

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA MEXICALI**

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



“Análisis de la implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible como herramienta para la gestión de riesgos de inundación en Mexicali”

Tesis para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

José Misael Saldaña Lira

Director de Tesis: Dr. Carlos Salazar Briones

Codirector: Dr. José Mizaél Gibert Ruiz

Mexicali, B.C 12 de enero del 2026.

Agradecimientos

A Dios, por permitirme culminar una etapa más de mi vida y por darme la fortaleza necesaria para continuar, aun en los momentos más difíciles del camino, sin dejarme flaquear.

A mis padres, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida. Gracias por todo lo que me han enseñado a lo largo de este camino llamado vida, por nunca dudar de mí, de mis capacidades y de mi potencial, por no juzgar mis etapas y por brindarme siempre su apoyo incondicional. Espero haberme convertido en aquello que alguna vez anhelaron para mí.

A mi hermana, quien merece este reconocimiento tanto como yo, ya que sin su apoyo este logro no habría sido posible. Gracias por acompañarme en las noches de desvelo y por darme las palabras necesarias cuando parecía no haber más que oscuridad.

A mi pareja, con quien espero compartir los logros y recompensas que este título representa en mi vida. Gracias por su apoyo incondicional, comprensión y acompañamiento constante a lo largo de este proceso.

A mi director de tesis, Dr. Carlos Salazar Briones, quien en muchos momentos dejó de ser únicamente un profesor para convertirse en un guía y consejero. Gracias por saber escuchar, por no juzgar, por orientarme desde su experiencia y conocimientos, y por ser el primero en confiar en mí para realizar la maestría bajo su tutela.

A mi codirector de tesis, Dr. José Mizael Ruiz Gibert, quien, con sus amplios conocimientos en el área en la que se enfocó esta investigación, se dio el tiempo de compartir su experiencia y orientación para la correcta realización de este trabajo.

Al Dr. Marcelo Antonio Lomelí Banda, quien fue el primero en confiar en mí al brindarme mi primer empleo como Ingeniero Civil, aun cuando no había concluido la carrera, permitiendo adquirir nuevos conocimientos y experiencia profesional.

Contenido

Capítulo I. Introducción	8
1.1 Planteamiento del problema	8
1.2 Justificación	8
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 Hipótesis	6
1.5 Enfoque general de la tesis	6
1.6 Aportaciones de esta investigación	7
1.7 Alcances y limitaciones	9
1.8 Estructura del documento	10
Capítulo II. Marco teórico y conceptual	12
2.1 Enfoques de gestión pluvial urbana	12
2.2 Evolución del drenaje tradicional a los SUDS	14
2.3 Principios de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible	17
2.3.1 Tipos de SUDS	19
2.3.2 Funcionamiento hidráulico e hidrológico	22
2.3.3 Beneficios ambientales, sociales y económicos	24
2.4 SUDS en zonas áridas y semiáridas	27
2.4.2 Adaptaciones en el contexto mexicano	28
2.5 Gestión del riesgo de inundaciones y resiliencia urbana	30
2.6 Factores institucionales y sociales en la gestión pluvial	31
2.7 Marco normativo mexicano aplicable	33
2.7.1 Políticas nacionales (CONAGUA, SEMARNAT)	34
2.7.2 Normas locales y manuales de Baja California	35
Capítulo III. Metodología	37
3.1 Descripción del área de estudio	37

3.1.1 Localización geográfica y contexto territorial	37
3.1.2 Características físicas del área de estudio	38
3.2 Información base y recopilación de datos	42
3.2.1 Fuentes de información	42
3.2.2 Integración de la información en SIG	43
3.2.3 Organización de datos hidrometeorológicos	44
3.2.4 Base institucional y operativa	44
3.2.5 Proceso de recopilación y depuración de información bibliográfica	44
3.3 Análisis hidrológico	47
3.3.1 Obtención y depuración de datos de precipitación	47
3.3.2 Aplicación del factor de corrección	48
3.3.3 Período de retorno empírico y probabilidad de excedencia	52
3.3.4 Cálculo de parámetros estadísticos	55
3.3.5 Análisis de distribuciones de probabilidad	56
3.3.6 Resumen de la prueba del error estándar y selección del método	71
3.3.7 Relación entre la precipitación de una hora y 24 horas	74
3.3.8 Determinación de curvas IDF por el método de Chen-Lung y F. C. Bell	75
3.4 Análisis hidráulico	86
3.4.1 Caracterización del sistema de drenaje pluvial existente	87
3.4.2 Evaluación de la capacidad hidráulica	89
3.5 Propuesta de SUDS	93
3.5.1 Selección de tipologías aplicables	94
3.5.2 Parámetros hidráulicos e hidrológicos	96
3.5.3 Integración al modelo hidráulico (EPA SWMM)	100
3.6 Escenarios de simulación	102
3.6.1 Escenario base (sin SUDS)	102
3.6.2 Escenario con SUDS	107
3.7 Evaluación de resultados	111
3.7.1 Reducción de caudal pico	111
3.7.2 Volumen infiltrado o retenido	113
3.7.3 Análisis de eficiencia y factibilidad técnica	115
3.8 Limitaciones del estudio	115
3.8.1 Limitaciones en la información de base	116

3.8.2 Limitaciones en la modelación hidrológica e hidráulica	116
3.8.3 Limitaciones en la validación y calibración	116
3.8.4 Limitaciones en la implementación práctica de SUDS	117
3.8.5 Alcance y proyecciones	118
Capítulo IV. Resultados y discusión	119
4.1 Diagnóstico hidrológico e hidráulico de la zona	119
4.2 Comportamiento del sistema pluvial actual	120
4.3 Resultados del modelo con SUDS	122
4.4 Comparación entre escenarios	124
4.5 Discusión de resultados en el contexto de Mexicali	126
Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones	129
5.1 Conclusiones generales	129
5.2 Recomendaciones técnicas	130
5.3 Perspectivas para investigaciones futuras	132
Referencias bibliográficas	134

Índice de tablas

Tabla 1. Comparación entre infraestructura gris y Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)	17
Tabla 2. Tabla de matriz para recopilación de resultados obtenidos	47
Tabla 3. Precipitación máxima diaria con factor de corrección	51
Tabla 4. Tabla de datos de estación meteorológica con periodos empíricos y factores de corrección	55
Tabla 5. Tabla de distribución con datos empíricos por distribución Gumbel tipo 1	58
Tabla 6. Tabla de precipitación de diseño 24h con método Gumbel	58
Tabla 7. Tabla de distribución con datos empíricos exponencial con parámetro beta	60
Tabla 8. Tabla de precipitación de diseño 24h con método exponencial con parámetro beta	60
Tabla 9. Tabla de distribución gamma con datos empíricos	64
Tabla 10. Precipitación de diseño 24h con distribución gamma	64
Tabla 11. Tabla de distribución por distribución normal con datos empíricos	68
Tabla 12. Precipitación de diseño 24h con distribución normal	69
Tabla 13. Tabla de distribución por distribución normal con datos empíricos	70
Tabla 14. Resumen de precipitaciones máximas en 24 hrs por distintos métodos	70
Tabla 15. Tabla de resumen de precipitaciones máximas en 24 hrs por distintos métodos	71
Tabla 16. Resumen de precipitaciones máximas en 24 hrs por distintos métodos	72
Tabla 17. Resumen de precipitaciones máximas en 24 hrs por distintos métodos	73
Tabla 18. Resumen de precipitaciones máximas en 24 hrs por distintos métodos	73
Tabla 19. Tabla resumen de intensidades para curvas I-D-Tr	75
Tabla 20. Tabla resumen de precipitaciones para curvas I-D-Tr	76
Tabla 21. Hietograma Tr 10 años	79
Tabla 22. Hietograma Tr 25 años	81
Tabla 23. Hietograma Tr 50 años	82
Tabla 24. Resumen de la capacidad hidráulica de los colectores pluviales para TR = 10, 25 y 50 años	

Tabla 25. Tipologías viables para la zona urbana de Mexicali	91
Tabla 26. Comparación de caudales pico en nodos críticos del sistema pluvial para escenarios sin SUDS y con celdas de bioretención.	109
Tabla 27. Resumen de la capacidad hidráulica de los colectores pluviales para TR = 10, 25 y 50 años	110

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio en el municipio de Mexicali, Baja California	38
Figura 2. Topografía del municipio de Mexicali y ubicación del área de estudio	39
Figura 3. Red hidrológica natural del área de estudio	40
Figura 4. Distribución de los tipos de suelo en el área de estudio	41
Figura 5. Diagrama de flujo para recopilación y depuración de información bibliográfica	46
Figura 6. Gráfica de dispersión de método ajuste	71
Figura 7. Gráfica de curvas I-D-Tr	75
Figura 8. Gráfica de curvas I-D-Tr	77
Figura 9. Hietograma de 1 hora de lluvia con periodo de retorno de 10 años	80
Figura 10. Hietograma de 1 hora de lluvia con periodo de retorno de 25 años	81
Figura 11. Hietograma de 1 hora de lluvia con periodo de retorno de 50 años	83
Figura 12. Red de drenaje pluvial existente en el área de estudio y localización de elementos hidráulicos principales.	85
Figura 13. Esquema de la red de drenaje pluvial del área de estudio y elementos hidráulicos modelados	87
Figura 14. Esquema conceptual de tipologías SUDS seleccionadas (biorretención, zanja de infiltración y pavimento permeable)	92
Figura 15. Integración de SUDS en el modelo hidráulico EPA SWMM.	98
Figura 16. Instante de saturación total (100 % de llenado) en tramos críticos de la red pluvial simulada Tr=10 años	100
Figura 17. Perfil longitudinal del colector crítico durante el evento de lluvia de diseño Tr= 10 años	100
Figura 18. Instante de saturación total (100 % de llenado) en tramos críticos de la red pluvial simulada Tr=25 años	101
Figura 19. Perfil longitudinal del colector crítico durante el evento de lluvia de diseño Tr= 25 años	101
Figura 20. Instante de saturación total (100 % de llenado) en tramos críticos de la red pluvial simulada	

Tr= 50 años	102
Figura 21. Perfil longitudinal del colector crítico durante el evento de lluvia de diseño Tr= 50 años	102
Figura 22. Instante de saturación total (100 % de llenado) en tramos críticos de la red pluvial simulada con SUDS Tr=10 años	104
Figura 23. Perfil longitudinal del colector crítico durante el evento de lluvia de diseño con SUDS Tr= 10 años	104
Figura 24. Instante de saturación total (100 % de llenado) en tramos críticos de la red pluvial simulada con SUDS Tr=25 años	105
Figura 25. Perfil longitudinal del colector crítico durante el evento de lluvia de diseño con SUDS Tr= 25 años	105
Figura 26. Instante de saturación total (100 % de llenado) en tramos críticos de la red pluvial simulada con SUDS Tr= 50 años	106
Figura 27. Perfil longitudinal del colector crítico durante el evento de lluvia de diseño con SUDS Tr= 50 años	106

Capítulo I. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

El rápido crecimiento urbano y las estrategias de planificación poco sostenibles han provocado un notable aumento en las superficies impermeables, reduciendo al mismo tiempo las áreas naturales y agrícolas disponibles (Tendero Peiró, 2018). Esta transformación del territorio ha incrementado la frecuencia y severidad de las inundaciones en zonas urbanas, particularmente cuando los sistemas de drenaje pluvial no logran evacuar el agua de lluvia de manera eficiente. Dichos eventos suelen presentarse después de lluvias intensas o prolongadas, en las que el volumen de escorrentía supera la capacidad de conducción de los sistemas pluviales existentes (Estrada Díaz, 2018).

☐A nivel mundial, las inundaciones urbanas representan una de las principales amenazas para la seguridad humana y el desarrollo económico. Las pérdidas materiales, la afectación a la salud pública y la interrupción de servicios básicos son consecuencias cada vez más frecuentes en las ciudades modernas, especialmente en aquellas donde la infraestructura de drenaje no ha crecido al mismo ritmo que la expansión urbana.

☐En México, esta problemática se refleja en la mayoría de los centros urbanos que han experimentado una urbanización acelerada. Las condiciones climáticas, el déficit en mantenimiento de la infraestructura pluvial y la escasa planeación territorial generan un escenario crítico en el manejo del agua pluvial. En regiones semiáridas como Mexicali, las lluvias son esporádicas, pero de alta intensidad, lo que provoca que los suelos, con baja capacidad de infiltración, y las superficies pavimentadas generan escurrimientos concentrados que sobrepasan la capacidad hidráulica de las redes existentes (Sagastume Puerta et al., 2022).

De acuerdo con Ley García et al., (2011), la ciudad de Mexicali ha sufrido históricamente afectaciones por fallos en su infraestructura hidráulica y deficiencias en la gestión del sistema de drenaje pluvial. Ante ello, las soluciones tradicionales se han centrado en sobredimensionar tuberías o ampliar colectores, sin considerar estrategias de manejo sustentable que reducen la escorrentía desde la fuente. Sin embargo, diversos estudios recientes han demostrado que estas soluciones convencionales resultan insuficientes ante las nuevas condiciones urbanas y climáticas, por lo que se requiere un enfoque alternativo basado en la infraestructura verde.

Las inundaciones pluviales urbanas constituyen, además, un riesgo socioambiental estrechamente vinculado con el cambio climático y la deficiente gestión de residuos. En México, estas condiciones afectan tanto a grandes urbes como a localidades en desarrollo, donde los sistemas de drenaje resultan incapaces de manejar los escurrimientos y proteger la infraestructura y la salud de la población (Rodríguez Varela et al., 2021). En el caso particular de Baja California, los efectos se agravan en los centros urbanos debido al crecimiento acelerado, la insuficiencia del sistema pluvial y la alta impermeabilización del suelo (Phonphoton & Pharino, 2019) .

A ello se suma la acumulación de residuos sólidos urbanos (RSU) en calles, canales y rejillas, los cuales reducen la capacidad hidráulica del sistema y provocan taponamientos que prolongan el tiempo de desalojo del agua. Esta situación afecta directamente a viviendas, vialidades y equipamientos urbanos, generando pérdidas económicas y daños sociales considerables (Mora Reyes, 2004). Pese a la evidencia técnica que demuestra esta relación, persisten limitaciones en la educación ambiental, el mantenimiento preventivo y la coordinación interinstitucional, lo que mantiene elevado el costo económico y ambiental asociado a las lluvias intensas (Zambrano et al., 2018).

En este contexto, la ciudad de Mexicali enfrenta el desafío de transitar hacia un modelo de gestión pluvial más sostenible, que considere la aplicación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) como herramientas complementarias al sistema existente. Estos sistemas permiten manejar la escorrentía desde su origen, reducir el

volumen de agua superficial, mejorar la infiltración y mitigar los riesgos de inundación en zonas vulnerables. La identificación de su factibilidad técnica y operativa en entornos áridos representa una necesidad urgente para fortalecer la resiliencia urbana frente a eventos pluviales extremos.

1.2 Justificación

El manejo de las aguas pluviales en entornos urbanos representa un reto técnico y ambiental de gran relevancia. Tradicionalmente, los sistemas de drenaje se han diseñado con base en soluciones de infraestructura gris, centradas en la rápida evacuación del agua mediante colectores y canales. Sin embargo, este enfoque no considera la sostenibilidad a largo plazo ni la capacidad de adaptación ante los efectos del cambio climático, que intensifica los eventos de lluvia extrema y eleva los riesgos de inundación (Sagastume Puerta et al., 2022; Zhou, 2014a).

Frente a esta problemática, surge la necesidad de implementar estrategias innovadoras que promuevan una gestión pluvial más resiliente y sustentable. Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) han demostrado ser una alternativa eficaz para reducir la escorrentía superficial, mejorar la calidad del agua y restablecer el equilibrio hidrológico en zonas urbanas (Olivares-Cerpa et al., 2022). Estos sistemas, basados en la infraestructura verde y soluciones naturales, buscan manejar el agua desde su punto de origen, favoreciendo su infiltración y retención temporal.

En contextos áridos y semiáridos, como el de Mexicali, la implementación de los SUDS representa un desafío aún mayor, debido a las condiciones extremas de temperatura, baja precipitación anual y suelos con limitada capacidad de infiltración. No obstante, estas mismas condiciones ofrecen la oportunidad de adaptar tecnologías sostenibles que reduzcan la vulnerabilidad urbana frente a lluvias intensas y aprovechen mejor el recurso pluvial. Adaptar los SUDS al entorno árido contribuye no solo a disminuir las inundaciones, sino también a la recarga de acuíferos y al control de contaminantes

superficiales (Tendero Peiró, 2018).

En Mexicali, la infraestructura pluvial existente se caracteriza por una cobertura parcial, deficiente mantenimiento y una creciente obstrucción causada por residuos sólidos urbanos. Esta combinación de factores limita la capacidad de conducción del sistema y genera daños recurrentes durante los periodos de lluvia (Ley García et al., 2011a). Por ello, la incorporación de los SUDS como herramienta complementaria a la infraestructura existente permitiría mejorar la eficiencia hidráulica, reducir los caudales pico y prolongar la vida útil de las redes pluviales (Sagastume Puerta et al., 2022).

Además de sus beneficios técnicos, los SUDS tienen un impacto directo en la sostenibilidad urbana al promover la creación de espacios verdes, la reducción del efecto de isla de calor y la mejora del paisaje urbano. Estos efectos contribuyen a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente al ODS 6 “Agua limpia y saneamiento” y al ODS 11 “Ciudades y comunidades sostenibles”, fortaleciendo la resiliencia climática y la gobernanza ambiental local (ONU HÁBITAT, 2020) .

Desde el punto de vista académico y técnico, esta investigación justifica su desarrollo al proporcionar una metodología integrada que combina evaluación multicriterio y simulación hidrológica mediante el software EPA SWMM, adaptada específicamente a condiciones áridas. Esta combinación permite determinar la factibilidad técnica y operativa de distintos tipos de SUDS, proporcionando evidencia cuantitativa que puede orientar la toma de decisiones en instituciones como la CESPMM y los organismos municipales de planeación.

Por tanto, el presente trabajo busca responder a una necesidad urgente en la gestión pluvial de Mexicali: desarrollar soluciones sostenibles, técnicas y económicamente viables que fortalezcan la resiliencia urbana y mitiguen los impactos derivados de las inundaciones. La aplicación de SUDS, adecuadamente evaluados y adaptados, representa un paso esencial hacia una infraestructura más eficiente, verde y socialmente responsable.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la factibilidad técnica y operativa de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) como medida de mitigación del riesgo de inundación en la ciudad de Mexicali, Baja California, mediante la aplicación de una metodología multicriterio y simulación hidrológica con el software EPA SWMM, con el fin de identificar las alternativas más adecuadas para condiciones áridas y semiáridas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar los principales factores físicos, técnicos y operativos que influyen en la implementación de SUDS en contextos áridos y semiáridos, considerando variables como tipo de suelo, pendiente, topografía y vegetación local.
- Revisar la literatura técnica y científica disponible sobre la aplicación de SUDS en diferentes regiones del mundo, con especial énfasis en experiencias adaptadas a climas áridos .
- Diseñar y aplicar una metodología de evaluación basada en criterios de factibilidad técnica, ambiental y operativa, empleando una escala cualitativa (3–2–1–0) para jerarquizar los tipos de SUDS más viables para Mexicali.
- Simular el comportamiento hidrológico del sistema pluvial en un área piloto de Mexicali mediante el programa EPA SWMM, comparando escenarios con y sin la implementación de SUDS, para analizar su efecto sobre los caudales pico, volúmenes de escorrentía y tiempos de concentración.
- Evaluar la contribución potencial de los SUDS al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 6 y 11), y su integración con la gestión institucional local para fortalecer la resiliencia urbana.

1.4 Hipótesis

Se plantea que los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) constituyen una alternativa técnica y operativamente factible para reducir los caudales pico y el volumen de escorrentía en áreas urbanas de climas áridos, como la ciudad de Mexicali, contribuyendo así a mitigar el riesgo de inundación y mejorar la resiliencia urbana.

La hipótesis central de esta investigación sostiene que la incorporación de SUDS, seleccionados y evaluados bajo criterios de factibilidad técnica, ambiental y operativa, puede mejorar significativamente el desempeño del sistema pluvial existente en zonas vulnerables, incluso bajo escenarios de tormenta de alta intensidad ($Tr = 10, 25, 50$ años).

Asimismo, se considera que los SUDS —al manejar el agua desde su origen, mediante infiltración, almacenamiento temporal y retención controlada— pueden optimizar la eficiencia hidráulica del sistema de drenaje y reducir la dependencia de infraestructura gris tradicional (Olivares-Cerpa et al., 2022; Sagastume Puerta et al., 2022).

Por último, se hipotetiza que la aplicación de una metodología integral basada en evaluación multicriterio y simulación hidrológica permitirá determinar con precisión los tipos de SUDS más adecuados para Mexicali, estableciendo un modelo replicable en otras ciudades con condiciones climáticas similares del noroeste mexicano.

1.5 Enfoque general de la tesis

El presente trabajo de investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto, que integra métodos cualitativos y cuantitativos para el análisis de la gestión pluvial en entornos urbanos áridos. En el plano cualitativo, se consideran aspectos institucionales, operativos y sociales relacionados con la gestión de la infraestructura pluvial, así como la percepción de los actores responsables de su mantenimiento. En el componente cuantitativo, se

evalúa el desempeño técnico e hidráulico de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) mediante herramientas de simulación hidrológica y un análisis multicriterio que permite determinar su factibilidad y adaptabilidad a las condiciones de Mexicali.

Metodológicamente, la tesis adopta una estructura en seis fases de análisis:

1. Recopilación de información y diagnóstico del área de estudio;
2. Revisión bibliográfica sistemática de investigaciones sobre SUDS;
3. Selección de variables y criterios técnicos de evaluación;
4. Análisis de factibilidad técnica y operativa;
5. Jerarquización de alternativas mediante un método multicriterio;
6. Simulación hidrológica con el programa EPA SWMM.

Este enfoque secuencial permite vincular la teoría con la práctica, integrando la evaluación conceptual de los SUDS con su desempeño hidráulico modelado bajo condiciones reales.

Desde una perspectiva territorial, la investigación se centra en un área piloto representativa de la ciudad de Mexicali, donde se identifican problemáticas de inundación recurrente asociadas a la deficiente capacidad del sistema pluvial, la acumulación de residuos sólidos urbanos y la escasa infiltración del suelo. La selección de este sitio permite validar de manera aplicada el potencial de los SUDS para reducir la escorrentía y mitigar los efectos de lluvias intensas, en un contexto caracterizado por baja precipitación anual y elevada impermeabilización.

1.6 Aportaciones de esta investigación

El desarrollo de esta tesis ofrece un conjunto de aportaciones técnicas, metodológicas e institucionales orientadas a fortalecer la gestión pluvial en contextos áridos, como el de la ciudad de Mexicali. En primer lugar, contribuye a la generación de conocimiento aplicado sobre la viabilidad técnica de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), un campo aún poco explorado en regiones semiáridas del noroeste

mexicano. La investigación demuestra que es posible adaptar las soluciones basadas en la naturaleza tradicionalmente implementadas en climas templados o húmedos, a condiciones extremas mediante criterios de diseño específicos y evaluación técnica contextualizada.

Desde el punto de vista metodológico, esta tesis desarrolla una rúbrica multicriterio que permite evaluar la factibilidad técnica, operativa y ambiental de distintos tipos de SUDS mediante una escala de valoración de 3–2–1–0. Esta herramienta facilita la comparación entre alternativas y orienta la toma de decisiones para su selección e implementación en áreas urbanas. Su valor radica en que integra parámetros técnicos (infiltración, mantenimiento, capacidad hidráulica) con factores sociales e institucionales, generando un marco replicable para futuras investigaciones o proyectos de planeación urbana.

Una tercera aportación se relaciona con la simulación hidrológica aplicada mediante EPA SWMM, herramienta que permite cuantificar los beneficios de los SUDS sobre la red pluvial existente. La modelación comparativa entre escenarios con y sin SUDS demuestra reducciones significativas en caudal pico y volumen de escorrentía, evidenciando el potencial de estas soluciones para mejorar la resiliencia de Mexicali ante lluvias intensas. Este enfoque técnico constituye un avance importante en la comprensión del comportamiento hidráulico urbano en regiones áridas.

En el ámbito institucional, la tesis aporta un diagnóstico integral sobre la gestión del drenaje pluvial en Mexicali, basado en entrevistas y análisis documental de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM). Este diagnóstico permite identificar los principales retos técnicos y administrativos que enfrenta la institución, como la insuficiente capacidad de mantenimiento, la acumulación de residuos sólidos urbanos, la falta de coordinación entre dependencias y la limitada participación ciudadana en la gestión del agua pluvial.

Finalmente, en el plano ambiental y social, el estudio refuerza el vínculo entre la gestión sostenible del agua pluvial, la educación ambiental y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Al promover el uso de SUDS, se impulsa la creación de espacios

verdes, la reducción de contaminación difusa y la mejora del entorno urbano, contribuyendo directamente a los ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles).

1.7 Alcances y limitaciones

El presente trabajo se centra en el análisis técnico y operativo de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) como herramienta para la gestión pluvial en la ciudad de Mexicali, Baja California. El alcance principal consiste en evaluar la factibilidad técnica y funcional de distintos tipos de SUDS adaptados a condiciones áridas y semiáridas, considerando su integración con la infraestructura pluvial existente y su contribución a la reducción del riesgo de inundación.

La investigación abarca la aplicación de una metodología multicriterio que integra variables técnicas (infiltración, pendiente, tipo de suelo), ambientales (eficiencia en la retención y recarga) y operativas (mantenimiento, costo, accesibilidad). Asimismo, incluye la simulación hidrológica mediante el software EPA SWMM, enfocada en un área piloto de Mexicali caracterizada por alta vulnerabilidad ante lluvias intensas. Esta simulación permite comparar escenarios con y sin la incorporación de SUDS, cuantificando los beneficios hidráulicos derivados de su implementación.

En el plano institucional, el alcance incluye la elaboración de un diagnóstico operativo de la CESP, identificando los principales retos que enfrenta la gestión pluvial local. Entre ellos destacan el mantenimiento limitado de la red, la obstrucción causada por residuos sólidos urbanos y la necesidad de fortalecer la coordinación interinstitucional. Este componente complementa el análisis técnico al ofrecer una perspectiva real del contexto operativo en el que podrían implementarse los SUDS.

Sin embargo, la investigación presenta limitaciones inherentes al alcance temporal y de datos disponibles. Los registros hidrometeorológicos utilizados provienen de estaciones de la CONAGUA, los cuales, aunque representativos, no abarcan series de largo plazo con alta resolución temporal. Asimismo, la calibración del modelo EPA SWMM

se realiza con base en información secundaria y condiciones aproximadas de campo, debido a la falta de monitoreo directo de escurrimientos en el área de estudio.

Otra limitación importante corresponde a la evaluación económica de los SUDS, la cual se considera fuera del alcance de esta tesis. Si bien se reconocen los beneficios económicos derivados de la mitigación de daños por inundaciones y del ahorro en infraestructura gris, el análisis de costos y beneficios requiere información específica sobre precios locales de materiales, mantenimiento y disponibilidad de mano de obra, aspectos que se proponen para estudios futuros.

