.

Todos los proyectos sujetos al Estudio de Impacto Urbano deberán contar con un sistema alternativo de captación y aprovechamiento de agua pluvial y residual.

La autoridad correspondiente revisará que dicho sistema esté integrado a la obra. En caso de no acreditarlo, al momento del aviso de terminación de obra correspondiente, la autoridad competente no otorgará la autorización de uso y ocupación.

NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA EL DISEÑO Y EJECUCIÓN DE OBRAS E INSTALACIÓN HIDRÁULICA

1.2.3. Sistemas de alcantarillado pluvial

2.5.3. Redes de alcantarillado pluvial

6.3. Redes de evacuación de aguas negras y pluviales

6.3.4. Instalación de tuberías de redes de evacuación de aguas negras y pluviales

De esta forma, el diseño de un sistema alternativo de captación y aprovechamiento de agua pluvial ya se encuentra considerado en la normativa de la Ciudad de México. De ahí la importancia de disponer de metodologías y herramientas adecuadas para su diseño.

I.4 Sistema de captación de agua de lluvia

Un sistema de captación de agua de lluvia (SCALL) consiste en los elementos necesarios para: captar el agua pluvial, conducir el agua hasta el punto de almacenamiento (canales, tuberías, dispositivos de control, etc.), sistema de tratamiento del agua captada y sistemas de retención e infiltración pluvial (Ilustración 8).

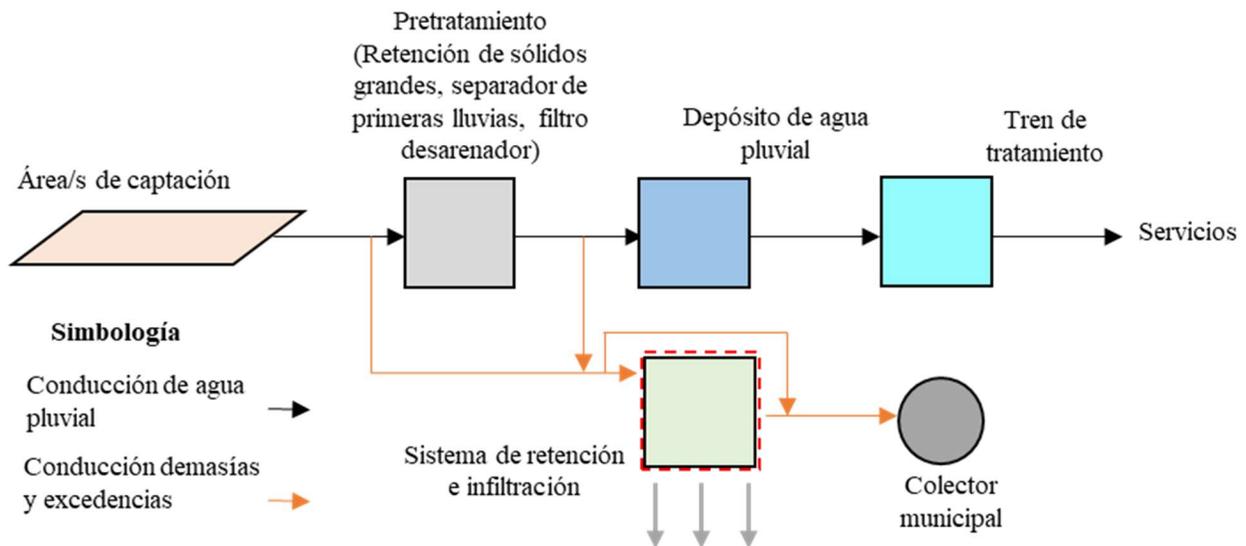


Ilustración 8 Diagrama de caja negra de un sistema de captación de agua de lluvia

Un SCALL es sustentable porque no requiere energía significativa para su operación. El agua se entrega a domicilio sin inversión en transporte, pero si se requiere de una inversión inicial en instalaciones, equipos y

todo lo necesario para su correcto funcionamiento; además, el agua de lluvia en muchos casos tiene mejor calidad que otras fuentes de abastecimiento como pozos e, incluso, agua de la red (IMTA, 2014).

La implementación de un sistema de captación de agua de lluvia requiere de datos que permitan dimensionar el sistema; debido a la naturaleza de la lluvia, un sistema de captación de agua pluvial depende de las precipitaciones en la región, por lo que el volumen de almacenamiento es variable y debe ser determinado con base en datos de precipitación de cada zona y la demanda de cada proyecto en particular, por lo tanto, es necesario recurrir a los conceptos de la hidrología y la hidráulica.

I.4.1 Proyectos relacionados

En distintos países y desde épocas prehispánicas hasta nuestros días, incluyendo México, se tienen registro de sistemas de captación de agua de lluvia; estos han evolucionado con el tiempo, pero el objetivo final es el mismo, aprovechar el agua de lluvia. A continuación, se describen algunos de ellos.

En la cultura Maya se tiene registro de la existencia de depósitos subterráneos llamados *chultunes*; que proviene de la contracción *Chulub* (agua de lluvia) y *Tun* (piedra labrada), utilizados para captar el agua de lluvia y abastecer a los hogares; estos depósitos se realizaban perforando en piedra caliza y se hacían de forma variada, compuestos de una o de varias cámaras conectadas entre sí, con una boca y tapa (Ilustración 9) (Pinto & Acevedo, 1993).

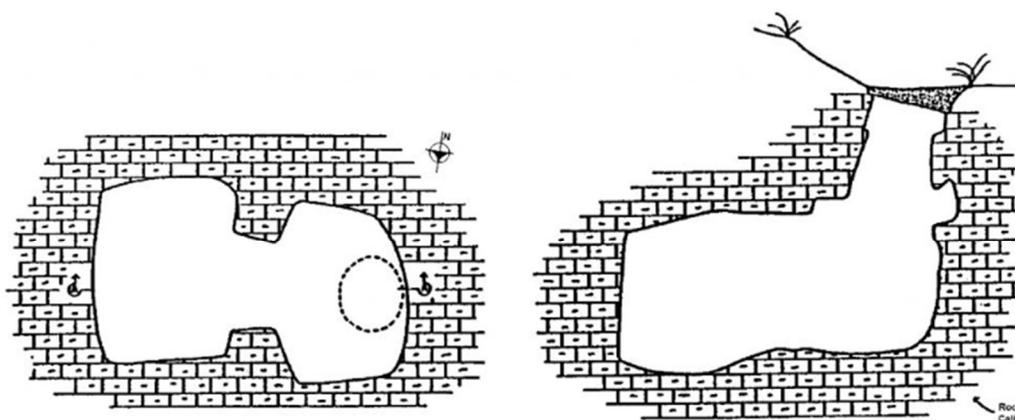


Ilustración 9 Esquema general de un Chultun (Pinto & Acevedo, 1993)

En la ciudad de Tokio (Japón) se han implementado sistemas de captación de agua pluvial (Ilustración 10). A nivel comunitario se han colocado sistemas llamados *Rojison*, los cuales pueden encontrarse en la vía pública; esta instalación recibe el agua de lluvia del techo de la casa y se almacena en un pozo; para la extracción del agua se utiliza una bomba manual, el agua es utilizada en riego, aseo de fachadas y pisos, combatir incendios, control de inundaciones y asegurar agua en situaciones de emergencia (Ballén, Galarza, & Ortiz, 2006).

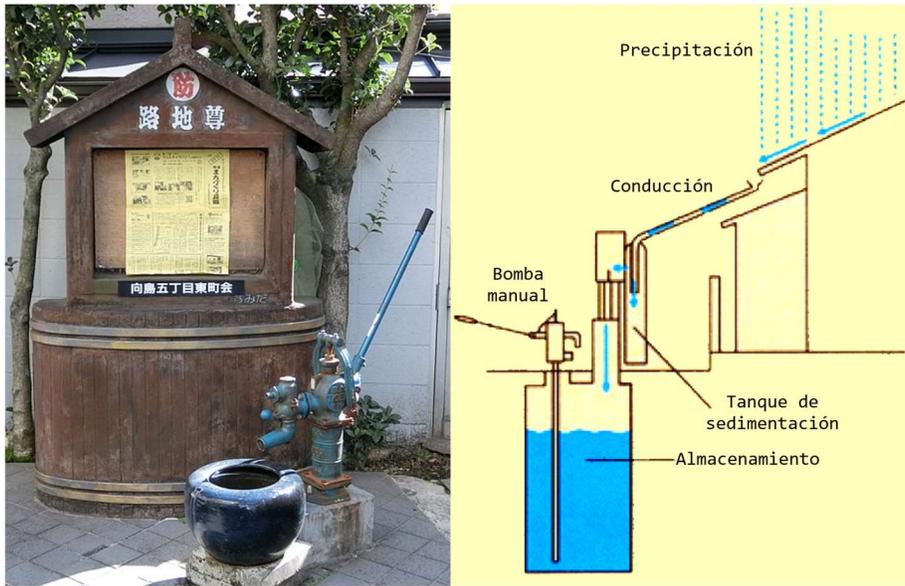


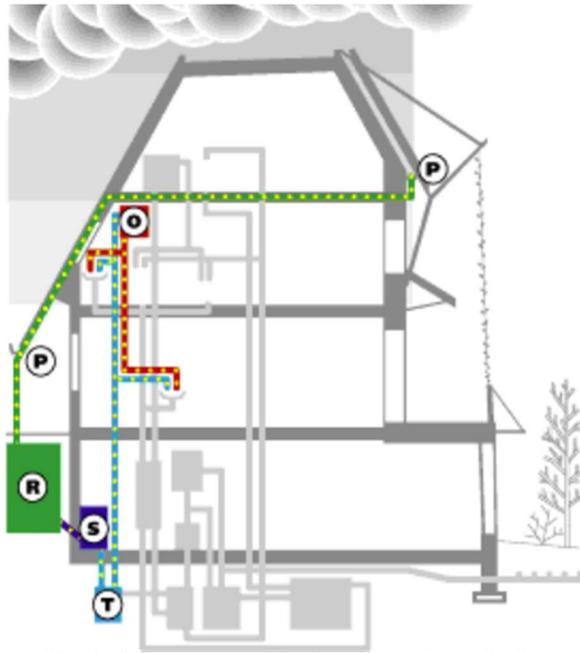
Ilustración 10 Rojison, sistema de captación de agua pluvial en Japón

Healty Hause, es un proyecto residencial ubicado en Toronto-Canadá donde el agua para consumo humano se suministra por medio de un sistema de canales que conducen el agua de lluvia hacia un tanque de almacenamiento donde es tratada con cal, esta es utilizada para reducir la acidez del agua y darle un sabor fresco, posteriormente el agua pasa a través de un filtro de arena fina y carbón activado para remover todas las impurezas y por último es sometida a un proceso de desinfección (Ballén, Galarza, & Ortiz, 2006) (Ilustración 11).

En México existen proyectos que han buscado fuentes de abastecimiento de agua distintas a la conducción del recurso de otras zonas, entre los que se encuentra la captación de agua de lluvia, tanto que se considera en la legislación actual, pero también se propone el uso del vapor de agua.

Isla Urbana es un proyecto conformado por diseñadores, urbanistas, ingenieros, antropólogos, educadores y artistas dedicados a demostrar la viabilidad de la captación de agua de lluvia en México. El proyecto fue fundado en colaboración con el Instituto Internacional de Recursos Renovables A.C. en 2009 en la Cultura Maya, una colonia popular al sur de la Ciudad de México. Con un enfoque ambiental y social, el trabajo de Isla Urbana se ha enfocado en aprender a captar agua de lluvia de la forma más práctica posible para poder abastecer a comunidades marginadas (Solución Pluvial, 2022)

En 2019 Isla Urbana reportó la instalación de 10,126 sistemas de captación de agua de lluvia y tan solo en la ciudad México cuentan con 17,134 sistemas; para 2021 los sistemas de captación de Isla Urbana llegaron a 14 estados de la república mexicana y a países como Brasil, Chile, Honduras y Panamá (Solución Pluvial, 2022).



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

Ilustración 11 Esquema general del sistema de aprovechamiento de agua pluvial Healty House (Ballén, Galarza, & Ortiz, 2006)

Jugo de nube es un proyecto académico piloto desarrollado en 2013 por la Dirección General de Atención a la Comunidad (DEGACO) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) a través del Programa Universitario de Estrategias para la Sustentabilidad y coordinado por Mireya Imaz Gispert, en el cual se busca la cosecha de agua de lluvia y su aprovechamiento para consumo humano. Es un proyecto localizado en el Edificio de Programas Universitarios en Ciudad Universitaria con una superficie de captación de 193.22 m² y un almacenamiento de 36,000 litros de agua; este proyecto destaca por el monitoreo a cargo de la Dirección General de Servicios Médicos y el Instituto de Geofísica de la UNAM, donde se determina que el agua cosechada cumple con las características para consumo humano según la NOM-127-SSA-1994 (DOF, 1996; López, 2017).

El monitoreo del agua de lluvia cosechada del proyecto Jugo de nube, es un referente para demostrar que es apta, incluso, para consumo humano.

En 2011 un grupo de investigadores del Colegio de Postgraduados en coordinación con el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), presentaron un estudio realizado en la Ciudad de México en el cual mediante la condensación de la humedad del agua se recolectaron 1.98 litros de agua cada 15 horas al utilizar

un higroimán; el higroimán es una variante de un sistema de refrigeración donde se alcanza el punto de rocío del agua; según los resultados obtenidos del estudio, en promedio se consumieron $3 \frac{kW}{h}$ lo que arroja que 1 litro de agua costaría producirse \$ 1.80, lo que para ese entonces era un costo menor que el costo por litro del agua purificada comercial (Olivas, Salinas, & Velez, 2011).

En el año 2018 el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) hace obligatorio, a los nuevos proyectos arquitectónicos de la Ciudad, la implementación de sistemas de captación de agua pluvial y su reaprovechamiento; para ello, el SACMEX dispone de una guía de elaboración de estos sistemas que ayuda al dimensionamiento de estos (SACMEX, 2020). El dimensionamiento del depósito de almacenamiento de agua de lluvia se propone en función de un periodo de retorno, sin embargo, se debería hacer a partir de la disponibilidad de agua de lluvia y de las demandas de cada proyecto en particular; en el título II.1 se profundizará sobre dicha guía. Por otra parte, los proyectos Jugo de nube e Isla Urbana se concentran en retener un volumen de agua de lluvia y no evalúan el uso que se le da a dicha agua, esto provoca que, al igual que el SACMEX, los depósitos de agua pluvial no estén debidamente dimensionados, un adecuado entendimiento del comportamiento de dicho depósito provocaría que en cualquier proyecto donde se implemente la captación de agua de lluvia se instalen depósitos adecuados para las condiciones requeridas.

I.5 Conceptos hidrológicos

La hidrología es la ciencia que trata sobre la ocurrencia, circulación y distribución del agua sobre y debajo de la superficie terrestre (Pizano, 2012). Los fenómenos hidrológicos son complejos y es posible que nunca se les entienda en su totalidad. Un sistema hidrológico se define como una estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera, que acepta agua y otras entradas, opera en ellas internamente y las produce como salidas. Los procesos que ocurren en este sistema hidrológico, se le denomina ciclo hidrológico (Chow, 1994).

I.5.1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es un sistema (Ilustración 12) cuyos componentes pueden agruparse en subsistemas del ciclo total tal como el agua atmosférica que contiene a los procesos de precipitación, evaporación, interceptación y transpiración; el sistema de agua superficial que contiene los procesos de flujo superficial, escurrimiento superficial, nacimientos de agua superficial y subterráneas, y escurrimiento hacia ríos y océanos; y el sistema de agua subsuperficial que contiene los procesos de infiltración, recarga de acuíferos, flujo subsuperficial y flujo de agua subterráneas. (Chow, 1994). Los principales componentes que intervienen en la captación de agua de lluvia son: precipitación, evaporación, infiltración y escurrimiento.

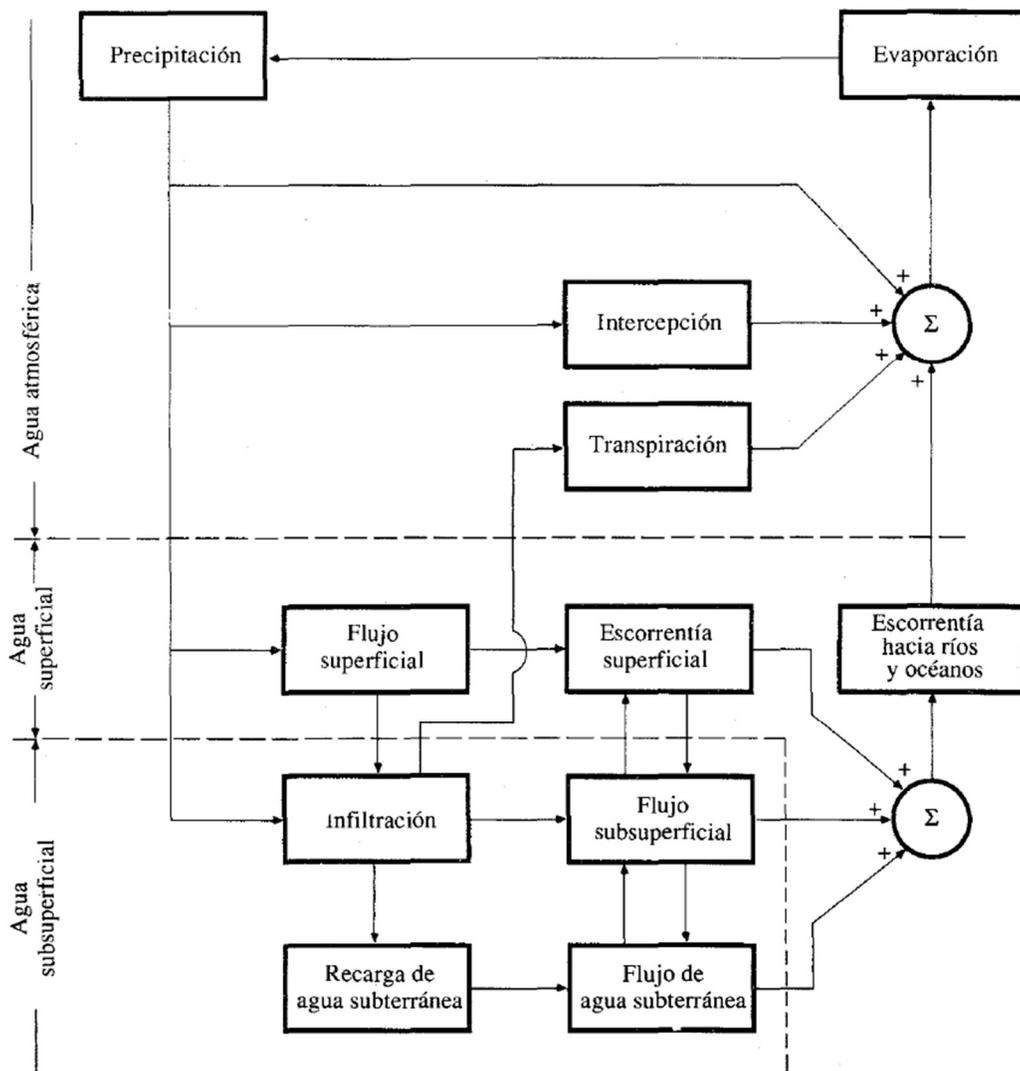


Ilustración 12 Representación en diagrama del ciclo hidrológico global (Chow, 1994)

I.5.2 Precipitación

La precipitación es producto del agua en estado gaseoso (vapor de agua o humedad) que se encuentra en la atmósfera, el cual al enfriarse se condensa y en función de otros procesos físicos puede caer a la superficie terrestre en estado líquido (lluvia y llovizna) y sólido (nieve y granizo) (Chow, 1994).

I.5.2.1 Medición de la precipitación

En el campo de la hidrología es esencial contar con una base de datos confiable y de registro histórico amplio. La lluvia es el componente del ciclo hidrológico mayormente medido. La medición de la precipitación se

realiza de forma directa/in situ con pluviómetros y pluviógrafos o de forma indirecta con radares meteorológicos o satélites (Sánchez & Cafaggi, 2019).

I.5.2.1.1 Pluviómetro

Un pluviómetro (Ilustración 13) es un instrumento que mide la cantidad de agua precipitada en un periodo de tiempo (generalmente 24 horas) en un determinado lugar; la unidad de medida es milímetros (*mm*). El pluviómetro consiste en un recipiente abierto, por lo general de forma cilíndrica. La altura de la precipitación captada en un pluviómetro se mide por medio de una probeta o una varilla graduadas (Sánchez & Cafaggi, 2019).

I.5.2.1.2 Pluviógrafos

Los pluviógrafos (Ilustración 13) miden la cantidad de agua precipitada y el tiempo en que ocurre. La diferencia con un pluviómetro es que este registra el tiempo y la precipitación; el término pluviógrafo es el empleado por la Organización Mundial de Meteorología (OMM). Los “pluviómetros automáticos” que registran la lluvia en periodos de tiempo menores a 24 horas, también pueden considerarse pluviógrafos, entre ellos, pluviómetros de pesaje, pluviómetro de flotador o pluviómetros de balancín o cubeta basculante.

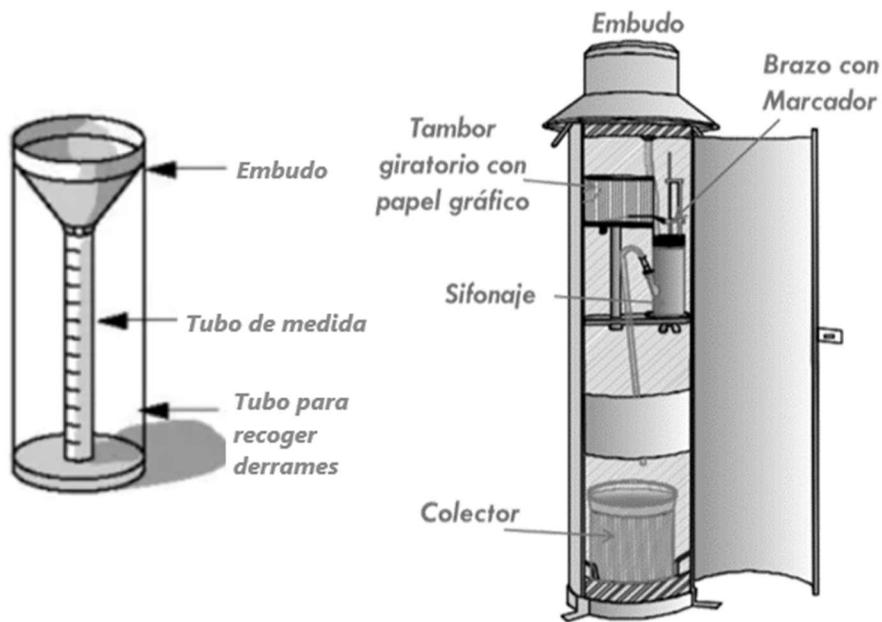


Ilustración 13 Pluviómetro (izquierda) y pluviógrafo de flotador (derecha)

I.5.2.1.3 Fuentes y productos de información

En México, existen distintas dependencias de gobierno y académicas que disponen de sistemas de medición de lluvia. Algunos de ellos se describen a continuación.

A nivel nacional, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a través de la Coordinación del Servicio Meteorológico Nacional dispone de información registrada en las estaciones climatológicas convencionales del país, como la precipitación anual, la precipitación media mensual y precipitación diaria almacenada en el CLICOM (*CLImatology COMuting*) desarrollado por las Naciones Unidas.

En cambio, en la Ciudad de México la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) cuenta con el Observatorio Hidrológico del Instituto de Ingeniería que mide la lluvia acumulada cada minuto de tiempo y con el Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario (PEMBU).

Por otra parte, el SACMEX dispone de un sistema de medición de 77 estaciones de lluvia acumulada en 30 minutos en tiempo real.

Resultado del análisis de registros de lluvia de 30 años o más sistemas de medición de lluvia, tanto el SACMEX en la ciudad de México como la Secretaría de Comunicaciones y transportes (SCT) y el centro de Prevención de Desastres (CENAPRED) a nivel nacional, disponen de mapas de isoyetas de precipitación y/o intensidad para diferentes duraciones y periodos de retorno (Ilustración 14), esta información es relevante cuando la información de precipitación analizada no es congruente o se dispone de pocos años de registro.

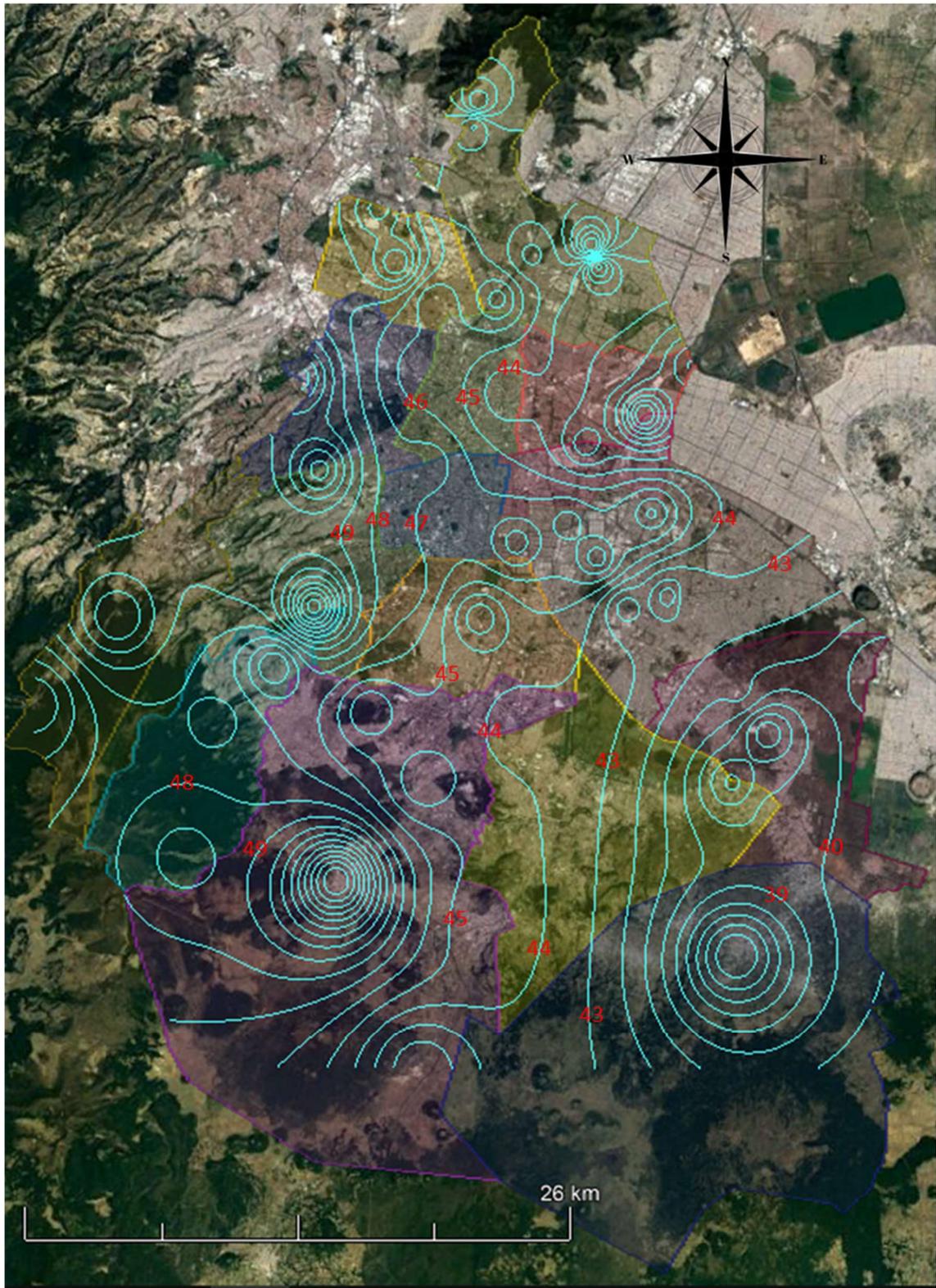


Ilustración 14 Mapa de isoyetas de precipitación de 60 minutos y 10 años de periodo de retorno de la CDMX acotadas a cada milímetro (SACMEX, 2018)

I.5.2.2 Hietograma

Un hietograma (del griego *hietos*, lluvia) es una gráfica de barras que representa la variación de la lámina de lluvia o intensidad de lluvia en función del tiempo, un hietograma expresa la precipitación de una tormenta concreta. (Ilustración 15). Para la elaboración de un hietograma para un incremento de tiempo cualquiera (minutos, horas, días, meses), bastará con disponer de datos de lluvia para periodos de tiempo iguales o menores al requerido.

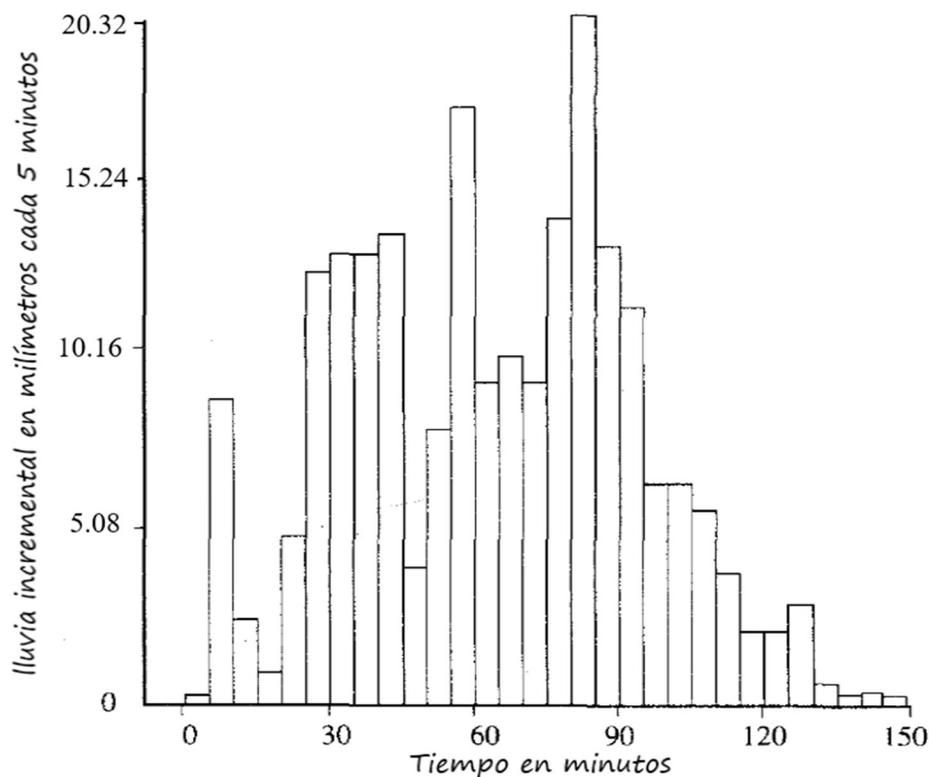


Ilustración 15. Hietograma de una tormenta de 150 minutos de duración en intervalos de 5 minutos. Modificado de (Chow, 1994)

I.5.2.3 Lluvia media

Para determinar la lluvia media en una superficie, existen diversos métodos; algunos de ellos se describen a continuación.

1.5.2.4 Método de la media aritmética

Es el método más sencillo para determinar la lluvia media y evalúa la precipitación total registrada de las n estaciones climatológicas, dividida sobre el total de las estaciones contenidas en el área, como:

$$P_m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} P_i \quad (1)$$

Donde P_m es la precipitación media del área en mm , n es el número de estaciones climatológicas contenidas en el área y P_i es la precipitación de la estación i en mm .

La principal limitación de este método es que considera la precipitación uniforme en el área cuando en realidad la lluvia no tiene ese comportamiento. Para que los resultados sean satisfactorios es necesario que la distribución de las estaciones sea lo más uniforme posible.

1.5.2.5 Método de los polígonos de Thiessen

El método de los polígonos de Thiessen o método de áreas de influencia establece que en cualquier punto la lluvia es igual a la que se registra en el pluviómetro más cercano, luego la lluvia registrada en un pluviómetro dado se aplica hasta la mitad de la distancia de la siguiente estación pluviométrica en cualquier dirección. El método original no toma en cuenta la influencia de la orografía.

Para calcular la precipitación media es necesario evaluar el área de influencia de cada estación y su respectiva precipitación, esto se hace mediante la elaboración de polígonos de Thiessen que se trazan de la siguiente forma (Ilustración 16):

- Se hace una triangulación uniendo todos los puntos más cercanos que representen las estaciones con datos de precipitación
- Se traza la mediatriz de cada lado de cada triángulo (las 3 mediatrices de cada triángulo van a coincidir en un punto dentro o fuera del mismo) las mediatrices se prolongan fuera del área de estudio.
- Los polígonos formados por las mediatrices serán el área de influencia de cada estación contenida dentro de la misma.

Así la precipitación media se calcula como:

$$P_m = \frac{1}{A} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} A_i \cdot P_i \quad (2)$$

Donde A es el área total de la zona de estudio en km^2 y A_i es el área de influencia del polígono i en km^2 .

