



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estimación del potencial de
aprovechamiento de agua de
lluvia a partir de registros
pluviométricos electrónicos en
tres zonas de la Ciudad de
México**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Civil

P R E S E N T A

Dulce González Gutiérrez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., junio 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ESTIMACION DEL POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA A PARTIR DE REGISTROS PLUVIOMETRICOS ELECTRONICOS EN TRES ZONAS DE LA CIUDAD DE MEXICO que presenté para obtener el título de INGENIERA CIVIL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

DULCE GONZALEZ GUTIERREZ

Número de cuenta: 318016414

A mis padres, Ana María y Delfino; y a mi abuelita Concepción, por ayudarme a construir quien soy hoy en día. Por ser ese refugio que necesitaba al llegar a casa después de un largo día de escuela y por brindarme las herramientas para culminar mis estudios.

A mis hermanos, Mariana y Alberto, por ser la guía de mi camino y por enseñarme a luchar por mis sueños.

A mis sobrinos, Denisse y Santiago, por enseñarme que aun en los días de estrés no hay que olvidarse de reír.

Al Dr. Óscar Fuentes Mariles, por abrirme las puertas del instituto y por brindarme su apoyo, compartir su conocimiento y asesoría.

Al M.I Omar Copca y al M.I Sebastián Hernández por su valiosa guía y apoyo constante.

A Grecia, por estar siempre presente y acompañarme en todas mis aventuras.

A Luis, por motivarme, por estar ahí en los buenos y malos momentos. Por enseñarme que el que persevera alcanza y por hacerme ver mi verdadero potencial.

A Raúl, por acompañarme en esta aventura de escribir una tesis y por brindarme su apoyo y motivación.

A mis amigas; Sofia, Areli, Delia y Oscar, por creer en mí en los días en los que ni yo creía en mí.

A los miembros del jurado por brindarme ayuda a la realización del presente documento.

“Una mujer debe ser dos cosas: quien ella quiera y lo que ella quiera” — *Coco Chanel*.

"Ser mujer y científica es romper barreras todos los días." — *Autor desconocido*.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se centra en la estimación del potencial de aprovechamiento de la captación de agua de lluvia en tres zonas estratégicas de la Ciudad de México: DM Nacional, Santa Ana Tlacotenco y San Miguel Ajusco. Ante la crisis hídrica actual y la desigual distribución del recurso en la capital, se propone la captación pluvial como una herramienta de ingeniería para transformar la vulnerabilidad de escasez de agua potable en resiliencia. A diferencia de los métodos tradicionales basados en promedios mensuales, esta metodología emplea un enfoque cuantitativo mediante el análisis de registros pluviométricos electrónicos durante un periodo de 35 años.

Para validar la propuesta, se desarrolló un algoritmo en Python que simula diariamente el funcionamiento de una política de captación compuesto por un área de 75 m². Se consideran tres escenarios de demanda doméstica no potable por día y tanques de almacenamiento con capacidad diferente. Los resultados de la simulación revelan una marcada variabilidad espacial en el potencial de captación. La zona de San Miguel Ajusco destacó como la de mayor viabilidad, alcanzando la mayor captación anual de volumen de agua de lluvia ya que cubre un mayor porcentaje de la demanda de 3 escenarios propuestos durante la temporada de lluvias. Por su parte, las zonas de DM Nacional y Santa Ana Tlacotenco mostraron un comportamiento similar, siendo capaces de satisfacer gran parte de la demanda planteada para las viviendas.

Este trabajo demuestra que la captación de agua de lluvia es una fuente importante para el suministro de agua que reduce significativamente la dependencia de la red pública. El modelo propuesto permite optimizar el dimensionamiento de los sistemas, garantizando que el diseño responda al comportamiento real de la precipitación histórica.

CONTENIDO

RESUMEN.....	4
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABLAS.....	VII
INTRODUCCIÓN	VIII
JUSTIFICACIÓN	IX
ESTADO DEL ARTE.....	X
OBJETIVO.....	XIV
General	XIV
Objetivos particulares.....	XIV
1. FUNDAMENTOS HIDROLÓGICOS.....	1
1.1. Ciclo hidrológico.....	1
1.2. Concepto de cuenca.....	3
1.3. Precipitación.....	4
1.3.1. Modelos de tormenta	5
1.3.2. Medición de precipitación	6
1.3.3 Análisis de la precipitación	7
1.4. Concepto de vaso	11
2. BASES DE PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA APLICADAS EN LA HIDROLOGÍA.....	12
2.1. Procesamiento estadístico	12
2.2. Procesamiento estadístico de datos hidrológicos	14
3. CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE AGUA PLUVIAL	18
3.1. Generalidades.....	18
3.1.1 Tipos de sistemas de captación	18
3.1.2 Componentes del sistema de captación de agua de lluvia.....	19
3.2. Criterios de diseño hidráulico	21
3.3. Usos del agua de lluvia.....	21
4. DESCRIPCIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO	25
4.1. Localización general	25
4.2. Localización particular.....	26
4.3. Contextualización.....	28
5. DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE CAPTACIÓN EN 3 ZONAS DE LA CDMX ..	32
5.1. Metodología	32
5.1.1. Recopilación de información.....	32

5.1.2. Procesamiento de datos	33
5.2 Modelo matemático propuesto	35
5.3 Aplicación del modelo matemático.....	38
5.1.3. Análisis de resultados.....	49
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	58
BIBLIOGRAFIA.....	62
GLOSARIO.....	65
ANEXOS.....	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo hidrológico.	2
Figura 2. Pendiente media de una cuenca.	4
Figura 3. Lluvia Acumulada en la temporada de estiaje (Febrero y Diciembre).	5
Figura 4. Lluvia Acumulada en la temporada de lluvia (Junio y Septiembre).	5
Figura 5. Partes del pluviómetro.	6
Figura 6. Partes del pluviómetro.	7
Figura 7. Polígonos de Thiessen.	8
Figura 8. Cura masa.	9
Figura 9. Hietograma.	10
Figura 10. Esquema de un sistema de captación de agua lluvia.....	19
Figura 11. Sistema de captación para usos agrícola.	23
Figura 12. Sistema de captación de agua de lluvia en industria automotriz.	23
Figura 13. Usos domésticos principales del agua de lluvia.	24
Figura 14. Ubicación de la CDMX.	25
Figura 15. Ubicación de las zonas de interés.	26
Figura 16. Ubicación de DM Nacional	26
Figura 17. Ubicación de Santa Ana Tlacotenco.....	27
Figura 18. Ubicación de San Miguel Ajusco	27
Figura 19. Ubicaciones de las estaciones de SEGUIAGUA	28
Figura 20. Ubicación de las estaciones de estudio	29
Figura 21. Áreas de influencia de las estaciones 4,37 y 43.....	29
Figura 22. Densidad y longitud de la red de agua potable por unidad territorial en la Ciudad de México.....	30
Figura 23. Precipitación acumulada anual de la estación 4.....	33
Figura 24 . Curva masa de la tormenta del día 17 de agosto de 1989 de la estación 4.	34
Figura 25 .Hietograma de la tormenta del día 4 de septiembre de 1989 de la estación 4.	34
Figura 26. Diagrama de flujo de la simulación.	37
Figura 27. Jerarquía de las necesidades de agua.	38
Figura 28. Actividades de consumo de la demanda del escenario A.	40
Figura 29. Actividades de consumo de la demanda del escenario B.....	41
Figura 30. Actividades de consumo de la demanda del escenario B.....	42
Figura 31. Porcentaje de viviendas particulares habitadas, según superficie construida.	43

Figura 32. Ejemplo de techo impermeabilizado.....	43
Figura 33. Tanques de almacenamiento para cada escenario.....	44
Figura 34. Volumen anual captado para el escenario B.....	47
Figura 35. Volumen de derrame para el escenario B.....	47
Figura 36. Días de demanda cubierta para el escenario B.....	48
Figura 37. Días de derrame para escenario B.....	48
Figura 38. Porcentaje del volumen aprovechado de lluvia para el escenario A.....	51
Figura 39. Porcentaje del volumen aprovechado de lluvia para el escenario B.....	51
Figura 40. Porcentaje del volumen aprovechado de lluvia para el escenario C.....	52
Figura 41. Porcentaje de suficiencia para escenario A.....	53
Figura 42. Porcentaje de suficiencia para escenario B.....	53
Figura 43. Porcentaje de suficiencia para escenario C.....	54
Figura 44. Representación esquemática del llenado del tanque mediante en agosto de 1988 para San Miguel Ajusco en el escenario A.....	55
Figura 45. Representación esquemática del llenado del tanque mediante en agosto de 1988 para San Miguel Ajusco en el escenario B.....	55
Figura 46. Representación esquemática del llenado del tanque mediante en agosto de 1988 para San Miguel Ajusco en el escenario C.....	56
Figura 47. Semáforo de cumplimiento de demanda para San Miguel Ajusco en el escenario C.....	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las cuencas por tamaño.....	3
Tabla 2. Reportes en DM Nacional.....	30
Tabla 3 . Reportes en Santa Ana Tlacotenco.....	31
Tabla 4 . Reportes en San Miguel Ajusco.....	31
Tabla 5 . Registros históricos del registro pluviométrico de la estación 4.....	33
Tabla 6. Registros históricos del registro pluviométrico de la estación 37.....	33
Tabla 7. Registros históricos del registro pluviométrico de la estación 43.....	33
Tabla 8. Rangos de consumo de agua según actividades en el cuarto de baño.....	38
Tabla 9. Rangos de consumo de agua según actividades en el cuarto de cocina y lavandería.....	39
Tabla 10. Rangos de consumo de agua según actividades extras.....	39
Tabla 11 . Cálculo del volumen de demanda doméstica del escenario A.....	39
Tabla 12. Cálculo del volumen de demanda doméstica del escenario B.....	40
Tabla 13. Cálculo del volumen de demanda doméstica del escenario C.....	42
Tabla 14. Coeficientes de escurrimiento. Fuente: CONAGUA.....	43
Tabla 15 . Volúmenes de tinacos. Fuente: ROTOPLAS.....	44
Tabla 16. Simulación de San Miguel Ajusco de julio de 2015 para el escenario B.....	45
Tabla 17. Simulación de San Miguel Ajusco para el escenario B.....	46
Tabla 18. Resumen de resultados de las simulaciones.....	50
Tabla 19 . Comparativa del potencial de aprovechamiento.....	57
Tabla 20. Simulación de San Miguel Ajusco para el escenario B.....	86

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para la existencia del ser humano y es indispensable para las diferentes actividades y para el desarrollo socioeconómico de las personas. El crecimiento demográfico y la urbanización han ejercido una fuerte demanda sobre los sistemas de abastecimiento de agua potable. En la actualidad existen grandes retos para el abastecimiento de agua potable en la Ciudad de México.

Actualmente se enfrenta una crisis hídrica en México debido a la sobre explotación de los recursos hídricos. Sin embargo, cuando habla de la escasez del agua, también se trata de una falta de gestión y buena distribución de este recurso. En la CDMX, la repartición del agua es profundamente desigual; mientras que en algunas de sus zonas centrales se cuenta con suministro constante, las áreas periféricas sufren de falta de agua o de un desabasto total. Este suministro desigual y la ineficiencia de la red, sumada a la creciente demanda por el aumento de la población, ha generado un déficit hídrico.

Para lograr expandir las formas en la que se obtiene el agua para cumplir con la demanda y a su vez tener un mejor balance entre la entrega de esta y mantener el equilibrio en el medio ambiente, sin dejar desabasto en cuerpos de agua existen fuentes alternativas. Una de ellas es el reúso y tratamiento de aguas grises, pero también existe la captación de agua de lluvia.

La ingeniería civil propone un cambio de paradigma: dejar de ver el agua de lluvia como un residuo que debe ser desalojado rápidamente por el sistema de drenaje para evitar inundaciones y comenzar a verla como un recurso estratégico para cumplir con la demanda de agua.

La captación de agua de lluvia con un correcto aprovechamiento y un buen diseño ingenieril puede convertirse el complemento indispensable para aliviar la demanda de la red pública. Un sistema bien diseñado no solo reduce la demanda, sino que también podría contribuir a la mitigación de inundaciones al disminuir los picos de escurrimiento superficial que saturan el drenaje combinado existente de la ciudad.

Bajo este supuesto, la presente investigación se enfoca en determinar el potencial de captación en tres puntos estratégicos de la Ciudad de México, analizando el volumen de agua recuperable mediante métodos hidrológicos. Además, este estudio busca demostrar que el aprovechamiento de la lluvia es una herramienta de ingeniería capaz de transformar la vulnerabilidad hídrica en resiliencia urbana.

JUSTIFICACIÓN

El agua es un recurso finito, cuya disponibilidad ha disminuido debido a diferentes causas. Existe una mayor extracción de agua en los acuíferos que la que ingresa a ellos (recarga), lo que provoca numerosas dificultades, entre las cuales está el grave inconveniente de los hundimientos diferenciales como el que ocurre en la CDMX. Además, el ciclo hidrológico está siendo alterado por el cambio climático, lo cual está modificando los patrones de precipitación a gran escala en el planeta.

Al analizar las alternativas de abastecimiento es importante considerar el tratamiento de las aguas residuales; lo que implica un costo importante y la ley actual restringe su uso doméstico. Lo que obliga a la ingeniería moderna a replantear la gestión de los recursos hídricos desde una perspectiva de economía circular y sostenible.

El captar agua pluvial es una opción viable para responder a las dificultades causadas por la falta de agua. Al ser recolectada antes de mezclarse con contaminantes del suelo o la existente en el drenaje, su tratamiento para alcanzar estándares no potables es significativamente más sencillo, económico y aceptado por la legislación vigente para varias actividades domésticas como son el lavado de ropa, sanitarios y limpieza general.

La implementación de sistemas de captación de agua de lluvia puede reducir la importación de agua de cuencas lejanas que conlleva un alto costo para su traslado.

Captar agua de lluvia no es solo una alternativa ante la falta del recurso; es una estrategia de adaptación. Permite reducir el suministro de las redes de agua potable municipales y permitan disponer de agua en la temporada de lluvias a las comunidades que carecen del suministro de agua o es donde es insuficiente.

En esta investigación se trata de validar técnicamente el potencial de la captación pluvial como un proceso sostenible para completar el suministro de agua, sobre todo en las zonas donde es limitado.

ESTADO DEL ARTE

Desde el origen de la humanidad el agua superficial ha representado la principal fuente de abastecimiento para su consumo y vía de transporte; sin embargo, hay registros que en la antigüedad también se desarrollaron tecnologías para la captación de agua de lluvia como alternativa para el riego en los cultivos y el consumo. De acuerdo Gould y Nissen Petersen (1999) señalan que los orígenes del aprovechamiento pluvial se encuentran en las primeras civilizaciones del Medio Oriente.

La Antigua República Romana, en los siglos III y IV a.C. estaba constituida por edificaciones unifamiliares llamadas “Domus”, las cuales se caracterizaban por que poseían un espacio a cielo abierto denominado “Atrio” en el cual se encontraba un estanque llamado “impluvium” cuya función era recolectar el agua de lluvia, esta agua era dirigida por un orificio en el techo llamado “compluvium”. Asimismo, en China en la región de Gansu se encontraron pozos y jarras utilizados para la captación de lluvias de hace 2000 años. (Frost Restori, 2011)

De manera similar, el imperio Maya, en el pie de la montaña de Puuc ubicada en el estado de Yucatán, en el siglo X A.C. se descubrió un sistema utilizado para el aprovechamiento de agua lluvia. Este sistema captaba el agua en un área de 100 a 200 m². El agua posteriormente se almacenaba en cisternas impermeabilizadas denominadas “Chultuns” las cuales poseían aproximadamente un diámetro de 5 m y se encontraban enterradas en el suelo. Esta agua se implementaba para el riego de los cultivos y además abastecía a la población. (Cortés-Alcaraz et al., 2021)

Por otro lado, en la actualidad existe una diversidad de sistemas de captación de agua de lluvia adaptadas a las necesidades de cada región. En la situación de la India cuya población es de más de 100 millones de habitantes, se han implementado técnicas de aprovechamiento pluvial y los sistemas de captación en techos son obligatorios. Debido a problemáticas de falta de agua se están desarrollando programas para impulsar apoyo a nuevas tecnologías que permitan el aprovechamiento del agua pluvial. Los sistemas de captación de lluvia que se han incorporado, tienen un bajo costo e impacto, esto permite aumentar las reservas de agua. Se han dispuesto un 50 % de los fondos de desarrollo rural para promover la tradicional cosecha de lluvia en el campo, esta técnica es realizada por las personas llamadas “pallar” quienes poseen conocimientos dedicados a idear soluciones para captar lluvia. En India los sitios más

comunes para captar la lluvia son en las azoteas, patios, pozos abiertos en tierras. (Ballén et al., 2006)

En Bangladesh se ve obligado a la utilización de aguas lluvias debido a la contaminación de áreas por arsénico. Se instalaron cerca de 1000 sistemas de aprovechamiento de agua pluvial por la ONG Fórum for Drinking Wáter Supply & Sanitation desde 1977. El agua recolectada se deposita en tanques de capacidades de 500 a 3,200 litros, los tanques utilizados para el almacenamiento están constituidos por una diversidad de materiales y tipos, que van desde tanques de concreto hasta tanques subterráneos. Esta agua de lluvia se utiliza para consumo humano debido a que con los residentes locales tiene una gran aceptación al ser considerada una fuente segura. Además, estudios en la zona han demostrado que el agua puede alcanzar hasta 4 o 5 meses sin poseer presencia de contaminación bacteriana si se mantiene bien almacenada y protegida. (Ballén et al., 2006)

En China, en la zona de la meseta de Loess de Gansu, localizada al noroeste del País, cuya región es de las más pobres de China las fuentes de agua superficial y subterránea son limitadas, lo que conlleva a que la agricultura en la provincia dependa por completo del agua de lluvia. La lluvia en esta provincia es escasa y se concentra en los meses de julio, agosto y septiembre, es así que su precipitación anual es de 300 mm. El gobierno local puso en marcha el proyecto 121 en el año 1995, el cual consistía la construcción de sistemas que se componían de canaletas la cuales recolectan el agua de los techos. Además, se construyeron planchas de plástico para recolectar la lluvia en el suelo. Toda el agua recolectada se almacenaba en tanques de concreto. Esta agua se utiliza para el riego de cultivos. En el año 2000, se construyeron 2,183,000 tanques para recolectar y almacenar el agua de lluvia disponiendo de una capacidad de 73.1 millones de m^3 garantizando así el suministro de agua potable para 1.97 millones personas y para el riego de 236,400 hectáreas de tierra. (Ballén et al., 2006)

En Singapur se pretende implementare que el 50% de la superficie se utilice para captar el agua de lluvia. Por lo anterior se está investigando posibles fuentes alternativas y métodos innovadores para la captación de agua pluvial. Aproximadamente el 86% de la población de Singapur vive en edificios de apartamentos, en los cuales en los techos se utiliza para la recolección de agua lluvia para posteriormente darle un uso potable. Estos sistemas se implementan mayormente en los techos de edificios altos, estacionamientos de edificios e instituciones educativas e incluso las pistas del aeropuerto. La lluvia que es recolectada se almacena en cisternas separadas del agua potable para ser usada en servicios no domésticos y a otra parte del agua se le aplica técnicas de potabilización para consumo humano. (Ballén et al., 2006)

En Tokio, Japón cuentan con sistemas llamados Rojinson, estos reciben agua de un promedio de 750 edificios que usan este sistema. Se recolecta agua de los techos de las casas y edificios para después ser almacenada en pozos subterráneos. El agua captada se extrae después de los pozos mediante un sistema de bombeo manual, para ser usada en jardines, aseo de fachadas

y pisos, incendios y con un tratamiento adecuado para consumo humano. Este sistema ayuda a controlar las inundaciones y además asegura agua para emergencias. (Ballén et al., 2006)

En África debido a que su alto porcentaje de pobreza tiene una situación grave por la escasez de agua, debido a que es complicada la obtención de este recurso por la falta de tecnología necesaria para la construcción y operación de sistemas de acueducto y alcantarillado. Sin embargo, se han puesto en funcionamiento sistemas de aprovechamiento pluvial en ciertas zonas África. Es importante destacar que sus sistemas tienen un proceso lento ya que el continente tiene bajas y escasas precipitaciones, además, tienen una cantidad pequeña de área de cubiertas impermeables y dificultad de obtención materiales de construcción lo que provoca que estos sistemas tengan un alto costo. Las zonas que mejor ha desarrollado estos sistemas son Togo, Mali, Zimbabwe, Botswana, Sudáfrica, Mozambique, Sierra Leona, Malawi, Tanzania. Estas provincias cuentan con sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia a muy bajo costo. (Frost Restori, 2011)

En Riverdale, Canadá, se sitúa la casa “HEALTHY HOUSE” la cual es una vivienda familiar de tres habitaciones con área de 158 m². Esta casa es un proyecto que destaca por ser autosuficiente en su totalidad, ya que no utiliza el sistema de acueducto municipal. El agua de lluvia es captada y dirigida a un tanque de almacenamiento donde se realiza un proceso de desinfección, agregándole cal la cual reduce la acidez de esta y le otorga un sabor fresco. (Ballén et al., 2006)

Por otro lado, es importante hablar del avance tecnológico que ha tenido México en cuanto a sistemas de captación de agua de lluvia. En México los sistemas de captación de agua pluvial más destacables son los programas gubernamentales para viviendas, escuelas, edificios públicos y mercados. El programa más destacado es el "Programa Cosecha de Lluvia", que consiste en otorgar estos sistemas de captación de agua de lluvia a las viviendas en CDMX. Otro programa muy reconocible es el llamado “Isla Urbana” que opera en la Alcaldía de Tlalpan, el cuál aprovecha el agua de lluvia a gran escala. Además, la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx) ha instalado 35 sistemas de captación en 26 espacios académicos, con una capacidad de almacenamiento de hasta 36,000 litros en un solo sistema. Este sistema usa filtros, incluyendo luz ultravioleta y carbón activado, para purificar el agua para su uso no potable. (SEDEMA, s.f., UAEMéx).

Si bien, en los sistemas de captación de agua de lluvia es importante la infraestructura, un componente también sumamente importante es el análisis de información pluviométrica para su correcto dimensionamiento del sistema. Por lo general el proceso más recurrente y más sencillo comienza con el cálculo del área de aportación, a esta área se le asigna un coeficiente de escurrimiento. Después para obtener datos cuantitativos de la precipitación se consultan las normas locales, tablas de precipitación y mapas de isoyetas de la zona para conocer cuánto llueve y la intensidad con la que lo hace. Con estos datos se dimensiona el sistema de captación de lluvia. (SEDEMA, s. f.).

No obstante, existen metodologías un tanto más complicadas en donde se recurre a un análisis hidrológico más completo. Como es el caso de un sistema de Monterrey, Nuevo León. En esta investigación se llevó un análisis de la información pluviométrica de las estaciones climatológicas de Nuevo León. Este análisis consiste en la realización de mapas de isoyetas y la distribución de la cantidad de precipitación en el estado de Nuevo León, con datos de precipitación media y precipitación neta. De acuerdo con Anaya Garduño (2011) la precipitación neta se obtiene a través de la ecuación en donde se define como la cantidad de agua de lluvia que queda a disposición del SCALL. (Villarreal-González et al., 2016)

$$P_N = \sum_{j=1}^n P_j \eta ; P_j \geq 40 \text{ mm}$$

Donde:

P_N es la precipitación neta, en mm

P_j es la precipitación media mensual, en mm

η es un coeficiente adimensional.

Se calcula la precipitación neta para cada una de las estaciones climatológicas sumando únicamente aquellas que reporten más de 40 mm de precipitación al mes. Con estos datos se crearon mapas con la distribución de la Precipitación Media Anual y Precipitación Neta Anual. Después se analiza la posible área de captación con la cual se puede estimar un volumen de agua captado. Sin embargo, hay que considerar las pérdidas inevitables por lo que se requiere calcular el área efectiva de captación, multiplicando el área total por el coeficiente de escurrimiento del área de captación. Cuando ya se conoce la magnitud del área destinada para la captación del agua pluvial se calcula el volumen de agua que puede ser captado en esta superficie y definir la capacidad para cubrir una demanda. Para calcular el volumen se tiene la siguiente ecuación. (Villarreal-González et al., 2016)

$$Vol = \frac{(PNA)(A_e)(CE)}{1000}$$

Donde:

Vol es el volumen captado, en m^3

P_{NA} , es la precipitación neta anual, en mm

A_e es el área efectiva de captación, en m^2

CE es el coeficiente de escurrimiento adimensional.

OBJETIVO

General

Cuantificar el potencial volumétrico de aprovechamiento de agua de lluvia en tres zonas de la Ciudad de México, mediante el procesamiento de registros pluviométricos históricos y la simulación diaria del funcionamiento de los sistemas de captación propuestos en tres zonas de interés y determinar la viabilidad de satisfacer demandas hídricas específicas.

Objetivos particulares

- Procesar registros pluviométricos electrónicos de las estaciones seleccionadas en la CDMX.
- Determinar el comportamiento de la precipitación durante la temporada de lluvia.
- Desarrollar un modelo de simulación diaria de los sistemas de captación de agua de lluvia que considere el área de captación, la capacidad de almacenamiento, la demanda y la precipitación diaria.
- Cuantificar el volumen aprovechable de la lluvia captada en las 3 zonas de estudios.
- Estimar el volumen de agua de ahorro de agua de red municipal.
- Evaluar cómo varía la eficiencia del sistema ante diferentes registros de lluvias en las zonas de estudio.



1. FUNDAMENTOS HIDROLÓGICOS

La Hidrología es la disciplina que tiene como objeto de estudio los procesos del agua, su ocurrencia, su circulación y distribución. A su vez estudia sus propiedades físicas y químicas. Y analiza la influencia que tienen sobre el medio ambiente, integrando la relación con los seres vivos (Chow, 1964). Ella se encarga del estudio del agua, examina su distribución, su ocurrencia y su movimiento en su entorno natural.

1.1. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es el proceso de circulación del agua entre los distintos depósitos de esta. Este desplazamiento es principalmente debido a dos causas, la primera es el sol pues este proporciona la energía para evaporar y elevar el agua evaporada. La segunda causa es la gravedad terrestre ya que hace que el agua condensada en las nubes descienda como precipitación o escurrimiento. Además, este es un ciclo biogeoquímico porque hay una participación de reacciones químicas lo que permite que el agua se traslade de lugares y cambie de estado físico. (Campos, 1998).

En la Tierra, el agua se manifiesta en tres estados: sólido, líquido y gaseoso. A través de procesos como la evaporación de las fuentes superficiales, la precipitación de las nubes y la filtración en el suelo, el agua se mantiene en un movimiento y cambio de estado constantes. Sin embargo, a pesar de estas transformaciones, el volumen total de agua en el planeta permanece constante. (Organismo Operador Municipal de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de Bahía de Banderas., S.F).

El ciclo hidrológico, se considera que comienza con la evaporación del agua en los océanos. Conforme se eleva, el aire humedecido se enfría y el vapor se transforma en agua; es decir el vapor se condensa para formar nubes. Después ocurre la precipitación, las gotas de agua en

las nubes caen por su propio peso. El agua podría caer como nieve o granizo si en la atmósfera hace mucho frío, por el contrario, caerán como gotas de lluvia. (Organismo Operador Municipal de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de Bahía de Banderas., S.F).

Una parte de la precipitación se evapora durante su caída y adicionalmente otra parte es retenida por la vegetación, los edificios, caminos y otros; esta agua posteriormente vuelve a la atmósfera en forma de vapor. Asimismo, la parte de agua que, si logra llegar al suelo, suele agruparse en pequeños surcos que después forman arroyos, los cuales se descargan en ríos que circulan las aguas a los embalses, lagos o mares, donde esta agua se evapora o se infiltra en el terreno. (Campos, 1998).

La parte restante de la precipitación penetra a través de la superficie del terreno y rellena los poros y fisuras presentes. Si el agua infiltrada es abundante, cierta cantidad desciende hasta recargar el agua subterránea. En cambio, cuando el volumen infiltrado es escaso, el agua permanece en la zona no saturada, de donde vuelve a la atmósfera por evaporación o por transpiración de las plantas. Finalmente, bajo la influencia de la gravedad, el escurrimiento del agua superficial y del agua subterránea se mueve hacia las zonas bajas y, con el tiempo, integra el escurrimiento total de los ríos, mismos que descargan el agua en los océanos. (Campos, 1998). Una parte del agua que llega a la superficie terrestre será aprovechada por los seres vivos; otra escurrirá por el terreno hasta llegar a un río, un lago o el océano. A este fenómeno se le conoce como escorrentía. Otro porcentaje del agua se filtrará a través del suelo, formando acuíferos o capas de agua subterránea, conocidas como capas freáticas. Este proceso es la infiltración. Tarde o temprano, toda esta agua volverá nuevamente a la atmósfera, debido principalmente a la evaporación. (Organismo Operador Municipal de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de Bahía de Banderas., S.F)

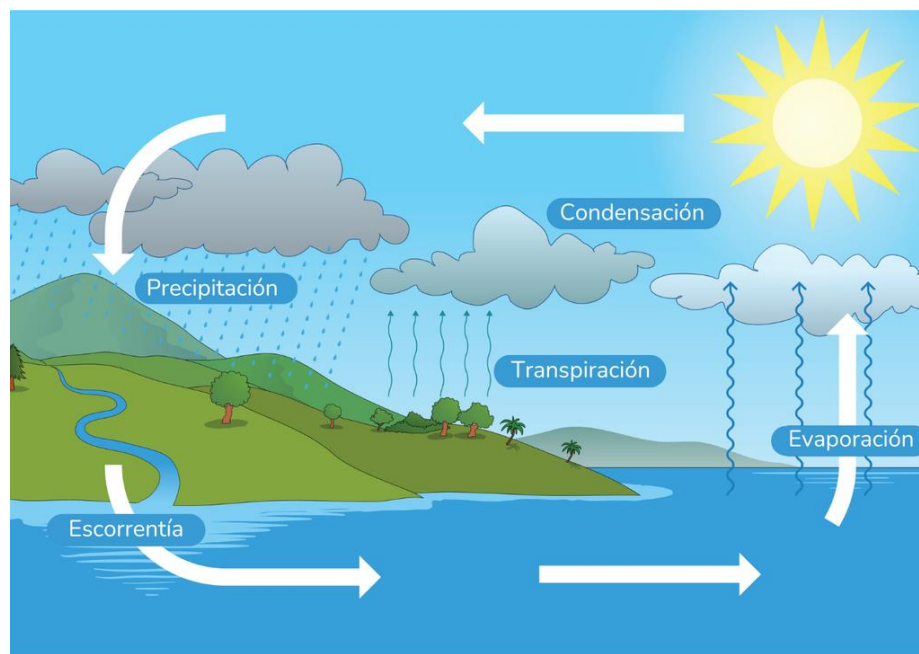


Figura 1. Ciclo hidrológico. Fuente: Fundación Terram

1.2. Concepto de cuenca

Se llama cuenca hidrográfica al área que contribuye al escurrimiento, que capta parte o todo el flujo de la corriente principal y sus tributarios. Es decir, es una zona de la superficie terrestre en donde las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. (Springall, S.f)

Los límites de una cuenca, que se conoce como “parteaguas” o “divisoria”, estas líneas imaginarias unen las crestas de las elevaciones de terreno por cuyas laderas escurre el agua hacia el cauce principal de salida de la propia cuenca, o hacia su centro, en caso de ser cerrada. su función es separar la cuenca de la otras adyacentes. (Martínez Martínez, 2017)

1.2.1 Tamaño o área de la cuenca

El tamaño o área de la cuenca, A , es el área en proyección horizontal de la superficie de la cuenca, en kilómetros cuadrados o hectáreas.

Hidrológicamente, las cuencas se pueden clasificar como pequeñas o grandes. El criterio para decir si una cuenca es pequeña o grande debe estar en las tormentas. Una cuenca pequeña es sensible a las lluvias de alta intensidad y corta duración y en ella predominan las características físicas del suelo con respecto a las del cauce. Una cuenca grande está gobernada por el efecto del almacenamiento del cauce.

Área (km ²)	Denominación
<25	Muy pequeña
25-250	Pequeña
250-500	Intermedia- Pequeña
500-2500	Intermedia- Grande
2500-5000	Grande
>5000	Muy grande

Tabla 1. Clasificación de las cuencas por tamaño. Fuente: Campos, 1998

1.2.2 Elevación media de la cuenca

La elevación media de la cuenca representa la elevación que en promedio tienen todos los puntos de la superficie de la cuenca.

De acuerdo con Campos (1998) se asocia a la cuenca un sistema de ejes de coordenadas x , y ; se procura que esta quede en el primer cuadrante. A partir de los ejes se traza una malla de líneas x , y ya especificadas con regularidad, de manera que por lo menos se tengan 100 intersecciones (x, y) de la malla dentro de la cuenca, en las cuales determine la elevación (E_i) . Si el punto de intersección cae dentro de dos curvas de nivel, se encuentra con interpolación lineal. La elevación media se calcula con:

$$\bar{E} = \frac{\sum_i^n E_i}{n}$$

1.2.3 Pendiente media de la cuenca

Según Aparicio (1989) la pendiente media de una cuenca es la pendiente de una línea recta que tiene un apoyo inamovible en el extremo de aguas abajo de la corriente que parte el perfil y hace que se tengan dos áreas iguales por arriba y abajo de dicha línea.

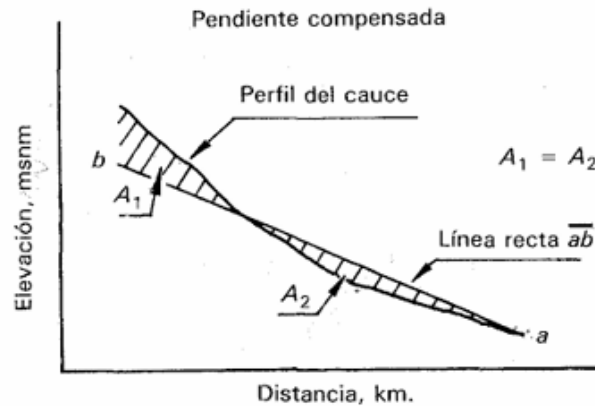


Figura 2. Pendiente media de una cuenca. Fuente: Aparicio

Taylor y Schwarz proponen calcular la pendiente media con la siguiente expresión:

$$S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2$$

Donde:

l_i es la longitud del tramo i.

S_i es la pendiente del tramo.

1.3. Precipitación

La precipitación es vapor de agua que se ha condensado de las nubes para caer en forma líquida, es decir; lluvia o sólidos como la nieve y el granizo. La precipitación es la parte del ciclo del agua que lleva agua desde la atmósfera hasta la superficie terrestre. El cuándo y dónde cae la precipitación está determinado por el sistema climático, especialmente por los patrones de circulación atmosférica y oceánica, y por la cantidad de agua que regresa a la atmósfera. (University of California Museum of Paleontology, s. f.)

La temporada de lluvia es un fenómeno meteorológico, que se inicia con la condensación del vapor de agua contenido en las nubes. En la CDMX la temporada de lluvia se extiende de mayo a octubre.

En ella la distribución es distinta en la lluvia, la cual no es uniforme y presenta variaciones significativas tanto en su intensidad como en su frecuencia a lo largo del territorio. Esta

variabilidad se manifiesta observar el comportamiento de la precipitación en la CDMX. Durante el periodo de estiaje, la presencia de precipitación es mínima, donde los registros apenas alcanzan valores marginales de 0 a 8 mm en la mayor parte de la cuenca. El contraste es claro al llegar a la temporada de la lluvia, la precipitación alcanza acumulados de hasta 250 mm debido a la interacción de los vientos con la accidentada topografía.

Esta disparidad climática en la CDMX justifica plenamente un análisis diferenciado por zonas, ya que la eficiencia de cualquier sistema de aprovechamiento de agua de lluvia dependerá directamente de la ubicación geográfica.