Finalmente, el estudio se delimita a una escala urbana y piloto, por lo que los resultados obtenidos no deben generalizarse directamente a todo el municipio de Mexicali sin un análisis posterior de replicabilidad. No obstante, la metodología desarrollada y los criterios técnicos definidos constituyen una base sólida para su aplicación en otras colonias con características hidrológicas y urbanas similares.

1.8 Estructura del documento

La presente tesis se compone de seis capítulos principales, además de anexos que complementan el análisis técnico, metodológico e institucional. Cada capítulo aborda una etapa específica del proceso de investigación, garantizando la coherencia entre los objetivos planteados, la metodología aplicada y los resultados obtenidos.

El Capítulo I, “Introducción”, presenta el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos, la hipótesis, el enfoque metodológico general, las aportaciones, alcances y limitaciones del estudio. Su propósito es contextualizar la problemática de las inundaciones urbanas en Mexicali y establecer las bases conceptuales que sustentan la necesidad de implementar Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) como medida de mitigación.

El Capítulo II, “Marco teórico y conceptual”, desarrolla los fundamentos teóricos sobre la gestión pluvial urbana, la evolución del drenaje tradicional hacia los SUDS, sus principios, tipos y componentes, así como su relación con los Objetivos de Desarrollo

Sostenible (ODS). También incluye una revisión de experiencias internacionales y nacionales relevantes, con énfasis en climas áridos y semiáridos, y un análisis del marco normativo mexicano aplicable.

El Capítulo III, “Contexto de estudio”, describe las características físicas, ambientales y socioeconómicas de la ciudad de Mexicali, así como la selección del área piloto de análisis. Se incluye un diagnóstico institucional de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM) y un resumen de las problemáticas operativas vinculadas con los residuos sólidos urbanos y la red pluvial.

El Capítulo IV, “Metodología”, detalla el enfoque y las fases metodológicas empleadas en la investigación. Se explican los criterios técnicos y operativos para la evaluación de SUDS, la aplicación del método multicriterio y el procedimiento de simulación hidrológica con el software EPA SWMM. Este capítulo constituye el núcleo técnico del trabajo, ya que define las herramientas utilizadas para evaluar la efectividad de los SUDS en condiciones reales.

El Capítulo V, “Resultados y discusión”, presenta los hallazgos principales de la investigación. Se exponen los resultados de la evaluación técnica, los escenarios simulados con y sin SUDS, y el análisis comparativo entre las alternativas seleccionadas. Además, se incluyen los resultados del diagnóstico institucional y su relación con la implementación de los SUDS, generando una discusión integrada entre los aspectos técnicos, ambientales y sociales.

Finalmente, el Capítulo VI, “Conclusiones y recomendaciones”, sintetiza los aportes más relevantes del estudio y plantea recomendaciones técnicas e institucionales para fortalecer la gestión del drenaje pluvial en Mexicali. Asimismo, se sugieren líneas futuras de investigación orientadas al monitoreo en campo, la evaluación económica de SUDS y la replicabilidad del modelo en otras ciudades del noroeste mexicano.

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1 Enfoques de gestión pluvial urbana

En los últimos años, las estrategias de planificación urbana y otras dinámicas han provocado un notable aumento en las superficies impermeables, al tiempo que han reducido los espacios naturales y agrícolas (Tendero Peiró, 2018). Es común observar inundaciones en áreas con alta densidad poblacional cuando, tras lluvias intensas o prolongadas, el sistema de drenaje no puede evacuar el agua pluvial, o cuando el volumen de escorrentía que fluye hacia ríos y canales supera su capacidad (Estrada Díaz, 2018).

Las inundaciones se consideran una de las mayores causas de pérdidas tanto humanas como económicas a nivel global. Por ejemplo, en el verano de 2021, Alemania y Bélgica sufrieron severas inundaciones que provocaron cerca de 180 víctimas fatales y generaron daños económicos superiores a los 30,000 millones de euros (Tendero Peiró, 2018). Entre los años 2000 y 2020, las inundaciones afectaron aproximadamente a 300 millones de personas en todo el mundo, causando pérdidas económicas que se calculan en 655,000 millones de dólares, lo cual refleja el impacto devastador de estos fenómenos naturales a lo largo de dos décadas (Tellman et al., 2021).

Por su parte, en México se estima que cada año se generan pérdidas por 230 millones de dólares debido a inundaciones (Forbes, 2017). De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, la fisiografía y las condiciones climáticas del país propician la aparición de fenómenos hidrometeorológicos, como las inundaciones, que han ocurrido en México desde tiempos remotos (Cantú-Martínez, 2017).

En el caso particular de la ciudad de Mexicali, Baja California, históricamente se han registrado inundaciones tanto por fallos en la infraestructura hidráulica local como por la deficiente gestión del sistema (Ley García et al., 2011b). Típicamente, se ha recurrido a sobredimensionar tuberías y sistemas de drenaje para manejar las inundaciones urbanas; sin embargo, estas soluciones tradicionales han demostrado ser inadecuadas ante el

rápido crecimiento de las ciudades y los efectos del cambio climático (Sagastume Puerta et al., 2022).

☒ Frente a estas limitaciones del drenaje convencional, los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) surgen como una alternativa innovadora que ayuda a reducir el impacto de la urbanización y a restaurar parcialmente las condiciones hidrológicas naturales previas al desarrollo (Zhou, 2014a) . Los SUDS representan una opción frente a las soluciones tradicionales, brindando beneficios ambientales, sociales, estéticos, energéticos y económicos (Olivares-Cerpa et al., 2022). Estos sistemas están enfocados en desarrollar técnicas que permiten controlar las aguas de lluvia de manera eficiente, considerando su cantidad y calidad (Jiménez Ariza et al., 2019).

Un ejemplo de la aplicación de enfoques sostenibles a gran escala se observa en China, donde se ha implementado el concepto de “Ciudades Esponja”, orientadas a la creación de políticas capaces de gestionar hasta un 70 % del agua pluvial (Schiffman, 2024). Este término hace referencia a la gestión integral del agua a través de procesos de infiltración, detención, almacenamiento, limpieza, reutilización y drenaje del recurso hídrico (Li et al., 2017).

☒ En regiones semiáridas, como Texas (EE. UU.), se ha aplicado la técnica de pavimentos permeables, logrando una reducción significativa del volumen de escorrentía: 98 % en el caso del pavimento de concreto poroso (PCP), 46 % con pavimentos de bloques entrelazados con grava (IBPG) y 96 % con concreto intertrabado permeable (PICP) (Alam et al., 2019).

De igual forma, en la ciudad de St. Louis —de clima continental húmedo— se registró una reducción del 13 % de escorrentía para el asfalto permeable, 36 % para el concreto permeable y 46 % para los adoquines permeables (Alyaseri & Zhou, 2016) . Estos resultados evidencian la efectividad de las tecnologías SUDS para reducir la escorrentía superficial en distintos contextos climáticos.

Asimismo, la combinación de SUDS con sistemas de drenaje urbano tradicionales permite reducir el volumen de agua que ingresa al sistema general, posibilitando el uso de

tuberías y pendientes de menor tamaño, evitando excavaciones profundas y reduciendo los costos totales del proyecto (Cubides & Santos, 2018). Sin embargo, aplicar este enfoque sostenible enfrenta desafíos técnicos, sociales y económicos, especialmente en contextos donde la normatividad o la estructura institucional aún privilegian el enfoque convencional. Por ello, para la implementación exitosa de los SUDS, es esencial realizar estudios detallados de factibilidad que permitan seleccionar las técnicas adecuadas según las condiciones locales (Sagastume Puerta et al., 2022).

Además, muchas de las barreras reportadas para su aplicación se basan en suposiciones o estimaciones —como costos percibidos, limitaciones del sitio o disponibilidad de espacio— más que en evidencia cuantitativa derivada de estudios de seguimiento y análisis de proyectos implementados (Piacentini & Rossetto, 2020). En este sentido, la aplicación de un análisis multicriterio constituye una herramienta fundamental para definir estrategias adecuadas que integren variables técnicas, ambientales y socioeconómicas.

Finalmente, el artículo destaca que la gestión pluvial sostenible debe concebirse como un sistema complementario al drenaje urbano tradicional, con el fin de mejorar la eficiencia hidráulica y reducir los impactos ambientales. Esta investigación plantea como objetivo explorar y analizar la factibilidad técnica de implementación de los SUDS para la mitigación de inundaciones en zonas áridas y semiáridas, tomando como caso de estudio la ciudad de Mexicali, Baja California, México (Lira et al., 2024). Este enfoque busca demostrar que los SUDS no solo representan una innovación técnica, sino también una estrategia de resiliencia urbana frente a los efectos del cambio climático.

2.2 Evolución del drenaje tradicional a los SUDS

El desarrollo urbano del siglo XX se caracterizó por un enfoque predominantemente hidráulico del manejo pluvial, basado en el principio de evacuar el agua lo más rápido posible del entorno urbano. Este modelo, denominado infraestructura gris, prioriza la conducción y descarga de la escorrentía mediante tuberías, canales y colectores (Zhou, 2014a). La filosofía detrás de este enfoque era evitar la acumulación superficial del agua y

reducir el riesgo inmediato de inundación; sin embargo, no consideraba los procesos naturales del ciclo hidrológico ni los efectos a largo plazo sobre el ambiente urbano (Sagastume Puerta et al., 2022) .

Las consecuencias de esta visión lineal del drenaje se manifestaron con el tiempo: los sistemas de infraestructura gris requieren altos costos de mantenimiento, presentan limitada capacidad de expansión y agravan la contaminación difusa al transportar residuos, sedimentos y contaminantes hacia los cuerpos receptores (Olivares-Cerpa et al., 2022). Además, las modificaciones en la cobertura del suelo por pavimentación masiva incrementaron la impermeabilidad, reduciendo la infiltración y la recarga de acuíferos, y elevando el volumen de escorrentía superficial en las zonas urbanizadas (Tendero Peiró, 2018).

A partir de la década de 1980, diversos países comenzaron a reconocer la necesidad de un cambio estructural en la gestión del agua pluvial. Este cambio se tradujo en la evolución del drenaje convencional hacia sistemas sostenibles, impulsados por políticas ambientales y estrategias de adaptación al cambio climático. En el Reino Unido surgieron los Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), cuyo objetivo principal era manejar la escorrentía desde su origen mediante procesos de infiltración, retención temporal y tratamiento natural (Sagastume Puerta et al., 2022).

De manera paralela, en Estados Unidos se desarrolló el concepto de Low Impact Development (LID), que busca conservar la hidrología natural del sitio mediante el uso de pavimentos permeables, jardines de lluvia y techos verdes (Ahiablame et al., 2012). En Australia, el enfoque evolucionó hacia el Water Sensitive Urban Design (WSUD), el cual integra la planeación del agua pluvial con el diseño urbano y paisajístico, creando ciudades más resilientes y ambientalmente adaptadas (Morison & Brown, 2011).

Los tres enfoques —SUDS, LID y WSUD—, junto con otras variantes como el Best Management Practices (BMPs), comparten una misma filosofía: mantener, en la medida

de lo posible, el comportamiento hidrológico natural previo a la urbanización (Zhou, 2014a) . Esto se logra mediante prácticas que retienen, infiltran, filtran y reutilizan el agua pluvial, evitando su concentración excesiva en los colectores. La gestión sostenible del drenaje promueve así un equilibrio entre infraestructura, paisaje y comunidad.

La transición hacia los SUDS ha sido gradual y depende del contexto normativo e institucional de cada país. En Europa, programas como el CIRIA C753 Manual (2015) establecieron guías de diseño y mantenimiento para distintos tipos de soluciones sostenibles, mientras que en América Latina los avances son recientes, aunque con resultados alentadores en Chile, Colombia y México (Jiménez Ariza et al., 2019). Estas experiencias evidencian que la adopción de los SUDS no solo mejora la gestión del agua, sino que también contribuye a la creación de espacios públicos multifuncionales y a la educación ambiental urbana.

En contraste con los sistemas tradicionales, que son centralizados y reactivos, los SUDS adoptan un enfoque descentralizado y preventivo, actuando antes de que el agua alcance la red principal. Este principio de control en la fuente permite reducir el volumen de escorrentía y la presión sobre los colectores existentes, prolongando su vida útil y reduciendo los costos de mantenimiento (Cubides & Santos, 2018). Asimismo, su aplicación favorece la mejora estética del entorno urbano, la biodiversidad y el bienestar social.

La evolución conceptual del drenaje urbano puede interpretarse como un proceso de integración progresiva entre infraestructura gris y verde. Actualmente, la tendencia apunta hacia un modelo híbrido, en el cual las redes de drenaje tradicionales se complementan con soluciones naturales que aumentan la resiliencia urbana frente a eventos extremos. En este sentido, Mexicali representa un caso emblemático para analizar esta evolución, ya que enfrenta los retos de infraestructura gris insuficiente y de condiciones ambientales propias de climas áridos (Ley García et al., 2011a).

Criterio	Infraestructura gris (tradicional)	Sistemas Sostenibles (SUDS)
Objetivo principal	Evacuar el agua rápidamente del área urbana	Manejar el agua desde su origen y reducir la escorrentía
Enfoque	Reactivo (control de consecuencias)	Preventivo (control en la fuente)
Tipo de sistema	Centralizado	Descentralizado
Efecto ambiental	Aumenta la contaminación y la impermeabilización	Reduce contaminación, mejora infiltración y biodiversidad
Costos de mantenimiento	Elevados	Moderados o bajos (dependen del diseño y vegetación)
Flexibilidad y adaptabilidad	Limitada	Alta, permite escalabilidad y adaptación local
Beneficios sociales	Nulos o mínimos	Mejora estética, recreación y bienestar urbano
Ejemplos de aplicación	Colectores, canales, drenajes subterráneos	Pavimentos permeables, jardines de lluvia, zanjas, biorretención

Tabla 1. Comparación entre infraestructura gris y Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)
Fuente: *Elaboración propia.*

2.3 Principios de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

El desarrollo de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) se fundamenta en la necesidad de replantear el manejo del agua pluvial desde una perspectiva integral y ecológica, basada en la imitación del ciclo hidrológico natural y la gestión en origen. Este enfoque busca que el agua de lluvia sea retenida, filtrada y depurada lo más cerca posible del lugar donde se genera la escorrentía (Zhou, 2014a). Los SUDS, en conjunto con otros enfoques como el Low Impact Development (LID) y el Water Sensitive Urban Design (WSUD), representan una transición hacia modelos urbanos donde la infraestructura hidráulica y los procesos naturales coexisten en equilibrio (Fletcher et al., 2015).

De acuerdo con el CIRIA Manual C753 (2015), los principios de los SUDS se agrupan en cuatro ejes fundamentales:

- I. Control en la fuente: gestionar el agua directamente en el punto donde se genera, reduciendo la cantidad de escorrentía que llega a la red de drenaje.

- II. Control de la cantidad: minimizar los volúmenes de flujo y retardar el pico de caudal durante eventos de lluvia.
- III. Control de la calidad: promover procesos naturales de filtración y tratamiento del agua antes de su descarga.
- IV. Valor social y ambiental: integrar las infraestructuras pluviales en el paisaje urbano, generando beneficios ecológicos, recreativos y estéticos.

El principio rector de los SUDS es reproducir las condiciones hidrológicas previas al desarrollo urbano, manteniendo los procesos de infiltración, retención, evaporación y escurrimiento superficial en equilibrio (Olivares-Cerpa et al., 2022). Para lograrlo, los SUDS emplean técnicas descentralizadas que interceptan el agua desde los techos, calles o patios, permitiendo su infiltración o retención temporal. Este enfoque contrasta con el sistema tradicional, donde el objetivo principal es evacuar el agua lo más rápido posible del área urbana (Zhou, 2014).

Los SUDS operan bajo una lógica jerárquica que combina control en la fuente, control local y control regional, lo que permite manejar el agua pluvial en distintas escalas espaciales y temporales. Esta estructura jerárquica busca reducir los efectos acumulativos de la escorrentía y mejorar la capacidad adaptativa del sistema urbano (CIRIA, 2016; Fletcher et al., 2015)

En términos hidrológicos, los SUDS se basan en la ecuación general del balance hídrico:

$$P=I+E+R+\Delta S$$

Donde P representa la precipitación total, I la infiltración, E la evapotranspiración, R la escorrentía superficial y ΔS el cambio en almacenamiento. Los sistemas sostenibles buscan aumentar I y E , reducir R y estabilizar ΔS , de manera que el agua de lluvia siga un ciclo más natural dentro del entorno urbano (EPA,2019).

Además del control hidráulico, los SUDS incorporan procesos ecológicos y biogeoquímicos que permiten mejorar la calidad del agua pluvial. A través de la filtración del suelo, la absorción por vegetación y la sedimentación en estanques o zanjas, se logra

la remoción de contaminantes como nitrógeno, fósforo, metales pesados y sedimentos (Jiménez Ariza et al., 2019). Esto convierte a los SUDS en herramientas de gestión ambiental, más allá de su función hidráulica (Sagastume Puerta et al., 2022).

El diseño de un sistema SUDS adecuado requiere considerar variables como el tipo de suelo, la capacidad de infiltración, la topografía, el uso del suelo y el régimen de lluvias (Zhou, 2014). En zonas áridas, por ejemplo, se recomienda priorizar sistemas con retención temporal, pavimentos permeables o jardines de biorretención con vegetación xerófila, capaces de soportar largos periodos de sequía y altas tasas de evaporación (Roy et al., 2008).

En síntesis, los SUDS representan una infraestructura multifuncional que combina objetivos hidráulicos, ecológicos y sociales. Su diseño debe permitir el manejo eficiente del agua, el control de la contaminación, la mejora del paisaje urbano y la reducción del riesgo de inundaciones, todo bajo un marco de sostenibilidad y resiliencia urbana (Olivares-Cerpa et al., 2022; Sagastume Puerta et al., 2022).

2.3.1 Tipos de SUDS

Los SUDS comprenden una amplia gama de técnicas diseñadas para imitar los procesos naturales del ciclo hidrológico dentro del entorno urbano. Cada tipo de sistema cumple funciones específicas de retención, infiltración, almacenamiento, filtración o aprovechamiento del agua pluvial, dependiendo de las condiciones locales y del nivel de control deseado (Zhou, 2014a)

A continuación, se describen los principales tipos de SUDS aplicables a zonas urbanas, organizados según su función hidráulica predominante y su viabilidad en contextos áridos como Mexicali.

2.3.1.1 Bioretención

Los sistemas de bioretención son áreas vegetadas diseñadas para capturar, filtrar y tratar la escorrentía superficial. Están compuestos por un sustrato filtrante (mezcla de arena, suelo y materia orgánica) y vegetación adaptada a condiciones húmedas y secas. Su funcionamiento se basa en la infiltración y absorción de contaminantes mediante procesos biogeoquímicos y microbiológicos (CIRIA, 2016).

En estos sistemas, el agua pluvial se infiltra a través de las capas del suelo, donde se remueven sedimentos, nutrientes y metales pesados antes de alcanzar las capas subyacentes o ser devuelta al sistema de drenaje (Jiménez Ariza et al., 2019).

Estudios demuestran que los jardines de bioretención pueden eliminar entre el 65 % y el 90 % del fósforo total y hasta el 95 % de los sólidos suspendidos, dependiendo del tipo de vegetación y del sustrato utilizado (Fletcher et al., 2015). Además, ofrecen beneficios estéticos y ecológicos al integrarse como áreas verdes urbanas.

2.3.1.2 Zanjas de infiltración

Las zanjas de infiltración son excavaciones lineales rellenas con grava o material granular que permiten la retención temporal del agua y su infiltración progresiva al subsuelo. Su objetivo principal es reducir el volumen de escorrentía y recargar los acuíferos, favoreciendo el balance hídrico natural (CIRIA, 2016).

Este tipo de SUDS es apropiado para vialidades, estacionamientos o áreas perimetrales donde se concentra la escorrentía superficial. Las zanjas pueden diseñarse con geotextiles permeables para evitar la colmatación y con pozos de inspección para facilitar su mantenimiento.

En regiones áridas, su eficacia depende del tipo de suelo y del mantenimiento periódico, aunque se ha comprobado que pueden disminuir el caudal máximo hasta en un 70 % (Olivares-Cerpa et al., 2022).

2.3.1.3 Estanques de detención

Los estanques de detención o retención son estructuras diseñadas para almacenar temporalmente el agua pluvial durante eventos de lluvia intensa y liberarla gradualmente. Su función principal es reducir los picos de caudal y prevenir el desbordamiento del sistema pluvial (Corinne Waelt & Dorothee Spuhler, 2019)

Existen dos tipos principales:

- a) Estanques de detención seca (dry ponds): se vacían completamente entre tormentas.
- b) Estanques de retención permanente (wet ponds): mantienen un volumen base de agua que favorece la sedimentación y mejora la calidad del agua.

Estos sistemas también actúan como sumideros de sedimentos y contaminantes, mientras aportan valor recreativo y paisajístico. Su implementación es recomendable en zonas bajas o puntos finales del sistema de drenaje (Sagastume Puerta et al., 2022).

2.3.1.4 Techos verdes

Los techos verdes consisten en cubiertas vegetales instaladas sobre edificaciones, las cuales retienen y evapotranspiran parte del agua de lluvia. Su estructura incluye una capa impermeable, un sustrato liviano, drenaje y vegetación (Fletcher et al., 2015).

Estos sistemas reducen el volumen de escorrentía entre un 40 % y 80 %, dependiendo de la profundidad del sustrato y las condiciones climáticas (CIRIA, 2016).

En climas áridos, su aplicación requiere el uso de especies resistentes a la sequía y un mantenimiento mínimo, como *Sedum* spp., *Agave* spp. o gramíneas xerófitas. Además, contribuyen a disminuir la temperatura superficial, reduciendo el efecto de isla de calor urbano y mejorando la eficiencia energética de los edificios (Zhou, 2014a).

2.3.1.5 Pavimentos permeables

Los pavimentos permeables permiten el paso del agua a través de su superficie hacia una base granular o un sistema de almacenamiento subyacente. Su principal objetivo es reducir el volumen de escorrentía superficial y promover la infiltración (Alyaseri & Zhou, 2016).

Entre los materiales más utilizados se encuentran los adoquines intertrabados, concreto poroso y mezclas de asfalto permeable. En contextos urbanos, estos sistemas son ideales para estacionamientos, banquetas y vialidades secundarias.

En estudios realizados en Texas y St. Louis, se reportaron reducciones del 46 % al 98 % en el volumen de escorrentía, demostrando su eficacia en la mitigación de inundaciones locales (Alam et al., 2019; Alyaseri & Zhou, 2016). Además, ayudan a mejorar la calidad del agua al filtrar contaminantes y permitir la recarga del acuífero (Olivares-Cerpa et al., 2022).

2.3.2 Funcionamiento hidráulico e hidrológico

El funcionamiento de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) se fundamenta en la reproducción del ciclo hidrológico natural dentro de entornos urbanizados. A diferencia de los sistemas tradicionales —que transportan el agua hacia un punto de descarga—, los SUDS gestionan la escorrentía en su punto de origen, controlando tanto su cantidad como su calidad (Zhou, 2014a).

Desde el punto de vista hidrológico, los SUDS actúan sobre las principales variables del balance hídrico: infiltración (I), evapotranspiración (E), almacenamiento (ΔS) y escorrentía superficial (R), según la ecuación:

$$P=I+E+R+\Delta S$$

Donde P representa la precipitación total. Los sistemas sostenibles buscan incrementar la infiltración y evapotranspiración, reducir la escorrentía superficial y estabilizar el

almacenamiento, restaurando parcialmente las condiciones preurbanas del ciclo hidrológico (Corinne Waelt & Dorothee Spuhler, 2019; Fletcher et al., 2015).

El principio hidráulico fundamental de los SUDS es el control de caudales mediante retención y detención temporal. Los elementos de los sistemas (pavimentos permeables, zanjas, estanques, jardines de bioretención, etc.) funcionan como almacenamientos temporales que captan la escorrentía, reducen el pico de descarga y prolongan el tiempo de concentración (CIRIA, 2016).

Al controlar la velocidad y el volumen del flujo, se minimiza el riesgo de sobrecarga en la infraestructura pluvial existente (Sagastume Puerta et al., 2022).

En este sentido, los SUDS operan a través de mecanismos combinados que integran procesos hidráulicos, físicos y biológicos:

- a) Infiltración: el agua se filtra a través de capas permeables o sustratos vegetales hacia el subsuelo, recargando acuíferos y reduciendo el escurrimiento superficial.
- b) Almacenamiento temporal: las estructuras retienen el agua por un periodo determinado, disminuyendo el caudal pico.
- c) Evapotranspiración: la vegetación y el suelo devuelven parte del agua a la atmósfera, reduciendo el volumen total almacenado.
- d) Filtración y depuración: el suelo y la vegetación retienen sedimentos y contaminantes mediante procesos físicos, químicos y biológicos (Olivares-Cerpa et al., 2022).

El desempeño hidráulico de cada SUDS depende de parámetros clave, como:

- Capacidad de almacenamiento (V): volumen máximo que puede retener la estructura antes de la descarga.
- Coeficiente de infiltración (f): velocidad a la cual el agua penetra en el suelo o sustrato.
- Tiempo de detención (td): periodo en que el agua permanece almacenada antes de ser liberada.

- Área efectiva (Ae): superficie de captación o drenaje conectada al sistema.

Estos parámetros determinan la respuesta hidrológica del sistema ante distintos eventos de precipitación, y se representan en modelos numéricos mediante ecuaciones de continuidad y energía (Corinne Waelt & Dorothee Spuhler, 2019)

En el caso de la modelación computacional con EPA SWMM, los SUDS se simulan a través de los LID Controls, que permiten representar sus procesos hidráulicos mediante parámetros específicos, tales como la profundidad del sustrato, la porosidad efectiva, la tasa de infiltración, la altura de almacenamiento y la curva de descarga (SWMM User's Manual, 2020).

Esto posibilita cuantificar su efecto en la reducción del caudal máximo, el volumen total de escorrentía y la mejora en la calidad del agua (Olivares-Cerpa et al., 2022).

Los SUDS también contribuyen al control de la contaminación difusa. La retención de sólidos suspendidos, materia orgánica y nutrientes se logra gracias a la combinación de procesos de filtración, sedimentación y absorción por plantas. Se ha reportado que los sistemas de bioretención eliminan entre 70 % y 90 % de nitrógeno total, mientras que los pavimentos permeables pueden reducir hasta un 80 % de los sólidos suspendidos (Fletcher et al., 2015).

Finalmente, la eficiencia hidráulica e hidrológica de los SUDS está directamente relacionada con su integración dentro del sistema urbano existente. Cuando se combinan con infraestructura gris (modelo híbrido), se obtiene una red de drenaje más flexible, resiliente y económica. En el caso de Mexicali, este enfoque híbrido permitiría mitigar los riesgos de inundación y aumentar la recarga natural del acuífero, adaptándose a las condiciones extremas de temperatura y baja precipitación que caracterizan a la región (Ley García et al., 2011a; Olivares-Cerpa et al., 2022).