1.5.2.6 Método de las isoyetas

El método de las isoyetas consiste en interpolar los valores de la lámina de lluvia de los pluviómetros y formar curvas de igual precipitación, llamadas isoyetas; la elaboración de un mapa de isoyetas se realiza de la siguiente manera (Ilustración 16):

- Se hace una triangulación uniendo los puntos de cada estación.
- Se encuentran los puntos de igual precipitación, para ello:
- Se define el valor de las isoyetas que se desean trazar en múltiplos equidistantes.
- Para un punto P_1 unido con un punto P_2 con valores de precipitación distintos se interpolan los valores intermedios con referencia a los múltiplos equidistantes seleccionados previamente, otra interpretación de este paso es escalar la distancia que hay del punto P_1 unido con un punto P_2 tal que los valores intermedios sean equidistantes respecto a los múltiplos seleccionados anteriormente.
- En cada línea de unión de los puntos se hacen marcas de los valores de la interpolación o escala.
- Se une con líneas continuas de cada una de las marcas del mismo valor
- Se suavizan las isoyetas

La precipitación media del área de estudio utilizando el método de las isoyetas es:

$$P_m = \frac{1}{A} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} A_i \cdot P_i \quad (3)$$

Donde n es el número de espacios generados entre isoyetas, A_i es el área entre isoyetas en km^2 y P_i es la precipitación media del área entre isoyetas en mm .

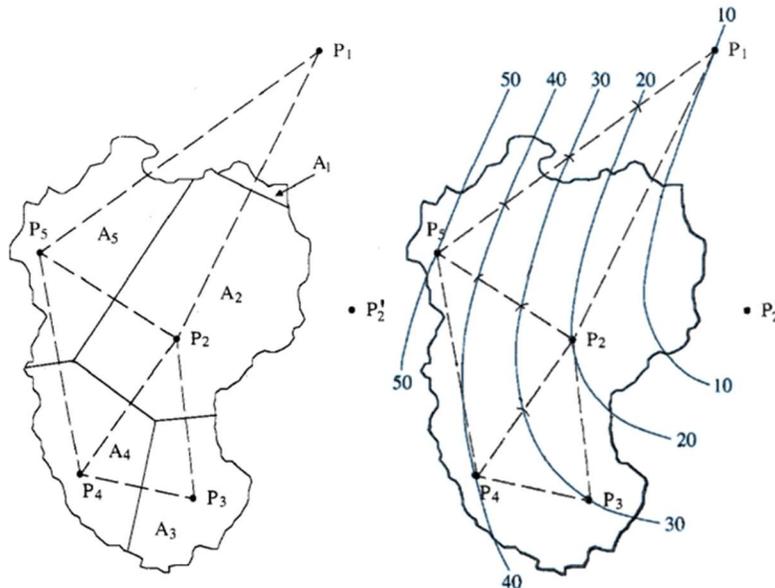


Ilustración 16 Esquema de método polígonos de Thiessen (izquierda) y método de las isoyetas (derecha) (Chow, 1994)

Cuando dentro del área de estudio, no se dispone de estaciones climatológicas, generalmente se utiliza la estación más cercana o se estiman o interpolan los datos con dos o más estaciones climatológicas. En este último caso, se utiliza el método del Inverso de la Distancia (IDW, por sus siglas en inglés), o cualquier método de interpolación. El método IDW, asume que las predicciones son una combinación línea de los datos como:

$$Z(j) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot Z(i) \quad (4)$$

Donde $Z(j)$ es el valor estimado en el punto interpolado j , N es el número de observaciones vecinas usadas para la estimación y λ_i es el peso dado al valor observado $Z(i)$.

El valor λ_i es:

$$\lambda_i = \frac{d_{ij}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{ij}^{-p}} \quad (5)$$

Donde p es el parámetro del exponente que controla que tan rápido los pesos de los puntos tienden a cero conforme aumenta la distancia de interpolación y d_{ij} es la distancia que separa a los puntos interpolados. Entre mayor sea p , mayor es el peso dado a los puntos más cercanos y por consiguiente se obtienen superficies más continuas o suaves y las predicciones tienden hacia el promedio de la muestra. Los valores p usualmente están entre 1 y 3, donde 2 es el valor más común.

1.5.2.7 Intensidad de precipitación

La intensidad de precipitación es la relación que existe entre la lámina de lluvia acumulada entre la duración en la que se acumuló y se expresa como:

$$i = \frac{P}{t_d} \quad (6)$$

Donde i es la intensidad de precipitación en mm/h , P es la altura de precipitación en mm y t_d es la duración de la lluvia en horas (h).

1.5.3 Curvas de Intensidad-Duración-Periodo de retorno

Las curvas de Intensidad-Duración-Periodo de retorno (IDT), son curvas que relacionan la intensidad de lluvia, duración y frecuencias o periodos de retorno.

En la práctica la construcción de las curvas IDT, puede realizarse de distintas formas o métodos. Uno de ellos el método de Chen.

1.5.3.1 Método de Chen

Chen (1983) propone una ecuación empírica con la que se puede calcular la intensidad de la precipitación para cualquier duración y periodo de retorno, como:

$$i_d^T = \frac{a \cdot P_1^{10} \cdot \log(10^{2-F} \cdot T^{F-1})}{(d + b)^c} \quad (7)$$

Donde i_d^T es la intensidad de precipitación en mm para una duración d en minutos y un periodo de retorno T en años y a , b y c son parámetros de la tormenta que pueden variar según el factor de convectividad R (12), F es la relación precipitación-frecuencia, definida como:

$$F = \frac{P_d^{100}}{P_d^{10}} \quad (8)$$

Donde P_d^{10} es la altura de lluvia para una duración d y 10 años de periodo de retorno y P_d^{100} es la altura de precipitación en mm para una duración d y 100 años de periodo de retorno.

$$a = -2.297536 + 100.0389 \cdot R - 432.5438 \cdot R^2 + 1256.228 \cdot R^3 - 1028.902 \cdot R^4 \quad (9)$$

$$b = -9.845761 + 96.94864 \cdot R - 341.4349 \cdot R^2 + 757.9172 \cdot R^3 - 598.7461 \cdot R^4 \quad (10)$$

$$c = -0.06498345 + 5.069284 \cdot R - 16.08111 \cdot R^2 + 29.09596 \cdot R^3 - 20.06288 \cdot R^4 \quad (11)$$

El factor de convectividad R (Ilustración 17) se define como:

$$R = \frac{P_1^T}{P_{24}^T} \quad (12)$$

Donde P_1^T es la altura de lluvia para una duración de 1 hora, P_{24}^T es la altura de lluvia para una duración de 24 horas y T años de periodo de retorno.

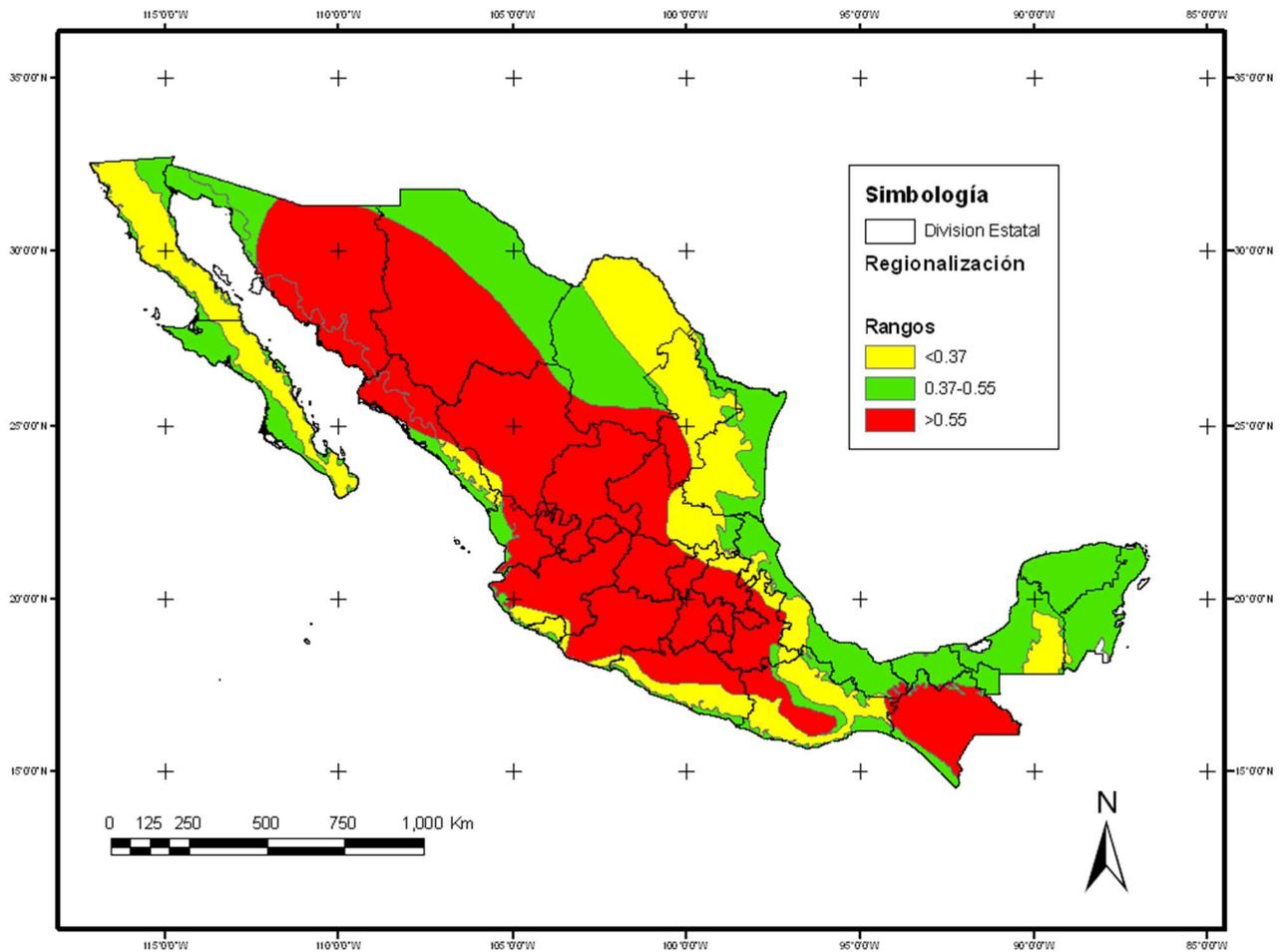


Ilustración 17. Regionalización del factor de conectividad R para la república mexicana (Baeza, 2007)

Para la obtención de P_d^{10} , P_d^{100} y P_{24}^T , es necesario realizar un análisis de frecuencias.

Un análisis de frecuencias consiste en determinar el valor de una variable hidrológica asociada a un periodo de retorno. El periodo de retorno de un evento con una magnitud dada puede definirse como el intervalo de ocurrencia promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud específica (Chow, 1994). De forma general el procedimiento consiste en:

Ordenar los datos de la precipitación máxima de cada año de mayor a menor y asignarle un valor m de posición para determinar el periodo de retorno, según la ley de Weibull como:

$$T = \frac{n + 1}{m} \quad (13)$$

Donde n es el número de datos en la serie y m es el valor de posición asignado.

Con las series periodo de retorno-precipitación, es posible establecer el modelo matemático, conocido como Función de Distribución de Probabilidad (FDP), de mejor ajuste a dicha serie, que represente el

comportamiento de la precipitación; finalmente se utiliza la FDP para determinar la precipitación asociada al periodo deseado.

I.5.4 Pérdidas de precipitación

El agua que se precipita y que no genera escurrimiento superficial puede tener varios destinos, una parte es retenida en copas de árboles y techos de construcciones, otra es retenida en depresiones naturales de terreno, otra es infiltrada; en todo este proceso existe evaporación que regresa el agua a la atmosfera.

Las pérdidas de precipitación es el volumen de agua precipitado que no contribuye al escurrimiento, esto es:

$$Q(t) = \Omega \cdot I(t) \quad (14)$$

Donde $Q(t)$ es el escurrimiento efectivo en el tiempo, Ω es una función de transferencia entre la salida y entrada al sistema y $I(t)$ es la precipitación en el tiempo.

La función de transferencia Ω expresa las pérdidas de precipitación en el proceso, estas pérdidas son las debidas a la infiltración, evaporación y todos aquellos procesos que interfieren en el escurrimiento.

De las variables que integran las pérdidas de precipitación, la infiltración representa el porcentaje mayor.

I.5.4.1 Infiltración

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo (Chow, 1994); este proceso depende de la cubierta vegetal, uso de suelo, características de suelo, pendiente del terreno, etc.

A medida que el agua se infiltra esta va saturando las capas superiores. Normalmente la infiltración no es capaz de saturar todo el suelo, solo satura las capas más cercanas a la superficie. Para estimar la infiltración existen distintos métodos en función de la información disponible: a continuación, se describen dos de los métodos más utilizados.

I.5.4.1.1 Número de curva

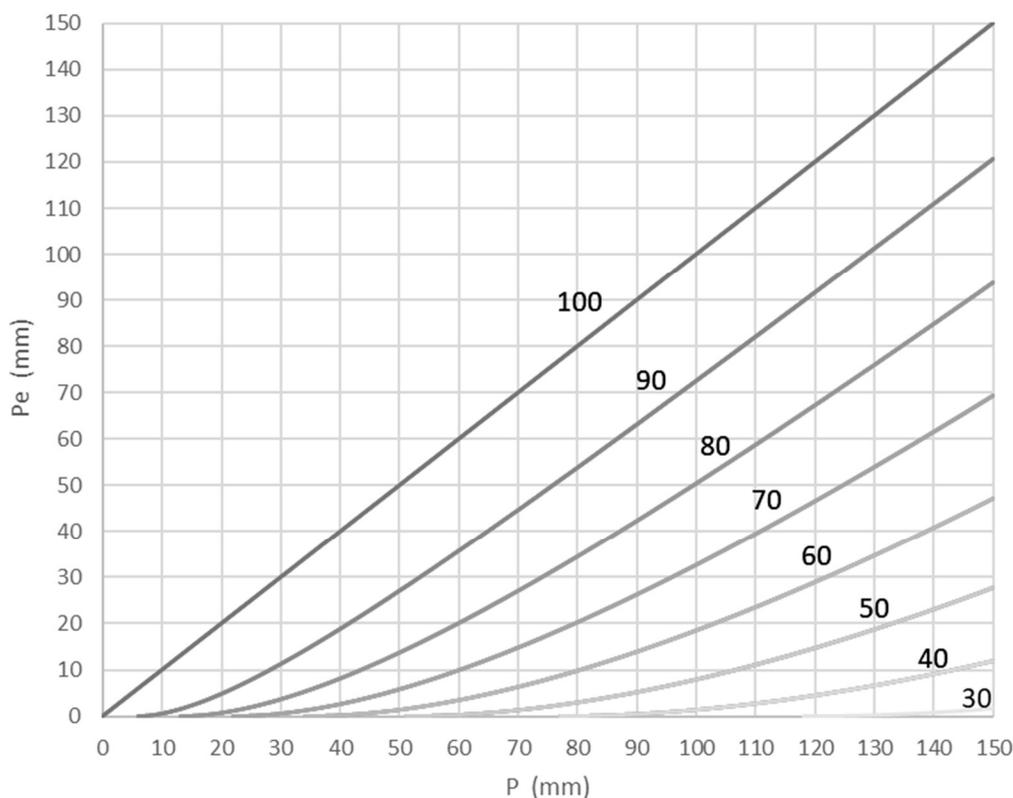
El método del Número de Curva (NC) es una técnica para estimar la infiltración, el NC refleja la capacidad de una zona para producir escurrimiento durante una lluvia. Así la lluvia efectiva empleando el NC es:

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{5080}{NC} + 50.8\right)^2}{P + \frac{20320}{NC} - 203.2} \quad (15)$$

Donde P_e es la precipitación efectiva en mm , NC es el número de curva, parámetro adimensional y varía de 0 a 100 (Gráfica 3)

El *NC* se obtiene a partir de la permeabilidad del suelo, cobertura vegetal y pendiente del terreno y se clasifica en A, B, C y D (Tabla 1).

En suelos desnudos con síntomas de erosión, se encontrarán *NC* elevados, en cambio, en suelos con cobertura vegetal densa y bien distribuida, se presentan *NC* más reducidos (Tabla 2).



Gráfica 3 Representación gráfica del *NC*

Tabla 1 Tipo de suelo para determinar el *NC*

TPO DE SUELO	TEXTURA DEL SUELO	WRB
A	Arenas con poco limo y arcilla, suelos muy permeables	Andosol, Arenosol, Fluviosol, Histosol
B	Arenas finas y limos	Calcisol, Gipsisol, Leptosol, Litosol, Regosol, Solonchak
C	Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcilla.	Chemozem, Kastañozem, Nitosol, Phaeozem, Umbrisol
D	Arcillas en grandes cantidades; suelos poco profundos con subhorizontes de roca sana; suelos muy impermeables	Acrisol, Alisol, Cambisol, Gleysol, Lixisol, Luvisol, Planosol, Plintosol, Vertisol

Tabla 2 Selección del NC en función del uso de suelo y tipo de suelo

Uso de la tierra y cobertura	Tratamiento del suelo	Pendiente del terreno en %	Tipo del suelo			
			A	B	C	D
Sin cultivo	Surcos rectos	-	77	86	91	94
Cultivos en surco	Surcos rectos	>1	72	81	88	91
	Surcos rectos	<1	67	78	85	89
	Contorneo	>1	70	79	84	88
	Contorneo	<1	65	75	82	86
	Tenazas	>1	66	74	80	82
	Tenazas	<1	62	71	78	81
Cereales	Surcos rectos	>1	65	76	84	88
	Surcos rectos	<1	63	75	83	87
	Contorneo	>1	63	74	82	85
	Contorneo	<1	61	73	81	84
	Tenazas	>1	61	72	79	82
	Tenazas	>1	59	70	78	81
Leguminosas o praderas con rotación	Surcos rectos	>1	66	77	85	89
	Surcos rectos	<1	58	72	81	85
	Contorneo	>1	64	75	83	85
	Contorneo	<1	55	69	78	83
	Tenazas	>1	63	73	80	83
	Tenazas	<1	51	67	76	80
Pastizales	-	>1	68	79	86	89
	-	<1	39	61	74	80
	Contorneo	>1	47	67	81	88
	Contorneo	<1	6	35	70	79
Pradera permanente	-	<1	30	58	71	78
Bosques naturales						
Muy ralo	-	-	56	75	86	91
Ralo	-	-	46	68	78	84
Normal	-	-	36	60	70	77
Espeso	-	-	26	52	62	69
Muy espeso	-	-	15	44	54	91
Caminos						
De terracería	-	-	72	82	87	89
Con superficie dura	-	-	74	84	90	92

Si en un área se encuentran distintos tipos de suelo, el valor de NC que representa el área total es el cociente de la suma del producto del área que contiene cada suelo y su NC correspondiente sobre el área total.

I.5.4.1.2 Coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento es la relación entre la tasa pico de escurrimiento directo y la intensidad promedio de precipitación en una tormenta. Debido a la alta variabilidad de la intensidad de la precipitación, este valor es difícil de determinar utilizando la información observada. Un coeficiente de escurrimiento también puede definirse como la relación entre el escurrimiento y la precipitación en un tiempo dado (Chow, 1994). Lo anterior se puede expresar como:

$$C = \frac{P_e}{P_t} \quad (16)$$

El coeficiente de escurrimiento también se puede determinar a partir de la cobertura vegetal y uso de suelo con información de la literatura técnica (Tabla 3).

Tabla 3 Coeficientes de escurrimiento (Chow, 1994)

Características de la superficie	Periodos de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
Áreas desarrolladas							
Asfáltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95	1.00
Concreto/techo	0.75	0.38	0.83	0.88	0.92	0.97	1.00
Zonas verdes (jardines, parques, etc.)							
<i>Condición pobre (cubierta de pasto menor del 50% del área)</i>							
Plano, 0-2%	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.58
Promedio, 2-7%	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Pendiente superior a 7%	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
<i>Condición promedio (cubierta de pasto de 50 al 75% del área)</i>							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
<i>Condición buena (cubierta de pasto mayor del 75% del área)</i>							
Plano, 0-2%	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.49
Promedio, 2-7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Pendiente superior a 7%	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.58
Áreas no desarrolladas							
Área de cultivos							
Plano, 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Promedio, 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Pendiente superior a 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
Pastizales							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Bosques							
Plano, 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Promedio, 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Pendiente superior a 7%	0.35	0.39	0.41	0.42	0.48	0.52	0.58

I.5.5 Esguerrimiento

El esguerrimiento es el proceso mediante el cual el agua circula sobre y por debajo de la superficie terrestre, el agua puede provenir de una precipitación la cual una parte es evaporada y otra infiltrada recargando acuíferos del subsuelo. Existen distintas clasificaciones del esguerrimiento.

- Esguerrimiento superficial: es el esguerrimiento que se produce sobre la superficie terrestre debido a una lluvia en exceso.
- Esguerrimiento subterráneo: es el esguerrimiento que se produce en el subsuelo y permite la recarga de acuíferos, proveniente de lluvia infiltrada.
- Esguerrimiento directo: es el esguerrimiento de agua que se observa en un cauce producto del esguerrimiento superficial.
- Esguerrimiento base: es el esguerrimiento de agua que ese observa en un cauce producto del esguerrimiento subterráneo.
-

I.5.5.1 Hidrograma

Un hidrograma es la representación gráfica del caudal en función del tiempo (Ilustración 18), esta forma de representar el esguerrimiento permite evaluar el volumen en un tiempo dado en función de su área o el volumen incremental en una tormenta.

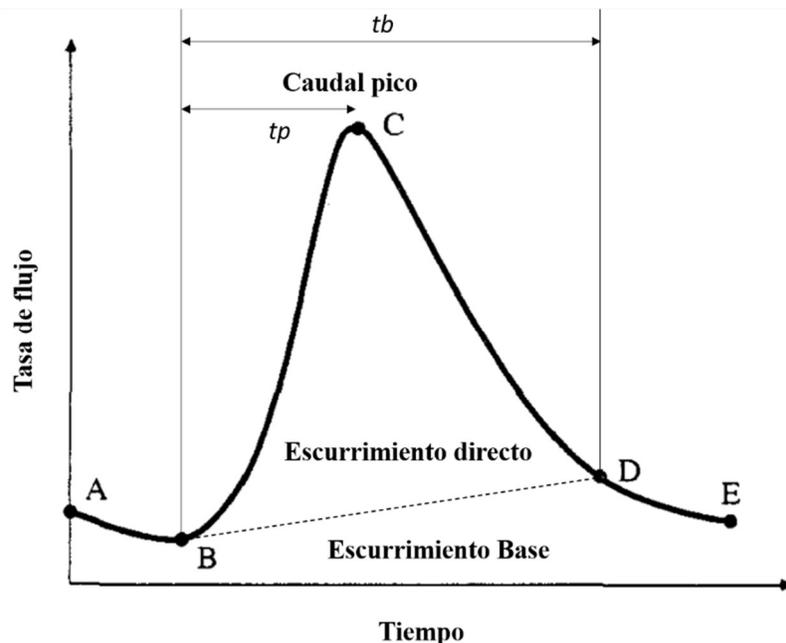


Ilustración 18. Componentes de un hidrograma

Donde los segmentos AB y DE representan la curva recesión del flujo base, BC es la rama de ascenso, C es el caudal pico de la tormenta, CD es la rama de descenso, tp es el tiempo pico, tiempo desde el inicio de la tormenta hasta el punto donde se presenta el caudal pico y tb es el tiempo base.

I.5.6 Proceso lluvia-escurrimiento

El resultado de una precipitación sobre una superficie es un flujo de agua, este flujo de agua se manifiesta en corrientes fluviales; es en ellas donde se realizan las medidas de escurrimiento que resultan de gran importancia para los proyectos de recursos hidrológicos, pues con estas medidas se determinan las cantidades de agua superficial con que se cuenta para cualquier obra de aprovechamiento (Maderey, 1977). Hoy en día existen una gran cantidad de métodos para representar numéricamente el proceso lluvia-escurrimiento; en este trabajo se describe el método racional americano, recomendado para cuencas o superficies urbanas pequeñas.

I.5.6.1 Método racional americano

El método o fórmula racional propone que si una lluvia con intensidad i actúa sobre un área impermeable A , a partir de un periodo de tiempo, se obtendrá como resultado un caudal constante; si la permeabilidad de dicha superficie se representa mediante el coeficiente de escurrimiento, se obtiene que:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,600} \quad (17)$$

Donde Q es el caudal de aportación en $\frac{l}{s}$, C representa el coeficiente de escurrimiento adimensional (Tabla 3) y A es el área en m^2 .

I.5.7 Funcionamiento de vasos

El funcionamiento de vasos es la variación de volumen almacenado en un tiempo y se deriva de la ecuación de continuidad (18) expresada de la siguiente forma (Andrade & Martinez, 2020):

$$I - O = \frac{dV}{dt} \quad (18)$$

Donde I es el caudal de entrada al vaso, O es el caudal de salida del vaso y $\frac{dV}{dt}$ es la variación de volumen almacenado en el tiempo.

La ecuación de continuidad para simular el funcionamiento de un depósito de agua pluvial se puede escribir como:

$$V_{i+1} = V_i + E - S \quad (19)$$

Donde V_{i+1} es el volumen al final del intervalo de tiempo Δt , V_i es el volumen al inicio del intervalo de tiempo Δt del funcionamiento de vaso en el instante i , E es el volumen de entrada en el depósito en el intervalo de tiempo Δt y S es el volumen de salida en el intervalo de tiempo Δt .

I.5.8 Simulación de Monte Carlo

La simulación de Monte Carlo es una herramienta estadística que emplea números aleatorios la cual permite la modelación de resultados en función del comportamiento histórico de datos y su probabilidad de ocurrencia (Salazar & Alzate, 2017). La simulación de Monte Carlo requiere la identificación de variables clave que afectan el resultado a proyectar en un sistema real. Además, este tipo de simulación genera una gran cantidad de escenarios por lo que permite tener un gran número de posibilidades a evaluar. A saber, la simulación de Monte Carlo no genera los valores de resultado óptimo de un sistema, sino, el conjunto de valores de mayor probabilidad de ocurrencia; para caracterizar una simulación de Monte Carlo es necesario recurrir a un análisis de estadística descriptiva.

La simulación de Monte Carlo, en un sistema estocástico, consiste en:

- Establecer los valores de entrada al sistema a evaluar
- Caracterizar los valores de entrada con su frecuencia relativa
- Calcular la frecuencia relativa acumulada de los valores de entrada al sistema
- Generar un conjunto de datos de muestra aleatoria
- Analizar los resultados

Los datos de registro de lluvia son, en sí mismos, datos de ocurrencia por lo que es posible emplear la simulación de Monte Carlo para la generación de estimaciones de lluvia.

I.5.8.1 *Estadística descriptiva e identificación de variables*

La estadística descriptiva es la rama de las Matemáticas que recolecta, presenta y caracteriza un conjunto de datos con el fin de describir apropiadamente las diversas características de dicho conjunto; al conjunto de los distintos valores numéricos que adopta un carácter cuantitativo se llama variable estadística (Becerra, 2010).

La descripción de las variables identificadas se puede realizar de tres formas: por medio de tablas de frecuencias, mediante gráficas y con medidas resúmenes, que corresponden a medidas de posición o dispersión (Rustom, 2012).

Las medidas de tendencia central, como la media, mediana y moda, caracterizan en un solo valor un conjunto de datos, estas corresponden a medidas de posición.

Por otra parte, las medidas de dispersión miden el grado de confluencia de los valores de la variable, es decir, la manera en cómo los datos difieren entre sí (Quevedo, 2011); algunas de estas medidas son:

Para los valores de la muestra.

- Varianza:

$$s^2 = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (20)$$

Donde x es el valor observado en la muestra, \bar{x} es la media de la muestra, n es el número de observaciones de la muestra.

- Desviación estándar:

$$s = \sqrt{s^2} \quad (21)$$

- Coeficiente de variación:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (22)$$

I.6 Aspectos hidráulicos

En un SCALL existe movimiento de agua sobre la superficie de captación y en los conductos de captación y distribución, es por ello necesario, conocer las variables hidráulicas en dichos procesos para posteriormente hacer el diseño de la infraestructura correspondiente. En este sentido, es importante profundizar en algunos aspectos de la hidráulica, disciplina que permite aplicar las leyes de equilibrio y principios del movimiento del agua.

I.6.1 Clasificación de fluidos

Se le llama fluido a un líquido en condiciones de movimiento o reposo.

Existen distintas formas de clasificar un fluido, entre ellas, en:

- Permanente o no permanente
- Uniforme y no uniforme
- Laminar o turbulento
- Unidimensional, bidireccional y tridimensional

El flujo permanente o no permanente tiene como criterio el tiempo; si las características del fluido varían con respecto al tiempo este será un fluido no permanente; si las características del fluido no cambian en el tiempo será un fluido en régimen permanente.

La clasificación uniforme y no uniforme (variable), es referente al uso del espacio; si el vector velocidad del fluido es idéntico en cualquier punto del fluido será un fluido uniforme, por el contrario, si el vector velocidad del fluido cambia a lo largo de su trayectoria será un flujo no uniforme.

Es un fluido laminar si este posee trayectorias bien definidas, si las trayectorias no siguen un patrón definido será un fluido en régimen turbulento.

El flujo es tridimensional si las características del fluido varían en el espacio en tres direcciones, el flujo es bidimensional cuando sus características son idénticas sobre planos paralelos y el flujo es unidimensional cuando las características varían como funciones del tiempo y en una coordenada curvilínea en el espacio.

El movimiento del agua en la superficie de captación, conductos de captación y distribución se puede representar y clasificar como flujo en una dimensión, turbulento, tanto permanente o no permanente. Por lo tanto, las ecuaciones fundamentales de la hidráulica, referidas al flujo unidimensional son la ecuación de continuidad, ecuación de la energía y ecuación de impulso y cantidad de movimiento. Para el establecimiento de estas ecuaciones no se hace distinción entre flujo laminar y flujo turbulento (Sotelo, 1997). El flujo de un fluido real no puede ser completamente unidimensional, sin embargo, con la consideración de valores medios de las características de cada sección, se puede considerar unidimensional (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016).

I.6.2 Ecuaciones de gobierno: flujo permanente

El principio de continuidad está basado en el principio de conservación de la masa, las ecuaciones que expresan este principio pueden determinarse para un volumen de fluido en una sección transversal y para un punto dentro del flujo resultando en:

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 = A_i \cdot V_i \quad (23)$$

Donde Q es el caudal en m^3/s , A es el área de la sección transversal en m^2 y V es la velocidad del flujo en m/s .

La cual establece que la entrada de flujo en un elemento cerrado será la misma a la salida del sistema.

Por otra parte, el cambio de energía interna de un sistema desde su posición 1 a 2 es igual a la suma de energía añadida a un flujo y el trabajo hecho por el mismo. La ecuación de la energía por unidad de peso para un flujo unidimensional, permanente e incompresible será:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + h_{fl} \quad (24)$$

Donde z es la carga de posición o nivel de referencia en m , p/γ es la carga de presión en m , la suma de la carga de presión y carga de posición se denomina carga piezométrica, $V^2/2 \cdot g$ es la carga de velocidad y expresa la energía cinética del fluido a lo largo de su recorrido en m , γ es el peso específico del líquido en kN/m^3 , g es la aceleración de la gravedad en m/s^2 y finalmente h_{fl} es la pérdida de carga entre las dos secciones debida a la irreversibilidad en el proceso en m .

En cambio, la ecuación de cantidad de movimiento, se fundamenta en la segunda ley de Newton la cual establece que la suma vectorial de todas las fuerzas F que actúan sobre una masa de fluido es igual a la rapidez del cambio del vector lineal cantidad de movimiento de la masa de fluido (Sotelo, 1997); esto es:

$$\sum F = \rho \cdot \sum_{sc} Q \cdot V \quad (25)$$

Donde F es la fuerza actuando sobre el fluido en N y ρ es la densidad del fluido en kg/m^3 .

Las ecuaciones anteriores son válidas tanto para flujo a superficie libre como flujo a presión.

I.6.3 Ecuaciones de gobierno: flujo variable

El cálculo del tirante o nivel del agua y la velocidad o caudal en una sección transversal de un canal o cauce para flujo variable en una dimensión (flujo a superficie libre), se puede realizar con las ecuaciones de Saint-Venant en una dimensión; las ecuaciones de Saint-Venant son un sistema de ecuaciones en derivadas parciales de tipo hiperbólico y no lineales (Chow, 1994), que aplicadas a un volumen de control (sección transversal en un canal prismático y no prismático) resultan en:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial x} - q = 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{\beta \cdot Q^2}{A} \right)}{\partial x} + g \cdot A \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f \right) - q \cdot v_x = 0 \quad (27)$$

Donde Q es el caudal de entrada al sistema, A es el área de la sección transversal, q es el caudal de entrada lateral, β es el coeficiente de momentum o coeficiente de *Boussinesq*, h es la elevación de la superficie del agua, S_f es la pendiente de fricción y se calcula con la ecuación (36) y v_x es la velocidad del flujo lateral en dirección x .

I.6.3.1 Pérdidas de carga

De forma general las pérdidas de carga se clasifican como:

$$h_{fl} = hf + hl \quad (28)$$

Donde hf son las pérdidas de carga de fricción en m y hl son las pérdidas de carga locales en m y se definen como:

$$hl = k \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (29)$$

Donde k es un coeficiente *adimensional* que depende del accesorio y la carga de velocidad a la salida del accesorio.

Las pérdidas de carga por fricción se calculan en función de si el flujo es a superficie libre o presión.

1.6.3.2 Flujo a presión

En la mecánica de fluidos, la ecuación de Darcy-Weisbach expresa la pérdida de carga por fricción h_f a lo largo de una tubería de longitud L , diámetro D y velocidad V como:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (30)$$

Donde f es el factor de fricción de Darcy-Weisbach.

El factor de fricción de Darcy-Weisbach se determina en función si el flujo es laminar o turbulento.