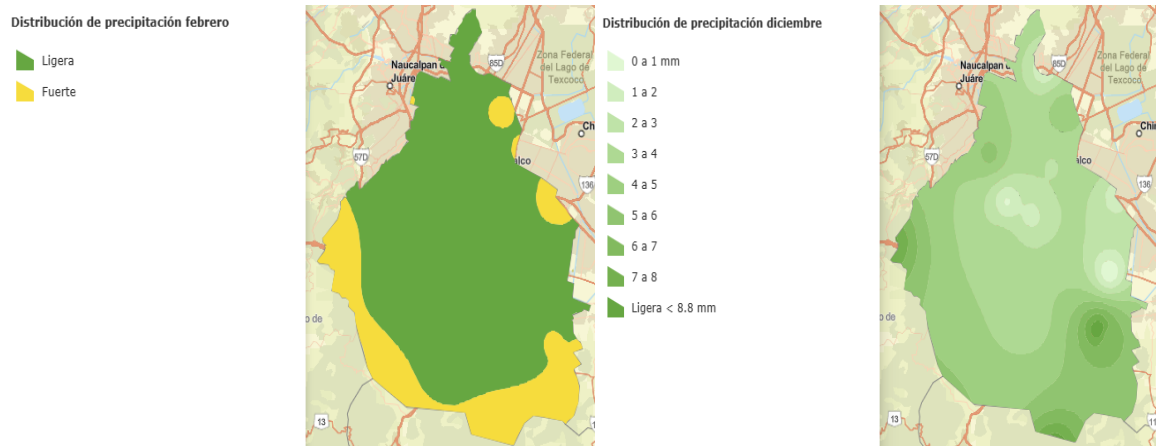


Figura 3. Lluvia Acumulada en la temporada de estiaje (Febrero y Diciembre). Fuente: Atlas de riesgos

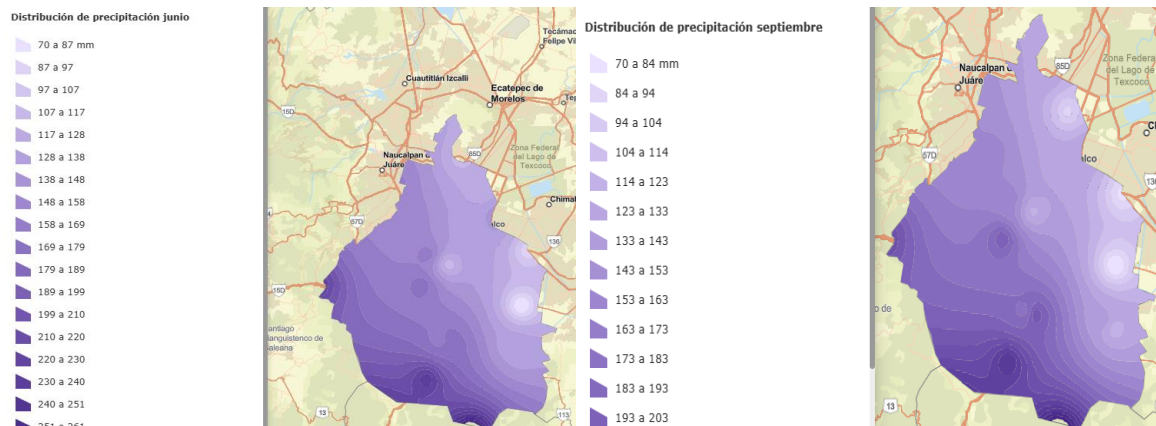


Figura 4. Lluvia Acumulada en la temporada de lluvia (Junio y Septiembre). Fuente: Atlas de riesgos

1.3.1. Modelos de tormenta

Los modelos de tormenta o de lluvia son métodos con los cuales se aíslan los factores significativos en el proceso de precipitación y se extrapolan hasta sus extremos probables, de tal manera que se tenga una idea razonable de la máxima precipitación que puede caer en una

zona dadas ciertas condiciones atmosféricas. Estos modelos son más aplicables a gran escala que a tormentas pequeñas. (Aparicio, 1989)

1.3.1.1 Modelo del plano inclinado

Describe de manera simplificada el proceso que se da en la producción de lluvia orográfica y de frente cálido. Supone que la masa de aire es estable, o sea que el aire es elevado sólo por la barrera frontal o topográfica. Este proceso es poco común en la naturaleza y produce lluvias leves. En general, las masas se hacen inestables al elevarse y la precipitación se origina por una combinación de efectos convectivos y orográficos. (Martínez, 2017)

1.3.1.2 Modelo de convergencia

Describe el proceso de lluvia de frente frío (tormentas convectivas o ciclónicas). Cuando el aire es forzado a converger en cierta zona, se produce un movimiento vertical del mismo por la elevación de la presión en la parte inferior de la zona; y en el límite superior se produce un flujo divergente. (Martínez, 2017)

1.3.2. Medición de precipitación

La precipitación se mide en términos de altura o lámina de agua, se expresa en milímetros o centímetros y se suele denotar con p ó h . Para su medición se utiliza un recipiente cilíndrico de lámina, de aproximadamente 20 centímetros de diámetro y 60 centímetros de altura; la tapa de tal recipiente es un embudo que desagua en una probeta cuya área es de un décimo del área transversal del recipiente, el cual se denomina pluviómetro. La probeta con tal área sirve para poder leer a simple vista láminas de hasta un décimo de milímetro. (Campos, 1998)

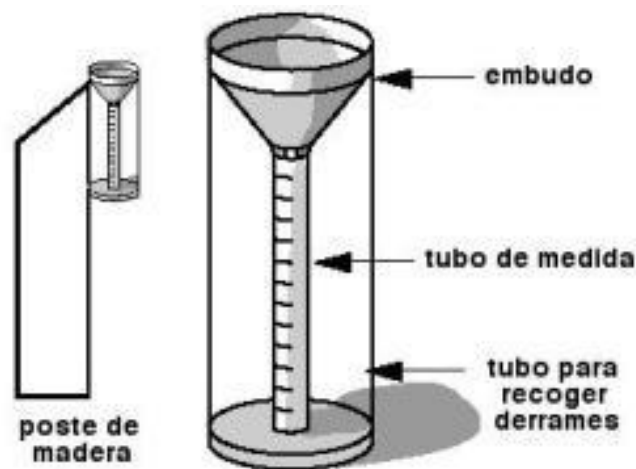


Figura 5. Partes del pluviómetro. Fuente: García, 2017

El pluviógrafo es un aparato que hace un registro de altura de lluvia contra tiempo. El más común es un pluviómetro ligado a un sistema de flotadores que originan el movimiento de una aguja sobre un papel registrador, montado en un mecanismo de relojería. Los pluviógrafos generalmente se utilizan para conocer cómo varía la precipitación con respecto al tiempo. (Campos, 1998)

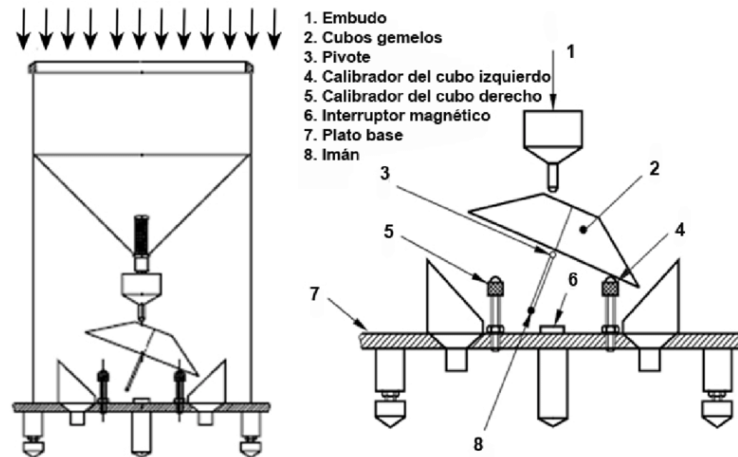


Figura 6. Partes del pluviómetro.

1.3.3 Análisis de la precipitación

1.3.3.1 Lluvia media

La altura de lluvia que cae en un sitio es diferente de la que cae en los alrededores, aunque sea sitios cercanos. Para los cálculos es necesario conocer la lluvia media de una zona, como puede ser una cuenca. Para calcular la lluvia media de una tormenta dada, existen tres métodos. (Aparicio, 1989)

1.3.3.1.2 Método aritmético

De acuerdo con Aparicio este método consiste en obtener el promedio aritmético de las alturas de precipitación registradas en cada estación usada en el análisis y se calcula con la siguiente expresión:

$$\bar{h}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{pi}$$

Donde:

h_{pi} es la altura de precipitación registrada en la estación i

n es el número de estaciones bajo análisis.

1.3.3.1.2 Polígonos de Thiessen

Aparicio (1989) establece que los polígonos de Thiessen son una técnica geométrica usada para fraccionar un área en zonas de influencia basadas en la proximidad a puntos de muestreo. Este método consiste en unir mediante líneas rectas en la cuenca, las estaciones más cercanas entre sí. Se forman triángulos en los cuales los vértices están las estaciones pluviométricas. Después se trazan líneas rectas que divide en dos partes exactamente iguales los lados de los triángulos, las líneas correspondientes a cada triángulo convergerán en un solo punto. Cada estación pluviométrica quedará rodeada por las líneas rectas, que forman los llamados polígonos de Thiessen. El área contenida por los polígonos de Thiessen y el parteaguas será el área de influencia de la estación correspondiente.

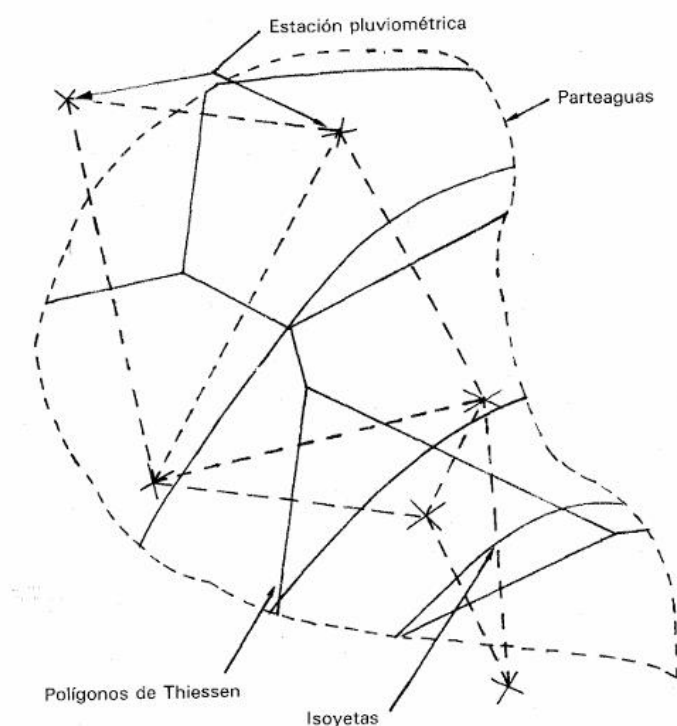


Figura 7. Polígonos de Thiessen. Fuente: Aparicio, 1989

Por consiguiente, la lluvia media se calcula como un promedio pesado de las precipitaciones registradas en cada estación, usando como peso el área de influencia de cada una:

$$\bar{h}_p = \frac{\sum_{i=1}^n A_i h_{pi}}{A_T}$$

Donde:

A_i es el área de influencia de la estación i

A_T es el área total de la cuenca.

1.3.3.2 Curva masa

Según Aparicio (1989) para conocer la variación en el tiempo de la precipitación media en la cuenca, es necesario calcular una curva masa media de precipitación. Esta curva se obtiene aplicando el método aritmético o el de polígonos de Thiessen a las alturas de precipitación acumuladas en cada estación para distintos tiempos. El resultado será una curva masa media y se puede depurar calculando la precipitación media de toda la tormenta con el método de las isoyetas y multiplicando cada ordenada de la curva masa media por el factor de ajuste para calcular una curva llamada curva masa media ajustada.

$$Fa = \frac{\bar{h}_{pis}}{\bar{h}_{p_0}}$$

Donde:

$\bar{h}_{pis}$ es la altura de precipitación media de toda la tormenta calculada con el método de las isoyetas

$\bar{h}_{p_0}$ es la misma tormenta, pero calculada con el método aritmético o el de polígonos de Thiessen.

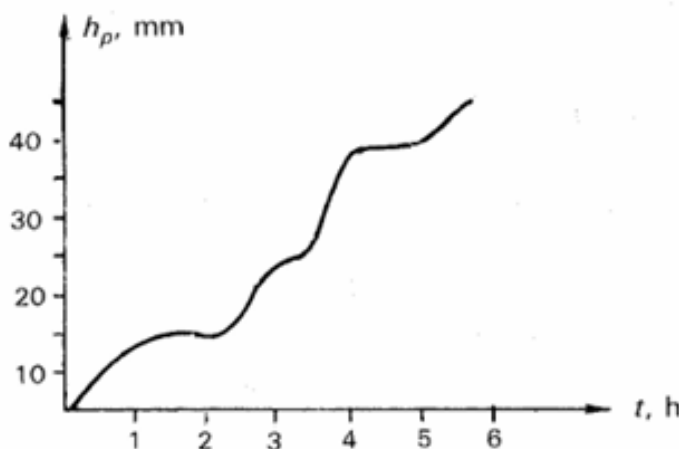


Figura 8. Curva masa. Fuente: Aparicio

1.3.3.3 Hietograma medio en la cuenca

Conforme a Martínez (2017) para conocer la variación en el tiempo de la precipitación media de una tormenta dada en la cuenca, entonces es necesario calcular el hietograma medio. Éste se determina con base en la curva masa media de precipitación. Que se calcula con la siguiente expresión:

$$C_m = C_{m1} \frac{A_1}{A} + C_{m2} \frac{A_2}{A} + \dots + C_{mn} \frac{A_n}{A}$$

Donde:

C_{mi} curva masa del pluviógrafo i , (mm)

A_i área de influencia del pluviógrafo i , (km²)

Después se calcula la curva masa ajustada a la cuenca:

$$\bar{C}_m = C_m Fa$$

Donde:

Fa factor de ajuste

El hietograma entonces se construye dividiendo el tiempo que duró la tormenta en n intervalos y midiendo la altura de precipitación media que se tuvo en cada uno de ellos. Para obtener la precipitación en cada intervalo de tiempo se tiene:

intervalo de tiempo se tiene:

$$P_i = P_{acum} - P_{i-1}$$

P_i precipitación media en la cuenca en el intervalo de interés, (mm)

P_{acum} precipitación acumulada en el registro promedio de los pluviógrafos en el intervalo de interés, en milímetros (mm)

P_{i-1} precipitación media en la cuenca en el intervalo anterior del intervalo de interés, (mm)

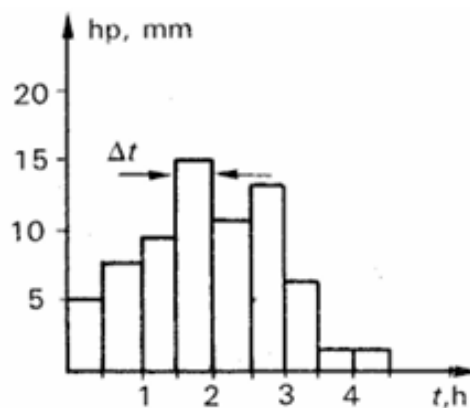


Figura 9. Hietograma. Fuente: Aparicio

1.3.3.4 Transposición y maximización de tormentas

Si en una cuenca se tiene falta de registros pluviométricos que muestren los eventos máximos de precipitación, o se tiene la necesidad de investigar las precipitaciones extremas; entonces se puede basar en los registros de lugares cercanos que sean meteorológicamente similares y así transponerlos a la cuenca en estudio y maximizarlos. (Martínez, 2017)

Entonces para poder transponer una tormenta se debe calcular las curvas p-A-d de la tormenta por transponer. Luego transponer la tormenta a la cuenca en estudio, multiplicando los

valores de la precipitación por el factor de ajuste que se obtiene de la siguiente expresión de acuerdo con Martínez (2017):

$$k = \frac{h_a}{h_o}$$

donde:

h_o la lluvia precipitable en el punto de ocurrencia de la tormenta por transponer, para el punto de rocío durante 12 horas en el lapso de duración de la tormenta, (mm).

h_a la lluvia precipitable en la cuenca en estudio para el mismo punto de rocío, (mm).

Ahora con el área de la cuenca se establecen las alturas de precipitación para distintas duraciones de las curvas P-A-D ajustadas con el factor k , con lo que se obtiene una curva masa. Posteriormente de la curva masa se calculan las alturas de precipitación en intervalos de tiempo previamente seleccionados. Luego se construyen diferentes hietogramas, colocando esas alturas en diferentes posiciones, hasta obtener la situación más desfavorable.

Finalmente, la tormenta se puede maximizar multiplicando sus alturas de precipitación por el factor de maximización:

$$k_m = \frac{h_m}{h_a}$$

donde:

h_m la lluvia precipitable correspondiente a la temperatura de rocío máxima persistente durante 12 horas en el sitio en estudio.

1.3.3.6 Relación entre la tormenta y su área de influencia

En la hidrología un problema constante es la determinación de la magnitud del área de influencia que puede considerarse que representa una estación climatológica. Para fines prácticos se puede considerar un área representativa de 25 km². (Springall, 1970)

1.4. Concepto de vaso

Un vaso, en la hidrología, es el espacio físico, ya sea natural o artificial, para el almacenamiento y regulación de agua. El vaso funciona como un depósito para detención de escurrimientos y así prevenir inundaciones, generar energía, abastecer agua potable o en el riego, gestionando el volumen de agua según su elevación.



2. BASES DE PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA

APLICADAS EN LA HIDROLOGÍA

Los sistemas hidrológicos son complicados de explicarse con modelos exactos. Por ello, para resolver sus problemas, es fundamental apoyarse en la probabilidad y la estadística. (Martínez, 2017)

2.1. Procesamiento estadístico

La probabilidad se dedica al estudio de los experimentos aleatorios. Cuando un experimento de esta naturaleza se repite en un número n de ocasiones, la frecuencia m con la que se manifiesta un resultado específico que se denomina evento, permite establecer la frecuencia relativa mediante la relación:

$$f = m/n.$$

Este valor tiende a estabilizarse conforme el tamaño de la muestra aumenta, aproximándose a un límite que se designa como probabilidad. En consecuencia, la teoría de la probabilidad se fundamenta en dicha estabilidad, permitiendo la construcción de modelos matemáticos que asignan probabilidades a los eventos. No obstante, la validez de estos modelos depende estrechamente de la convergencia entre las probabilidades teóricas asignadas y las



frecuencias relativas observadas en la realidad, lo que introduce los problemas de verificación y confiabilidad que representan el núcleo de estudio de la estadística (Lipschutz, 1979).

Como disciplina matemática, la estadística establece los métodos científicos para la recopilación, organización, análisis y presentación de datos, con el fin de formular conclusiones y fundamentar la toma de decisiones.

En el análisis de conjuntos de datos que involucran grupos extensos de individuos u objetos, resulta frecuentemente inviable observar la totalidad de los elementos, denominada población. En su lugar, se trabaja con una fracción representativa llamada muestra.

En el ámbito de la Hidrología, las poblaciones suelen considerarse infinitas, lo que hace indispensable el uso de muestras; por ejemplo, la precipitación anual en un sitio específico constituye una población infinita, de la cual los registros históricos de una estación pluviométrica representan únicamente una muestra. Si dicha muestra es representativa, es posible inferir conclusiones significativas sobre la población, aunque, dada la incertidumbre inherente a estas inferencias, los resultados deben expresarse siempre en términos probabilísticos (Spiegel, 1979).

Los datos derivados de experimentos que no tiene una regla para obtenerlos, se denominan variables aleatorias y se clasifican en discretas o continuas según el proceso de obtención: son discretas si resultan de un conteo y continuas si provienen de una medición. Bajo esta distinción, el número de días con lluvia en un periodo anual se identifica como una variable discreta, mientras que el volumen de la lluvia anual se define como una variable continua. En la notación técnica, las variables aleatorias se representan con letras mayúsculas (X), mientras que sus valores específicos se denotan con minúsculas (x).

Una definición rigurosa establece que cualquier cantidad X es una variable aleatoria si, para un número determinado x , existe una probabilidad P de que X sea menor o igual a x , expresándose formalmente como $P(X \leq x)$ (Campos, 1998).

Para caracterizar estas variables es importante considerar su ley de probabilidades. En el caso de las variables discretas, esta relación se describe mediante una función de masa de probabilidad o una función de distribución acumulada. Por el contrario, las variables continuas se definen a través de una función de densidad de probabilidad o una función de distribución. Si bien existen diversos modelos matemáticos para representar estas leyes, como las distribuciones uniforme y normal, la Hidrología centra su interés primordial en los modelos de probabilidad continua debido a la naturaleza de los fenómenos físicos que estudia, cuyas características principales permiten modelar el comportamiento de las variables de diseño y gestión del recurso hídrico.

2.1.1 Características de la función densidad de probabilidad

De acuerdo con Martínez (2017) la función $f(x)$ es una función de densidad de probabilidad para la variable aleatoria continua X , definida en el conjunto de los números reales, si

$$f(x) \geq 0 \text{ para toda } x \in \mathbb{R}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$$

$$P(a < x < b) = \int_a^b f(x) dx$$

Se debe notar que cuando X es una variable aleatoria continua no importa si se incluye el punto final de intervalo o no, por ejemplo:

$$P(a \leq X < b) = P(X = a) + P(a < X < b) = 0 + P(a < X < b) = P(a < X < b)$$

En el caso de que X sea discreta, el límite sí se debe tomar en cuenta, puesto que la probabilidad de un valor discreto puede ser no nula. (Martínez, 2017)

2.1.2 Características de la función distribución de probabilidad

Martínez (2017) define que la distribución acumulada o función distribución de probabilidad $F(x)$ de una variable aleatoria continua X con una función de densidad $f(x)$ es:

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \text{ para } -\infty < X < \infty$$

Entonces:

$$P(a < X < b) = F(b) - F(a)$$

Si la derivada existe, se cumple que:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$$

2.2. Procesamiento estadístico de datos hidrológicos

2.2.1 Deducción de datos faltantes

Es normal que en un registro de precipitación falten los datos de un cierto periodo de días, meses o incluso de años, por la ausencia del operador o a fallas del aparato registrador. Sin embargo, se pueden estimar por diferentes métodos los datos faltantes si se tienen registros simultáneos de algunas estaciones situadas cerca de la estación correspondiente, tales como los siguientes:

- Método Racional deductivo
- Relación Normalizada
- Método del US National Weather Service
- Regresión Lineal

- Método racional deductivo

2.2.1.1 Método racional deductivo

Este método es usado para estimar precipitaciones mensuales. Es útil cuando no se cuenta de estaciones cercanas o cuando las existentes no cuentan con los datos mensuales requeridos.

Si falta un dato mensual o máximo dos, se puede estimar su valor mediante el promedio aritmético de los valores contenidos en el registro para ese mes, los cuales deberán ser como mínimo diez en el caso de un dato faltante, y veinte, en el caso de dos. (Campos, 1998)

Primero se calcula la suma de precipitaciones mensuales en todos los años completos y se obtiene la lluvia mensual promedio de cada año. Después de efectuar para todos los años completos el cálculo de los porcentajes mensuales de precipitación, definidos como la relación entre la lluvia mensual y la lluvia anual multiplicada por cien, se debe realizar una validación estadística de la serie de datos. Esta operación consiste en dividir la altura de lluvia registrada en cada mes entre el total acumulado de ese mismo año para obtener su peso relativo. Como proceso de verificación, se procede a calcular la suma de los porcentajes obtenidos para los doce meses del año, la cual debe resultar exactamente igual a 1200 y tal suma se divide entre el número de años completos; esto es, se calcula el porcentaje promedio, que se puede denominar s , con i variando de 1 a 12, uno para enero y doce para diciembre. (Campos, 1998)

Según Capos (1998) la hipótesis del método consiste en suponer que los meses con precipitación desconocida tendrán un porcentaje igual al porcentaje promedio(s). Por lo tanto, para cada mes con precipitación desconocida se cumple la relación:

$$p_i = \frac{\sum p s_i}{1200 - \sum s}$$

Donde:

i índice del mes con precipitación desconocida

p precipitación mensual desconocida, (mm)

$\sum s$ suma de los porcentajes promedio de los meses cuya precipitación se desconoce, en porcentaje (%)

$\sum p$ suma de las precipitaciones mensuales conocidas en el año incompleto que se está analizando, (mm)

s porcentaje promedio del mes con dato faltante

Examinando la ecuación lo que aparece es una cantidad constante para un año incompleto, por lo que se puede expresar para ese año la precipitación desconocida p_i se podrá calcular con la siguiente expresión:

$$p_i = k * s_i$$

Donde:

$$k = \frac{\sum p}{1200 - \sum s}$$

2.2.1.2 Método de la relación normalizada

Esta metodología es aplicable a para precipitaciones mensuales o anuales. El dato faltante se estima a partir de los valores de n estaciones cercanas, como mínimo 3, ubicadas alrededor de la estación incompleta. (Martínez, 2017)

Cuando la precipitación media anual o media mensual de cada estación auxiliar cumple con máximo el 10% de deferencia con la estación incompleta, se usará el promedio aritmético de las n estaciones para estimar el dato faltante. (Martínez, 2017)

Por el contrario, se aplica la ecuación:

$$p_x = \frac{N_x}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{N_i}$$

Donde:

p_x precipitación anual o mensual faltante, (mm)

N_x precipitación media anual o media mensual en la estación incompleta, (mm)

N_i precipitación media anual o media mensual en la estación auxiliar i , (mm)

P_i precipitación anual (o mensual) observada en la estación auxiliar i , para la misma fecha faltante, en milímetros (mm)

2.2.1.3 Método del US National Weather Service

De acuerdo con Martínez (2017) el método se utiliza para estimar precipitaciones diarias, mensuales o anuales. Este método establece que puede ser estimado el dato faltante en una estación en función de los datos en las estaciones cercanas. Entonces se utiliza la ecuación, para estimar el dato faltante:

$$p_x = \frac{\sum \frac{p_i}{d_i^2}}{\frac{1}{d_i^2}}$$

Donde:

p_x precipitación deducida, en milímetros (mm)

p_i precipitación en la estación i , (mm)

d_i distancia de la estación i a la estación en estudio, (km)

Es importante contar con mínimo dos estaciones auxiliares. Sin embargo, se recomienda usar las cuatro estaciones más cercanas. Asimismo, es beneficioso que cada una de las estaciones estén ubicadas en la misma zona geográfica.

2.2.1.4 Método de la regresión lineal

Este método consiste en examinar si existe alguna correlación entre los registros simultáneos de una estación la estación incompleta y el de las estaciones cercanas que se encuentren dentro de la misma zona geográfica. Si se verifica que la correlación existe y es buena entonces se usa la ecuación de ajuste. (Martínez, 2017)

Entonces para estimar los datos faltantes en la estación de estudio entonces se debe establecer la correlación con datos del mismo mes, a lo largo de los años de registro simultáneo. (Martínez, 2017)

La ecuación de ajuste resultante corresponde a la recta de regresión

$$y = a + bx$$

2.2.2 Ajuste de registros de precipitación

Si sucede que en alguna estación hubo un cambio en las condiciones de medición ya sea por cambio de un operador o de condiciones climatológicas adyacentes, las tendencias pueden tener alteraciones de registro que pueden llegar a importantes y podrían afectar su homogeneidad. Es decir, si una serie de datos es homogénea si es una muestra de una sola población. Entonces, si una serie no es homogénea para volverla homogénea y poder hacer estimaciones estadísticas se le deben hacer ajustes y correlaciones a la población. (Campos, 1998)

$$P_a = P_o \frac{M_1}{M_o}$$

Donde:

P_a Lluvia corregida.

P_o Lluvia registrada a corregir.

M_1 Pendiente de la recta del periodo que se considera correcto

M_o Pendiente de la recta del periodo que se quiere ajustar.



3. CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE AGUA PLUVIAL

3.1. Generalidades

3.1.1 Tipos de sistemas de captación

3.1.1.1 Sistemas activos

En los sistemas activos se utiliza algún sistema para captar el agua de lluvia para después ser almacenada y distribuida. (Active Water Harvesting, 2013).

3.1.1.2 Sistemas de captación externos

Los sistemas de captación externos básicamente implican la recolección de agua de lluvia en un área extensa y se distribuye a una distancia lejana del área del sistema de captación. Algunos ejemplos de sistemas de captación son la agricultura de esorrentías o el manejo de escurrimientos superficiales. Estos sistemas se utilizan para suministrar agua adicional a cultivos con técnicas de riego por inundación o avenidas y son comunes en regiones áridas y semiáridas de México (Anaya, 2002).

3.1.1.3 Sistemas de microcaptación o captación in situ

Estos sistemas son en los cuales el área de captación y el área de cultivo están cercanas, pero se diferencian entre sí. Comúnmente algunos sistemas de captación se encuentran al contorno, o pueden incluir barreras semicirculares y en otros sistemas el área de cultivo está abajo del área de captación. (Loredo, Libro y Num, 2005).

Asimismo, los sistemas de microcaptación de agua de lluvia se conocen también como sistemas de captación in situ, es necesario obtener información sobre la cantidad y distribución de la lluvia en el año, la capacidad de almacenamiento de agua en el perfil del suelo, las necesidades hídricas del cultivo para su construcción y considerar los recursos con que se cuenta para establecer el sistema de captación que se adecue a las circunstancias del área de trabajo. (Anaya, 2002).

3.1.1.4 Sistemas de captación en techos

Se le conoce sistema de captación en techos a aquel en el que se capta agua de lluvia sobre una superficie, ya sea un techo, una azotea, una loza o un balcón para captar agua de lluvia y conducirla a un sistema de almacenamiento como una cisterna o un tanque (Anaya y Trejo, 1998).

3.1.2 Componentes del sistema de captación de agua de lluvia

Los sistemas de captación de agua de lluvia están integrados por cinco dispositivos básicos: el área de captación, las tuberías para conducir el agua, el filtro de agua, el tanque de almacenamiento y los complementos. Asimismo, cada dispositivo está compuesto por uno más elementos que trabajan en conjunto para captar el agua, tener un procedimiento para su tratamiento y que esté disponible para su aprovechamiento (García, 2012).

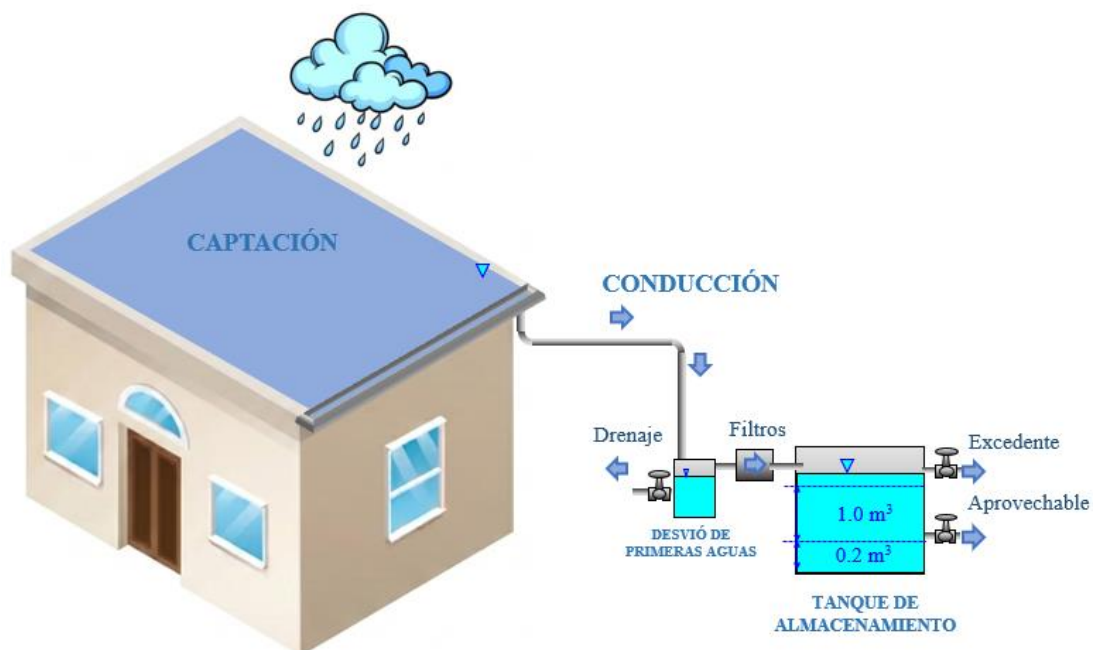


Figura 10. Esquema de un sistema de captación de agua lluvia. Elaboración propia

3.1.2.1 Área de captación

El área de captación es la superficie seleccionada para la captación del agua de lluvia. Existen diversas superficies para captar agua, una con mucho potencial es el techo y por lo tal, está limitada al área de éste. El área efectiva de la superficie de captación y el material de este influyen en la eficiencia de la captación y la calidad del agua, por esto se prefieren materiales que sean lisos, limpios e impermeables. Cada superficie además de tener coeficiente escurrimiento específicos, requieren de diferente tratamiento por su calidad asociada. (García, 2012) (Abdulla y Al-Shareef, 2009) (Sehgal, 2008).

3.1.2.2 Sistema de conducción

Consiste en canales, tubos o tuberías de diversas formas y materiales se instalan en los bordes bajos del techo, éstos se encargan de dirigir el agua recolectada al sistema de almacenamiento (Reséndiz, 2012).

Es común colocar mallas que ayuden a detener la basura, sólidos y hojas para evitar que el sistema se obstruya o se tape. Los materiales más utilizados en los sistemas de conducción son utilizados son la lámina galvanizada, el aluminio, pvc y otros materiales como madera o bambú. El tamaño de los de los sistemas de conducción depende del área del techo y de la cantidad de agua de lluvia a ser conducida a través (Abdulla y Al-Shareef, 2009).

3.1.2.3 Sistema de filtro

Este dispositivo optimiza la recolección pluvial mediante dos fases: primero, descarga el agua inicial contaminada por residuos del entorno en la superficie de captación, es decir; la llamada primeras aguas. En la segunda fase, filtra el agua de lluvia antes de ser almacenada para proteger la pureza del agua acumulada.

3.1.2.4 Sistema de almacenamiento del agua captada

El tanque de almacenamiento del agua de lluvia por lo general son cisternas o tanques. Este sistema es el componente más costoso del sistema de captación de agua de lluvia. Es necesario colocar al sistema un recubrimiento para evitar la contaminación del agua, y también poner una cobertura hermética que va a prevenir el crecimiento de algas y la reproducción de mosquitos. (Brown, Gerston y Colley, 2005).

El tamaño del tanque o de la cisterna es determinado por diversas variables: la precipitación local, la demanda, los periodos sin lluvia, la superficie de captación y el presupuesto (Brown, Gerston y Colley, 2005).

3.2. Criterios de diseño hidráulico

De acuerdo con CONAGUA (2016) para determinar si la instalación de un sistema de captación de agua de lluvia es viable en una vivienda, se debe llevar a cabo el siguiente análisis. Primero se debe recopilar la información pluviométrica de la zona de por lo menos 15 años anteriores. Con esta información histórica, se calcula la precipitación media anual según la NMX-AA-164-SCFI-2013, con la siguiente expresión:

$$\bar{p} = \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{n}$$

Donde:

$\bar{p}$: Precipitación promedio anual con distribución mensual, en mm.

p_i la precipitación media mensual, en mm.

n : número de años.

Después de la obtención de la precipitación promedio anual, se obtiene el volumen anual promedio de captación (VA) con una distribución mensual. Este volumen se calcula con la siguiente expresión:

$$V_A = \frac{\bar{p} A k_e}{1000}$$

Donde:

V_A : Volumen promedio de captación anual con distribución mensual, en m³.

$\bar{p}$: Precipitación promedio anual con distribución mensual, en mm.

A : Área de captación, en m².

k_e : Coeficiente de escurrimiento de acuerdo al material de las instalaciones de captación, adimensional.

3.3. Usos del agua de lluvia

El agua de lluvia es de calidad confiable y se considera como agua sin contaminación para aplicaciones no potables, por lo que normalmente el único proceso necesario antes de su almacenamiento es la filtración. Generalmente las propiedades físicas y químicas del agua pluvial son mejores al agua proveniente de las fuentes subterráneas, ya que éstas usualmente están más contaminadas (Gaceta UNAM, 2018).

Además, gracias al ciclo hidrológico, el agua de lluvia ya cuenta con un procesamiento de destilación, por ello los contaminantes que tuviese estando en un cuerpo de agua o en la

superficie terrestre son eliminados. Sin embargo, en las ciudades como la Ciudad de México, las grandes industrias y la elevada densidad poblacional causan efectos desfavorables en la química de las aguas pluviales. Esta precipitación retiene de la atmósfera las partículas y gases emitidos por fuentes naturales, pero también las causadas por el humano, como emisiones vehiculares e industriales. Es decir, el problema no es el agua de las lluvias, sino más las condiciones atmosféricas (Arroyo Tania, 2013).

Rocío García Martínez (2018) evaluó el agua de lluvia para conocer la calidad de esta y así saber las posibilidades que existen de consumo humano directo del agua. En esta evaluación se tomaron en cuenta parámetros tales como, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, coliformes totales, coliformes fecales, conductividad eléctrica, pH, sulfato, nitrato, cloruro y sodio. Los resultados de los análisis fueron positivos para los contaminantes en la mayoría de los casos. A causa de estos parámetros contenidos en el agua de lluvia, sólo puede ser usada para el consumo humano indirecto (Gaceta UNAM, 2018).

Si el agua de lluvia absorbe los contaminantes en el aire que la pueden acidificar, a pesar de ello, la precipitación se considera buena calidad para usos no potables con un pH de 4. Por el contrario, si el agua es más ácida de lo normal, se pueden agregar químicos neutralizadores como lo son el bicarbonato de sodio para ajustar el pH de ácido a básico. (Arroyo Tania, 2013).

También el agua de lluvia puede recoger microorganismos, contaminantes y escombros del área de captación, motivo por el que el agua de pluvial dentro del deben incluir filtración u otros tratamientos. Es suficiente con usar alguna de las técnicas de desinfección de agua como el uso de cloro, hervir el agua antes de su uso, filtros de carbón activado, purificación por ozono o desinfección por rayos ultravioleta. Los requerimientos respecto a la calidad del agua dependerán del uso de esta. (Profeco, 2018).

El, agua de lluvia se puede aprovechar en el sector agrícola ya que su calidad química es superior para el desarrollo de los cultivos en comparación con otras fuentes superficiales o subterráneas. Debido a que el agua pluvial es un recurso naturalmente blando y con una baja concentración de sales, su uso favorece el crecimiento de la vegetación y protege la estructura del suelo al evitar la acumulación de sodio en las raíces. (Rodríguez, A., León, J. L., & Tello, J. L., 2013).