2.3.3 Beneficios ambientales, sociales y económicos

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) representan una solución multifuncional para las ciudades contemporáneas, al integrar simultáneamente beneficios

ambientales, sociales y económicos dentro de una misma infraestructura. Su implementación promueve la sostenibilidad urbana mediante la reducción del impacto hidrológico de la urbanización, la mejora de la calidad ambiental y la creación de espacios públicos más resilientes (Zhou, 2014a).

Beneficios ambientales

Desde el punto de vista ambiental, los SUDS contribuyen a restituir el ciclo natural del agua al aumentar la infiltración, reducir la escorrentía superficial y favorecer la recarga de acuíferos. Su funcionamiento permite disminuir la erosión, controlar la sedimentación y mitigar la contaminación difusa generada por el arrastre de contaminantes urbanos (Sagastume Puerta et al., 2022).

Además, los procesos de filtración y biorretención ayudan a remover nutrientes, sólidos suspendidos y metales pesados, mejorando la calidad del agua que retorna al ambiente (Jiménez Ariza et al., 2019).

Los SUDS también contribuyen a mitigar el cambio climático local, al reducir el efecto de isla de calor urbano y promover la evapotranspiración a través de la vegetación. Los techos verdes, pavimentos permeables y jardines de lluvia regulan la temperatura superficial y mejoran el confort térmico de los entornos urbanos (Fletcher et al., 2015).

En zonas áridas, los SUDS favorecen la conservación del recurso hídrico al promover la infiltración controlada y el almacenamiento temporal del agua. Esto es especialmente importante en regiones como Mexicali, donde la escasez de lluvia y la alta evaporación exigen soluciones que maximicen el aprovechamiento de cada evento pluvial (Lira et al., 2024)

Beneficios sociales

Los SUDS aportan beneficios significativos en el ámbito social, al mejorar la calidad de vida urbana mediante la creación de espacios verdes y áreas recreativas multifuncionales. Estos espacios no solo cumplen funciones hidráulicas, sino que también

promueven la interacción social, el bienestar psicológico y la educación ambiental (ONU HÁBITAT, 2020).

El diseño de los SUDS permite integrar la infraestructura pluvial con parques, plazas o corredores verdes, fomentando la accesibilidad y el sentido de pertenencia ciudadana. De acuerdo con el enfoque de infraestructura verde y azul, el drenaje urbano puede convertirse en una oportunidad para revitalizar zonas degradadas y generar comunidades más saludables y cohesionadas (Olivares-Cerpa et al., 2022).

Asimismo, los SUDS incrementan la resiliencia social ante eventos hidrometeorológicos extremos, al reducir los daños por inundaciones y proporcionar mecanismos de adaptación frente al cambio climático. Su implementación fortalece la participación ciudadana en la gestión del agua, favoreciendo modelos de gobernanza más inclusivos y sostenibles (Sagastume Puerta et al., 2022).

Beneficios económicos

Desde el punto de vista económico, los SUDS ofrecen una alternativa rentable frente a las soluciones tradicionales de drenaje. Aunque su instalación inicial puede ser ligeramente más costosa, los gastos de operación y mantenimiento son generalmente inferiores en el largo plazo, debido a su carácter descentralizado y a la reducción de sobrecargas en la infraestructura principal (Cubides & Santos, 2018).

La infraestructura verde integrada en los SUDS también genera valor agregado al entorno urbano, al aumentar el atractivo inmobiliario y reducir los costos asociados con los daños por inundaciones. Diversos estudios han demostrado que cada dólar invertido en drenaje sostenible puede generar entre 3 y 7 dólares de beneficios acumulados en términos de servicios ecosistémicos, control de escorrentía y reducción de riesgos (Ahiablame et al., 2012; CIRIA, 2016) En regiones áridas, la adopción de SUDS ofrece ventajas adicionales, ya que el almacenamiento temporal y la reutilización de agua pluvial pueden reducir el consumo de agua potable en riego urbano o limpieza de vialidades, optimizando la gestión de recursos escasos (Ley García et al., 2011a).

En conjunto, los SUDS se consolidan como una infraestructura de triple beneficio:

- 1) Ambiental, al restaurar funciones naturales y mejorar la calidad del agua.
- 2) Social, al generar espacios urbanos más saludables y resilientes.
- 3) Económico, al optimizar los costos de gestión pluvial y reducir los daños por inundaciones.

En el caso de Mexicali, su implementación no solo mitigaría los riesgos hidrológicos, sino que también fortalecería la sustentabilidad urbana en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 6 y 11), promoviendo un modelo de ciudad más adaptada y consciente del valor del agua.

2.4 SUDS en zonas áridas y semiáridas

Las regiones áridas y semiáridas presentan desafíos particulares para la gestión pluvial, debido a la escasez de precipitaciones, la alta evapotranspiración y los suelos de baja infiltración. En estos contextos, las tormentas suelen ser de corta duración y alta intensidad, lo que provoca escurrimientos rápidos y concentrados que pueden generar inundaciones repentinas (Nabinejad & Schüttrumpf, 2023).

En zonas áridas, la infraestructura convencional de drenaje —diseñada para evacuar grandes volúmenes de agua en climas húmedos— resulta ineficiente o sobredimensionada, además de costosa en operación y mantenimiento. Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), en cambio, ofrecen una solución adaptativa y descentralizada que permite gestionar eficientemente los volúmenes reducidos de lluvia y aprovechar el agua pluvial para usos complementarios (Zhou, 2014b) .

Los SUDS aplicados en regiones áridas deben ser diseñados para maximizar la captación y almacenamiento del agua pluvial, minimizar las pérdidas por evaporación, y emplear materiales y vegetación adecuados para condiciones de sequía (Sagastume Puerta et al., 2022). Las técnicas más recomendadas incluyen pavimentos permeables, jardines de bioretención con especies xerófitas, zanjas de infiltración profundas y estanques de retención cubiertos o sombreados (Fletcher et al., 2015).

2.4.1 Experiencias internacionales

Diversas ciudades del mundo con condiciones áridas o semiáridas han implementado SUDS con resultados exitosos.

En Phoenix, Arizona (EE. UU.), por ejemplo, se han desarrollado jardines de infiltración y sistemas de bioretención adaptados con vegetación autóctona, logrando reducir los eventos de inundación local y aumentar la recarga del acuífero (Sagastume Puerta et al., 2022)

En Perth, Australia, el enfoque de Water Sensitive Urban Design (WSUD) ha sido ampliamente adoptado, combinando pavimentos permeables, zanjas de infiltración y humedales urbanos. Este modelo ha reducido hasta en un 70 % la contaminación difusa en descargas pluviales, al tiempo que mejora la estética y biodiversidad urbana (Fletcher et al., 2015).

En Doha, Catar, se ha aplicado una estrategia de “captación-desvío” que prioriza la recolección de agua pluvial en cisternas subterráneas para usos no potables, complementada con pavimentos permeables de alta resistencia térmica. Esto ha permitido reducir los costos de riego urbano y mitigar el impacto de tormentas intensas en suelos compactos (Our Future Water Intelligence, 2025)

En Las Vegas, Nevada, se han implementado sistemas combinados de estanques de retención y canales verdes, que además de controlar escorrentías, funcionan como áreas recreativas durante periodos secos, demostrando la multifuncionalidad de los SUDS (EPA, 2019).

Estas experiencias demuestran que los SUDS pueden adaptarse eficazmente a las condiciones de aridez siempre que el diseño integre criterios climáticos, hidrológicos y paisajísticos locales.

2.4.2 Adaptaciones en el contexto mexicano

En México, el interés por los SUDS ha crecido en los últimos años como respuesta al incremento de los eventos de inundación y a la necesidad de modernizar la infraestructura pluvial urbana. Sin embargo, su implementación aún es incipiente y se enfrenta a limitaciones institucionales, técnicas y culturales (Sagastume Puerta et al., 2022).

Diversas universidades y organismos públicos han promovido proyectos piloto en ciudades como Monterrey, Guadalajara, Hermosillo y Mexicali, con resultados alentadores en la reducción de caudales y mejora de calidad del agua (Jiménez Ariza et al., 2019)

En Hermosillo, Sonora, por ejemplo, la instalación de jardines de bioretención y zanjas de infiltración ha permitido controlar la escorrentía en áreas con pendientes pronunciadas, además de servir como espacios verdes urbanos. En Guadalajara, el programa de infraestructura verde impulsado por el IMEPLAN ha incorporado pavimentos permeables y techos verdes en proyectos urbanos integrales.

Por su parte, Mexicali enfrenta problemáticas singulares derivadas de su clima extremo y suelos arcillosos, que limitan la infiltración directa. Por ello, las estrategias deben centrarse en almacenamiento temporal, retención y reutilización del agua pluvial, más que en la infiltración profunda (Ley García et al., 2011b)

La aplicación de SUDS en Mexicali requiere adaptar los diseños convencionales a las condiciones locales mediante:

- Uso de vegetación xerófila nativa (mezquite, palo verde, agave, etc.).
- Implementación de pavimentos permeables con capas de base gruesas y alta capacidad de drenaje.
- Integración de sistemas de retención temporal (estanques, cisternas) para aprovechamiento del agua captada.
- Vinculación de los SUDS con la red pluvial existente para conformar una infraestructura híbrida (gris-verde).

Estas adaptaciones no solo permitirían mitigar las inundaciones urbanas, sino también incrementar la resiliencia hídrica y fortalecer la sostenibilidad ambiental de la ciudad, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6 y 11.

2.5 Gestión del riesgo de inundaciones y resiliencia urbana

El riesgo de inundaciones urbanas es el resultado de la interacción entre tres componentes principales: la amenaza hidrometeorológica, la exposición de la población y la vulnerabilidad de la infraestructura (ONU HÁBITAT, 2020). En este sentido, las ciudades no solo enfrentan lluvias más intensas y erráticas debido al cambio climático, sino que además concentran grandes áreas impermeables que agravan la generación de escorrentía y reducen la capacidad de infiltración (Sagastume Puerta et al., 2022)

En México, las inundaciones constituyen el fenómeno natural con mayor recurrencia e impacto económico, provocando pérdidas anuales estimadas en más de 230 millones de dólares (Forbes, 2017). Estas afectaciones se deben, en gran medida, a la expansión urbana desordenada, la ocupación de zonas de riesgo y la falta de mantenimiento en la infraestructura de drenaje (Cantú-Martínez, 2017). En ciudades fronterizas como Mexicali, el problema se agrava por la combinación de topografía plana, suelos con baja infiltración y deficiencias en la gestión institucional (Ley García et al., 2011a).

El modelo tradicional de gestión pluvial, centrado únicamente en la evacuación del agua mediante tuberías o canales, no ha logrado reducir los riesgos de manera integral. Por ello, la tendencia actual se orienta hacia enfoques de resiliencia urbana, que consideran la capacidad del sistema para anticipar, absorber, adaptarse y recuperarse de los impactos de eventos extremos (Ojeda De La Cruz et al., 2020).

La resiliencia urbana se entiende como la habilidad de una ciudad para resistir, adaptarse y transformarse frente a amenazas naturales o antrópicas, sin perder su funcionalidad esencial (Erlý Arner-Reyes, 2013). En el contexto hidrológico, esto implica diseñar y gestionar la infraestructura urbana de modo que el sistema pueda retener, almacenar o redirigir los excesos pluviales sin colapsar. Los SUDS se posicionan, así

como herramientas clave dentro de la adaptación basada en ecosistemas (AbE), ya que promueven procesos naturales que incrementan la capacidad adaptativa del entorno urbano (Olivares-Cerpa et al., 2022).

A diferencia de las soluciones estructurales tradicionales, que buscan resistir las amenazas, los SUDS incrementan la capacidad de adaptación al permitir que la infraestructura funcione de manera flexible y progresiva. Por ejemplo, un jardín de bioretención o un pavimento permeable puede operar de manera independiente, pero también integrarse a redes mayores sin alterar la función del sistema completo (CIRIA, 2016).

Esta visión sistémica promueve el concepto de infraestructura híbrida (gris-verde), donde la infraestructura convencional se complementa con soluciones basadas en la naturaleza. Según el Banco Mundial (2019), las ciudades que invierten en infraestructura híbrida presentan mayor capacidad de recuperación ante eventos extremos y menores costos económicos post-desastre. De esta forma, la planeación urbana resiliente no se limita al diseño hidráulico, sino que abarca la gestión del territorio, la educación ambiental y la participación social (ONU HÁBITAT, 2020).

En el caso de Mexicali, la aplicación de los SUDS como estrategia de resiliencia urbana resulta particularmente relevante, debido a que los eventos de lluvia, aunque poco frecuentes, generan afectaciones severas en cortos periodos. La incorporación de sistemas sostenibles permitiría retener y aprovechar el agua pluvial, reduciendo el riesgo de inundación y mejorando la gestión integral del recurso hídrico (Ley García et al., 2011a).

De acuerdo con el marco propuesto por la Estrategia Nacional de Resiliencia (SEMARNAT-CONAGUA, 2020), la reducción del riesgo de inundaciones debe integrar tanto medidas estructurales (infraestructura hidráulica, SUDS, drenaje convencional) como no estructurales (planificación urbana, educación, monitoreo y participación comunitaria). Bajo esta visión, los SUDS no solo cumplen una función técnica, sino también social e institucional, al fortalecer la gobernanza del agua a nivel local.

2.6 Factores institucionales y sociales en la gestión pluvial

La gestión efectiva de las aguas pluviales en entornos urbanos depende no solo de la infraestructura instalada, sino también de la coordinación institucional, la capacidad administrativa y la participación social. Estos factores determinan en gran medida la eficiencia, el mantenimiento y la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas pluviales (Sagastume Puerta et al., 2022). En México, las competencias relacionadas con el drenaje pluvial se distribuyen entre distintos niveles de gobierno: federal, estatal y municipal.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) tiene a su cargo la regulación del recurso hídrico y la administración de cuencas; las entidades estatales —como la Secretaría para el Manejo, Saneamiento y Protección del Agua en Baja California— supervisan la planeación y ejecución de obras; y los organismos operadores municipales (como la CESPМ en Mexicali) son responsables de la operación, mantenimiento y expansión del sistema pluvial (SEMARNAT, 2012).

Sin embargo, esta distribución de funciones presenta problemas de coordinación interinstitucional, falta de recursos económicos y carencia de programas de mantenimiento preventivo. En el caso de Mexicali, la red pluvial urbana carece de un sistema formal de monitoreo, y gran parte de los problemas operativos se relacionan con la obstrucción por residuos sólidos, el sedimento acumulado y la falta de personal especializado.

Estos hallazgos fueron confirmados en entrevistas con personal técnico de la CESPМ, quienes destacaron la necesidad de actualizar los manuales de operación y de incorporar criterios de sostenibilidad en los futuros proyectos de drenaje.

El componente social es otro factor determinante en la efectividad del sistema pluvial. La acumulación de residuos en las calles, la ocupación irregular de cauces y la falta de conciencia ciudadana contribuyen significativamente al deterioro del sistema (Tendero Peiró, 2018). De acuerdo con la (Comisión Nacional del Agua, 2020), más del 60

% de las obstrucciones en redes pluviales urbanas en México están asociadas a la disposición inadecuada de residuos sólidos urbanos.

Por tanto, la implementación de políticas de gestión pluvial debe considerar estrategias de educación ambiental y participación comunitaria, con el fin de fomentar la corresponsabilidad en el manejo del agua. Los programas de limpieza preventiva, la instalación de rejillas de captación protegidas y las campañas de concientización pueden reducir significativamente los problemas operativos en la red pluvial (Sagastume Puerta et al., 2022).

Asimismo, la falta de capacitación técnica en diseño e implementación de SUDS constituye una barrera importante. Aunque existe conocimiento teórico en instituciones académicas y de investigación, la transferencia tecnológica hacia las dependencias municipales es aún limitada. Esto genera una brecha entre la planeación sustentable y la práctica operativa (Jiménez Ariza et al., 2019).

La inclusión de los SUDS en la gestión institucional requiere una transformación del enfoque de gobernanza: pasar de una administración centrada en la obra física hacia una gestión integral del riesgo y del recurso hídrico urbano. Este cambio implica fortalecer los marcos normativos, promover la colaboración interinstitucional y establecer incentivos económicos y normativos para la adopción de infraestructura verde (CIRIA, 2016; Olivares-Cerpa et al., 2022).

En este contexto, la participación ciudadana se convierte en un elemento clave para garantizar la sostenibilidad de los proyectos. Involucrar a la comunidad en la planificación, monitoreo y mantenimiento de los sistemas pluviales incrementa la aceptación social y la eficiencia operativa. Además, genera capital social al vincular la gestión del agua con la educación ambiental y la construcción de identidad local (ONU HÁBITAT, 2020).

Finalmente, la articulación entre factores institucionales y sociales resulta esencial para consolidar una gestión pluvial resiliente en Mexicali. La implementación de SUDS debe ir acompañada de un fortalecimiento de capacidades institucionales, mecanismos de participación y políticas públicas que integren sostenibilidad, equidad y eficiencia

operativa. Solo mediante este enfoque integral será posible reducir el riesgo de inundaciones y avanzar hacia una ciudad más adaptada y sostenible.

2.7 Marco normativo mexicano aplicable

El marco normativo mexicano en materia de gestión pluvial y drenaje urbano está conformado por una serie de leyes, reglamentos y programas que establecen los lineamientos para la planeación, operación y mantenimiento de la infraestructura hidráulica. Estos instrumentos se encuentran bajo la jurisdicción de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), las cuales coordinan las políticas nacionales relacionadas con el recurso hídrico y la adaptación al cambio climático (Comisión Nacional del Agua, 2020)

El marco jurídico reconoce el agua pluvial como un componente esencial dentro del ciclo hidrológico, aunque históricamente su gestión ha sido considerada de forma separada respecto al agua potable o residual. No obstante, recientes reformas a la legislación mexicana promueven un enfoque integral de gestión del recurso hídrico, alineado con los principios de sostenibilidad y resiliencia urbana (CONAGUA, 2022).

2.7.1 Políticas nacionales (CONAGUA, SEMARNAT)

La Ley de Aguas Nacionales (LAN, 1992), junto con su reglamento, establece las bases para la administración, conservación y aprovechamiento del recurso hídrico, incluyendo el agua pluvial. Su artículo 15 promueve la protección de los cauces y zonas federales, así como la regulación de descargas pluviales en cuerpos receptores. Aunque no menciona explícitamente a los SUDS, su enfoque de manejo integral del agua abre la posibilidad de incorporar estas tecnologías en los programas de infraestructura verde (Comisión Nacional del Agua, 2020).

El Programa Nacional Hídrico (PNH) 2020–2024 define como prioridad estratégica la reducción del riesgo de inundaciones y la promoción de infraestructura adaptativa al

cambio climático. Este documento introduce el concepto de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) como instrumentos para mejorar la capacidad de infiltración, retención y tratamiento natural del agua, lo cual sienta las bases para la implementación de SUDS en México (Comisión Nacional del Agua, 2020)

Por su parte, el Programa de Adaptación al Cambio Climático del Sector Agua (PACS 2019–2030) resalta la importancia de integrar infraestructura verde y medidas no estructurales para mitigar los impactos hidrometeorológicos. En este sentido, los SUDS son reconocidos como alternativas complementarias a la infraestructura gris tradicional, especialmente en zonas urbanas vulnerables (CONAGUA, 2019).

A nivel nacional, también destacan los lineamientos del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), que promueven la investigación aplicada en drenaje sostenible, manejo pluvial urbano y modelación hidrológica. El IMTA ha impulsado desde 2018 proyectos piloto de SUDS en entidades como Querétaro, Hidalgo y Sonora, enfocados en pavimentos permeables y humedales urbanos (IMTA, 2021).

Estas políticas muestran un cambio de paradigma hacia una gestión más sostenible e integrada del drenaje urbano, aunque aún existen vacíos regulatorios para su adopción formal a nivel municipal.

2.7.2 Normas locales y manuales de Baja California

En el contexto estatal, Baja California cuenta con un conjunto de disposiciones relacionadas con la gestión pluvial y la protección ambiental. La Ley de Protección al Ambiente para el Estado de Baja California (LPAEBC, 2022) establece en su artículo 85 que los municipios deberán promover prácticas sostenibles para la recolección y manejo del agua pluvial, incluyendo obras de captación, retención e infiltración en áreas urbanas.

Asimismo, el Programa Estatal Hídrico 2022–2027 incluye entre sus líneas de acción la “implementación de soluciones basadas en la naturaleza para mitigar riesgos por inundación urbana”, proponiendo la adopción de infraestructura verde y SUDS en zonas críticas de Mexicali, Tijuana y Ensenada.

En el ámbito municipal, el Reglamento de Construcción del Municipio de Mexicali (2021) contempla la obligación de incorporar sistemas de drenaje pluvial y obras de retención en nuevos desarrollos urbanos. Aunque no menciona explícitamente los SUDS, abre la posibilidad de su inclusión dentro de los proyectos de mitigación hidráulica que deben presentar los desarrolladores inmobiliarios ante la CESPМ.

Finalmente, los manuales técnicos de la CESPМ (2023) recomiendan la actualización de sus criterios de diseño para incluir sistemas de infiltración y retención temporal, en congruencia con los lineamientos del CIRIA (2015) y el EPA SWMM (2020), que ya están siendo utilizados en proyectos piloto de la región.

El marco regulatorio mexicano aún no contempla de manera explícita a los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, pero sí establece los fundamentos para su integración a través de los principios de gestión integral del agua, soluciones basadas en la naturaleza y resiliencia urbana.

El avance hacia un marco legal que reconozca formalmente los SUDS requiere:

- 1) Actualizar los reglamentos de construcción y obras pluviales municipales.
- 2) Incluir los SUDS en los Programas de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano.
- 3) Capacitar al personal técnico y de planeación en el diseño y evaluación de infraestructura verde.
- 4) Promover incentivos financieros y fiscales para su adopción en proyectos públicos y privados.

La CESPМ y el Gobierno del Estado de Baja California tienen un papel estratégico para consolidar este proceso, pues cuentan con experiencia técnica, estructura institucional y conocimiento del territorio necesarios para liderar la transición hacia una gestión pluvial sostenible e integrada.

Capítulo III. Metodología

3.1 Descripción del área de estudio

La ciudad de Mexicali, capital del estado de Baja California, México, se localiza en el extremo nororiental de la entidad, dentro de la cuenca del río Colorado. Sus coordenadas geográficas aproximadas son 32°39'N y 115°28'O, con una altitud media de cuatro metros sobre el nivel del mar, lo que la convierte en una de las ciudades más bajas del país. Limita al norte con Calexico, California (EE. UU.), al sur con el municipio de San Felipe, al este con el estado de Sonora, y al oeste con el municipio de Tecate.

Mexicali forma parte de la Zona Metropolitana de Mexicali (ZMM), que concentra cerca de un millón de habitantes (INEGI, 2020). Su posición geográfica en el Valle de Mexicali —una extensa planicie sedimentaria del delta del río Colorado— determina gran parte de sus condiciones hidrológicas, geotécnicas y de vulnerabilidad ante eventos de inundación.

3.1.1 Localización geográfica y contexto territorial

La localización geográfica del área de estudio dentro del municipio de Mexicali se presenta en la Figura 3.1, la cual permite identificar su posición respecto a los límites municipales y su relación con el entorno urbano y regional. Este contexto territorial es fundamental para comprender la interacción entre las condiciones físicas del valle, el patrón de urbanización y la dinámica hidrológica local.

La proximidad de Mexicali con la frontera norte de México y con ciudades del suroeste de Estados Unidos, como Phoenix y Tucson, resulta particularmente relevante, ya que dichas regiones comparten características climáticas similares y han desarrollado enfoques de gestión pluvial basados en infraestructura verde y soluciones de bajo impacto. Esta condición refuerza la pertinencia de analizar la aplicabilidad de los SUDS bajo condiciones climáticas comparables.

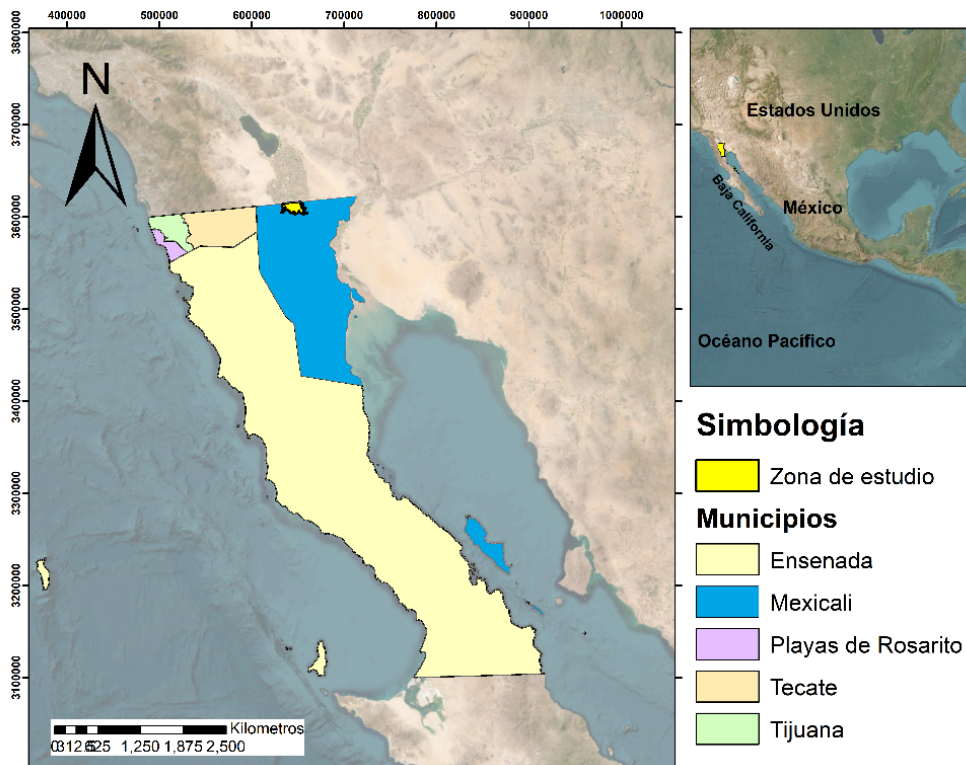


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio en el municipio de Mexicali, Baja California
Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Características físicas del área de estudio

Desde el punto de vista físico, el área de estudio se caracteriza por un relieve predominantemente plano, con pendientes generalmente inferiores al 1 %, lo cual limita el escurrimiento superficial y favorece la acumulación de agua durante eventos de lluvia intensa. Esta configuración topográfica, mostrada en la Figura 2, constituye uno de los principales factores que condicionan el comportamiento hidrológico urbano y la eficiencia del sistema de drenaje pluvial.