Según Poiseuille si $Re < 2,300$ el flujo es laminar y el factor de fricción depende exclusivamente del número de Reynolds, como:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (31)$$

Donde Re es el número de Reynolds, es un parámetro adimensional y se calcula como:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (32)$$

Donde ν es la viscosidad cinemática del líquido en m^2/s .

En la zona de transición localizada entre el flujo laminar y el flujo turbulento ($2,300 < Re < 4,000$) el factor de fricción depende tanto del número de Reynolds como de la rugosidad relativa del material y se puede emplear la fórmula de Colebrook-White para su cálculo (34).

El factor de fricción para flujo turbulento depende de si la tubería es hidráulicamente lisa o rugosa; en cada caso hay distintas ecuaciones, las cuales generalmente son implícitas, por lo tanto, se requiere de un proceso iterativo para determinar dicho valor. Para solventar lo anterior, también existen ecuaciones explícitas, entre ellas:

Ecuación Swamee-Jain:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{5.741}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (33)$$

Válida para:

$$5 \times 10^3 < Re < 1 \times 10^8 \text{ y}$$

$$1 \times 10^{-6} < \varepsilon/D < 0.001$$

Ecuación de Colebrook-White:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{G}{Re^T} \right) \right]^2} \quad (34)$$

Válida para $Re < \frac{3500}{\varepsilon/D}$

En ambos casos, ε es la rugosidad absoluta del material de la tubería expresada en m y para la ecuación de Colebrook-White, los valores G y T dependen del número de Reynolds (Tabla 4).

Tabla 4 Valores de G y T de la ecuación Colebrook-White en función del número de Reynolds. (GODF, 2004)

	G	T
$4,000 \leq Re \leq 100,000$	4.555	0.8764
$100000 \leq Re \leq 3,000,000$	6.732	0.9104
$3,000,000 \leq Re \leq 100,000,000$	8.9882	0.93

1.6.3.3 Flujo a superficie libre

Para flujo permanente y variable en una dimensión a superficie libre, las pérdidas de energía se estiman con ecuaciones de resistencia al flujo, la más empleada, la ecuación de Manning, la cual es:

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \cdot S_f^{\frac{1}{2}} \quad (35)$$

Donde V representa la velocidad media en la sección transversal en m/s , n es el factor de rugosidad de Manning en $s/m^{1/3}$ (Tabla 5) y R_h es el radio hidráulico (38) expresado en m .

A partir de la ecuación de Manning, la pendiente de fricción S_f es:

$$S_f = \left(\frac{n \cdot V}{R_h^{\frac{2}{3}}} \right)^2 \quad (36)$$

La ecuación de Manning puede expresarse en términos del factor de fricción de Darcy-Weisbach (30) como sigue:

$$n = \sqrt{\frac{f}{8 \cdot g}} \cdot R_h^{\frac{1}{6}} \quad (37)$$

El radio hidráulico R_h es la relación entre la superficie transversal A y el perímetro mojado de la superficie P .

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (38)$$

Tabla 5 Coeficientes de rugosidad de Manning para varias superficies de canales

Coeficientes de rugosidad de Manning para varias superficies de canales abiertos	
Material	Coefficiente de rugosidad de Manning
Concreto	0.012
Fondo de grava con lados de	
Concreto	0.020
Piedra	0.023
Riprap	0.033
Canales naturales	
Limpios y rectos	0.030
Limpios y curvos	0.040
Cursos con hierbas y piscinas	0.050
Con matorrales y árboles	0.100
Planicies de inundación	
Pastos	0.035
Cultivos	0.040
Hierbas y pequeños matorrales	0.050
Matorrales densos	0.070
Árboles densos	0.100

I.6.4 Equipos de bombeo

Un equipo de bombeo, conocido comúnmente como bomba, es una máquina que intercambia energía entre un fluido y un sistema mecánico. Una bomba se compone de dos partes principales.

- Un elemento rotatorio (impulsor y flecha)
- Un elemento estacionario (cubierta)

En una bomba, el líquido entra al impulsor, el cual lo descarga con una mayor presión y velocidad respecto a la entrada, incrementando su energía (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016)

Los impulsores se clasifican según su trayectoria como:

- Impulsor de flujo radial
- Impulsor de flujo axial
- Impulsor de flujo mixto

I.6.4.1 Clasificación de las bombas

Las bombas de flujo radial o centrífugas se caracterizan por tener un impulsor angosto y álabes largos respecto a su altura; este tipo de bombas permiten proporcionar cargas de bombeo altas, pero con gastos de bombeo bajos y son de eje horizontal (Ilustración 19).

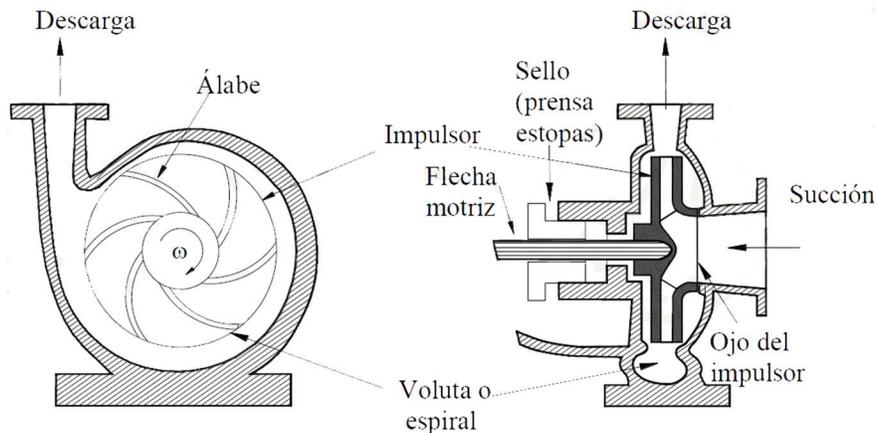


Ilustración 19. Bomba de flujo radial (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016)

Las bombas de flujo mixto son empleadas para cargas y gastos medios, su impulsor es más corto y ancho que el radial, el conducto que forman las cubiertas frontal y posterior del impulsor es más amplio que el del tipo radial; sus álabes requieren tener una curvatura para seguir la trayectoria tanto del sentido radial como el axial.

Es común que las bombas de flujo mixto se diseñen con voluta, pero también se encuentran diseños con difusor para diseños que requieran varias etapas de bombeo, son bombas que se emplean normalmente en pozos profundos donde el difusor se utiliza para recibir y guiar la descarga (Ilustración 20).

Las bombas de flujo axial (Ilustración 21) tienen la capacidad de proporcionar grandes gastos a cargas bajas, estas bombas requieren álabes en lugar de volutas y son de eje vertical. Estas bombas contienen en una cubierta tubular o columna, el impulsor y la combinación impulsor-difusor está considerada en el diseño de los ángulos de los álabes.

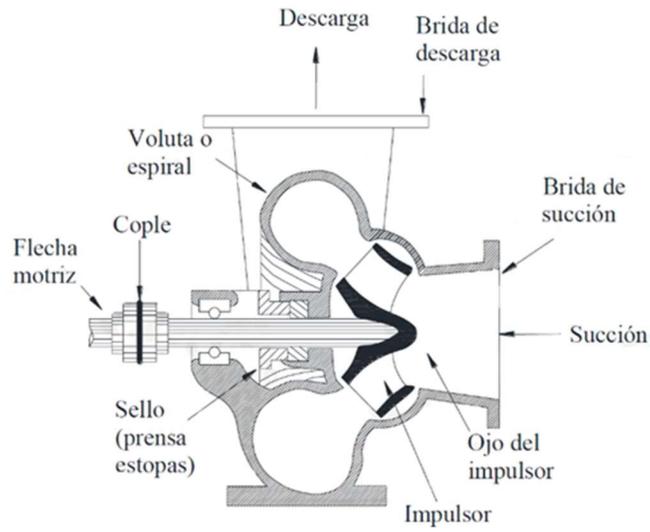


Ilustración 20 Corte transversal de bomba de flujo mixto (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016)

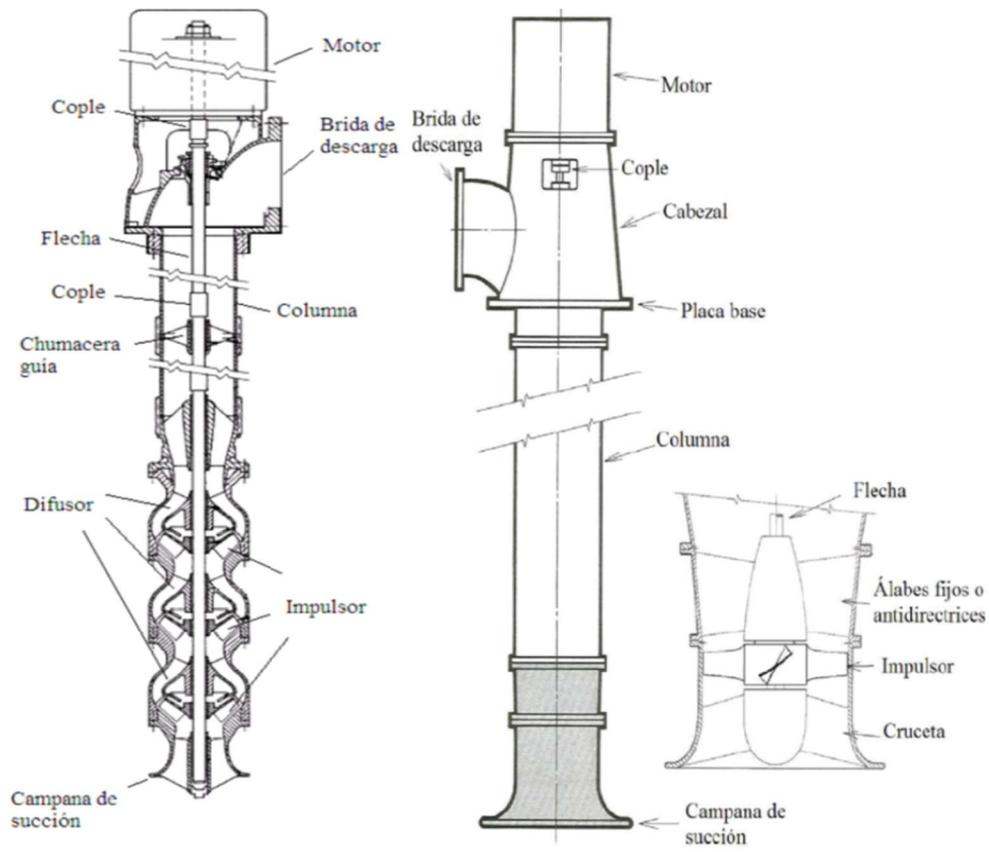


Ilustración 21 Bomba de tres pasos de eje vertical e impulsor de flujo mixto, Bomba de flujo axial (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016)

1.6.4.2 Carga dinámica total

En la práctica de la ingeniería hidráulica la Carga Dinámica Total (CDT) es la carga mínima necesaria que debe suministrar un equipo de bombeo para abastecer agua en las condiciones de servicio requeridas por el usuario y tiene su fundamento en la ecuación de la energía en m (24).

Así la Carga Dinámica Total es:

$$CDT = H_B = H_E + hf + hl \quad (39)$$

Donde H_E es la carga estática y corresponde a la diferencia de elevaciones de la superficie libre del agua de los depósitos de descarga y succión en m (Ilustración 22).

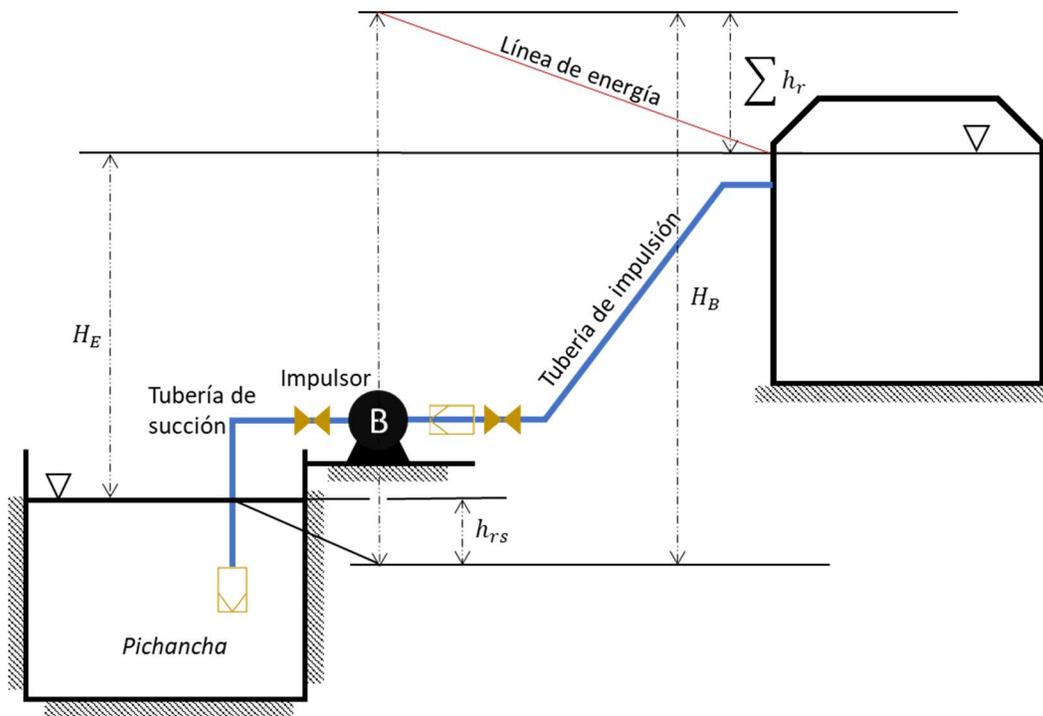


Ilustración 22 Línea de energía, carga estática y dinámica.

1.6.4.3 Potencia y eficiencia hidráulica

La potencia hidráulica se define como la energía transmitida a un sistema, en el caso de una bomba esta energía es adicionada y se define como:

$$P_H = \gamma \cdot Q \cdot H_B \quad (40)$$

Donde P_H representa la potencia hidráulica en W , Q es el gasto que debe suministrar la bomba en m^3/s , γ el peso específico del agua en N/m^3 y H_B es la carga de bombeo en $m. c. a.$ (metros columna de agua).

Por otra parte, la eficiencia permite conocer que porcentaje de energía que proporciona la bomba se convierte en energía útil, así, la eficiencia de una bomba se determina como:

$$\eta_B = \frac{P_H}{P_M} \quad (41)$$

La bomba entrega potencia hidráulica P_H y recibe potencia mecánica P_M ; de forma similar, el motor entrega potencia mecánica y recibe potencia eléctrica P_E , por lo tanto, la eficiencia del motor-bomba es:

$$\eta_{GB} = \frac{P_H}{P_E} \quad (42)$$

Esta eficiencia está relacionada con el consumo de energía eléctrica y por lo tanto con el pago de la misma, en todo caso la eficiencia de bomba como la del motor eléctrico deben ser las más altas posibles.

1.6.4.4 Cavitación

Un fluido actuando en un sistema a presión puede vaporizarse si la presión absoluta que lo rodea es menor que la presión de vapor del mismo; esta vaporización provoca la creación de burbujas las cuales implotan al llevarlas hacia regiones de mayor presión. Este fenómeno se le denomina cavitación y puede presentarse en las zonas de menor presión; en una bomba puede ocurrir este fenómeno a la entrada de los álabes del impulsor, el fenómeno de cavitación provoca que la bomba opere a bajas eficiencias, vibraciones en exceso y presencia de ruido proveniente del impulsor.

1.6.4.5 Carga de succión positiva neta

La Carga de Succión Positiva Neta (CSPN), establece las condiciones mínimas de succión para prevenir la cavitación en una bomba, es un valor que suele ser proporcionado por el fabricante. La CSPN de la instalación debe ser mayor a la CDPN requerida por el fabricante.

La carga de succión positiva neta de diseño es:

$$CSPN_D = \Delta z + \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} - h_{fl_{1-2}} \quad (43)$$

Donde Δz es la diferencia de altura desde el espejo de agua y el eje del impulsor en m . Para configuraciones de instalaciones donde la bomba esté en carga el valor Δz será positivo y para configuraciones donde la bomba esté en succión será negativo, $h_{fl_{1-2}}$ son las pérdidas debidas a fricción y accesorios en m , P_v es la presión de vapor de agua en Pa y P_{atm} es la presión atmosférica en Pa , la cual se puede estimar como (Sotelo, 1997):

$$P_{atm} = P_0 \cdot (1 - 2.26 \times 10^{-5} \cdot z)^{5.256} \quad (44)$$

Donde P_0 es la presión atmosférica a nivel del mar o 1 atm equivalente a 101.3 kPa, z es la altitud medida desde el nivel medio del mar en m y el factor 2.26×10^{-5} es una relación del decremento de temperatura por cada metro de incremento en la altitud por lo que sus unidades son m^{-1} .

Por lo regular, los fabricantes proporcionan la relación $Q - CSPN_R$, donde $CSPN_R$ es la carga de succión positiva neta mínima, por lo que:

$$CSPN_D \geq CSPN_R \quad (45)$$

1.6.4.6 Curva característica de la bomba

La curva característica de una bomba o curva de rendimiento es la representación del comportamiento real y permite describir la relación entre las variables hidráulicas de la misma; en la práctica la utilización de curvas características es de gran ayuda para determinar el equipo de bombeo más adecuado para una instalación. Usualmente los fabricantes proporcionan las curvas características de sus equipos relacionando

- Gasto-carga.
- Gasto-eficiencia.
- Gasto-potencia mecánica.
- Gasto-carga de succión positiva neta.

La relación gasto-carga da lugar a la curva de carga de la bomba y a la curva de resistencia del sistema. En la Ilustración 23 se pueden observar una curva característica de bombas comerciales.

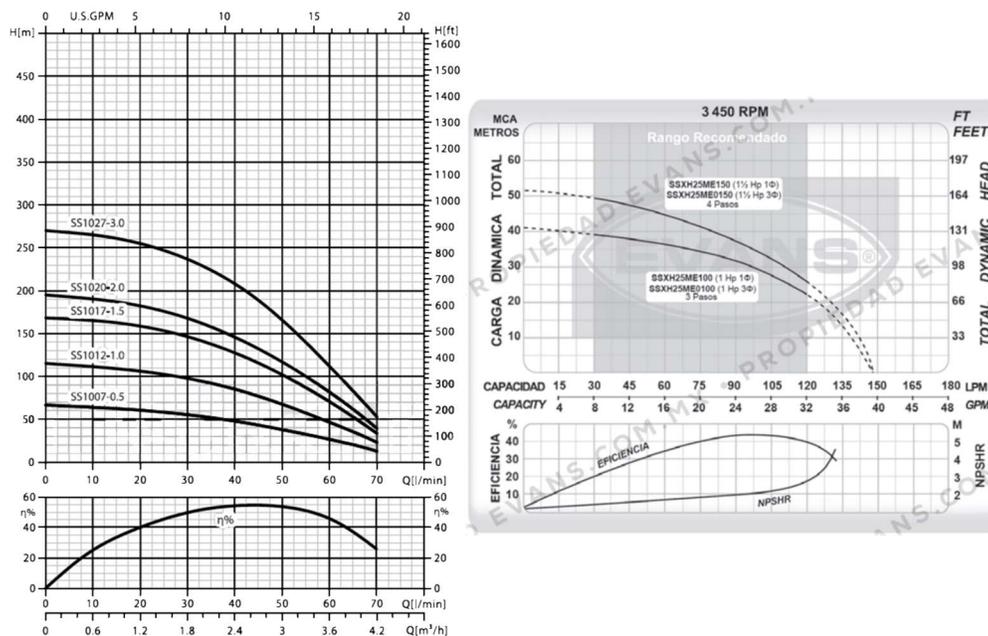


Ilustración 23. Curva de rendimiento de bomba tipo sumergible modelo SS10 marca Barmesa (izquierda), Curva de rendimiento de una bomba centrífuga horizontal modelo SSXH25 marca Evans (derecha).

1.6.4.7 Curva de carga del sistema

La relación entre el gasto en el sistema hidráulico y la carga que debe proporcionar la bomba se denomina *curva del sistema* (Ilustración 24).

Una bomba debe ser capaz de entregar el gasto requerido en el sistema hidráulico con la carga que éste le impone para ese gasto. El sistema hidráulico está formado por las tuberías y accesorios necesarios para llevar el líquido desde la captación hasta el sitio de entrega (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016). Al aplicar la ecuación de la energía entre estos dos puntos resulta:

$$H_{B\ SIS} = H_E + h_{rs} + h_{rd} \quad (46)$$

Donde $H_{B\ SIS}$ es la carga total o dinámica que proporciona la bomba en m , H_E es la carga estática del punto 1 a 2 en m , h_{rs} es la pérdida de carga en el tramo de succión en m , h_{rd} es la pérdida de carga en el tramo de la impulsión en m .

Si la tubería descarga en forma libre entonces:

$$H_{B\ SIS} = H_E + \frac{V_d^2}{2 \cdot g} + h_{rs} + h_{rd} \quad (47)$$

Si el bombeo se realiza entre dos tanques presurizados entonces la carga estática se define como $\Delta z + \Delta p/\gamma$. Siendo Δz la diferencia de elevaciones y Δp la diferencia de presiones.

Las pérdidas de carga h_r se componen de las pérdidas por fricción y por accesorios o locales. Para un sistema formado por n tubos y m accesorios se tiene que:

$$\sum h_r = \sum_{i=1}^n \left[\left(f \cdot \frac{L}{D} + \sum_{j=1}^m k \right) \cdot \frac{1}{2 \cdot g \cdot A^2} \right] \cdot Q^2 \quad (48)$$

Si se define un coeficiente global de pérdida como:

$$K_{SIS} = \sum_{i=1}^n \left[\left(f \cdot \frac{L}{D} + \sum_{j=1}^m k \right) \cdot \frac{1}{2 \cdot g \cdot A^2} \right] \quad (49)$$

De igual forma para sistemas que descargan en condiciones atmosféricas se obtiene:

$$K_{SIS} = \sum_{i=1}^n \left[\left(f \cdot \frac{L}{D} + 1 + \sum_{j=1}^m k \right) \cdot \frac{1}{2 \cdot g \cdot A^2} \right] \quad (50)$$

Así, la carga del sistema se escribe como:

$$H_{B\ SIS} = H_E + K_{SIS} \cdot Q^2 \quad (51)$$

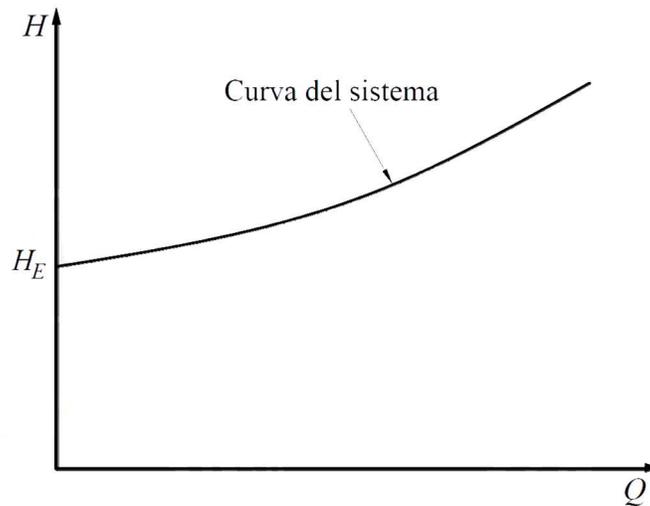


Ilustración 24 Curva del sistema (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016)

I.6.4.8 Punto de operación

El funcionamiento de una determinada bomba en un sistema hidráulico debe satisfacer en forma simultánea la curva del sistema y la curva característica de la bomba, gráficamente implica la intersección de ambas curvas, el punto de intersección se denomina *punto de operación* (Ilustración 25). A los valores del gasto y carga en el punto de intersección se les denomina gasto de operación y carga de operación respectivamente (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016).

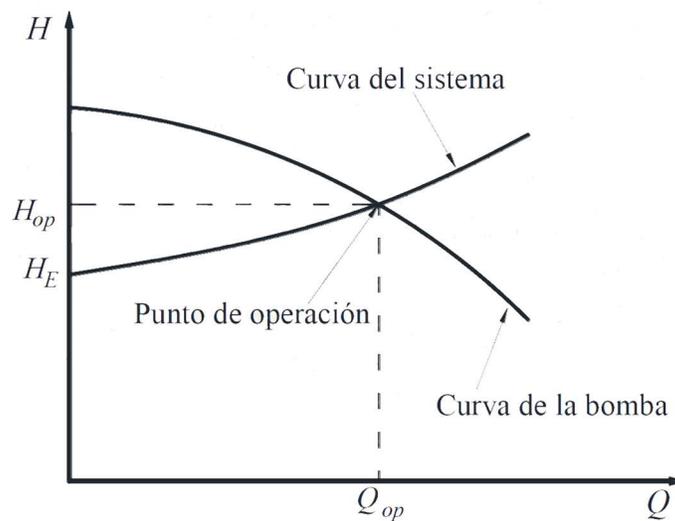


Ilustración 25 Punto de operación (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016)

La selección adecuada de un equipo de bombeo implica que el punto de operación coincida con las condiciones de diseño de la bomba. En la operación del sistema de bombeo el gasto es variable, por lo que es necesario considerar un intervalo de gastos de operación (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016).

Es recomendable que:

- El gasto de operación más frecuente del sistema corresponda al gasto de diseño del equipo de bombeo.
- Que la curva gasto-eficiencia de la bomba sea lo más plana posible dentro del intervalo de gastos de operación.

La Ilustración 26 muestra la condición del gasto máximo que se presenta con la carga estática mínima y gasto mínimo con la carga estática máxima.

El diseño del sistema de bombeo debe tomar en cuenta que el gasto de bombeado podrá variar desde cero hasta un gasto máximo que se presentará para un $K_{SIS\ min}$ y $H_{E\ min}$ (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016).

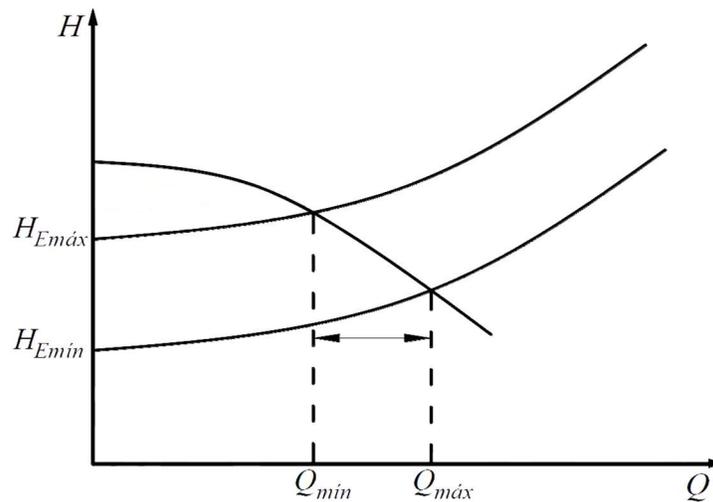


Ilustración 26 Variación del gasto de operación y carga estática (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016)

II. Dimensionamiento de un SCALL

En este capítulo, en primer lugar, se expone un análisis de la guía para la implementación de sistemas alternativos del SACMEX (SACMEX, 2020), para ello, se ahondará sobre sus lineamientos técnicos y de funcionamiento del sistema. En segundo lugar, a partir de lo anterior, se propone una metodología para el dimensionamiento de un SCALL, la cual tiene el objetivo de generar una memoria de cálculo ordenada que cumpla con los requerimientos solicitados por el SACMEX y de fácil aplicación.

Dicha metodología pretende un desarrollo en orden y coherente con los procesos requeridos en un sistema de captación de agua de lluvia, esto es, desde los datos necesarios para su elaboración, hasta la propuesta, si así lo requiere, de los equipos de bombeo para el suministro del agua. Para abordar la metodología es necesario observar lo propuesto por el SACMEX, ahondar sobre algunos principios del comportamiento de la lluvia y consumo de agua.

II.1 Observaciones a la guía del SACMEX

La guía de elaboración de sistemas alternativos del SACMEX para el dimensionamiento de un SCALL posee características que son resaltables, la principal de ellas es establecer las bases para el diseño de los sistemas de captación, así mismo, marca los lineamientos sanitarios que debe cumplir el agua de lluvia para ser implementada en distintos servicios en función de la utilidad que se le dará a la misma, realiza un desglose general del funcionamiento del sistema de reaprovechamiento del agua captada y brinda esquemas de los distintos tipos de sistemas de infiltración propuestos. La guía otorga información de datos procesados para los tiempos y periodos de retorno en forma de mapas de isoyetas y rescata el diseño de canalizaciones pluviales, sin ser específico. Si bien la guía establece los lineamientos necesarios de la implementación, esta, tiene sus limitaciones.

Las curvas IDT están en función de una duración de tormenta y periodo de retorno asociados a una intensidad de lluvia, por lo tanto, si se considera una intensidad de lluvia con 60 minutos de duración y 10 años de periodo de retorno, como lo exige el SACMEX, el depósito que recibirá el volumen generado, en una determinada área de captación, solo será llenado cuando se presente dicha precipitación o una superior (con derrames), ahora bien, si se piensa en dos proyectos colindantes, cada uno con similar área de captación, pero uno de ellos es un conjunto habitacional de n departamentos y el otro de tipo residencial unifamiliar que implementará el rehúso de agua pluvial, es evidente que las exigencias de ambos proyectos son totalmente distintas, incluso recibiendo el mismo volumen de agua de lluvia, pero el dimensionamiento del sistema de captación propuesto por el SACMEX no considera lo anterior; habría que proponer un método distinto para determinar la lluvia que se presentará a lo largo de un periodo de tiempo pero que a la vez, resuelva la demanda que se tendrá del agua captada, la cual es función de cada proyecto en particular.

Bien es cierto que el sistema debe estar preparado para las condiciones más críticas que se puedan presentar, pero un sobredimensionamiento del depósito de agua pluvial tiene, al mismo tiempo, otras consideraciones, si el depósito fuese de concreto armado y opera a un porcentaje inferior a su llenado, éste presentará agrietamientos y serán más evidentes en la temporada de secas, para atender lo anterior una opción es resolver

el sistema con tanques de polietileno pero aun así estos estarán sobredimensionados, esto significa espacio y mayor inversión para la instalación, ya sea superficial o subterránea.

Con lo anterior se expone que la forma de dimensionamiento de sistemas de captación de agua de lluvia propuesta por el SACMEX no toma en cuenta el aspecto económico de la instalación ni los parámetros de operación del mismo, un sistema con sobredimensiones implica mayor inversión inicial e inadecuada operación, esto sin considerar la exigencia de equipos de medición y calidad de agua que no hacen más que encarecer el sistema.

Además, de manera técnica no resuelve apropiadamente el volumen de las primeras lluvias a separar, pues no considera que la contaminación será gradualmente removida durante los primeros minutos de lluvia, así mismo, el caudal de diseño de los equipos de abastecimiento de agua pluvial no queda sustentado y la misma guía exige que dichos caudales deben ser especificados en el proyecto.

Así mismo, existen discrepancias en la guía pues el agua proveniente de las superficies Clase 2 no debe ser utilizada para consumo humano e indica que puede ser usada en servicios potables, sin embargo, para ello deberá cumplir con la NOM-127-SSA1-1994 que establece los límites permisibles para uso y consumo humano.

Para resolver las limitaciones mencionadas de la guía, se presenta una metodología de dimensionamiento de un SCALL que cumpla con los requisitos del SACMEX, en cuanto a la obligatoriedad de esta y al mismo tiempo se plantea un diseño simplificado y preciso, lo anterior permitirá que la alternativa de abastecimiento de agua de lluvia sea cada vez más usada y como consecuencia tendrá un mayor impacto social, económico y ambiental, así se pretende alcanzar el nivel de alternativa sostenible.

Para el volumen del depósito principal (depósito que recibe el agua aprovechable de agua pluvial) se propone implementar la teoría de funcionamiento de vasos (apartado I.5.7), donde la entrada al sistema será la precipitación típica de cada día a lo largo de un año que se presenta en la ubicación del proyecto y se propone estimarla con la simulación de Monte Carlo (I.5.8), y la salida del sistema será la demanda de agua pluvial de cada proyecto en particular.

Por otra parte, antes de buscar el cumplimiento de la calidad de agua, habría que determinar las condiciones donde ocurre la lluvia (jardines, patios, parques, calles, avenidas y todo tipo de cubiertas, incluso puede pasar de una cubierta a un jardín), y la interacción con el ser humano; ciertamente el agua de lluvia que proviene de una vialidad, donde transitan vehículos, no tendrá la misma calidad que el agua de lluvia proveniente de una cubierta limpia, entonces, si el agua de lluvia se emplea para servicios donde de manera natural ocurre la interacción lluvia-humano, es decir, lavado de autos, lavado de patios, riego de jardines, incluso uso en WC, cumplir con una calidad de agua solo hace que el sistema incremente su inversión inicial; con lo anterior se indica que el sistema de tratamiento de agua de lluvia debe ser coherente con la naturaleza de la precipitación. Además, se puede prescindir de filtros desarenadores antes del depósito de agua de lluvia, pues, transcurrido un tiempo de almacenamiento, las partículas no disueltas y de mayor densidad se depositarán en el fondo del tanque de almacenamiento y un adecuado mantenimiento evitará daño a los equipos de bombeo, si estos son necesarios para el abastecimiento.