En la figura 13 se presenta un sistema de captación destinado para su uso agrícola según el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (s.f.).



Figura 11. Sistema de captación para usos agrícola. Fuente: IICA

De igual forma el agua de lluvia puede utilizarse como agua de proceso si no se necesita una calidad de agua potable. El aprovechamiento del agua de lluvia puede tener las siguientes aplicaciones en la industria según la empresa Wisy (s.f.):

- Agua de refrigeración
- Como fluido de perforación
- Limpieza
- Humidificación
- Irrigación
- Para el suministro de agua de extinción

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de captación de agua de lluvia en el sector industrial automotriz dado por Soluciones Hidropluviales. (2025)



Figura 12. Sistema de captación de agua de lluvia en industria automotriz. Fuente: Soluciones Hidropluviales.

Otro uso del agua de lluvia es utilizarla para el control de incendios forestales con helicópteros ya que está limitada por la disponibilidad de fuentes de agua para la recarga de las aeronaves. (Román et al., 2018). Finalmente, otro uso del agua de lluvia podría también ser filtrada al acuífero y recargar cuerpos de agua para favorecer los procesos ecológicos naturales (Profeco, 2018).

Asimismo el más común es el uso doméstico, siendo este el objeto de estudio de la presente investigación. Dentro de los usos domésticos pueden variar entre los siguientes según Profeco (2018):

- Para la lavadora.
- Limpieza del patio o de la acera.
- Agua para riego de plantas y el jardín.
- Para mascotas o ganado.
- Para la utilizarla en la limpieza de la casa o lavar el auto.
- Estanques al aire libre y fuentes de agua.
- Agua para consumo siempre y cuando se hierva antes de ingerirla.
- Protección contra incendios.
- Para el WC.

A continuación, se presentan la ilustración de los usos domésticos de agua de lluvia de acuerdo con la Profeco (2018) y su respectivo consumo diario de agua.



Figura 13. Usos domésticos principales del agua de lluvia. Elaboración propia.



4. DESCRIPCIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO

4.1. Localización general

La Ciudad de México se localiza en el Valle de México, en la región central del país. Se encuentra rodeada por el Estado de México al norte, este y oeste, y por el estado de Morelos al sur. Cuenta con una población de 9,209,944 habitantes (INEGI, 2020), distribuidos en una superficie territorial de aproximadamente $1,485 \text{ km}^2$. Geográficamente se ubica entre las coordenadas $19^\circ 03'$ y $19^\circ 36'$ de latitud norte, y los meridianos $98^\circ 57'$ y $99^\circ 22'$ de longitud oeste.



Figura 14. Ubicación de la CDMX.

La división política de la Ciudad de México es de 16 alcaldías, nuestras zonas de interés se ubican en las alcaldías Gustavo A. Madero, Tlalpan y Milpa Alta.

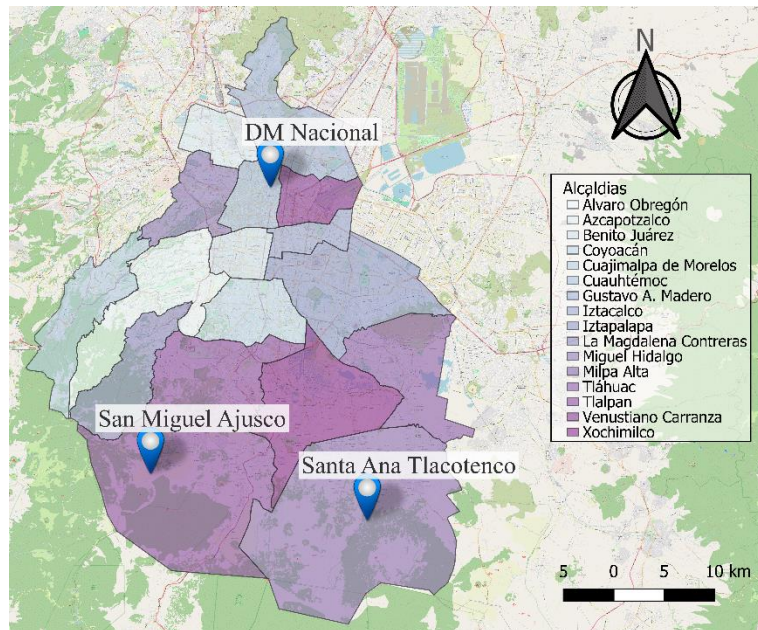


Figura 15. Ubicación de las zonas de interés.

4.2. Localización particular

Con el objetivo de analizar la variabilidad espacial de la precipitación en la Ciudad de México y su impacto en el potencial de captación pluvial, se seleccionaron tres zonas de estudio estratégicas. Estas ubicaciones representan diferentes condiciones topográficas y regímenes pluviales dentro de la entidad, permitiendo un análisis comparativo robusto.

Este punto de monitoreo se localiza en la colonia DM Nacional, perteneciente a la Alcaldía Gustavo A. Madero. Se encuentra en la región norte de la Ciudad de México, una zona densamente urbanizada.

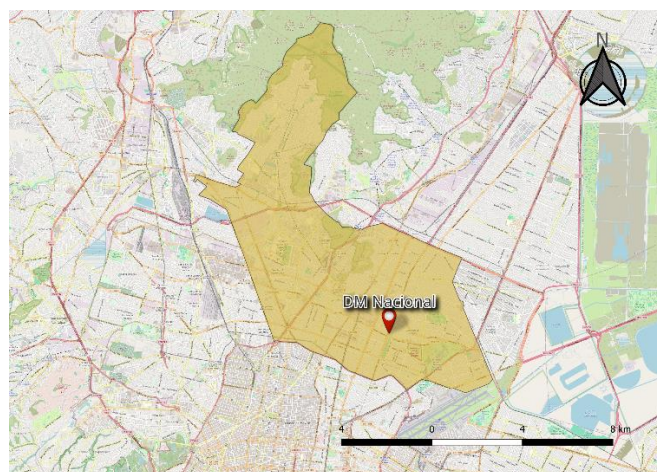


Figura 16. Ubicación de DM Nacional

Santa Ana Tlacotenco es la segunda colonia, la zona de interés está ubicada en el extremo sureste de la Ciudad de México, dentro de la Alcaldía Milpa Alta, esta zona presenta una transición hacia relieves más elevados. Se distingue por contar con importantes áreas de conservación y actividad agrícola, lo que la sitúa como una zona periférica con altitudes medias.

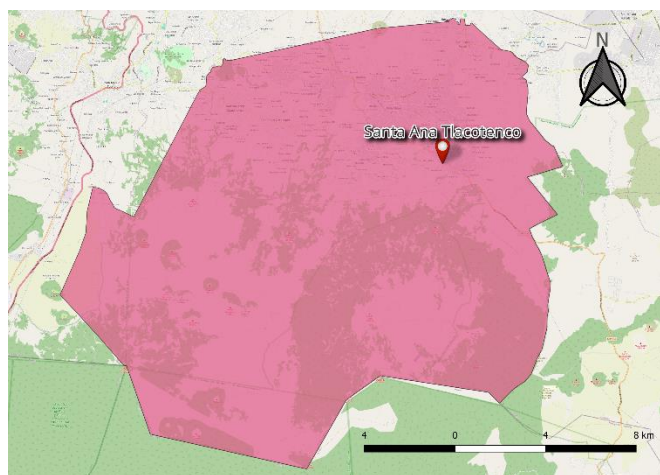


Figura 17. Ubicación de Santa Ana Tlacotenco

La última colonia es San Miguel Ajusco, esta ubicación corresponde a la región sur de la capital, situada en una zona de alta montaña, en la Alcaldía Tlalpan. El sitio se define por su elevada altitud y una topografía accidentada, factores que influyen de manera directa en sus altos niveles de precipitación y su relevancia para la conservación hídrica.

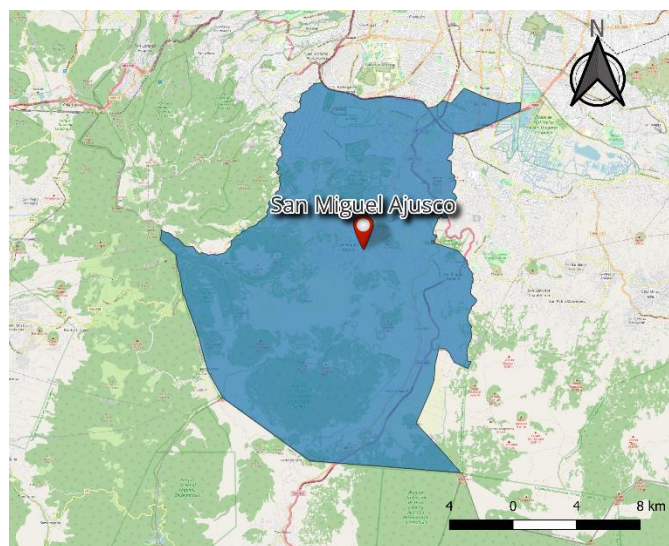


Figura 18. Ubicación de San Miguel Ajusco

4.3. Contextualización

La Ciudad de México cuenta con una red de monitoreo hidrometeorológico operada por el sistema SEGIAGUA, la cual se encuentra distribuida estratégicamente en las 16 alcaldías para registrar el comportamiento de las precipitaciones en tiempo real. Esta infraestructura es fundamental para obtener datos precisos que sustenten la simulación de los sistemas de captación pluvial. Para los fines de esta investigación, se seleccionaron las estaciones que presentan un radio de influencia directo sobre las ubicaciones de estudio.

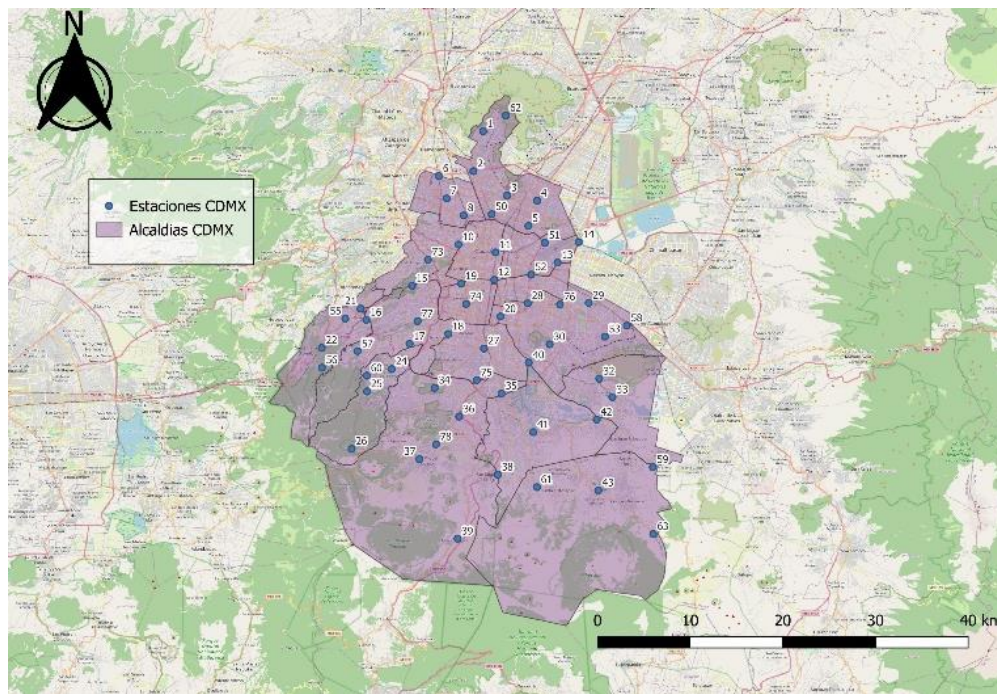


Figura 19. Ubicaciones de las estaciones de SEGIAGUA

Se determinó trabajar con las siguientes estaciones:

- Estación 37: Por su influencia en la colonia DM Nacional.
- Estación 43: Por su cercanía con el pueblo de Santa Ana Tlacotenco.
- Estación 4: Por su cobertura en el área de San Miguel Ajusco.

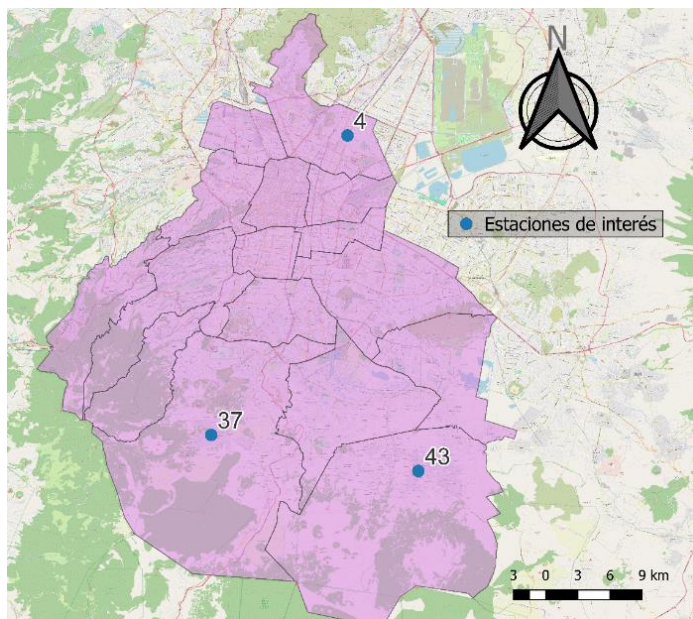


Figura 20. Ubicación de las estaciones de estudio

Dichas estaciones cuentan con un polígono de Thiessen como se muestra en la figura 21. Esta es entonces el área de influencia donde la cual los resultados de las simulaciones tienen validez.

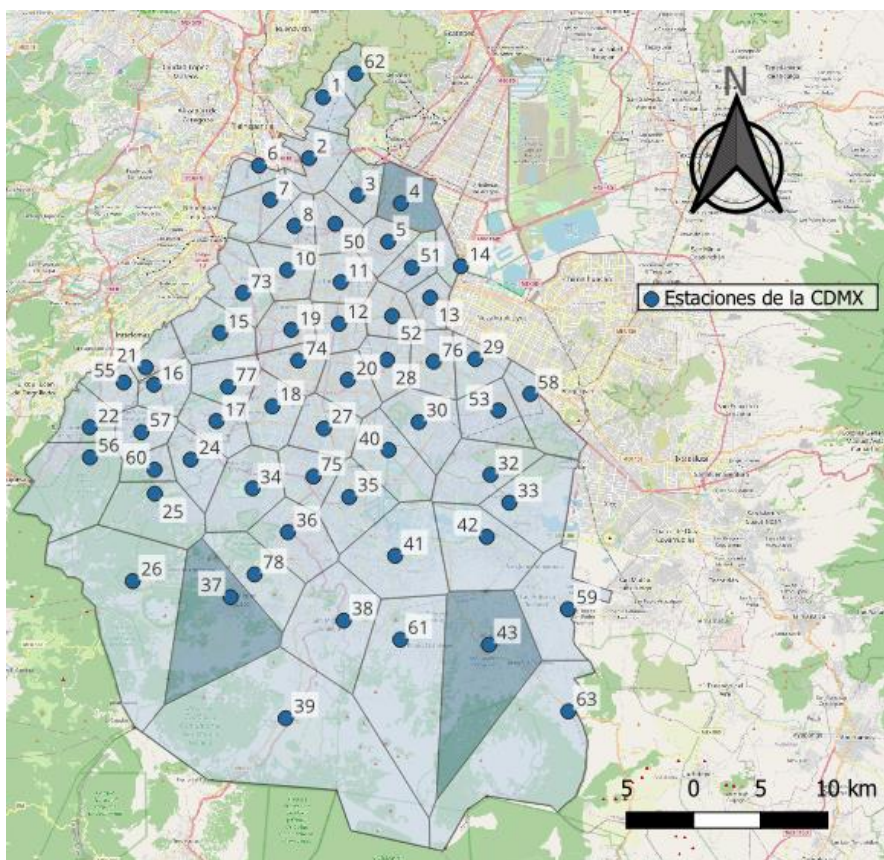


Figura 21. Áreas de influencia de las estaciones 4,37 y 43.

Para comprender la viabilidad de los sistemas de captación pluvial, es necesario contrastar la disponibilidad del recurso frente a las deficiencias de la infraestructura actual. Como se observa en la figura 19, la densidad y longitud de la red de agua potable presenta una distribución distinta. Mientras que las zonas centrales y del norte cuentan con una red más consolidada, las zonas periféricas y de alta montaña, donde se ubican puntos críticos como San Miguel Ajusco y Santa Ana Tlacotenco exhiben una menor infraestructura de red. Esta limitación obliga a la población de dichas zonas a depender de fuentes alternativas, como el suministro mediante pipas o el tandeo.

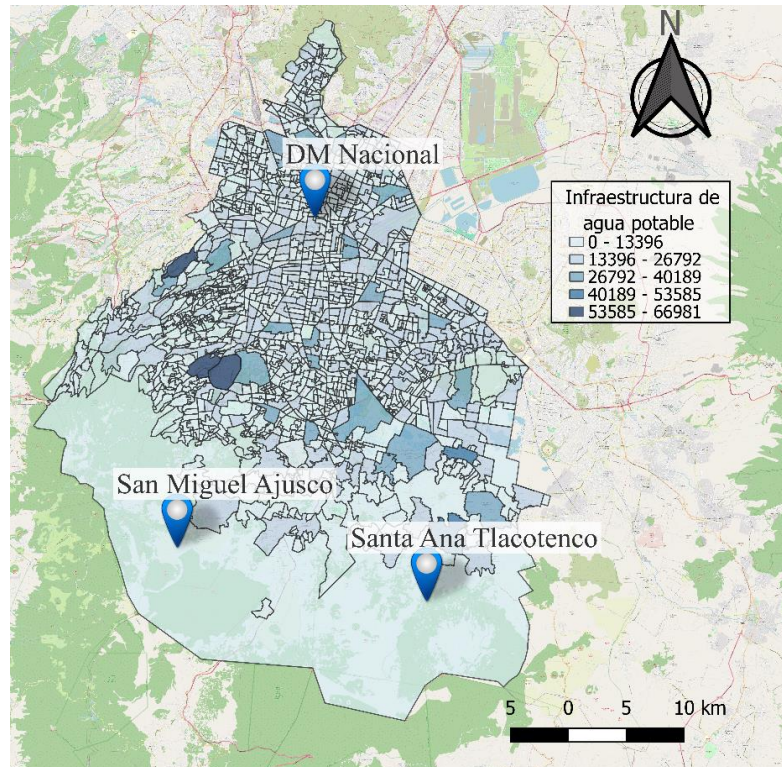


Figura 22. Densidad y longitud de la red de agua potable por unidad territorial en la Ciudad de México, Fuente: SEGUIAGUA.

La falta de continuidad en el servicio de agua potable ha generado un incremento en los reportes de desabasto. La captación de agua de lluvia se presenta no solo como una alternativa ecológica, sino como una respuesta necesaria ante la incapacidad de la red de cubrir la demanda de forma ininterrumpida. A continuación, se presenta una tabla que resume la frecuencia y el tipo de problemáticas reportadas en las zonas de estudio.

DM Nacional						
Folio de incidente	Fecha de reporte	Reporte	Alcaldía	Colonia	Longitud	Latitud
I-20220107-0236	07/01/2022	Falta de agua	Gustavo A. Madero	D M Nacional	- 99.0951777	19.4732077
I-20230527-0035	27/05/2023	Falta de agua	Gustavo A. Madero	D M Nacional	- 99.0925126	19.4776251
I-20240128-0036	28/01/2024	Falta de agua	Gustavo A. Madero	D M Nacional	-99.0935	19.4777

Tabla 2. Reportes en DM Nacional

SANTA ANA TLACOTENCO (PBLO)						
Folio	Tipo de falla	latitud	longitud	Fecha	Colonia	Alcaldía
20190328-0210	Falta de agua	19.177289	- 99.000821	28/03/2019	SANTA ANA TLACOTENCO (PBLO)	MILPA ALTA
20210218-0089	Falta de agua	19.167204	- 98.997912	18/02/2021	SANTA ANA TLACOTENCO (PBLO)	MILPA ALTA
20200614-0096	Falta de agua	19.178227	- 99.007495	14/06/2020	SANTA ANA TLACOTENCO (PBLO)	MILPA ALTA
I-20230610-0023	Falta de agua	19.1742	-99.0031	10/06/2023	SANTA ANA TLACOTENCO (PBLO)	MILPA ALTA

Tabla 3 . Reportes en Santa Ana Tlacotenco

SAN MIGUEL AJUSCO						
Folio	Tipo de falla	latitud	longitud	Fecha	Colonia	Alcaldía
20210519-0239	Falta de agua	19.22688	-99.197021	19/05/2021	San Miguel Ajusco	TLALPAN
20210525-0137	Falta de agua	19.224403	-99.196584	25/05/2021	San Miguel Ajusco	TLALPAN
20190108-0444	Falta de agua	19.223212	-99.202941	08/01/2019	San Miguel Ajusco	TLALPAN
20201218-0003	Falta de agua	19.222146	-99.194341	18/12/2020	San Miguel Ajusco	TLALPAN

Tabla 4 . Reportes en San Miguel Ajusco

A



5. DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE CAPTACIÓN EN 3 ZONAS DE LA CDMX

Para fundamentar esta investigación y obtener resultados mucho más certeros se programó un algoritmo en Python que permite hacer la simulación del funcionamiento del sistema de captación de agua pluvial en la temporada de lluvia de la CDMX durante 35 años, programado con la metodología que se presenta a continuación.

5.1. Metodología

Para calcular el volumen de agua de lluvia que puede ser aprovechado en una zona, se ha definido un proceso que parte del uso de información pluviométrica registrada en estaciones climatológicas automáticas, las cuales capturan información minuto a minuto. El enfoque propuesto para el diseño de sistemas de captación de agua de lluvia se basa en el registro pluviométrico electrónico de precipitación.

Con dicha información se realiza una simulación diaria durante 35 años de suministro a una zona con área de captación conocida, considerando una demanda establecida y el volumen de agua precipitado llevado a un tanque de almacenamiento de volumen predefinido.

5.1.1. Recopilación de información

Para el desarrollo de la simulación, se utilizaron los registros de datos históricos de precipitación de 35 años (1988-2023), provenientes de las estaciones pluviométricas electrónicas denominadas estación 3, 37 y 43. Estas estaciones fueron seleccionadas por su ubicación estratégica y la continuidad de sus registros, lo cual garantiza la representatividad necesaria para el diseño.

La información recopilada presenta una estructura de datos crudos, los cuales detallan la fecha exacta y tiempo de cada evento de lluvia detectado. El registro se basa en el conteo de pulsos electrónicos generados por el sensor de balancín del pluviómetro, lo que permite lo que facilita un registro preciso del momento exacto en que llueve, permitiendo analizar la intensidad de cada tormenta de forma individual.

Es importante destacar que el año 2003 no cuenta con registros, por lo que no se toma en cuenta para la simulación.

Año	Mes	ESTACION	DIA	NO_PTOS	HR1	ALT1	HR2	ALT2	HR3	ALT3	HR4	ALT4	HR5	ALT5	HR6	ALT6
1988	8	04	04	5	1635	0	1700	21	1715	31	1745	33	1845	37	0	0
1988	8	04	07	5	1120	0	1145	36	1220	44	1245	50	1330	53	0	0

Tabla 5 . Registros históricos del registro pluviométrico de la estación 4. Fuente: SEGUIAGUA.

Año	Mes	Estación	Día	NO_PTOS	HR1	ALT1	HR2	ALT2	HR3	ALT3	HR4	ALT4
1988	8	37	04	3	1745	0	1755	26	1800	27	0	0
1988	8	37	05	2	1350	0	1405	2	0	0	0	0

Tabla 6. Registros históricos del registro pluviométrico de la estación 37. Fuente: SEGUIAGUA

Año	Mes	ESTACION	DIA	NO_PTOS	HR1	ALT1	HR2	ALT2	HR3	ALT3	HR4	ALT4	HR5	ALT5
1988	8	43	04	2	1840	0	1845	1	0	0	0	0	0	0
1988	8	43	09	4	1840	0	1930	2	15	2	30	7	0	0

Tabla 7. Registros históricos del registro pluviométrico de la estación 43. Fuente: SEGUIAGUA

5.1.2. Procesamiento de datos

Los datos de los registros pluviométricos electrónicos se procesaron de pulsos a mm, De tal modo que cada pulso se multiplica por 0.0254 mm por lo que:

$$1 \text{ pulso} = 0.0254 \text{ mm}$$

Obteniendo así los siguientes resultados de precipitación acumulada anual para la estación 4, correspondiente a la colonia DM Nacional.

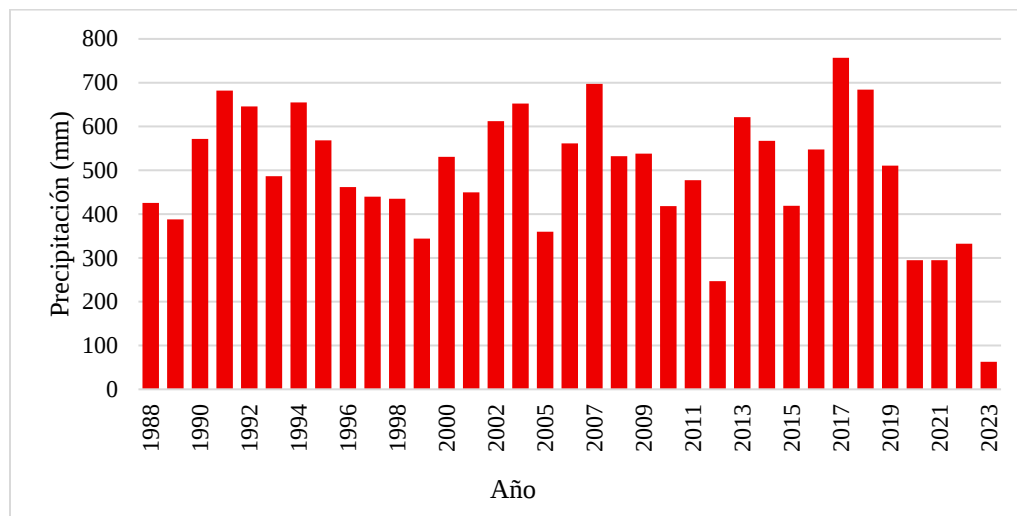


Figura 23. Precipitación acumulada anual de la estación 4

Los resultados correspondientes a las estaciones restantes se encuentran disponibles para su consulta en el Anexo

El análisis hidrológico requiere la construcción de la curva masa y el hietograma para cada una de las estaciones seleccionadas en las tres zonas de la Ciudad de México. Este proceso comienza con la integración de los datos de precipitación acumulada en el tiempo, lo que permite visualizar la variabilidad de la tormenta y determinar la altura total de agua de lluvia que cayó durante un evento específico.

Asimismo, para la estación 4, se obtuvo la curva masa de la lluvia máxima la cual se puede observar en la siguiente figura.

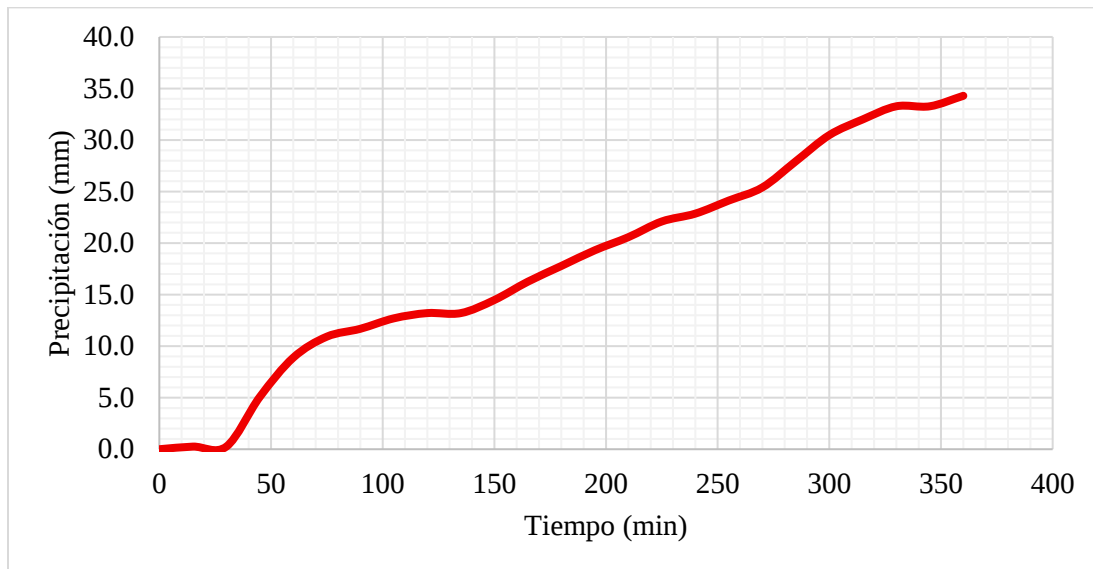


Figura 24 . Curva masa de la tormenta del día 17 de agosto de 1989 de la estación 4.

Finalmente en la figura 24 se puede observar el hietograma correspondiente a la estación 4.

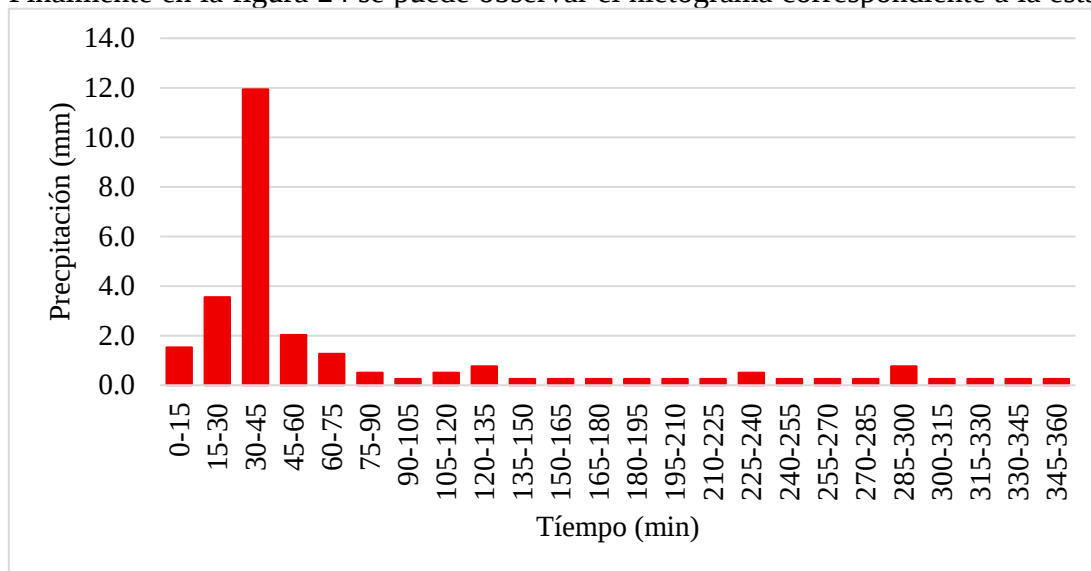


Figura 25 .Hietograma de la tormenta del día 4 de septiembre de 1989 de la estación 4.

El desglose de los resultados para las estaciones 43 y 37 puede revisarse en la sección de anexos.

5.2 Modelo matemático propuesto

La simulación del comportamiento del sistema de captación de agua de lluvia propuesto (SCALLP) se fundamenta en el principio de funcionamiento de vasos, tradicionalmente empleado en la operación de embalses. Este enfoque permite modelar el volumen almacenado en el depósito de forma continua a lo largo del tiempo, evaluando la interacción directa entre las aportaciones pluviales (entradas), la demanda requerida (salidas) y las posibles pérdidas por vertido o excedencias cuando el volumen de almacenamiento supera la capacidad de diseño.

Para llevar a cabo esta modelación de manera rigurosa, se adopta la aproximación hidrológica de tránsito de avenidas en vasos descrita en el Capítulo A.1.8 del Manual de Obras Civiles de la CFE (M.O.A. Domínguez M. R., Fuentes M. G.E., 2011). El comportamiento dinámico del almacenamiento se rige por la ecuación diferencial de continuidad, la cual establece que el cambio del volumen almacenado en un intervalo de tiempo es igual a la diferencia entre el gasto de entrada y el gasto de salida:

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

Donde:

- V Volumen almacenado en el depósito (m^3).
- I(t): Gasto de entrada o aportación pluvial (m^3/s).
- O(t): Gasto de salida total (m^3/s), que engloba tanto la demanda regulada como los volúmenes excedentes vertidos.

Para la aplicación específica en el SCALLP, a partir de registros pluviométricos con un paso de tiempo definido, el modelo contabiliza el volumen remanente del periodo anterior, añade el volumen captado por la superficie de aportación y resta el volumen extraído para satisfacer la demanda, permitiendo identificar con precisión el déficit de volumen de lluvia o los volúmenes de excedencias.

Este método permite simular cronológicamente el comportamiento del almacenamiento, analizando la oferta de agua de lluvia obtenida de los datos pluviométricos contra la demanda estimada.

Mediante una simulación diaria del funcionamiento del sistema durante 35 años se determina el volumen aprovechable que puede ser captado en el tanque de almacenamiento.

Esta simulación se ejecuta en ciclos y cada ciclo inicia en una hora fija establecida diaria en donde se verifica el volumen inicial en el tanque (V_i). Después se hace una comparación sobre si el volumen inicial es suficiente para cubrir la demanda (V_D) que requiere la edificación. Si el volumen es insuficiente se activa un suministro complementario de la red pública (V_R), tal que:

$$V_i > V_D ; V_R = 0$$
$$V_i > V_D ; V_R > 0$$

Independientemente si el suministro a la edificación fue completado en su totalidad por el sistema o hubo un complemento de la red pública, se calcula el volumen que puede ser efectivamente captado (V_C) en el tanque de almacenamiento. Este volumen se obtiene dado que se asume que si el agua de lluvia el agua captada en el día logro un volumen que logra cubrir varios días de demanda estará disponible en el tanque de almacenamiento para su consumo en los días posteriores. El volumen que puede ser efectivamente se define como:

$$V_{EC} = V_{Tanque} - V_{Libre}$$

Donde:

V_{Libre} , Volumen libre disponible en el tanque

El volumen aprovechable de la precipitación (V_P) es el resultado de multiplicar la lámina de precipitación registrada por el área de la superficie del (A). Sin embargo, debido a factores como la evaporación, la absorción del material y las irregularidades del techo impiden que se recupere la totalidad del agua, se aplicó un coeficiente de escurrimiento (C_e), tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$V_P = P A C_e$$

Para la correcta simulación del sistema se considera que el tanque de almacenamiento es indispensable considerar un volumen muerto (V_m). Este volumen se calcula determinando una altura de seguridad entre el fondo del tanque y el nivel inferior de la válvula de succión para la distribución. Considerar este volumen muerto en el cálculo garantiza que el agua de lluvia proyectada para el abastecimiento no se sobreestime, Además este volumen no está destinado al consumo, sino que cumple una función de saneamiento pasivo al actuar como una zona de sedimentación.

Por otro lado, cabe destacar que, si el sistema logro cubrir la demanda, el volumen ocupado de la red (V_R) será igual a 0 y el volumen administrado por el sistema será el total de la demanda ($V_{Administrado} = V_D$). En cambio, si el sistema no capto agua de lluvia y el volumen almacenado no logra cubrir ninguna parte de la demanda el volumen de la red de agua potable será igual a la demanda ($V_R = V_D$). Mientras que el cálculo del volumen ocupado de la red si el sistema cumplió la demanda de la edificación mediante agua de lluvia y al mismo tiempo de la red será del siguiente modo:

$$V_R = V_D - V_{Administrado}$$

Donde:

$V_{Administrado}$, Volumen administrado por el sistema

El volumen administrado por el sistema ($V_{Administrado}$) puede ser proporcionado por el almacenamiento disponible en el tanque o bien, por la lluvia del día de la simulación.

Además, si el tanque es incapaz de admitir el volumen total de precipitación existirá un volumen de derrame (V_{De}) en el sistema de tal forma que:

$$V_{De} = V_P - V_C$$

El volumen aprovechado de la lluvia (V_A), es decir el volumen real de la precipitación que se captó y se aprovechó, será:

$$V_A = V_P - V_{De} - V_{PL}$$

Posteriormente se realiza un balance hídrico para obtener el volumen final en el día de modo que:

$$V_f = V_A + V_i - V_{Administrado} - V_{PL}$$

Donde:

V_f , Volumen final en el día

V_A , Volumen aprovechado de la precipitación

V_i Volumen inicial en el tanque

$V_{Administrado}$, Volumen ocupado para el suministro en la edificación

V_{PL} , Volumen de primeras lluvias

La metodología se desarrolla con la siguiente la lógica secuencial y se ajusta al diagrama de flujo de procesos detallado en la figura mostrada.