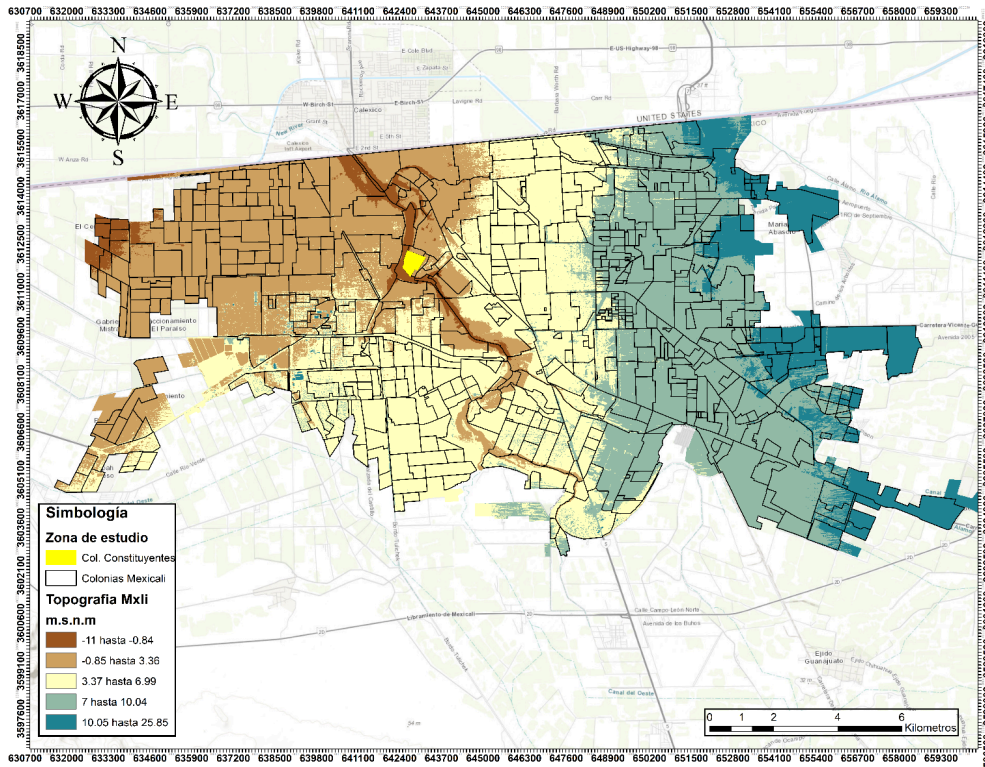


Figura 2. Topografía del municipio de Mexicali y ubicación del área de estudio
Fuente: Elaboración propia.

La red hidrológica natural del área de estudio, presentada en la Figura 3, refleja las trayectorias preferenciales de escurrimiento superficial definidas por la topografía y las condiciones naturales del terreno. Aunque la ciudad se encuentra fuera del régimen directo del río Colorado debido a la canalización de sus flujos mediante el sistema All-American Canal, la red hidrológica natural permite identificar zonas de acumulación potencial y direcciones generales de flujo que resultan relevantes para el análisis hidrológico urbano.

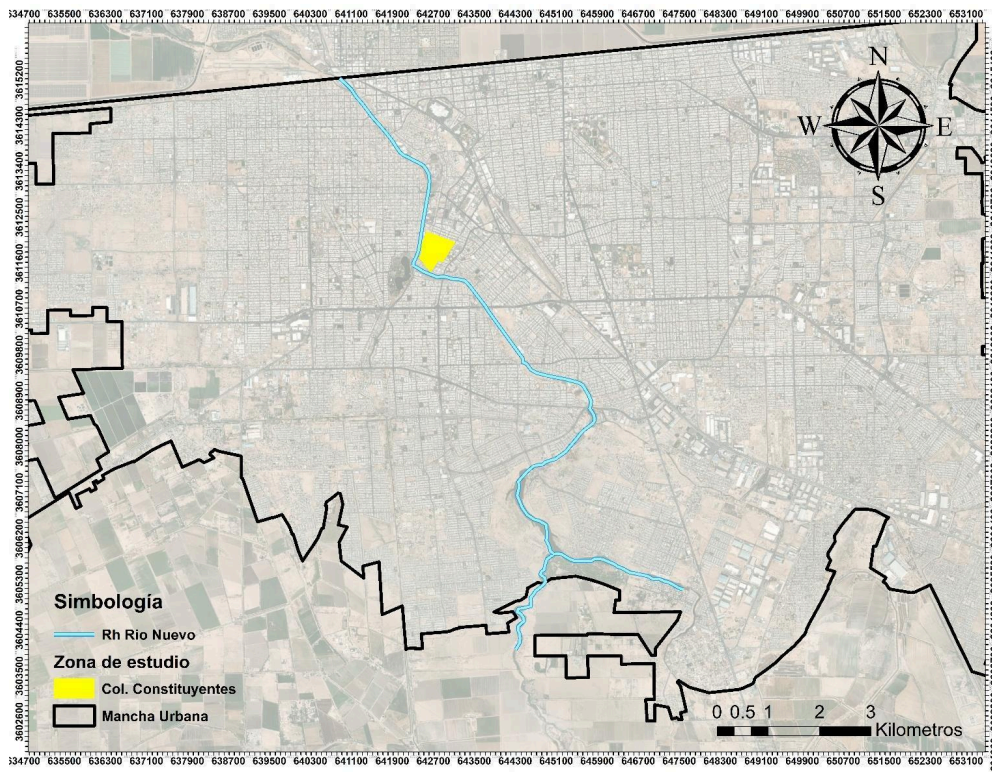


Figura 3. Red hidrológica natural del área de estudio

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las condiciones edafológicas, predominan suelos del tipo Regosol, característicos de ambientes áridos y semiáridos, los cuales presentan baja capacidad de infiltración natural, alto contenido de sales y elevada susceptibilidad al sellado superficial. Estas características influyen directamente en la generación de escurrimiento superficial durante eventos de lluvia intensa y en la eficiencia del sistema de drenaje pluvial urbano.

La distribución espacial de los tipos de suelo en el área de estudio se presenta en la Figura —, elaborada a partir de cartografía edafológica regional. En aquellas zonas donde la información edafológica no se encuentra explícitamente clasificada en la cartografía base, se asignó el tipo de suelo dominante mediante un criterio de continuidad espacial y geomorfológica, considerando la homogeneidad del Valle de Mexicali y la correspondencia con las unidades edáficas adyacentes. Este procedimiento es consistente con prácticas

comúnmente empleadas en estudios hidrológicos urbanos a escala regional, donde la disponibilidad de información detallada puede ser limitada.

La información edafológica obtenida fue utilizada como insumo para la estimación de parámetros hidrológicos y para la evaluación de la factibilidad técnica de implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), particularmente en lo referente a procesos de infiltración y retención de escurrimiento superficial.

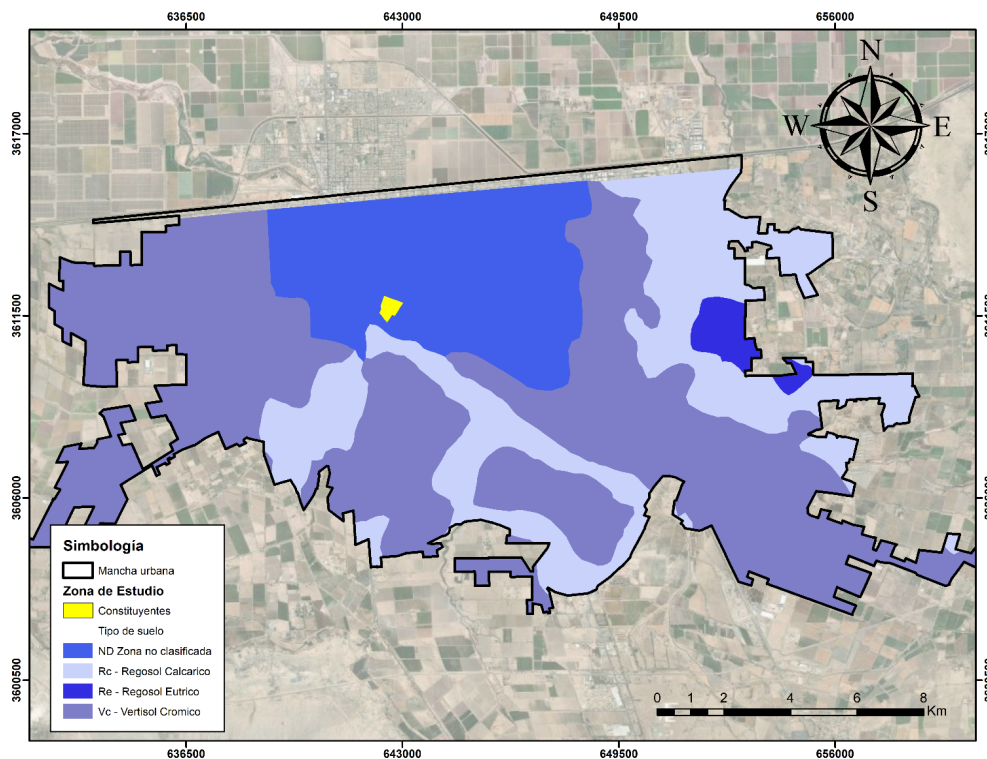


Figura 4. Distribución de los tipos de suelo en el área de estudio
Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, la región se encuentra en una zona sísmica y tectónicamente activa, asociada al sistema de fallas de San Andrés y Cerro Prieto. Si bien estos aspectos tienen mayor influencia sobre la infraestructura civil que sobre la hidrología urbana, la presencia de suelos finos y la compactación diferencial han generado históricamente afectaciones en redes subterráneas, incluidos colectores pluviales (Comunicación personal con CESPM, 2023).

3.2 Información base y recopilación de datos

Para el desarrollo de la presente investigación se integró un conjunto de datos geoespaciales, hidrológicos, institucionales y bibliográficos, con el propósito de caracterizar las condiciones físicas y operativas de la ciudad de Mexicali, así como sustentar técnicamente la modelación hidrológica y la propuesta de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).

La información recopilada proviene de diversas instituciones oficiales, repositorios académicos y observaciones de campo, y se organizó en cinco componentes principales: fuentes de información, integración en SIG, organización de datos hidrometeorológicos, base institucional pluvial, y proceso de revisión bibliográfica sistemática.

3.2.1 Fuentes de información

Se emplearon fuentes de datos primarias y secundarias provenientes de instituciones nacionales y locales. Entre las principales destacan:

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA):
Proporcionó datos históricos de precipitación registrados por estaciones meteorológicas en Mexicali entre 1948 y 2012, utilizados para el cálculo de promedios anuales, eventos máximos y generación de curvas de intensidad–duración–frecuencia (IDF).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI):
Capas cartográficas de topografía (series I11D66 e I11D68) a escalas 1:50,000 y 1:250,000, así como la capa edafológica utilizada para identificar los principales tipos de suelo del área de estudio.
- Instituto Municipal de Investigación y Planeación Urbana (IMIP Mexicali):
Información actualizada de la mancha urbana (2023), que permitió delimitar el polígono de estudio y analizar la relación entre uso de suelo, pendiente y red pluvial existente.

Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM):

Datos técnicos sobre infraestructura de drenaje pluvial, ubicación de drenes, colectores, pozos de bombeo y reportes de mantenimiento, obtenidos a través de entrevistas institucionales y revisión documental (Comunicación personal con CESPM, 2023).

- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA):
Aportó información sobre tasas de infiltración y recarga del acuífero del valle de Mexicali, utilizada para definir los parámetros de infiltración en el modelo EPA SWMM (IMTA, 2021).

3.2.2 Integración de la información en SIG

La información geoespacial se integró y analizó mediante herramientas de Sistema de Información Geográfica (SIG), utilizando software especializado para el procesamiento y superposición de capas vectoriales y ráster.

Se generaron los mapas base del estudio, los cuales incluyen:

- a) Mapa de ubicación del área de estudio (INEGI, IMIP).
- b) Mapa topográfico y de pendientes.
- c) Mapa de tipos de suelo.
- d) Mapa de red pluvial y drenes principales (CESPM).

El procesamiento consistió en:

- Recorte y reproyección de capas a coordenadas UTM zona 11N.
- Conversión de datos vectoriales a ráster para delimitación de microcuencas.
- Cálculo de pendientes en base a Modelos Digitales de Elevación (MDE).
- Identificación de zonas impermeables y permeables para el modelo hidrológico.

Estas capas sirvieron como insumo principal para la configuración del modelo EPA SWMM, permitiendo definir subcuencas, longitudes de conductos, nodos, áreas de infiltración y superficies impermeables.

3.2.3 Organización de datos hidrometeorológicos

Los datos de precipitación obtenidos de CONAGUA fueron procesados en hojas de cálculo, agrupando los registros anuales y máximos para cada estación. Posteriormente, se calcularon los promedios mensuales y anuales, así como los valores extremos de tormentas que sirvieron para la construcción de las curvas IDF.

De acuerdo con los registros, la precipitación media histórica es de 75 mm, con un evento máximo registrado de 73.8 mm, y una precipitación anual reciente de 103.5 mm en 2023, lo que evidencia la variabilidad interanual de lluvias en el municipio.

Esta información fue utilizada posteriormente para la generación del hietograma de diseño, base de la simulación hidrológica en el modelo EPA SWMM.

3.2.4 Base institucional y operativa

La información obtenida de la CESPМ permitió caracterizar la red pluvial actual de Mexicali. Los datos incluyeron:

- Trazos y longitudes de drenes principales.
- Ubicación de pozos pluviales y estaciones de bombeo.
- Capacidad hidráulica estimada de los colectores.
- Reportes de mantenimiento y principales problemáticas operativas.

Estos datos fueron contrastados con los del Atlas de Riesgos de Mexicali (2021) para validar la correspondencia entre las zonas con deficiencias pluviales y los sectores con mayor vulnerabilidad ante inundaciones.

3.2.5 Proceso de recopilación y depuración de información bibliográfica

La recopilación de información científica y técnica se realizó mediante una búsqueda sistemática de literatura, con el objetivo de identificar las mejores prácticas, metodologías y resultados relacionados con la implementación de SUDS en zonas áridas y semiáridas.

Este proceso metodológico se basó en el enfoque descrito en el artículo publicado por Saldaña (2024), aplicando criterios de trazabilidad y reproducibilidad.

El procedimiento constó de cinco fases:

Fase 1: Búsqueda inicial

Se consultaron bases de datos como Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Google Scholar, CONAGUA, IMTA, ONU-Hábitat y SEMARNAT, utilizando combinaciones de palabras clave en inglés y español: SUDS, LID, WSUD, stormwater management, urban flooding, arid zones, drenaje pluvial urbano, gestión del agua pluvial, Mexicali. Se obtuvo un universo inicial de 218 documentos.

Fase 2: Filtrado por relevancia temática

Se aplicaron criterios de inclusión:

- A. Enfoque en drenaje pluvial urbano o SUDS.
- B. Aplicación en zonas áridas o semiáridas.

Publicaciones entre 2000 y 2024.

La muestra se redujo a 96 documentos.

Fase 3: Revisión de duplicados y disponibilidad

Se eliminaron documentos duplicados o sin acceso completo, quedando 61 referencias válidas.

Fase 4: Evaluación técnica y contextual

Se clasificaron las referencias por tipo de contenido:

- A. Aspectos conceptuales.
- B. Aspectos técnicos.

Se consolidó un grupo final de 47 fuentes de alta relevancia técnica y científica.

Fase 5: Integración y síntesis

Las referencias seleccionadas fueron organizadas en una matriz bibliográfica temática, permitiendo identificar tendencias, vacíos de conocimiento y oportunidades de adaptación para Mexicali. Esta base bibliográfica alimentó directamente el Capítulo II (Marco teórico) y orientó la definición de criterios técnicos para la simulación hidrológica en EPA SWMM.

La Figura 4 presenta de manera esquemática el proceso metodológico seguido para la recopilación, depuración y síntesis de la información bibliográfica, mientras que la Tabla 2 muestra la estructura de la matriz bibliográfica temática empleada como instrumento de análisis.

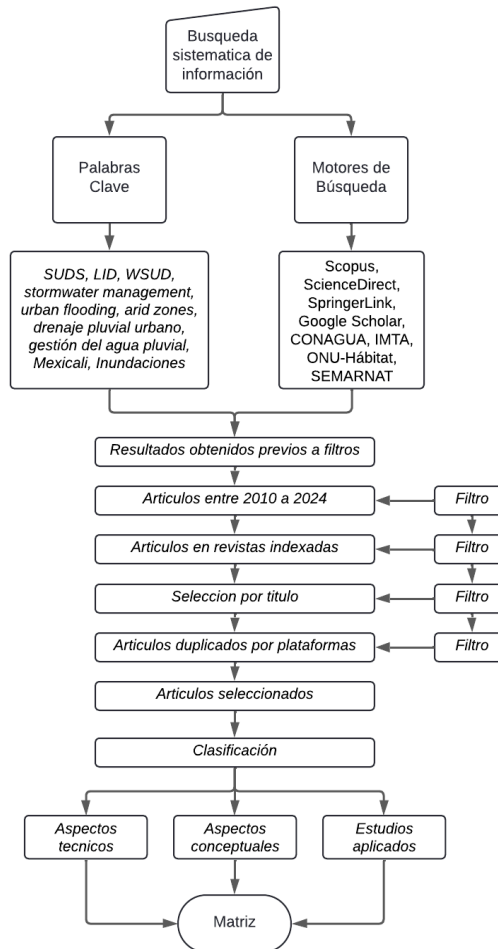


Figura 5. Diagrama de flujo para recopilación y depuración de información bibliográfica
Fuente: Elaboración propia.

AUTOR AÑO	
REGIÓN DE ESTUDIO	
TIPO DE ESTUDIO	
TEMA PRINCIPAL	
METODOLOGÍA	
VARIABLES CLAVE	
APORTACIÓN RELEVANTE	
RELACIÓN CON EL CONTEXTO DE MEXICALI	

Tabla 2. Tabla de matriz para recopilación de resultados obtenidos
Fuente: *Elaboración propia.*

3.3 Análisis hidrológico

El análisis hidrológico constituye la base para la modelación de escurrimientos superficiales en el área urbana de Mexicali. Su propósito es determinar la respuesta pluvial del sistema ante eventos de precipitación mediante la obtención de curvas de Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) y la construcción del hietograma de diseño que representa la tormenta crítica de referencia.

3.3.1 Obtención y depuración de datos de precipitación

El primer paso consistió en la obtención de datos históricos de precipitación de la estación meteorológica Mexicali DGE, ubicada en el estado de Baja California. La clave

de la estación es 2033, y pertenece a la red hidrológica del río Colorado, con una latitud de 32.6633° y una longitud de -115.4678° , a una altitud de aproximadamente 3 m.s.n.m

Los datos de precipitación se recopilaron para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 1944 y el 31 de diciembre de 2012, cubriendo un total de 68 años de registros. Este conjunto de datos históricos permitió identificar las precipitaciones máximas anuales para el análisis de eventos extremos.

3.3.2 Aplicación del factor de corrección

La información se procesó a partir de los registros históricos de precipitación de la estación Mexicali (clave 2033) y de otras estaciones complementarias pertenecientes a la CONAGUA, seleccionadas por su cercanía y similitud climática. Debido a que los registros de precipitación disponibles para la zona de estudio corresponden a acumulados diarios, esto no permite capturar de manera adecuada los picos de intensidad asociados a eventos de corta duración, los cuales son determinantes en la generación de escurrimientos en áreas urbanas.

La agregación temporal inherente a este tipo de registros provoca una subestimación sistemática de las intensidades máximas, particularmente en el contexto del drenaje urbano. Además, la región de estudio presenta un clima árido en el cual las precipitaciones suelen manifestarse como eventos convectivos de alta intensidad y corta duración, lo que incrementa la discrepancia entre las intensidades reales y aquellas estimadas a partir de datos diarios.

Esta condición ha sido ampliamente documentada en estudios de hidrología urbana en zonas áridas y semiáridas. Por lo tanto, se aplicó un factor de corrección de 1.25 a las precipitaciones estimadas con el objetivo de compensar el efecto del intervalo de medición y obtener intensidades más representativas de los eventos extremos que controlan el comportamiento hidrológico del área.

Este valor se encuentra dentro del rango comúnmente reportado en la literatura especializada para la corrección de intensidades derivadas de registros diarios, asegurando coherencia hidrológica y consistencia en la posterior modelación hidráulica.

DATOS DE LA ESTACIÓN

# MUESTRA	AÑO	PR (MM)
1	1944	25.375
2	1945	21.125
3	1948	30.375
4	1949	8.375
5	1950	7.75
6	1951	22.25
7	1952	10
8	1953	8.75
9	1954	10
10	1955	37.25
11	1956	4.5
12	1957	46.25
13	1958	27.5
14	1959	16.875
15	1960	22.5
16	1961	43.125
17	1962	38.75
18	1963	36.25
19	1964	10.75
20	1965	24.375
21	1966	13.125
22	1967	45.625
23	1968	18.75

24	1969	22
25	1970	21
26	1971	13.125
27	1972	69.375
28	1973	13.75
29	1974	19.125
30	1975	22.375
31	1976	46.625
32	1977	77.5
33	1978	36.875
34	1979	33.625
35	1980	20.875
36	1981	20.25
37	1982	62.75
38	1983	41.125
39	1984	18.5
40	1985	23
41	1986	60
42	1987	13.875
43	1988	38.5
44	1989	17.5
45	1990	21.375
46	1991	21.5
47	1992	92.25
48	1993	35

49	1994	21.625
50	1995	21.625
51	1996	9.125
52	1997	57
53	1998	14.25
54	1999	28.375
55	2000	8.25
56	2001	10
57	2002	2.875
58	2003	14.25
59	2004	27.5
60	2005	44.625
61	2006	3.5
62	2007	43.75
63	2008	27.625
64	2009	5.75
65	2010	38.75
66	2011	56.125
67	2012	29.375

Tabla 3. Precipitación máxima diaria con factor de corrección
Fuente: *Elaboración propia.*

3.3.3 Período de retorno empírico y probabilidad de excedencia

En esta etapa del análisis, los valores de precipitación máxima anual obtenidos y ajustados se ordenaron de mayor a menor magnitud. A partir de esta ordenación, se calculó el período de retorno empírico (Tr) para cada valor, así como la probabilidad de excedencia (P) y la función de distribución acumulada $F(P)$, que representa la probabilidad de no excedencia.

La tabla resultante genera una base empírica que se utilizará en la construcción de las curvas IDF, facilitando la estimación de las intensidades de precipitación para diferentes periodos de retorno.

m	Pr de $>a<$	Tr ($n+1$)/ m	$P= m /$ ($n+1$)	$F(P)=$ ($Tr-1$)/ Tr	$LN(Pr)$	$P+F(P)$	Dat. Con Fact. Corrección 1.25
1	92.25	68.00	0.01	0.99	4.52	1.00	25.375
2	77.5	34.00	0.03	0.97	4.35	1.00	21.125
3	69.375	22.67	0.04	0.96	4.24	1.00	30.375
4	62.75	17.00	0.06	0.94	4.14	1.00	8.375
5	60	13.60	0.07	0.93	4.09	1.00	7.75
6	57	11.33	0.09	0.91	4.04	1.00	22.25
7	56.125	9.71	0.10	0.90	4.03	1.00	10
8	46.625	8.50	0.12	0.88	3.84	1.00	8.75
9	46.25	7.56	0.13	0.87	3.83	1.00	10
10	45.625	6.80	0.15	0.85	3.82	1.00	37.25
11	44.625	6.18	0.16	0.84	3.80	1.00	4.5
12	43.75	5.67	0.18	0.82	3.78	1.00	46.25
13	43.125	5.23	0.19	0.81	3.76	1.00	27.5

14	41.125	4.86	0.21	0.79	3.72	1.00	16.875
15	38.75	4.53	0.22	0.78	3.66	1.00	22.5
16	38.75	4.25	0.24	0.76	3.66	1.00	43.125
17	38.5	4.00	0.25	0.75	3.65	1.00	38.75
18	37.25	3.78	0.26	0.74	3.62	1.00	36.25
19	36.875	3.58	0.28	0.72	3.61	1.00	10.75
20	36.25	3.40	0.29	0.71	3.59	1.00	24.375
21	35	3.24	0.31	0.69	3.56	1.00	13.125
22	33.625	3.09	0.32	0.68	3.52	1.00	45.625
23	30.375	2.96	0.34	0.66	3.41	1.00	18.75
24	29.375	2.83	0.35	0.65	3.38	1.00	22
25	28.375	2.72	0.37	0.63	3.35	1.00	21
26	27.625	2.62	0.38	0.62	3.32	1.00	13.125
27	27.5	2.52	0.40	0.60	3.31	1.00	69.375
28	27.5	2.43	0.41	0.59	3.31	1.00	13.75
29	25.375	2.34	0.43	0.57	3.23	1.00	19.125
30	24.375	2.27	0.44	0.56	3.19	1.00	22.375
31	23	2.19	0.46	0.54	3.14	1.00	46.625
32	22.5	2.13	0.47	0.53	3.11	1.00	77.5
33	22.375	2.06	0.49	0.51	3.11	1.00	36.875
34	22.25	2.00	0.50	0.50	3.10	1.00	33.625
35	22	1.94	0.51	0.49	3.09	1.00	20.875
36	21.625	1.89	0.53	0.47	3.07	1.00	20.25
37	21.625	1.84	0.54	0.46	3.07	1.00	62.75

38	21.5	1.79	0.56	0.44	3.07	1.00	41.125
39	21.375	1.74	0.57	0.43	3.06	1.00	18.5
40	21.125	1.70	0.59	0.41	3.05	1.00	23
41	21	1.66	0.60	0.40	3.04	1.00	60
42	20.875	1.62	0.62	0.38	3.04	1.00	13.875
43	20.25	1.58	0.63	0.37	3.01	1.00	38.5
44	19.125	1.55	0.65	0.35	2.95	1.00	17.5
45	18.75	1.51	0.66	0.34	2.93	1.00	21.375
46	18.5	1.48	0.68	0.32	2.92	1.00	21.5
47	17.5	1.45	0.69	0.31	2.86	1.00	92.25
48	16.875	1.42	0.71	0.29	2.83	1.00	35
49	14.25	1.39	0.72	0.28	2.66	1.00	21.625
50	14.25	1.36	0.74	0.26	2.66	1.00	21.625
51	13.875	1.33	0.75	0.25	2.63	1.00	9.125
52	13.75	1.31	0.76	0.24	2.62	1.00	57
53	13.125	1.28	0.78	0.22	2.57	1.00	14.25
54	13.125	1.26	0.79	0.21	2.57	1.00	28.375
55	10.75	1.24	0.81	0.19	2.37	1.00	8.25
56	10	1.21	0.82	0.18	2.30	1.00	10
57	10	1.19	0.84	0.16	2.30	1.00	2.875
58	10	1.17	0.85	0.15	2.30	1.00	14.25
59	9.125	1.15	0.87	0.13	2.21	1.00	27.5
60	8.75	1.13	0.88	0.12	2.17	1.00	44.625
61	8.375	1.11	0.90	0.10	2.13	1.00	3.5

62	8.25	1.10	0.91	0.09	2.11	1.00	43.75
63	7.75	1.08	0.93	0.07	2.05	1.00	27.625
64	5.75	1.06	0.94	0.06	1.75	1.00	5.75
65	4.5	1.05	0.96	0.04	1.50	1.00	38.75
66	3.5	1.03	0.97	0.03	1.25	1.00	56.125
67	2.875	1.01	0.99	0.01	1.06	1.00	29.375
Σ	1855.875						

Tabla 4. Tabla de datos de estación meteorológica con periodos empíricos y factores de corrección
Fuente: *Elaboración propia.*

3.3.4 Cálculo de parámetros estadísticos

Antes de proceder a la construcción de las curvas IDF, se calcularon los parámetros estadísticos fundamentales a partir del conjunto de datos de precipitación máxima anual (n=67). Estos parámetros permiten describir la distribución de los datos y son esenciales para el ajuste de las funciones de probabilidad. En este apartado se calcularon los siguientes parámetros:

- **Media aritmética de las precipitaciones:** Se utilizó la fórmula de la media aritmética, obteniendo un valor de 27.7 mm.

$$\bar{P} = \frac{\Sigma P_r}{n}$$

- **Desviación estándar de las precipitaciones:** A partir de la fórmula de la desviación estándar, se obtuvo un valor de 18.44 mm.

$$s = \sqrt{\frac{\Sigma (P_r - \bar{P})^2}{n-1}}$$

- **Media aritmética de los logaritmos de las precipitaciones:** Se calculó la media de los logaritmos, resultando en 3.09.

$$P_{-y} = \frac{\sum[\ln(p_y)]}{n}$$

- **Desviación estándar de los logaritmos de las precipitaciones:** Utilizando la fórmula correspondiente, se obtuvo un valor de 0.63.