Por otra parte, si el agua será para uso potable, por definición, se debe exigir el cumplimiento de la NOM-127-SSA1-1994. Cumplir los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en dicha norma puede resultar técnicamente complicado y costoso para proyectos pequeños de tipo residencial unifamiliar

(Espinosa, 2014). En todo caso, para uso no potable se debe emplear como referencia la NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Si lo que se requiere es captar el mayor volumen de agua de lluvia entonces el objetivo sería abastecer servicios al público con contacto directo con los límites establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997 y por otra parte se evita el riesgo de falla al cumplimiento de la NOM-127-SSA1-1994, pues solo se tendría certidumbre de la calidad del agua con estudios periódicos que evalúen los parámetros; lo anterior implica mayor costo de operación, en todo caso, el uso del agua colectada dependerá de un análisis de los requerimientos del proyecto, considerando que a mayor calidad de agua, habrá mayor costo de implementación y tratamiento.

Así, adicional al cumplimiento de los requisitos del SACMEX, en la metodología propuesta, se presenta una opción para el dimensionamiento del depósito de agua pluvial empleando la teoría de funcionamiento de vasos, proporciones de los depósitos más económicos y cálculos hidráulicos del suministro.

Durante la primera parte de la metodología se plantea dar orden a los datos que ayudaran a sintetizar los cálculos posteriores, así mismo, en cada apartado se condensará todo lo necesario para ejecutar ese inciso en particular. Posteriormente se presenta la parte técnica necesaria para un adecuado dimensionamiento del sistema de captación, depósitos, caudales, diámetros de tubería, sistema de abastecimiento del agua captada y los equipos necesarios para su suministro.

La metodología planteada para el dimensionamiento de sistemas alternativos consiste en:

- Criterios generales
- Recopilación y procesamiento de datos
- Caudal de aportación
- Separación de inicio de tormenta
- Pre-filtro
- Filtrado
- Depósito de almacenamiento de agua pluvial
- Volumen del sistema de retención e infiltración pluvial
- Conducción de agua pluvial
- Volumen de demasías/excedencias
- Tren de tratamiento
- Red de abastecimiento de agua

II.2 Criterios generales

En el desarrollo de un proyecto técnico se debe utilizar un sistema de unidades aceptado por la comunidad científica. En México la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-008-SCFI-2002 (DOF, 2002) establece el sistema general de unidades de medida definiendo un lenguaje común que responda a las exigencias de las actividades científicas, tecnológicas, educativas, industriales y comerciales del país. Esta Norma establece las definiciones, símbolos y reglas de escritura de las unidades del Sistema Internacional de Unidades (SI) y

otras unidades fuera de este Sistema que acepte la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) que, en conjunto, constituyen el Sistema General de Unidades de Medida.

Es posible que las exigencias de un proyecto demanden la utilización de unidades distintas establecidas por la NOM-008-SCFI-2002 como la utilización del Sistema Imperial o anglosajón, la cual es una colección de unidades definidas por primera vez en la Ley de Pesas y Medidas Británica de 1824 (Piñero, 2000). No obstante, se debe tener claro que la NOM-008-SCFI-2002 es referencia del sistema de unidades empleado en el territorio nacional y la mayor parte de las naciones del mundo.

II.3 Recopilación y procesamiento de datos

En este apartado se describen algunos aspectos relacionados con la recopilación de los datos y la información necesaria para el dimensionamiento del sistema de captación de agua de lluvia, destacando, la ubicación del proyecto, las características generales del mismo e información de precipitación de la zona, con el objetivo de determinar si el sistema alternativo es viable.

II.3.1 Ubicación

Uno de los aspectos importantes es conocer la ubicación (dirección y coordenadas geográficas) del predio y donde se implementará el SCALL, con la finalidad de recopilar los datos y la información necesaria en los subsecuentes procesos de la metodología.

Las coordenadas se pueden obtener directamente con un sistema de posicionamiento geográfico o con la ayuda de un mapa que permita visualizar dicha ubicación.

II.3.2 Características generales del proyecto

Definida la ubicación del proyecto, es necesario determinar las características generales, esto es: tipo y tamaño de superficie de construcción, obligatoriedad de implementación del sistema y tipo, tamaño de superficie captación.

II.3.2.1 *Tipo de construcción*

En este punto se requiere información que permita evaluar el tipo de construcción donde se implementará el SCALL, esto es, la manifestación de construcción ya que, en función de ésta, la Guía de elaboración de sistemas alternativos (SACMEX, 2020) clasifica la obligatoriedad de la incorporación de sistemas de captación de agua de lluvia.

Según el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF) en su título cuarto “De las Manifestaciones de Construcción y de las Licencias de Construcción Especiales”, artículo 51, las Manifestaciones de Construcción se clasifican en tipo A, B y C.

La manifestación de construcción de tipo A corresponde a construcciones y ampliaciones de una vivienda unifamiliar de hasta 120 m^2 de hasta dos niveles. La Manifestación de construcción tipo B corresponde a usos no habitacionales o mixtos de hasta $5,000\text{ m}^2$ y hasta $10,000\text{ m}^2$ con uso habitacional, se consideran dentro de este tipo los proyectos con uso habitacional de hasta $10,000$ metros cuadrados de construcción destinados a la vivienda de interés social. La manifestación tipo C es aplicable a usos no habitacionales o mixtos de más de $5,000\text{ m}^2$ o más de $10,000\text{ m}^2$ con uso habitacional, o construcciones que requieran dictamen de impacto urbano o impacto urbano-ambiental. (RCDF, 2021).

Existen dos modalidades más para las manifestaciones de construcción referentes a las licencias de construcción especiales y las expuestas en el artículo 62 del RCDF; las licencias de construcciones especiales son expedidas para construir, ampliar, modificar, reparar, instalar, demoler, desmantelar una obra o instalación, colocar tapial, excavar cuando no sea parte del proceso de construcción de un edificio o realizar actividades en suelo de conservación (RCDF, 2021). En el artículo 62, capítulo II sobre las disposiciones complementarias sobre manifestaciones de construcción y licencias de construcción especial del RCDF, se exponen los casos en los que no se requiere manifestación de construcción especial; a grandes rasgos comprende a las obras del Programa de Mejoramiento en un Lote Familiar para la Construcción de Vivienda de interés social y Popular, reposición y reparación de acabados de construcción, reparación de instalaciones, modificación de divisiones de interiores sin interferencia con los elementos estructurales, construcciones provisionales, etc.

II.3.2.2 *Superficie de construcción*

La superficie total de construcción al igual que la Manifestación de Construcción es relevante para determinar si la implementación del sistema de captación de agua de lluvia es obligatoria o no; la superficie total de construcción no es necesariamente la superficie total del predio.

La superficie de construcción se encuentra contenida y debidamente caracterizada en el proyecto arquitectónico.

II.3.2.3 *Obligatoriedad del sistema*

En función de la manifestación de construcción, tipo de construcción y la superficie total de construcción el SACMEX determina la obligatoriedad de un sistema alternativo de rehúso de agua. Con fundamento en los artículos 53, 58, 89 y 124 del RCDF (Tabla 30). De esta forma, si el SCALL es opcional (residencia unifamiliar, menor a 120 m^2 y manifestación de construcción de tipo A) u obligatorio (el resto de casos) y se decide su implementación, se procede a desarrollar la memoria de cálculo del proyecto.

II.3.3 *Clasificación de superficies de captación*

La ubicación y área de las superficies de captación deben estar debidamente indicadas en el proyecto arquitectónico con la finalidad de realizar la clasificación correspondiente de cada una de ellas.

La Clase de superficie se realizará según el SACMEX (Tabla 6).

Tabla 6 Descripción y usos de los tipos de superficie de (SACMEX, 2020)

Descripción y usos de los tipos de superficie del sistema alternativo					
Tipo de superficie	Superficie de captación	Descripción	Reutilización potable	Reutilización no potable	Infiltración-Absorción
Clase 1	Cubiertas limpias	No debe emitir contaminantes orgánicos e inorgánicos, deberán estar contruidos de materiales inertes (barro, concreto, loseta, vidrio, lámina galvanizada, lámina esmaltada, policarbonato, etcétera).	Si	Si	Si
Clase 2	Cubiertas no limpias	Con posible emisión de contaminantes orgánicos (hidrocarburos, cubiertas verdes, cubiertas naturadas, maceteros, materiales biodegradables y con posible contaminación inducida de origen animal, espacios habitables, etcétera).	Si (Opcional)	Si	Si
	Cubiertas verdes		Si (Opcional)	Si	Si
Clase 3	Pavimentos privados	Terrazas en distintos niveles, andadores, pavimentos, circulaciones viales, estacionamientos, jardines a nivel de planta o inferiores.	No	Si (Opcional)	Si
Clase 4	Pavimentos públicos	Banquetas, andadores, parques, estacionamientos, vialidades, rampas.	No	No	Si

Esta manera de clasificar permite tener criterios para decidir los subprocesos que tendrá el agua captada y realizar una correcta conducción y dimensionamiento de los sistemas de almacenamiento.

II.3.4 Precipitación

Los fenómenos naturales, entre ellos la lluvia, son procesos estocásticos, es decir, son de carácter aleatorio; para cada día de cada año la precipitación puede presentarse o no, pero al mismo tiempo puede ser mayor o menor al registro anterior, no obstante, la lluvia presenta patrones como se observa en el subcapítulo I.2, esto permite implementar herramientas que ayuden a la caracterización de la lluvia en una zona, así, el diseño de los elementos de un SCALL se diseñarán según la Tabla 7.

Tabla 7 Precipitación de diseño de un SCALL

Precipitación de diseño de un SCALL (mm/h)	
Drenajes pluviales	se considera una intensidad de lluvia de 5 minutos de duración y 10 años de periodo de retorno
Depósito de agua pluvial	Se considera la precipitación característica de la zona
Sistemas de retención e infiltración	Se considera la precipitación característica de la zona

La precipitación característica de la zona se obtendrá empleando la información de la o las estaciones climatológicas más cercanas al proyecto; para ello, es necesario disponer de datos suficientes de precipitación (mínimo 15 años) y la coherencia de los mismos, la metodología para la determinación de la precipitación característica se describe en capítulo III.3.

II.4 Caudal de aportación

El caudal de entrada al sistema, en $m^3/día$, se calculará empleando el método Racional Americano (apartado I.5.6.1) y se realizará para cada día en particular a lo largo de un año empleando los resultados de la precipitación característica (apartado III.3). Además, se calculará para cada área de captación con su respectivo coeficiente de escurrimiento conforme a la Tabla 32. Para las superficies que sean aprovechables se les restará el volumen de inicio de tormenta que corresponda a dicha área (II.5)

II.5 Separación de inicio de tormenta

La separación de inicio de tormenta consiste en desviar, acumular o retener un volumen de agua proveniente de una superficie que no ha recibido una precipitación por un cierto tiempo y que puede contener contaminación, así, el volumen de inicio de tormenta es:

$$V_{it} = \frac{A_a \cdot C \cdot P_{it}}{1000}; P_{it} = \frac{P_p}{2} \quad (52)$$

Donde P_{it} es la precipitación de inicio de tormenta en mm , P_p es la precipitación media diaria anual de la zona de estudio en mm , V_{it} es el volumen de inicio de tormenta en m^3 , A_a es el área de aportación en m^2 , C es el coeficiente de escurrimiento del A_a .

Las áreas de aportación para el cálculo de volumen de inicio de tormenta serán todas las áreas que se aprovecharán y cuya precipitación llegará al depósito de agua de lluvia (Ilustración 27).

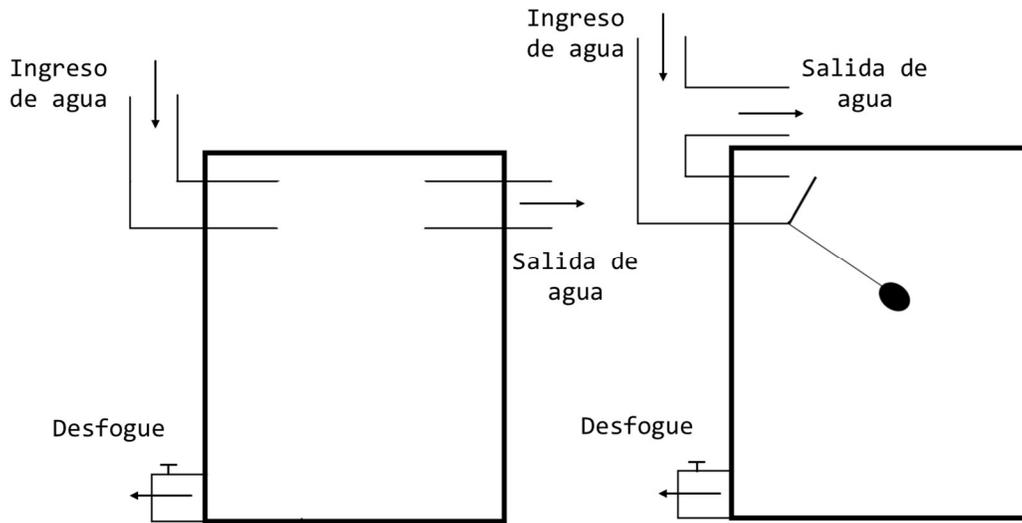


Ilustración 27 Ejemplos de sistemas de retención de inicio de tormenta

II.6 Pre-filtro

El pre-filtro consiste en retener sólidos grandes, esto es, hojas, ramas, piedras, insectos y en general objetos de dimensiones que puedan obstruir el funcionamiento de las canalizaciones; este pre filtro no es un sistema de filtrado de partículas suspendidas (Ilustración 28). En todo caso, se debe garantizar la remoción de sólidos mayores a 1 mm y su instalación debe permitir retirar los sólidos retenidos.

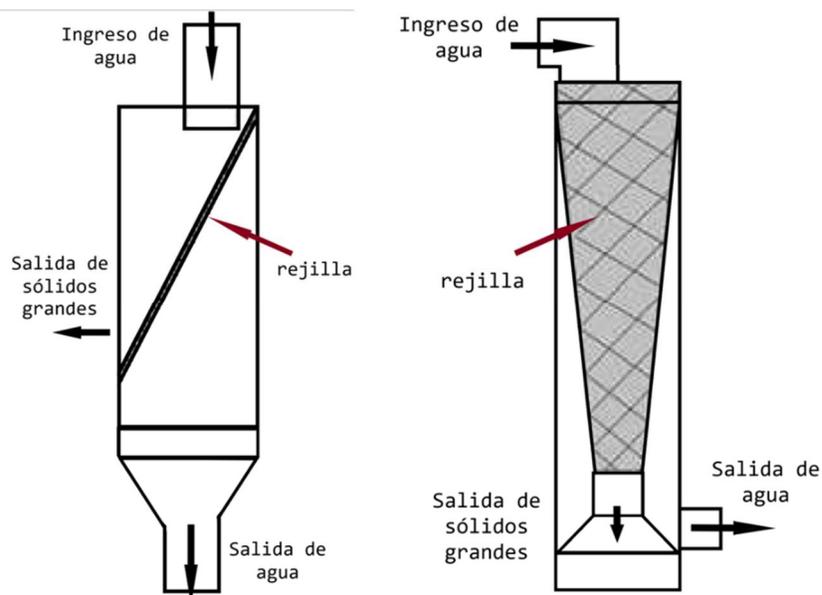


Ilustración 28 Sistemas de retención de sólidos grandes. Modificado de (Gloud & Nissen, 1999)

II.7 Filtrado

Consiste en retener las partículas de hasta 0.5 mm ($500\ \mu\text{m}$) y puede realizarse por medio de filtros (desarenadores) comerciales o armados que contengan las especificaciones necesarias para un correcto funcionamiento (Ilustración 29); es importante observar que existe una separación previa de agua pluvial la cual al mismo tiempo lleva solidos suspendidos, por lo que esta fase previa al almacenamiento es para garantizar que no existen partículas que puedan dañar los equipos de suministro de agua. La filtración por arena se da principalmente por el proceso de colado, este mecanismo retiene los sólidos suspendidos y se basa en la acumulación de partículas cuyo diámetro es mayor al tamaño de poro entre granos, es recomendable implementar desarenadores de flujo rápido para garantizar la mayor captación posible.

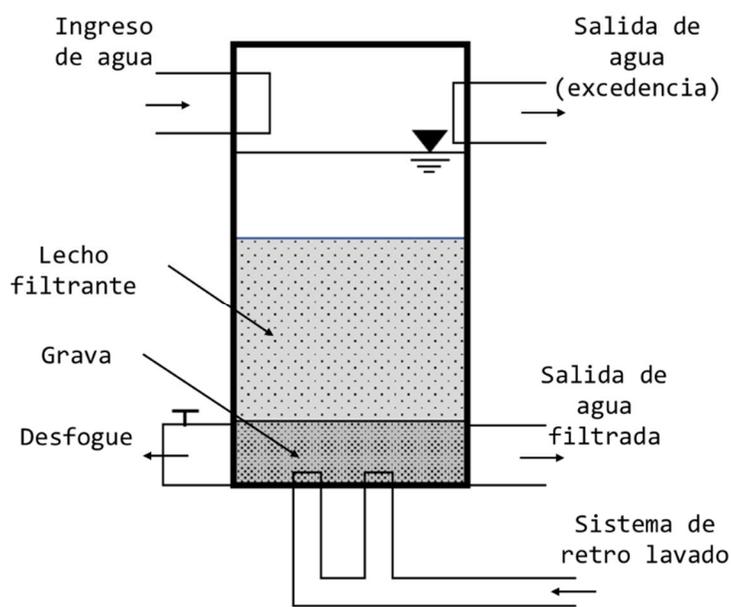


Ilustración 29 Esquema general de filtro desarenador

II.8 Depósito de almacenamiento de agua pluvial

Para la obtención del volumen de almacenamiento se empleará la teoría del funcionamiento de vasos (apartado I.5.7), para ello es necesario conocer la demanda que se tendrá de agua pluvial.

El depósito de agua pluvial contará con un *bypass* proveniente del depósito de agua potable y no permitirá el trasvase del depósito de agua de lluvia al de agua potable.

II.8.1 Demanda de agua pluvial

Comúnmente, el cálculo de la demanda de agua potable se basa en el número de habitantes, clima y días de reserva, lo cual proporciona valores adecuados, por lo tanto, la estimación de la demanda de agua de lluvia

se puede determinar de forma similar o como un porcentaje de este (título III.4.2), en función de los usos que se le dé al agua de lluvia (servicios, muebles, etc.).

A continuación, se muestran 2 métodos empleados para el cálculo del gasto de diseño de la red de abastecimiento de agua potable, ambos métodos funcionan para determinar el porcentaje de utilización del agua pluvial respecto al agua potable.

II.8.1.1 Método de Hunter

El Método de Hunter permite calcular el caudal de diseño de agua potable a partir del tipo y número de mueble (Tabla 8) y el caudal de consumo de estos (Tabla 9).

Tabla 8 Unidades mueble, según el método de Hunter (GODF, 2004)

Mueble	Unidades Mueble		
	Total	Agua fría	Agua Caliente
Artesa	2	1.5	1.5
Bebedero	2	1.5	1.5
Cocineta	1	1	
Fregadero	2	1.5	1.5
Grupos de baño (WC con fluxómetro)			
WC-R-L	3	3	1.5
WC-R	3	3	1.5
WC-L	3	3	1
L-R	2	1.5	1.5
Grupos de baño (WC con tanque)			
WC-R-L	2	1.5	1.5
WC-R	2	1.5	1.5
WC-L	2	1	1
Inodoro con fluxómetro	3	3	
Inodoro con tanque	1	1	
Lavabos	2	1	1
Mingitorios con fluxómetro	3	3	
Mingitorios con llave de resorte	2	2	
Regaderas	2	1.5	1.5
Vertederos	1	1	
Lavadero de Loza	10		10
Lavadoras			
Horizontales	3	2	
Extractores	6	4	

El consumo de la unidad mueble ha cambiado con el tiempo debido a que los fabricantes buscan que los equipos sean de menor consumo, pero satisfaciendo las necesidades de confort del usuario, por ejemplo, un valor constante de 0.42 l/s (FI, 1994), por unidad mueble y variable (Tabla 9), según el número de muebles (IMSS, 1997).

Tabla 9 Método Hunter-Nielsen: gastos en función de unidades mueble. (IMSS, 1997)

Número de Unidades Muebles	Sin fluxómetro l/s	Con fluxómetro l/s	Número de Unidades Muebles	Sin fluxómetro l/s	Con fluxómetro l/s
1	0.10		26	1.14	2.45
2	0.18		27	1.17	2.49
3	0.25		28	1.21	2.53
4	0.31		29	1.24	2.57
5	0.37	1.30	30	1.28	2.61
6	0.42	1.39	31	1.31	2.64
7	0.46	1.48	32	1.34	2.67
8	0.50	1.56	33	1.37	2.70
9	0.54	1.63	34	1.40	2.73
10	0.58	1.70	35	1.43	2.76
11	0.61	1.76	36	1.46	2.79
12	0.65	1.82	37	1.49	2.82
13	0.68	1.88	38	1.52	2.85
14	0.72	1.93	39	1.55	2.88
15	0.75	1.98	40	1.58	2.91
16	0.79	2.03	41	1.61	2.94
17	0.82	2.08	42	1.64	2.97
18	0.86	2.13	43	1.67	3.00
19	0.89	2.17	44	1.70	3.03
20	0.93	2.21	45	1.73	3.06
21	0.96	2.25	46	1.76	3.09
22	1.00	2.29	47	1.79	3.12
23	1.03	2.33	48	1.82	3.15
24	1.07	2.37	49	1.84	3.18
25	1.10	2.41	50	1.87	3.20

II.8.1.2 Método Racional

En el Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua (SISAUA, 2006) se presentaron distintos métodos para el cálculo de gastos máximos probables instantáneos para edificaciones de distintos tipos, en el cual se evaluaron los resultados con aforos en distintas edificaciones, destacó el Método Racional por presentar los caudales más próximos a los aforados en los 8 casos expuestos.

El método racional evalúa la simultaneidad de operación de los equipos y calcula el gasto máximo probable como:

$$Q_{mp} = K_1 \cdot q_{m\acute{a}x}; q_{m\acute{a}x} = \sum_{i=1}^{i=m} x_i \cdot q_i \quad (53)$$

Donde Q_{mp} es el gasto máximo probable en l/s , $q_{m\acute{a}x}$ es el gasto máximo del total de los equipos en l/s (Tabla 10), x es el número de aparatos de cierto tipo *adimensional* y q es el gasto particular de cada aparato en l/s y K_1 es el coeficiente de simultaneidad *adimensional*, definido como:

$$K_1 = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \quad (54)$$

Donde n es el número de aparatos *adimensional*.

Para conjuntos de viviendas de similares características el gasto pico se obtiene como la suma de los gastos punta de cada vivienda afectado por el valor K_2 expresado como:

$$K_2 = \frac{(N+19)}{10 \cdot (N+1)} \quad (55)$$

Donde N es el número de viviendas.

Tabla 10 Caudales mínimos en el Método Racional (SISAUA, 2006)

Aparato	Consumo L/s
Lavabo	0.10
Sanitario con depósito	0.10
Ducha	0.20
Lavadero	0.25
Lavadora	0.25
Lavaplatos	0.20
llave exterior	0.20
fregadero	0.20
Bidet	0.10
Bañera	0.30
"Oficce"	0.15
Fluxómetros	1.40
Calentador eléctrico	0.30
Mingitorios	0.15

Con el gasto de diseño de agua potable diario, se puede obtener el caudal de agua pluvial diario ($m^3/día$), o porcentaje de agua pluvial con respecto al agua potable, en función del número de aparatos o servicios que empleen el agua pluvial.

II.8.2 Volumen de almacenamiento de agua pluvial

El volumen de almacenamiento se puede calcular de forma precisa empleando la teoría de funcionamiento de vasos a lo largo de un año (capítulo III.4). El volumen de entrada al sistema será el caudal de aportación para cada día ($\Delta t = 1$ día) y se le restará el volumen de inicio de tormenta V_{it} , el volumen de salida será la demanda de agua pluvial al día; además, en el funcionamiento del depósito se garantizará el suministro de la demanda de agua pluvial al día proveniente del depósito de agua potable.

Se simularán al menos 15 años de precipitación empleando la metodología del capítulo III.3 y se vinculará con el funcionamiento de vasos (capítulo III.4); del funcionamiento del depósito se registra el promedio de V_{i+1} de cada año, de tal forma que el volumen del depósito de agua pluvial será:

$$V_{dap} = V_{pn} + V_d \quad (56)$$

Donde V_{dap} es el volumen de almacenamiento de agua pluvial en m^3 , V_{pn} es el volumen promedio de V_{i+1} de al menos 15 años del funcionamiento de vasos en m^3 y V_d es el volumen demandado de agua pluvial al día en m^3 . Además, se considerará un sobredimensionamiento de 15% de colchón de aire.

II.8.3 Depósitos más económicos

Conocido el volumen de almacenamiento se puede evaluar el tirante de agua, la superficie y los compartimientos del depósito de almacenamiento, los cuales dependerán de los niveles topográficos disponibles del proyecto y de las dimensiones constructivas, a fin de no tener que recurrir a espesores exagerados en las losas de concreto con las que se cubran. (FI, 1994)

Si el depósito de almacenamiento con una superficie S en planta se subdividen en n compartimientos, donde a y b son sus proporciones (Tabla 11), se tiene que:

$$S = a \cdot b \cdot n$$

En el caso de que los n compartimientos formen una hilera (Ilustración 30), la superficie de los muros será proporcional a la altura interior de la cisterna, dimensión que se toma como fija y proporcional a la suma de las longitudes de los muros, esto es:

$$M = 2 \cdot n \cdot a + (n + 1) \cdot b$$

Resolviendo:

$$\frac{dM}{db} = (n + 1) - 2 \cdot \frac{S}{b^2} = 0$$

Se obtiene:

$$b = \frac{2 \cdot n \cdot a}{n + 1} \quad (57)$$

Para depósitos con división axial (Ilustración 30), con dos hileras de celdas se tiene que:

$$M = 2 \cdot b \cdot \left(\frac{n}{2} + 1\right) + \frac{3 \cdot a \cdot n}{2}$$

Derivando

$$\frac{dM}{db} = n + 2 - \frac{3 \cdot S}{2 \cdot b^2} = 0$$

Se tiene como resultado:

$$b = \frac{3 \cdot a \cdot n}{2 \cdot (n + 2)} \quad (58)$$

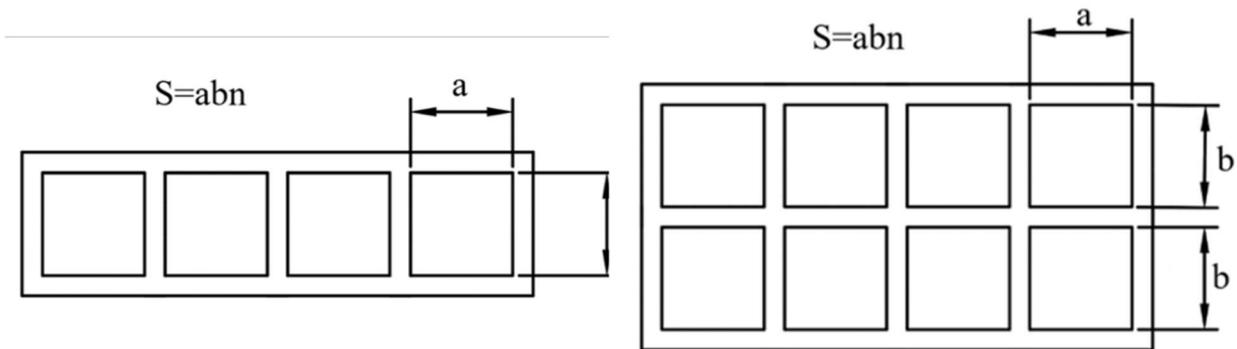


Ilustración 30 Arreglo de depósitos: una hilera y en dos hileras respectivamente

Tabla 11 Proporciones de depósitos más eficientes con n compartimientos: una hilera y dos hileras respectivamente

n	a	:	b
1	1	:	1
2	3	:	4
3	2	:	3
4	5	:	8
5	3	:	5
6	7	:	12
7	7	:	12
8	9	:	16
9	5	:	9
10	11	:	20

n	a	:	b
2	4	:	3
4	1	:	1
6	8	:	9
8	5	:	6
10	4	:	5
12	7	:	9
14	16	:	21
16	3	:	4
18	20	:	27
20	11	:	15

II.8.4 Depósitos comerciales

En el mercado existen distintas marcas que ofrecen diversas formas y tamaños de depósitos de polipropileno para el almacenamiento de agua, los cuales pueden ubicarse en la techumbre, superficie de terreno o bajo nivel del suelo; para un depósito en techumbre, su operación resulta más sencilla mientras que en un depósito bajo suelo se recomienda encofrarlo por muros de mampostería.

Algunas opciones del mercado común son: AQUAPLAS Y ROTOPLAS, esta última posee en su catálogo las siguientes opciones especializadas en agua pluvial:

Captador pluvial urbano:

- Cónico: este es el sistema más pequeño de la marca con una altura de 1.016 metros, capacidad de almacenamiento de 150 litros, se compone del tanque de almacenamiento, un filtro de hojas, un ramal de entrada de agua pluvial al tanque, mismo que incorpora una llave tipo jardín.
- Vertical: un sistema con altura de 1.8 m, de altura, con capacidad de almacenamiento de 750 litros, tipo vertical y modular (permite adicionar más tanques de las mismas características); al igual que el cónico, incorpora un filtro de hojas y un ramal de entrada al tanque.



Ilustración 31 Captador pluvial urbano tipo cónico y vertical Rotoplas (Rotoplas, 2023)

Captador pluvial rural: es un sistema con la capacidad de almacenar 5,000 o 10,000 litros de agua, pensado para su instalación en exterior y bajo consumo eléctrico pues incorpora una bomba manual; además se compone de un sistema de separación de primeras lluvias con tanque colector automático/manual, filtro de hojas, reductor de turbulencias. El captador pluvial de 5,000 litros alcanza una altura de 1.36 m y un diámetro de 2.38 m, mientras que el de 10,000 litros, alcanza una altura de 2.44 m y 2.38 m de diámetro.



Ilustración 32 Captador pluvial rural Rotoplas. (Rotoplas, 2023)

II.9 Volumen del sistema de retención e infiltración pluvial

El sistema de retención e infiltración se diseñará para la condición más desfavorable conforme a lo siguiente.

- El sistema retendrá el volumen máximo derramado en un día, proveniente del depósito de agua pluvial (V_{mr}).
- El sistema retendrá el volumen máximo derramado en un día, proveniente de las áreas no aprovechables (V_A).
- El sistema se dimensionará con un 20% adicional del volumen que resulte de la suma del V_{mr} y V_A

Así el volumen de retención e infiltración se calculará como:

$$V_{RI} = (V_A + V_{mr}) \cdot 1.2 \quad (59)$$

II.10 Conducción de agua pluvial

Se podrá emplear un sistema de conducción tipo convencional atmosférico cuyo diámetro está en función de la lluvia de diseño, según la ubicación del proyecto. En un SCALL existen conductos verticales y horizontales.

II.10.1 Verticales

La tubería vertical, de forma sencilla, se puede dimensionar con la Norma de Diseño de Ingeniería en Instalaciones, Hidráulica Sanitaria y Especiales del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS, 1997), en función de la precipitación de diseño y el área tributaria (Tabla 34).

En un tubo vertical el agua desciende adhiriéndose a la parte interior, de tal forma que se genera un cilindro hueco (FI, 1994).

Para la determinación de una tubería, se determina que el área disponible sea adecuada para conducir el caudal máximo en el tramo de la red, lo anterior se puede determinar empleando el espesor de lámina adherida al tubo vertical y de manera similar, empleando la teoría del radio hidráulico disponible, así, el espesor de la lámina de agua adherida se calcula como:

$$E = \frac{D}{2} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{N-1}{N}} \right) \quad (60)$$

Donde E representa la lámina adherida en mm , D es el diámetro interior de la tubería expresado en mm y N es el factor de llenado (4 para tubo lleno a la cuarta parte).

Para determinar si la capacidad de conducción de una bajada parcialmente llena es adecuada, se utiliza la ecuación de continuidad, para ello, se debe evaluar el radio hidráulico R_h , considerando un tubo lleno a la n ésima parte, esto es:

$$R_h = \frac{A_n}{P} = \frac{\frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot N}}{\pi \cdot D} = \frac{D}{4 \cdot N} \quad (61)$$

Donde A_n es el área transversal del líquido en un tubo lleno a la n ésima parte en m^2 y N es el factor de llenado.

Si la pendiente hidráulica es la relación de la diferencia de nivel y la longitud del tubo para una bajada vertical, la pendiente será del 100% o 1 en términos decimales; así al aplicar la fórmula de Manning (35) se tiene que:

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \quad (62)$$

Por lo que la capacidad de conducción en el tubo vertical es:

$$Q_n = V \cdot A_n \quad (63)$$

El caudal a tubo lleno a la n ésima parte debe ser suficiente para desalojar el caudal de aportación de un área determinada y con el número de bajadas adecuadas, además, es recomendable que las bajadas pluviales no excedan una tercera parte del área de la tubería en condiciones extraordinarias y una cuarta parte en condiciones de caudal máximo probable.

II.10.2 Horizontales

Los drenajes pluviales horizontales también se pueden dimensionar con la Norma de Diseño de Ingeniería en Instalaciones, Hidráulica Sanitaria y Especiales del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS, 1997), en

función de la precipitación de diseño, la pendiente y el área tributaria (Tabla 33), empero, la pendiente mínima será aquella que produzca una velocidad de 60 *cm/s* con el gasto máximo probable y la pendiente máxima será aquella que produzca una velocidad de 3.0 *m/s* con el gasto máximo probable.