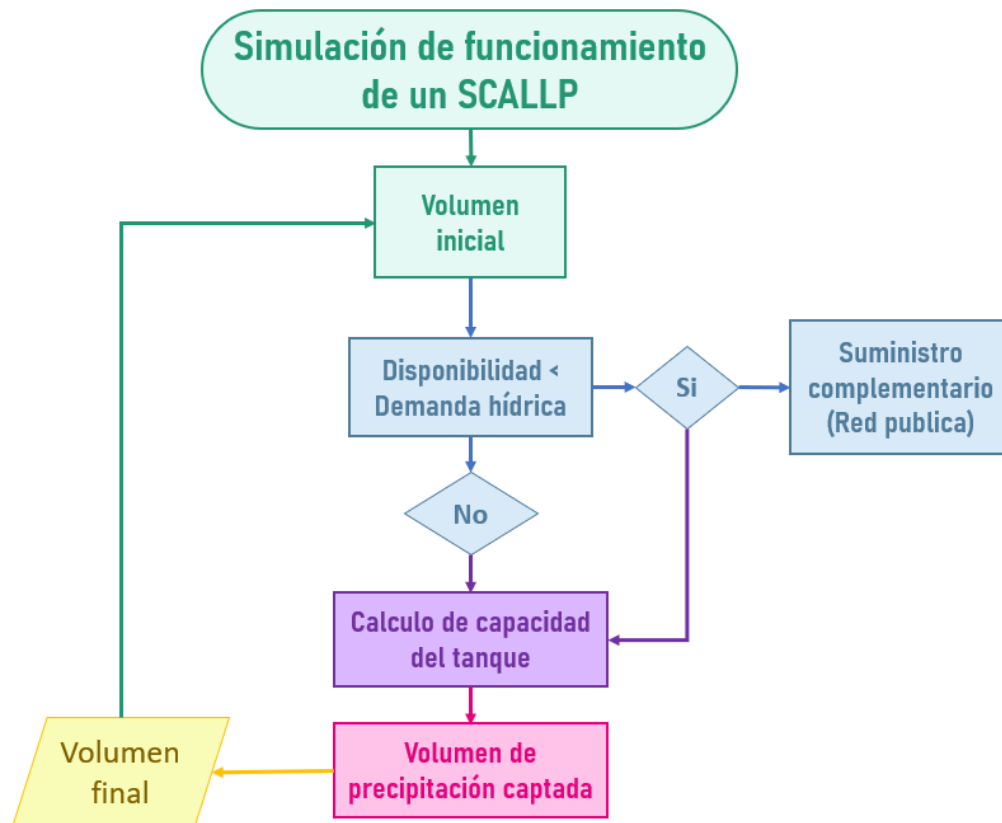


Figura 26. Diagrama de flujo de la simulación.

5.3 Aplicación del modelo matemático

La metodología se aplicó en las tres zonas de la CDMX, las cuales fueron previamente seleccionadas. Se realizó la simulación a 35 años de registros considerando 6 meses de temporada de lluvias para ambos sistemas de captación de lluvia en las zonas seleccionadas, con las siguientes consideraciones iniciales.

La Organización Mundial de la Salud (OMS,2009) dice que una persona requiere de 100 litros de agua al día para cubrir sus necesidades, lo que equivale a un aproximado de 6 a 8 cubetas grandes. A continuación, se detalla la jerarquía de prioridades para el uso del agua establecida por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

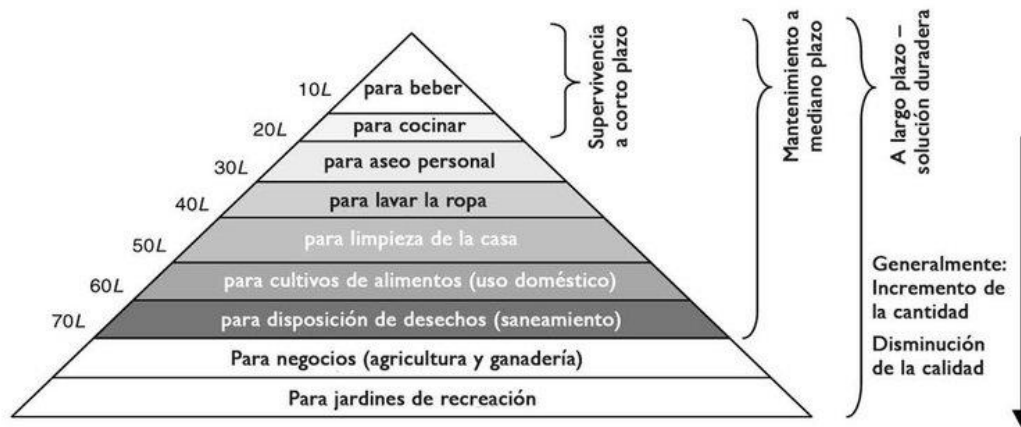


Figura 27. Jerarquía de las necesidades de agua. Fuente: OMS

De acuerdo con la fundación Aquae (2021) el uso del agua en el hogar varía según los hábitos, el tamaño de la familia y la eficiencia de los aparatos. A continuación, se presenta una lista de 30 estimaciones de consumo principales de agua según Aquae (2021) dividido los usos en zonas:

Los siguientes usos corresponden a las actividades y demandas dentro del cuarto de baño. En esta sección de la tabla se detallan los consumos asociados a la higiene personal y los servicios sanitarios principales.

Usos	Consumo (litros)	
	Mínimo	Máximo
Ducha (5-10 min)	35	70
Bañera	80	200
Inodoro (descarga eficiente/dual)	3	6
Inodoro (descarga tradicional)	8	10
Lavarse las manos	2	5
Lavarse los dientes (grifo abierto)	20	30
Lavarse los dientes (vaso)	0.25	0.5
Afeitado (grifo abierto)	40	70
Lavarse la cara	2	5
Limpieza del inodoro	5	10

Tabla 8. Rangos de consumo de agua según actividades en el cuarto de baño

Los siguientes usos representan los valores de consumo en cocina y lavandería. Este apartado de la tabla incluye las actividades domésticas de preparación de alimentos, limpieza de utensilios y el lavado de ropa.

Usos	Consumo (litros)	
	Mínimo	Máximo
Lavadora (Ciclo completo)	90	150
Lavavajillas	15	20
Lavar platos a mano	20	100
Lavar platos a mano (remojo)	15	20
Cocinar	6	8
Beber	1	2
Preparar café/te	1	2
Lavado de frutas/verduras	5	10
Lavar utensilios de cocina	5	10
Hielo	1	2

Tabla 9. Rangos de consumo de agua según actividades en el cuarto de cocina y lavandería

Los siguientes usos abarcan los requerimientos en exterior y varios. En esta sección se agrupan los consumos destinados al mantenimiento de áreas verdes, limpieza de patios y otras actividades complementarias o de usos múltiples.

Usos	Consumo (litros)	
	Mínimo	Máximo
Limpiar pisos	20	40
Limpiar ventanas	10	20
Regar plantas de interior	5	10
Lavar el coche (manguera)	300	500
Lavar el coche (cubeta)	20	30
Limpieza de patio con manguera	50	100
Riego pequeño jardín	50	100
Llenar una piscina pequeña	800	1000
Bañar a la mascota	20	50
Limpieza de garaje	20	50

Tabla 10. Rangos de consumo de agua según actividades extras.

La V_D se estimó para 4 habitantes en la edificación, en la cual se consideran 3 escenarios. El escenario A contempla un aprovechamiento del agua de lluvia básico priorizando los usos finales de acuerdo con la pirámide de prioridades establecida por la OMS. Bajo este criterio, se considera que el resto de los usos diarios será cubierto por la red de distribución pública, tomando en cuenta para este primer análisis los siguientes usos del agua:

Actividad	Consumo (L)	Número de veces al día	Observación	Consumo diario por persona (VD)	Consumo diario total (VD)
Descarga de WC	8	12	-	24	96
Lavadora de Ropa	90	0.71	Promedio 5 cargas a la semana	16	64
Limpieza de Pisos	20	0.43	Tres veces a la semana	2	9
Riego de plantas de interior	5	0.43	Tres veces a la semana	1	2
Auto	50	0.14	1 vez a la semana	2	7
TOTAL DIARIO (VD)				45	178

Tabla 11. Cálculo del volumen de demanda doméstica del escenario A

Se presenta a continuación un gráfico que presenta el consumo destinado de agua de lluvia de la demanda considerado para las actividades del del escenario A.



Figura 28. Actividades de consumo de la demanda del escenario A. Elaboración propia

El Escenario B plantea un nivel de consumo intermedio. Alineado con la jerarquía de prioridades de la OMS, este modelo está diseñado para aprovechar la captación pluvial en operaciones y actividades estándar; asumiendo que los requerimientos hídricos restantes continuarán siendo abastecidos por la red municipal. En consecuencia, este escenario abarca las siguientes aplicaciones:

Actividad	Consumo (L)	Número de veces al día	Observación	Consumo diario por persona (VD)	Consumo diario total (VD)
Descarga de WC	8	12	-	24	96
Lavadora de Ropa	90	0.71	Promedio 5 cargas a la semana	16	64
Limpieza de Pisos	20	0.43	Tres veces a la semana	2	9
Riego de plantas de interior	5	0.43	Tres veces a la semana	1	2
Auto	50	0.14	1 vez a la semana	2	7
Jardin pequeño	100	0.43	Tres veces a la semana	11	43
Limpieza de ventanas	10	0.14	1 vez a la semana	0	1
Limpieza de inodoro	10	0.43	Tres veces a la semana	1	4
Limpiar el patio	50	0.14	1 vez a la semana	2	7
TOTAL DIARIO (VD)				58	234

Tabla 12. Cálculo del volumen de demanda doméstica del escenario B

El siguiente gráfico que ilustra las actividades del escenario B consideradas en el consumo por actividad del agua de lluvia.



Figura 29. Actividades de consumo de la demanda del escenario B. Elaboración propia

Por último, el escenario C plantea un aprovechamiento contempla un uso completo Si bien es la opción de mayor alcance al cubrir todos los niveles de prioridad de la OMS, exige procesos de tratamiento especializados para asegurar la potabilidad del agua, lo que inherentemente implica una mayor inversión para el proyecto.

Actividad	Consumo (L)	Número de veces al día	Observación	Consumo diario por persona (VD)	Consumo diario total (VD)
Descarga de WC	8	12	-	24	96
Lavadora de Ropa	90	0.71	Promedio 5 cargas a la semana	16	64
Limpieza de Pisos	20	0.43	Tres veces a la semana	2	9
Riego de plantas de interior	5	0.43	Tres veces a la semana	1	2
Auto	50	0.14	1 vez a la semana	2	7
Jardin pequeño	100	0.43	Tres veces a la semana	11	43
Limpieza de ventanas	10	0.14	1 vez a la semana	0	1
Limpieza de inodoro	10	0.43	Tres veces a la semana	1	4
Limpiar el patio	50	0.14	1 vez a la semana	2	7

Actividad	Consumo (L)	Número de veces al día	Observación	Consumo diario por persona (VD)	Consumo diario total (VD)
Ducha	50	4	-	50	200
Lavarse las manos	2	15	-	8	30
Lavarse la cara	2	4	-	2	8
Beber agua	2	4	-	2	8
Cocinar	6	1	-	2	6
Lavar platos	100	1	-	25	100
Lavar frutas y verduras	5	1	-	1	5
TOTAL DIARIO (VD)				148	591

Tabla 13. Cálculo del volumen de demanda doméstica del escenario C

En la figura 35 se presenta un gráfico con las actividades consideradas en el consumo de agua de lluvia del escenario C.



Figura 30. Actividades de consumo de la demanda del escenario B. Elaboración propia

De acuerdo con el INEGI (2020) 26.8% de las viviendas tiene una superficie de construcción en el rango de 46 a 75 m^2 y el 21.9% de las viviendas tiene la extensión de construcción osciló entre 76 y 100 como se observa en la figura 30. De acuerdo con lo datos anteriores el área de captación se consideró de 75 m^2 .

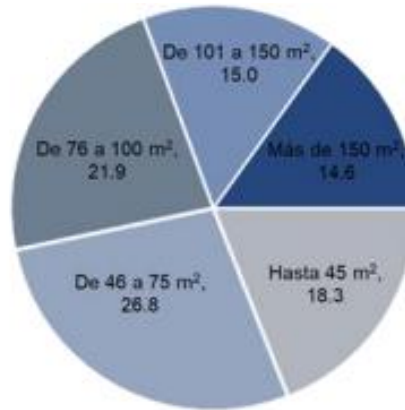


Figura 31. Porcentaje de viviendas particulares habitadas, según superficie construida.

Se considero un techo impermeabilizado con un coeficiente de escurrimiento de 0.9 según la CONAGUA (s.f) como se muestra en la tabla.

Material o tipo de construcción	Kc
Cubiertas metálicas o plásticas (PVC, Polietileno)	0.95
Techos impermeabilizados o cubiertos con materiales duros (p. ej. Tejas)	0.9
Concreto hidráulico	0.9
Lámina metálica corrugada	0.8

Tabla 14. Coeficientes de escurrimiento. Fuente: CONAGUA

Se muestra una imagen que ejemplifica el techo impermeabilizado el cual que se consideró para las simulaciones y para la obtención del coeficiente de escurrimiento.



Figura 32. Ejemplo de techo impermeabilizado

Según información de Rotoplas se tiene los volúmenes de tanques de almacenamiento comerciales mostrados en la tabla 11. Se seleccionó una capacidad para el escenario A de 1,100 L, para el escenario B un almacenamiento de 2,000 L y finalmente para el escenario C un tinaco de 2,500 L

Capacidad del tinaco	Uso Diario Recomendado durante un Corte	Actividad extra posible (con precaución)
450 L	Esencial Cubre las necesidades básicas de 1-2 personas por poco tiempo.	Ninguna. Enfoque en ahorro máximo.
800 L	Cómoda Permite una rutina casi normal para 2-3 personas por un par de días.	Limpieza general de superficies.
1,100 L	Normal Sostiene la rutina diaria de una familia de 4 sin estrés por casi 2 días.	Riego manual de plantas.
2,000 L	Superior Garantiza la normalidad de 5 - 7 personas por varios días y reduce la preocupación al mínimo.	1 carga de ropa esencial en la lavadora.
2,500 L	Total Normalidad absoluta de 7 - 9 personas por un periodo extendido, con flexibilidad para extras.	2 a 3 cargas de ropa o una limpieza más a fondo.

Tabla 15 . Volúmenes de tinacos. Fuente: ROTOPLAS

Se muestra una figura ilustrativa del tanque de almacenamiento a utilizar para cada escenario.



Figura 33. Tanques de almacenamiento para cada escenario.

Con las variables de entradas definidas en corrió las simulaciones de 35 años en Python para los 3 escenarios en las 3 zonas seleccionadas, obteniendo el comportamiento de las simulaciones realizadas. Debido a la extensión de la serie histórica y con el objetivo de facilitar la interpretación de los datos, se seleccionó un periodo representativo y la simulación con mejor porcentaje de aprovechamiento. Para ilustrar el funcionamiento del modelo en una escala temporal detallada, se seleccionó el año para una de las 3 zonas en el que ocurre la mediana del de precipitación. Siendo 2019 para DM nacional, 1989 para Santa Ana Tlacotenco y 2015 para San Miguel Ajusco.

En la siguiente tabla se encuentran los resultados correspondientes a la simulación de San Miguel Ajusco para el escenario B.

Año	Mes	Día	Precipitación (mm)	Demanda (l)	Volumen potencial (l)	Volumen primeras lluvias (l)	Volumen captado	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Volumen del tanque (l)
2015	7	1	13.208	235	892	40	852	0	617	2000
2015	7	2	6.35	235	429	40	389	0	154	2000
2015	7	3	1.778	235	120	40	80	0	0	1845
2015	7	4	4.826	235	326	40	286	0	0	1896
2015	7	5	16.51	235	1114	40	1074	0	735	2000
2015	7	6	0.762	235	51	40	11	0	0	1776
2015	7	7	0.762	235	51	40	11	0	0	1553
2015	7	8	16.256	235	1097	40	1057	0	375	2000
2015	7	9	18.034	235	1217	40	1177	0	942	2000
2015	7	10	0	235	0	0	0	0	0	1765
2015	7	11	0	235	0	0	0	0	0	1530
2015	7	12	0	235	0	0	0	0	0	1295
2015	7	13	0	235	0	0	0	0	0	1060
2015	7	14	1.27	235	86	40	46	0	0	871
2015	7	15	2.54	235	171	40	131	0	0	767
2015	7	16	14.478	235	977	40	937	0	0	1469
2015	7	17	2.54	235	171	40	131	0	0	1366
2015	7	18	43.434	235	2932	40	2892	0	2023	2000
2015	7	19	2.032	235	137	40	97	0	0	1862
2015	7	20	0	235	0	0	0	0	0	1627
2015	7	21	8.128	235	549	40	509	0	0	1901
2015	7	22	3.81	235	257	40	217	0	0	1883
2015	7	23	13.97	235	943	40	903	0	551	2000
2015	7	24	12.192	235	823	40	783	0	548	2000
2015	7	25	0	235	0	0	0	0	0	1765
2015	7	26	0	235	0	0	0	0	0	1530
2015	7	27	11.684	235	789	40	749	0	44	2000
2015	7	28	26.924	235	1817	40	1777	0	1542	2000
2015	7	29	9.652	235	652	40	612	0	377	2000
2015	7	30	11.176	235	754	40	714	0	479	2000

Tabla 16. Simulación de San Miguel Ajusco de julio de 2015 para el escenario B.

Al observar la siguiente tabla, encontraremos el registro de la simulación anual acumulada para el escenario B, enfocado en la zona de San Miguel Ajusco.

Año	Precipitación (mm)	Volumen potencial (l)	Volumen aprovechado (l)	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Días de suficiencia	Días con derrame
1988	829.818	56012.72	27853.15	15386.85	24492.39	109	31
1989	1103.376	74477.88	32696.41	10543.59	37548.57	130	44
1990	1211.072	81747.36	39725.24	3514.762	37325.18	164	54
1991	886.206	59818.91	35463.04	7776.965	19872.14	140	33
1992	1147.318	77443.97	36180.9	7059.098	35594.56	144	51
1993	991.616	66934.08	30674.85	12565.15	32186.21	124	39
1994	1118.87	75523.73	36784.32	6455.684	33266.55	149	37
1995	1198.118	80872.97	34508.32	8731.68	40797.56	140	44
1996	764.286	51589.31	31428.68	11811.32	16179.16	130	27
1997	861.314	58138.7	34041.79	9198.206	20006.87	133	29
1998	1054.1	71151.75	29851.6	13388.41	36940.21	115	48
1999	1091.692	73689.21	35460.52	7779.479	33904.37	146	42
2000	992.378	66985.52	36134.8	7105.201	26932.11	147	41
2001	997.966	67362.71	36219.4	7020.603	26396.1	142	32
2002	869.188	58670.19	35496.21	7743.788	17918.98	140	24
2004	958.85	64722.38	39411.18	3828.822	20586.88	165	31
2005	854.456	57675.78	30522.1	12717.9	23389.36	123	32
2006	1162.05	78438.38	39574.2	3665.803	33997	161	54
2007	976.884	65939.67	35334.78	7905.224	26292.01	142	34
2008	964.692	65116.71	33815.16	9424.836	27245.79	135	34
2009	751.84	50749.2	27798.8	15441.2	18755.69	110	23
2010	684.022	46171.49	24459.78	18780.22	18587.54	94	24
2011	635	42862.5	28332.65	14907.35	11616.96	105	14
2012	1086.104	73312.02	35170.66	8069.34	33925.62	145	47
2013	873.252	58944.51	35886.61	7353.393	18189.9	149	37
2014	1197.864	80855.82	40390.47	2849.534	35672.45	169	44
2015	967.232	65288.16	35867.14	7372.859	24866.91	149	42
2016	969.518	65442.47	36510.48	6729.52	24081.93	148	44
2017	1064.768	71871.84	35995.72	7244.283	30054.7	147	41
2018	853.948	57641.49	34790.49	8449.505	16752.93	131	29
2019	977.138	65956.82	36454.04	6785.956	23560.57	150	36
2020	805.18	54349.65	29284.48	13955.52	21963.7	119	27
2021	805.18	54349.65	29284.48	13955.52	21963.7	119	27
2022	855.726	57761.51	34591.91	8648.086	19176.68	143	28
2023	204.978	13836.02	10054.52	33185.48	0	11	0

Tabla 17. Simulación de San Miguel Ajusco para el escenario B.

Por motivos de extensión, el conjunto completo de tablas con las proyecciones para las demás zonas y escenarios analizados se ha integrado en el apartado de Anexos.

Para facilitar la interpretación de los resultados, se generará historial de ramas a partir del escenario considerado como el más representativo del comportamiento.

El siguiente histograma ilustra el volumen aprovechado del agua de lluvia en el escenario B, comparando directamente los escenarios DM Nacional, Santa Ana Tlacotenco y San Miguel Ajusco.

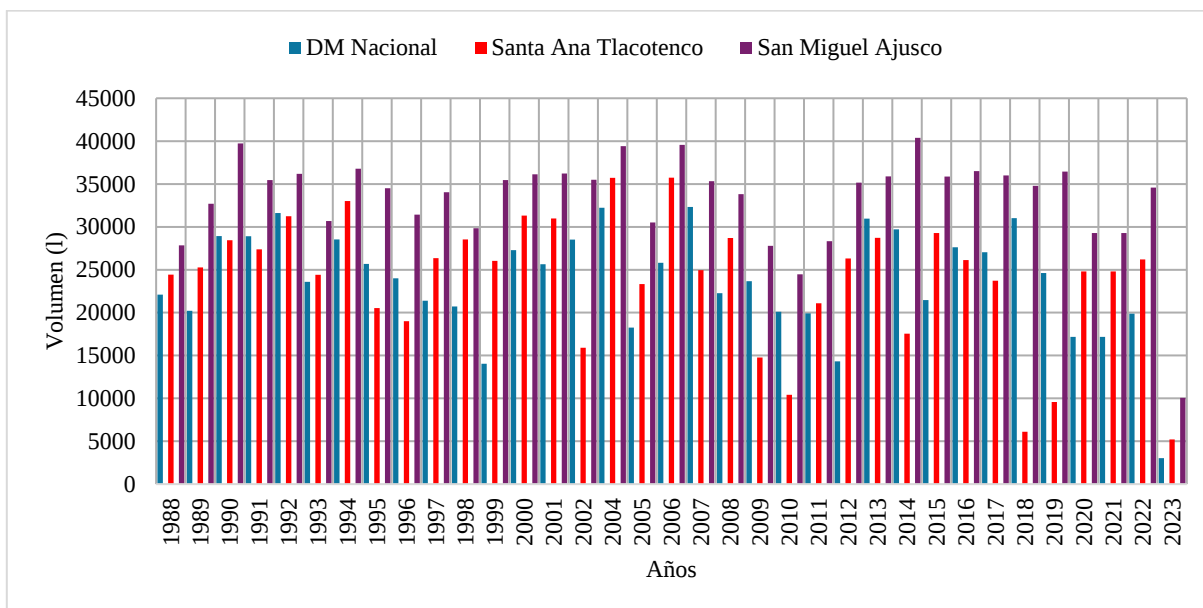


Figura 34. Volumen anual captado para el escenario B.

Para analizar el volumen de excedentes o de derrame de lluvia en el escenario B, el siguiente histograma consolida los datos de las tres zonas estudiadas.

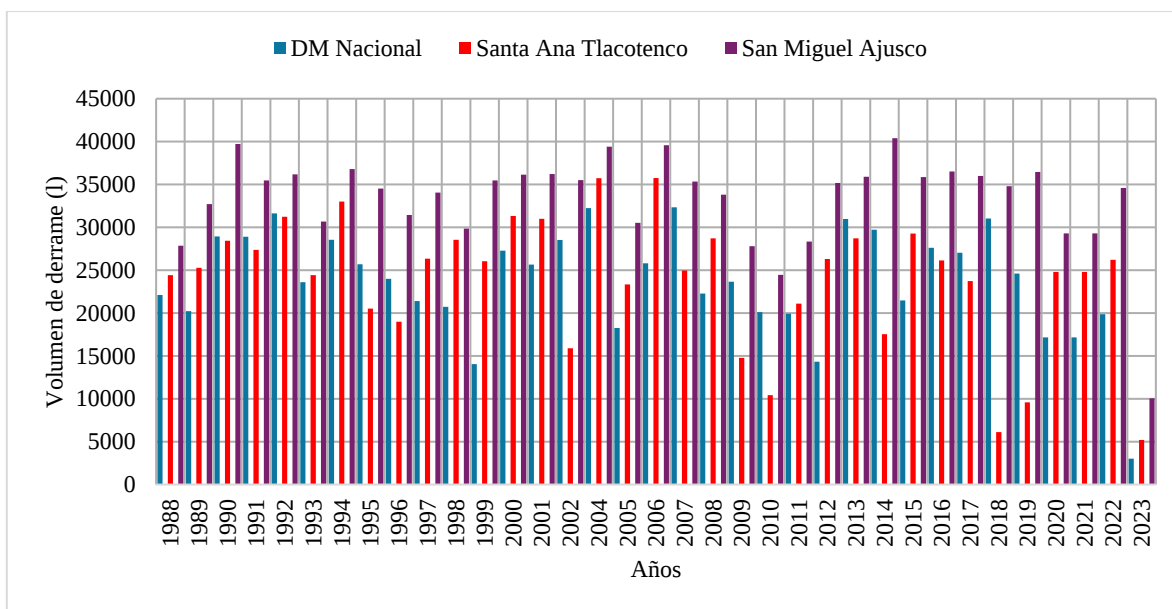


Figura 35. Volumen de derrame para el escenario B.

La cantidad de días con demanda cubierta para el escenario B se expone en la siguiente gráfica, la cual agrupa de manera comparativa las zonas.

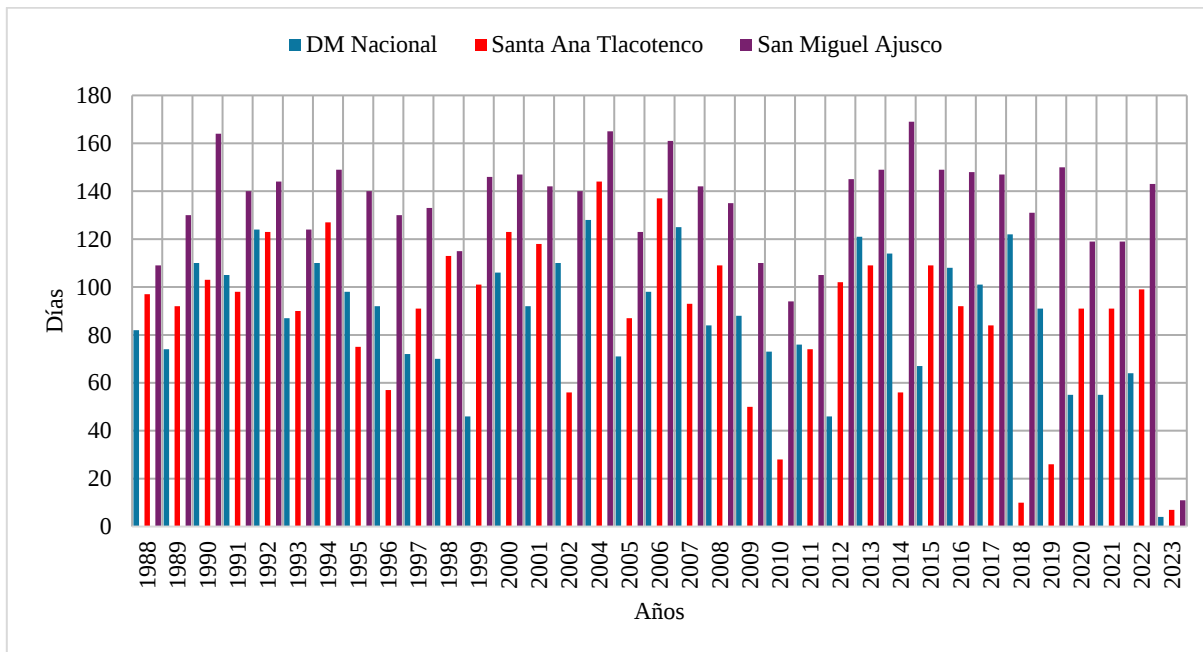


Figura 36. Días de demanda cubierta para el escenario B.

El registro de los días en los que ocurrió un derrame en el escenario B se ilustra mediante este gráfico, evaluando de forma paralela a DM Nacional, Santa Ana Tlacotenco y San Miguel Ajusco.

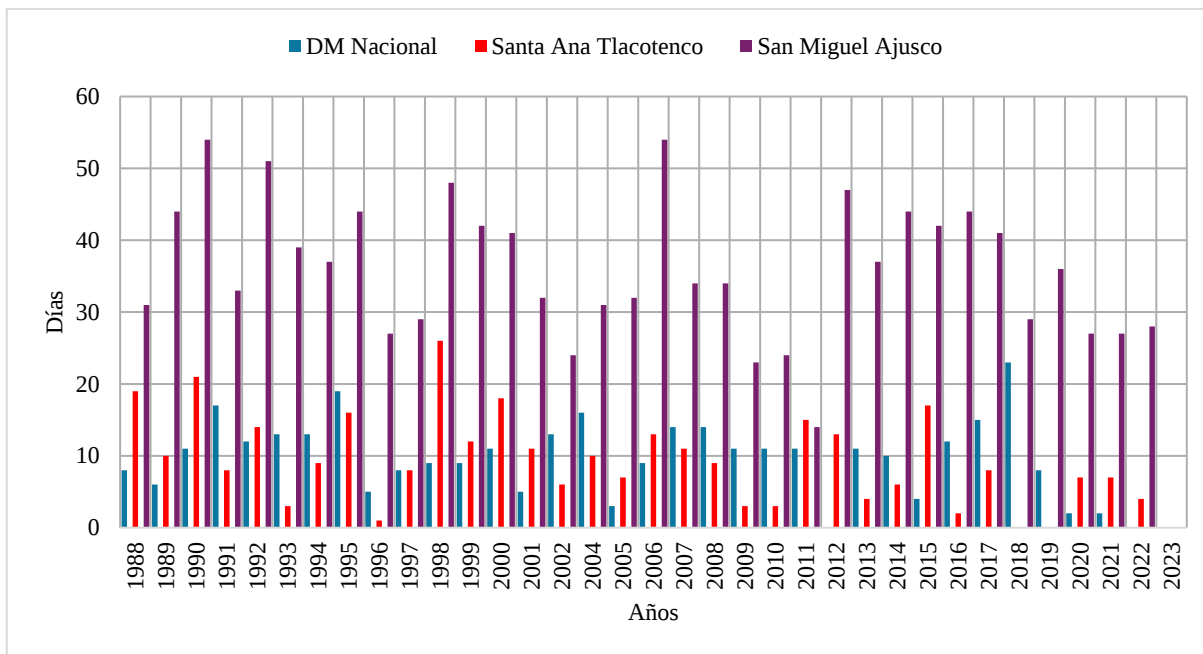


Figura 37. Días de derrame para escenario B.

Cabe señalar que los histogramas correspondientes a los escenarios restantes se han integrado en el apartado de Anexos para su consulta detallada.

5.1.3. Análisis de resultados

El comportamiento que presentaron los sistemas de captación tras la simulación de 35 años durante la temporada de lluvia demuestra que cada zona tiene un potencial diferente de captación de agua de lluvia, debido a cada mostro un desempeño distinto de acuerdo con su ubicación y régimen pluvial.

Es importante destacar que la viabilidad de este análisis en las tres zonas evaluadas recae directamente en la calidad de los datos de entrada. La elección de estos sitios, fundamentada primordialmente en la disponibilidad de registros pluviométricos electrónicos continuos y confiables más que en criterios convencionales resultó clave para observar el comportamiento dinámico del sistema. Al analizar los datos de estos 35 años, se observa que los patrones de lluvia son muy irregulares; lo que llueve en un año puede ser completamente distinto a lo que llueve al año siguiente. En años considerados atípicos o secos, la resolución horaria de los datos permitió cuantificar cómo los eventos aislados de lluvia intensa, aunque menos frecuentes, logran recargar el sistema lo suficiente para mantener la suficiencia operativa de la vivienda. Estos cambios en el volumen almacenado habrían pasado totalmente desapercibidos si se hubieran utilizado promedios mensuales.

Estos resultados muestran al analizarlos revela diferencias significativas en la capacidad de captación dependiendo de la zona de estudio. De manera general, se observa que San Miguel Ajusco presenta el mayor potencial de aprovechamiento, superando los volúmenes obtenidos en DM Nacional y Santa Ana Tlacotenco. Este comportamiento se refleja directamente en la suficiencia de los sistemas, logrando cubrir una mayor cantidad de días de demanda mediante agua de lluvia y reduciendo el uso de la red pública. En la siguiente tabla se presenta los máximos, el promedio y los mínimos obtenidos para cada uno de los escenarios simulados.

Escenario	Zona	Indicador	Volumen potencial (l)	Volumen aprovechado (l)	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Días de suficiencia	Días con derrame	Suficiencia (%)
A	DM nacional	Máximo	51092	25076	21209	26490	130	33	71
		Promedio	34138	19156	13596	11769	95	19	52
		Mínimo	16665	11543	7676	807	55	2	30
	Santa Ana Tlacotenco	Máximo	49549	28157	26635	23318	144	37	78
		Promedio	33108	19499	13253	10249	97	20	53
		Mínimo	7818	6117	4595	0	20	0	11
	San Miguel Ajusco	Máximo	81747	30902	14478	50382	171	70	93
		Promedio	64643	25876	6876	34383	138	48	75
		Mínimo	42863	18274	1850	19078	94	23	51
B	DM nacional	Máximo	51092	32326	29200	20017	128	23	70
		Promedio	34138	24316	18924	6557	90	10	49
		Mínimo	16665	14040	10914	0	46	0	25
	Santa Ana Tlacotenco	Máximo	49549	35743	37123	17094	144	26	78
		Promedio	33108	24434	18806	5296	90	9	49
		Mínimo	7818	6117	7497	0	10	0	5
	San Miguel Ajusco	Máximo	81747	40390	18780	40798	169	54	92
		Promedio	64643	34000	9240	26178	137	36	74
		Mínimo	42863	24460	2850	11617	94	14	51

Escenario	Zona	Indicador	Volumen potencial (l)	Volumen aprovechado (l)	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Días de suficiencia	Días con derrame	Suficiencia (%)
C	DM nacional	Máximo	51092	41117	94426	9271	48	7	26
		Promedio	34138	29586	79158	1443	29	2	16
		Mínimo	16665	14318	67627	0	6	0	3
	Santa Ana Tlacotenco	Máximo	49549	42858	102627	5718	48	6	26
		Promedio	33108	28760	79984	1051	25	2	13
		Mínimo	7818	6117	65886	0	1	0	1
	San Miguel Ajusco	Máximo	81747	68905	73038	15594	86	19	47
		Promedio	64643	53611	55133	6712	65	8	36
		Mínimo	42863	35706	39839	905	39	2	21

Tabla 18. Resumen de resultados de las simulaciones

Al observar el volumen anual captado a lo largo de los 35 años simulados, se hace evidente la alta resiliencia del sistema. Si bien las gráficas identifican años con precipitaciones notablemente por debajo del promedio, el volumen aprovechable no decae a niveles que vuelvan inviable la infraestructura. Por el contrario, la constancia en los volúmenes mínimos garantizados año con año demuestra que la captación pluvial es una fuente de apoyo confiable a largo plazo, capaz de amortiguar de manera efectiva los impactos de las sequías prolongadas que actualmente afectan a las principales fuentes de suministro de la ciudad.

Asimismo, es importante visualizar el volumen que se derrama del agua de lluvia en los sistemas para cada escenario. Al evaluar el comportamiento del volumen de derrame a lo largo de la simulación, se observa una relación directa con la intensidad de los eventos de tormenta y no necesariamente con la lámina total acumulada en la temporada. Los picos máximos de lluvia saturan rápidamente la capacidad del tanque, generando excedentes en lapsos muy cortos. Esto comprueba que el volumen de agua aprovechada depende directamente de la relación entre el gasto diario de la vivienda y la rapidez con la que se llena el tanque. El sistema opera de manera óptima cuando se asume un porcentaje de derrame inevitable, priorizando la rotación del volumen almacenado mediante los consumos diarios de los escenarios evaluados.

El análisis de los días de demanda cubierta revela el verdadero impacto de este tipo de proyectos. Las gráficas demuestran que, más allá de la cantidad total de litros captados al año, el sistema logra proporcionar una autonomía real a la vivienda durante varios días. Gracias a la recarga constante del tanque en la temporada de lluvias, los usuarios pueden prescindir de la red pública en las épocas donde el tandeo es más severo.

En el siguiente apartado se examina el porcentaje de aprovechamiento del volumen pluvial, un parámetro clave para determinar el potencial real de captación frente al total de lluvia precipitada. El análisis de esta variable proporciona una visión integral sobre la capacidad de cada sistema para aprovechar el recurso pluvial disponible antes de generar excedentes. Al comparar el comportamiento de los escenarios A, B y C en cada una de las zonas evaluadas, se identificó el escenario C que ofrece la mayor optimización del volumen llovido.

Dentro del análisis de resultados, el presente histograma ilustra el porcentaje volumen pluvial que logró ser aprovechada en el escenario A, contrastando de manera directa las zonas de estudio.