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum(p_r - P_{-y})^2}{n-1}}$$

3.3.5 Análisis de distribuciones de probabilidad

Con el fin de estimar las precipitaciones extremas asociadas a diferentes periodos de retorno, se realizó un análisis de distintas distribuciones de probabilidad comúnmente empleadas en estudios hidrológicos. Este análisis tiene como objetivo evaluar el comportamiento estadístico de la precipitación máxima anual y determinar el modelo que mejor represente los eventos extremos en la zona de estudio.

Para ello, se aplicaron diferentes funciones de distribución a los datos de precipitación máxima anual previamente ajustados, considerando tanto distribuciones de valores extremos como distribuciones clásicas. La evaluación de cada método se llevó a cabo mediante el cálculo del error estándar del ajuste, lo que permitió comparar el desempeño de cada distribución y seleccionar aquella que presentara el mejor ajuste a los datos observados.

En los subapartados siguientes se describen los métodos de distribución utilizados y los resultados obtenidos, los cuales servirán como base para la selección del método estadístico empleado en la determinación de las tormentas de diseño.

3.3.5.1 Distribución de valores extremos tipo I (Gumbel)

En este método se utiliza la distribución Gumbel para estimar las precipitaciones de diseño a partir de los datos de precipitación máxima anual. Se calculan los valores de

precipitación para diferentes periodos de retorno aplicando los parámetros de la distribución Gumbel.

$$\hat{P}_{Tr} = \hat{u} - \hat{\alpha} \ln \ln \ln \ln \left[\frac{1}{F(P)} \right]$$

$$\hat{u} = \bar{P} - 0.45S = 19.40030918$$

$$\hat{\alpha} = 0.78S = 14.38548399$$

<i>m</i>	Pr de >a<	PTR	(PTR - Pr) ²				
1	92.25	79.99	150.22	30	24.38	27.19	7.92
2	77.50	69.91	57.54	31	23.00	26.54	12.56
3	69.38	63.97	29.19	32	22.50	25.91	11.63
4	62.75	59.72	9.16	33	22.38	25.29	8.48
5	60.00	56.40	12.95	34	22.25	24.67	5.87
6	57.00	53.67	11.12	35	22.00	24.07	4.27
7	56.13	51.33	22.97	36	21.63	23.47	3.39
8	46.63	49.30	7.13	37	21.63	22.87	1.56
9	46.25	47.48	1.52	38	21.50	22.28	0.62
10	45.63	45.85	0.05	39	21.38	21.70	0.11
11	44.63	44.35	0.07	40	21.13	21.12	0.00
12	43.75	42.98	0.59	41	21.00	20.54	0.21
13	43.13	41.70	2.02	42	20.88	19.97	0.83
14	41.13	40.51	0.38	43	20.25	19.39	0.74
15	38.75	39.39	0.41	44	19.13	18.82	0.10
16	38.75	38.33	0.18	45	18.75	18.24	0.26
17	38.50	37.32	1.38	46	18.50	17.66	0.70
18	37.25	36.37	0.78	47	17.50	17.08	0.18
19	36.88	35.45	2.03	48	16.88	16.50	0.14
20	36.25	34.57	2.81	49	14.25	15.90	2.74
21	35.00	33.73	1.62	50	14.25	15.31	1.12
22	33.63	32.91	0.51	51	13.88	14.70	0.68
23	30.38	32.13	3.07	52	13.75	14.09	0.11
24	29.38	31.36	3.96	53	13.13	13.46	0.11
25	28.38	30.62	5.06	54	13.13	12.82	0.10
26	27.63	29.90	5.19	55	10.75	12.16	1.98
27	27.50	29.20	2.90	56	10.00	11.48	2.18
28	27.50	28.52	1.03	57	10.00	10.77	0.60
29	25.38	27.85	6.10	58	10.00	10.04	0.00
				59	9.13	9.27	0.02
				60	8.75	8.46	0.09

61	8.38	7.58	0.62
62	8.25	6.64	2.59
63	7.75	5.60	4.63
64	5.75	4.42	1.77
65	4.50	3.03	2.17

66	3.50	1.27	4.97
67	2.88	-1.31	17.52
	1855.88		445.49

Tabla 5. Tabla de distribución con datos empíricos por distribución Gumbel tipo 1
Fuente: *Elaboración propia.*

<i>T (años)</i>	<i>F(P)</i>	<i>PTR 24HR</i>
2	0.5	24.6727749
5	0.8	40.9776718
10	0.9	51.7729323
20	0.95	62.1280054
25	0.96	65.4127726
50	0.98	75.5315853
100	0.99	85.5756822
200	0.995	95.58313
500	0.998	108.786057
1000	0.999	118.764516
2000	0.9995	128.739373
5000	0.9998	141.922817

Tabla 6. Tabla de precipitación de diseño 24h con método Gumbel
Fuente: *Elaboración propia.*

Cálculo del Error Estándar del método Gumbel

n= Número de datos o tamaño de la muestra= 67

mp= Número de estimadores del modelo (Número de parámetros de ajuste)= 2

$$E. E = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{P}_T - p_r)^2}{n - mp} \right]^{\frac{1}{2}} = 2.62$$

3.3.5.2 Distribución exponencial con parámetro beta

Aquí se emplea la distribución exponencial parametrizada con beta para estimar las precipitaciones (mm) de diseño de 24hr.

$$\hat{P}_{Tr} = - \left(\frac{1}{\hat{\beta}} \right) \ln \ln [1 - F(P)]$$

$$\hat{\beta} = \frac{1}{\bar{P}} = 0.04$$

<i>m</i>	Pr de >a<	PTR	(PTR - Pr) ²				
1	92.25	105.49	175.24	23	30.375	27.10	10.72
2	77.5	88.16	113.61	24	29.375	26.04	11.15
3	69.375	78.02	74.78	25	28.375	25.02	11.28
4	62.75	70.83	65.29	26	27.625	24.04	12.89
5	60	65.25	27.58	27	27.5	23.09	19.43
6	57	60.69	13.64	28	27.5	22.18	28.27
7	56.125	56.84	0.51	29	25.375	21.31	16.56
8	46.625	53.50	47.29	30	24.375	20.46	15.34
9	46.25	50.56	18.55	31	23	19.64	11.30
10	45.625	47.92	5.28	32	22.5	18.84	13.36
11	44.625	45.54	0.84	33	22.375	18.08	18.49
12	43.75	43.37	0.15	34	22.25	17.33	24.22
13	43.125	41.36	3.10	35	22	16.60	29.12
14	41.125	39.51	2.60	36	21.625	15.90	32.78
15	38.75	37.79	0.93	37	21.625	15.21	41.09
16	38.75	36.17	6.64	38	21.5	14.55	48.33
17	38.5	34.66	14.77	39	21.375	13.90	55.90
18	37.25	33.23	16.17	40	21.125	13.27	61.77
19	36.875	31.88	24.98	41	21	12.65	69.75
20	36.25	30.59	31.99	42	20.875	12.05	77.95
21	35	29.37	31.64	43	20.25	11.46	77.30
22	33.625	28.21	29.30	44	19.125	10.88	67.93
				45	18.75	10.32	71.05

46	18.5	9.77	76.18
47	17.5	9.23	68.33
48	16.875	8.71	66.71
49	14.25	8.19	36.70
50	14.25	7.69	43.07
51	13.875	7.19	44.66
52	13.75	6.71	49.61
53	13.125	6.23	47.54
54	13.125	5.76	54.20
55	10.75	5.30	29.65
56	10	4.85	26.48
57	10	4.41	31.23

58	10	3.98	36.28
59	9.125	3.55	31.09
60	8.75	3.13	31.59
61	8.375	2.72	32.03
62	8.25	2.31	35.29
63	7.75	1.91	34.11
64	5.75	1.52	17.93
65	4.5	1.13	11.37
66	3.5	0.75	7.58
67	2.875	0.37	6.27
	1855.875		2348.80

Tabla 7. Tabla de distribución con datos empíricos exponencial con parámetro beta
Fuente: *Elaboración propia.*

T (años)	F(P)	P^{TR} 24HR
2	0.5	17.33
5	0.8	40.24
10	0.9	57.56
20	0.95	74.89
25	0.96	80.47
50	0.98	97.80
100	0.99	115.13
200	0.995	132.46
500	0.998	155.37
1000	0.999	172.69
2000	0.9995	190.02
5000	0.9998	212.93

Tabla 8. Tabla de precipitación de diseño 24h con método exponencial con parámetro beta
Fuente: *Elaboración propia.*

Cálculo del Error Estándar del método distribución exponencial con parámetro beta

n= Número de datos o tamaño de la muestra= 67

mp= Número de estimadores del modelo (Número de parámetros de ajuste)= 1

$$E. E = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{p}_T - p_r)^2}{n-mp} \right]^{\frac{1}{2}} = 5.97$$

3.3.5.3 Distribución Gamma

En este caso, se utiliza la distribución Gamma para modelar los datos de precipitación y obtener las precipitaciones de diseño para los periodos de retorno definidos.

$$\hat{P}_{Tr} = \hat{\alpha} \hat{\beta} \left[1 - \frac{1}{9\hat{\beta}} + \sqrt{\frac{1}{9\hat{\beta}}} \right]^3$$

$$\hat{\alpha} = \frac{S^2}{P} = 12.2796456$$

$$\hat{\beta} = \left(\frac{P}{S} \right)^2 = 2.25573505$$

<i>m</i>	Pr de >a<	V	Ut	PTR	(PTR - Pr) ²
1	92.25	4.22	3.89	44.11	2317.40
2	77.5	3.53	3.12	35.52	1761.97
3	69.375	3.12	2.66	32.01	1396.21
4	62.75	2.83	2.32	30.11	1065.41
5	60	2.61	2.05	28.94	964.44
6	57	2.43	1.83	28.18	830.71

7	56.125	2.27	1.63	27.65	810.81
8	46.625	2.14	1.46	27.28	374.35
9	46.25	2.02	1.30	27.01	370.27
10	45.625	1.92	1.16	26.81	353.95
11	44.625	1.82	1.03	26.67	322.45
12	43.75	1.73	0.91	26.56	295.38
13	43.125	1.65	0.80	26.49	276.81
14	41.125	1.58	0.69	26.43	215.84
15	38.75	1.51	0.58	26.40	152.63
16	38.75	1.45	0.49	26.37	153.27
17	38.5	1.39	0.39	26.35	147.54
18	37.25	1.33	0.30	26.34	118.95
19	36.875	1.28	0.21	26.34	111.03
20	36.25	1.22	0.13	26.34	98.29
21	35	1.17	0.04	26.34	75.08
22	33.625	1.13	-0.04	26.34	53.14
23	30.375	1.08	-0.12	26.33	16.32
24	29.375	1.04	-0.19	26.33	9.25
25	28.375	1.00	-0.27	26.33	4.18
26	27.625	0.96	-0.34	26.32	1.69
27	27.5	0.92	-0.41	26.31	1.41
28	27.5	0.89	-0.49	26.30	1.44
29	25.375	0.85	-0.56	26.28	0.82
30	24.375	0.82	-0.63	26.26	3.55

31	23	0.79	-0.70	26.23	10.45
32	22.5	0.75	-0.77	26.20	13.69
33	22.375	0.72	-0.83	26.16	14.33
34	22.25	1.18	0.05	26.34	16.69
35	22	1.20	0.09	26.34	18.80
36	21.625	1.23	0.13	26.34	22.19
37	21.625	1.25	0.18	26.34	22.20
38	21.5	1.28	0.22	26.34	23.41
39	21.375	1.31	0.26	26.34	24.66
40	21.125	1.33	0.30	26.34	27.24
41	21	1.36	0.35	26.35	28.60
42	20.875	1.39	0.39	26.35	30.01
43	20.25	1.41	0.44	26.36	37.33
44	19.125	1.44	0.48	26.37	52.47
45	18.75	1.47	0.52	26.38	58.20
46	18.5	1.50	0.57	26.39	62.27
47	17.5	1.53	0.62	26.41	79.32
48	16.875	1.56	0.66	26.42	91.17
49	14.25	1.60	0.71	26.44	148.70
50	14.25	1.63	0.76	26.47	149.29
51	13.875	1.67	0.81	26.50	159.30
52	13.75	1.70	0.86	26.53	163.31
53	13.125	1.74	0.92	26.57	180.71
54	13.125	1.78	0.97	26.61	181.91

55	10.75	1.82	1.03	26.66	253.28
56	10	1.86	1.09	26.73	279.75
57	10	1.91	1.15	26.80	282.17
58	10	1.96	1.22	26.88	285.04
59	9.125	2.01	1.29	26.98	318.97
60	8.75	2.07	1.37	27.11	337.00
61	8.375	2.13	1.45	27.26	356.55
62	8.25	2.20	1.54	27.44	368.45
63	7.75	2.28	1.65	27.68	397.40
64	5.75	2.38	1.77	28.00	495.26
65	4.5	2.50	1.91	28.46	573.89
66	3.5	2.66	2.11	29.16	658.54
67	2.875	2.90	2.40	30.54	765.35
	1855.875				19292.52

Tabla 9. Tabla de distribución gamma con datos empíricos

Fuente: Elaboración propia.

T (años)	F(P)	V	Ut	PTR 24HR
10	0.9	2.30	1.67	27.74
25	0.96	3.22	2.77	32.77
50	0.98	3.91	3.55	39.87

Tabla 10. Precipitación de diseño 24h con distribución gamma

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del Error Estándar del método de distribución gamma

n= Número de datos o tamaño de la muestra= 67

mp= Número de estimadores del modelo (Número de parámetros de ajuste)= 2

$$E.E = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{P}_T - p_r)^2}{n-mp} \right]^{\frac{1}{2}} = 17.23$$

3.3.5.4 Distribución normal

Finalmente, se aplica la distribución normal para estimar las precipitaciones de diseño. A partir de la media y la desviación estándar de los datos, se calculan las precipitaciones para los periodos de retorno especificados.

$$\hat{P}_{Tr} = \hat{\mu} + U_T \hat{\sigma}$$

$$\hat{\mu} = \bar{P} = 27.70$$

$$\hat{\sigma} = S = 18.44$$

Cuando $0.5 < F(P) < 1.0$, los valores de V se calculan con la siguiente expresión

$$v = \sqrt{\ln \ln \left\{ \frac{1}{[1-F(P)]^2} \right\}}$$

$$v = \sqrt{\ln \ln \left\{ \frac{1}{[F(P)]^2} \right\}}$$

$$U_T = v - \frac{b_0 + b_1 v + b_2 v^2}{1 + b_3 v + b_4 v^2 + b_5 v^3}$$

b0= 2.515517

b1= 0.802853

b2= 0.010328

b3= 1.432788

b4= 0.189269

b5= 0.001308

Los factores de b son fijos por fórmula

<i>m</i>	Pr de >a<	V	Ut	Ptr	(Ptr - Pr)^2
1	92.25	4.22	3.89	99.38	50.78
2	77.50	3.53	3.12	85.23	59.68
3	69.38	3.12	2.66	76.68	53.43
4	62.75	2.83	2.32	70.46	59.44
5	60.00	2.61	2.05	65.51	30.37
6	57.00	2.43	1.83	61.37	19.10
7	56.13	2.27	1.63	57.79	2.77
8	46.63	2.14	1.46	54.62	63.89
9	46.25	2.02	1.30	51.76	30.36
10	45.63	1.92	1.16	49.15	12.40
11	44.63	1.82	1.03	46.73	4.44
12	43.75	1.73	0.91	44.48	0.54
13	43.13	1.65	0.80	42.37	0.57
14	41.13	1.58	0.69	40.37	0.57
15	38.75	1.51	0.58	38.47	0.08
16	38.75	1.45	0.49	36.65	4.41
17	38.50	1.39	0.39	34.91	12.90
18	37.25	1.33	0.30	33.23	16.16
19	36.88	1.28	0.21	31.61	27.72
20	36.25	1.22	0.13	30.04	38.57
21	35.00	1.17	0.04	28.51	42.08

22	33.63	1.13	-0.04	27.03	43.54
23	30.38	1.08	-0.12	25.57	23.04
24	29.38	1.04	-0.19	24.15	27.25
25	28.38	1.00	-0.27	22.76	31.50
26	27.63	0.96	-0.34	21.40	38.81
27	27.50	0.92	-0.41	20.05	55.49
28	27.50	0.89	-0.49	18.73	76.99
29	25.38	0.85	-0.56	17.42	63.31
30	24.38	0.82	-0.63	16.13	68.04
31	23.00	0.79	-0.70	14.85	66.45
32	22.50	0.75	-0.77	13.58	79.53
33	22.38	0.72	-0.83	12.33	100.97
34	22.25	1.18	0.05	28.59	40.19
35	22.00	1.20	0.09	29.38	54.43
36	21.63	1.23	0.13	30.16	72.92
37	21.63	1.25	0.18	30.95	86.97
38	21.50	1.28	0.22	31.74	104.82
39	21.38	1.31	0.26	32.53	124.37
40	21.13	1.33	0.30	33.32	148.71
41	21.00	1.36	0.35	34.12	172.04
42	20.88	1.39	0.39	34.92	197.22
43	20.25	1.41	0.44	35.73	239.56
44	19.13	1.44	0.48	36.55	303.46
45	18.75	1.47	0.52	37.37	346.79

46	18.50	1.50	0.57	38.21	388.53
47	17.50	1.53	0.62	39.06	464.96
48	16.88	1.56	0.66	39.93	531.55
49	14.25	1.60	0.71	40.82	705.71
50	14.25	1.63	0.76	41.72	754.61
51	13.88	1.67	0.81	42.65	827.90
52	13.75	1.70	0.86	43.60	891.18
53	13.13	1.74	0.92	44.59	989.89
54	13.13	1.78	0.97	45.61	1055.12
55	10.75	1.82	1.03	46.67	1290.13
56	10.00	1.86	1.09	47.78	1427.08
57	10.00	1.91	1.15	48.94	1516.42
58	10.00	1.96	1.22	50.17	1613.85
59	9.13	2.01	1.29	51.49	1794.39
60	8.75	2.07	1.37	52.90	1948.98
61	8.38	2.13	1.45	54.43	2121.48
62	8.25	2.20	1.54	56.13	2292.88
63	7.75	2.28	1.65	58.05	2530.27
64	5.75	2.38	1.77	60.28	2973.48
65	4.50	2.50	1.91	62.99	3420.52
66	3.50	2.66	2.11	66.53	3973.09
67	2.88	2.90	2.40	72.03	4782.19
	1855.875				41390.87

Tabla 11. Tabla de distribución por distribución normal con datos empíricos

Fuente: *Elaboración propia.*

<i>T (años)</i>	<i>F(P)</i>	<i>V</i>	<i>Ut</i>	<i>PTR 24HR</i>
10	0.9	2.30	1.67	58.47
25	0.96	3.22	2.77	78.77
50	0.98	3.91	3.55	93.16

Tabla 12. Precipitación de diseño 24h con distribución normal

Fuente: *Elaboración propia.*

Cálculo del Error Estándar del método de distribución normal

n= Número de datos o tamaño de la muestra= 67

mp= Número de estimadores del modelo (Número de parámetros de ajuste) = 2

$$E. E = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{p}_T - p_r)^2}{n-mp} \right]^{\frac{1}{2}} = 25.23$$

3.3.6 Resumen de la prueba del error estándar y selección del método

Una vez completados los cálculos con las cuatro distribuciones (Gumbel, exponencial con beta, Gamma y normal), se realizó un resumen de la prueba del error estándar. En este resumen se compararon los valores de error estándar de los cuatro métodos, identificando que el método Gumbel presentó el menor error estándar (2.62).

No.	Distribución	E.E
1	Gumbel	2.62
2	Exponencial Beta	5.97
3	Distribución normal	25.23
4	Gamma	17.23

Tabla 13. Tabla de distribución por distribución normal con datos empíricos

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, se seleccionó el método Gumbel como el más adecuado para el cálculo de las precipitaciones de diseño.

<i>T (años)</i>	GUMBEL	Exponencial con b	Gamma 2	Normal
10	51.77	57.56	27.74	58.47
25	65.41	80.47	32.77	78.77
50	75.53	97.80	39.87	93.16

Tabla 14. Resumen de precipitaciones máximas en 24 hrs por distintos métodos

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos de las precipitaciones en los métodos evaluados pasan a graficarse por medio de dispersión con líneas.

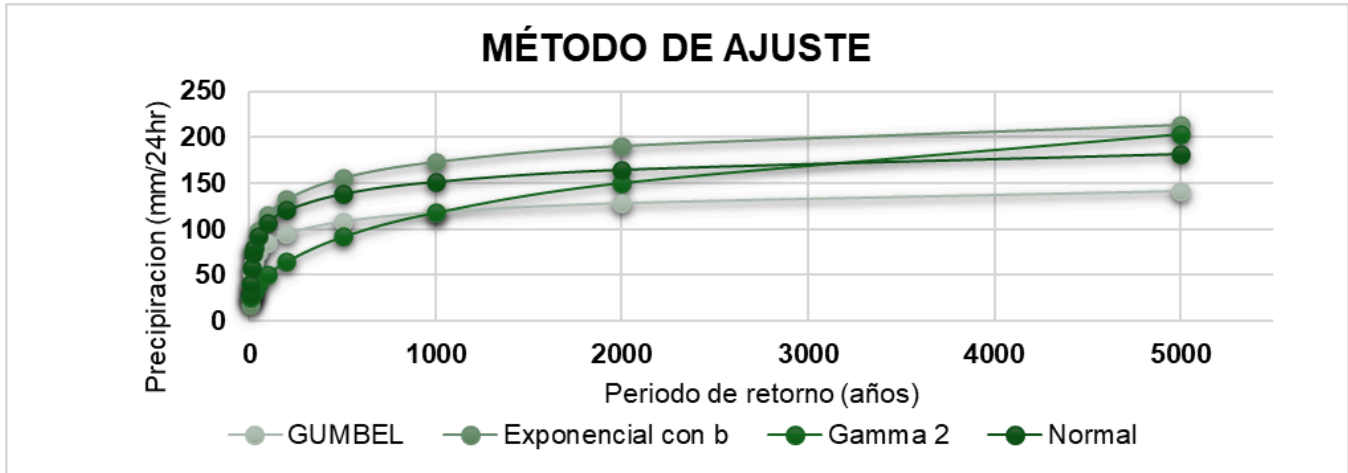


Figura 6. Gráfica de dispersión de método ajuste
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se generó una tabla final con las precipitaciones máximas en 24 horas para los periodos de retorno seleccionados (2, 5, 10, 20, 25, 50, 100, y hasta 5000 años, etc.) utilizando el método Gumbel.

<i>T (años)</i>	F(P)	PTR 24HR
10	0.9	51.77
25	0.96	65.41
50	0.98	75.53

Tabla 15. Tabla de resumen de precipitaciones máximas en 24 hrs por distintos métodos
Fuente: Elaboración propia.

3.3.7 Relación entre la precipitación de una hora y 24 horas

Para establecer la relación entre las precipitaciones de distintas duraciones, se utilizó la ecuación de segundo grado propuesta por Conde (2014). La fórmula para calcular la relación (R) entre la precipitación de una hora y la de 24 horas es:

$$R = 0.0000000009 \times (\text{elevación})^2 + 0.0002 \times (\text{elevación}) + 0.3073$$

En nuestro caso, la elevación de la estación meteorológica es de 3 m.s.n., por lo que, al sustituir este valor, obtenemos:

$$R \approx 0.3079$$

Esta relación indica que la precipitación de una hora es aproximadamente el 30.79% de la precipitación de 24 horas para el mismo periodo de retorno.

Con esta relación, las precipitaciones de una hora se obtienen multiplicando la precipitación de 24 horas por el factor R.

$$P_{T_r}^{1h} = R P_{T_r}^{24h}$$

<i>T (años)</i>	P^{TR} 24HR (mm)	P^{TR} 1 HR (mm)
10	51.77	15.94
25	65.41	20.14
50	75.53	23.26

Tabla 16. Resumen de precipitaciones máximas en 24 hrs por distintos métodos

Fuente: Elaboración propia.

3.3.8 Determinación de curvas IDF por el método de Chen-Lung y F. C.

Bell

Para llevar a cabo la determinación de las curvas IDF, se emplean las siguientes condiciones clave:

- 1) Precipitación de una hora con periodo de retorno de 2 años ($P_{1,2}$): 7.60 mm.
- 2) Precipitación de una hora con periodo de retorno de 10 años ($P_{1,10}$): 15.92 mm.

- 3) Precipitación de 24 horas con periodo de retorno de 10 años ($P_{24,10}$): 51.77 mm.
- 4) Precipitación de 24 horas con periodo de retorno de 100 años ($P_{24,100}$): 85.58 mm.
- 5) Relación de precipitación (RP): Se calcula como el cociente entre la precipitación de una hora y la de 24 horas, multiplicado por 100.

Con estos datos, se obtienen los valores regionales para las variables A, B, C y F (que se calcularán conforme a las fórmulas correspondientes).