Para determinar la capacidad de conducción se utiliza el mismo procedimiento de las conducciones verticales, un diseño más formal se puede realizar considerando flujo uniforme (23) o flujo permanente (I.6.3.3).

II.11 Volumen de demasías/excedencias

Los sistemas de primeras lluvias, filtración y volumen de almacenamiento de agua pluvial deberán incorporar un sistema de demasías, con sello hidráulico para evitar retorno de agua y ser canalizados al tanque de tormenta, en caso de no ser factible, canalizarse directamente a superficies Clase 4, (banquetas, andadores, vialidades), a través de una infraestructura verde/azul, fuera del predio, antes de la descarga al colector municipal (SACMEX, 2020).

Estas canalizaciones permitirán el desfogue de los volúmenes excedentes del tanque de almacenamiento de agua pluvial, el sistema de tormentas y todos aquellos puntos en los que un sobre volumen de agua pueda causar daños a la instalación o a la edificación. Las canalizaciones en piso no podrán ocupar más del 90% de su sección transversal, por sistemas constructivos es recomendable que la sección mínima de descarga sea un diámetro nominal de 100 mm y se evaluará conforme a la ecuación (63).

II.12 Tren de tratamiento

Esta fase del sistema tiene distintas formas de implementación y dependerá del uso que se le dará al agua colectada y la calidad requerida para ese uso.

En los casos donde el agua colectada se emplee en servicios potables se atenderá conforme a los tratamientos descritos en la NOM-127-SSA1-1994, esto es, filtrado de lecho profundo, absorción en carbón activado y desinfección o cualquier combinación descrita en la norma y que garantice el cumplimiento de la misma.

Cuando donde el aprovechamiento de agua de lluvia corresponda a usos no potables se garantizará el cumplimiento de la NOM-003-SEMARNAT-1997 y podrá realizarse por medio de filtros de lecho profundo y/o absorción en carbón activado, o cualquier otro método que atienda a los límites máximos permisibles de la norma. Finalmente, si las superficies Clase 3 son aprovechadas (Tabla 29), se deberá implementar un sistema de retención de grasas y aceites inmediatamente antes de incorporarse al sistema de pre-filtro.

En el mercado existen diversas marcas que comercializan filtros de lecho profundo, absorción por carbón activado y diversos métodos de desinfección (Ilustración 33). En todo caso se deberá implementar el método, o conjunto de métodos, que satisfaga la calidad de agua requerida (tren de tratamiento).

El gasto de diseño para la selección de estos equipos será el caudal máximo de abastecimiento en los aparatos del sistema de aprovechamiento de agua pluvial (apartado II.8.1).



Ilustración 33 Filtro de lecho profundo con sistema de retro lavado manual modelo SOFT-LP-0948M MCA EVANS, flujo max. 22 lpm y Filtro carbón activado con sistema de retro lavado automático modelo SOFT-FL-0948 MCA EVANS, flujo max. 18 lpm.

De esta forma, se pueden presentar distintas configuraciones en el sistema de captación y suministro de agua de lluvia, la configuración más adecuada dependerá de las exigencias del proyecto y de la calidad del agua de lluvia antes de ser almacenada, lo anterior responde a la calidad de las superficies de captación.

En los siguientes esquemas se muestran algunas configuraciones de implementación:

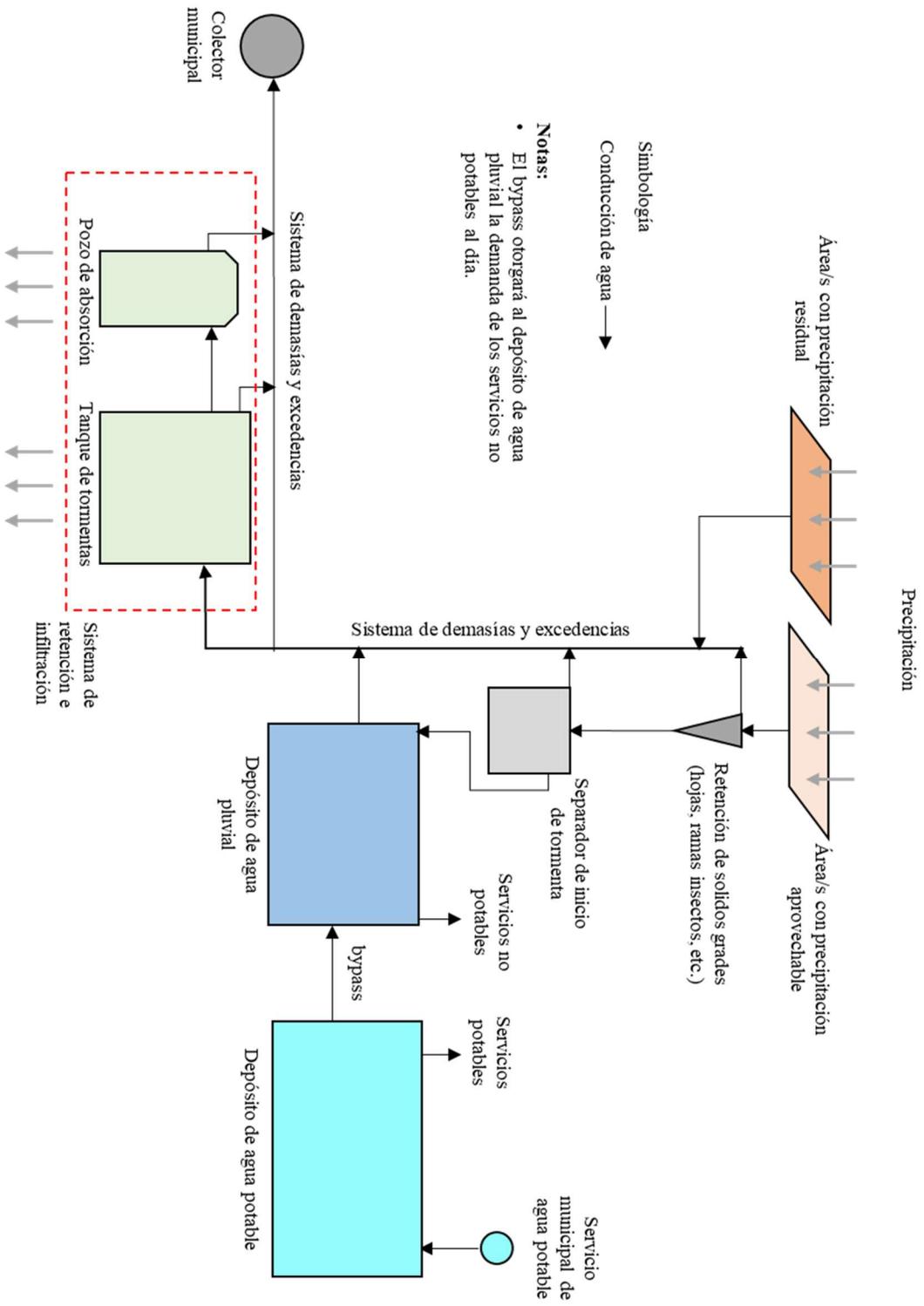


Ilustración 34 Configuración de un SCALL simplificado, adecuado para sistemas residencial unifamiliar

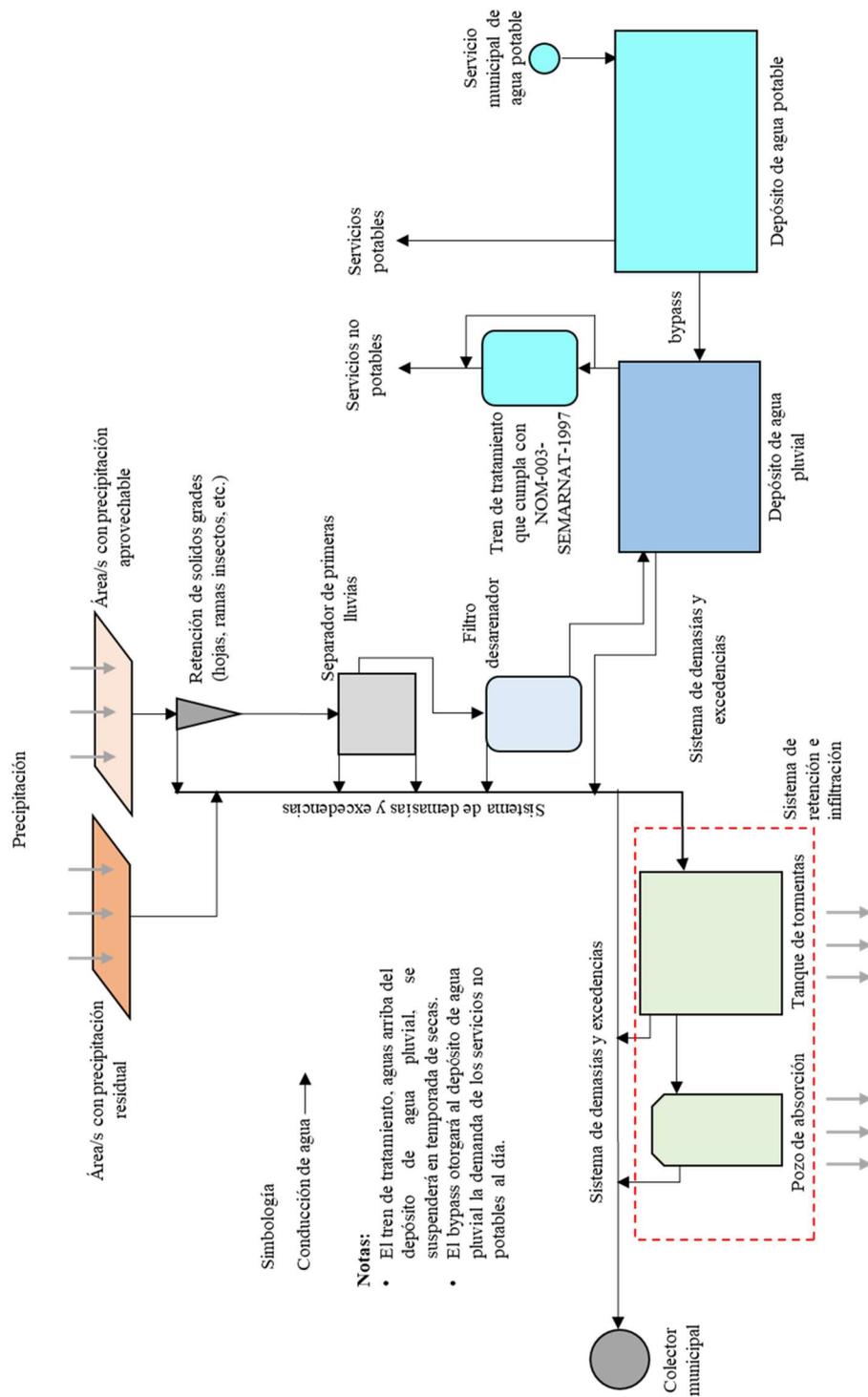


Ilustración 35 Configuración de un SCALL con abastecimiento a servicios no potables cumpliendo la NOM-003-SEMARNAT-1997

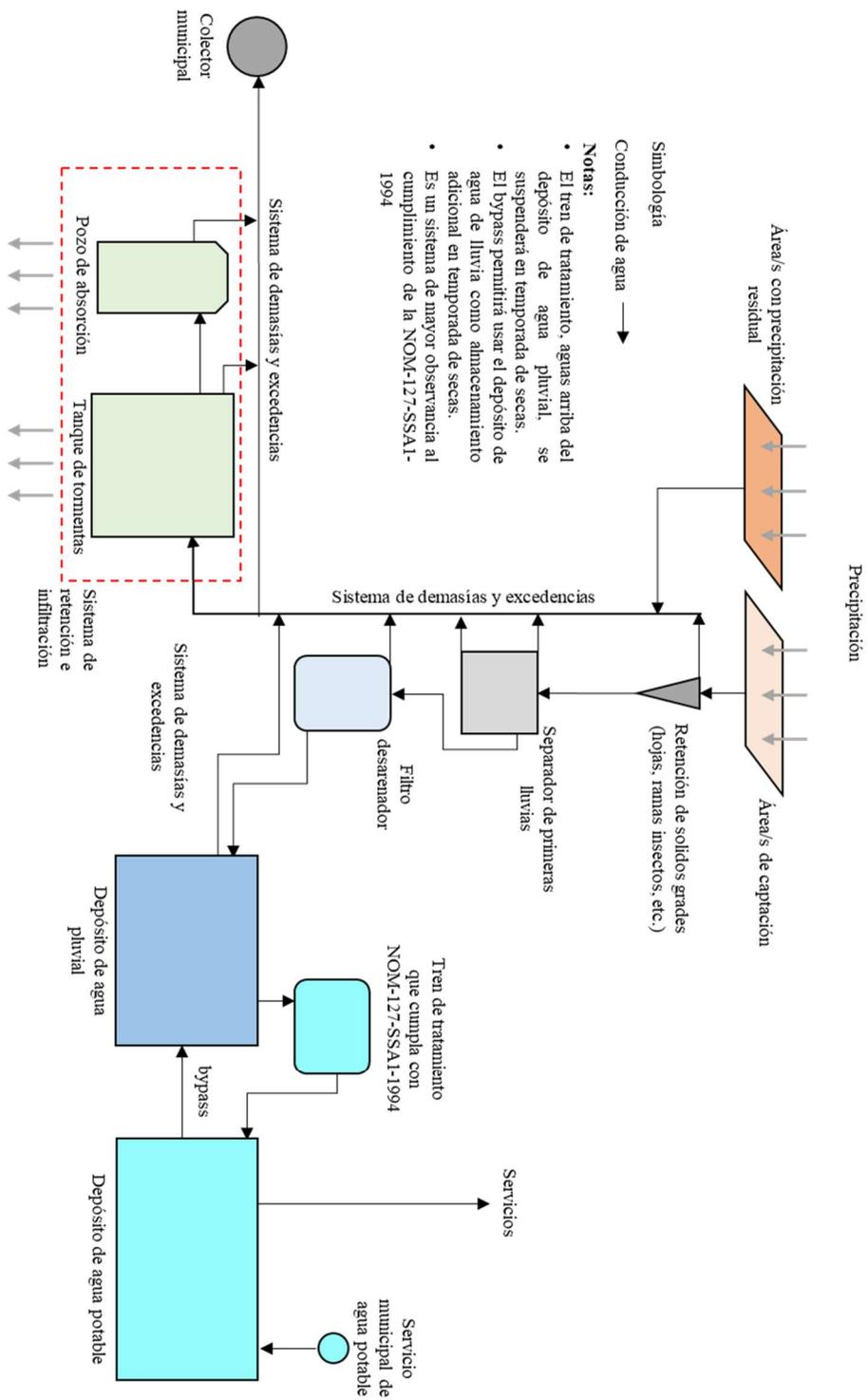


Ilustración 36 Configuración de un SCALL con abastecimiento a servicios potables cumpliendo la NOM-127-SSA1-1994

II.13 Red de abastecimiento de agua

Una red habitacional de abastecimiento de agua se utiliza para conducir el líquido de un punto a otro mediante gravedad y/o presión; para ello se requieren equipos, dispositivos y accesorios de control y suministro.

Una red de abastecimiento en edificaciones está compuesta por conductos a presión (tuberías), accesorios de control (válvulas, reducciones, uniones, etc.), entradas, salidas y, debe ser evaluada en su conjunto para determinar el mejor servicio posible. En un proyecto ejecutivo/de construcción la red de abastecimiento se describe con trayectorias, geometría, diámetros, y accesorios hidráulicos.

En las Normas Técnicas Complementarias Para el Diseño y Ejecución de Obras e Instalaciones Hidráulicas (NTCIH) (GODF, 2004) se establecen recomendaciones de métodos, procedimientos y parámetros para el diseño y construcción de obras hidráulicas.

Si el sistema cumple con la NOM-127-SSA1-1994, que por definición es agua para uso y consumo humano, se podrá incorporar al sistema de agua potable, con anterioridad se mencionaron las dificultades que esto implica por lo que es recomendable el uso de agua pluvial para servicios no potables y que la calidad del agua cumpla con la NOM-003-SEMARNAT-1997, en este caso la red de abastecimiento de agua pluvial será independiente de la red de agua potable.

II.13.1 Datos preliminares

Para realizar el diseño de la red de abastecimiento en una edificación es necesario contar con datos preliminares siguientes:

- Propiedades físicas del agua (Tabla 13).
- Trazo de trayectorias y propuesta de sus diámetros.
- Ubicación de accesorios y localización de equipos en planos arquitectónicos.
- Especificaciones técnicas de los muebles o equipos.

Para evaluar la red de abastecimiento es necesario que esta posea características que den al usuario condiciones de servicio adecuadas, esto implica disponer de la carga de presión suficiente para los *muebles*; según las recomendaciones de las NTCIH (GODF, 2004), un mueble o equipo requerirá las condiciones expresadas en la Tabla 12.

Tabla 12 Cargas mínimas de trabajo (GODF, 2004)

Mueble o equipo	Diámetro	Carga de trabajo
	mm	m.c.a.
Inodoro (fluxómetro)	32	10
Inodoro (Tanque)	13	3
Lavabo	13	3
Lavadero	13	3
Mingitorio (fluxómetro)	25	10
Mingitorio (llave de resorte)	13	5
Regadera	13	10
Salida para riego con manguera	19	17
Vertedero de aseo	13	3
Fredero (por mezcladora)	13	3
Lavado de Loz	13	14

Tabla 13 Propiedades físicas del agua, recuperado de (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016)

Temperatura	Densidad	Peso específico	Viscosidad	Viscosidad cinemática	Tensión superficial	Presión de vapor (absoluta)	Módulo de elasticidad volumétrico
t	ρ	γ	μ	ν	σ	P_v	E_v
C°	kg/m ³	kN/m ³	Pa*s	m ² /s	N/m	Pa	Pa
0	999.900	9.809	1.792E-03	1.792E-06	7.62E-02	6.10E+02	2.04E+09
5	1000.000	9.810	1.519E-03	1.519E-06	7.54E-02	8.72E+02	2.06E+09
10	999.700	9.807	1.308E-03	1.308E-06	7.48E-02	1.23E+03	2.11E+09
15	999.100	9.801	1.140E-03	1.14E-06	7.41E-02	1.70E+03	2.14E+09
20	998.200	9.792	1.005E-03	1.00E-06	7.36E-02	2.34E+03	2.20E+09
25	997.000	9.781	8.91E-04	8.94E-07	7.26E-02	3.17E+03	2.22E+09
30	995.700	9.768	8.01E-04	8.04E-07	7.18E-02	4.24E+03	2.23E+09
40	992.200	9.733	6.56E-04	6.61E-07	7.01E-02	7.38E+03	2.27E+09
50	988.100	9.693	5.49E-04	5.56E-07	6.82E-02	1.23E+04	2.30E+09
60	983.200	9.645	4.69E-04	4.77E-07	6.68E-02	1.99E+04	2.28E+09
70	977.800	9.592	4.06E-04	4.15E-07	6.50E-02	3.12E+04	2.25E+09
80	971.800	9.553	3.57E-04	3.67E-07	6.30E-02	4.73E+04	2.21E+09
90	965.300	9.470	3.17E-04	3.28E-07	6.12E-02	7.01E+04	2.16E+09
100	958.400	9.402	2.84E-04	2.96E-07	5.94E-02	1.01E+05	2.07E+09

Nota: Para determinar el peso específico se consideró $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$

La presión que se necesita para alimentar al mueble más desfavorable se denomina carga requerida (h_m) o carga de trabajo, para adicionar esta carga existen distintos métodos, la manera de implementarlos dependerá de la experiencia del proyectista y en su caso de los espacios disponibles para equipos o especificaciones arquitectónicas, algunos de los métodos más utilizados son:

- Tanque elevado
- Bomba presurizadora
- Bombeo de velocidad variable a presión constante
- Sistema hidroneumático

Tanque elevado. La CDT se calculará hasta el punto de conexión al tanque elevado, suele ser el sistema más económico, pero no proporciona cargas mayores a los 2 metros en servicios de planta alta.

Bomba presurizadora. Puede actuar en conjunto con un tanque elevado, o no. Si actúa con tanque elevado la CDT se calculará hasta dicho tanque y la bomba presurizadora será seleccionada en función de las condiciones de presión requeridas por el usuario.

Bombeo de velocidad variable a presión constante. Es un conjunto de equipos y control que suministran el agua a los servicios a determinada presión, esta presión es asignada por el proyectista en función de los requerimientos de los muebles donde se aprovechará el agua colectada. En este caso la CDT se calculará para la presión mínima requerida por el mueble más desfavorable y se considerarán todos los tramos que estén conectados al sistema.

Sistema hidroneumático. Consiste en el conjunto bomba, tanque de presión y equipos de control, estos actúan entre sí presurizando una red de abastecimiento, en este caso la CDT debe ser calculada para la carga de trabajo más una carga de presión que variará en función del llenado y vaciado del tanque de presión. Según el INIFED (2015) el equipo hidroneumático tendrá una presión máxima de operación de 4.2 kg/cm^2 (60 psi, 42 m.c.a.) y según las NTCIH (GODF, 2004), la velocidad máxima y mínima del fluido dependerá del tipo de material (Tabla 14). La curva del sistema se evaluará con la ecuación (51).

Tabla 14 Velocidades mínimas y máximas en tuberías (GODF, 2004)

Material de la tubería	Velocidad m/s	
	Máxima	Mínima
Concreto simple hasta 45 cm de diámetro	3	0.3
Concreto reforzado de 60 cm de diámetro o mayores	3.5	0.3
Concreto presforzado	3.5	0.3
Acero con revestimiento	5	0.3
Acero sin revestimiento	5	0.3
Acero galvanizado	5	0.3
Asbesto cemento	5	0.3
Fierro fundido	5	0.3
Hierro dúctil	5	0.3
Polietileno de alta densidad	5	0.3
PVC (policloruro de vinilo)	5	0.3

II.13.2 Selección de los equipos de bombeo

Dependiendo del tipo de sistema de suministro seleccionado, se propondrán los equipos de bombeo más adecuados para un correcto funcionamiento del sistema; la información básica requerida para realizar la selección de cualquier equipo de bombeo es, la Carga Dinámica Total, el gasto de diseño y la curva del sistema. Es importante mencionar que a mayor gasto de diseño y malas consideraciones de la red de abastecimiento los equipos de bombeo estarán sobredimensionados o sub dimensionados, lo que conducirá a bajas eficiencias de los equipos y un funcionamiento poco adecuado.

La capacidad de las bombas no debe exceder el 15% o 20% sobre el caudal de diseño. Un margen excesivo en la capacidad de la bomba puede llevar a una operación fuera de lo recomendado por el fabricante, Por otro lado, utilizar una bomba por periodos largos de operación y a una fracción del caudal de diseño tendrá consecuencias como operar a bajas eficiencias, mayor susceptibilidad de presentar cavitación y altos niveles de vibración (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016).

Para determinar la posibilidad de cavitación se emplea el concepto de la carga de succión positiva neta (NPSH o CSPN) de la ecuación (43).

Finalmente, con la curva del sistema (en función de la carga estática mínima y máxima), la curva de la bomba y la curva de eficiencia, se evalúa el punto de operación.

III. Caso de estudio

En la metodología expuesta se recalca que el dimensionamiento de un SCALL está estrechamente relacionado con la precipitación que se presenta en la zona, el área de captación y sus características físicas, la demanda y calidad del agua pluvial. Por ello, en este apartado se expone la interacción que existe entre las distintas consideraciones de un SCALL las variaciones que se pueden presentar en los volúmenes del depósito de agua pluvial y volúmenes de retención e infiltración. Además, se expone el procedimiento para la determinación de lluvia esperada empleando la simulación de Monte Carlo (apartado I.5.8) y la simulación del funcionamiento de vasos (título I.5.7), para el dimensionamiento del depósito de agua pluvial. Lo anterior será desarrollado para un caso de estudio localizado en la Alcaldía Iztapalapa en la Ciudad de México, en donde, la implementación de un SCALL ayude a mitigar la problemática del abastecimiento de agua potable.

III.1 Ubicación

En el oriente de la CDMX, en la alcaldía Iztapalapa (Ilustración 37), se presentan múltiples problemas de abastecimiento de agua potable, entre ellos, suministro por tandeos, falta de agua y fugas (Ilustración 6), por lo tanto, la implementación de un SCALL es una adecuada alternativa al suministro de agua. Concretamente, al oriente de la alcaldía Iztapalapa se observa mayor persistencia de problemáticas relacionadas con el abastecimiento de agua, por lo anterior sería el lugar más idóneo de implementación.

De esta forma, para la evaluación de la precipitación se utiliza la estación climatológica 15050 LOS REYES 19.358° , -98.992° , pues es la estación con influencia más cercana a la zona de estudio, además de encontrarse activa; la ubicación de la estación corresponde a la isoyeta 147 mm, según el mapa de isoyetas con duración de 5 minutos y periodo de retorno de 10 años del SACMEX (Ilustración 37).

III.2 Características generales

Con la finalidad de aplicar la metodología de manera generalizada y con fines ilustrativos de cálculo, en la ubicación propuesta se supone que se encuentra una construcción tipo A, en la cual existe la necesidad de construir un SCALL, con una superficie de captación clase 1 de $70 m^2$ y otra de clase 3 de $50 m^2$, la primera, debido a sus condiciones de superficie, le corresponde un coeficiente de escurrimiento de 0.95, mientras que a la segunda uno de 0.8.

Además, con la finalidad de obtener tablas de diseño, para el caso de estudio, se considerará una superficie de captación clase 1 con áreas de $0-330 m^2$ y otra de clase 3 (no aprovechable) de $50 m^2$; en ambos casos se considerarán distintas demandas de agua pluvial ($0.1-1 m^3/día$).

Por otra parte, la lluvia acumulada anual correspondiente a la estación más cercana (15050), se muestra en la Gráfica 4, a saber, el promedio de precipitación diaria, la media y desviación estándar de la lluvia acumulada anual son $1.519 mm$, $554.42 mm$ y $134.73 mm$, respectivamente.

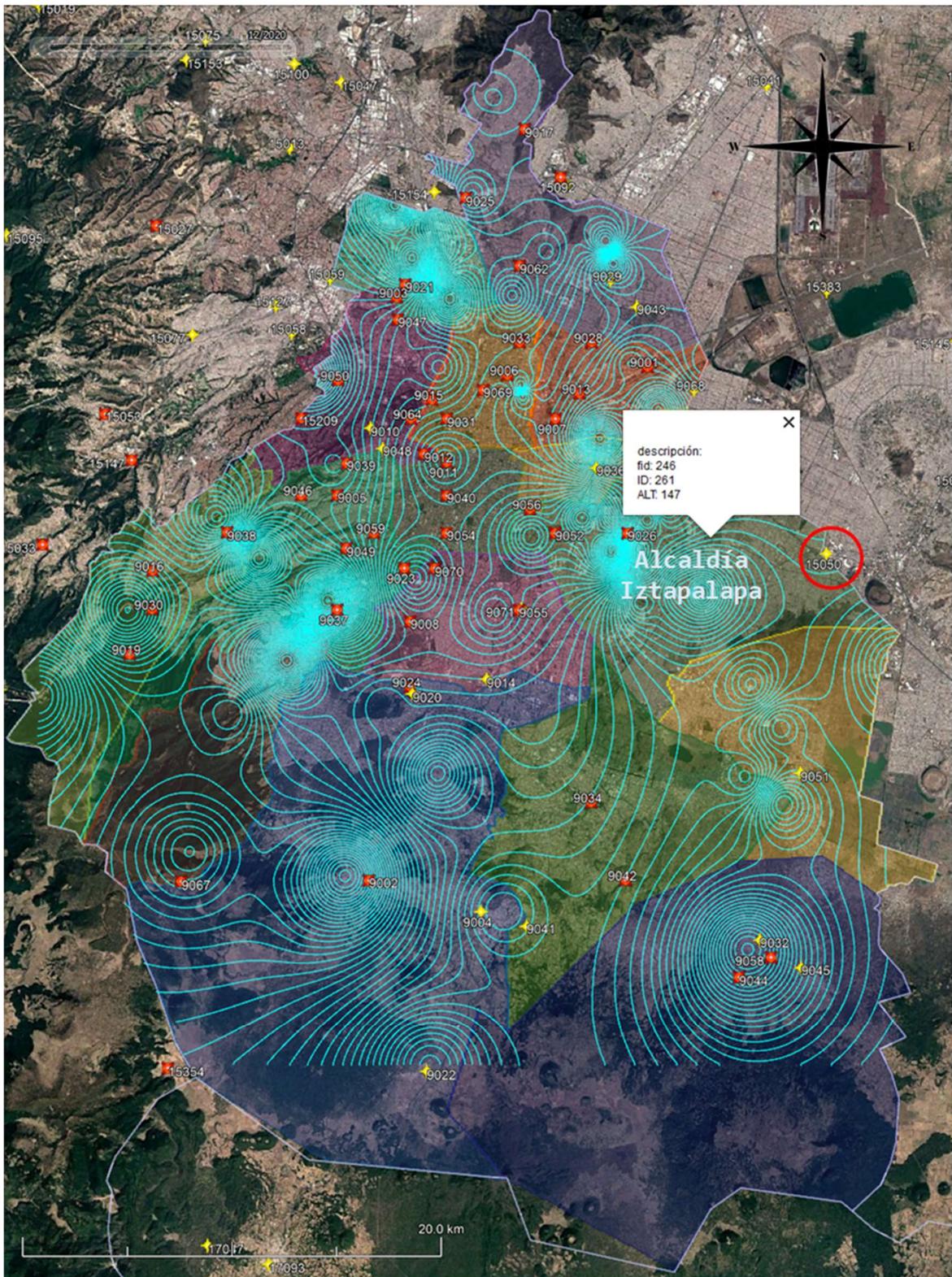
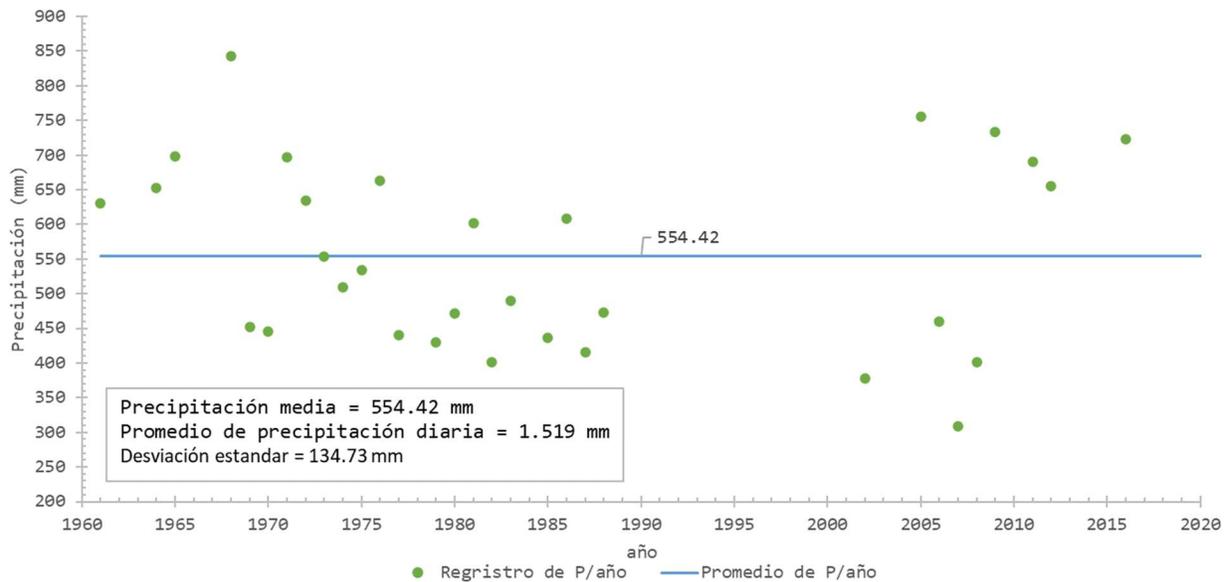


Ilustración 37 Estaciones climatológicas de la CONAGUA, ubicación de la estación climatológica 15050 y mapas de isoyetas de 5 minutos y 10 años de periodo de retorno (SCAMEX).



Gráfica 4 Precipitación histórica anual de la estación 15050

III.3 Precipitación característica

Para determinar la precipitación característica, se empleará la simulación de Monte Carlo (apartado I.5.8), para ello:

- a) Se ordenan los valores de lluvia por año y día juliano (1-365), posteriormente se verifica la cantidad y calidad de estos para asegurar que se obtendrán datos típicos de precipitación; habrá años que tengan que ser completados o excluidos por no representar la lluvia completa del año (Tabla 15).