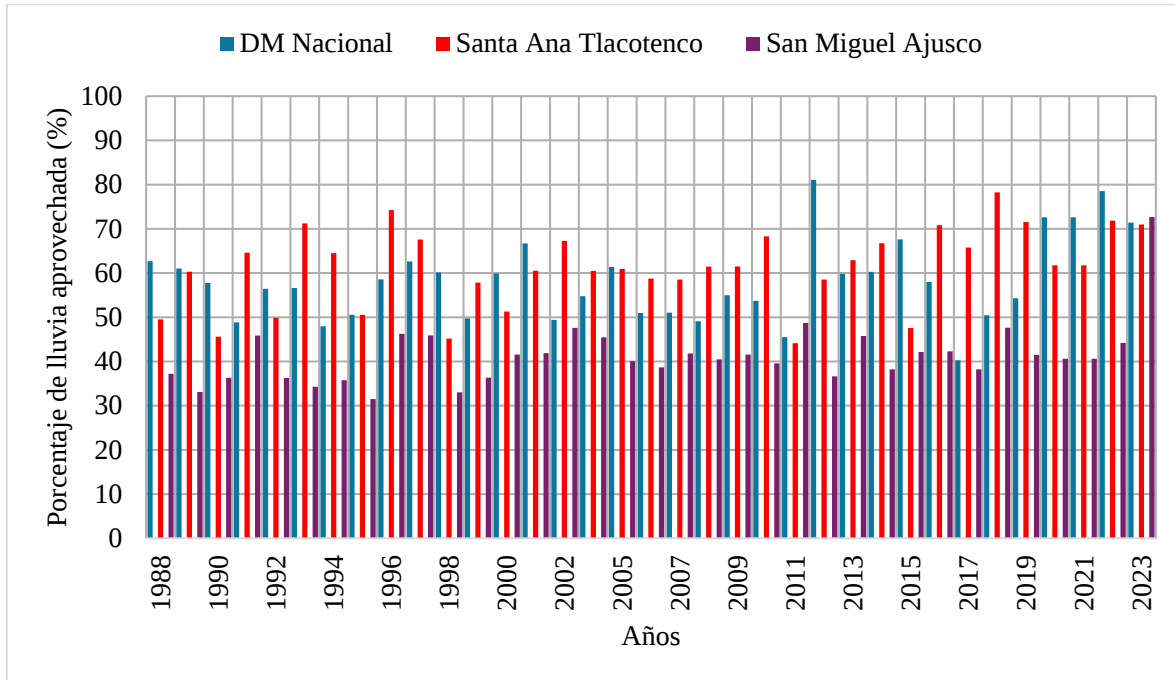


Figura 38. Porcentaje del volumen aprovechado de lluvia para el escenario A.

A continuación, se grafica el porcentaje del volumen de precipitación efectivamente aprovechado para el escenario B, integrando el desempeño de las tres localidades.

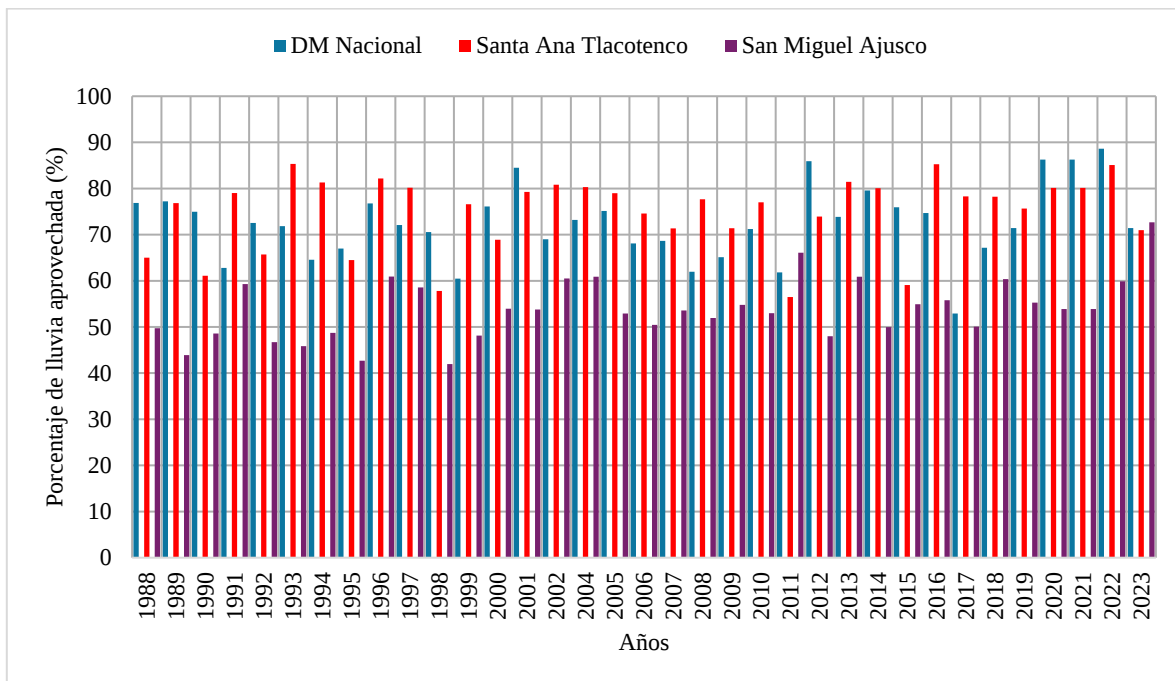


Figura 39. Porcentaje del volumen aprovechado de lluvia para el escenario B.

En este gráfico se examina la tasa de captación o porcentaje aprovechado respecto al volumen total llovido para el escenario C, mostrando de forma conjunta el comportamiento de DM Nacional, Santa Ana Tlacotenco y San Miguel Ajusco.

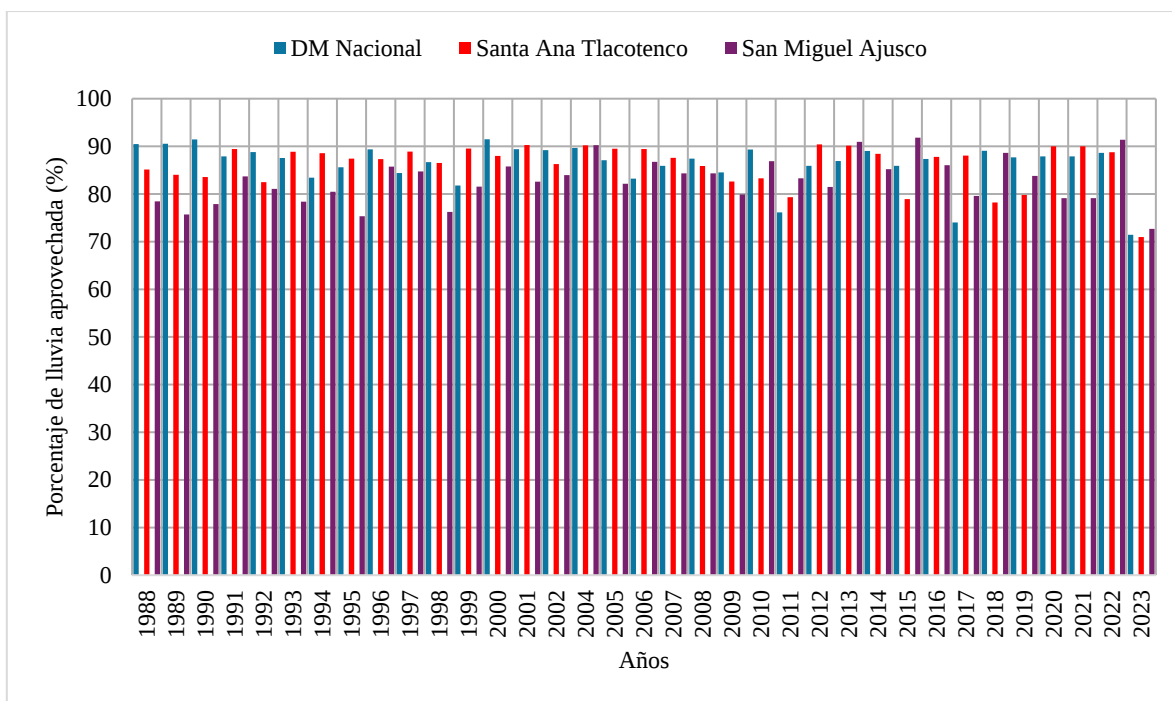


Figura 40. Porcentaje del volumen aprovechado de lluvia para el escenario C.

Sin embargo, también se analizó el porcentaje de suficiencia respecto a los días que logro cubrir la demanda cada sistema. De tal modo que los 184 días de la temporada de lluvia es el 100% de suficiencia. Al analizar las gráficas de porcentaje de suficiencia bajo los tres escenarios de consumo, se evidencia la capacidad real del sistema para sustituir el suministro de la red pública. Estos resultados demuestran que la viabilidad de la captación pluvial no debe evaluarse únicamente por los volúmenes totales acumulados al año o por el porcentaje aprovechado del total del volumen de precipitación, sino por el porcentaje exacto de la demanda de la vivienda que se logra satisfacer de manera efectiva. Al simular el comportamiento del sistema durante los 35 años de registros históricos, se observa que, durante la temporada de lluvias, los niveles de suficiencia mantienen una notable estabilidad, incluso frente a la irregularidad natural de las tormentas. Además, con este análisis se puede observar que, aunque en el escenario C logra un mayor porcentaje de aprovechamiento del volumen de agua de lluvia, también es el escenario que cumple con menor porcentaje de suficiencia frente a la demanda doméstica. Por el contrario, el escenario A logra un mayor porcentaje de suficiencia a pesar tener el menor aprovechamiento del volumen de lluvia.

El siguiente histograma detalla el porcentaje de suficiencia que se logró en el escenario A, lo que permite evaluar y comparar el impacto de las zonas de interés.

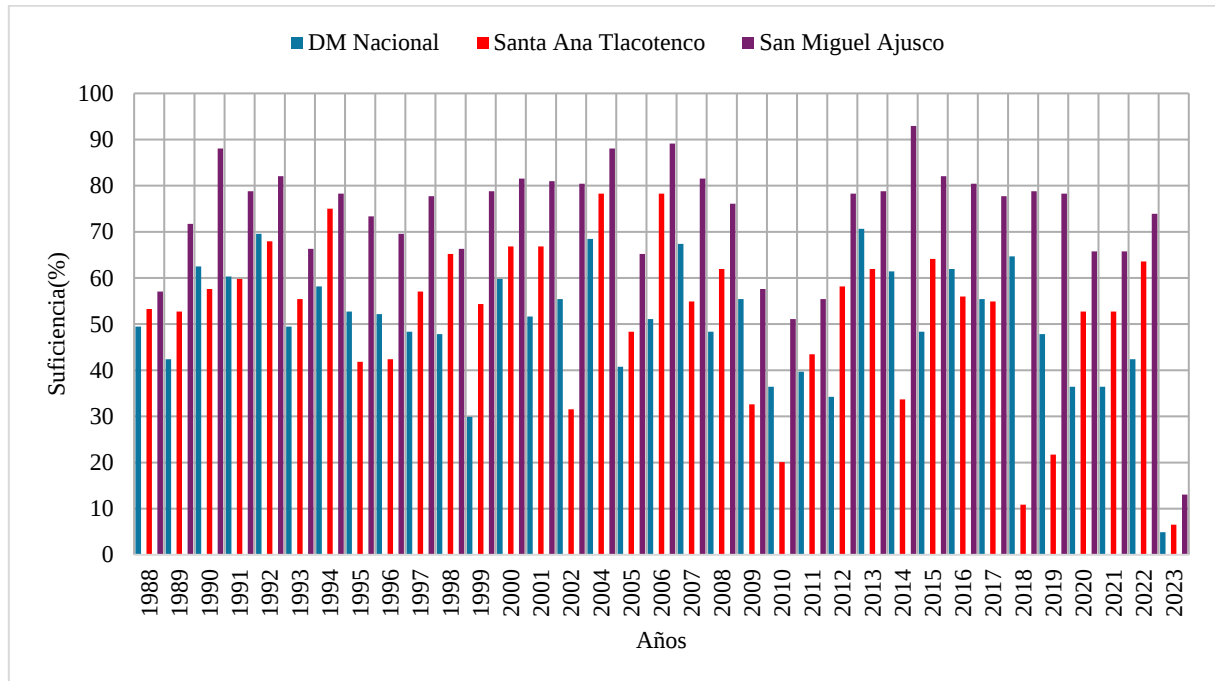


Figura 41. Porcentaje de suficiencia para escenario A.

Para medir la capacidad de abastecimiento del escenario B esta figura representa el porcentaje de suficiencia obtenido, agrupando comparativamente DM Nacional, Santa Ana Tlacotenco y San Miguel Ajusco.

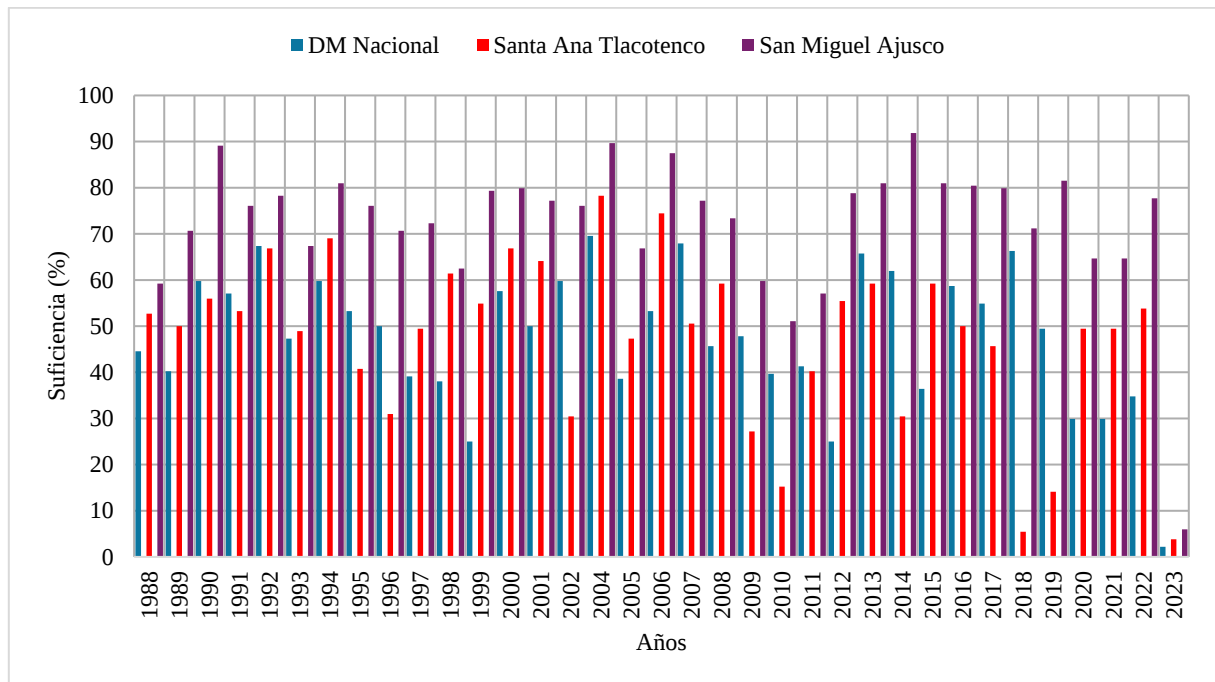


Figura 42. Porcentaje de suficiencia para escenario B.

Finalmente, el presente gráfico de barras exhibe el porcentaje de suficiencia consolidado en el escenario C, englobando los resultados arrojados por las simulaciones en DM Nacional, Santa Ana Tlacotenco y San Miguel Ajusco.

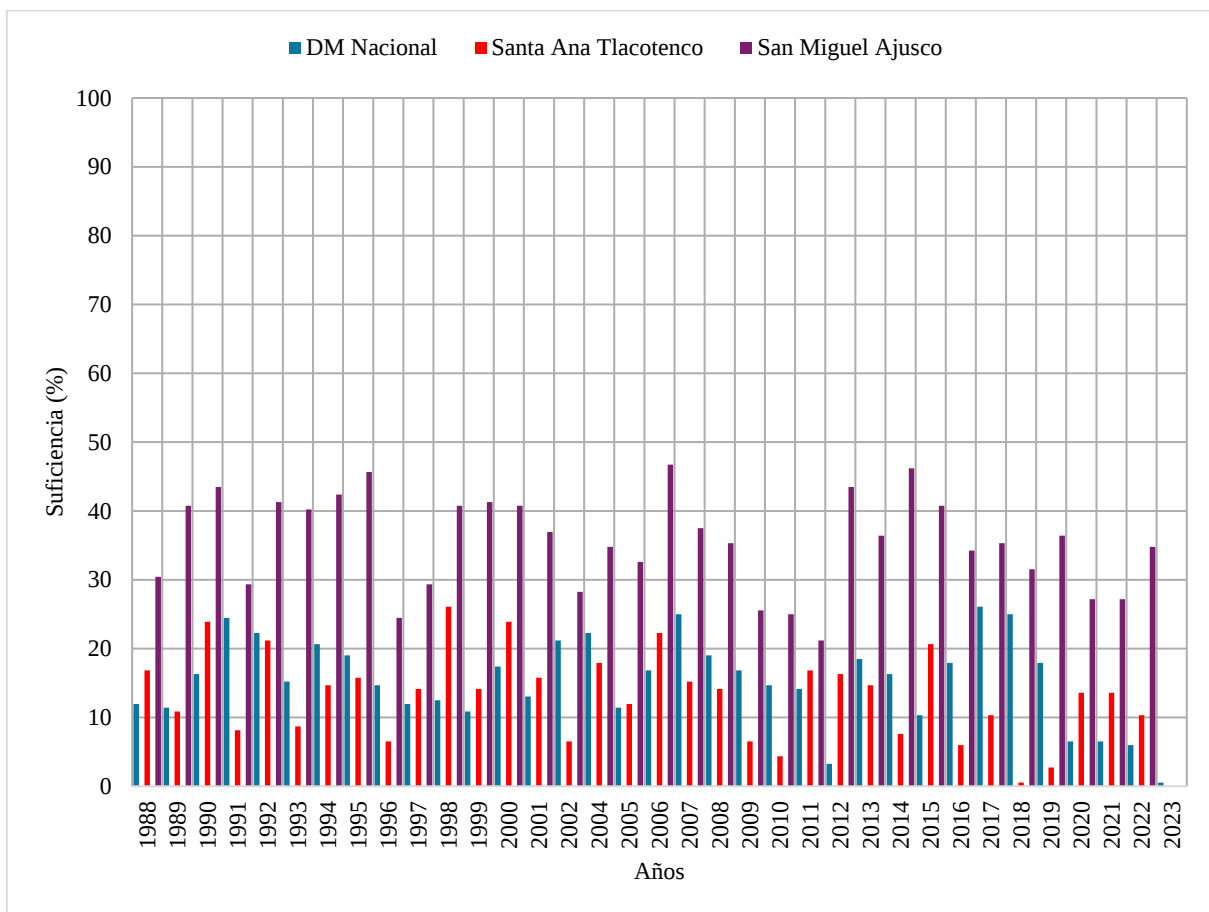


Figura 43. Porcentaje de suficiencia para escenario C.

Aunque los histogramas facilitan la interpretación de los datos, el uso de esquemas ilustrativos permite una comprensión más intuitiva del comportamiento operativo de los sistemas. Para comprender la dinámica operativa del sistema, la representación esquemática del llenado del tanque ilustra el balance entre las tormentas y el consumo. En estas figuras se observa claramente cómo el volumen almacenado rara vez permanece estático. El tanque se vacía con la demanda constante de la casa y se recarga de forma con la siguiente precipitación. Este comportamiento transitorio diario justifica técnicamente por que construir cisternas de dimensiones más grandes no es siempre la solución para lograr excelentes niveles de suficiencia. En las siguientes figuras se presenta una simulación visual del volumen de almacenamiento diario (en litros) en el tanque tomando como referencia agosto de 1988. Con el fin de optimizar el análisis, la descripción detallada de los resultados se focalizará en la zona de San Miguel Ajusco, siendo esta la más representativa.

La imagen que se presenta enseguida esquematiza el nivel de llenado diario del tanque en San Miguel Ajusco durante el mes de agosto de 1988, de acuerdo con el escenario A.

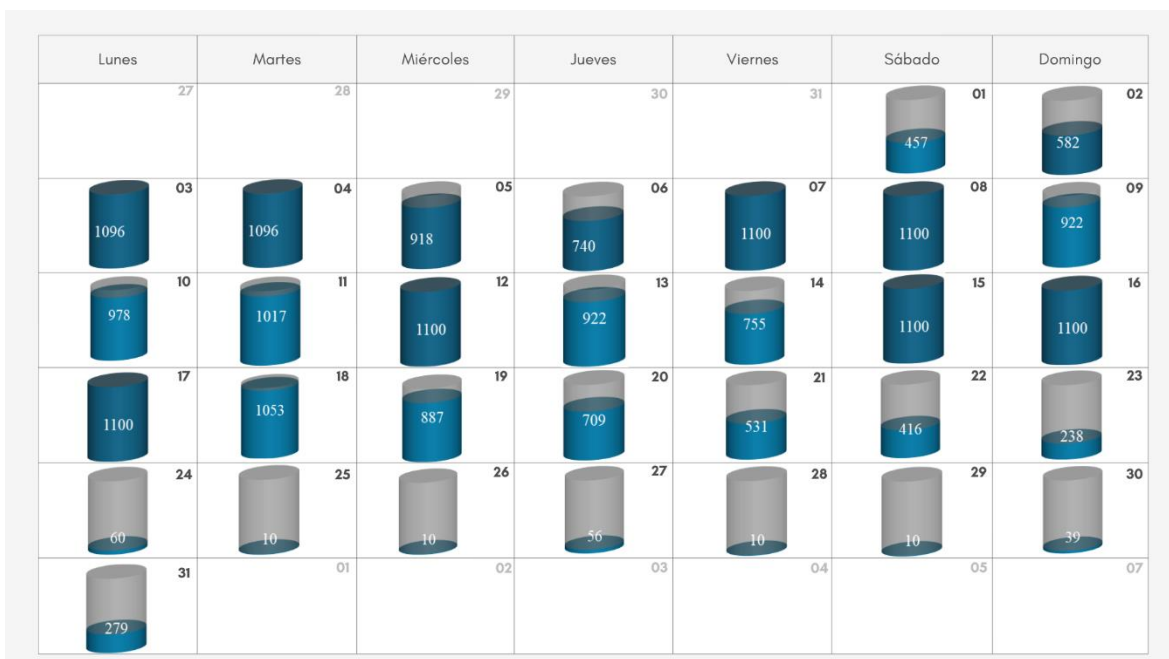


Figura 44. Representación esquemática del llenado del tanque mediante en agosto de 1988 para San Miguel Ajusco en el escenario A.

Al observar la siguiente ilustración, se aprecia la variación visual del volumen diario alcanzado en el tanque a lo largo de agosto de 1988, evaluando el escenario B enfocado en San Miguel Ajusco.

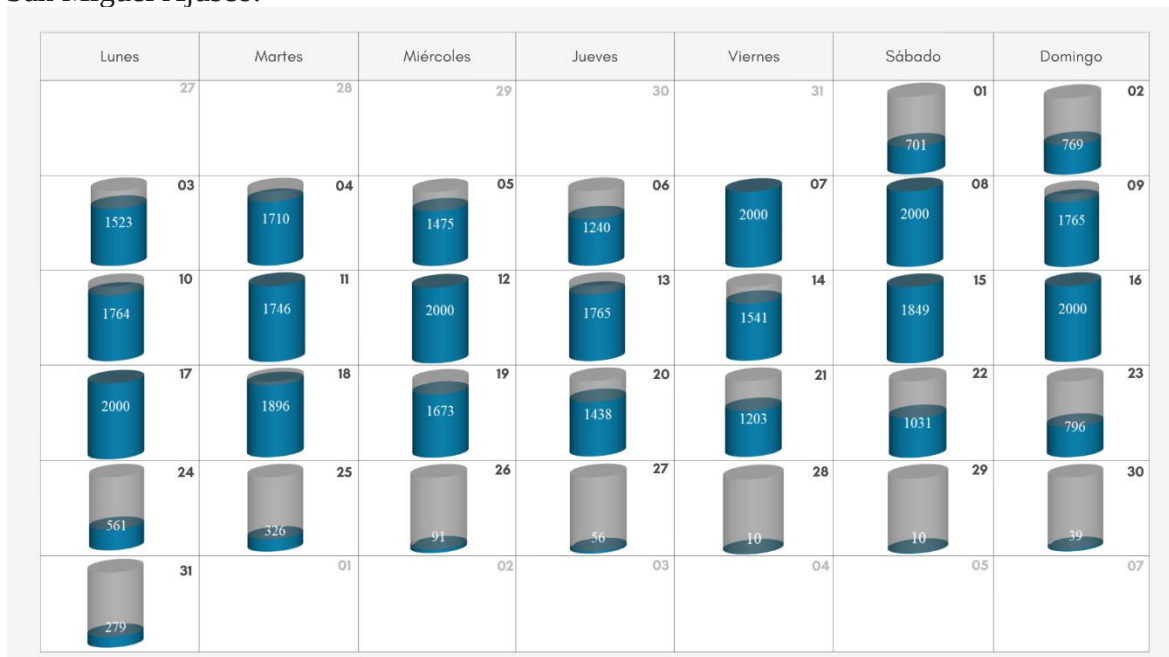


Figura 45. Representación esquemática del llenado del tanque mediante en agosto de 1988 para San Miguel Ajusco en el escenario B.

Finalmente, esta figura recrea el volumen diario del volumen de lluvia aprovechado dentro del tanque de almacenamiento durante agosto de 1988, reflejando los resultados del escenario C para San Miguel Ajusco.



Figura 46. Representación esquemática del llenado del tanque mediante en agosto de 1988 para San Miguel Ajusco en el escenario C.

Es importante mencionar que los perfiles de almacenamiento y las simulaciones visuales correspondientes a las demás zonas de estudio y escenarios alternativos no incluidos en este apartado se encuentran recopilados de forma sistemática en el anexo.

Si bien los volúmenes captados presentan cifras considerables, su magnitud por sí sola no refleja el beneficio real para el usuario. La siguiente tabla permite dimensionar el impacto social y operativo de estos sistemas al traducir los litros obtenidos en unidades de consumo cotidiano. Se presenta una comparativa que traslada el volumen aprovechado de agua de lluvia a indicadores tangibles, facilitando la comprensión del ahorro y la eficiencia del sistema en cada zona y por cada escenario.

Escenario	Zona	Indicador	Volumen aprovechado (l)	Garrafrones (20 L)	Descargas de WC (8 L)	Equivalente en Pipas (10k L)
A	DM nacional	Máximo	25076	1254	1672	3
		Promedio	19156	958	1277	2
		Mínimo	11543	577	770	1
	Santa Ana Tlacotenco	Máximo	28157	1408	1877	3
		Promedio	19499	975	1300	2
		Mínimo	6117	306	408	1
	San Miguel Ajusco	Máximo	30902	1545	2060	3
		Promedio	25876	1294	1725	3
		Mínimo	18274	914	1218	2
B	DM nacional	Máximo	32326	1616	2155	3



DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL

Escenario	Zona	Indicador	Volumen aprovechado (l)	Garrafrones (20 L)	Descargas de WC (8 L)	Equivalente en Pipas (10k L)
		Promedio	24316	1216	1621	2
		Mínimo	14040	702	936	1
	Santa Ana Tlacotenco	Máximo	35743	1787	2383	4
		Promedio	24434	1222	1629	2
		Mínimo	6117	306	408	1
	San Miguel Ajusco	Máximo	40390	2020	2693	4
		Promedio	34000	1700	2267	3
		Mínimo	24460	1223	1631	2
C	DM nacional	Máximo	41117	2056	2741	4
		Promedio	29586	1479	1972	3
		Mínimo	14318	716	955	1
	Santa Ana Tlacotenco	Máximo	42858	2143	2857	4
		Promedio	28760	1438	1917	3
		Mínimo	6117	306	408	1
	San Miguel Ajusco	Máximo	68905	3445	4594	7
		Promedio	53611	2681	3574	5
		Mínimo	35706	1785	2380	4

Tabla 19. Comparativa del potencial de aprovechamiento



6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Tradicionalmente, el análisis de los sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) se ha abordado utilizando promedios mensuales o anuales, un enfoque cualitativo que ignora la verdadera naturaleza de la precipitación. Evaluar con promedios mensuales asume que la lluvia se distribuye uniformemente a lo largo de los 30 días, omitiendo así los días de tormenta intensa o los periodos de sequía que ocurren dentro de un mismo mes. Esto conduce a una posible subestimación del volumen de derrame y a una sobreestimación de la suficiencia real del sistema.

Este estudio propone un enfoque cuantitativo basado en registros históricos de pluviógrafos electrónicos. Al procesar datos hora por hora a lo largo de un periodo de 35 años durante las temporadas de lluvia, la simulación logra capturar la intensidad real de las tormentas. Este cambio permite transitar de un análisis basado en supuestos a uno fundamentado en el comportamiento histórico de la precipitación, demostrando que la evaluación del potencial de un SCALL y de su capacidad de almacenamiento debe ser un proceso sustentado en simulaciones técnicas precisas, y no solo en una estimación de promedios.

Una de las mayores ventajas de esta metodología es su capacidad de adaptación al sitio de estudio. Al permitir la manipulación de las variables de entrada, el modelo facilita la optimización de los costos y la evaluación de distintos escenarios. Un tanque excesivamente grande representa una inversión innecesaria, mientras que un tanque pequeño desaprovecha el potencial del recurso.

Mediante la simulación se observa claramente que un tanque de mayores dimensiones no siempre garantiza más agua; el volumen captado está estrictamente limitado por el área de la captación (azotea) y el régimen de lluvias de la zona, por lo que suponer capacidades de almacenamiento más grandes llega a ser ineficiente. Al cuantificar el volumen real aprovechable, se puede realizar un análisis de sensibilidad para entender qué capacidad maximiza la suficiencia del sistema evitando proponer volúmenes excesivos.

Además, aunque esta tesis simuló el funcionamiento de los sistemas enfocándose en viviendas, la flexibilidad del modelo abre la puerta a proyectos de otra escala. Precisamente por la ventaja de poder modificar las variables de entrada, esta misma metodología se puede aplicar a grandes dimensiones, evaluando la viabilidad de los SCALL para otros usos como es el riego de cultivos en el sector agrícola o para instalaciones industriales con demandas de agua diferentes a las domésticas.

Para abarcar de manera realista los distintos patrones de consumo de los usuarios, la evaluación se dividió en tres escenarios de demanda: un consumo básico (Escenario A), un consumo intermedio (Escenario B) y un uso completo (Escenario C). Tras la simulación exhaustiva en las tres zonas estratégicas de la Ciudad de México, los resultados revelan una clara irregularidad que valida la necesidad de un análisis localizado.

San Miguel Ajusco presentó el mayor potencial de aprovechamiento pluvial de las zonas evaluadas, con un volumen potencial aprovechado máximo anual de 64,643 litros (90 % de volumen potencial de lluvia). En un escenario de consumo básico, el sistema demostró una suficiencia sobresaliente del 75% en promedio durante la temporada de lluvias, llegando en años excepcionales hasta un 93%.

En contraste, las zonas de DM Nacional y Santa Ana Tlacotenco presentaron comportamientos muy similares entre sí, con volúmenes potenciales aprovechados máximos de 34,138 L y 33,108 L (90 % de volumen potencial de lluvia), respectivamente. Bajo un escenario de consumo básico, el sistema demostró una suficiencia promedio del 52% para DM Nacional y del 53% para Santa Ana Tlacotenco. Esto indica que el sistema funciona como una excelente medida de mitigación ante la escasez, reduciendo drásticamente la dependencia de la red de distribución urbana en periodos de tandeo. Si bien los días con derrame sugieren que existe un excedente de agua, el mismo análisis demuestra que intentar captar la totalidad de esos picos requeriría infraestructura sobredimensionada, reafirmando la importancia de evaluar con base en la eficiencia.

Para comprender la trascendencia de estos resultados, es fundamental traducir los datos técnicos a indicadores de impacto social. En el caso de San Miguel Ajusco, el volumen aprovechado promedio en un escenario de consumo completo equivale a más de 5 pipas de agua de 10,000 litros y pudiendo llegar hasta 7 pipas en años más lluviosos. Por su parte, en DM Nacional y Santa Ana Tlacotenco, el volumen aprovechado equivale a casi 3 pipas anuales por vivienda. Desde una perspectiva de planeación urbana, esto significa que por cada vivienda que implemente este sistema, se evita el tránsito, las emisiones y el costo económico asociados al suministro constante de camiones cisterna por año.

Por otro lado, analizando los esquemas dinámicos de almacenamiento diario en el tanque de almacenamiento permite visualizar el desempeño del sistema de captación. A través de un diagrama tipo semáforo aplicado al volumen del tanque se identifica el nivel de eficiencia en el suministro diario del año 1988 el color verde denota la cobertura total de la demanda, el amarillo indica un abastecimiento parcial y el rojo señala un déficit total, donde el almacenamiento o el volumen de lluvia fue insuficiente para aportar en el consumo.



Figura 47. Semáforo de cumplimiento de demanda para San Miguel Ajusco en el escenario C.

Esta simulación es la demostración de que la ocurrencia de un evento de precipitación la cual no garantiza, por sí sola, la satisfacción total de la demanda. Como se observa en el gráfico, existen múltiples días con registro de lluvia que culminan en un estado de cobertura parcial o déficit. Esta condición se explica mediante la variabilidad temporal y la distribución horaria de la precipitación.

De este diagrama se puede concluir que este comportamiento operativo subraya una premisa crítica para el diseño de estos sistemas: para una estimación precisa del potencial de aprovechamiento, no basta con cuantificar la lámina de precipitación diaria acumulada. Es imperativo el uso de registros pluviométricos de alta resolución para modelar con exactitud el llenado y vaciado del tanque, demostrando que la eficiencia de un SCALL depende no solo del volumen total precipitado, sino de la sincronía entre el horario de la lluvia y los patrones de demanda.

Por todo lo anterior, recomiendo que esta metodología se aplique a futuro en otras regiones del país, priorizando zonas con registros pluviométricos electrónicos continuos, para transitar de un análisis con promedios a un análisis de simulación que sirvan en la toma de decisiones en los sistemas de captaciones. A la par, como siguiente etapa de la investigación, resulta fundamental integrar un módulo de evaluación económica; puesto que el modelo podría permitir determinar en su la capacidad óptima del tanque, acoplar un análisis de costos frente al ahorro por no depender en su totalidad de la red pública permitiría calcular el tiempo exacto de recuperación de la inversión para cada escenario de consumo. Finalmente, este trabajo puede escalarse para evaluar el impacto de los sistemas como medida de mitigación del drenaje urbano; al vincular la simulación horaria de los volúmenes de derrame con modelos de escurrimiento superficial, se podría cuantificar el agua que se evita enviar a la red de alcantarillado durante las tormentas intensas, contribuyendo directamente a disminuir la saturación de la infraestructura en las zonas de estudio.



CONCLUSIONES



En resumen, con esta metodología no solo se supone de forma teórica que los sistemas de captación de lluvia son una alternativa de suministro complementario, sino que se demuestra cuantitativamente su comportamiento y su adaptabilidad a distintos escenarios de consumo. Ante un contexto donde la seguridad hídrica es cada vez más vulnerable, simular el funcionamiento y conocer el potencial real del volumen aprovechable se convierte en una herramienta técnica indispensable para la toma de decisiones.



BIBLIOGRAFIA

Agriculture Institute. (2025). *Diferentes tipos de lluvia y sus características*. Recuperado de <https://agriculture.institute/hydrology/types-of-rainfall-characteristics/>

Aparicio Mijares, F. J. (1989). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa.

Ballén, A., Galarza, J., & Ortiz, R. (2006). *Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia*. sswm.info.

https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/BALLEN%20et%20al.%202006.%20Historia%20de%20los%20sist%20de%20aprovechamiento%20agua%20lluvia.pdf

Campos Aranda, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. Editorial Universitaria.

COHIMA. (s. f.). *La hidrología y su importancia*. COHIMA Consultoría. <https://cohima.com.mx/la-hidrologia-y-su-importancia/>

Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (s. f.). *Lineamientos técnicos: Sistemas de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/152776/LINEAMIENTOS_CAPTACION_PLUVIAL.pdf

Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2015). *Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales - Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Recuperado de <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf>

Cortés-Alcaraz, S., Ramírez-Rivera, P., Chung-Alonso, P. y Arceo-Díaz, S. (2021). *Captación de lluvia como alternativa para el ahorro de agua potable*. Ciencia UANL. Recuperado de: <https://cienciauanl.uanl.mx/?p=11005>

Frost Restori, A. (2011, mayo). *Antecedentes de la captación del agua de lluvia*. Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia (CIDECALLI - CP). https://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/eventos/aguadelluvia11/1_albertofrost.pdf

Fundación Ellen MacArthur. (2022). *Cómo la economía circular hace frente a la pérdida de biodiversidad*. Recuperado de <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/c174fffc3aa3556/original/El-imperativo-de-la-naturaleza-The-Nature-Imperative.pdf>

García, A. (2017, 1 de agosto). *Pluviómetro & pluviómetro*. Y8 Meteorología y Excel. <https://y8meteorologiayexcel.wordpress.com/2017/08/01/pluviometro-pluvimetro/>

Gobierno de México & Centro Nacional de Prevención de Desastres [CENAPRED]. (2018). *Fenómenos Hidrometeorológicos*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/336997/5_Curso_FenPertb_Hidros.pdf

Gobierno del Estado de Veracruz & Protección Civil. (2026). *Programa Especial de Temporada de Estiaje y Sequía Meteorológica 2026*. Recuperado de <https://www.veracruz.gob.mx/proteccioncivil/wp-content/uploads/sites/5/2026/02/PROGRAMA-SEQUIA-2026-.pdf>



BIBLIOGRAFÍA



Herrera Monroy, L. A. (2010). *Diseño de un sistema de captación de agua de lluvia para una casa habitación en el Distrito Federal* [Tesis de Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio Digital IPN. <https://repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/5813/1/LUIS%20ALBERTO%20HERRERA%20MONROY.pdf>

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (s.f.). *Sistema de captacion de agua de lluvia SCALL*. Bomberos Agroforestales de las Américas. Recuperado de <https://bomberos.agroforestales.iica.int/tecnologias-1/sistema-de-captacion-de-agua-de-lluvia-scalle>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2022). *Estadísticas a propósito del Día Nacional de la Vivienda*. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2022/EAP_DiaNalViv.pdf

López Miranda, J., & Cervantes Rendón, E. (2017). *Captación de agua de lluvia para consumo humano*. Ingeniería. Redalyc. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750927001.pdf>

Martínez Martínez, S. I. (2017). *Introducción a la hidrología superficial*. Editorial de la Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Fuentes M.O. A., Domínguez M. R., Fuentes M. G.E., (octubre 2011) Capítulo A.1.8. *Tránsito de avenidas y simulación del funcionamiento de vasos de almacenamiento*, Manual de obras civiles de la Comisión Federal de Electricidad

Fuentes M.O.A., Hernández C, S., Copca M.O., Ponce B.R., González G. D., Martínez S.I.D.(2025) *Evaluación Hidráulica Integral en la Chinampa Nantli: Monitoreo de campo, Modelación y Análisis del Funcionamiento del Biorreactor, GII, Intensificación de los procesos para la obtención de biocompuestos a partir de agua residual, 7. reúso y distribución de agua residual tratada, c) distribución de agua tratada (sistemas centralizados y descentralizados), a posibles centros de consumo, d) identificación de sitios de recarga soportado en el tipo de reúso, de acuerdo al cumplimiento de la normatividad vigente*. Noviembre, Informe interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, México., 26pp.