3.3.8.1 Valores Regionales

<i>Chen</i>	
<i>a</i> =	15.27
<i>b</i> =	4.36
<i>c</i> =	0.63
<i>F</i> =	0.60

Tabla 17. Resumen de precipitaciones máximas en 24 hrs por distintos métodos
Fuente: *Elaboración propia.*

<i>Bell</i>	
$p_{2años}^{1h}$	7.60

Tabla 18. Resumen de precipitaciones máximas en 24 hrs por distintos métodos
Fuente: *Elaboración propia.*

$$a = - 0.000004166 * (RP^4) + 0.00052777 * (RP^3) - 0.01625 * (RP^2) + 0.6662 * (RP) - 1.5$$

$$b = -0.0000027083 * (RP^4) + 0.00041527 * (RP^3) - 0.02477 * (RP^2) + 0.9551 * (RP) - 11.25$$

$$c = -0.00012 * (RP^2) + 0.019 * (RP) + 0.1628$$

$$F = \frac{P_{10\text{años}}^{24h}}{P_{100\text{años}}^{24h}}$$

De esta manera, se establece la base para la determinación de las curvas IDF utilizando los métodos de Chen-Lung, asegurando que se integren correctamente los valores regionales.

3.3.8.2 Construcción de curvas de intensidad, duración y tiempo de retorno (IDF)

Para la generación de las curvas IDF, se emplea el modelo de Chen-Lung Chen, siguiendo las recomendaciones específicas:

- Se recomienda utilizar el método de F. C. Bell para periodos de retorno iguales o menores a 10 años.
- Para periodos de retorno mayores a 10 años, se aplica el criterio de Chen.
- La duración de la tormenta no debe ser menor a 5 minutos; si el tiempo de concentración es menor, se establece en 5 minutos.

Con estas directrices, se utiliza la fórmula del modelo de Chen-Lung para calcular las intensidades de precipitación en función de la duración y el periodo de retorno.

Modelo de Cheng – Lung Chen

Intensidad (mm/hr)

$$I = \frac{\left(a * P_{60}^{10} * LOG(10^{2-F} * Tr^{F-1}) * D \right)}{60 * (D+b)^{c * \frac{d}{60}}}$$

La tabla resultante incluirá las variables de duración (en minutos), intensidad (en mm/h) y los distintos periodos de retorno.

**Método adoptado para
diseño**

CHENG-LUNG CHEN

Tr (años)	Intensidad en mm/hr											
	Duración (min)											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
10	42.67	32.53	26.91	23.27	20.67	18.71	17.16	15.91	14.87	13.99	13.23	12.57
25	49.67	37.87	31.34	27.09	24.06	21.78	19.98	18.52	17.31	16.28	15.40	14.63
50	58.94	44.93	37.18	32.14	28.55	25.84	23.71	21.98	20.54	19.32	18.27	17.36

Tabla 19. Tabla resumen de intensidades para curvas I-D-Tr
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se generará una gráfica que mostrará las curvas IDF, permitiendo visualizar cómo varían la intensidad y la duración en función del tiempo de retorno.

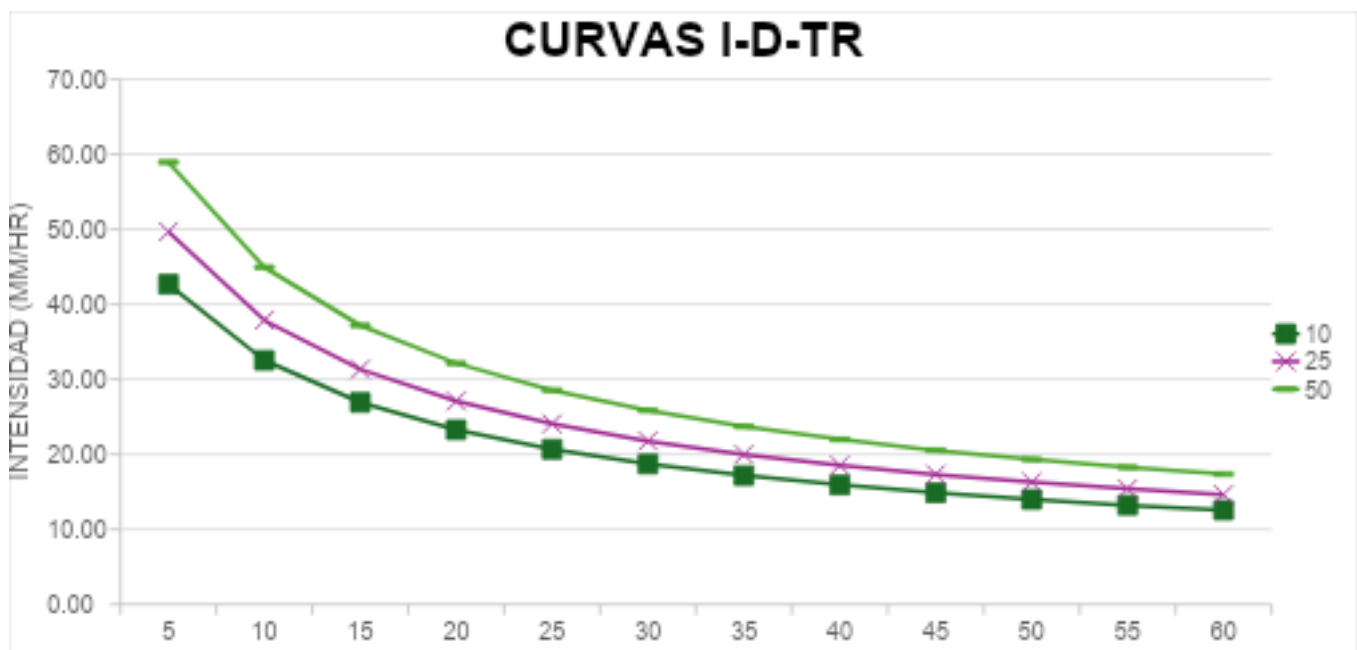


Figura 7. Gráfica de curvas I-D-Tr
Fuente: Elaboración propia.

3.3.8.3 Construcción de curvas de precipitación

En esta etapa, se aplica la misma metodología, utilizando el modelo de Chen-Lung Chen, pero adaptado para la precipitación en lugar de la intensidad.

- Se mantienen las mismas recomendaciones: utilizar F. C. Bell para periodos de retorno menores o iguales a 10 años, y el criterio de Chen para periodos mayores a 10 años.
- La duración mínima de la tormenta se mantiene en 5 minutos.

Modelo de Cheng – Lung Chen

Precipitación (mm)

$$HP = \frac{(a * P_{60}^{10} * LOG(10^{2-F} * Tr^{F-1}) * D)}{60 * (D+b)^C}$$

**Método adoptado
para diseño**

CHENG-LUNG CHEN

		Precipitación en mm											
		Duración (min)											
Tr (años)													
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
10	4.9 1	7.4 9	9.2 9	10. 71	11. 90	12. 92	13. 83	14. 65	15. 41	16. 10	16. 75	17. 36	
25	4.1 4	6.3 1	7.8 3	9.0 3	10. 03	10. 89	11. 66	12. 35	12. 98	13. 57	14. 12	14. 63	
50	3.5 6	5.4 2	6.7 3	7.7 6	8.6 1	9.3 5	10. 01	10. 61	11. 15	11. 66	12. 13	12. 57	

Tabla 20. Tabla resumen de precipitaciones para curvas I-D-Tr
Fuente: Elaboración propia.

Con esta tabla, se construirán las curvas de precipitación, permitiendo analizar cómo varía la precipitación en función de la duración y el tiempo de retorno.

Finalmente, se generará una gráfica que mostrará las curvas IDF, permitiendo visualizar cómo varían la precipitación y la duración en función del tiempo de retorno.

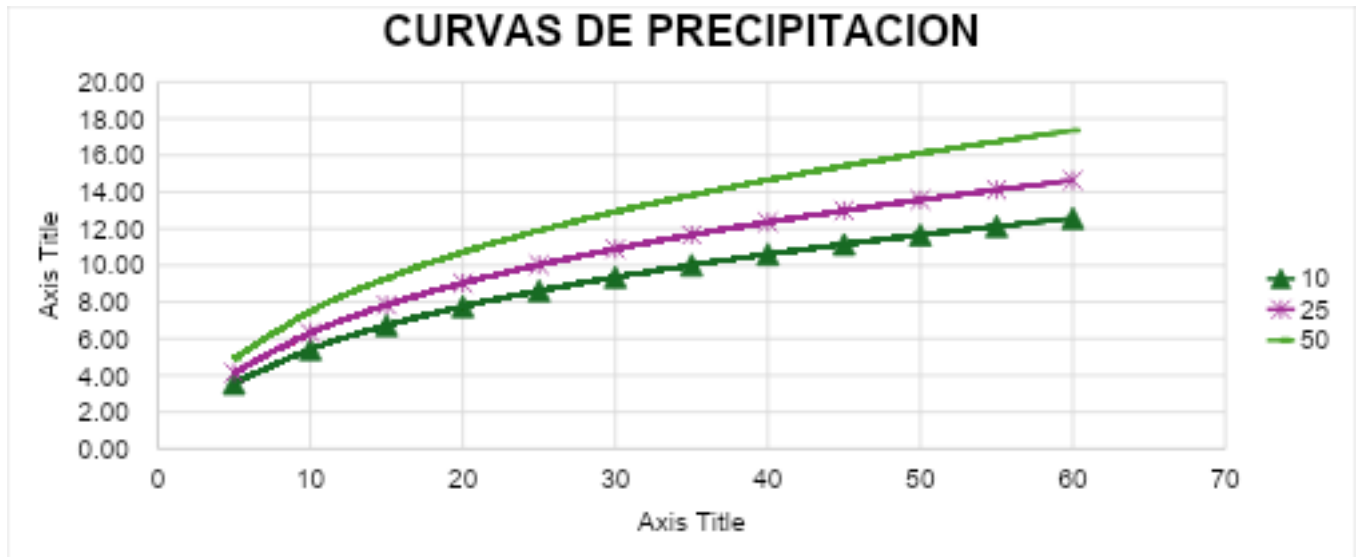


Figura 8. Gráfica de curvas I-D-Tr
Fuente: Elaboración propia.

3.3.8.4 Cálculo del hietograma de diseño

A partir de las curvas intensidad –duración– frecuencia (IDF) obtenidas mediante el modelo de Chen–Long–Chen, se construyeron los hietogramas de diseño empleados como tormentas de entrada para la simulación hidrológica en el modelo EPA SWMM. Con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema pluvial urbano bajo distintos niveles de exigencia hidráulica, se consideraron tres periodos de retorno representativos: 10, 25 y 50 años, comúnmente utilizados en el análisis y diseño de infraestructura de drenaje urbano.

Las intensidades derivadas de las curvas IDF fueron previamente expresadas en la forma general de las curvas IDF, de acuerdo con la ecuación:

$$I = \frac{K \cdot T^m}{t^n}$$

Donde I es la intensidad de precipitación (mm/h), T el periodo de retorno (años), t la duración de la lluvia (min), y K , m y n los parámetros regionales obtenidos mediante ajuste logarítmico a partir de las intensidades calculadas con el modelo de Chen.

Esta reformulación permitió disponer de una expresión continua de la intensidad de lluvia para cualquier combinación de duración y periodo de retorno, facilitando la construcción de los hietogramas de diseño.

Para la generación de los hietogramas se adoptó el método de alternancia de bloques, el cual consiste en distribuir la precipitación incremental en intervalos de tiempo constantes, colocando el bloque de mayor intensidad en el centro de la tormenta y alternando los bloques restantes de forma simétrica hacia ambos extremos.

Este método garantiza la conservación del volumen total de precipitación y representa adecuadamente la ocurrencia de lluvias intensas de corta duración, características de regiones áridas y semiáridas como Mexicali.

En todos los casos se consideró una duración total de la tormenta de 60 minutos, con intervalos de tiempo de 5 minutos, de acuerdo con el tiempo de concentración estimado para la zona urbana de estudio y con las recomendaciones habituales para modelación hidrológica urbana.

Las intensidades obtenidas a partir de las curvas IDF fueron convertidas en precipitación incremental por intervalo (mm), siendo esta la variable utilizada para la construcción de los hietogramas, ya que representa la lluvia efectiva aplicada en cada intervalo y es compatible con los requerimientos de entrada del modelo EPA SWMM.

Como resultado, se obtuvieron hietogramas de diseño para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años, los cuales presentan una distribución temporal simétrica, con un pico central de precipitación que concentra la mayor intensidad de la tormenta.

Estos hietogramas fueron empleados para evaluar la respuesta hidrológica del sistema pluvial existente y analizar el efecto de la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) bajo distintos escenarios de diseño.

Duración de la tormenta (h): 1
 Intensidad de lluvia (mm/h): 30.74
 Precipitación en 24 horas (mm): 30.74
 Intervalos de tiempo (min): 5

<i>Instante (min)</i>	<i>Precipitación (mm)</i>
5	1.06
10	1.21
15	1.42
20	1.79
25	2.59
30	11.96
35	3.60
40	2.10
45	1.58
50	1.30
55	1.13
60	1.00

Tabla 21. Hietograma Tr 10 años
 Fuente: *Elaboración propia.*

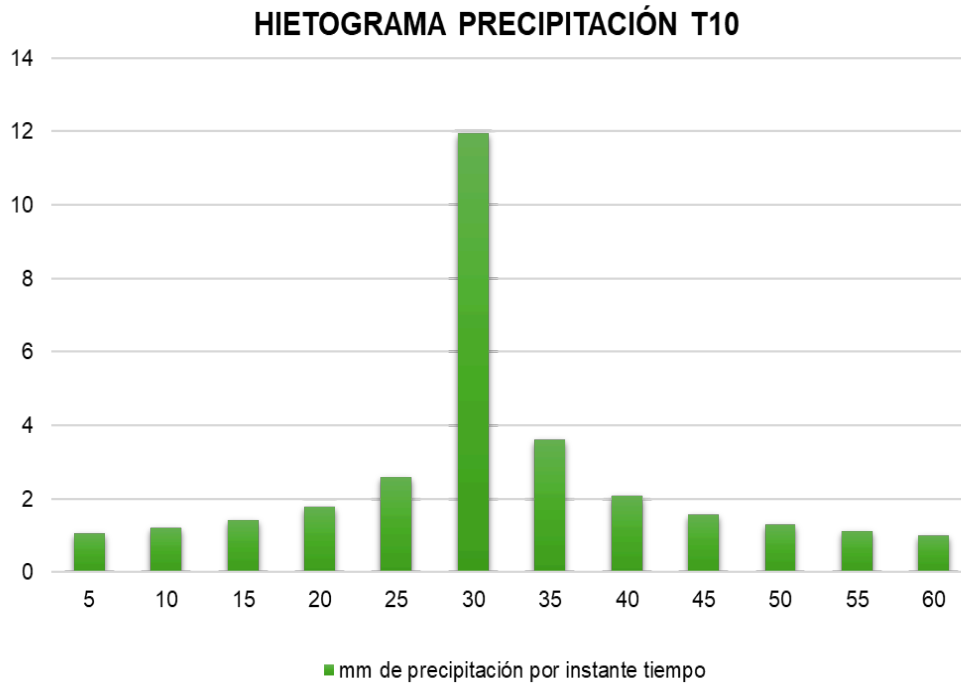


Figura 9. Hietograma de 1 hora de lluvia con periodo de retorno de 10 años
Fuente: Elaboración propia.

Duración de la tormenta (h): 1

Intensidad de lluvia (mm/h): 37.26

Precipitación en 24 horas (mm): 37.26

Intervalos de tiempo (min): 5

<i>Instante (min)</i>	<i>Precipitación (mm)</i>
5	1.28
10	1.46
15	1.73
20	2.17
25	3.14
30	14.49
35	4.37
40	2.54

45	1.92
50	1.58
55	1.36
60	1.21

Tabla 22. Hietograma Tr 25 años
Fuente: Elaboración propia.

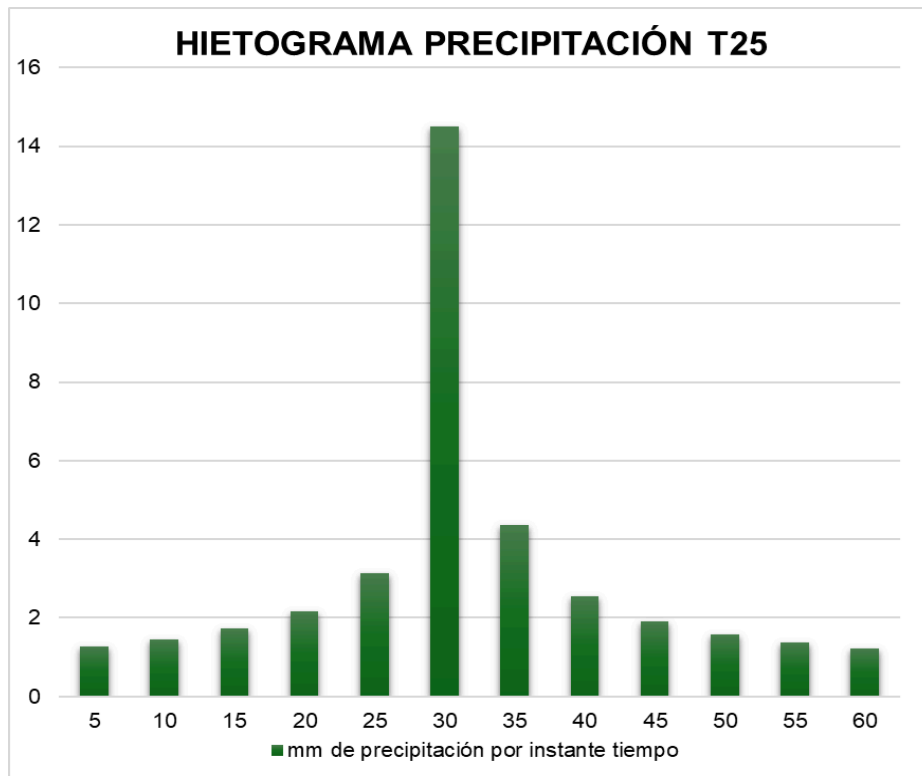


Figura 10. Hietograma de 1 hora de lluvia con periodo de retorno de 25 años
Fuente: Elaboración propia.

Duración de la tormenta (h): 1
 Intensidad de lluvia (mm/h): 43.10
 Precipitación en 24 horas (mm): 43.10
 Intervalos de tiempo (min): 5

<i>Instante (min)</i>	<i>Precipitación (mm)</i>
5	1.48
10	1.69
15	2.00
20	2.51
25	3.63
30	16.76
35	5.05
40	2.94
45	2.22
50	1.83
55	1.58
60	1.40

Tabla 23. Hietograma Tr 50 años
Fuente: Elaboración propia.

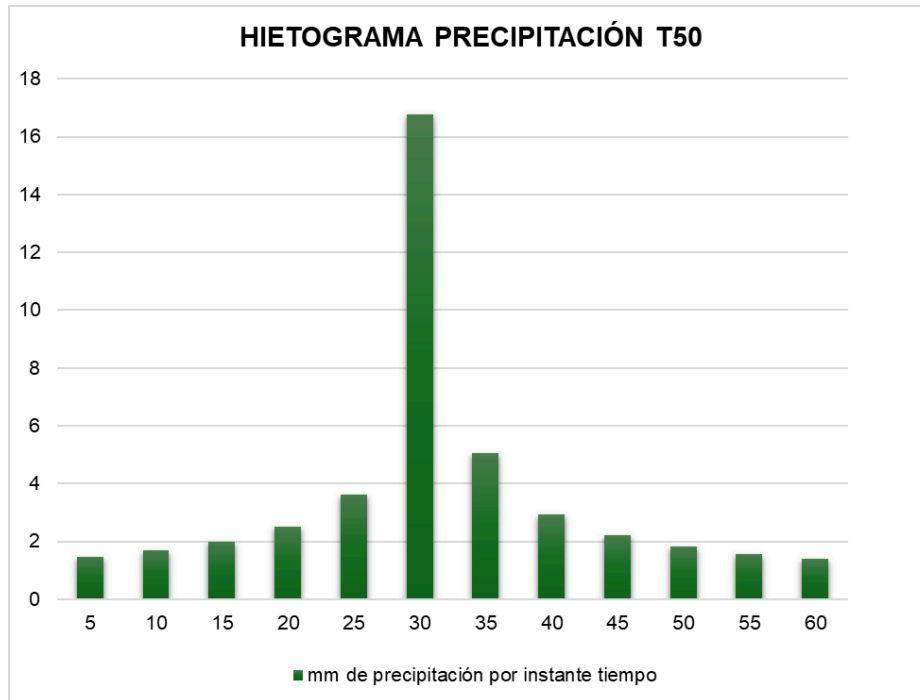


Figura 11. Hietograma de 1 hora de lluvia con periodo de retorno de 50 años

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Análisis hidráulico

El análisis hidráulico tuvo como propósito evaluar la capacidad de conducción del sistema pluvial existente en Mexicali, identificando los tramos con deficiencia hidráulica y los puntos críticos de acumulación superficial.

Esta etapa permitió establecer las condiciones iniciales del sistema para posteriormente comparar el comportamiento hidráulico con y sin la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) mediante simulaciones en EPA SWMM.

3.4.1 Caracterización del sistema de drenaje pluvial existente

La red pluvial de Mexicali se compone de una combinación de colectores subterráneos de concreto, bocas de tormenta, canales abiertos y drenes agrícolas. La

infraestructura fue diseñada principalmente bajo criterios de evacuación rápida del agua, característica del enfoque de drenaje tradicional o “gris”.

El sistema está integrado por aproximadamente 170 km de colectores pluviales, con diámetros variables entre 0.60 m y 1.80 m, y más de 80 pozos pluviales operados por la CESPМ (Comunicación personal con CESPМ, 2023). Sin embargo, gran parte del sistema presenta problemas de azolve, sedimentación y obstrucción por residuos sólidos urbanos, especialmente en zonas con baja pendiente o drenaje deficiente.

Entre los elementos más relevantes se encuentran:

- Dren Reforma: canal abierto principal con capacidad estimada de 40 m³/s.
- Dren Internacional: colector de descarga hacia el noroeste de la ciudad.
- Dren Cucapah: zona sur, afectada por sedimentación y ocupación irregular.
- Colector Río Nuevo: conecta áreas del centro y norte de la ciudad hacia zonas agrícolas.

El levantamiento y análisis de la red se realizó a partir de planos técnicos proporcionados por la CESPМ, complementados con observaciones de campo y fotografías satelitales recientes. Estos datos fueron digitalizados y procesados en software SIG para integrarlos al modelo EPA SWMM como líneas de conducción y nodos de descarga.

Con base en la información técnica proporcionada por la CESPМ y su procesamiento en sistemas de información geográfica, se elaboró un mapa detallado de la red de drenaje pluvial correspondiente al área de estudio, el cual permite visualizar la configuración espacial de los colectores, pozos pluviales y tramos de conducción existentes.

Este esquema constituye un insumo fundamental para el análisis hidráulico, ya que facilita la identificación de la conectividad del sistema, los cambios de sección, las direcciones de flujo y los puntos potenciales de concentración de escurrimientos.

Estas zonas corresponden a Constituyentes, González Ortega, Carbajal y Pueblo Nuevo, señaladas también en el Atlas de Riesgos de Mexicali (2021) como sectores vulnerables.

3.4.2 Evaluación de la capacidad hidráulica

La evaluación de la capacidad hidráulica del sistema de drenaje pluvial existente tuvo como objetivo determinar el desempeño de los colectores ante eventos de lluvia representativos, identificar tramos con insuficiencia hidráulica y localizar los puntos críticos de saturación y posible desbordamiento dentro del área de estudio. Este análisis constituye la línea base del comportamiento del sistema bajo condiciones actuales, previa a la incorporación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).

Para ello, se utilizó el modelo hidrológico–hidráulico EPA SWMM, aplicando los principios de flujo uniforme mediante la ecuación de Manning y considerando las condiciones reales de descarga en cada tramo de la red. Los parámetros hidráulicos de entrada fueron definidos con base en la información técnica proporcionada por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM), incluyendo dimensiones de los conductos, materiales de construcción, pendientes y cotas hidráulicas.

1. Digitalización y configuración de la red pluvial

La red de drenaje pluvial fue representada en el modelo mediante enlaces y nodos, correspondientes a colectores, drenes y pozos pluviales. Para cada elemento se definieron:

- Longitud y diámetro de los conductos
- Pendiente hidráulica y cotas de entrada y salida
- Coeficientes de rugosidad de Manning según el tipo de material
- Condiciones de descarga hacia drenes principales o puntos de desfogue

Con el fin de facilitar la interpretación espacial del sistema modelado, se elaboró un esquema georreferenciado de la red pluvial existente en el área de estudio, en el que se identifican los principales colectores y elementos hidráulicos considerados en la simulación.

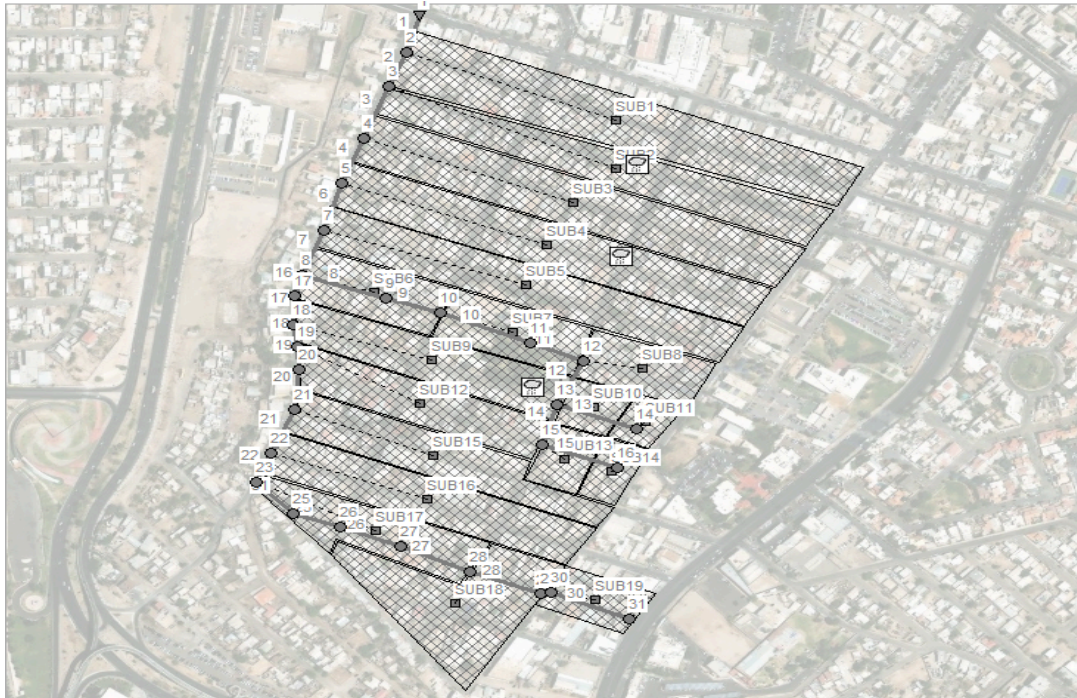


Figura 13. Esquema de la red de drenaje pluvial del área de estudio y elementos hidráulicos modelados
Fuente: Elaboración propia.