Tabla 15 Orden de datos de precipitación en un año Juliano

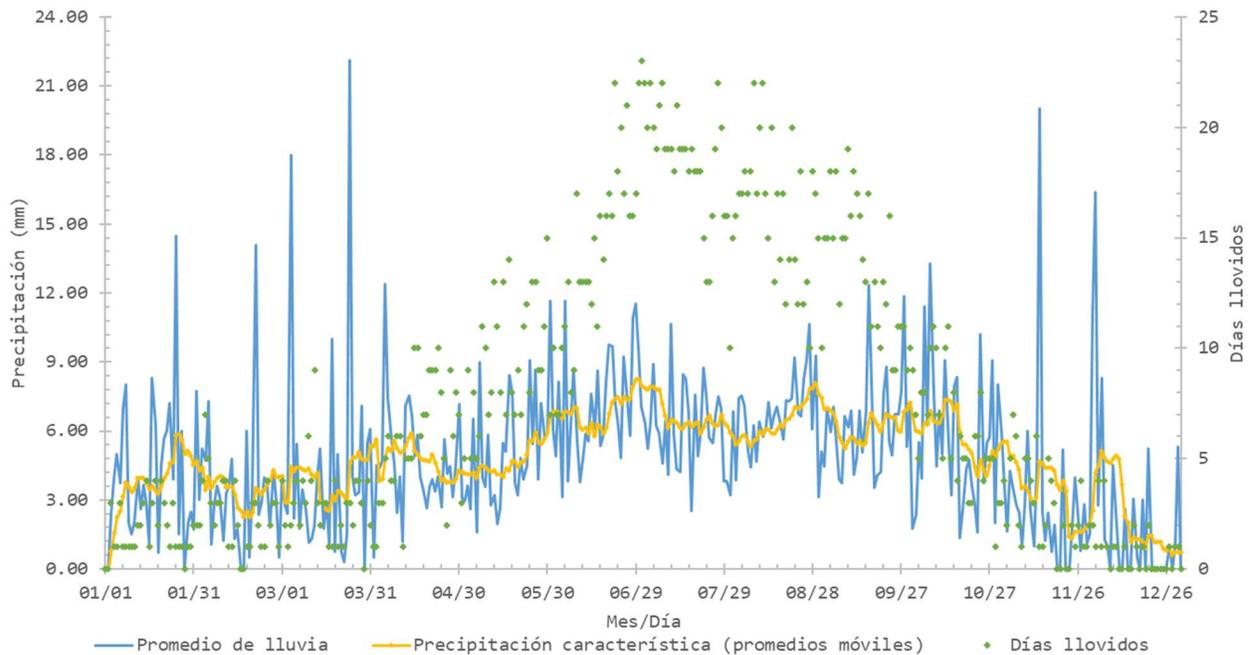
	Año 1	Año 2	Año 3	Año n...
mes/día	mm			
01/01	4	6	0	0
01/02	3	0	1	2
...
12/31	0	2	3	1

- b) Con los datos ordenados, (1-365) de todos los años disponibles se procede a (Tabla 16):
 - Sumar la precipitación de cada día juliano P_{ac} (columna 2).
 - Contar los días con lluvia n_{dP} (columna 3).
 - Determinar la precipitación media $P_m = P_{ac}/n_{dP}$ (columna 4).
 - Calcular los promedios móviles; P_{mov} , los cuales permiten suavizar las variaciones aleatorias de los datos y detectar los periodos de lluvia (columna 5).

Tabla 16 Días con lluvia, precipitación media y promedios móviles

	suma	Días llovidos	Promedio	Promedio móvil
mes/día	mm	días	mm	mm
01/01	10	2	5	5
01/02	6	2	3	4
...
12/31	6	3	2	3.5

El resultado es una gráfica de la precipitación característica, la cual corresponde a los promedios móviles. (Gráfica 5); en dicha gráfica se observa que la variación del promedio de precipitación en la temporada de secas es grande, en principio debido a la naturaleza de los datos crudos o a una incorrecta lectura de los datos, por lo que, al implementar los promedios móviles se descarta que exista una variación significativa en la precipitación en dicha temporada. Más adelante se expondrá la variación de los niveles o almacenamiento de agua en los depósitos al emplear el promedio de lluvia y los promedios móviles.



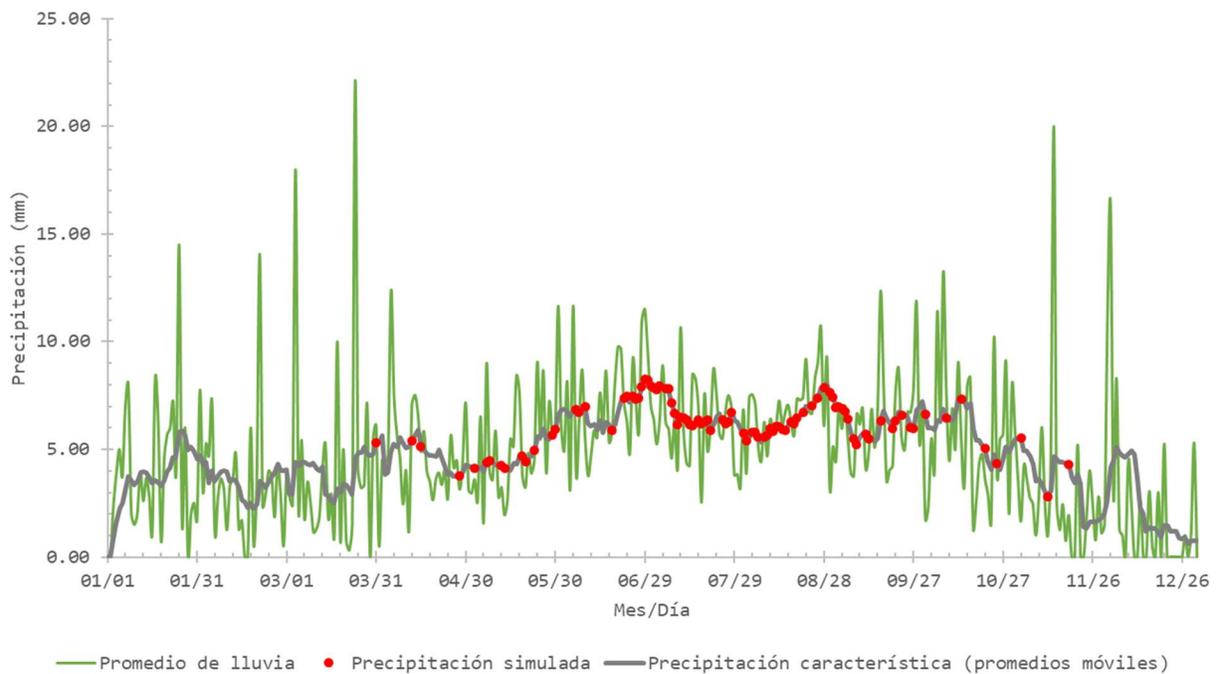
Gráfica 5 Precipitación característica de la estación 15050

- c) Posteriormente, con los datos de lluvia característica (Tabla 17):
- Se ordena el número de días llovidos de menor a mayor, conservando la fecha de ocurrencia (mes/día) (columna 1 y 2).

- A los días ordenados se le asocia el valor de la precipitación característica o promedios móviles que corresponda a dicho día (columna 3)
 - Se calcula la frecuencia relativa de los días con lluvia (columna 4).
 - Se calcula la frecuencia relativa acumulada de los días con lluvia (columna 5).
- d) Enseguida se simula la precipitación que se presentará en un año cualquiera (Simulación de Monte Carlo) (Tabla 17); para ello:
- Se genera un número aleatorio entre 0 y 1 para cada día (columna 6).
 - Si la frecuencia relativa acumulada es menor que el número aleatorio generado, implica que no se presentará lluvia; en caso contrario se presentará la precipitación característica (columna 7).
 - Se reordenan los datos en su forma natural inicial (secuencia ordenada del año).
 - Se grafican los datos (Gráfica 5).

Tabla 17 Frecuencia relativa, frecuencia relativa acumulada y simulación de la precipitación característica

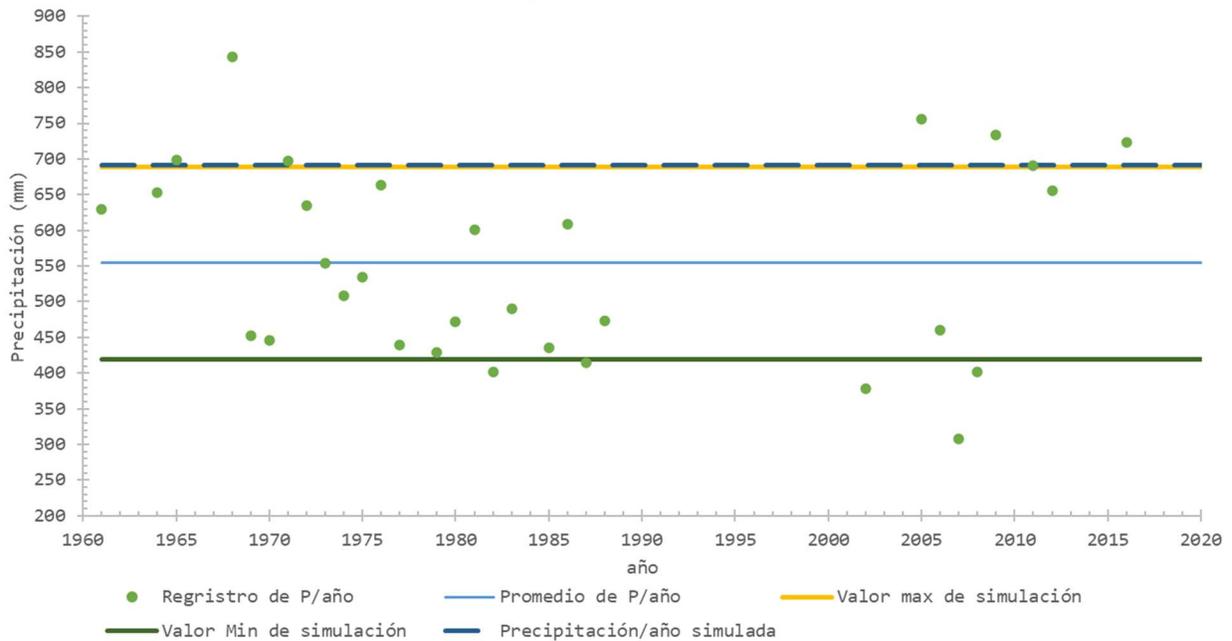
	Días llovidos	Precipitación característica	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada	Aleatorio	Lluvia en un año cualquiera simulado
mes/día	días	mm				mm
01/28	0	0	0	0	0.09885	0
06/27	17	7.79	0.00551	0.57027	0.72368	0
...
07/01	25	7.87	0.00810	1	0.1369	7.87
suma	3088					692.46



Gráfica 6 Precipitación simulada en un año de la estación 15050, empleando promedios móviles.

El resultado de la simulación es la precipitación diaria en un año cualquiera, asociado a la línea de tendencia del promedio de lluvia móvil (Gráfica 6)-

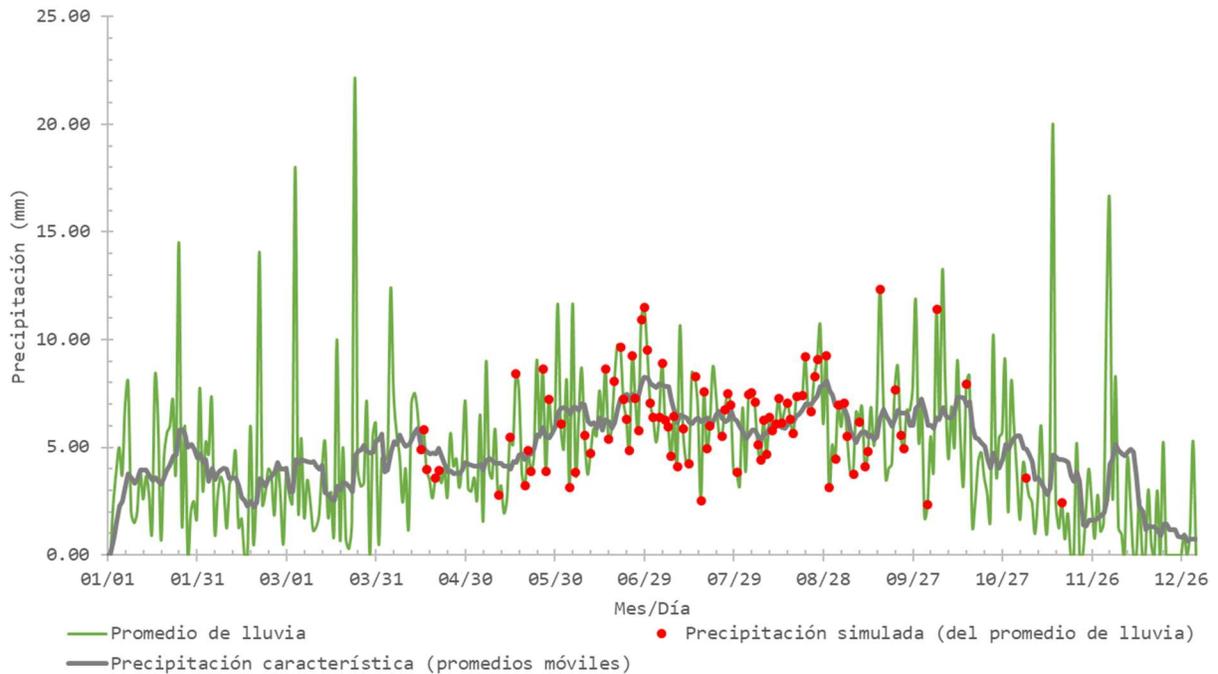
- e) Finalmente, la suma de la precipitación característica en un año se debe encontrar en el intervalo de la precipitación media anual \pm la desviación estándar, en caso contrario esa precipitación simulada en el año puede ser descartada (Gráfica 7).



Gráfica 7 Simulación de precipitación acumulada en un año de la estación (15050)

El procesamiento de los datos permitirá realizar tantas simulaciones de precipitación de años que se requieran, cada simulación es distinta y es importante recalcar que se encuentra asociada a datos históricos, de esta forma, la precipitación simulada es coherente con la temporada de lluvias.

En la Gráfica 8 se presenta la lluvia esperada en un año cualquiera asociada a la lluvia media diaria, en dicha gráfica se observan variaciones importantes en los valores, lo anterior tendría repercusiones en el funcionamiento de vasos, como un sobredimensionamiento o subdimensionamiento del depósito de agua pluvial.



Gráfica 8 Precipitación simulada en un año de la estación 15050, empleando el promedio de lluvia.

III.4 Simulación del funcionamiento de vasos

El funcionamiento de vasos aplicado a un depósito de agua de lluvia posee las características siguientes:

- Un volumen de entrada en función de la precipitación y las características de las superficies de captación.
- Un volumen de salida correspondiente a la demanda estimada de agua de lluvia.

III.4.1 Caudal de aportación

Así, a partir de la precipitación esperada (apartado III.3) y para la superficie clase 1 de 70 m^2 , primero se determina el volumen de inicio de tormenta (II.5), esto es:

$$P_{it} = \frac{1.519 \text{ mm}}{2} = 0.759 \text{ mm}$$

$$V_{it} = \frac{70 \text{ m}^2 \cdot 0.95 \cdot 0.759 \text{ mm}}{1000} = 0.0505 \text{ m}^3 = 50.50 \text{ litros}$$

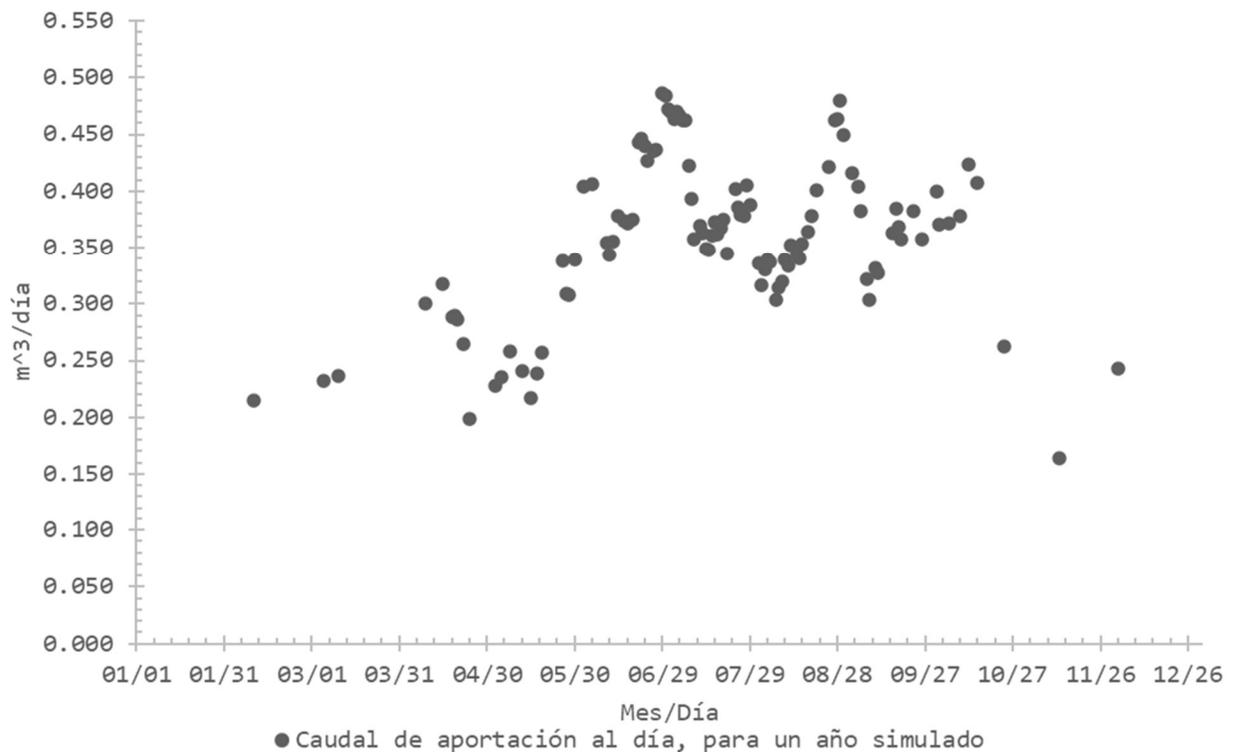
Enseguida, el caudal de aportación total correspondiente a la precipitación de un día cualquiera (7.97 mm), en este caso, el día primero de julio de un año cualquiera es (apartado II.4):

$$Q = \frac{0.95 \cdot 7.97 \frac{mm}{día} \cdot 70 m^2}{1000} = 0.530 \frac{m^3}{día}$$

Finalmente, el caudal de aportación, a partir de la precipitación esperada y restando la separación de inicio de tormenta es:

$$Q = 0.530 \frac{m^3}{día} - 0.0505 \frac{m^3}{día} = 0.479 \frac{m^3}{día}$$

Los valores del caudal de aportación diario para cada uno de los días de lluvia esperada de un año cualquiera se muestran en la Gráfica 9.



Gráfica 9 Caudal de aportación diario para un año simulado de la estación climatológica 15050 actuando en una superficie de Clase 1 de 70 m²

III.4.2 Demanda de agua pluvial

El volumen de salida del depósito corresponde a la demanda de agua pluvial y se determina conforme al punto II.8.1. Para el presente caso de estudio se realiza el análisis para una vivienda tipo, la cual dispone de

un fregadero, un WC con tanque, un lavabo, una regadera, una lavadora y una llave exterior. La demanda de agua potable según el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) (CONAGUA & SEMARNAT, 2019), es la siguiente (Tabla 18):

Tabla 18 Análisis de consumo de agua potable

Análisis de consumo de agua potable	
Datos	
Población total:	4.00 habitantes
Periodo de diseño:	15.00 años
Días al año:	365.00 Días
Tasa de crecimiento 2020 (INEGI):	1.2%
Población de diseño:	5.00 habitantes
Cálculo de consumo doméstico de agua potable	
NSE:	1
Tipo de clima:	<u>Cálido Húmedo</u>
	243.00 l/hab/día
consumo doméstico:	1,215.00 l/día
	1.22 m3/día

La demanda de agua pluvial se puede estimar como un porcentaje de la demanda de agua potable y en función de la cantidad de agua que utiliza cada aparato/mueble, a saber, el caudal máximo probable en la red de agua potable y la red de agua pluvial se evalúa con el método de Hunter (II.8.1.1); así, para el caso de estudio, los caudales máximos probables en la red de agua potable y pluvial en la vivienda tipo, se determinan conforme a la Tabla 19 y Tabla 20 respectivamente.

Tabla 19 Gasto máximo probable de la red de agua potable, método de Hunter.

MÉTODO HUNTER									
TIPO DE MUEBLE			Fregadero	WC tanque	Lavabo	Regadera	Lavadora	Llave exterior	UM
UM por mueble			2	3	2	2	2	1	Totales
Núcleo		Cant	C a n t i d a d d e m u e b l e s						
Descripción	Tipo								
NÚCELO TIPO	1	1	1	1	1	1	1	1	12
APARATOS	=	6							12
Qmp=		0.650 l/s							

Tabla 20 Gasto máximo probable de la red de agua pluvial, método de Hunter.

MÉTODO HUNTER									
TIPO DE MUEBLE			Fregadero	WC tanque	Lavabo	Regadera	Lavadora	Llave exterior	UM Totales
UM por mueble			2	3	2	2	2	1	
Núcleo			C a n t i d a d d e m u e b l e s						
Descripción	Tipo	Cant							
NÚCELO TIPO	1	1	1					1	4
APARATOS	=	2							4
Qmp=		0.310 l/s							

Finalmente, con los resultados anteriores, se desprende que el caudal máximo probable de agua pluvial (0.310 l/s), representa el 47.69% del agua potable (0.650 l/s), por lo tanto, si la demanda de agua potable es de 1,215 l/día (100 %), el 47.69 % de agua pluvial corresponderá a 579.46 l/día ($0.579m^3/día$) (Tabla 21).

Tabla 21 Consumo de agua pluvial

Consumo de agua pluvial	
Consumo agua potable	1,215.00 l/día
Caudal máximo probable (potable)	0.650 l/s
<u>Caudal máximo probable (pluvial)</u>	0.310 l/s
% de utilización de agua pluvial respecto agua potable	47.69 %
<u>Consumo de agua pluvial</u>	579.46 l/día

III.4.3 Consideraciones, cálculos y resultados

Para aplicar el funcionamiento de vasos para determinar el volumen del depósito de agua pluvial es necesario tener en cuenta lo siguiente:

El caudal de aportación calculado a partir de la lluvia esperada cambia conforme al año de simulación, por lo tanto, el resultado del funcionamiento de vasos también será variable y proporcional a dicha precipitación.

El volumen de agua pluvial demandado se considera constante, es un valor que depende del uso que se dará al agua pluvial y si se requiere considerarlo variable correspondería realizar un análisis más apropiado.

Es importante señalar que una restricción en el funcionamiento de vasos es el volumen de agua precipitado, para el cual se ha planteado que no excederá la demanda de agua pluvial al año; numéricamente es posible empero pensar que un hogar o proyecto se abastecerá plenamente de agua de lluvia, si así fuese el caso, resultaría en depósitos grandes.

El funcionamiento de vasos debe considerar la entrada de agua potable necesaria que garantice el suministro de la demanda de agua pluvial, si y solo si, el caudal de aportación es insuficiente para abastecer tal demanda.

De esta forma, al considerar una demanda de agua pluvial de $0.6 \text{ m}^3/\text{día}$, las condiciones iniciales del funcionamiento de vasos son las mostradas en la Tabla 22.

Tabla 22 Condiciones iniciales de funcionamiento de vasos

Funcionamiento de vaso sin restricciones de tamaño de depósito						
	Intervalo de tiempo	Agua potable	Aportación	Demanda	Inicio del día	Final del día
	Δt	Ei	$Ei p$	Si	Vi	$Vi+1$
mes/día	día	m^3	m^3	m^3	m^3	m^3
01/01	1.000	0.600	0.000	0.600	0.000	0.000

Al realizar el funcionamiento de vasos sin restricciones del tamaño del depósito (Tabla 23), se obtiene, para cada día del año, el volumen de aportación (columna 4), la demanda de agua pluvial en todo el año (columna 5), el volumen necesario de entrada de agua potable al depósito de agua pluvial (columna 3) y los volúmenes en el depósito al inicio (columna 6) y final (columna 7) del día, este último es un valor de interés para el cálculo del depósito de agua pluvial.

Tabla 23 Fragmento del funcionamiento de vaso sin restricciones de tamaño de depósito

Funcionamiento de vaso sin restricciones de tamaño de depósito						
	Intervalo de tiempo	Agua potable	Aportación	Demanda	Inicio del día	Final del día
	Δt	Ei	$Ei p$	Si	Vi	$Vi+1$
mes/día	día	m^3	m^3	m^3	m^3	m^3
6/15	1	0.228	0.000	0.600	0.372	0.000
6/16	1	0.600	0.367	0.600	0.000	0.367
6/17	1	0.233	0.361	0.600	0.367	0.361
6/18	1	0.239	0.000	0.600	0.361	0.000
6/19	1	0.600	0.359	0.600	0.000	0.359
6/20	1	0.241	0.000	0.600	0.359	0.000
6/21	1	0.600	0.431	0.600	0.000	0.431

De esta forma, el promedio del volumen al final del día (columna 7), tras 15 años de simulación es de 0.097 m^3 de agua y el valor máximo del volumen al final del día es 0.497 m^3 de agua.

Así y atendiendo el punto II.8.2, el volumen de almacenamiento de agua pluvial es:

$$V_{dap} = 0.097 \text{ m}^3 + 0.6 \text{ m}^3 = 0.697 \text{ m}^3$$

De la Tabla 23 observando los volúmenes finales del día (columna 7), pareciera que el volumen de depósito propuesto es pequeño, por esta razón, es necesario realizar un funcionamiento de vaso adicional que contenga la restricción del tamaño del depósito propuesto ($0.697 m^3$), de tal forma que se observe el derrame que tendrá dicho depósito; los resultados de dicho procedimiento, para los mismos días, se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24 Fragmento del funcionamiento de vaso con restricción de tamaño de depósito

Funcionamiento de vaso con restricciones de tamaño de depósito							
	Intervalo de tiempo	Agua potable	Aportación	Demanda	Inicio del día	Final del día	Derramado
	Δt	Ei	$Ei p$	Si	Vi	$Vi+1$	Vd
mes/día	día	m^3	m^3	m^3	m^3	m^3	m^3
6/15	1	0.228	0.000	0.600	0.372	0.000	0.000
6/16	1	0.600	0.367	0.600	0.000	0.367	0.000
6/17	1	0.233	0.361	0.600	0.367	0.361	0.000
6/18	1	0.239	0.000	0.600	0.361	0.000	0.000
6/19	1	0.600	0.359	0.600	0.000	0.359	0.000
6/20	1	0.241	0.000	0.600	0.359	0.000	0.000
6/21	1	0.600	0.431	0.600	0.000	0.431	0.000

El volumen al final del día (Tabla 24) no excede el volumen propuesto del depósito ($0.697 m^3$), lo anterior hace que el volumen derramado del sistema sea nulo; más adelante se ahondará sobre dicho resultado. De esta forma, para almacenar el agua pluvial se puede utilizar un depósito comercial de 750 litros ($0.75 m^3$) (título II.8.4), o un depósito armado de mínimo $0.697 m^3$ más un sobredimensionamiento de 15% de colchón de aire.

Antes de continuar con la metodología (cálculo del volumen de retención e infiltración) se debe recordar que para el presente caso de estudio se analizaron 2 áreas, una aprovechable de clase 1 y la otra no aprovechable de clase 3, por lo tanto, para esta última con un área de $50 m^2$, se obtuvo un volumen de aportación (V_A) de $0.330 m^3$ máximo en un día (apartado II.9).

$$V_A = \frac{8.25mm * 50m^2 * 0.8}{1000} = 0.330m^3$$

Para las condiciones de simulación, el sistema no presenta derrames provenientes del depósito de agua pluvial, por lo tanto, el volumen máximo derramado (V_{mr}) es $0 m^3$.

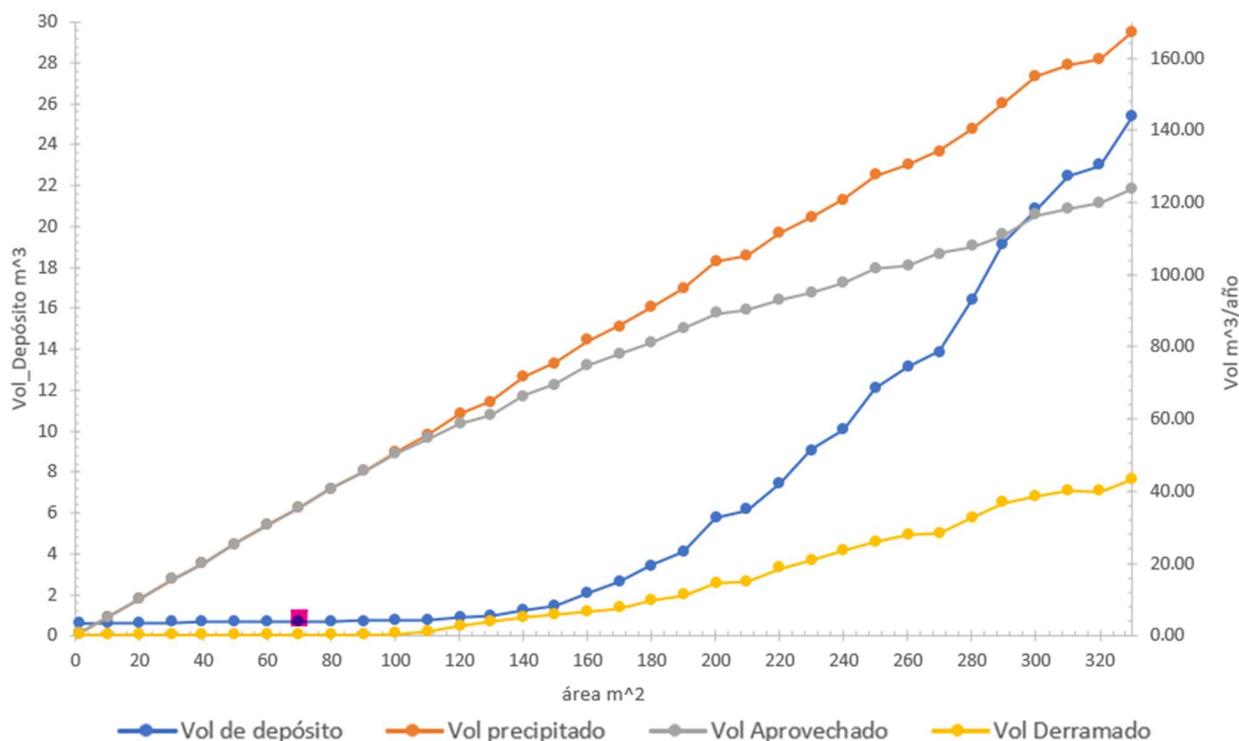
Entonces, el volumen de retención e infiltración es (apartado II.9):

$$V_{RI} = (0.330 m^3 + 0 m^3) \cdot 1.2 = 0.396 m^3$$

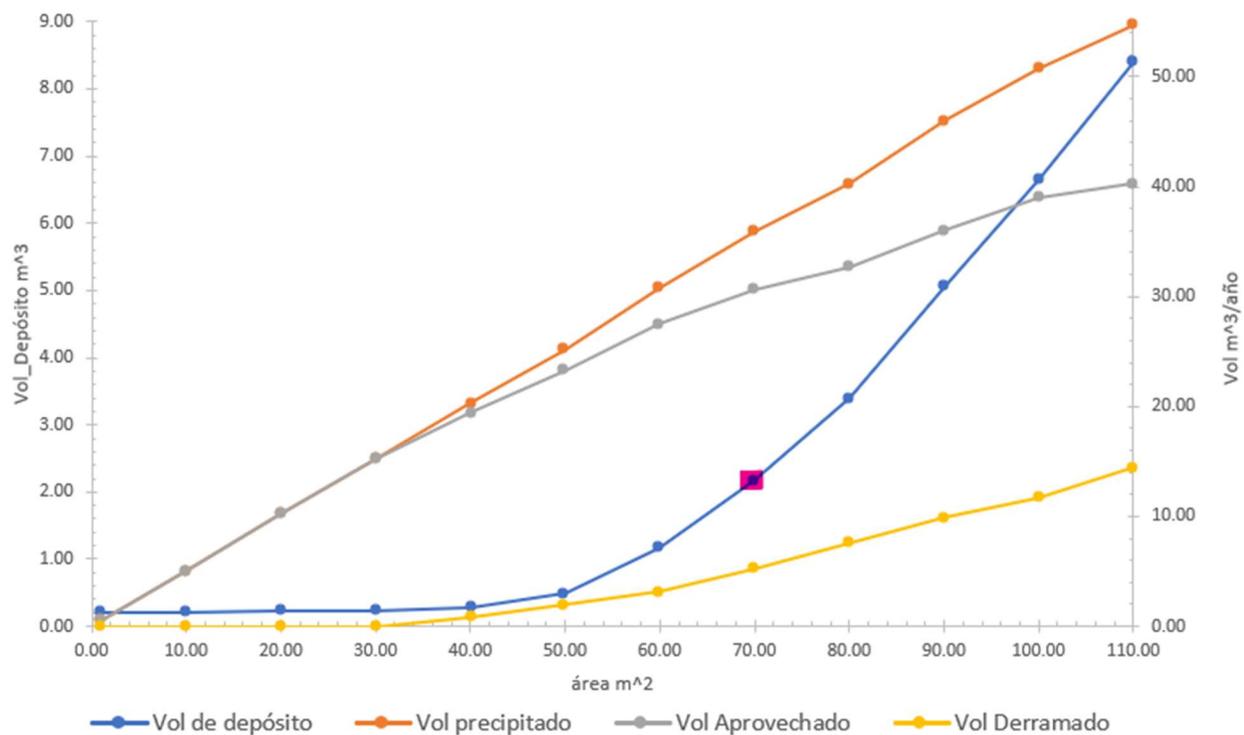
Para las condiciones de simulación elegidas es evidente que la demanda es grande en comparación con la lluvia esperada, por esta razón los derrames son nulos. Además, el valor adicional del 20% al volumen derramado y volumen de áreas no aprovechables tiene su justificación, esto es, al incrementar el área de

captación se incrementa el volumen de agua que entrará al depósito y por lo tanto existe mayor probabilidad de derrame.