Organismo Operador Municipal de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de Bahía de Banderas [OROMAPAS]. (s. f.). *Ciclo hidrológico*. Recuperado de: <https://www.oromapas.gob.mx/cultura-del-agua/ciclo-hidrologico/>

Rotoplas. (s. f.). *Tinaco Plus equipado 1,100 litros color beige*. Recuperado de: <https://rotoplas.com.mx/product/Tinaco-Plus-equipado-1-100-litros-color-beige/>

Padilla Muñoz, R. (2022, 22 de marzo). Una persona necesita 100 litros de agua al día: OMS. Gaceta UDG. Recuperado de: <https://www.gaceta.udg.mx/una-persona-necesita-100-litros-de-agua-al-dia-oms/>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA]. (2025). *Indicador 10: Nivel de estrés hídrico, extracción de aguas como proporción de los recursos hídricos disponibles*. Recuperado de: <https://sdgs.unep.org/sites/default/files/2025-09/9.%20Water%20Indicators-S.pdf>

Secretaría del Medio Ambiente [SEDEMA]. (s. f.). *Cosecha de Lluvia*. Gobierno de la Ciudad de México. Recuperado de: <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/cosecha-de-lluvia>



BIBLIOGRAFÍA



Secretaría del Medio Ambiente [SEDEMA]. (s. f.). *Manual de cosecha de lluvia*. Gobierno de la Ciudad de México. Recuperado de: <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/CosechaDeLluvia/ManualSCALLescuela.pdf>

Sierra Valenzuela, J. A. (2020). *Diseño de un sistema de captación de agua de lluvia para el edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Santo Tomás* [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás]. Repository USTA. Recuperado de: <https://repository.usta.edu.co/server/api/core/bitstreams/fe78329c-3a91-4970-aeb4-aa361c223d6b/content>

Sistema Nacional de Información del Agua [SINA - CONAGUA]. (2016). *Glosario*. Recuperado de <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/glosario.html>

Sociedad Mexicana de Especialistas en Agricultura Protegida [SMEAP México] & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2023). *La Evapotranspiración y el Manejo del Riego*. Recuperado de <https://smeapmexico.org/la-evapotranspiracion-y-el-manejo-del-riego/>

Soluciones Hidropluviales. (2025, 28 de noviembre). *Industria Automotriz: gran potencial de aprovechar la lluvia*. Recuperado de: <https://hidropluviales.com/2025/11/28/industria-automotriz-gran-potencial-de-aprovechar-la-lluvia/>

TecnoAqua. (2018, 29 de octubre). *Fundación Aquae: infografía sobre el consumo de agua en los hogares españoles*. Recuperado de: <https://www.tecnoaqua.es/noticias/20181029/fundacion-aquae-infografia-consumo-agua-hogares>

Universidad de Chile & Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2020). *Las aguas grises: una nueva fuente de agua*. Repositorio UCHILE. Recuperado de https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/183863/Aguas_grises.pdf

Universidad Autónoma del Estado de Morelos [UAEM]. (2021, 23 de agosto). *Inauguran en UAEM el sistema Cosecha de Lluvia*. Recuperado de: <https://www.uaem.mx/difusion-y-medios/publicaciones/boletines/inauguran-en-uaem-el-sistema-cosecha-de-lluvia>

University of California Museum of Paleontology. (s. f.). *Precipitation*. Understanding Global Change. Recuperado de: <https://ugc.berkeley.edu/background-content/precipitation/>

GLOSARIO

Aguas grises: De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006, citado en Universidad de Chile, 2020), las aguas grises se definen como aquellas aguas residuales domésticas no tratadas que no han entrado en contacto con las aguas negras y que generalmente contienen concentraciones no significativas de materia fecal, procedentes principalmente de descargas de duchas, lavamanos y lavadoras.

Escorrentía superficial: De acuerdo con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, citado en fuentes hidrológicas convencionales) y la literatura técnica (Scribd, 2023), la escorrentía superficial se define como el flujo de agua proveniente de la precipitación que circula sobre la superficie terrestre sin infiltrarse, convirtiéndose en el componente principal del ciclo del agua que drena y erosiona el terreno antes de alcanzar un cauce principal.

Estiaje: De acuerdo con el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA-CONAGUA, 2016) y normativas de Protección Civil (2026), el estiaje se define como el nivel o caudal mínimo que alcanzan los cuerpos de agua superficiales o subterráneos (tales como ríos, lagunas o acuíferos) en la época de mayor calor y menor precipitación, originado por una escasez prolongada de lluvias y el incremento del potencial de evapotranspiración.

Estrés hídrico: De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2025), el estrés hídrico se define como el volumen de recursos hídricos que se extraen para abastecer las demandas de un país o región en proporción a los recursos de agua dulce renovable disponibles, indicando que existe este nivel de estrés cuando la demanda sectorial ejerce una presión que compromete la sustentabilidad ambiental del recurso.

Evapotranspiración: De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2006, citado en SMEAP México, 2023), la evapotranspiración se define como la combinación de dos procesos físicos simultáneos: la pérdida de agua del suelo y las superficies por evaporación directa, y la pérdida de agua desde las plantas hacia la atmósfera a través del proceso fisiológico de transpiración.

Lluvia convectiva: De acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2018) y los modelos de fenómenos hidrometeorológicos, la lluvia convectiva se define como una precipitación localizada, de alta intensidad, pero de corta duración, que es impulsada por el rápido calentamiento de las masas de aire en la superficie terrestre, provocando su ascenso súbito, expansión e inestabilidad termodinámica.

Lluvia orográfica: De acuerdo con el Instituto de Agricultura e Hidrología (Agriculture Institute, 2025), la lluvia orográfica se define como un fenómeno de precipitación geográficamente fijo y persistente, que ocurre cuando una masa de aire húmedo es forzada mecánicamente a elevarse al encontrarse con una barrera topográfica (como una montaña o relieve accidentado), provocando su enfriamiento, condensación y posterior descarga en la vertiente de barlovento.

ANEXOS

Año	Mes	ESTACION	DIA	NO_PTOS	HR1	ALT1	HR2	ALT2
1988	5	04	01	3	1650	0	1700	2
1988	5	04	04	12	1735	0	1745	10
1988	5	04	12	3	1610	0	1630	5
1988	5	04	13	5	1555	0	1605	10
1988	5	04	14	6	1635	0	1645	2
1988	5	04	27	4	1915	0	1920	2
1988	5	04	28	5	2125	0	2130	2
1988	6	04	03	6	2135	0	2140	2
1988	6	04	04	2	2150	0	2200	2
1988	6	04	07	9	1750	0	1800	11
1988	6	04	14	2	1815	0	1930	2
1988	6	04	15	2	1705	0	1710	3
1988	6	04	17	16	1420	0	1425	1
1988	6	04	18	7	2105	0	2110	1
1988	6	04	22	15	1255	0	1420	8
1988	6	04	23	4	1610	0	1615	4
1988	6	04	24	7	250	0	320	2
1988	6	04	25	16	600	0	605	5
1988	6	04	26	2	1705	0	1730	15
1988	6	04	27	8	2135	0	2140	3
1988	6	04	28	7	120	0	230	3
1988	6	04	29	11	600	0	610	4
1988	6	04	30	5	605	0	625	8
1988	7	04	02	2	1915	0	2005	52
1988	7	04	03	2	1850	0	1855	1
1988	7	04	05	8	1530	0	1550	4
1988	7	04	06	2	1600	0	1635	7
1988	7	04	08	8	1630	0	1650	62
1988	7	04	10	11	1630	0	1700	35
1988	7	04	11	3	1615	0	1640	27
1988	7	04	13	4	1835	0	1840	1
1988	7	04	14	4	1755	0	1800	1
1988	7	04	15	4	1935	0	1950	2
1988	7	04	16	7	1915	0	1925	2
1988	7	04	19	6	1610	0	1615	3
1988	7	04	20	8	850	0	910	6
1988	7	04	21	5	1815	0	1845	3
1988	7	04	22	2	950	0	955	1
1988	7	04	24	5	1625	0	1630	10
1988	7	04	26	2	2145	0	2150	1
1988	7	04	27	3	2215	0	2255	37
1988	7	04	30	5	1505	0	1515	3
1988	8	04	01	2	1745	0	1820	2
1988	8	04	02	4	1615	0	1630	12
1988	8	04	03	8	1640	0	1650	13
1988	8	04	04	5	1635	0	1700	21
1988	8	04	07	5	1120	0	1145	36
1988	8	04	08	3	1615	0	1620	2
1988	8	04	10	5	1915	0	1930	6
1988	8	04	15	7	2150	0	2200	7
1988	8	04	16	5	1340	0	1405	31
1988	8	04	16	5	1645	0	1650	5

ANEXO A. Estructura de la base de datos hidrometeorológicos de la estación 4. (Datos Crudos)



ANEXOS

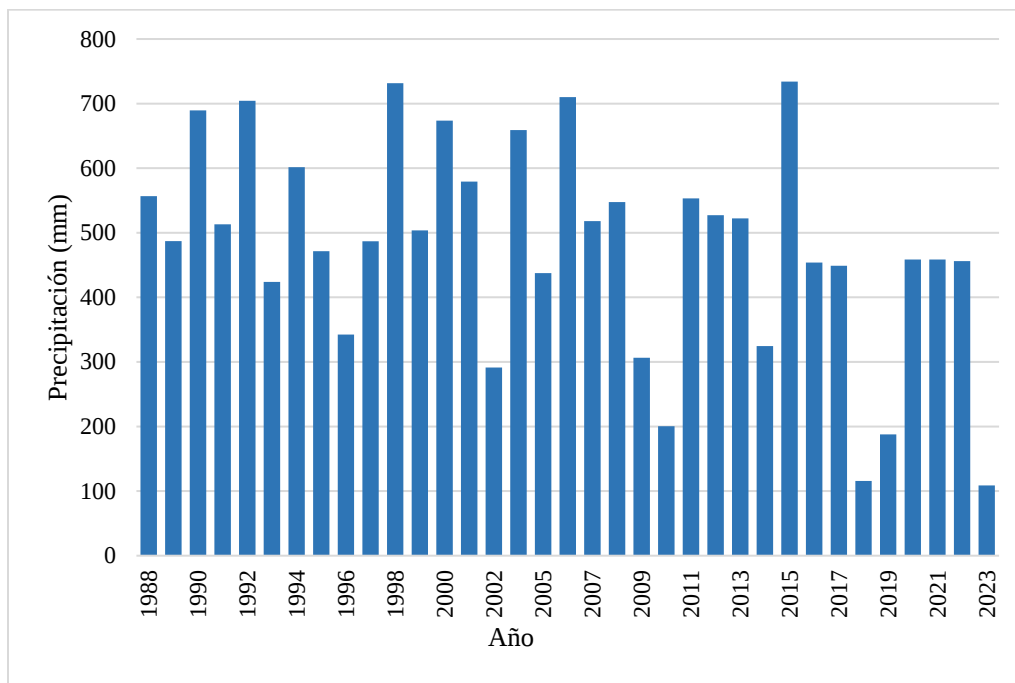
Año	Mes	ESTACION	DIA	NO_PTOS	HR1	ALT1	HR2	ALT2	HR3	#
1988	5	43	12	2	1600	0	1630	4	0	
1988	5	43	13	7	1515	0	1520	6	1640	
1988	5	43	14	5	1645	0	1700	4	1715	
1988	5	43	15	3	1910	0	1915	5	1920	
1988	5	43	25	4	2030	0	2035	1	2115	
1988	5	43	26	15	1530	0	1545	5	1550	
1988	5	43	27	10	1520	0	1530	1	1540	
1988	5	43	28	6	2100	0	2115	3	2130	
1988	6	43	02	5	2010	0	2020	2	2030	
1988	6	43	03	7	2150	0	2200	2	2210	
1988	6	43	04	4	2215	0	2220	1	420	
1988	6	43	06	2	1220	0	1225	2	0	
1988	6	43	13	4	2000	0	2035	3	2205	
1988	6	43	14	2	1945	0	1950	1	0	
1988	6	43	15	2	1415	0	1420	1	0	
1988	6	43	17	28	1415	0	1420	1	1730	
1988	6	43	18	16	1755	0	1805	3	1835	
1988	6	43	19	9	1500	0	1530	9	1545	
1988	6	43	21	3	1815	0	1830	5	1840	
1988	6	43	22	7	1245	0	1300	4	1315	
1988	6	43	23	14	1000	0	1010	2	1110	
1988	6	43	24	7	1540	0	1605	2	100	
1988	6	43	25	15	700	0	715	3	720	
1988	6	43	26	9	1545	0	1550	8	1555	
1988	6	43	27	4	2115	0	2120	6	2130	
1988	6	43	28	10	115	0	120	7	135	
1988	6	43	29	6	800	0	805	1	1430	
1988	7	43	01	4	1245	0	1315	3	2200	
1988	7	43	05	6	1305	0	1325	3	1835	
1988	7	43	07	6	1700	0	1715	13	2050	
1988	7	43	08	8	1410	0	1415	1	2020	
1988	7	43	10	2	1450	0	1455	1	0	
1988	7	43	11	7	1735	0	1755	17	1805	
1988	7	43	13	6	2345	0	5	2	15	
1988	7	43	14	5	1730	0	1735	5	1745	
1988	7	43	15	8	850	0	855	1	1850	
1988	7	43	16	2	1750	0	1755	1	0	
1988	7	43	18	12	1630	0	1640	16	1650	
1988	7	43	19	2	1900	0	1905	2	0	
1988	7	43	20	6	900	0	1250	8	1840	
1988	7	43	21	12	1645	0	1650	1	1925	
1988	7	43	22	2	1505	0	1525	19	0	
1988	7	43	26	2	1540	0	1545	1	0	
1988	7	43	27	7	1940	0	2005	29	2045	
1988	7	43	29	8	1430	0	1445	9	1740	
1988	7	43	30	2	1545	0	1550	1	0	
1988	8	43	01	5	2015	0	2040	4	2115	
1988	8	43	03	12	1430	0	1435	1	1745	
1988	8	43	04	2	1840	0	1845	1	0	
1988	8	43	07	11	1445	0	1450	14	1700	
1988	8	43	09	4	1840	0	1930	2	15	
1988	8	43	14	2	415	0	450	2	0	

ANEXO B. Estructura de la base de datos hidrometeorológicos de la estación 43. (Datos Crudos)

Año	Mes	ESTACION	DIA	NO_PTO5	HR1	ALT1	HR2	ALT2	HR3
1988	5	37	01	6	1610	0	1650	3	1655
1988	5	37	12	2	1605	0	1630	4	0
1988	5	37	13	10	1430	0	1440	12	1455
1988	5	37	14	3	1605	0	1620	6	1700
1988	5	37	22	2	1955	0	2200	1	0
1988	5	37	23	5	2010	0	2015	2	2030
1988	5	37	24	3	2000	0	2015	10	2025
1988	5	37	25	2	2100	0	2120	3	0
1988	5	37	26	24	1525	0	1530	5	1535
1988	5	37	27	12	1345	0	1400	2	1500
1988	5	37	28	6	1945	0	2050	3	2055
1988	5	37	29	5	1515	0	1530	11	1625
1988	5	37	30	4	1415	0	1420	1	1810
1988	6	37	04	4	1540	0	1600	3	2050
1988	6	37	05	4	1545	0	1625	3	2105
1988	6	37	12	4	2040	0	2050	5	2100
1988	6	37	13	4	1735	0	1800	5	1820
1988	6	37	14	11	1545	0	1615	4	1620
1988	6	37	15	7	1410	0	1450	3	1550
1988	6	37	16	3	415	0	455	3	530
1988	6	37	17	22	600	0	610	2	825
1988	6	37	18	17	1755	0	1810	6	1845
1988	6	37	19	13	1530	0	1545	2	1630
1988	6	37	20	2	1740	0	1915	5	0
1988	6	37	21	2	2015	0	2020	1	0
1988	6	37	22	20	1145	0	1215	3	1240
1988	6	37	23	11	1635	0	1640	1	1820
1988	6	37	24	10	240	0	345	3	400
1988	6	37	25	12	700	0	710	2	720
1988	6	37	26	2	2200	0	2215	3	0
1988	6	37	27	2	2230	0	2300	5	0
1988	6	37	28	14	1900	0	1915	9	1930
1988	6	37	29	4	815	0	1445	3	1515
1988	6	37	30	7	1145	0	1245	2	1250
1988	6	37	06	2	2120	0	2125	1	0
1988	7	37	01	14	1130	0	1140	4	1240
1988	7	37	03	7	1135	0	1145	5	1220
1988	7	37	04	8	2250	0	2305	27	2315
1988	7	37	05	13	1300	0	1315	4	1345
1988	7	37	07	7	1815	0	1820	4	2145
1988	7	37	08	7	2030	0	2045	2	2215
1988	7	37	10	3	1835	0	1845	15	1900
1988	7	37	11	8	2400	0	5	1	45
1988	7	37	13	12	1900	0	1915	5	2000
1988	7	37	14	2	2200	0	2205	1	0
1988	7	37	15	18	740	0	745	2	1355
1988	7	37	17	2	115	0	140	2	0
1988	7	37	18	7	1900	0	1935	3	130
1988	7	37	19	8	640	0	645	1	1810
1988	7	37	20	14	1020	0	1100	3	1150
1988	7	37	21	12	730	0	820	3	1830
1988	7	37	22	4	1605	0	1610	1	2000

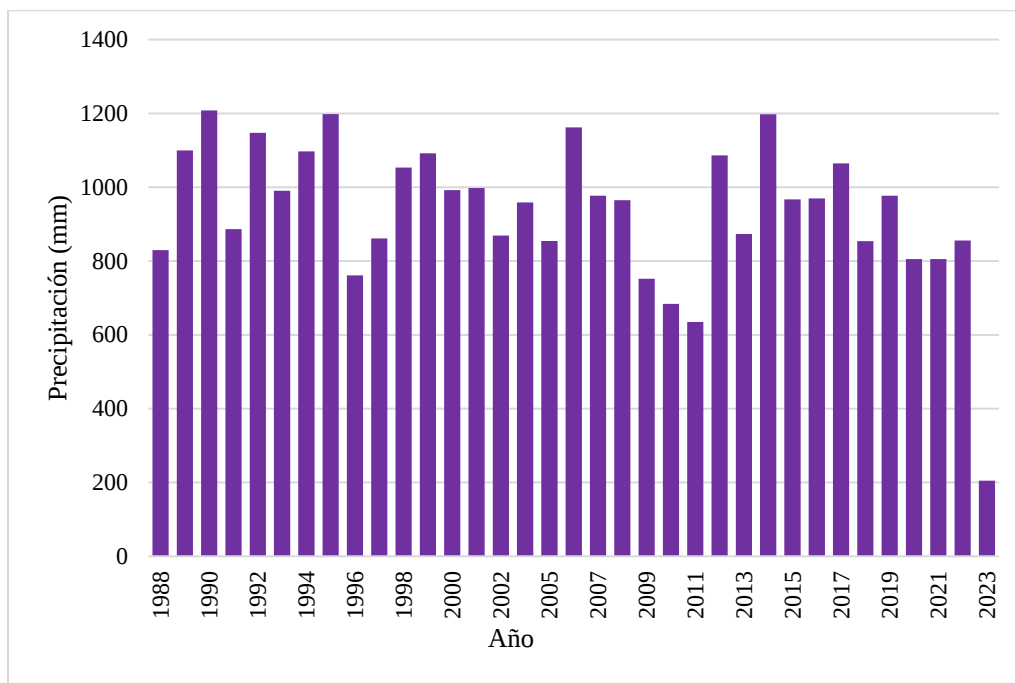
ANEXO C. Estructura de la base de datos hidrometeorológicos de la estación 43. (Datos Crudos)

Se presenta la lluvia acumulada anual en la estación 43 considerada en la colonia Santa Ana Tlacotenco.



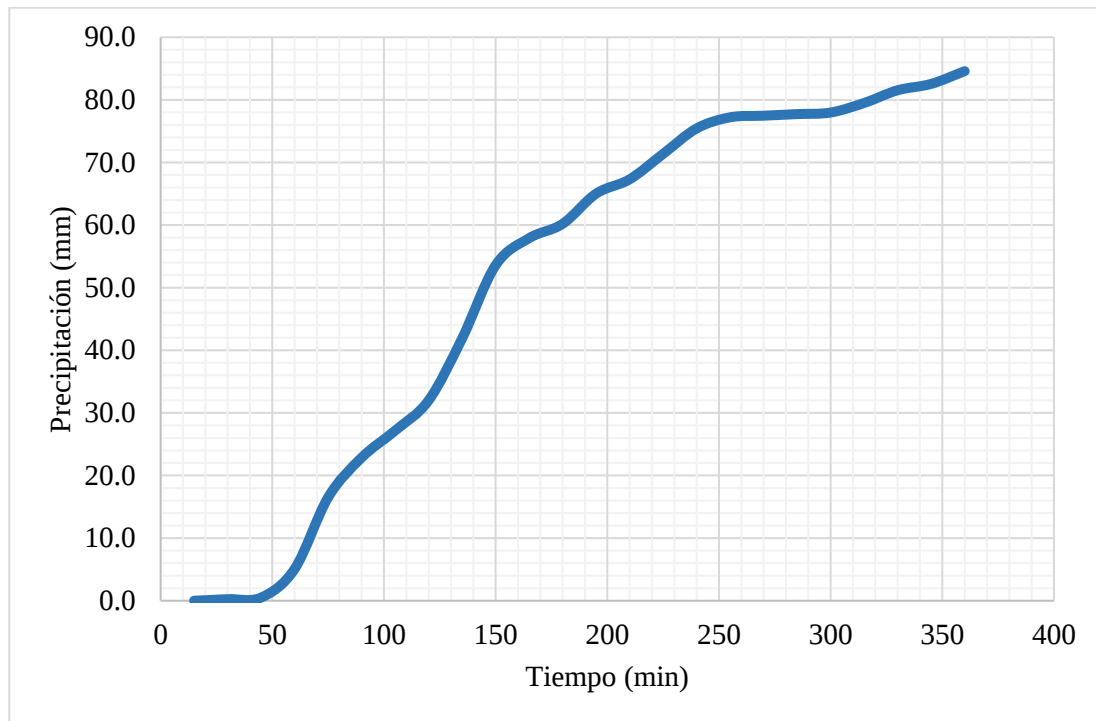
ANEXO D. Precipitación acumulada anual de la estación 43

Adicionalmente el gráfico a continuación representa la lluvia acumulada para la estación 37 utilizada para la colonia San Miguel Ajusco.



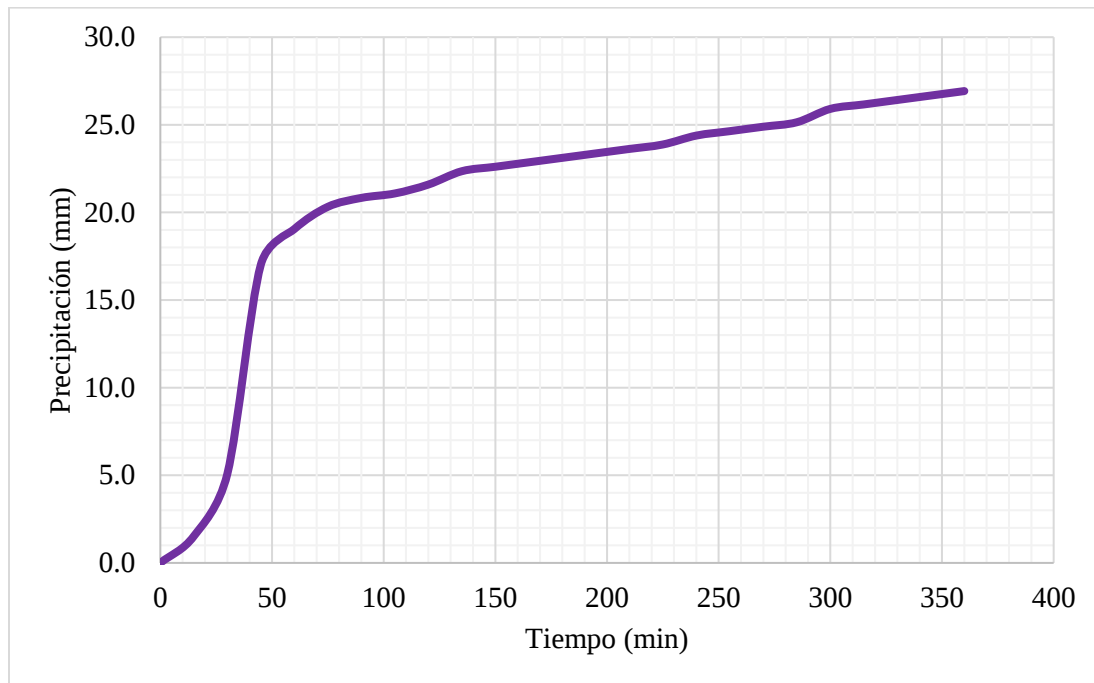
ANEXO E. Precipitación acumulada anual de la estación 37

A continuación en la figura 26 se presentan la curva masa de la lluvia máxima de mayor duración ocurrida en la estación 43.



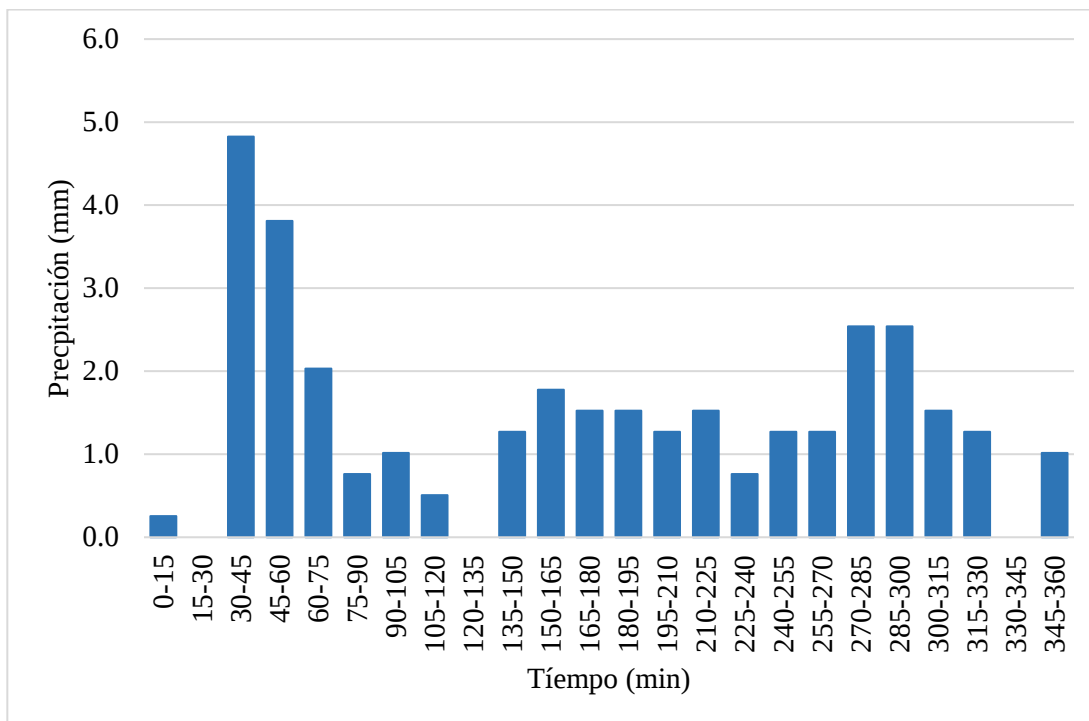
ANEXO F. Curva masa de la tormenta del día 6 de septiembre de 1989 de la estación 43.

Igualmente se calculó la curva masa para la estación 37 con los datos de la lluvia máxima ocurrida.



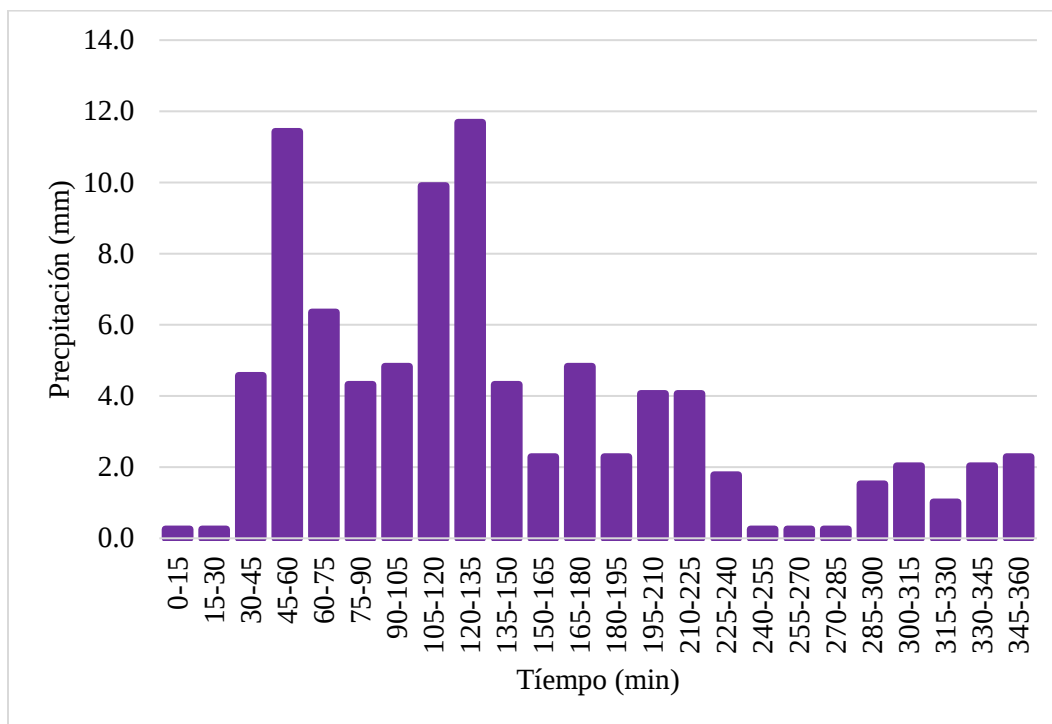
ANEXO G. Curva masa de la tormenta del día 4 de septiembre de 1989 de la estación 37.

Por otro lado se obtuvo el hietograma para la estación 43, representado en la figura siguiente figura.



ANEXO H. Hietograma de la tormenta del día 6 de septiembre de 1989 de la estación 43.

También se muestra en la siguiente figura el hietograma realizado para la estación 37.



ANEXO I. Hietograma de la tormenta del día 17 de agosto de 1989 de la estación 37.



```
# =====
# 1. PARÁMETROS TÉCNICOS
# =====
VT = 2500.0 # Volumen del tanque (Litros)
Vm = 10.0   # Volumen muerto (Litros)
A = 75.0    # Área de captación (m2)
Ce = 0.9    # Coeficiente de escurrimiento
FACTOR = 0.254 # Conversión de pulsos a mm
DEMANDA_DIARIA = 341.0

# Demandas por actividad (L/día)
D_WC, D_LAV, D_LIM, D_RIEGO = 180.0, 71.0, 4.0, 86.0

ARCHIVO_ENTRADA = "Est37.xlsx"
|
# =====
# 2. SIMULACIÓN
# =====

def ejecutar():
    if not os.path.exists(ARCHIVO_ENTRADA):
        print(f"No se encuentra {ARCHIVO_ENTRADA}")
        return

    print("Leyendo datos...")
    df_in = pd.read_excel(ARCHIVO_ENTRADA)
    df_in.columns = [c.lower().strip() for c in df_in.columns]

    dict_lluvia = {(int(r['año']), int(r['mes']), int(r['dia'])): procesar_hietograma(r) for _, r in df_in.iterrows()}

    inicio = pd.to_datetime(f"{int(df_in['año'].min())-01-01")
    fin = pd.to_datetime(f"{int(df_in['año'].max())-12-31 23:00:00")
    linea_t = pd.date_range(inicio, fin, freq='h')

    vi_h, vi_d = 0.0, 0.0
    res_h, res_d = [], []

    print("Calculando balances (Horario y Diario)...")
```

ANEXO J. Código de Python

```
print("Calculando balances (Horario y Diario)...")

# --- BALANCE HORARIO ---
for f in linea_t:
    key = (f.year, f.month, f.day)
    lluvia_p = dict_lluvia.get(key, [0]*24)[f.hour]
    vp = (lluvia_p * FACTOR) * A * Ce
    vd = obtener_demanda(f.hour, f.weekday()) >= 5)

    vo = vd if vi_h >= vd + Vm else max(0, vi_h - Vm)
    v_red = vd - vo
    suf = 1 if v_red <= 0.001 else 0
    v_temp = vi_h - vo
    v_libre = VT - v_temp
    vf = VT if vp > v_libre else v_temp + vp
    v_der = max(0, vp - v_libre)

    res_h.append({
        'Año': f.year, 'Mes': f.month, 'Fecha': f.date(), 'Hora': f.hour,
        'V_Captado_L': vp, 'V_Red_L': v_red, 'V_Derrame_L': v_der, 'Suficiencia': suf, 'V_Tanque': vf
    })
    vi_h = vf

# --- BALANCE DIARIO ---
df_diario_in = df_in.sort_values(['año', 'mes', 'dia'])
for _, r in df_diario_in.iterrows():
    # Captación total del día
    precip_total_mm = r[ [f'alt{i}' for i in range(1,31) if f'alt{i}' in r] ].max() * FACTOR
    if pd.isna(precip_total_mm): precip_total_mm = 0

    vp_d = precip_total_mm * A * Ce
    vd_d = DEMANDA_DIARIA

    vo_d = vd_d if vi_d >= vd_d + Vm else max(0, vi_d - Vm)
    v_red_d = vd_d - vo_d
    suf_d = 1 if v_red_d <= 0.001 else 0
```

ANEXO K. Código de Python

A continuación, se muestran la tabla de resultados por hora de la simulación en DM Nacional para el escenario A, para el 2019 año de la mediana de la lluvia.

Año	Mes	Día	Precipitación (mm)	Demanda (l)	Volumen potencial (l)	Volumen primeras lluvias (l)	Volumen captado	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Volumen del tanque (l)
2019	7	1	0	178	0	0	0	178	0	10
2019	7	2	34.544	178	2332	40	1090	178	1202	1100
2019	7	3	0	178	0	0	0	0	0	922
2019	7	4	1.016	178	69	40	29	0	0	773
2019	7	5	0	178	0	0	0	0	0	595
2019	7	6	3.81	178	257	40	217	0	0	634
2019	7	7	0	178	0	0	0	0	0	456
2019	7	8	5.588	178	377	40	337	0	0	615
2019	7	9	0	178	0	0	0	0	0	437
2019	7	10	3.81	178	257	40	217	0	0	476
2019	7	11	6.35	178	429	40	389	0	0	687
2019	7	12	6.35	178	429	40	389	0	0	897
2019	7	13	3.048	178	206	40	166	0	0	885
2019	7	14	1.27	178	86	40	46	0	0	753
2019	7	15	0	178	0	0	0	0	0	575
2019	7	16	0	178	0	0	0	0	0	397
2019	7	17	2.032	178	137	40	97	0	0	316
2019	7	18	19.05	178	1286	40	962	0	284	1100
2019	7	19	4.826	178	326	40	178	0	108	1100
2019	7	20	0	178	0	0	0	0	0	922
2019	7	21	0.508	178	34	34	0	0	0	744
2019	7	22	0	178	0	0	0	0	0	566
2019	7	23	24.13	178	1629	40	712	0	877	1100
2019	7	24	0	178	0	0	0	0	0	922
2019	7	25	5.08	178	343	40	303	0	0	1047
2019	7	26	8.636	178	583	40	231	0	312	1100
2019	7	27	0.254	178	17	17	0	0	0	922
2019	7	28	2.286	178	154	40	114	0	0	858
2019	7	29	0	178	0	0	0	0	0	680
2019	7	30	0	178	0	0	0	0	0	502
2019	7	31	0.254	178	17	17	0	0	0	324

ANEXO L. Simulación de julio de 2019 de DM Nacional para el escenario A.