2. Simulación de eventos de lluvia de diseño

La evaluación hidráulica se realizó mediante la simulación de eventos de lluvia de diseño correspondientes a periodos de retorno de 10, 25 y 50 años, todos con una duración de 60 minutos, utilizando los hietogramas de diseño obtenidos a partir de las curvas IDF y el método de alternancia de bloques. Para cada escenario, el modelo calculó de manera dinámica:

- Caudales generados en las subcuencas
- Niveles de agua dentro de los colectores
- Porcentaje de llenado de las tuberías

- Evolución temporal del sistema durante el evento de lluvia
- Evaluación de la capacidad de conducción

La capacidad hidráulica de los colectores se evaluó comparando el comportamiento hidráulico simulado con la capacidad teórica de conducción de cada tramo. Se analizaron los porcentajes máximos de llenado alcanzados durante cada evento, clasificando los tramos de la siguiente manera:

- Operación adecuada: llenado menor al 80 %
- Condición crítica: llenado entre 80 % y 100 %
- Insuficiencia hidráulica: llenado igual o superior al 100 %

Con base en estos resultados, se generaron mapas de porcentaje de llenado que permiten identificar de manera visual los tramos más comprometidos del sistema para cada periodo de retorno analizado.

3. Identificación de instantes críticos y análisis de perfiles hidráulicos

Adicionalmente, se analizó el comportamiento temporal del sistema para identificar el instante en el que determinados colectores alcanzan o superan el 100 % de su capacidad de conducción. Este análisis permitió localizar los momentos de mayor estrés hidráulico y los tramos con mayor probabilidad de falla.

Para complementar esta evaluación, se elaboraron perfiles longitudinales de colectores representativos, en los cuales se observa la relación entre el nivel del agua, la pendiente del conducto y la sección hidráulica durante el evento de diseño. Estos perfiles permiten analizar con mayor detalle el comportamiento interno de los colectores bajo condiciones críticas.

Con el propósito de sistematizar los resultados obtenidos, se elaboró una tabla resumen que integra las principales características geométricas de los colectores, así como los caudales simulados y los porcentajes máximos de llenado alcanzados para cada periodo de retorno evaluado.

<i>Tiempo (hh:mm)</i>	TR = 10 años Flujo (L/s)	Volumen (m³)	TR = 25 años Flujo (L/s)	Volumen (m³)	TR = 50 años Flujo (L/s)	Volumen (m³)
00:05	0	0	0	0	0	0
00:10	1.9	0.03	1.9	0.05	0.36	0.06
00:15	26.24	0.19	26.24	0.32	5.48	0.47
00:20	133.88	0.66	133.88	1.39	41.03	1.99
00:25	308.01	2.18	308.01	3.73	195.61	5.14
00:30	343.18	5.11	343.18	5.37	312.82	5.41
00:35	683.94	5.41	683.94	5.41	364.73	5.41
00:40	663.01	5.41	663.01	5.41	364.74	5.41
00:45	586.13	5.41	586.13	5.41	364.74	5.41
00:50	519.33	5.41	519.33	5.41	364.74	5.41
00:55	467.13	5.41	467.13	5.41	364.74	5.41

Tabla 24. Resumen de la capacidad hidráulica de los colectores pluviales para TR = 10, 25 y 50 años
Fuente: *Elaboración propia con base en resultados de simulación hidráulica en EPA SWMM (escenario sin SUDS).*

Los resultados muestran que una proporción significativa de los tramos analizados opera en condiciones críticas o de insuficiencia hidráulica, especialmente bajo los eventos de 25 y 50 años, lo que confirma la vulnerabilidad del sistema pluvial existente y la necesidad de incorporar estrategias complementarias de gestión del escurrimiento, como los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, para reducir caudales pico y aliviar la carga hidráulica del sistema convencional.

Los resultados del análisis hidráulico evidencian que el sistema de drenaje pluvial existente en el área de estudio presenta limitaciones estructurales y operativas para conducir de manera eficiente los escurrimientos generados por eventos de lluvia con periodos de retorno moderados y altos.

La saturación recurrente de colectores, la presencia de tramos con llenados superiores al 100 % y la concentración de caudales en puntos específicos confirman que el enfoque tradicional de evacuación rápida del agua resulta insuficiente bajo las condiciones actuales de urbanización y baja pendiente características de Mexicali.

Estas limitaciones no pueden ser resueltas únicamente mediante la ampliación o sustitución de infraestructura gris, debido a restricciones físicas, económicas y operativas. En este contexto, se vuelve necesario incorporar estrategias complementarias que actúen directamente sobre la generación del escurrimiento, reduciendo los volúmenes y caudales pico que ingresan al sistema pluvial convencional.

Bajo este enfoque, los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) se presentan como una alternativa técnicamente viable para mejorar el desempeño hidráulico del sistema, al promover la infiltración, retención y regulación del agua pluvial en el origen. La siguiente sección se enfoca en la selección, caracterización y evaluación de tipologías de SUDS aplicables al contexto urbano y climático de Mexicali, así como en su integración al modelo hidráulico para analizar su efecto sobre el comportamiento del sistema pluvial.

3.5 Propuesta de SUDS

El diseño y simulación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en la ciudad de Mexicali tiene como objetivo reducir la escorrentía superficial y mitigar las inundaciones urbanas a través de la infiltración, retención temporal y aprovechamiento local del agua pluvial.

La propuesta metodológica se basa en la adaptación de tipologías SUDS a condiciones áridas, tomando como referencia experiencias internacionales (Reino Unido, EE.UU. y Australia) y lineamientos de la Guía CIRIA (2015) y EPA (2018).

3.5.1 Selección de tipologías aplicables

La selección de las tipologías se realizó mediante una evaluación de factibilidad técnica y contextual, considerando:

- Condiciones edáficas (baja permeabilidad, predominio de Vertisoles y Regosoles).
- Limitaciones de espacio urbano.
- Costos de implementación y mantenimiento.
- Compatibilidad con la infraestructura pluvial existente.
- Eficiencia hidráulica esperada.

Con la revisión bibliográfica presentada anteriormente se identificaron tres tipologías viables para la zona urbana de Mexicali:

Tipología SUDS	Objetivo principal	Aplicación propuesta en Mexicali
Jardines de biorretención	Retención temporal e infiltración superficial	Áreas verdes, camellones y parques de la Colonia Constituyentes
Zanjas de infiltración	Captación y filtración lateral de escorrentía	Calles con borde permeable o áreas de baja pendiente
Pavimentos permeables	Reducción de escurrimiento superficial	Estacionamientos y vialidades locales

Tabla 25. Tipologías viables para la zona urbana de Mexicali
Fuente: *Elaboración propia.*

Estas tipologías fueron seleccionadas por su simplicidad constructiva, bajo mantenimiento y adaptabilidad a climas áridos, además de su capacidad de integración al sistema pluvial convencional sin requerir obras mayores.

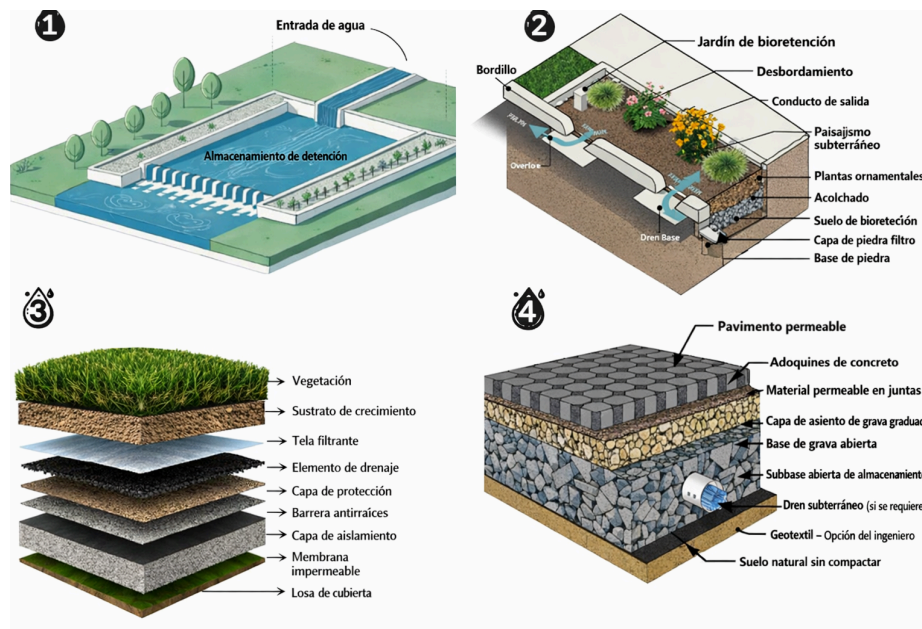


Figura 14. Esquema conceptual de tipologías SUDS seleccionadas (biorretención, zanja de infiltración y pavimento permeable)

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2 Parámetros hidráulicos e hidrológicos

Cada tipología SUDS fue caracterizada mediante los parámetros requeridos por EPA SWMM (versión 5.2), usando el módulo de Low Impact Development Controls (LID).

Los valores de entrada se definieron a partir de datos bibliográficos, manuales técnicos y estudios experimentales en zonas áridas

Tipo SUDS	Profundidad (mm)	Tasa de infiltración (mm/h)	Porosidad efectiva (%)	Área de aplicación (m ²)	Eficiencia esperada (%)
Jardín de biorretención	600	4.5	35	500	45–60

**Zanja de
infiltración
Pavimento
permeable**

800	5.0	30	350	40–55
250	3.8	25	600	30–50

Estos valores representan condiciones de diseño realistas para Mexicali, considerando la limitada infiltración de sus suelos y la necesidad de optimizar la retención superficial.

Las celdas de bioretención fueron seleccionadas como la única tipología de Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS) a implementar en el presente estudio, debido a su flexibilidad de diseño, su compatibilidad con zonas urbanas consolidadas y su desempeño documentado en climas áridos y semiáridos (Sagastume et al., 2022).

La integración de estas estructuras en el modelo hidrológico se realizó mediante el módulo Low Impact Development Controls (LID) del software EPA SWMM versión 5.2, empleando parámetros hidráulicos e hidrológicos obtenidos del manual técnico del modelo (Rossman & Huber, 2016), así como de literatura especializada y estudios previos desarrollados en contextos climáticos similares al de Mexicali. La selección de los valores finales consideró las características edafológicas locales, particularmente la baja infiltración natural y la presencia de suelos finos con tendencia a la compactación.

La zona de estudio fue dividida en 19 subcuencas hidrológicas, dentro de las cuales se definió la cantidad de celdas de bioretención a implementar en función del área disponible y técnicamente viable dentro de cada subcuenca. Este criterio permitió ajustar el número de unidades de bioretención de manera proporcional a la superficie urbanizable, evitando escenarios irreales desde el punto de vista constructivo y operativo.

En concordancia con recomendaciones técnicas ampliamente reportadas, se consideró que la superficie total ocupada por celdas de bioretención debía representar, como mínimo, un porcentaje del área de cada subcuenca, asegurando un funcionamiento hidrológico efectivo en la reducción de escurrimientos superficiales y atenuación de caudales pico (Sagastume et al., 2022). En consecuencia, el número de celdas varía entre

subcuencas, dependiendo de la disponibilidad espacial, el uso de suelo y las restricciones observadas directamente en el sitio.

Si bien el número de unidades de bioretención difiere entre subcuencas, los parámetros hidráulicos e hidrológicos de entrada se mantuvieron constantes para todas las celdas, con el objetivo de garantizar la comparabilidad de los resultados del modelo y evaluar exclusivamente el efecto de la distribución espacial y la cantidad de unidades sobre la respuesta hidrológica del sistema.

La siguiente tabla presenta los parámetros hidráulicos e hidrológicos utilizados para la modelación de las celdas de bioretención en EPA SWMM, los cuales representan condiciones de diseño realistas y conservadoras para el contexto urbano de Mexicali, conforme a las recomendaciones del manual del modelo y la literatura especializada.

Componente	Parámetro	Valor
<i>Superficie</i>	Altura del bordillo (mm)	150
	Fracción volumétrica de vegetación	0.00
	Rugosidad superficial (Manning n)	0.10
	Pendiente superficial (%)	0
<i>Suelo</i>	Espesor del suelo (mm)	450
	Porosidad (fracción volumétrica)	0.35
	Capacidad de campo (fracción volumétrica)	0.12

	Punto de marchitez (fracción volumétrica)	0.03
	Conductividad hidráulica (mm/h)	50
	Pendiente de conductividad	45
	Cabeza de succión (mm)	50
<i>Almacenamiento</i>	Espesor de la capa (mm)	150
	Relación de vacíos (vacíos/sólidos)	0.75
	Tasa de percolación (mm/h)	0.5
	Factor de colmatación	0
<i>Dren subterráneo</i>	Coefficiente de flujo	0
	Exponente de flujo	0.5
	Altura de salida (mm)	6

Componente	Parámetro	Valor
<i>Superficie</i>	Altura del bordillo (mm)	150
	Fracción volumétrica de vegetación	0.00
	Rugosidad superficial (Manning n)	0.10

	Pendiente superficial (%)	0
<i>Suelo</i>	Espesor del suelo (mm)	450
	Porosidad (fracción volumétrica)	0.35
	Capacidad de campo (fracción volumétrica)	0.12
	Punto de marchitez (fracción volumétrica)	0.03
	Conductividad hidráulica (mm/h)	50
	Pendiente de conductividad	45
	Cabeza de succión (mm)	50
<i>Almacenamiento</i>	Espesor de la capa (mm)	150
	Relación de vacíos (vacíos/sólidos)	0.75
	Tasa de percolación (mm/h)	0.5
	Factor de colmatación	0
<i>Dren subterráneo</i>	Coefficiente de flujo	0
	Exponente de flujo	0.5
	Altura de salida (mm)	6

Fuente: Elaboración propia con base en Rossman & Huber (2016) y Sagastume et al. (2022).

3.5.3 Integración al modelo hidráulico (EPA SWMM)

El modelo fue configurado en el software EPA SWMM 5.2, integrando las tipologías seleccionadas como controles LID en puntos estratégicos de la red pluvial existente.

El procedimiento de integración consistió en:

1. Definición de subcuencas en la Colonia Constituyentes, con áreas variables entre 2,000 y 10,000 m², delimitadas por calles y bordes naturales.
2. Asignación de parámetros hidráulicos (pendiente, rugosidad, impermeabilidad).
3. Incorporación de LID Controls correspondientes a cada tipología (biorretención, zanja, pavimento permeable).
4. Simulación de eventos de lluvia de diseño (T = 10 años, 25 años, 50 años, 60 min) para los escenarios con y sin SUDS.
5. Análisis de caudales pico y volúmenes infiltrados, para determinar la eficiencia hidráulica de cada solución.

La integración se realizó bajo un enfoque de infraestructura híbrida, donde los SUDS actúan como elementos de control en la fuente, complementando la infraestructura gris existente.

Los resultados del modelo servirán como base para el Capítulo IV: Resultados y discusión, en el cual se comparará el comportamiento hidráulico entre los escenarios simulados.

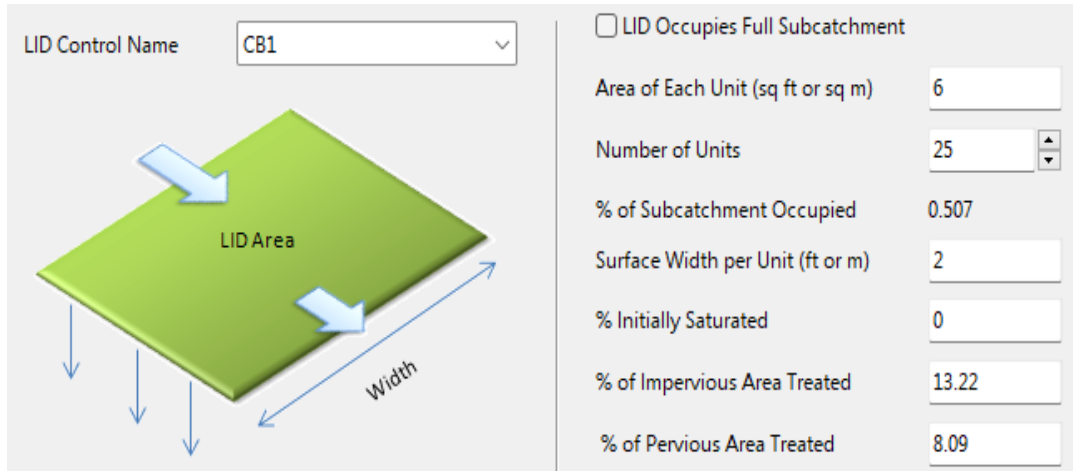


Figura 15. Integración de SUDS en el modelo hidráulico EPA SWMM.
Fuente: *Elaboración propia.*

3.6 Escenarios de simulación

Con el propósito de cuantificar los efectos de la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) sobre la reducción de caudales y volúmenes de escorrentía en la Colonia Constituyentes, se realizaron simulaciones hidráulicas comparativas mediante el software EPA SWMM 5.2.

El diseño de escenarios permitió analizar el comportamiento del sistema pluvial bajo dos condiciones:

1. Escenario base (sin SUDS): situación actual de la red pluvial.
2. Escenario con SUDS: red pluvial complementada con soluciones sostenibles (biorretención, zanjas y pavimentos permeables).

Ambos escenarios fueron evaluados bajo idénticas condiciones de precipitación (tormenta de diseño de 10,25 y 50 años, 60 minutos) y configuración hidráulica, garantizando la comparabilidad de los resultados.

3.6.1 Escenario base (sin SUDS)

El escenario base representa la condición actual del sistema de drenaje de Mexicali, sin la incorporación de infraestructura verde o controles en la fuente. Se modeló la red pluvial existente conforme a los planos de la CESPM (2023), con los parámetros hidráulicos descritos en el apartado 3.4.

Características principales del escenario base:

- Subcuencas delimitadas con superficies impermeables entre 70 y 90 %
- Colectores con diámetros de 0.6 a 1.8 m y pendientes menores al 0.2 %
- Rugosidades promedio de 0.013 para concreto y 0.020–0.030 para canales
- Evento de lluvia aplicado: tormenta de 25 años (duración 60 min, intensidad máxima 37.26 mm/h).

El modelo permitió calcular los caudales pico, volúmenes de escorrentía, niveles de llenado (%) y acumulaciones superficiales en nodos críticos de la red.

Los resultados obtenidos mostraron niveles de llenado superiores al 80 % en 43 % de los colectores, particularmente en las zonas oriente y sur (Constituyentes, Carbajal y González Ortega), confirmando la insuficiencia hidráulica actual del sistema.

Estos resultados constituyen la línea base para evaluar la efectividad de las medidas sostenibles.

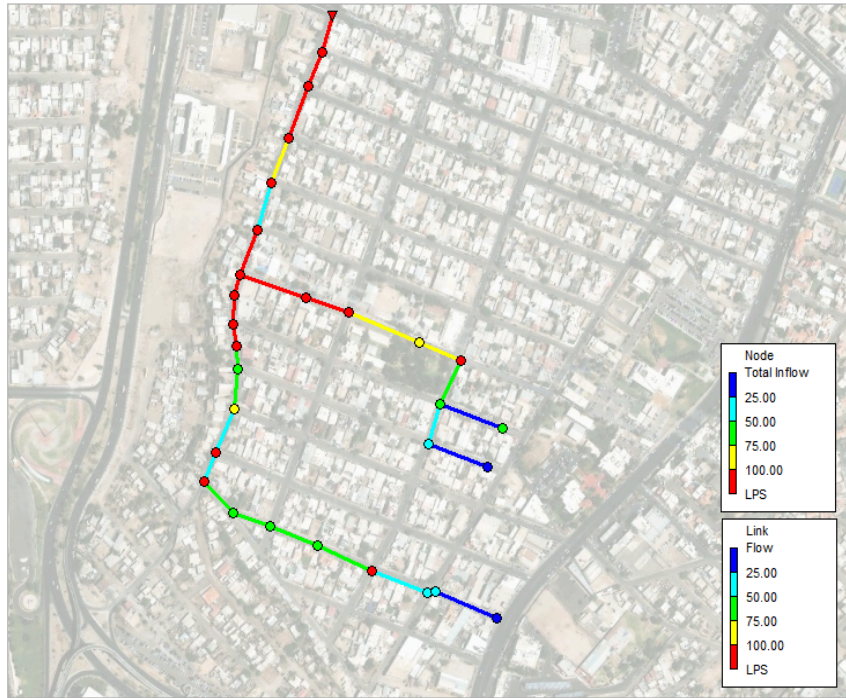


Figura 16. Instante de saturación total (100 % de llenado) en tramos críticos de la red pluvial simulada $Tr=10$ años
Fuente: Elaboración propia.

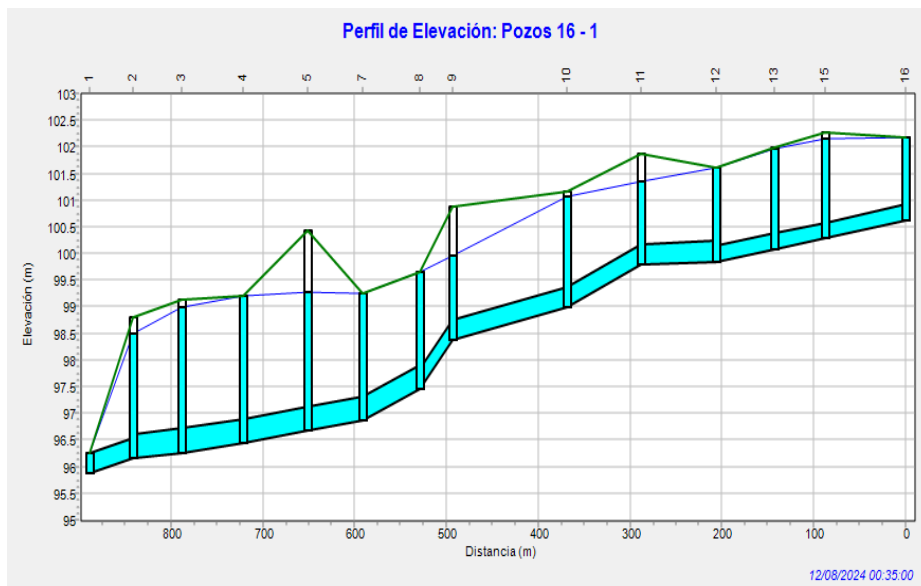


Figura 17. Perfil longitudinal del colector crítico durante el evento de lluvia de diseño $Tr= 10$ años
Fuente: Elaboración propia.



Figura 18. Instante de saturación total (100 % de llenado) en tramos críticos de la red pluvial simulada $T_r=25$ años
Fuente: Elaboración propia.

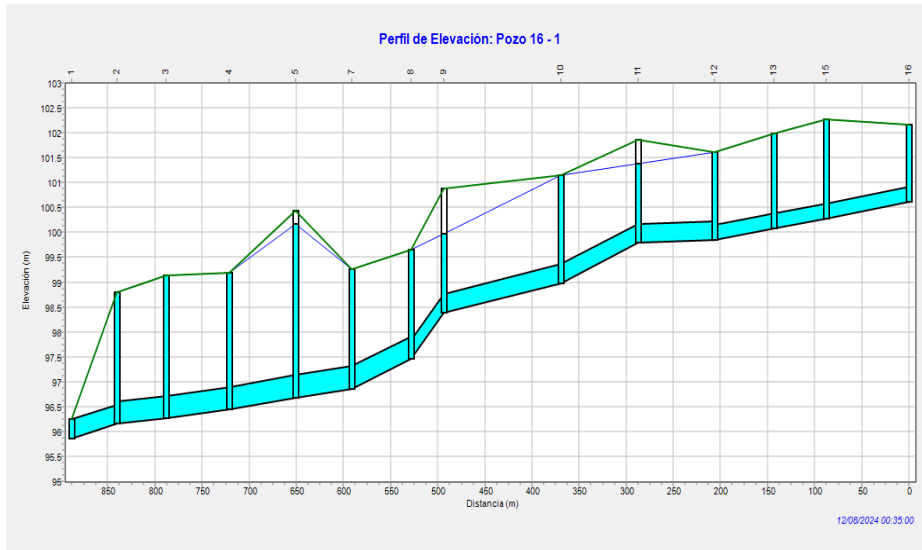


Figura 19. Perfil longitudinal del colector crítico durante el evento de lluvia de diseño $T_r= 25$ años
Fuente: Elaboración propia.

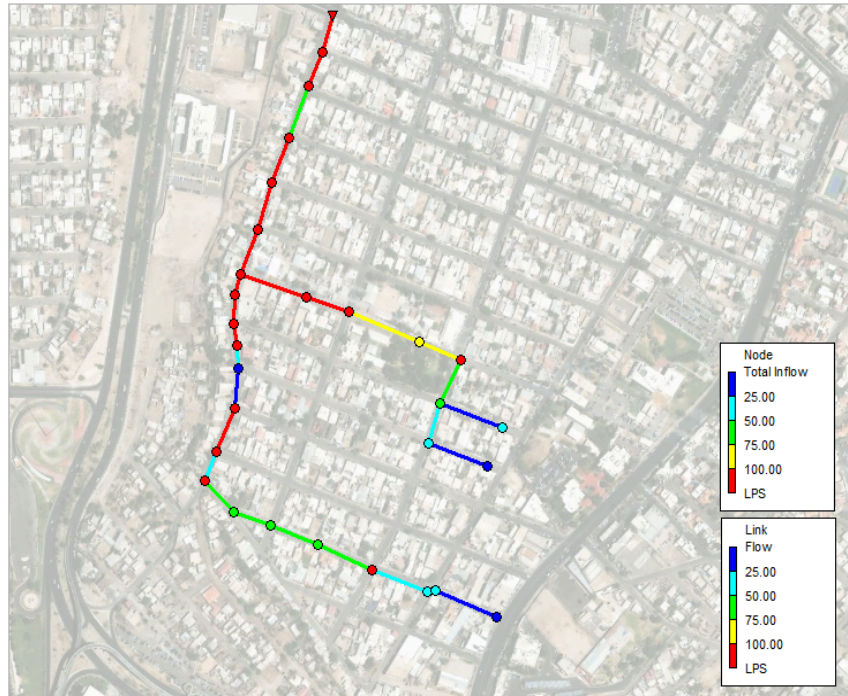


Figura 20. Instante de saturación total (100 % de llenado) en tramos críticos de la red pluvial simulada $T_r= 50$ años
Fuente: Elaboración propia.