Con la finalidad de generalizar el procedimiento para determinar el volumen del depósito de agua pluvial en función de la lluvia, área de captación y demanda, el cálculo se aplicó a distintas áreas de captación. Los resultados obtenidos para dos demandas distintas (0.6 y $0.2 \text{ m}^3/\text{día}$) se muestran en la Gráfica 10 y en la Gráfica 11, respectivamente.



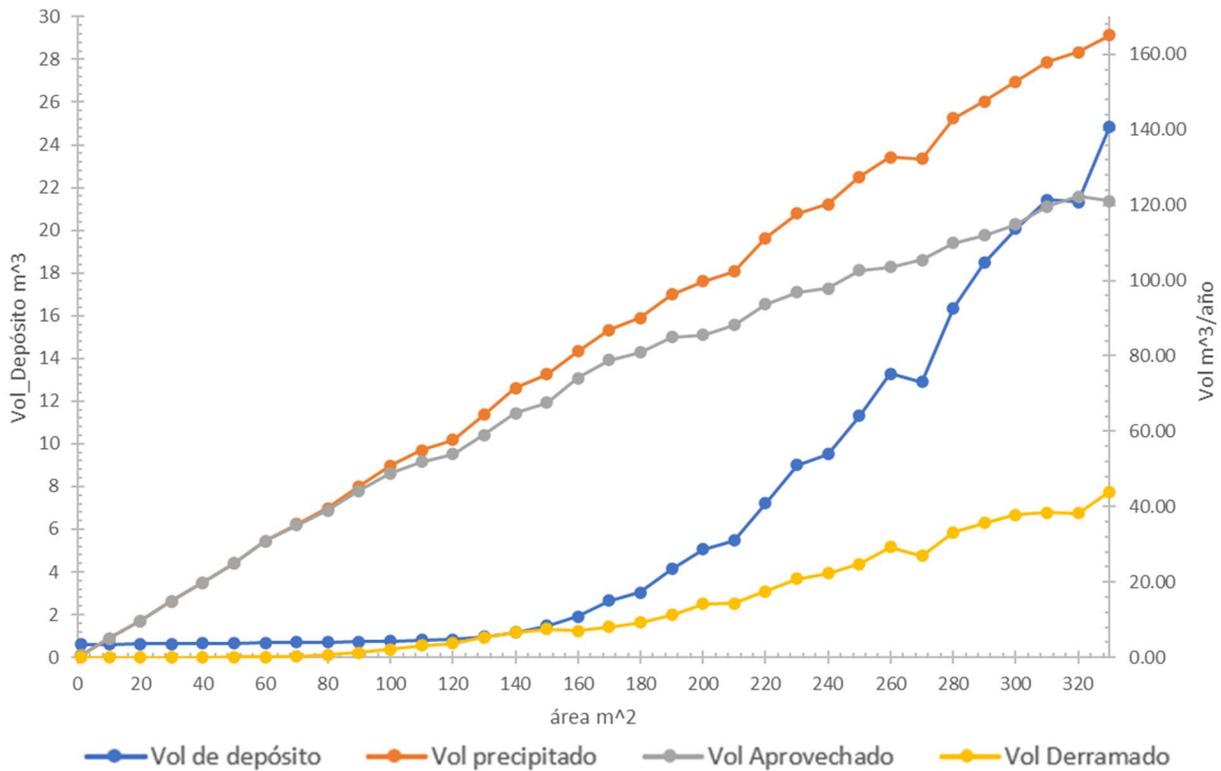
Gráfica 10 Volumen de depósito para distintas áreas de captación y demanda de $0.6 \text{ m}^3/\text{día}$



Gráfica 11 Volumen de depósito para distintas áreas de captación y demanda de 0.2 m³/día

De las gráficas anteriores, al disminuir la demanda de agua pluvial, bajo las mismas condiciones de área de captación y precipitación, el volumen de depósito se incrementa, ello no implica que el depósito esté mal dimensionado, sino, que el depósito calculado corresponde a la demanda y a la precipitación en el área de captación (Gráfica 11).

También se presenta el comportamiento del volumen del depósito empleando la lluvia promedio de cada día (Gráfica 12); se observa que al incrementar los valores del área de captación, los valores del volumen del depósito son similares a los obtenidos con la lluvia esperada (Gráfica 10), pero con un comportamiento “errático”, esto es, distintos a una curva suave y con tendencia positiva (Gráfica 10), por lo que, emplear la lluvia a partir de los promedios móviles para el cálculo es lo más adecuado.



Gráfica 12 Volumen de depósito para distintas áreas de captación y demanda de $0.6 \text{ m}^3/\text{día}$ con promedio de lluvia

El procedimiento anterior se aplicó en el área de captación considerando distintas demandas; el resumen de resultados se presenta en la Tabla 25, de dicha tabla se observa que existen días donde el depósito permanece vacío al final del día (última columna DDLL *Días con Depósito Lleno*), lo anterior se consideraría un depósito con bajo rendimiento, en cambio, un depósito que permanece completamente lleno durante algunos días del año sería lo más adecuado.

Además, al disminuir la demanda de agua pluvial, el volumen derramado es mayor debido al bajo uso del agua pluvial, por lo que, al presentarse una precipitación lo suficientemente importante, tal que supere el valor de la demanda, el depósito se llenará con facilidad (Tabla 25).

Una de las consideraciones en el funcionamiento de vasos es que el volumen total precipitado no excederá la demanda total al año, en este sentido, en la Tabla 25 (columna 5) se considera que un depósito es poco factible cuando el volumen precipitado al año es mayor o similar al volumen demandado al año, la condición anterior se observa en la fila 1 de resultados de la Tabla 25, donde, la demanda anual es baja y resulta menor al volumen precipitado que se presentará, por esta razón el volumen del depósito se consideró no factible (0 m^3).

Tabla 25 Resultados de volúmenes de depósito para un área de captación de 70 m² clase 1, 50 m² clase 3 y distintas demandas de agua pluvial

Demanda		Área	Vdap	Volumen Precipitado m ³ /año	Volumen Aprovechado m ³ /año	Volumen Derramado m ³ /año	Vol max derramado (Vmr) m ³ /día	VRI	VA	DDLL
m ³ /año	m ³ /día							m ²	m ³	m ³ /día
36.50	0.10	70.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
73.00	0.20	70.00	2.165	35.891	30.606	5.285	0.273	0.715	0.323	33.000
109.50	0.30	70.00	0.581	34.896	32.483	2.413	0.178	0.601	0.323	24.000
146.00	0.40	70.00	0.514	35.824	35.232	0.592	0.077	0.480	0.323	11.000
182.50	0.50	70.00	0.596	35.221	35.221	0.000	0.000	0.387	0.323	0.000
219.00	0.60	70.00	0.697	35.572	35.572	0.000	0.000	0.387	0.323	0.000
255.50	0.70	70.00	0.795	34.690	34.690	0.000	0.000	0.387	0.323	0.000
292.00	0.80	70.00	0.895	34.867	34.867	0.000	0.000	0.387	0.323	0.000
328.50	0.90	70.00	0.997	35.534	35.534	0.000	0.000	0.387	0.323	0.000
365.00	1.00	70.00	1.097	35.462	35.462	0.000	0.000	0.387	0.323	0.000
401.50	1.10	70.00	1.197	35.504	35.504	0.000	0.000	0.387	0.323	0.000
438.00	1.20	70.00	1.297	35.561	35.561	0.000	0.000	0.387	0.323	0.000
474.50	1.30	70.00	1.397	35.640	35.640	0.000	0.000	0.387	0.323	0.000
511.00	1.40	70.00	1.495	34.650	34.650	0.000	0.000	0.387	0.323	0.000

Respecto al volumen precipitado (columna 5 Tabla 25), se debe tener en cuenta que cada uno de los valores está asociado a 15 años de simulación y la variación en los resultados respecto al valor mínimo y máximo al año es de 3.46%.

III.4.3.1 Metodología SACMEX

Las dimensiones del depósito de agua pluvial según la guía de elaboración de sistemas alternativos del SACMEX se obtienen con una lluvia de 60 minutos de duración y 10 años de periodo de retorno, por lo que, la isoyeta que caracteriza la zona de estudio es 42.6 mm/hr, el coeficiente de escurrimiento para la superficie de captación clase 1 de 70 m² es de 0.95; de esta forma, el volumen de del depósito de agua pluvial (64) es:

$$V_{TP} = \frac{0.95 \cdot 42.6 \cdot 70}{1,000} = 2.83 \text{ m}^3$$

Para un área de 50 m² de superficie clase 3 el coeficiente de escurrimiento es 0.8, con lo anterior, el volumen de aportación (V_A) es:

$$V_A = \frac{0.8 \cdot 42.6 \cdot 50}{1,000} = 1.7 \text{ m}^3$$

El volumen de retención e infiltración (65) es:

$$V_{RI} = (0.55 \cdot 2.83 \text{ m}^3) + 1.7 \text{ m}^3 = 3.26 \text{ m}^3$$

III.5 Análisis de resultados

En este apartado se realiza un análisis de los resultados obtenidos en el capítulo III al aplicar la metodología propuesta para el dimensionamiento del depósito de agua pluvial y la guía de elaboración de sistemas alternativos del SACMEX a un caso de estudio; el análisis se concentra en evaluar el volumen de almacenamiento de lluvia (Tabla 26) y el volumen de retención e infiltración (Tabla 27).

Lo primero que se destaca es que SACMEX plantea que se presentará una lluvia constante durante la vida útil del depósito de agua pluvial; según los datos históricos, lo anterior no es correcto pues tanto la intensidad como la frecuencia de la lluvia varían a lo largo del tiempo tal como se observó en la Gráfica 6.

Por otra parte, los datos de la Tabla 25 muestran que el depósito de agua pluvial tendrá días en los cuales no se utiliza la totalidad del mismo, en este sentido, se puede afirmar que un depósito de agua pluvial debe ser usado, por lo menos algunos días, en su totalidad para garantizar que permita el derrame del agua en exceso. En el caso de estudio, con un régimen de demanda de $0.6 \text{ m}^3/\text{día}$, al utilizar el dimensionamiento por funcionamiento de vasos, se obtuvo que el depósito de 0.697 m^3 no presentaría derrames; si se piensa en el mismo régimen de demanda y se compara el depósito obtenido con la metodología del SACMEX (2.83 m^3) (Tabla 26), queda en evidencia que el depósito del SACMEX no será llenado con la precipitación esperada, es decir, es un depósito sobredimensionado.

Con lo anterior, es necesario recordar que el funcionamiento de vasos no otorga el volumen de depósito óptimo, sino, el volumen más adecuado que cumple con el régimen de demanda de agua pluvial y precipitación esperada. En este sentido y retomando la Tabla 25, existe un régimen de demandas (0.2 a $0.4 \text{ m}^3/\text{día}$) donde los depósitos calculados (2.165 a 0.514 m^3) serán llenados algunos días y que además están en función de la precipitación en una misma área. Para entender lo anterior, un área de captación es capaz de abastecer cierto régimen de demanda, no se puede pensar en un área de captación pequeña y una demanda excesivamente alta, de igual forma no se puede tener un área de captación pluvial grande, de la cual se puede almacenar volúmenes importantes de agua, pero con poca demanda.

Al analizar los resultados de la Tabla 26, se observa que los volúmenes calculados con la metodología del SACMEX varían significativamente respecto a la metodología propuesta, lo anterior es debido a que ambas metodologías consideran datos de entrada distintos, por una parte, el depósito de SACMEX no toma en cuenta la demanda y la precipitación es estática; en cambio, la metodología propuesta toma en cuenta una demanda de agua de lluvia y estima el volumen de captación para cada día en función de datos históricos, por esta razón las variaciones del depósito de almacenamiento son significativas (últimas columnas de la Tabla 26). No obstante, existen depósitos según SACMEX que se asemejan a los resultados de los depósitos de la metodología propuesta, por ejemplo, en la Tabla 26, se observa que para un área de 120 m^2 y una demanda de $0.3 \text{ m}^3/\text{día}$, el volumen calculado del depósito es 5.37 m^3 , y según el SACMEX el depósito sería de 4.86 m^3 para los cuales se presenta una variación del 10.63%, en este caso se podría afirmar que los depósitos calculados con la metodología propuesta están sobredimensionados, pero no es así, es necesario recordar que la metodología propuesta calcula un volumen de almacenamiento adecuado que se ajusta al régimen de demanda y precipitación esperada.

Tabla 26 Volumen de depósito de agua de lluvia para distintas áreas de captación de la superficie clase 1, área constante de 50m² de superficie clase 3 y distintas demandas.

Área m ²	Volumen de depósito m ³										SACMEX	variación con depósito más pequeño %	variación con depósito más grande %
	Funcionamiento de vaso												
	Demanda m ³ /día												
10	0.11	0.21	0.31	0.41	0.51	0.61	0.71	0.81	0.91	1.01	0.41	71.89	150.28
20	0.15	0.23	0.33	0.43	0.53	0.63	0.73	0.83	0.93	1.03	0.81	81.89	27.06
30	0.53	0.24	0.34	0.44	0.54	0.64	0.74	0.84	0.94	1.04	1.21	80.08	14.21
40	1.71	0.29	0.36	0.45	0.55	0.65	0.76	0.86	0.96	1.06	1.62	82.25	5.85
50	3.46	0.48	0.38	0.47	0.57	0.67	0.77	0.87	0.97	1.07	2.02	81.42	70.87
60	5.18	1.16	0.43	0.48	0.58	0.68	0.78	0.88	0.98	1.08	2.43	82.24	113.30
70		2.17	0.58	0.51	0.60	0.70	0.79	0.90	1.00	1.10	2.83	81.84	23.57
80		3.39	1.08	0.59	0.62	0.71	0.81	0.91	1.01	1.11	3.24	81.77	4.78
90		5.06	1.61	0.72	0.65	0.72	0.83	0.92	1.02	1.12	3.64	82.06	38.92
100		6.64	2.63	0.97	0.73	0.75	0.84	0.94	1.04	1.14	4.05	82.01	64.00
110		8.40	3.74	1.60	0.85	0.79	0.86	0.95	1.05	1.16	4.45	82.31	88.67
120			5.37	2.17	1.00	0.89	0.89	0.97	1.06	1.17	4.86	81.75	10.63
130			6.44	3.37	1.40	0.96	0.95	0.99	1.08	1.18	5.26	81.90	22.50
140			8.17	4.06	1.94	1.22	1.00	1.03	1.10	1.19	5.67	82.32	44.21
150			9.77	5.46	2.89	1.47	1.13	1.08	1.13	1.21	6.07	82.25	60.98
160			11.81	6.66	3.84	2.10	1.33	1.16	1.17	1.24	6.48	82.12	82.36
170			13.69	8.37	4.69	2.63	1.64	1.26	1.22	1.27	6.88	82.26	98.93
180				9.63	5.84	3.44	1.96	1.42	1.31	1.30	7.28	82.12	32.15
190				11.39	6.91	4.11	2.29	1.57	1.40	1.37	7.69	82.24	48.13
200				13.46	8.17	5.73	3.11	1.94	1.61	1.48	8.09	81.76	66.33
210				15.33	9.56	6.10	3.69	2.52	1.81	1.54	8.50	81.90	80.42
220				16.93	11.12	7.47	4.53	2.96	2.09	1.67	8.90	81.27	90.17
230					13.08	9.08	5.46	3.62	2.42	1.97	9.31	78.86	40.51
240					15.04	10.08	7.18	4.16	2.85	2.04	9.71	78.95	54.82
250					17.04	12.09	8.01	5.29	3.71	2.41	10.12	76.18	68.46
260					18.13	13.13	9.65	6.27	4.01	2.92	10.52	72.24	72.28
270					20.52	13.90	10.33	7.63	4.62	3.37	10.93	69.14	87.83
280						16.38	11.48	8.65	6.04	3.62	11.33	68.05	44.55
290						19.18	13.06	9.36	6.71	5.23	11.74	55.46	63.44
300						20.82	15.29	10.42	7.52	5.49	12.14	54.79	71.52
310						22.44	17.48	11.96	9.37	6.31	12.55	49.72	78.86
320						22.98	18.20	13.68	9.94	7.03	12.95	45.72	77.45
330						25.33	20.11	14.98	10.47	8.11	13.36	39.28	89.64
340							22.43	15.53	11.47	9.83	13.76	28.57	62.99
350							23.06	17.87	14.08	10.93	14.16	22.82	62.82

Respecto a los volúmenes de retención e infiltración (Tabla 27), al compararlos con los volúmenes calculados con la metodología del SACMEX se puede afirmar que éstos están sobredimensionados con una variación mínima de 72.56 %; para dicho volumen es necesario recapitular que la metodología propuesta toma en cuenta el volumen de aportación de las áreas no aprovechables, el derrame del depósito de agua pluvial y un sobredimensionamiento del 20%. Para entender la razón por la cual los volúmenes de retención e infiltración del SACMEX son significativamente mayores respecto a la metodología propuesta se debe recordar que la lluvia empleada en ambos casos es distinta, además el SACMEX propone que, del depósito de agua pluvial se derramará el 55% del volumen almacenado, siendo que no existe certeza de que dicho depósito sea llenado

en algún momento del año. Aunado a lo anterior, para áreas menores de 100 m² el volumen de retención e infiltración propuesto por el SACMEX resulta en volúmenes mayores que el volumen del depósito de almacenamiento de agua pluvial, esto no sucede con la metodología propuesta.

Tabla 27 Volumen de retención e infiltración, válido para el presente caso de estudio

Área Sup. clase 1	Volumen de retención e infiltración (m ³) con un volumen de aportación (VA) proveniente de sup. clase 3 de 50m ²										SACMEX	variación respecto VRI mínimo	variación respecto VRI máximo
	Funcionamiento de vaso												
	Demanda m ³ /día												
	m ²	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9		1	%
10	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	1.93	83.28	83.28
20	0.37	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	2.15	84.99	82.64
30	0.46	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	2.37	86.38	80.44
40	0.55	0.42	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	2.59	87.54	78.61
50	0.64	0.51	0.38	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	2.82	88.55	77.23
60	0.73	0.60	0.47	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	3.04	89.38	76.07
70		0.69	0.56	0.43	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	3.26	90.10	78.69
80		0.78	0.65	0.52	0.38	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	3.48	90.72	77.44
90		0.86	0.75	0.62	0.49	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	3.71	91.30	76.69
100		0.95	0.84	0.71	0.58	0.45	0.32	0.32	0.32	0.32	3.93	91.79	75.73
110		1.04	0.93	0.80	0.67	0.54	0.38	0.32	0.32	0.32	4.15	92.22	74.87
120			1.02	0.89	0.76	0.63	0.50	0.32	0.32	0.32	4.38	92.63	76.80
130			1.09	0.98	0.85	0.72	0.59	0.45	0.32	0.32	4.60	92.98	76.28
140			1.18	1.07	0.94	0.81	0.68	0.55	0.38	0.32	4.82	93.30	75.51
150			1.27	1.16	1.03	0.90	0.77	0.64	0.51	0.32	5.04	93.60	74.81
160			1.36	1.25	1.12	0.99	0.86	0.73	0.60	0.43	5.27	91.82	74.22
170			1.45	1.34	1.21	1.08	0.95	0.82	0.69	0.56	5.49	89.85	73.63
180				1.43	1.30	1.17	1.04	0.91	0.78	0.65	5.71	88.66	75.00
190				1.51	1.39	1.26	1.13	1.00	0.87	0.74	5.93	87.55	74.54
200				1.58	1.48	1.35	1.22	1.09	0.96	0.83	6.16	86.55	74.27
210				1.69	1.56	1.44	1.31	1.18	1.05	0.92	6.38	85.60	73.52
220				1.76	1.63	1.53	1.40	1.27	1.14	1.01	6.60	84.71	73.28
230					1.72	1.62	1.49	1.36	1.23	1.10	6.82	83.88	74.75
240					1.81	1.71	1.58	1.45	1.32	1.19	7.05	83.13	74.31
250					1.90	1.80	1.67	1.54	1.41	1.28	7.27	82.40	73.86
260					1.99	1.86	1.76	1.63	1.50	1.37	7.49	81.71	73.44
270					2.08	1.95	1.85	1.72	1.59	1.46	7.71	81.06	73.04
280						2.07	1.93	1.81	1.68	1.55	7.94	80.47	73.92
290						2.16	2.03	1.90	1.77	1.64	8.16	79.89	73.52
300						2.22	2.11	1.98	1.85	1.73	8.38	79.34	73.56
310						2.31	2.21	2.08	1.95	1.82	8.60	78.82	73.20
320						2.39	2.26	2.17	2.04	1.91	8.83	78.35	72.88
330						2.48	2.35	2.25	2.13	2.00	9.05	77.88	72.56
340							2.44	2.35	2.22	2.09	9.27	77.43	73.65
350							2.56	2.44	2.31	2.18	9.49	77.00	73.05

Un aspecto importante a evaluar de la metodología propuesta es la variación de la precipitación simulada, para esto, la Tabla 28 muestra que el procesamiento de los datos que se realizó, provoca que las estimaciones de precipitación no varíen de manera significativa, siendo la máxima variación de volumen precipitado al año de 5.72%, esto indica que el aceptar solo simulaciones donde la suma de la precipitación simulada al año estén contenidas en la precipitación media anual \pm la desviación estándar de los datos históricos de precipitación acumulada es adecuado.

Tabla 28 Máxima variación del volumen precipitado simulado en la estación 15050 para distintas áreas

Volumen precipitado (m ³ /año)										
Área	max	min	dif.	%		Área	max	min	dif.	%
m ²						m ²				
10	5.12	4.92	0.21	4.07		190	96.54	95.20	1.34	1.39
20	10.25	9.93	0.32	3.08		200	103.81	99.85	3.96	3.81
30	15.50	14.95	0.54	3.49		210	107.33	105.20	2.13	1.98
40	20.71	20.05	0.66	3.21		220	112.77	109.97	2.80	2.48
50	25.64	25.05	0.59	2.32		230	116.19	114.84	1.35	1.16
60	30.87	30.04	0.83	2.69		240	122.84	118.51	4.33	3.53
70	35.89	34.69	1.20	3.35		250	128.57	125.82	2.75	2.14
80	41.00	40.34	0.66	1.62		260	132.16	130.25	1.90	1.44
90	46.28	44.60	1.68	3.62		270	137.15	134.30	2.85	2.08
100	51.15	49.78	1.37	2.68		280	142.37	139.13	3.24	2.28
110	57.29	54.47	2.82	4.92		290	148.67	145.30	3.38	2.27
120	62.07	59.99	2.08	3.34		300	154.85	150.72	4.12	2.66
130	67.39	64.69	2.70	4.01		310	159.38	153.22	6.16	3.87
140	71.57	69.84	1.74	2.42		320	162.38	159.68	2.70	1.66
150	77.44	75.22	2.22	2.87		330	168.58	162.55	6.03	3.57
160	81.75	80.42	1.34	1.63		340	178.22	168.03	10.19	5.72
170	87.00	85.52	1.48	1.70		350	179.67	174.47	5.21	2.90
180	91.49	89.58	1.91	2.09						

cada valor de volumen es el resultado de 15 años de simulación de precipitación característica en la estación 15050

IV. Conclusiones

En este trabajo se abordó, de manera general, la problemática del suministro de agua potable en México, se recalcó que dicha problemática tiene posibles soluciones a partir de perspectivas sostenibles, haciendo partícipes al Estado, ciudadanía y medio ambiente. Se expuso de manera particular la problemática del abastecimiento de agua en la Ciudad de México donde la mitigación de dicha dificultad requiere la amplificación de una cultura del agua y al mismo tiempo el desarrollo legislativo y técnico; en este sentido, una de las soluciones para mitigar la problemática del abastecimiento de agua es la implementación de sistemas de captación de agua de lluvia, donde, conocer el comportamiento a nivel macro y micro de la captación del agua de lluvia, junto al aprovechamiento de la misma, permite la optimización de los elementos que conforman un SCALL, lo anterior tendría como resultado sistemas funcionales que atiendan los criterios ambientales, sociales y económicos.

Aunado a las indagaciones anteriores, se realizó un análisis de la metodología del Sistema de Aguas de la Ciudad de México para el dimensionamiento de sistemas de captación de agua de lluvia, del cual se determinó que se puede mejorar el procedimiento del dimensionamiento del depósito de agua de lluvia pues las consideraciones de precipitación que sugiere el SACMEX no corresponden a la naturaleza de la lluvia, además de no considerar las demandas de agua pluvial.

A diferencia de un dimensionamiento de depósito de agua potable, donde solo se considera el volumen demandado, pues el suministro es parcialmente constante, el dimensionamiento de agua pluvial depende de la precipitación y la demanda. Para resolver las dificultades de la guía del SACMEX, se propuso la Simulación de Monte Carlo para estimar la lluvia en cada día a lo largo de un año cualquiera y su posterior uso en la teoría de funcionamiento de vaso. De los resultados de lluvia, empleando la simulación de Monte Carlo, se demostró que los datos son congruentes, pues, al sumar la lluvia estimada a lo largo del año, esta, entra en el intervalo de \pm la desviación estándar de los datos históricos de precipitación anual, además, las variaciones de volumen de precipitación captado en distintas áreas son adecuados como se demostró en la Tabla 25 y Tabla 28, por lo tanto, los datos generados de precipitación son adecuados.

Así mismo, se demostró que el uso de la teoría del funcionamiento de vasos incrementa la comprensión del comportamiento que tendrá un SCALL y resulta apropiado para el dimensionamiento de un depósito de agua pluvial pues considera variables como la demanda (salida del sistema), y precipitación (entrada al sistema). El conocer la demanda de agua pluvial tiene como consecuencia resolver el tratamiento adecuado para el agua captada, la optimización del costo de implementación y un depósito de almacenamiento adecuado a cada proyecto en particular.

Los resultados obtenidos desmostaron que el dimensionamiento de los depósitos de agua pluvial varía con las condiciones del proyecto y que no es adecuado dimensionar dichos depósitos solo con una lámina de lluvia constante, además, considerar una lámina de lluvia, de la cual no existe certeza que se presente, tiene otras implicaciones, tales como, un sobredimensionamiento de los caudales en los sistemas de retención e infiltración que al mismo tiempo provoca un sobredimensionamiento de los equipos de bombeo necesarios para el desalojo de excedencias.

Por otra parte, el desarrollo de una metodología de trabajo para el dimensionamiento de un sistema de captación de agua de lluvia permite una sincronía entre proyectistas y autoridades encargadas de la revisión

y autorización de dichos proyectos, al mismo tiempo, la metodología, permite visualizar cada elemento que compone un SCALL lo que ayuda a dar puntualidad y solución técnica de cada apartado, lo anterior permite optimizar los recursos de inversión y mantenimiento haciendo que la implementación de dichos sistemas sea más atractivo y como consecuencia se convierte en parte de la mitigación de la problemática de abastecimiento de agua en las ciudades. Aún más importante, al acompañar cualquier solución técnica con una cultura del agua, donde se estimule la responsabilidad de las partes involucradas, Estado y ciudadana; las generaciones futuras heredarán un distinto porvenir ambiental.

Ilustraciones

<i>Ilustración 1 Regiones hidrológicas-administrativas (SEMARNAT, 2015)</i>	6
<i>Ilustración 2 Región hidrológica-administrativa XII, composición estatal y municipal.</i>	7
<i>Ilustración 3 Cuenca del valle de México y Zona Metropolitana del Valle de México.</i>	8
<i>Ilustración 4 Antiguo lago de Texcoco y su huella en la CDMX</i>	10
<i>Ilustración 5 . Perfil de Sistema Cutzamala (CONAGUA, 2005)</i>	12
<i>Ilustración 6 Desigualdad territorial de abastecimiento de agua en la CDMX (Flores, 2015)</i>	13
<i>Ilustración 7 Precipitación media anual de la CDMX (CONABIO)</i>	16
<i>Ilustración 8 Diagrama de caja negra de un sistema de captación de agua de lluvia</i>	20
<i>Ilustración 9 Esquema general de un Chultun (Pinto & Acevedo, 1993)</i>	21
<i>Ilustración 10 Rojison, sistema de captación de agua pluvial en Japón</i>	22
<i>Ilustración 11 Esquema general del sistema de aprovechamiento de agua pluvial Healty House (Ballén, Galarza, & Ortiz, 2006)</i>	23
<i>Ilustración 12 Representación en diagrama del ciclo hidrológico global (Chow, 1994)</i>	25
<i>Ilustración 13 Pluviómetro (izquierda) y pluviógrafo de flotador (derecha)</i>	26
<i>Ilustración 14 Mapa de isoyetas de precipitación de 60 minutos y 10 años de periodo de retorno de la CDMX acotadas a cada milímetro (SACMEX, 2018)</i>	28
<i>Ilustración 15. Hietograma de una tormenta de 150 minutos de duración en intervalos de 5 minutos. Modificado de (Chow, 1994)</i>	29
<i>Ilustración 16 Esquema de método polígonos de Thiessen (izquierda) y método de las isoyetas (derecha) (Chow, 1994)</i>	31
<i>Ilustración 17. Regionalización del factor de convectividad R para la república mexicana (Baeza, 2007)</i>	34
<i>Ilustración 18. Componentes de un hidrograma</i>	39
<i>Ilustración 19. Bomba de flujo radial (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016)</i>	48
<i>Ilustración 20 Corte transversal de bomba de flujo mixto (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016)</i>	49
<i>Ilustración 21 Bomba de tres pasos de eje vertical e impulsor de flujo mixto, Bomba de flujo axial (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016)</i>	49
<i>Ilustración 22 Línea de energía, carga estática y dinámica.</i>	50
<i>Ilustración 23. Curva de rendimiento de bomba tipo sumergible modelo SS10 marca Barmesa (izquierda), Curva de rendimiento de una bomba centrífuga horizontal modelo SSXH25 marca Evans (derecha).</i>	52
<i>Ilustración 24 Curva del sistema (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016)</i>	54
<i>Ilustración 25 Punto de operación (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016)</i>	54
<i>Ilustración 26 Variación del gasto de operación y carga estática (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016)</i>	55
<i>Ilustración 27 Ejemplos de sistemas de retención de inicio de tormenta</i>	64
	107

<i>Ilustración 28 Sistemas de retención de sólidos grandes. Modificado de (Gloud & Nissen, 1999)</i>	64
<i>Ilustración 29 Esquema general de filtro desarenador</i>	65
<i>Ilustración 30 Arreglo de depósitos: una hilera y en dos hileras respectivamente</i>	70
<i>Ilustración 31 Captador pluvial urbano tipo cónico y vertical Rotoplas (Rotoplas, 2023)</i>	71
<i>Ilustración 32 Captador pluvial rural Rotoplas. (Rotoplas, 2023)</i>	72
<i>Ilustración 33 Filtro de lecho profundo con sistema de retro lavado manual modelo SOFT-LP-0948M MCA EVANS, flujo max. 22 lpm y Filtro carbón activado con sistema de retro lavado automático modelo SOFT-FL-0948 MCA EVANS, flujo max. 18 lpm.</i>	75
<i>Ilustración 34 Configuración de un SCALL simplificado, adecuado para sistemas residencial unifamiliar</i>	76
<i>Ilustración 35 Configuración de un SCALL con abastecimiento a servicios no potables cumpliendo la NOM-003-SEMARNAT-1997</i>	77
<i>Ilustración 36 Configuración de un SCALL con abastecimiento a servicios potables cumpliendo la NOM-127-SSA1-1994</i>	78
<i>Ilustración 37 Estaciones climatológicas de la CONAGUA, ubicación de la estación climatológica 15050 y mapas de isoyetas de 5 minutos y 10 años de periodo de retorno (SCAMEX).</i>	84
<i>Ilustración 38. Representación gráfica del Sistema Alternativo (SACMEX, 2020)</i>	118
<i>Ilustración 39 Corte conceptual de tanque de infiltración. (SACMEX, 2020)</i>	124

Tablas

<i>Tabla 1 Tipo de suelo para determinar el NC</i>	36
<i>Tabla 2 Selección del NC en función del uso de suelo y tipo de suelo</i>	37
<i>Tabla 3 Coeficientes de escurrimiento (Chow, 1994)</i>	38
<i>Tabla 4 Valores de G y T de la ecuación Colebrook-White</i>	46
<i>Tabla 5 Coeficientes de rugosidad de Manning para varias superficies de canales</i>	47
<i>Tabla 6 Descripción y usos de los tipos de superficie de (SACMEX, 2020)</i>	62
<i>Tabla 7 Precipitación de diseño de un SCALL</i>	63
<i>Tabla 8 Unidades mueble, según el método de Hunter (GODF, 2004)</i>	66
<i>Tabla 9 Método Hunter-Nielsen: gastos en función de unidades mueble. (IMSS, 1997)</i>	67
<i>Tabla 10 Caudales mínimos en el Método Racional (SISAUA, 2006)</i>	68
<i>Tabla 11 Proporciones de depósitos más eficientes con n compartimientos: una hilera y dos hileras respectivamente</i>	70
<i>Tabla 12 Cargas mínimas de trabajo (GODF, 2004)</i>	79
<i>Tabla 13 Propiedades físicas del agua, recuperado de (Cafaggi, Rodal, & Sánchez, 2016)</i>	80
<i>Tabla 14 Velocidades mínimas y máximas en tuberías (GODF, 2004)</i>	81
<i>Tabla 15 Orden de datos de precipitación en un año Juliano</i>	85
<i>Tabla 16 Días con lluvia, precipitación media y promedios móviles</i>	86
<i>Tabla 17 Frecuencia relativa, frecuencia relativa acumulada y simulación de la precipitación característica</i>	87
<i>Tabla 18 Análisis de consumo de agua potable</i>	92
<i>Tabla 19 Gasto máximo probable de la red de agua potable, método de Hunter.</i>	92
<i>Tabla 20 Gasto máximo probable de la red de agua pluvial, método de Hunter.</i>	93
<i>Tabla 21 Consumo de agua pluvial</i>	93
<i>Tabla 22 Condiciones iniciales de funcionamiento de vasos</i>	94
<i>Tabla 23 Fragmento del funcionamiento de vaso sin restricciones de tamaño de depósito</i>	94
<i>Tabla 24 Fragmento del funcionamiento de vaso con restricción de tamaño de depósito</i>	95
<i>Tabla 25 Resultados de volúmenes de depósito para un área de captación de 70 m² clase 1, 50 m² clase 3 y distintas demandas de agua pluvial</i>	99
<i>Tabla 26 Volumen de depósito de agua de lluvia para distintas áreas de captación de la superficie clase 1, área constante de 50m² de superficie clase 3 y distintas demandas.</i>	101
<i>Tabla 27 Volumen de retención e infiltración, válido para el presente caso de estudio</i>	102
<i>Tabla 28 Máxima variación del volumen precipitado simulado en la estación 15050 para distintas áreas</i>	103
<i>Tabla 29 Descripción de los tipos de superficie de captación (SACMEX, 2020)</i>	117
	109