En la tabla 18 se muestran los resultados por hora obtenidos en la simulación en Santa Ana Tlacoteco para el escenario A.

Año	Mes	Día	Precipitación (mm)	Demanda (l)	Volumen potencial (l)	Volumen primeras lluvias (l)	Volumen captado	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Volumen del tanque (l)
1989	7	1	0	178	0	0	0	0	0	807
1989	7	2	0	178	0	0	0	0	0	629
1989	7	3	0.762	178	51	40	11	0	0	462
1989	7	4	8.382	178	566	40	526	0	0	810
1989	7	5	0	178	0	0	0	0	0	632
1989	7	6	9.652	178	652	40	612	0	0	1066
1989	7	7	0.254	178	17	17	0	0	0	888
1989	7	8	1.524	178	103	40	63	0	0	772
1989	7	9	1.27	178	86	40	46	0	0	640
1989	7	10	0	178	0	0	0	0	0	462
1989	7	11	15.494	178	1046	40	776	0	190	1100
1989	7	12	1.27	178	86	40	46	0	0	968
1989	7	13	6.858	178	463	40	270	0	113	1100
1989	7	14	0	178	0	0	0	0	0	922
1989	7	15	0	178	0	0	0	0	0	744
1989	7	16	0	178	0	0	0	0	0	566
1989	7	17	0	178	0	0	0	0	0	388
1989	7	18	0	178	0	0	0	0	0	210
1989	7	19	0	178	0	0	0	0	0	32
1989	7	20	3.81	178	257	40	217	156	0	227
1989	7	21	0	178	0	0	0	0	0	49
1989	7	22	0	178	0	0	0	139	0	10
1989	7	23	1.524	178	103	40	63	178	0	73
1989	7	24	23.368	178	1577	40	1050	115	447	1100
1989	7	25	0	178	0	0	0	0	0	922
1989	7	26	10.414	178	703	40	316	0	307	1100
1989	7	27	0	178	0	0	0	0	0	922
1989	7	28	0	178	0	0	0	0	0	744
1989	7	29	4.826	178	326	40	286	0	0	852
1989	7	30	0.254	178	17	17	0	0	0	674
1989	7	31	1.524	178	103	40	63	0	0	559

ANEXO M. Simulación del julio de 1989 de Santa Ana Tlacoteco para el escenario A.

Del mismo modo, se adjunta la tabla de resultados horarios para el escenario A en la zona de estudio San Miguel Ajusco, en el año de la mediana de la precipitación.

Año	Mes	Día	Precipitación (mm)	Demanda (l)	Volumen potencial (l)	Volumen primeras lluvias (l)	Volumen captado	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Volumen del tanque (l)
2015	7	1	13.208	178	892	40	178	0	674	1100
2015	7	2	6.35	178	429	40	178	0	211	1100
2015	7	3	1.778	178	120	40	80	0	0	1002
2015	7	4	4.826	178	326	40	276	0	10	1100
2015	7	5	16.51	178	1114	40	178	0	896	1100
2015	7	6	0.762	178	51	40	11	0	0	933
2015	7	7	0.762	178	51	40	11	0	0	767
2015	7	8	16.256	178	1097	40	511	0	546	1100
2015	7	9	18.034	178	1217	40	178	0	999	1100
2015	7	10	0	178	0	0	0	0	0	922
2015	7	11	0	178	0	0	0	0	0	744
2015	7	12	0	178	0	0	0	0	0	566
2015	7	13	0	178	0	0	0	0	0	388
2015	7	14	1.27	178	86	40	46	0	0	256
2015	7	15	2.54	178	171	40	131	0	0	209
2015	7	16	14.478	178	977	40	937	0	0	968
2015	7	17	2.54	178	171	40	131	0	0	922
2015	7	18	43.434	178	2932	40	356	0	2536	1100
2015	7	19	2.032	178	137	40	97	0	0	1019
2015	7	20	0	178	0	0	0	0	0	841
2015	7	21	8.128	178	549	40	437	0	72	1100
2015	7	22	3.81	178	257	40	178	0	39	1100
2015	7	23	13.97	178	943	40	178	0	725	1100
2015	7	24	12.192	178	823	40	178	0	605	1100
2015	7	25	0	178	0	0	0	0	0	922
2015	7	26	0	178	0	0	0	0	0	744
2015	7	27	11.684	178	789	40	534	0	215	1100
2015	7	28	26.924	178	1817	40	178	0	1599	1100
2015	7	29	9.652	178	652	40	178	0	434	1100
2015	7	30	11.176	178	754	40	178	0	536	1100
2015	7	31	3.81	178	257	40	178	0	39	1100

ANEXO N. Simulación del julio 2015 de San Miguel Ajusco para el escenario A.

Asimismo, se presentan los datos derivados de la simulación para el escenario B para DM Nacional.

Año	Mes	Día	Precipitación (mm)	Demanda (l)	Volumen potencial (l)	Volumen primeras lluvias (l)	Volumen captado	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Volumen del tanque (l)
2019	7	1	0	235	0	0	0	0	0	194
2019	7	2	34.544	235	2332	40	2292	51	302	2000
2019	7	3	0	235	0	0	0	0	0	1765
2019	7	4	1.016	235	69	40	29	0	0	1559
2019	7	5	0	235	0	0	0	0	0	1324
2019	7	6	3.81	235	257	40	217	0	0	1306
2019	7	7	0	235	0	0	0	0	0	1071
2019	7	8	5.588	235	377	40	337	0	0	1173
2019	7	9	0	235	0	0	0	0	0	938
2019	7	10	3.81	235	257	40	217	0	0	920
2019	7	11	6.35	235	429	40	389	0	0	1074
2019	7	12	6.35	235	429	40	389	0	0	1227
2019	7	13	3.048	235	206	40	166	0	0	1158
2019	7	14	1.27	235	86	40	46	0	0	969
2019	7	15	0	235	0	0	0	0	0	734
2019	7	16	0	235	0	0	0	0	0	499
2019	7	17	2.032	235	137	40	97	0	0	361
2019	7	18	19.05	235	1286	40	1246	0	0	1372
2019	7	19	4.826	235	326	40	286	0	0	1423
2019	7	20	0	235	0	0	0	0	0	1188
2019	7	21	0.508	235	34	34	0	0	0	953
2019	7	22	0	235	0	0	0	0	0	718
2019	7	23	24.13	235	1629	40	1589	0	71	2000
2019	7	24	0	235	0	0	0	0	0	1765
2019	7	25	5.08	235	343	40	303	0	0	1833
2019	7	26	8.636	235	583	40	543	0	141	2000
2019	7	27	0.254	235	17	17	0	0	0	1765
2019	7	28	2.286	235	154	40	114	0	0	1644
2019	7	29	0	235	0	0	0	0	0	1409
2019	7	30	0	235	0	0	0	0	0	1174
2019	7	31	0.254	235	17	17	0	0	0	939

ANEXO O. Simulación del julio de 2019 de DM Nacional para el escenario B.

Adicionalmente, la tabla 21 se pueden observar los resultados de la simulación en Santa Ana Tlacontenco para el escenario B.

Año	Mes	Día	Precipitación (mm)	Demanda (l)	Volumen potencial (l)	Volumen primeras lluvias (l)	Volumen captado	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Volumen del tanque (l)
1989	7	1	0	235	0	0	0	0	0	1593
1989	7	2	0	235	0	0	0	0	0	1358
1989	7	3	0.762	235	51	40	11	0	0	1134
1989	7	4	8.382	235	566	40	526	0	0	1425
1989	7	5	0	235	0	0	0	0	0	1190
1989	7	6	9.652	235	652	40	612	0	0	1567
1989	7	7	0.254	235	17	17	0	0	0	1332
1989	7	8	1.524	235	103	40	63	0	0	1159
1989	7	9	1.27	235	86	40	46	0	0	970
1989	7	10	0	235	0	0	0	0	0	735
1989	7	11	15.494	235	1046	40	1006	0	0	1506
1989	7	12	1.27	235	86	40	46	0	0	1317
1989	7	13	6.858	235	463	40	423	0	0	1505
1989	7	14	0	235	0	0	0	0	0	1270
1989	7	15	0	235	0	0	0	0	0	1035
1989	7	16	0	235	0	0	0	0	0	800
1989	7	17	0	235	0	0	0	0	0	565
1989	7	18	0	235	0	0	0	0	0	330
1989	7	19	0	235	0	0	0	0	0	95
1989	7	20	3.81	235	257	40	217	150	0	227
1989	7	21	0	235	0	0	0	18	0	10
1989	7	22	0	235	0	0	0	235	0	10
1989	7	23	1.524	235	103	40	63	235	0	73
1989	7	24	23.368	235	1577	40	1537	172	0	1547
1989	7	25	0	235	0	0	0	0	0	1312
1989	7	26	10.414	235	703	40	663	0	0	1740
1989	7	27	0	235	0	0	0	0	0	1505
1989	7	28	0	235	0	0	0	0	0	1270
1989	7	29	4.826	235	326	40	286	0	0	1321
1989	7	30	0.254	235	17	17	0	0	0	1086
1989	7	31	1.524	235	103	40	63	0	0	914

ANEXO P. Simulación de julio de 1989 de Santa Ana Tlacotenco para el escenario B.

También, se incluye las tablas para el escenario C de la simulación para DM Nacional en 2019, año en que ocurre la mediana de la precipitación.

Año	Mes	Día	Precipitación (mm)	Demanda (l)	Volumen potencial (l)	Volumen primeras lluvias (l)	Volumen captado	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Volumen del tanque (l)
2019	7	1	0	591	0	0	0	591	0	10
2019	7	2	34.544	591	2332	40	2292	591	0	2302
2019	7	3	0	591	0	0	0	0	0	1711
2019	7	4	1.016	591	69	40	29	0	0	1148
2019	7	5	0	591	0	0	0	0	0	557
2019	7	6	3.81	591	257	40	217	44	0	227
2019	7	7	0	591	0	0	0	374	0	10
2019	7	8	5.588	591	377	40	337	591	0	347
2019	7	9	0	591	0	0	0	254	0	10
2019	7	10	3.81	591	257	40	217	591	0	227
2019	7	11	6.35	591	429	40	389	374	0	399
2019	7	12	6.35	591	429	40	389	202	0	399
2019	7	13	3.048	591	206	40	166	202	0	176
2019	7	14	1.27	591	86	40	46	425	0	56
2019	7	15	0	591	0	0	0	545	0	10
2019	7	16	0	591	0	0	0	591	0	10
2019	7	17	2.032	591	137	40	97	591	0	107
2019	7	18	19.05	591	1286	40	1246	494	0	1256
2019	7	19	4.826	591	326	40	286	0	0	951
2019	7	20	0	591	0	0	0	0	0	360
2019	7	21	0.508	591	34	34	0	241	0	10
2019	7	22	0	591	0	0	0	591	0	10
2019	7	23	24.13	591	1629	40	1589	591	0	1599
2019	7	24	0	591	0	0	0	0	0	1008
2019	7	25	5.08	591	343	40	303	0	0	720
2019	7	26	8.636	591	583	40	543	0	0	672
2019	7	27	0.254	591	17	17	0	0	0	81
2019	7	28	2.286	591	154	40	114	520	0	124
2019	7	29	0	591	0	0	0	477	0	10
2019	7	30	0	591	0	0	0	591	0	10
2019	7	31	0.254	591	17	17	0	591	0	10

ANEXO Q. Simulación de julio de 2019 de DM Nacional para el escenario C.

Los resultados de la simulación para el escenario C en Santa Ana Tlacotenco se presenta en la tabla 2.

Año	Mes	Día	Precipitación (mm)	Demanda (l)	Volumen potencial (l)	Volumen primeras lluvias (l)	Volumen captado	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Volumen del tanque (l)
1989	7	1	0	591	0	0	0	473	0	10
1989	7	2	0	591	0	0	0	591	0	10
1989	7	3	0.762	591	51	40	11	591	0	21
1989	7	4	8.382	591	566	40	526	580	0	536
1989	7	5	0	591	0	0	0	65	0	10
1989	7	6	9.652	591	652	40	612	591	0	622
1989	7	7	0.254	591	17	17	0	0	0	31
1989	7	8	1.524	591	103	40	63	570	0	73
1989	7	9	1.27	591	86	40	46	528	0	56
1989	7	10	0	591	0	0	0	545	0	10
1989	7	11	15.494	591	1046	40	1006	591	0	1016
1989	7	12	1.27	591	86	40	46	0	0	471
1989	7	13	6.858	591	463	40	423	130	0	433
1989	7	14	0	591	0	0	0	168	0	10
1989	7	15	0	591	0	0	0	591	0	10
1989	7	16	0	591	0	0	0	591	0	10
1989	7	17	0	591	0	0	0	591	0	10
1989	7	18	0	591	0	0	0	591	0	10
1989	7	19	0	591	0	0	0	591	0	10
1989	7	20	3.81	591	257	40	217	591	0	227
1989	7	21	0	591	0	0	0	374	0	10
1989	7	22	0	591	0	0	0	591	0	10
1989	7	23	1.524	591	103	40	63	591	0	73
1989	7	24	23.368	591	1577	40	1537	528	0	1547
1989	7	25	0	591	0	0	0	0	0	956
1989	7	26	10.414	591	703	40	663	0	0	1028
1989	7	27	0	591	0	0	0	0	0	437
1989	7	28	0	591	0	0	0	164	0	10
1989	7	29	4.826	591	326	40	286	591	0	296
1989	7	30	0.254	591	17	17	0	305	0	10
1989	7	31	1.524	591	103	40	63	591	0	73

ANEXO R. Simulación de julio de 1989 de Santa Ana Tlacotenco para el escenario C.

Finalmente se incluye la última tabla del año en donde ocurre la mediana de la precipitación en donde se presentan los resultados de la simulación en San Miguel Ajusco para el escenario C.

Año	Mes	Día	Precipitación (mm)	Demanda (l)	Volumen potencial (l)	Volumen primeras lluvias (l)	Volumen captado	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Volumen del tanque (l)
2015	7	1	13.208	591	892	40	852	0	259	2500
2015	7	2	6.35	591	429	40	389	0	0	2298
2015	7	3	1.778	591	120	40	80	0	0	1787
2015	7	4	4.826	591	326	40	286	0	0	1481
2015	7	5	16.51	591	1114	40	1074	0	0	1965
2015	7	6	0.762	591	51	40	11	0	0	1385
2015	7	7	0.762	591	51	40	11	0	0	806
2015	7	8	16.256	591	1097	40	1057	0	0	1272
2015	7	9	18.034	591	1217	40	1177	0	0	1858
2015	7	10	0	591	0	0	0	0	0	1267
2015	7	11	0	591	0	0	0	0	0	676
2015	7	12	0	591	0	0	0	0	0	85
2015	7	13	0	591	0	0	0	516	0	10
2015	7	14	1.27	591	86	40	46	591	0	56
2015	7	15	2.54	591	171	40	131	545	0	141
2015	7	16	14.478	591	977	40	937	460	0	947
2015	7	17	2.54	591	171	40	131	0	0	488
2015	7	18	43.434	591	2932	40	2892	113	402	2500
2015	7	19	2.032	591	137	40	97	0	0	2006
2015	7	20	0	591	0	0	0	0	0	1415
2015	7	21	8.128	591	549	40	509	0	0	1333
2015	7	22	3.81	591	257	40	217	0	0	959
2015	7	23	13.97	591	943	40	903	0	0	1271
2015	7	24	12.192	591	823	40	783	0	0	1463
2015	7	25	0	591	0	0	0	0	0	872
2015	7	26	0	591	0	0	0	0	0	281
2015	7	27	11.684	591	789	40	749	320	0	759
2015	7	28	26.924	591	1817	40	1777	0	0	1945
2015	7	29	9.652	591	652	40	612	0	0	1966
2015	7	30	11.176	591	754	40	714	0	0	2089
2015	7	31	3.81	591	257	40	217	0	0	1715

ANEXO S. Simulación de julio de 2015 de San Miguel Ajusco para el escenario C.

De igual forma, se presentan los resultados mensuales para el mes agosto de 1988, representando el comportamiento del escenario A en DM Nacional.

Año	Mes	Día	Precipitación (mm)	Demanda (l)	Volumen potencial (l)	Volumen primeras lluvias (l)	Volumen captado	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Volumen del tanque (l)
1988	8	1	0.5	178	34	34.29	0.0	0	0	137.3
1988	8	2	4.6	178	309	40	268.6	50.72	0	278.6
1988	8	3	10.2	178	686	40	645.8	0	0	746.4
1988	8	4	9.4	178	634	40	594.4	0	62.8	1069.6
1988	8	5	0.0	178	0	0	0.0	0	0	922.0
1988	8	6	0.0	178	0	0	0.0	0	0	744.0
1988	8	7	13.5	178	909	40	868.7	0	334.7	1100.0
1988	8	8	1.0	178	69	40	28.6	0	0	950.6
1988	8	9	0.0	178	0	0	0.0	0	0	772.6
1988	8	10	5.1	178	343	40	302.9	0	0	897.5
1988	8	11	0.0	178	0	0	0.0	0	0	719.5
1988	8	12	0.0	178	0	0	0.0	0	0	541.5
1988	8	13	0.0	178	0	0	0.0	0	0	363.5
1988	8	14	0.0	178	0	0	0.0	0	0	185.5
1988	8	15	6.6	178	446	40	405.8	2.52	0	415.8
1988	8	16	9.7	178	652	40	611.5	0	0	849.3
1988	8	17	0.0	178	0	0	0.0	0	0	671.3
1988	8	18	0.0	178	0	0	0.0	0	0	493.3
1988	8	19	0.5	178	34	34.29	0.0	0	0	315.3
1988	8	20	2.5	178	171	40	131.5	0	0	268.7
1988	8	21	1.5	178	103	40	62.9	0	0	153.6
1988	8	22	6.9	178	463	40	422.9	34.4	0	432.9
1988	8	23	0.0	178	0	0	0.0	0	0	254.9
1988	8	24	8.4	178	566	40	525.8	0	0	602.7
1988	8	25	0.0	178	0	0	0.0	0	0	424.7
1988	8	26	0.0	178	0	0	0.0	0	0	246.7
1988	8	27	0.5	178	34	34.29	0.0	0	0	68.7
1988	8	28	0.0	178	0	0	0.0	119.3	0	10.0
1988	8	29	0.0	178	0	0	0.0	178	0	10.0
1988	8	30	2.8	178	189	40	148.6	178	0	158.6
1988	8	31	7.9	178	531	40	491.5	29.405	0	501.5

ANEXO T. Simulación de DM nacional en agosto de 1988 para el escenario A

La simulación de agosto de 1988 correspondiente en Santa Ana Tlacontenco para el escenario A se presenta en la siguiente tabla.

Año	Mes	Día	Precipitación (mm)	Demanda (l)	Volumen potencial (l)	Volumen primeras lluvias (l)	Volumen captado	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Volumen del tanque (l)
1988	8	1	5	178	326	40	286	0	0	829
1988	8	2	0	178	0	0	0	0	0	651
1988	8	3	29	178	1989	40	617	0	1331	1091
1988	8	4	0	178	17	17	0	0	0	913
1988	8	5	0	178	0	0	0	0	0	735
1988	8	6	0	178	0	0	0	0	0	557
1988	8	7	20	178	1372	40	721	0	620	1100
1988	8	8	0	178	0	0	0	0	0	922
1988	8	9	2	178	120	40	80	0	0	824
1988	8	10	0	178	0	0	0	0	0	646
1988	8	11	0	178	0	0	0	0	0	468
1988	8	12	0	178	0	0	0	0	0	290
1988	8	13	0	178	0	0	0	0	0	112
1988	8	14	1	178	34	34	0	76	0	10
1988	8	15	8	178	514	40	474	178	0	484
1988	8	16	10	178	703	40	663	0	0	969
1988	8	17	2	178	154	40	114	0	0	906
1988	8	18	1	178	34	34	0	0	0	728
1988	8	19	2	178	103	40	63	0	0	612
1988	8	20	0	178	0	0	0	0	0	434
1988	8	21	19	178	1303	40	844	0	419	1100
1988	8	22	3	178	206	40	166	0	0	1088
1988	8	23	0	178	0	0	0	0	0	910
1988	8	24	2	178	154	40	114	0	0	846
1988	8	25	0	178	0	0	0	0	0	668
1988	8	26	0	178	0	0	0	0	0	490
1988	8	27	0	178	0	0	0	0	0	312
1988	8	28	0	178	0	0	0	0	0	134
1988	8	29	0	178	0	0	0	54	0	10
1988	8	30	2	178	137	40	97	178	0	107
1988	8	31	9	178	634	40	594	81	0	604

ANEXO U. Simulación de Santa Ana Tlacotenco para el escenario A.

La tabla 28 muestra los valores obtenidos para la simulación de agosto de 1988 en San Miguel Ajusco para el escenario A.

Año	Mes	Día	Precipitación (mm)	Demanda (l)	Volumen potencial (l)	Volumen primeras lluvias (l)	Volumen captado	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Volumen del tanque (l)
1988	8	1	5	178	309	40	269	0	0	457
1988	8	2	5	178	343	40	303	0	0	582
1988	8	3	15	178	1029	40	989	0	297	1096
1988	8	4	7	178	463	40	423	0	245	1096
1988	8	5	1	178	34	34	0	0	0	918
1988	8	6	0	178	0	0	0	0	0	740
1988	8	7	21	178	1440	40	1400	0	862	1100
1988	8	8	29	178	1972	40	1932	0	1754	1100
1988	8	9	0	178	17	17	0	0	0	922
1988	8	10	4	178	274	40	234	0	0	978
1988	8	11	4	178	257	40	217	0	0	1017
1988	8	12	8	178	549	40	509	0	248	1100
1988	8	13	0	178	0	0	0	0	0	922
1988	8	14	1	178	51	40	11	0	0	755
1988	8	15	9	178	583	40	543	0	20	1100
1988	8	16	13	178	874	40	834	0	656	1100
1988	8	17	7	178	480	40	440	0	262	1100
1988	8	18	3	178	171	40	131	0	0	1053
1988	8	19	1	178	51	40	11	0	0	887
1988	8	20	0	178	0	0	0	0	0	709
1988	8	21	0	178	0	0	0	0	0	531
1988	8	22	2	178	103	40	63	0	0	416
1988	8	23	0	178	0	0	0	0	0	238
1988	8	24	0	178	0	0	0	0	0	60
1988	8	25	0	178	0	0	0	128	0	10
1988	8	26	0	178	0	0	0	178	0	10
1988	8	27	1	178	86	40	46	178	0	56
1988	8	28	0	178	0	0	0	132	0	10
1988	8	29	0	178	0	0	0	178	0	10
1988	8	30	1	178	69	40	29	178	0	39
1988	8	31	5	178	309	40	269	149	0	279

ANEXO V. Simulación de San Miguel Ajusco para el escenario A.

Los resultados de la simulación en agosto del año 1988 que se obtuvo en DM Nacional para el escenario B se pueden observar en la siguiente tabla.

Año	Mes	Día	Precipitación (mm)	Demanda (l)	Volumen potencial (l)	Volumen primeras lluvias (l)	Volumen captado	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Volumen del tanque (l)
1988	8	1	0.508	235	34	34	0	81	0	10
1988	8	2	4.572	235	309	40	269	173	0	217
1988	8	3	10.16	235	686	40	646	0	0	627
1988	8	4	9.398	235	634	40	594	0	0	987
1988	8	5	0	235	0	0	0	0	0	752
1988	8	6	0	235	0	0	0	0	0	517
1988	8	7	13.462	235	909	40	869	0	0	1150
1988	8	8	1.016	235	69	40	29	0	0	944
1988	8	9	0	235	0	0	0	0	0	709
1988	8	10	5.08	235	343	40	303	0	0	777
1988	8	11	0	235	0	0	0	0	0	542
1988	8	12	0	235	0	0	0	0	0	307
1988	8	13	0	235	0	0	0	0	0	72
1988	8	14	0	235	0	0	0	163	0	10
1988	8	15	6.604	235	446	40	406	235	0	181
1988	8	16	9.652	235	652	40	612	0	0	557
1988	8	17	0	235	0	0	0	0	0	322
1988	8	18	0	235	0	0	0	0	0	87
1988	8	19	0.508	235	34	34	0	158	0	10
1988	8	20	2.54	235	171	40	131	104	0	10
1988	8	21	1.524	235	103	40	63	172	0	10
1988	8	22	6.858	235	463	40	423	0	0	198
1988	8	23	0	235	0	0	0	47	0	10
1988	8	24	8.382	235	566	40	526	0	0	301
1988	8	25	0	235	0	0	0	0	0	66
1988	8	26	0	235	0	0	0	179	0	10
1988	8	27	0.508	235	34	34	0	235	0	10
1988	8	28	0	235	0	0	0	235	0	10
1988	8	29	0	235	0	0	0	235	0	10
1988	8	30	2.794	235	189	40	149	235	0	159
1988	8	31	7.874	235	531	40	491	0	0	415

ANEXO W. Simulación de DM Nacional para el escenario B.

El mes de agosto de 1988 se representó en la siguiente tabla con los resultados obtenidos en Santa Ana Tlacotenco para el escenario B.

Año	Mes	Día	Precipitación (mm)	Demanda (l)	Volumen potencial (l)	Volumen primeras lluvias (l)	Volumen captado	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Volumen del tanque (l)
1988	8	1	5	235	326	40	286	0	0	1581
1988	8	2	0	235	0	0	0	0	0	1346
1988	8	3	29	235	1989	40	889	0	1060	2000
1988	8	4	0	235	17	17	0	0	0	1765
1988	8	5	0	235	0	0	0	0	0	1530
1988	8	6	0	235	0	0	0	0	0	1295
1988	8	7	20	235	1372	40	940	0	392	2000
1988	8	8	0	235	0	0	0	0	0	1765
1988	8	9	2	235	120	40	80	0	0	1610
1988	8	10	0	235	0	0	0	0	0	1375
1988	8	11	0	235	0	0	0	0	0	1140
1988	8	12	0	235	0	0	0	0	0	905
1988	8	13	0	235	0	0	0	0	0	670
1988	8	14	1	235	34	34	0	0	0	435
1988	8	15	8	235	514	40	474	0	0	674
1988	8	16	10	235	703	40	663	0	0	1102
1988	8	17	2	235	154	40	114	0	0	982
1988	8	18	1	235	34	34	0	0	0	747
1988	8	19	2	235	103	40	63	0	0	574
1988	8	20	0	235	0	0	0	0	0	339
1988	8	21	19	235	1303	40	1263	0	0	1368
1988	8	22	3	235	206	40	166	0	0	1298
1988	8	23	0	235	0	0	0	0	0	1063
1988	8	24	2	235	154	40	114	0	0	943
1988	8	25	0	235	0	0	0	0	0	708
1988	8	26	0	235	0	0	0	0	0	473
1988	8	27	0	235	0	0	0	0	0	238
1988	8	28	0	235	0	0	0	7	0	10
1988	8	29	0	235	0	0	0	235	0	10
1988	8	30	2	235	137	40	97	235	0	107
1988	8	31	9	235	634	40	594	138	0	604

ANEXO X. Simulación de Santa Ana Tlacotenco para el escenario B.

Año	Mes	Día	Precipitación (mm)	Demanda (l)	Volumen potencial (l)	Volumen primeras lluvias (l)	Volumen captado	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Volumen del tanque (l)
1988	8	1	4.572	235	308.61	40	268.61	0	0	700.905
1988	8	2	5.08	235	342.9	40	302.9	0	0	768.805
1988	8	3	15.24	235	1028.7	40	988.7	0	0	1522.505
1988	8	4	6.858	235	462.915	40	422.915	0	0	1710.42
1988	8	5	0.508	235	34.29	34.29	0	0	0	1475.42
1988	8	6	0	235	0	0	0	0	0	1240.42
1988	8	7	21.336	235	1440.18	40	1400.18	0	405.6	2000
1988	8	8	29.21	235	1971.675	40	1931.675	0	1696.675	2000
1988	8	9	0.254	235	17.145	17.145	0	0	0	1765
1988	8	10	4.064	235	274.32	40	234.32	0	0	1764.32
1988	8	11	3.81	235	257.175	40	217.175	0	0	1746.495
1988	8	12	8.128	235	548.64	40	508.64	0	20.135	2000
1988	8	13	0	235	0	0	0	0	0	1765
1988	8	14	0.762	235	51.435	40	11.435	0	0	1541.435
1988	8	15	8.636	235	582.93	40	542.93	0	0	1849.365
1988	8	16	12.954	235	874.395	40	834.395	0	448.76	2000
1988	8	17	7.112	235	480.06	40	440.06	0	205.06	2000
1988	8	18	2.54	235	171.45	40	131.45	0	0	1896.45
1988	8	19	0.762	235	51.435	40	11.435	0	0	1672.885
1988	8	20	0	235	0	0	0	0	0	1437.885
1988	8	21	0	235	0	0	0	0	0	1202.885
1988	8	22	1.524	235	102.87	40	62.87	0	0	1030.755
1988	8	23	0	235	0	0	0	0	0	795.755
1988	8	24	0	235	0	0	0	0	0	560.755
1988	8	25	0	235	0	0	0	0	0	325.755
1988	8	26	0	235	0	0	0	0	0	90.755
1988	8	27	1.27	235	85.725	40	45.725	154.245	0	55.725
1988	8	28	0	235	0	0	0	189.275	0	10
1988	8	29	0	235	0	0	0	235	0	10
1988	8	30	1.016	235	68.58	40	28.58	235	0	38.58
1988	8	31	4.572	235	308.61	40	268.61	206.42	0	278.61

Tabla 20. Simulación de San Miguel Ajusco para el escenario B.

Los valores que se exponen en esta tabla resumen el comportamiento de la simulación anual acumulada para DM Nacional al evaluar el escenario C.

Año	Precipitación (mm)	Volumen potencial (l)	Volumen aprovechado (l)	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Días de suficiencia	Días con derrame
1988	425.958	28752.17	26018.58	82725.42	129.2688	22	1
1989	387.858	26180.42	23708.43	85035.57	0	21	0
1990	571.754	38593.4	35297.64	73446.36	0	30	0
1991	681.99	46034.33	40462.72	68281.28	2044.639	45	7
1992	645.668	43582.59	38705.39	70038.61	964.2831	41	3
1993	486.41	32832.68	28746.1	79997.9	967.9644	28	3
1994	654.812	44199.81	36875.21	71868.79	3737.41	38	3
1995	568.198	38353.37	32827.4	75916.6	2390.208	35	4
1996	463.042	31255.34	27929.8	80814.2	481.2	27	2
1997	439.674	29678	25047.68	83696.32	1500.274	22	2
1998	435.102	29369.39	25454.57	83289.43	499.0644	23	2
1999	343.916	23214.33	18986.79	89757.21	2034.658	20	2
2000	530.86	35833.05	32776.69	75967.31	23.4775	32	1
2001	449.58	30346.65	27130.91	81613.09	0	24	0
2002	612.394	41336.6	36877.71	71866.29	1098.44	39	1
2004	652.272	44028.36	39479.15	69264.85	767.7306	41	2
2005	359.918	24294.47	21157.25	87586.75	1230.043	21	2
2006	561.34	37890.45	31531.19	77212.81	3196.838	31	3
2007	697.484	47080.17	40443	68301	3295.687	46	4
2008	532.384	35935.92	31419.14	77324.86	1569.586	35	7
2009	538.226	36330.26	30711.34	78032.66	2448.874	31	3
2010	418.084	28220.67	25209.63	83534.37	6.9875	27	1
2011	477.266	32215.46	24533.24	84210.76	4860.769	26	6
2012	246.888	16664.94	14317.74	94426.27	0	6	0
2013	621.284	41936.67	36450.05	72293.95	2008.012	34	5
2014	553.212	37341.81	33247.5	75496.5	581.4113	30	1
2015	418.846	28272.11	24285.07	84458.93	742.6813	19	2
2016	547.624	36964.62	32284.29	76459.71	1542.778	33	2
2017	756.92	51092.1	37815.15	70928.85	9271.062	48	6
2018	684.022	46171.49	41117.04	67626.96	342.8375	46	1
2019	510.54	34461.45	30218.26	78525.75	1330.295	33	3
2020	294.894	19905.35	17495.33	91248.67	0	12	0
2021	294.894	19905.35	17495.33	91248.67	0	12	0
2022	332.232	22425.66	19878.49	88865.52	0	11	0
2023	62.738	4234.815	3024.785	105719.2	0	1	0

ANEXO Y. Simulación de DM Nacional para el escenario C.

Enseguida se documentan los valores de la simulación anual acumulada, evaluando específicamente el escenario C dentro de la zona Santa Ana Tlacontenco.

Año	Precipitación (mm)	Volumen potencial (l)	Volumen aprovechado (l)	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Días de suficiencia	Días con derrame
1988	556.768	37581.84	31999.39	76744.61	2703.836	31	4
1989	487.172	32884.11	27633.56	81110.44	2349.1	20	2
1990	689.61	46548.68	38899.26	69844.74	4159.371	44	6
1991	513.08	34632.9	30971.42	77772.58	0	15	0
1992	704.342	47543.09	39213.3	69530.7	3556.356	39	3
1993	423.926	28615.01	25427.83	83316.17	0	16	0
1994	601.472	40599.36	35959.28	72784.72	481.4519	27	3
1995	471.424	31821.12	27823.24	80920.76	993.5613	29	4
1996	342.392	23111.46	20181.79	88562.21	45.35125	12	1
1997	486.918	32866.97	29222.65	79521.36	0	26	0
1998	731.52	49377.6	42724.39	66019.61	2906.004	48	3
1999	503.682	33998.54	30440.18	78303.82	296.8625	26	1
2000	673.608	45468.54	40007.45	68736.55	2153.929	44	4
2001	579.12	39090.6	35286.72	73457.28	85.25875	29	1
2002	291.338	19665.32	16968.61	91775.39	0	12	0
2003	0	0	0	108744	0	0	0
2004	659.13	44491.28	40138.26	68605.74	605.8106	33	1
2005	437.642	29540.84	26439.72	82304.28	11.06625	22	1
2006	709.93	47920.28	42858.03	65885.97	840.7663	41	2
2007	518.16	34975.8	30633.25	78110.75	675.3569	28	2
2008	547.624	36964.62	31738.55	77005.45	1490.298	26	2
2009	306.578	20694.02	17099.5	91644.51	1687.345	12	2
2010	200.406	13527.41	11265.91	97478.09	0	8	0
2011	553.212	37341.81	29628.27	79115.73	4749.216	31	5
2012	527.304	35593.02	32182.98	76561.03	0	30	0
2013	522.224	35250.12	31770.43	76973.57	223.9313	27	1
2014	324.612	21911.31	19375.54	89368.46	0	14	0
2015	734.06	49549.05	39106.86	69637.14	5717.683	38	5
2016	453.898	30638.12	26896.62	81847.38	0	11	0
2017	448.818	30295.22	26679.45	82064.56	0	19	0
2018	115.824	7818.12	6116.64	102627.4	0	1	0
2019	187.706	12670.16	10112.11	98631.89	0	5	0
2020	458.47	30946.73	27856.7	80887.31	0	25	0
2021	458.47	30946.73	27856.7	80887.31	0	25	0
2022	456.184	30792.42	27330.96	81413.05	0	19	0
2023	108.712	7338.06	5208.015	103536	0	0	0

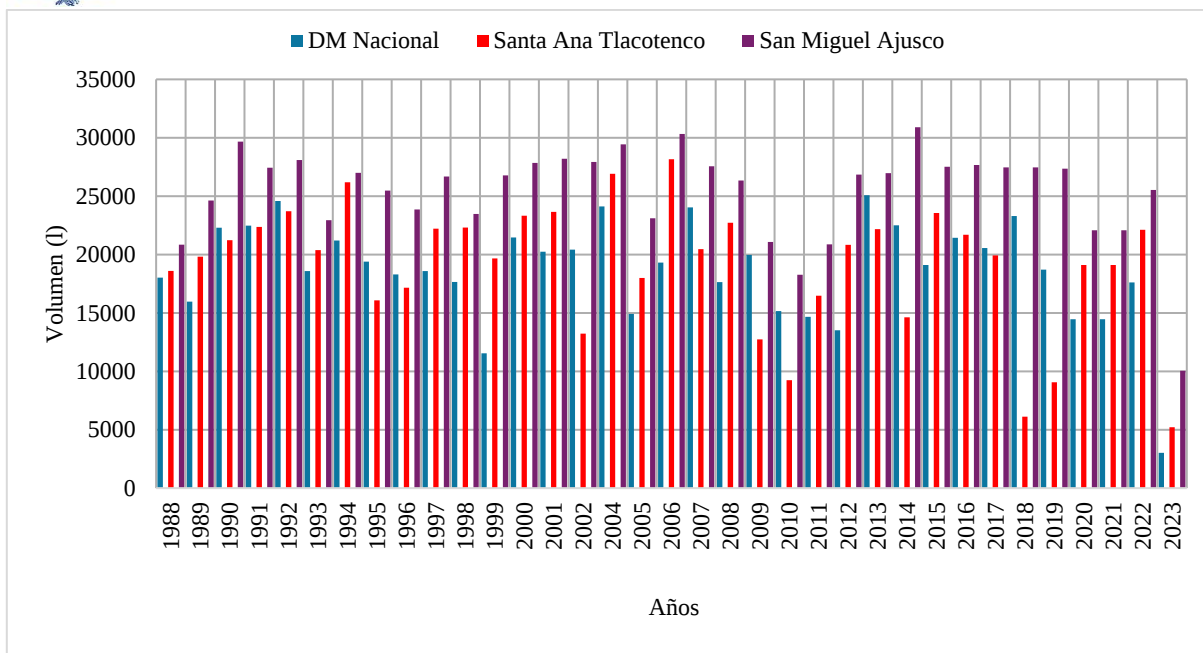
ANEXO Z. Simulación de Santa Ana Tlacotenco para el escenario C.