<i>Tabla 30 Requerimientos por tipo de construcción (SACMEX, 2020)</i>	<i>118</i>
<i>Tabla 31 Usos del agua de lluvia en función de su origen (SACMEX, 2020)</i>	<i>119</i>
<i>Tabla 32 Coeficientes de escurrimiento (SACMEX, 2020)</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 33 Drenajes pluviales horizontales (IMSS, 1997). Diámetros de la tubería horizontal</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 34 Drenajes pluviales verticales (IMSS, 1997). Diámetros de la tubería vertical</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 35 Tasa de infiltración típicas y porosidad de varios grupos de suelos (SACMEX, 2020)</i>	<i>123</i>

Gráficas

<i>Gráfica 1 Volumen concesionado para usos consuntivos (CONAGUA, 2018)</i>	6
<i>Gráfica 2. Precipitación normal a nivel nacional en el periodo 1981-2010 y el año 2017 (mm) (CONAGUA, 2018).</i>	15
<i>Gráfica 3 Representación gráfica del NC</i>	36
<i>Gráfica 4 Precipitación histórica anual de la estación 15050</i>	85
<i>Gráfica 5 Precipitación característica de la estación 15050</i>	86
<i>Gráfica 6 Precipitación simulada en un año de la estación 15050, empleando promedios móviles.</i>	88
<i>Gráfica 7 Simulación de precipitación acumulada en un año de la estación (15050)</i>	89
<i>Gráfica 8 Precipitación simulada en un año de la estación 15050, empleando el promedio de lluvia.</i>	90
<i>Gráfica 9 Caudal de aportación diario para un año simulado de la estación climatológica 15050 actuando en una superficie de Clase 1 de 70 m²</i>	91
<i>Gráfica 10 Volumen de depósito para distintas áreas de captación y demanda de 0.6 m³día</i>	96
<i>Gráfica 11 Volumen de depósito para distintas áreas de captación y demanda de 0.2 m³día</i>	97
<i>Gráfica 12 Volumen de depósito para distintas áreas de captación y demanda de 0.6 m³día con promedio de lluvia</i>	98

Referencias

- AGNU. (1987). *Our Common Future*. Brundtland: Asamblea General de las Naciones Unidas.
- Aldama, Á., & Ocón, A. (2002). Resistencia al flujo en canales y límites de aplicabilidad de la fórmula de Manning. IMTA.
- Andrade, J., & Martínez, S. (2020). *Tránsito de avenidas en vasos: ¿hidrológico o hidráulico?* Jiutepec.
- Auvinet, G., Comulada, M., Méndez, R., & Rangel, J. (2012). *Túnel Emisor Oriente: análisis, diseño y comportamiento* (Vol. I). Distrito Federal.
- Baeza, C. (2007). *Estimación regional de factores de conectividad para el cálculo de las relaciones intensidad-duración-frecuencia*. Distrito Federal.
- Ballén, J., Galarza, M., & Ortiz, R. (2006). *Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia*. João Pessoa.
- Becerra, J. (2010). *Estadística Descriptiva*.
- Cafaggi, A., Rodal, E., & Sánchez, A. (2016). *Sistemas de Bomeo*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- CEPAL. (1997). Gestión Ambientalmente Adecuada de Residuos Sólidos. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas*.
- Chow, V. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGRAW-HILL.
- Colegio de México. (2001). *Agua y sustentabilidad en la Ciudad de México*. Distrito Federal: Colegio de México.
- CONAGUA. (2005). *Sistema Cutzamala, Agua para todos los mexicanos*. Distrito Federal.
- CONAGUA. (2013). *Estadísticas del Agua de la Región Hidrológica Administrativa XIII*. Distrito Federal.
- CONAGUA. (2018). *Estadísticas del Agua en México*. Ciudad de México.
- CONAGUA, & SEMARNAT. (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado*. Distrito Federal.
- DOF. (1996). *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*.
- DOF. (1998). *NORMA Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público*.
- DOF. (2002). *NORMA Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, Sistema General de Unidades de Medida*.
- Espinosa, A. (2014). Calida del agua. *Periodico digital de divulgación de la Red del Agua*.

- FI. (1994). *Curso de Instalaciones hidráulicas, sanitarias y de gas para edificios*. Distrito Federal: UNAM.
- Flores, M. (2015). *Desigualdad territorial de abastecimiento de agua*. Instituto de Geografía, UNAM.
- GCDMX. (2019). *Primer Informe de gobierno, Anexo estadístico*. Ciudad de México.
- GCDMX. (2021). *Tercer Informe de Gobierno, Anexo estadístico*. Ciudad de México.
- Gloud, J., & Nissen, E. (1999). *Rainwater catchment systems for domestic supply*. Intermediate Technology Publications.
- GODF. (2004). *Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Ejecución de Obras Hidráulicas*. Distrito Federal.
- GODF, G. O. (2004). *Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Ejecución de Obras Hidráulicas*. Distrito Federal.
- IMSS. (1997). *Norma de Diseño de Ingeniería en Instalaciones Hidráulica, Sanitaria y Especiales*. Distrito Federal: Instituto Mexicano del Seguro Social.
- IMTA. (2014). *Variabilidad y barreras para el ejercicio del derecho humano del agua y saneamiento en México*. Distrito federal: Instituto Mexicano del Tecnología del Agua.
- IMTA. (2022). *Inundaciones en Tenochtitlan*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Tecnología del Agua.
- INEGI. (2020). *Subsistema de información demográfica y social*.
- INEGI. (2021). *Producto Interno Bruto por Entidad Federativa*.
- INIFED; SEP. (2015). *Normas y especificaciones para estudios, proyectos, contrucciones e instalaciones*.
- Legorreta, J. (1997). *Agua de lluvia, la llave del futuro en el Valle de México*. La jornada Ecológica.
- López, R. (2017). *Jugo de nube, programa de la UNAM de cosecha de agua de lluvia*. Ciudad de México.
- Maderey, L. (1977). *El agua de escurriamiento en la República Mexicana*. Distrito Federal.
- Museo Legislativo. (2021). *Efemerides Marzo*. Obtenido de Museo Legislativo.
- OCDE. (2015). *Estudios Territoriales de la OCDE, Valle de México*. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.
- Olivas, A., Salinas, J., & Velez, O. (2011). *La humedad atmosférica como fuente opcional de agua para uso doméstico*. Distrito Federal: IMTA.
- Pinto, A., & Acevedo, R. (1993). *Chultunes en Uaxactun: forma y uso*.
- Piñero, M. (2000). *Metrología: Introducción, Conceptos e Instrumentos*. Oviedo: Oviedo Servicio de Publicaciones.
- Pizano, A. (2012). *Hidrología, Aspectos generales para la asignatura de hidráulica e hidrología*. Distrito Federal.
- Quevedo, F. (2011). *Medidas de tendencia central y dispersión. Medwave*.

- RCDF. (2021). *Reglamento de Contrucciones para el Distrito Federeal*. Ciudad de México.
- Rotoplas. (24 de enero de 2023). *Rotoplas, Productos*. Obtenido de <https://rotoplas.com/productos/>
- Rustom, A. (2012). *ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA, PROBABILIDAD E INFERENCIA. Una visión conceptual*. Santiago.
- SACMEX. (2018). *Diagnóstico, logros y desafíos*. Ciudad de México: Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
- SACMEX. (2018). *Fugas*. Ciudad de México: Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
- SACMEX. (2018). *Guía de elaboración de sistemas alternativos*. Ciudad de México: Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
- SACMEX. (2020). *Guía de elaboración de sistemas alterntivos*. Ciudad de México: Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
- Salazar, E., & Alzate, W. (2017). *Los datos de registro de lluvia son, en sí mismos, datos de ocurrencia por lo que permiten emplear la simulación de Monte Carlo para la generación de estimaciones de lluvia*.
- Sánchez, A., & Cafaggi, A. (2019). *Manual de prácticas de hidología*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- SCT. (s.f.). *Isoyetas de Intenisdad-Duración-Periodos de retorno para la República Mexicana*. Recuperado el 04 de 2022, de Dirección General de Servicios Técnicos.
- SEDEMA. (2020). *Manual para instalar un sistema de captación pluvial en tu vivienda*. Ciudad de México: Secretaría del Medio Ambiente.
- SEMARNAT. (2015). *Atlas Digital Geográfico*. Recuperado el 04 de 2022
- SEMARNAT. (2018). *Informe del Medio Ambiente en México*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT. (2020). *Plan Ncional Hidrico 2020-2024*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SISAUA. (2006). Aplicación de los métodos para el cálculo de caudales máximos probables instantaneos, en edificaciones de distintos tipos. *Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua*. João Pessoa.
- Solución Pluvial. (2022). *Historia*. Recuperado el 4 de Abril de 2022, de Isla Urbana.
- Sotelo, G. (1997). *Hidráulica General*. Distrito Federal: LIMUSA.
- Torres, L. (2017). *La Gestión del agua potable en la Ciudad de México*. México: IMTA.
- Zepeda, S. (2019). *Manual de Instalaciones Hidráulicas. Sanitarias, Gas, Aire comprimido y vapor*. Ciudad de México: LIMUSA.

Anexo

Guía de elaboración de sistemas alternativos del SACMEX

La guía de elaboración de sistemas alternativos del Sistema de Aguas de la Ciudad México (SACMEX, 2020) es un compendio de los criterios técnicos para el diseño de captación de agua de lluvia, conducción, almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento, infiltración y descarga de la misma. Dentro de los alcances de esta guía está el proporcionar las especificaciones y parámetros de diseño para distintos sistemas alternativos de agua, así como distintas modalidades de captación, en función de la calidad de agua colectada (SACMEX, 2020) . En este apartado se describe brevemente la estructura general de guía para la implementación de sistemas alternativos.

Estructura general de la guía.

De manera general, la precipitación de las áreas de captación se conduce hacia un sistema de separación de primeras lluvias, posteriormente el agua se conduce a través de un desarenador y finalmente se almacena en un depósito; en todos los casos se conecta con un sistema de demasías para evitar que un sobre-volumen pueda provocar un funcionamiento no aceptable en la instalación; el sistema de demasías se dirige a un tanque de tormentas y aun sistema de infiltración el cual está conectado al colector municipal mediante un sistema de excedencias (Ilustración 38). El agua almacenada es tratada para posteriormente ser usada como agua potable, nunca para consumo humano.

La guía inicia con la *clasificación y requisitos* donde se señalan las superficies de captación (Tabla 29) y muestra un esquema general del Sistema Alternativo (Ilustración 38). Posteriormente se presenta la obligatoriedad de implementación del sistema alternativo en función del tipo de manifestación de construcción, tipo de superficie de construcción (Tabla 30), finalmente se presentan los usos del agua captada en función de la superficie de procedencia (Tabla 31).

Tabla 29 Descripción de los tipos de superficie de captación (SACMEX, 2020)

Tipo de superficie	Superficie de captación	Descripción
Clase 1	Cubiertas	No debe emitir contaminantes orgánicos e inorgánicos, deberán estar contruidos de materiales inertes (barro, concreto, loseta, vidrio, lámina galvanizada, lámina esmaltada, policarbonato, etcétera).
Clase 2	Cubiertas	Con posible emisión de contaminantes orgánicos (hidrocarburos, cubiertas verdes, cubiertas naturadas, maceteros, materiales biodegradables y con posible contaminación inducida de origen animal, espacios habitables, etcétera).
Clase 3	Pavimentos privados	Terrazas en distintos niveles, andadores, pavimentos, circulaciones viales, estacionamientos, jardines a nivel de planta o inferiores.
Clase 4	Pavimentos públicos	Banquetas, andadores, parques, estacionamientos, vialidades, rampas.

Tabla 30 Requerimientos por tipo de construcción (SACMEX, 2020)

Manifestación de construcción	Tipo de Construcción	Superficie de construcción	Retención e infiltración pluvial	Reúso de agua captada	Uso de agua tratada en servicios no potables	Medición
Artículo 62 del RCDF	Programas de Gobierno	mayor a 120 m ²	Obligatorio	Obligatorio	Obligatorio	Obligatorio
Manifestación de construcción tipo A	Residencial Unifamiliar	menor a 120 m ²	Opcional	Opcional	Opcional	Opcional
Manifestación de construcción tipo B	No Habitacional	menor de 5,000 m ²	Obligatorio	Obligatorio	Obligatorio	Obligatorio
	Habitacional/Mixto	menor de 10,000 m ²				
Manifestación de construcción tipo C	No Habitacional/Mixto	más de 5,000 m ²				
	Habitacional/Mixto	más de 10,000 m ²				
Manifestación de construcción Especial	Variable	Suelo de conservación				

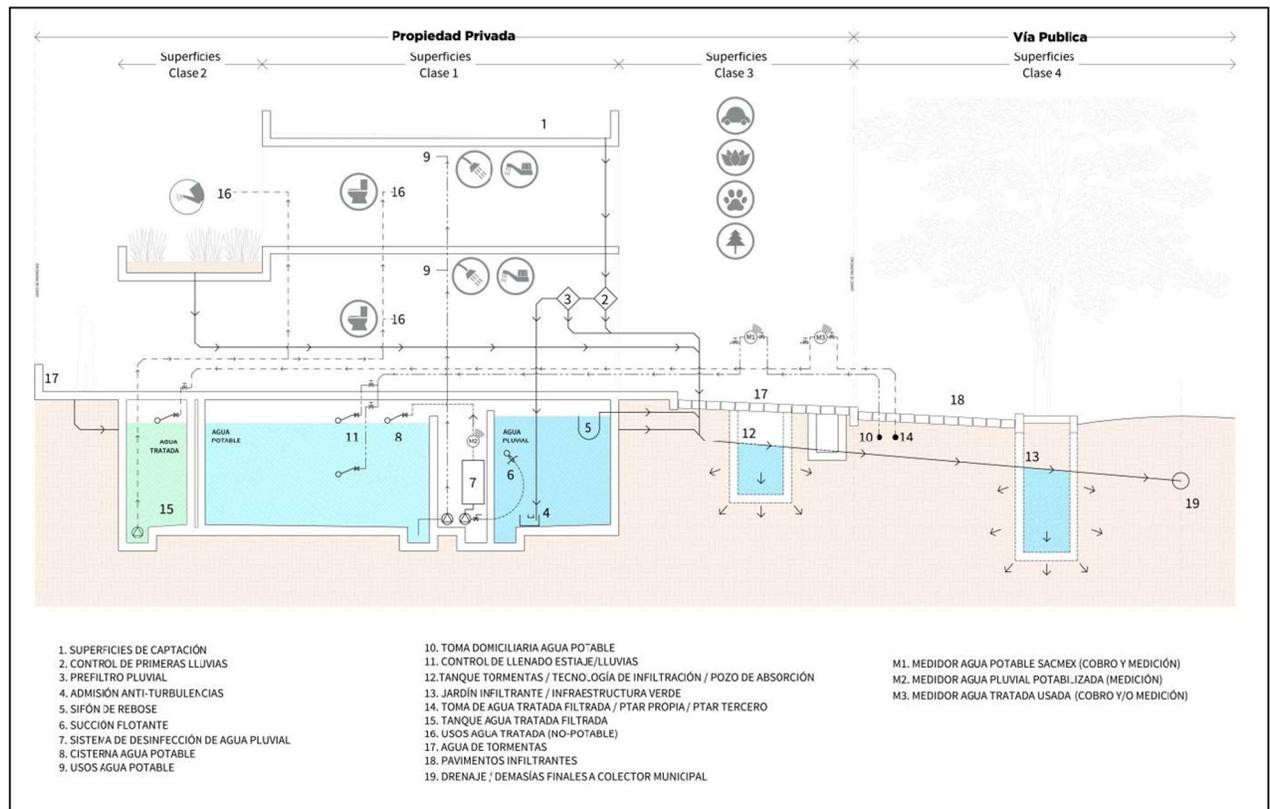


Ilustración 38. Representación gráfica del Sistema Alternativo (SACMEX, 2020)

Tabla 31 Usos del agua de lluvia en función de su origen (SACMEX, 2020)

Tipo de superficie	Fuente/Origen	Reutilización potable	Reutilización no potable	Infiltración-Absorción
Clase 1	Cubiertas limpias	Si	Si	Si
Clase 2	Cubiertas no limpias	Si (Opcional)	Si	Si
	Cubiertas verdes	Si (Opcional)	Si	Si
Clase 3	Pavimentos privados	No	Si (Opcional)	Si
Clase 4	Pavimentos públicos	No	No	Si

Dentro de estas señalizaciones, la guía estipula que:

En todos los casos, los sistemas de retención e infiltración podrán ejecutarse con la instalación de infraestructura verde para las excedencias del agua pluvial, escurrimientos de agua de tormentas de superficies Clase 3 dentro de los límites de la propiedad, en caso de no ser viable dentro del predio, se deberá ejecutar un proyecto especial instalando en superficies Clase 4, es decir, infraestructura verde en la vía pública (SACMEX, 2020).

El agua pluvial proveniente de las superficies Clase 2 se podrá reutilizar en servicios potables, nunca para consumo humano, y solamente si se incorpora un proceso de potabilización avanzado que cumpla con la NOM-127-SSA1-1994.

El agua proveniente de superficies Clase 3 se podrá usar en servicios no potables siempre y cuando se cuente con mecanismos de retención de grasas e hidrocarburos, y cuenten con un método de filtración suficiente para cumplir con los límites permisibles de parámetros de contaminantes descritos en la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997.

Posteriormente la guía expone los *requerimientos para el diseño e instalación*; en este apartado indica que el diseño del sistema alternativo deberá crear redes de drenaje pluvial separadas, esto es, un tanque (pluvial) que captará el agua de lluvia proveniente de azoteas de la Clase 1 y un tanque de tormenta y/o un sistema de infraestructura verde captará el agua pluvial proveniente de la planta baja (Clase 2 y 3) y la línea de rechazo de los equipos de tratamiento pluvial (SACMEX, 2020).

Los parámetros de las superficies cumplirán con lo dicho en el apartado *clasificación y requisitos* y el sistema de canalización y distribución de agua pluvial responderá al cálculo de diseño por intensidad acorde a las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Ejecución de Obras e Instalaciones Hidráulicas y se tendrá que entregar la memoria de cálculo, metodologías utilizadas, software y cada hoja deberá estar firmada por un Director Responsable de Obra (DRO).

El diseño y cálculo de las canalizaciones pluviales considera “Sistemas de drenaje aéreo” formado por coladeras de azotea, canalones, bajadas pluviales y colectores aéreos; y el “Sistema de drenaje en pisos” conformado por bocas de tormenta, registros pluviales y colectores de pisos. (SACMEX, 2020).

Para el cálculo de sistema de drenaje aéreo se considera una intensidad de lluvia de 5 minutos de duración y 10 años de periodo de retorno e indica que la pendiente de los colectores estará contenida de 1 a 2 % y llenos hasta la cuarta parte de su área transversal, se empleará el método Racional Americano (17) para el cálculo del caudal de aportación y los coeficientes de escurrimiento de la Tabla 32; se utilizará la Tabla 33 para el

dimensionamiento de drenajes pluviales horizontales y la Tabla 34 para el dimensionamiento de drenajes pluviales verticales.

Tabla 32 Coeficientes de escurrimiento (SACMEX, 2020)

Tipo de superficie	Sistema de diseño	Coefficiente de escurrimiento
Clase 1	Drenaje aéreo	0.95
Clase 2	Drenaje aéreo	0.95
	Drenaje aéreo (cubierta verde)	0.8 (cubierta verde)
Clase 3	Drenaje aéreo/pisos	0.8
Clase 4	Drenaje en pisos	0.8

Tabla 33 Drenajes pluviales horizontales (IMSS, 1997). Diámetros de la tubería horizontal

Precipitación de diseño (mm/h)	Según diámetro de la tubería (mm)														
	Área tributaria en proyección horizontal (m ²)														
	pendiente 1%					pendiente 1.5%					pendiente de 2%				
	75	100	150	200	250	75	100	150	200	250	75	100	150	200	250
50	152	348	990	2128	3828	186	426	1212	2604	4688	214	492	1396	3008	5414
60	127	290	825	1773	3190	155	355	1010	2170	3907	178	410	1163	2507	4512
70	109	246	707	1520	2734	133	304	866	1860	3349	153	351	997	2149	3867
80	95	217	619	1330	2392	116	266	757	1627	2930	134	307	872	1880	3384
90	84	193	550	1182	2127	103	237	673	1447	2604	119	273	776	1671	3008
100	76	174	495	1064	1914	93	213	606	1302	2344	107	246	698	1504	2707
110	69	158	450	967	1740	85	194	551	1184	2131	97	224	636	1397	2461
120	63	145	412	887	1595	77	177	505	1085	1953	89	205	582	1253	2256
130	58	134	381	818	1472	72	164	466	1002	1803	82	189	537	1157	2082
140	54	124	354	760	1367	66	152	433	930	1674	76	176	499	1074	1934
150	51	116	330	709	1276	62	142	404	888	1536	71	164	465	1003	1805
160	47	109	309	665	1196	58	133	379	814	1465	67	154	436	940	1692
170	45	102	291	626	1126	55	125	356	766	1379	63	145	411	885	1595
180	42	97	275	591	1063	52	118	337	723	1302	59	137	388	836	1509
190	42	92	261	560	1007	49	112	319	685	1234	56	129	367	792	1425
200	38	87	247	532	967	46	106	303	651	1172	53	123	349	752	1353

Tabla 34 Drenajes pluviales verticales (IMSS, 1997). Diámetros de la tubería vertical

Precipitación de diseño (mm/h)	Según diámetro de la tubería (mm)				
	Área tributaria en proyección horizontal (m ²)				
	75	100	150	200	250
50	136	416	860		
60	113	347	723		
70	97	297	620	1820	
80	85	260	542	1592	
90	76	231	482	1416	
100	68	208	434	1274	2737
110	62	189	395	1158	2488
120	57	173	362	1062	2281
130	52	160	334	980	2105
140	49	149	310	910	1955
150	45	139	289	849	1825
160	42	130	271	796	1711
170	40	122	255	749	1610
180	38	116	241	708	1521
190	36	109	228	671	1441
200	34	104	217	639	1668

La guía considera un drenaje de emergencia para el agua pluvial, independiente de la canalización principal de agua pluvial.

Para el sistema de drenaje en pisos indica que el diámetro mínimo debe ser de 200 mm y atenderá a las velocidades mínimas y máximas del “Manual de Agua Potable y Alcantarillado y Saneamiento” y las Normas Técnicas Complementarias del RCDF, para el cálculo de gasto y velocidad de la conducción se empleará la ecuación de Manning (35), el gasto de aportación se calculará con el método Racional Americano (17) y las conducciones podrán emplear el 90% de su área transversal.

Aclara que todo sistema de captación deberá tener un sistema de pre-tratamiento de agua pluvial el cual consiste en rejillas o mallas al ingresar al depósito de agua pluvial, esta rejilla no deberá contener aperturas mayores a los 0.15 mm o una certificación para remover partículas mayores a las 500 micras μm (0.5mm), el filtro deberá permitir el rechazo de aguas de demasía y se deberá usar una malla por cada depósito.

Los separadores de primeras lluvias funcionarán por separación física automáticamente, y tendrán conexión con un sistema de demasías que podrá conectarse al tanque de tormentas.

El depósito de almacenamiento de agua pluvial recibirá los volúmenes generados por las superficies Clase 1; los volúmenes de las superficies Clase 2 y 3 llegarán al tanque de tormentas y recibirá las excedencias del depósito de agua pluvial.

El depósito de agua pluvial se dimensionará para una lluvia de 60 minutos de duración y 10 años de periodo de retorno. El volumen del depósito se determinará de la siguiente forma:

$$V_{TP} = \frac{C \cdot P_d \cdot A_T}{1,000}; P_d = i \cdot 1h \quad (64)$$

Donde V_{TP} es el volumen del depósito de agua pluvial en m^3 , C representa el coeficiente de escurrimiento, P_d es la altura de precipitación de diseño en mm , A_T es el área tributaria en m^2 e i es la intensidad de lluvia.

Para evitar rebosamientos, los depósitos deberán tener un sobre-dimensionamiento del 15% del volumen calculado, el depósito de almacenamiento tendrá un volumen adicional de regulación o colchón de aire y deberá contar con un sistema de demasías ya sea por gravedad o bombeo.

Como tratamiento del agua pluvial, todos los usos deben incorporar un tamizado de $50 \mu m$ ($0.05 mm$). Para los usos no potables, de las superficies Clase 2, si el agua lo requiere, se podrá adicionar un filtro de carbón activado. Para usos potables, las superficies Clase 1, deberán estar construidas con materiales no tóxicos.

La filtración debe garantizar la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, en todos los casos, esto es, garantizar una desinfección redundante, mediante una combinación de agentes de esterilización y desinfección simultánea, con la finalidad de la esterilización de microorganismos en el agua.

El sistema de retención e infiltración se dimensionará para la situación más desfavorable que se pueda presentar, esto es, cuando el depósito de agua pluvial se encuentre lleno, por lo que el sistema de retención e infiltración recibirá el volumen de todo el predio con las siguientes consideraciones:

1. El Sistema retendrá las excedencias pluviales del Sistema de Captación de Agua de Lluvias, se debe considerar que estas excedencias alcancen el 50% del volumen del tanque pluvial.
2. El Sistema retendrá el agua que descarguen los equipos de tratamiento del sistema de captación de agua de lluvias, se debe considerar que este volumen alcanzará 5% del volumen del tanque pluvial.
3. El Sistema retendrá el escurrimiento pluvial proveniente de estacionamientos y andadores de planta baja, así como del área libre del predio.
4. Para todas las áreas mencionadas en el número 3, se considerará un coeficiente de escurrimiento de 0.80, sin importar que se traten de pavimentos, andadores o área verde.
5. El escurrimiento pluvial generado por las áreas del punto 3, se denominará volumen de aportación.

$$V_{RI} = (0.55 \cdot V_{TP}) + V_A \quad (65)$$

Donde V_{RI} es el volumen de retención e infiltración en m^3 , V_A es el volumen de aportación no proveniente del depósito de agua pluvial en m^3 .

La altura de precipitación de diseño para los sistemas de retención e infiltración será para una lluvia de 60 minutos de duración y un periodo de retorno de 10 años.

El sistema de infiltración se diseñará para 18 horas, por lo que el caudal de infiltración Q_I en m^3/h , será.

$$Q_I = \frac{V_{RI}}{18} \quad (66)$$

Las estrategias de infiltración pluvial se basarán en técnicas superficiales y/o pozo de absorción, en ninguno de los casos se llegará a tocar el manto acuífero de la Ciudad de México (SACMEX, 2020). Para sistemas de infiltración superficial (bio-retenciones y tanques de infiltración) el gasto de infiltración se determinará como:

$$Q_{if} = \frac{K_n \cdot i_g \cdot A_p}{1000} \quad (67)$$

Donde Q_{if} es el gasto de infiltración en m^3/h , K_n es la permeabilidad promedio del estrato en mm/h , i_g es el gradiente hidráulico (1 para este caso) y A_p es el área permeable en m^2 .

K_n responde a la Tabla 35 con áreas menores a $1,000 m^2$ y cuando el proyecto tenga hasta dos sótanos.

Tabla 35 Tasa de infiltración típicas y porosidad de varios grupos de suelos (SACMEX, 2020)

Grupo hidrológico de suelos del NCRS	Textura típica del suelo	Tasa de saturación de infiltración por m^2		Porosidad
		mm/hr	in/hr	
A	Arena	200	8	0.437
A	Areanas con pocos limos	50	2	0.437
B	Franco arenosos	25	1	0.453
B	Franco	12.7	0.5	0.463
C	Franco limosos	6.3	0.25	0.501
C	Franco arcilloso con pocas arenas	3.8	0.15	0.39
D	Franco arcilloso y arcilla limosa	<2.3	<0.09	0.465
D	Arcilla	<1.3	<0.05	0.475

Si el cálculo determina que la infiltración del agua pluvial supera las 18 horas, se podrá emplear un sistema de bombeo que drene el volumen restante hacia el drenaje de la Ciudad de México, para realizar el bombeo se propone un tiempo máximo de 3 horas y no debe drenar a más de 30 l/s. En total, el tiempo de drenado de diseño del Sistema de Retención e Infiltración será de 21 horas. El cálculo de infiltración, estudios y documentos donde se demuestre que no es viable la infiltración del agua pluvial deberán estar firmado por el Director Residente de Obra (SACMEX, 2020).

Sobre los sistemas de tratamiento menciona que estos deberán diseñarse para retirar los contaminantes de los primeros 25mm de lluvia por cada metro cuadrado del área de aportación, con un gasto de diseño empleando el método Racional Americano (17) con una intensidad de $25 mm/hr$ (SACMEX, 2020).

Los pozos de absorción contarán con un dispositivo de filtrado que retire partículas de $20 \mu m$ ($0.02 mm$), reduzca la carga orgánica y de patógenos en al menos un 50%. Los pozos de absorción adicionalmente contarán con una válvula de cierre, sensores de medición de caudal y calidad, y desinfección (SACMEX, 2020).

En los casos donde el agua pluvial cosechada no cumpla con los requisitos de agua potable, se podrá emplear un sistema alternativo de agua de lluvia en los servicios de W.C y llaves de nariz del edificio, con una red de

distribución independiente al agua potable y podrá funcionar a gravedad o mediante sistemas de presión (SACMEX, 2020).

Dentro de la guía se menciona que el sistema debe contar con instrumentos de medición tanto en la infiltración como en el uso de agua pluvial e incorporar sensores de calidad del agua.

Además, se describen los métodos de infiltración (bio retenciones, tanques de infiltración, tanques con pozos de absorción, pozos de absorción donde se establece la utilización de la Ley de Darcy para determinar la infiltración (67).

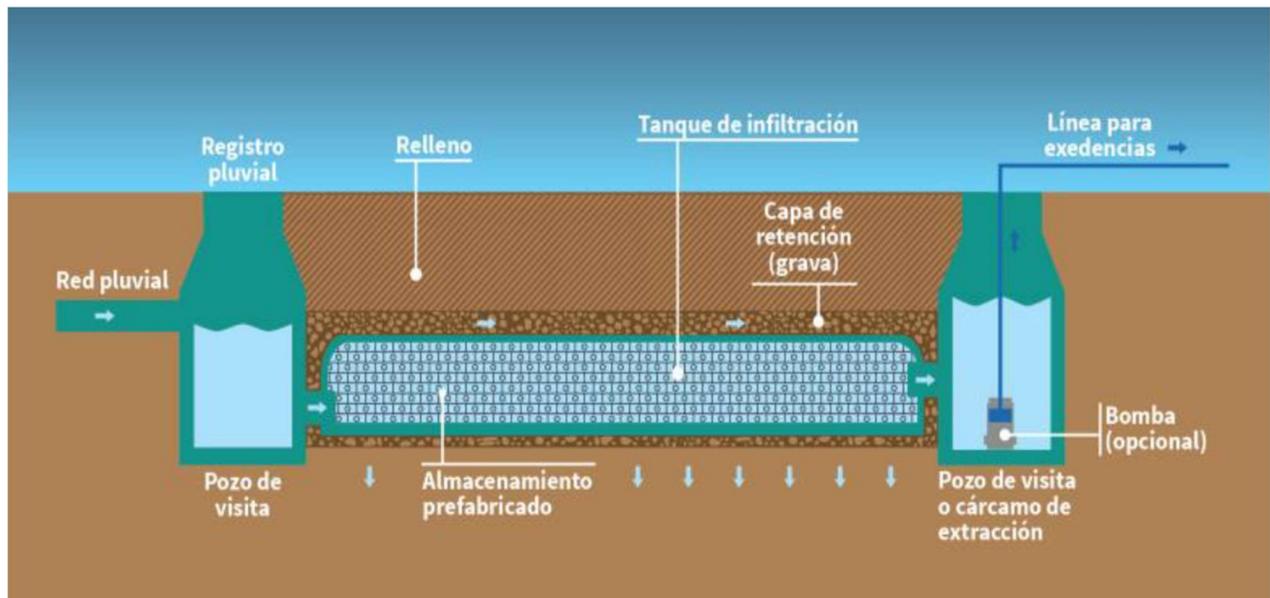


Ilustración 39 Corte conceptual de tanque de infiltración. (SACMEX, 2020)