Finalmente, este cuadro expone los resultados derivados de la simulación anual acumulada al aplicar el escenario C en San Miguel Ajusco.

Año	Precipitación (mm)	Volumen potencial (l)	Volumen aprovechado (l)	Volumen utilizado de la red (l)	Volumen de derrame (l)	Días de suficiencia	Días con derrame
1988	829.818	56012.72	43940.35	64803.65	8405.193	56	6
1989	1103.376	74477.88	56388.25	52355.75	13856.73	75	12
1990	1211.072	81747.36	63666.75	45077.25	13504.87	80	13
1991	886.206	59818.91	50071.07	58672.93	5394.922	54	7
1992	1147.318	77443.97	62777.59	45966.41	9397.569	76	14
1993	991.616	66934.08	52475.38	56268.62	10431.53	74	13
1994	1118.87	75523.73	60772.85	47971.15	9338.909	78	12
1995	1198.118	80872.97	60920.28	47823.72	15594.08	84	18
1996	764.286	51589.31	44231.96	64512.04	3375.876	45	3
1997	861.314	58138.7	49270.24	59473.76	4778.426	54	5
1998	1054.1	71151.75	54255.14	54488.86	12578.02	75	19
1999	1091.692	73689.21	60078.74	48665.26	9286.148	76	9
2000	992.378	66985.52	57467.66	51276.34	5599.247	75	11
2001	997.966	67362.71	55634.15	53109.86	6981.355	68	7
2002	869.188	58670.19	49268.15	59475.85	4563.933	52	5
2004	958.85	64722.38	58395.52	50348.48	1602.531	64	4
2005	854.456	57675.78	47378.21	61365.79	6533.25	60	7
2006	1162.05	78438.38	68032.53	40711.47	5538.666	86	9
2007	976.884	65939.67	55606.38	53137.62	6020.401	69	8
2008	964.692	65116.71	54909.04	53834.96	6151.911	65	7
2009	751.84	50749.2	40554	68190	6745.166	47	4
2010	684.022	46171.49	40110.84	68633.17	2945.38	46	3
2011	635	42862.5	35705.51	73038.49	4244.106	39	4
2012	1086.104	73312.02	59742.76	49001.25	9353.525	80	13
2013	873.252	58944.51	53600.97	55143.03	944.9125	67	2
2014	1197.864	80855.82	68905.03	39838.97	7157.891	85	10
2015	967.232	65288.16	59955.84	48788.16	905.1475	75	4
2016	969.518	65442.47	56300.81	52443.19	4291.595	63	8
2017	1064.768	71871.84	57206.05	51537.95	8853.269	65	6
2018	853.948	57641.49	51079.19	57664.81	1645.159	58	3
2019	977.138	65956.82	55277.64	53466.36	4702.156	67	7
2020	805.18	54349.65	43002.21	65741.79	8245.972	50	8
2021	805.18	54349.65	43002.21	65741.79	8245.972	50	8
2022	855.726	57761.51	52780.47	55963.53	988.1238	64	3
2023	204.978	13836.02	10054.52	98689.48	0	0	0

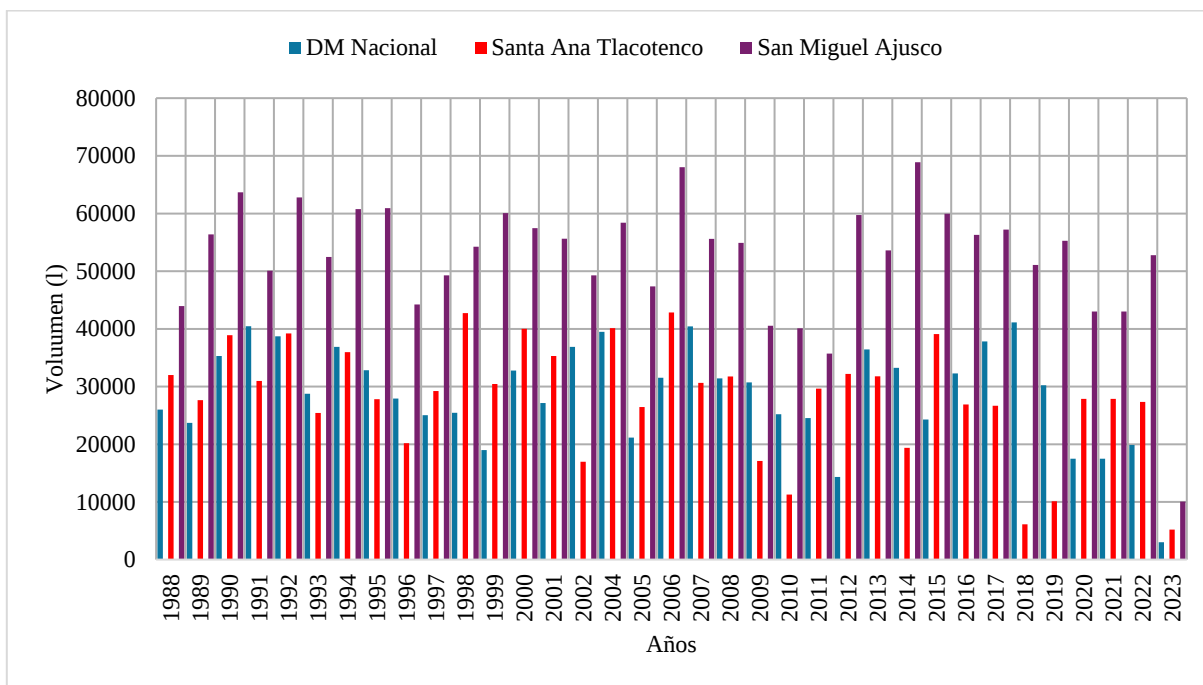
ANEXO AA. Simulación de San Miguel Ajusco para el escenario C.

A continuación, la gráfica de barras muestra el volumen de lluvia aprovechado para el escenario A, agrupando los resultados obtenidos en las tres zonas evaluados



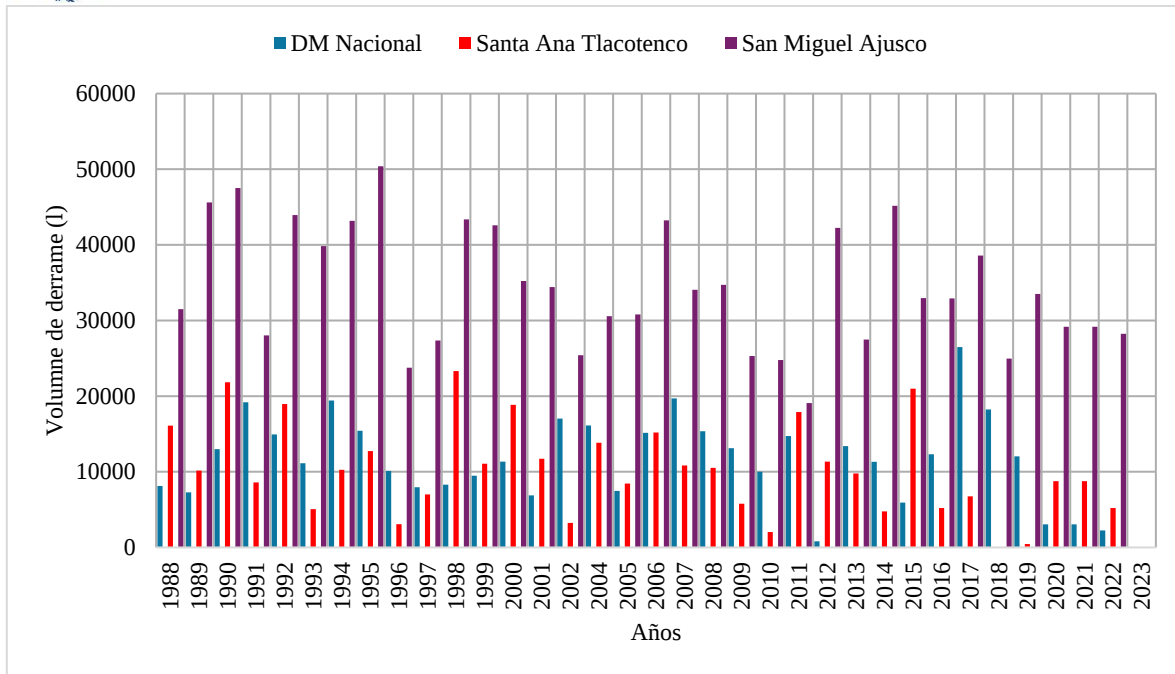
ANEXO BB. Volumen anual captado para el escenario A.

En este histograma se contrasta el volumen aprovechado de precipitación pluvial correspondiente al escenario C, integrando la perspectiva de las zonas analizadas.



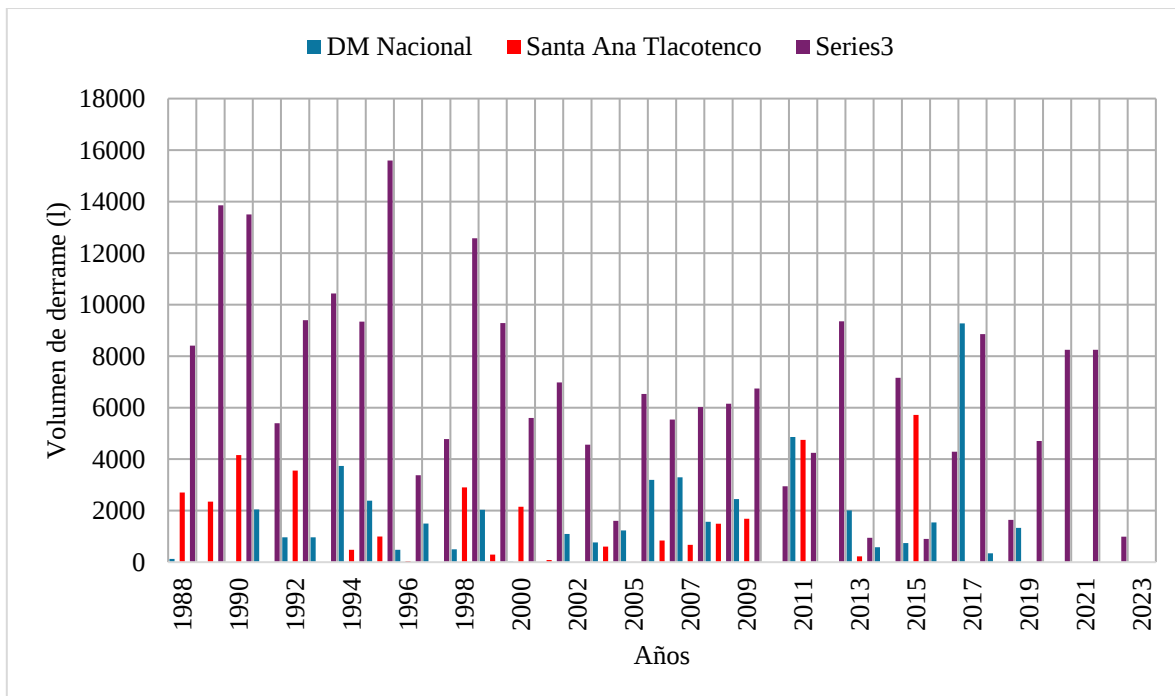
ANEXO CC. Volumen anual captado para el escenario C.

La presente figura representa el volumen de derrame de lluvia registrado en el escenario A, donde se visualiza el comportamiento conjunto de DM Nacional, Santa Ana Tlacotenco y San Miguel Ajusco.



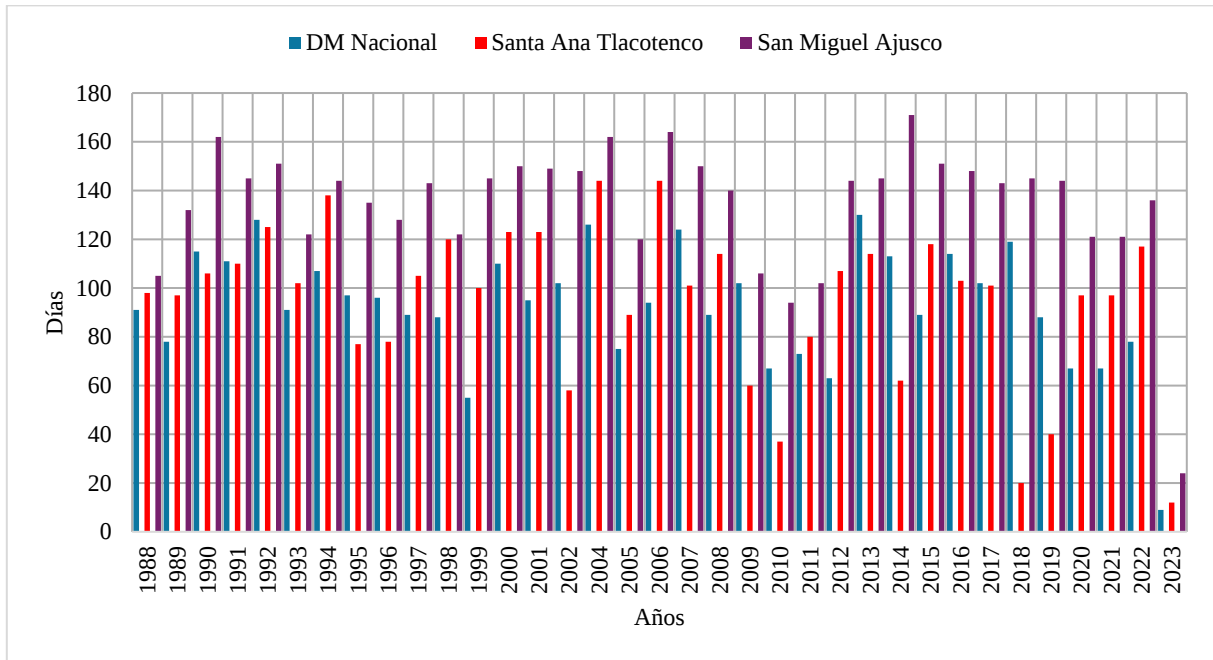
ANEXO DD. Volumen de derrame para el escenario A.

El gráfico a continuación detalla los valores del volumen de derrame pluvial en el escenario c, permitiendo observar las diferencias entre las localidades simuladas.



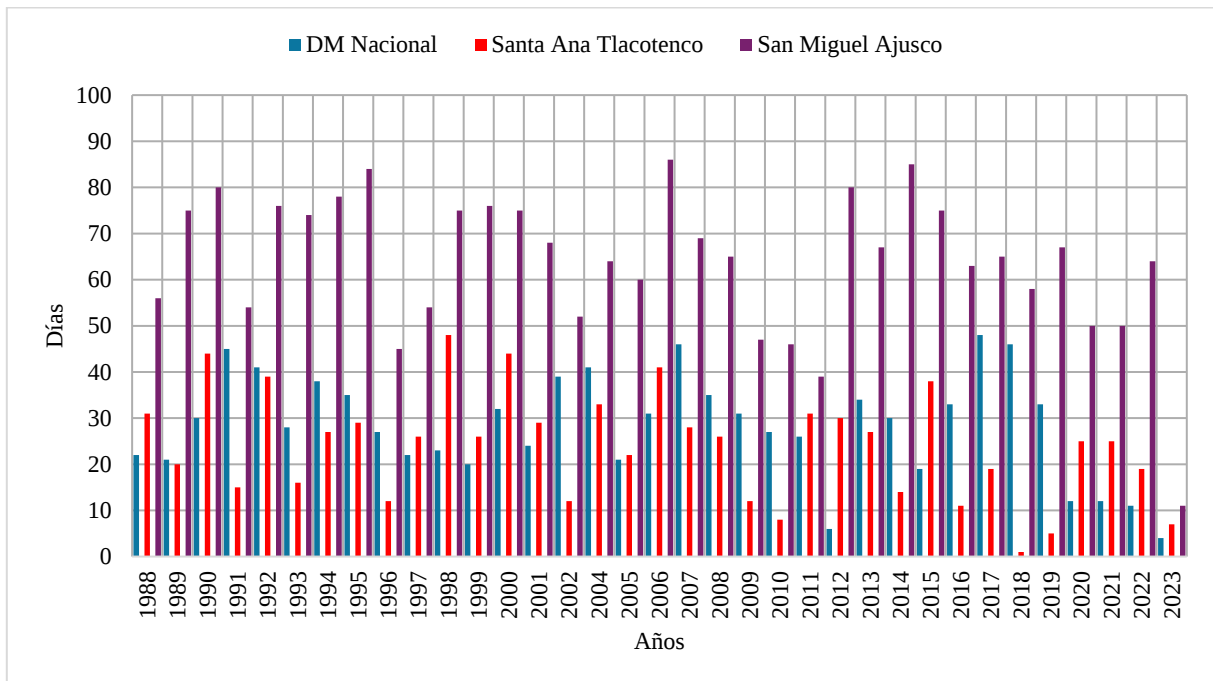
ANEXO EE. Volumen de derrame para el escenario C.

Del mismo modo, se presentan los histogramas de los días en los que se logró una suficiencia en la demanda de cada escenario para el escenario A, reuniendo la información de DM Nacional, Santa Ana Tlacotenco y San Miguel Ajusco.



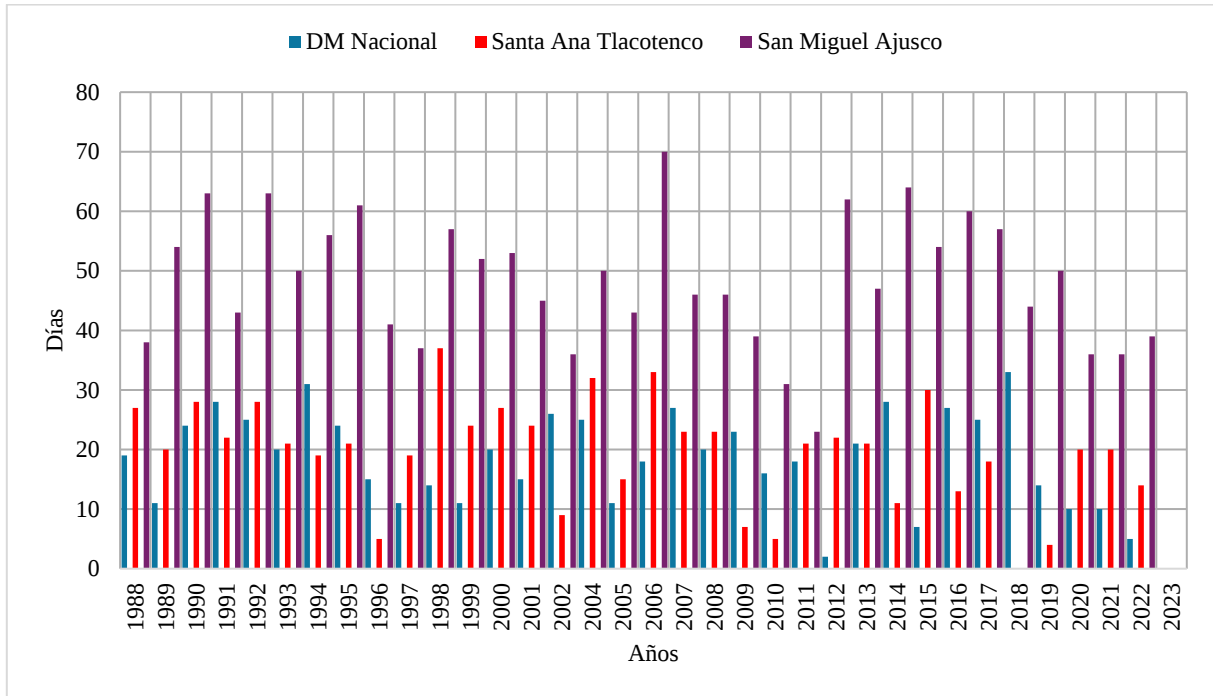
ANEXO FF. Días de demanda cubierta para el escenario A.

Enseguida se presenta la distribución de los días en los que fue posible abastecer la demanda para el escenario C, contrastando simultáneamente las tres localidades de interés.



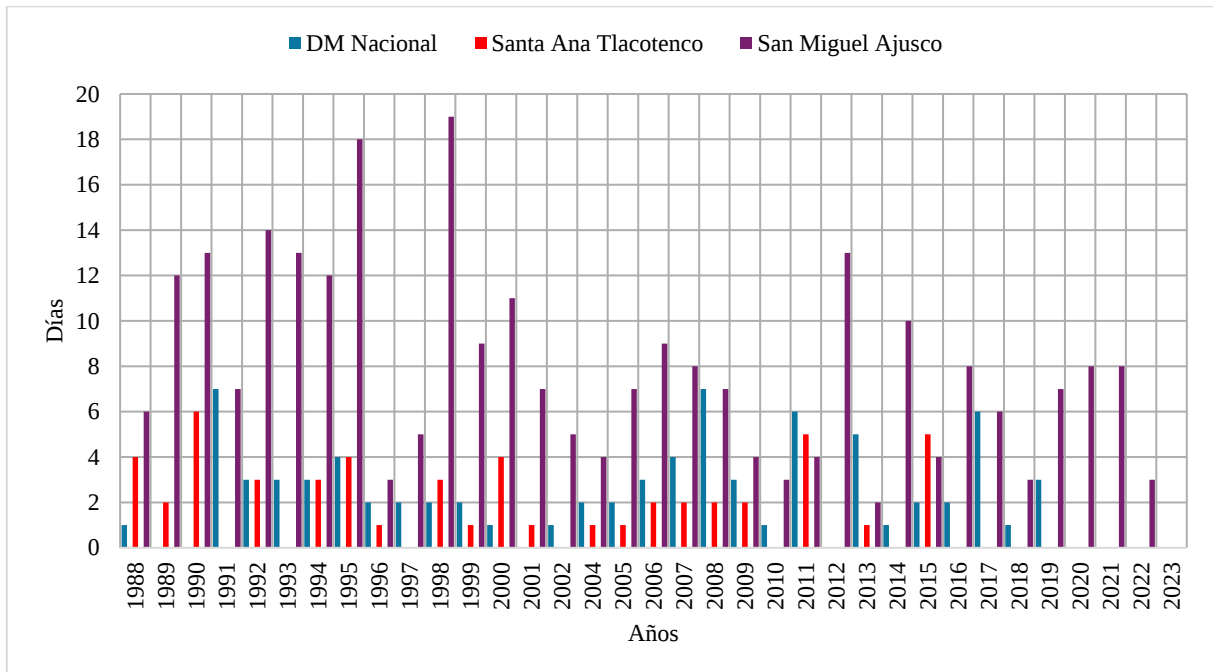
ANEXO GG. Días de demanda cubierta para el escenario C.

Para el escenario A el presente histograma cuantifica el número de días que presentaron derrame, facilitando la comparación visual las zonas analizadas.



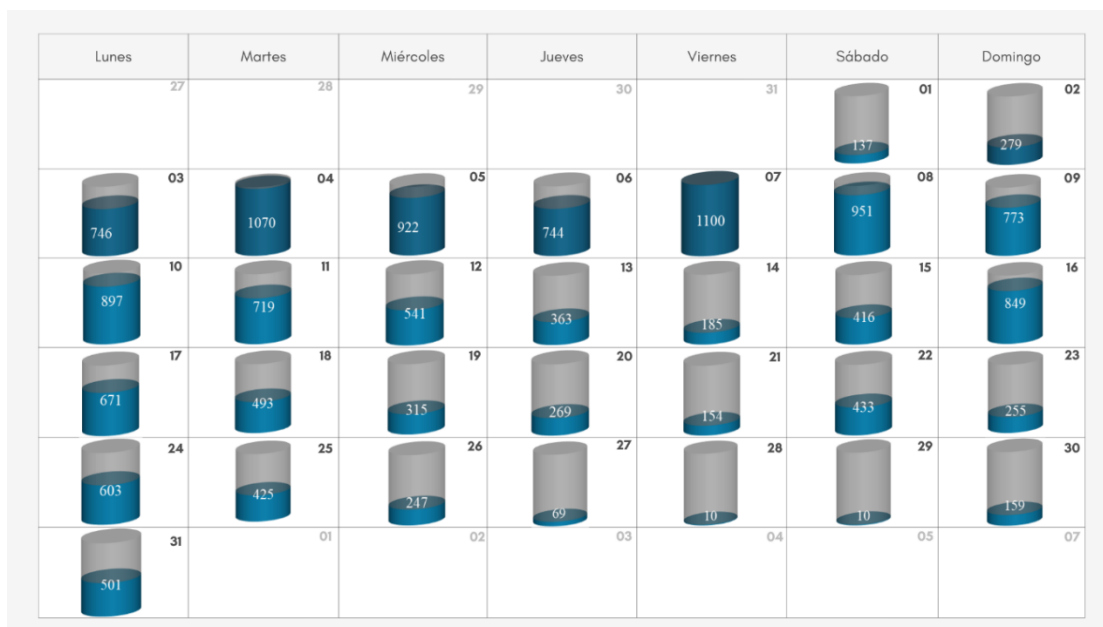
ANEXO HH. Días de derrame para escenario A.

Finalmente, la gráfica adjunta documenta la frecuencia de días con derrame DM Nacional, Santa Ana Tlacotenco y San Miguel Ajusco, mostrando el desempeño respectivo bajo las condiciones de los escenarios y C.



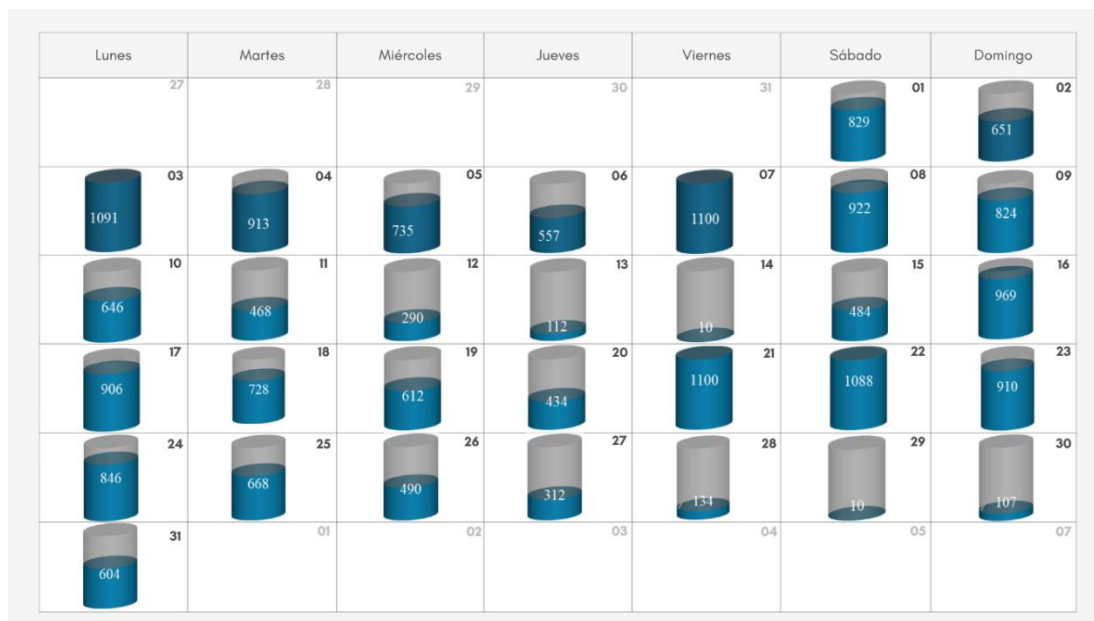
ANEXO II . Días de derrame para escenario C.

La siguiente imagen representa visualmente el nivel de almacenamiento diario en el tanque durante el mes de agosto de 1988 para la zona DM Nacional, operando bajo las condiciones del escenario A.



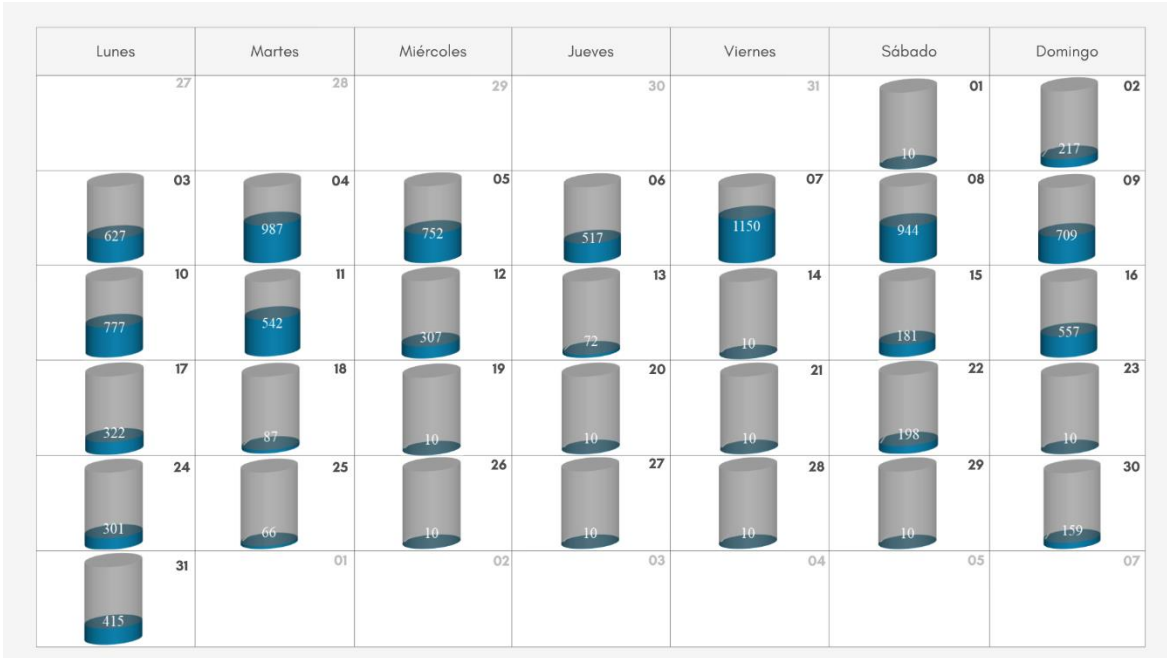
ANEXO JJ. Representación esquemática del llenado del tanque mediante en agosto de 1988 para DM Nacional en el escenario A.

Para Santa Ana Tlacontenco, la presente imagen ejemplifica la evolución diaria del nivel del agua dentro del tanque a lo largo de agosto de 1988, aplicando los parámetros del escenario A.



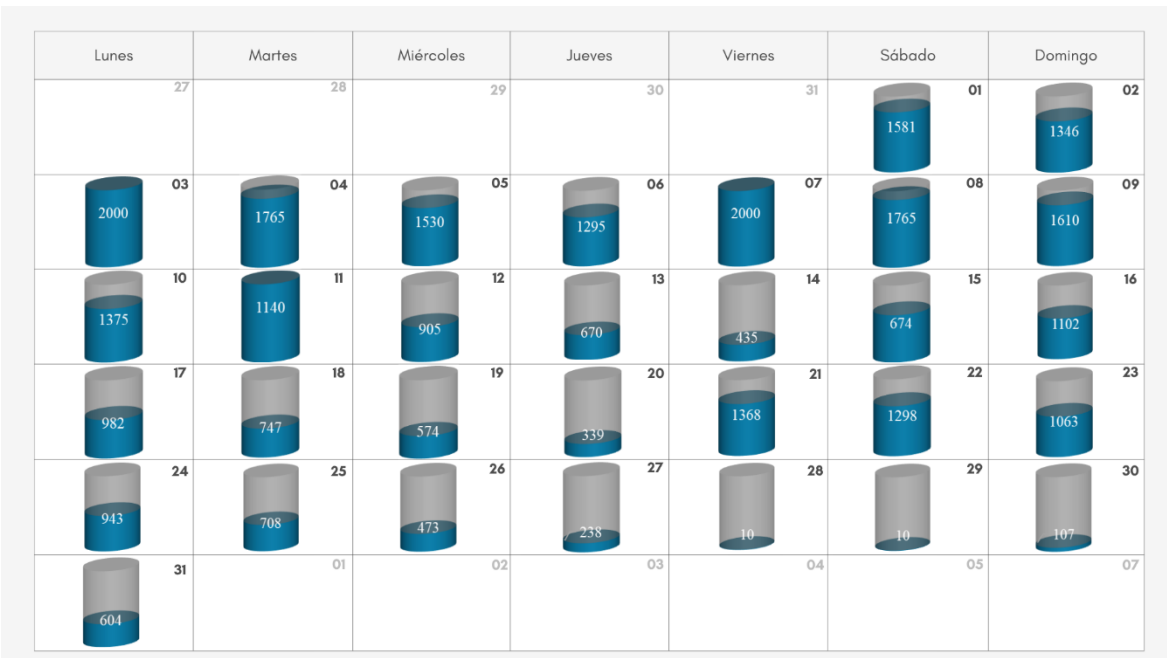
ANEXO KK. Representación esquemática del llenado del tanque mediante en agosto de 1988 para Santa Ana Tlacotenco en el escenario A.

A continuación se muestra una recreación del volumen de agua retenido diariamente en el tanque a lo largo de agosto de 1988, correspondiente a la simulación del escenario B en DM Nacional.



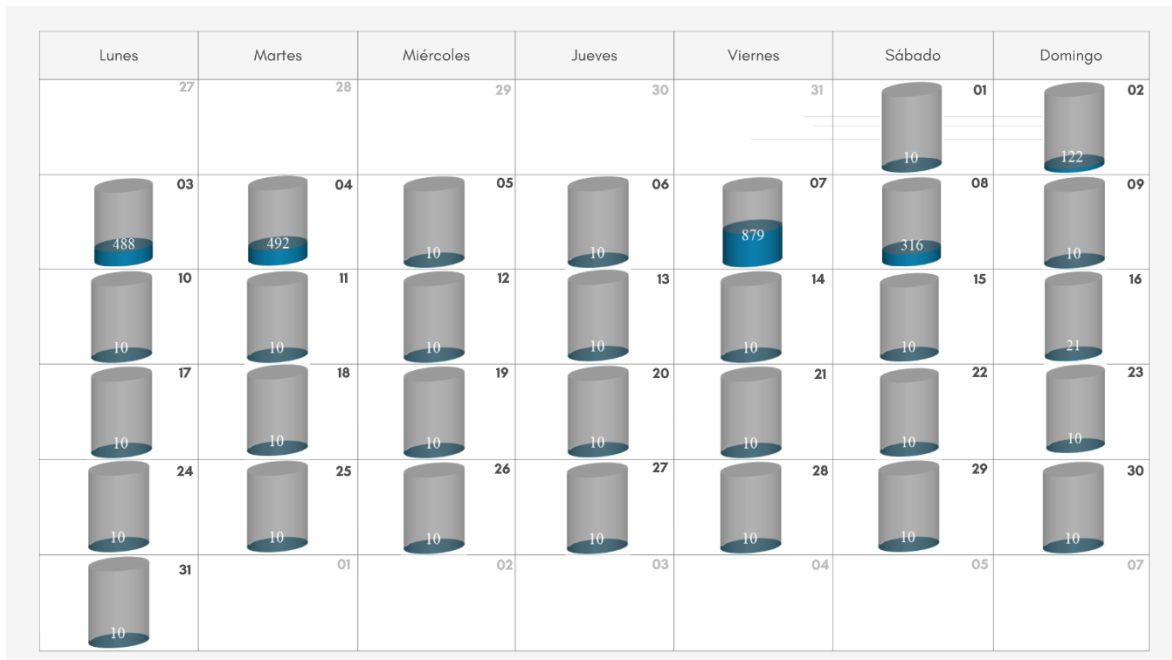
ANEXO LL. Representación esquemática del llenado del tanque mediante en agosto de 1988 para DM Nacional en el escenario B.

El comportamiento visual del volumen captado en el tanque durante el mes de agosto de 1988, bajo las consideraciones del escenario B para Santa Ana Tlacontenco, se exhibe a continuación.



ANEXO MM. Representación esquemática del llenado del tanque mediante en agosto de 1988 para Santa Ana Tlacontenco en el escenario B.

En la figura adjunta se ilustra el volumen del tanque de captación día con día durante agosto de 1988, evaluando el comportamiento del sistema bajo el escenario C en la zona de DM Nacional.



ANEXO NN. Representación esquemática del llenado del tanque mediante en agosto de 1988 para DM Nacional en el escenario C.

Esta representación gráfica proyecta cómo se vería la capacidad de almacenamiento del tanque cada día de agosto de 1988, asumiendo el escenario C en la zona de Santa Ana Tlacotenco.



ANEXO OO. Representación esquemática del llenado del tanque mediante en agosto de 1988 para Santa Ana Tlacotenco en el escenario C.