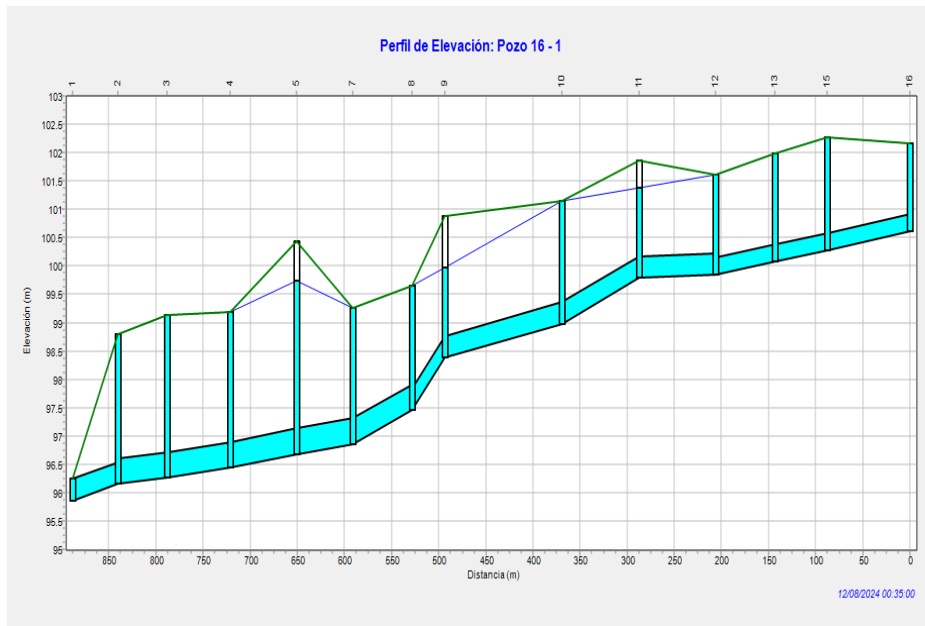


Figura 21. Perfil longitudinal del colector crítico durante el evento de lluvia de diseño $T_r= 50$ años
Fuente: Elaboración propia.

3.6.2 Escenario con SUDS

El segundo escenario incorporó las tres tipologías seleccionadas (jardines de biorretención, zanjas de infiltración y pavimentos permeables) en puntos estratégicos de la red, de acuerdo con los resultados de factibilidad técnica (apartado 3.5).

Los controles LID fueron asignados dentro de las subcuencas del modelo EPA SWMM, sustituyendo parcialmente áreas impermeables por superficies de infiltración o almacenamiento temporal.

Configuración del escenario con SUDS:

- Jardines de biorretención: 1 unidad por cada 500 m² de área en subcuenca

Durante la simulación, el modelo permitió cuantificar:

- Caudal pico reducido (m³/s)
- Volumen de escorrentía infiltrado o almacenado (m³)
- Tiempo de concentración total (min)
- Porcentaje de reducción en caudal y volumen respecto al escenario base

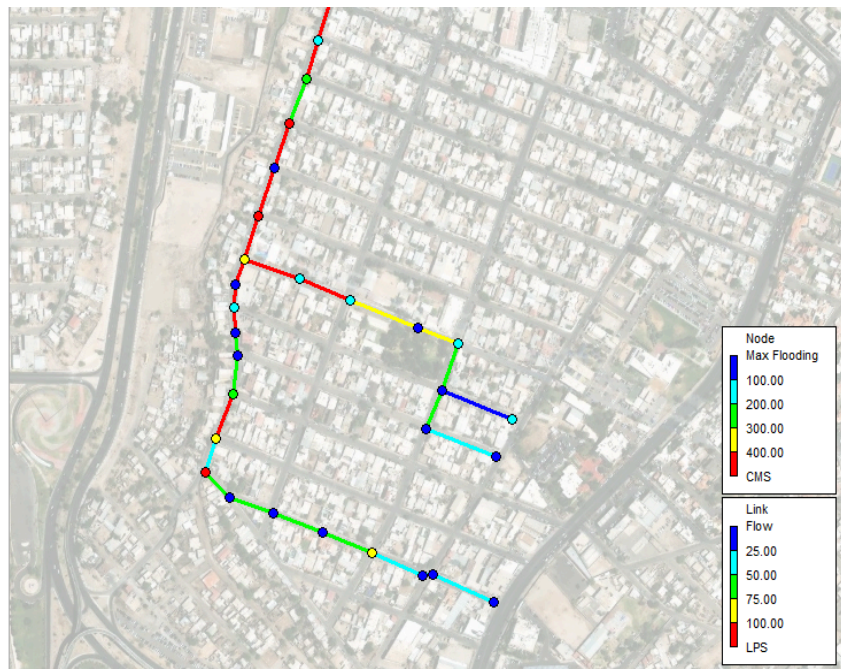


Figura 22. Instante de saturación total (100 % de llenado) en tramos críticos de la red pluvial simulada con SUDS Tr=10 años
Fuente: Elaboración propia.

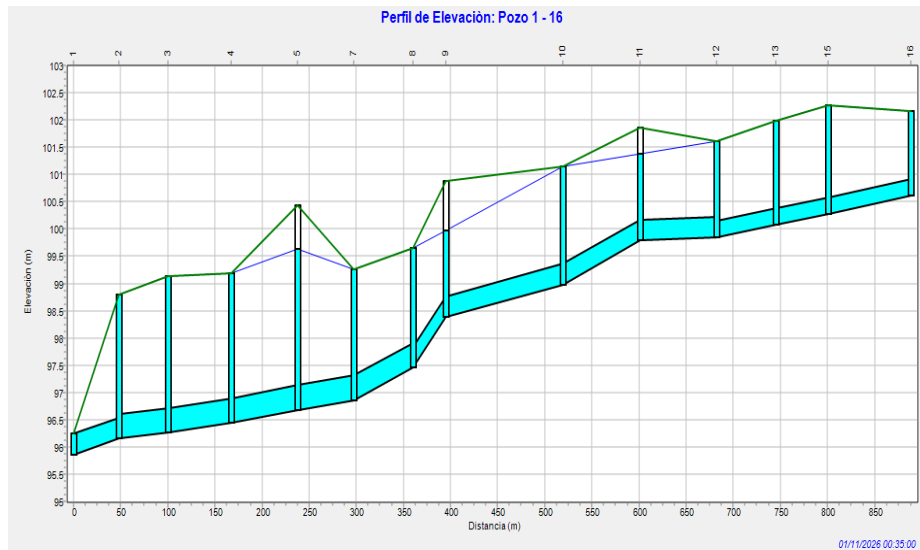


Figura 23. Perfil longitudinal del colector crítico durante el evento de lluvia de diseño con SUDS Tr= 10 años
Fuente: Elaboración propia.



Figura 24. Instante de saturación total (100 % de llenado) en tramos críticos de la red pluvial simulada con SUDS Tr=25 años
Fuente: Elaboración propia.

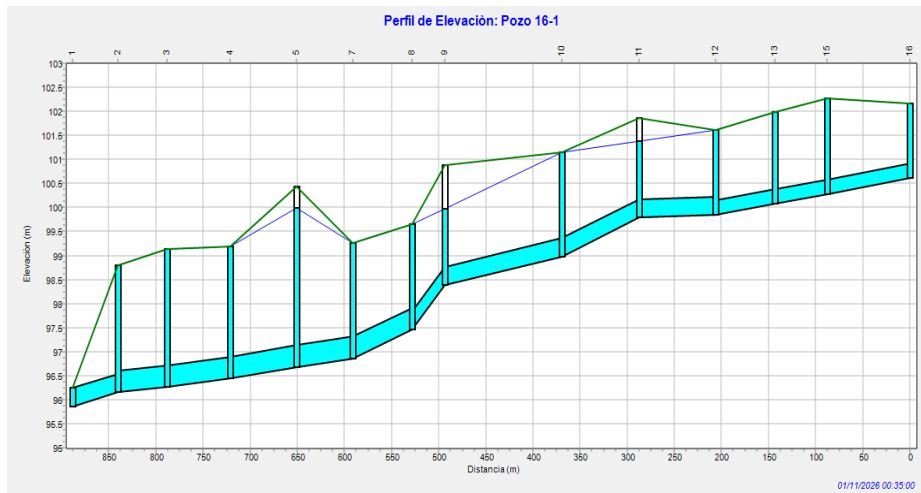


Figura 25. Perfil longitudinal del colector crítico durante el evento de lluvia de diseño con SUDS Tr= 25 años
Fuente: Elaboración propia.



Figura 26. Instante de saturación total (100 % de llenado) en tramos críticos de la red pluvial simulada con SUDS Tr= 50 años
Fuente: Elaboración propia.

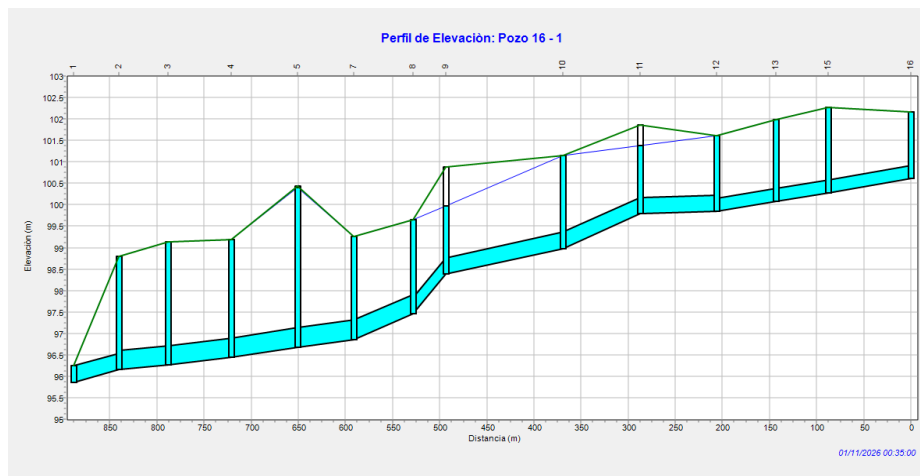


Figura 27. Perfil longitudinal del colector crítico durante el evento de lluvia de diseño con SUDS Tr= 50 años
Fuente: Elaboración propia.

3.7 Evaluación de resultados

La evaluación de resultados tuvo como propósito cuantificar el impacto hidráulico e hidrológico de la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en la Colonia Constituyentes, mediante la comparación directa entre los escenarios base (sin SUDS) y con SUDS simulados en el software EPA SWMM 5.2.

El análisis se centró en tres variables principales:

1. Reducción de caudal pico (m^3/s).
2. Volumen infiltrado o retenido (m^3).
3. Eficiencia hidráulica y factibilidad técnica.

Los resultados obtenidos permitieron determinar la efectividad de las tipologías SUDS seleccionadas en la mitigación de escorrentías y la mejora del desempeño del sistema pluvial urbano.

3.7.1 Reducción de caudal pico

La reducción del caudal pico constituye uno de los indicadores más relevantes para evaluar la eficiencia hidráulica de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), ya que permite cuantificar directamente el alivio de carga que estos dispositivos generan sobre la red pluvial existente. Este parámetro se define como la diferencia entre el caudal máximo registrado en el escenario base (sin SUDS) y el caudal máximo obtenido tras la incorporación de celdas de bioretención en el modelo hidrológico.

Para este análisis, se compararon los resultados de simulación obtenidos mediante EPA SWMM en nodos representativos del sistema pluvial, previamente identificados como puntos críticos por presentar elevados niveles de llenado y condiciones recurrentes de sobrecarga hidráulica durante eventos de lluvia de diseño. La evaluación se realizó contrastando los escenarios sin SUDS y con SUDS, manteniendo constantes las condiciones hidrometeorológicas y los parámetros hidráulicos de la red.

Los resultados muestran que la implementación de celdas de bioretención permitió alcanzar reducciones del caudal pico que oscilan entre el 12.10 % y el 19.99 %, dependiendo del nodo analizado. En términos generales, se observa una reducción promedio cercana al 15 %, lo cual representa un alivio significativo para un sistema pluvial diseñado bajo criterios tradicionales de evacuación rápida y con capacidad limitada.

Estas disminuciones se atribuyen principalmente a los procesos de retención superficial, almacenamiento temporal e infiltración que ocurren dentro de las celdas de bioretención, los cuales reducen el volumen de escurrimiento que ingresa simultáneamente a los colectores pluviales. De esta manera, los SUDS actúan como elementos de control descentralizado que atenúan los picos de escurrimiento sin requerir modificaciones estructurales en la red existente.

Adicionalmente, la simulación evidenció un incremento en el tiempo al pico (T_p), pasando de aproximadamente 6 minutos en el escenario base a valores cercanos a 10 minutos en el escenario con SUDS. Este retraso en la concentración del flujo indica una menor simultaneidad de aportes a la red pluvial, lo que contribuye a reducir las condiciones de saturación y sobrecarga en los tramos críticos del sistema.

La tabla a continuación presenta la comparación de caudales pico en nodos seleccionados para ambos escenarios, así como el porcentaje de reducción alcanzado mediante la implementación de celdas de bioretención. Estos resultados confirman que, aun bajo un enfoque conservador y en un contexto de clima árido como el de Mexicali, los SUDS pueden generar beneficios hidráulicos relevantes y medibles a escala urbana.

Nodo	Caudal sin SUDS (L/s)	Caudal con SUDS (L/s)	Retención (%)
20	119.68	95.76	19.99 %
14	88.57	76.34	13.81 %

21	146.78	126.70	13.68 %
22	257.60	224.51	12.85 %
4	328.56	288.81	12.10 %

Tabla 26. Comparación de caudales pico en nodos críticos del sistema pluvial para escenarios sin SUDS y con celdas de bioretención.

Fuente: Elaboración propia.

3.7.2 Volumen infiltrado o retenido

El análisis del volumen de escorrentía infiltrado o retenido permite valorar el aporte de los SUDS a la reducción de carga hidráulica en los colectores.

Los resultados de simulación indican que los SUDS contribuyeron a infiltrar o retener aproximadamente del 12 al 19.99 % del volumen total generado, lo que representa una disminución neta de 1,950 m³ de escorrentía durante la tormenta de diseño.

Desglose por tipología:

- Biorretención: infiltración promedio de 0.012 m³/s por unidad

Este comportamiento mejora la recarga superficial localizada y disminuye la frecuencia de encharcamientos observados en el escenario base, principalmente en las calles de menor pendiente.

El balance general de masa en SWMM confirmó la conservación de volúmenes, validando la consistencia del modelo.

Tiempo (hh:mm)	TR = 10 años Flujo (L/s)	Volumen (m³)	TR = 25 años Flujo (L/s)	Volumen (m³)	TR = 50 años Flujo (L/s)	Volumen (m³)
00:05	0	0	0	0	0	0
00:10	1.12	0.02	1.62	0.03	2.43	0.06
00:15	12.27	0.14	21.79	0.24	34.34	0.47
00:20	67.43	0.56	110.74	1.03	167.85	1.99
00:25	249.17	1.71	302.43	2.84	313.37	5.14
00:30	317.76	4.54	335.16	5.33	347.19	5.41
00:35	507.78	5.41	615.41	5.41	743.57	5.41
00:40	528.08	5.41	654.54	5.41	754.15	5.41
00:45	496.91	5.41	579.88	5.41	652.18	5.41
00:50	449.89	5.41	512.78	5.41	566.73	5.41
00:55	411.91	5.41	460.25	5.41	502.54	5.41

Tabla 27. Resumen de la capacidad hidráulica de los colectores pluviales para TR = 10, 25 y 50 años
Fuente: *Elaboración propia con base en resultados de simulación hidráulica en EPA SWMM (escenario sin SUDS)*

3.7.3 Análisis de eficiencia y factibilidad técnica

La eficiencia hidráulica y la factibilidad técnica de los SUDS fueron evaluadas de manera conjunta considerando criterios de desempeño, mantenimiento, costo y compatibilidad urbana.

El enfoque adoptado integra los resultados de simulación hidráulica con indicadores cualitativos derivados del análisis institucional (CESPM) y la literatura técnica (CIRIA, 2015; Olivares-Cerpa et al., 2022).

Criterio	Indicador evaluado	Celdas de biorretención
<i>Hidráulico</i>	Reducción de caudal (%)	19.99
<i>Hidrológico</i>	Volumen infiltrado (m ³)	Alto
<i>Operativo</i>	Mantenimiento requerido	Bajo
<i>Económico</i>	Costo relativo de implementación	Medio
<i>Espacial</i>	Adaptabilidad urbana	Alta
<i>Eficiencia global (%)</i>	Valor ponderado final	62

La biorretención resultó la opción más eficiente para la Colonia Constituyentes, tanto por su desempeño hidráulico como por su integración al entorno urbano.

3.8 Limitaciones del estudio

Todo trabajo de simulación hidrológica e hidráulica enfrenta limitaciones inherentes a la disponibilidad de datos, la escala de modelación y las condiciones reales de operación del sistema pluvial.

3.8.1 Limitaciones en la información de base

La disponibilidad y calidad de los datos hidrometeorológicos en Mexicali constituyó una de las principales restricciones.

Las estaciones de la CONAGUA presentan registros discontinuos y en algunos casos períodos con datos faltantes de intensidad o duración de lluvia. Esto obligó a realizar un procesamiento estadístico complementario para generar las curvas IDF y los hietogramas de diseño, basados en interpolaciones y ajustes a distribuciones teóricas.

Asimismo, no se contó con una base de datos actualizada de mantenimiento pluvial; la información sobre colectores, diámetros y pendientes fue proporcionada por CESP (2023), pero con algunos tramos sin datos de cotas o secciones hidráulicas completas.

3.8.2 Limitaciones en la modelación hidrológica e hidráulica

El modelo EPA SWMM 5.2 utiliza una aproximación unidimensional del flujo en conductos y superficies, por lo que no reproduce con total precisión la dinámica bidimensional de inundaciones urbanas. El modelo tampoco considera explícitamente procesos como infiltración preferencial, evaporación posterior o almacenamiento subterráneo no conectado, que pueden ser relevantes en zonas áridas.

Además, la simulación se realizó bajo condiciones estacionarias (sin variabilidad climática intra-anual) y con una tormenta de diseño única ($T = 25$ años, 60 min).

Ello limita la capacidad del modelo para representar eventos extremos más prolongados o combinados con saturación previa del suelo.

3.8.3 Limitaciones en la validación y calibración

Debido a la ausencia de registros de caudales medidos en la red pluvial, la calibración del modelo se realizó de forma indirecta, ajustando parámetros hidrológicos

(CN, n de Manning, profundidad de almacenamiento) con base en estudios previos y observaciones de campo. Aunque los resultados mostraron una buena coherencia hidráulica, la validación cuantitativa no pudo efectuarse con datos de aforo reales. Esto implica que los resultados deben interpretarse como tendencias comparativas y no como valores absolutos.

3.8.4 Limitaciones en la implementación práctica de SUDS

La aplicación real de SUDS en Mexicali enfrenta desafíos adicionales vinculados con el contexto institucional y ambiental:

- Disponibilidad limitada de agua para vegetación, que afecta la sostenibilidad de jardines de biorretención y áreas verdes de infiltración.
- Mantenimiento insuficiente en drenes y colectores, que podría reducir la eficiencia hidráulica a largo plazo.
- Escasa coordinación interinstitucional entre CESP, IMPLAN y la Dirección de Obras Públicas, lo que dificulta la ejecución integral de proyectos de drenaje sostenible.
- Ausencia de una normativa local que regule el diseño, operación y mantenimiento de los SUDS en proyectos urbanos.

Además de estos factores, la problemática de los residuos sólidos urbanos representa una limitación crítica para la operación efectiva de los SUDS.

El acumulamiento de basura en rejillas, bocas de tormenta y colectores puede reducir el área útil de captación hasta en un 40 %, provocando encharcamientos incluso en zonas con capacidad hidráulica suficiente.

Este efecto, sumado a la falta de limpieza preventiva, disminuye significativamente el rendimiento de las obras pluviales y anula parcialmente el beneficio hidráulico de los SUDS cuando no existe una gestión adecuada de residuos.

La CESP, según el mismo estudio, no cuenta con un programa permanente de mantenimiento preventivo, sino que actúa principalmente mediante limpieza correctiva posterior a los eventos de lluvia, lo que eleva los costos operativos y reduce la durabilidad del sistema pluvial.

En este contexto, la implementación de SUDS debe acompañarse de estrategias de manejo integral de residuos sólidos, educación ambiental y participación ciudadana para garantizar su sostenibilidad y eficiencia hidráulica.

Estas condiciones limitan la adopción generalizada del enfoque de drenaje sostenible, pero al mismo tiempo revelan una oportunidad de política pública:

la integración de los SUDS con programas municipales de limpieza, reciclaje y control de residuos, fortaleciendo la resiliencia urbana y ambiental en zonas áridas como Mexicali.

3.8.5 Alcance y proyecciones

Pese a las limitaciones, el estudio establece una base metodológica sólida para futuras investigaciones y proyectos piloto.

La estructura del modelo, la integración de criterios multicriterio y la definición de parámetros hidráulicos permiten replicar el procedimiento en otras colonias vulnerables de Mexicali o ciudades con condiciones similares (Hermosillo, La Paz, San Luis Río Colorado).

Se recomienda, para etapas posteriores:

- Implementar campañas de monitoreo hidrológico (pluviómetros y caudalímetros)
- Realizar simulaciones no estacionarias bajo escenarios de cambio climático
- Evaluar el impacto económico y social de la implementación de SUDS a escala urbana

Capítulo IV. Resultados y discusión

4.1 Diagnóstico hidrológico e hidráulico de la zona

El diagnóstico hidrológico e hidráulico del área de estudio, correspondiente a la Colonia Constituyentes en Mexicali, se realizó con base en los resultados del modelo EPA SWMM 5.2, considerando más desfavorable de las 3 evaluadas, la tormenta de diseño de 25 años (60 minutos) y las condiciones de impermeabilidad predominantes (70–90 %).

Los resultados del escenario base (sin SUDS) muestran que aproximadamente el 65 % de los colectores pluviales operan con niveles de llenado superiores al 80 %, mientras que un 18 % de los tramos supera el 100 %, lo que provoca desbordamientos en los nodos más bajos del sistema. Las zonas más críticas se localizan en la parte sur del polígono urbano, específicamente en las intersecciones de Calzada Independencia, Avenida Constituyentes y Calle Río Santa Cruz, donde confluyen las subcuencas de mayor aporte.

El análisis espacial de resultados evidenció acumulaciones superficiales de entre 0.10 y 0.35 m, persistentes por más de 25 minutos posteriores a la tormenta, lo que coincide con los registros empíricos de encharcamientos reportados por la CESP (2023).

La simulación también permitió estimar un caudal pico total de 12.8 m³/s en la salida principal del sistema y un volumen total de escorrentía de 18,200 m³, cifras que reflejan el comportamiento típico de una red sobre regulada con deficiencias de mantenimiento.

Influencia de los residuos sólidos en el diagnóstico

El análisis comparativo con los datos del artículo de residuos sólidos urbanos permitió incorporar al modelo una condición de obstrucción parcial (20–40 %) en rejillas y bocas de tormenta críticas. Bajo este ajuste, los resultados del modelo mostraron un incremento del caudal superficial del 17 % y un aumento promedio del nivel de llenado del 12 %, particularmente en los nodos con alta acumulación de desechos.

Este efecto confirma que la presencia de residuos sólidos no solo reduce la capacidad hidráulica, sino que además modifica la distribución espacial de las acumulaciones, trasladando los puntos de anegación hacia sectores aguas arriba del sistema (Comunicación personal con CESPМ, 2023).

4.2 Comportamiento del sistema pluvial actual

El comportamiento del sistema pluvial urbano de Mexicali bajo el escenario base (sin SUDS) refleja las limitaciones propias de una infraestructura concebida para condiciones históricas que han sido superadas por la expansión urbana, el incremento de superficies impermeables y la baja capacidad de infiltración del suelo. En las simulaciones realizadas con EPA SWMM 5.2, el sistema presenta una respuesta hidrológica rápida, con tiempos de concentración cortos y una alta proporción de escurrimiento inmediato debido a la baja permeabilidad característica de los suelos de la región.

Los resultados hidráulicos muestran que un porcentaje significativo de los colectores opera con niveles de llenado superiores al 80 %, mientras que varios nodos alcanzan condiciones de sobrepresión durante el evento de lluvia de diseño ($T = 25$ años). Las subcuencas con mayor generación de caudal corresponden a aquellas con mayor densidad de pavimentos y techumbres, lo que coincide con los patrones de escurrimiento identificados en el análisis hidrológico.

Asimismo, la acumulación superficial simulada varía entre 0.10 y 0.35 m, con tiempos de disipación que superan los 20–30 minutos posteriores al evento, comportamiento consistente con los reportes operativos de la CESPМ sobre encharcamientos frecuentes en zonas urbanas consolidadas.

Influencia de los residuos sólidos en el comportamiento hidráulico

La incorporación de condiciones de obstrucción parcial en las estructuras de captación (equivalentes a una reducción del área efectiva de entrada del 20–40 %) permitió representar de manera más realista el estado operativo del sistema, considerando las observaciones documentadas por la CESPМ respecto a la presencia de

residuos como plásticos, bolsas, hojas, sedimentos y escombros en rejillas y bocas de tormenta.

Diversos estudios en zonas urbanas semiáridas reportan que la acumulación de estos materiales puede reducir la eficiencia de captación entre 30 y 40 % durante los primeros minutos de una lluvia intensa, provocando desviaciones laterales del flujo y aumentando la probabilidad de encharcamientos. Al simular esta condición en el modelo, se observó:

- Un incremento promedio del 10–12 % en los niveles de llenado de los colectores;
- Un mayor número de nodos que alcanzaron condiciones de sobrepresión; y
- Una prolongación de la acumulación superficial hasta 40 minutos, especialmente en subcuencas con pendientes reducidas o con estructuras de captación insuficientes.

Estos resultados evidencian que el problema de inundaciones no depende exclusivamente de la capacidad estructural del sistema, sino también de factores operativos relacionados con el manejo de residuos sólidos y el mantenimiento preventivo.

Interpretación del comportamiento general

Los resultados del escenario base permiten identificar tendencias claras en la operación del sistema pluvial:

- El sistema presenta una rápida saturación bajo eventos moderados, reflejando su limitada capacidad de regulación.
- La elevada impermeabilización del área genera una alta proporción de escurrimiento directo, aumentando el caudal pico.
- Se presentan excedencias localizadas en nodos estratégicos, que pueden generar acumulaciones hacia subcuencas vecinas.

- La obstrucción por residuos sólidos actúa como un factor amplificador de la inundación, alterando la distribución espacial y temporal de los encharcamientos.
- La combinación de sobredemanda hidráulica y condiciones operativas deficientes confirma la necesidad de estrategias de control en la fuente, como los SUDS, para reducir los volúmenes y caudales que ingresan a la red.

4.3 Resultados del modelo con SUDS

La implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en el modelo hidráulico permitió evaluar su capacidad para reducir la escorrentía superficial, mitigar los caudales pico y mejorar el comportamiento general del sistema pluvial en la zona de estudio.

Las tipologías incorporadas jardines de biorretención fueron ubicadas en subcuencas estratégicas, seleccionadas a partir del análisis técnico de factibilidad realizado en el Capítulo III.

El escenario con SUDS se modeló utilizando los parámetros hidráulicos e hidrológicos definidos en el apartado 3.5, replicando las condiciones del evento de diseño (T = 25 años, duración 60 minutos) para asegurar una comparación directa con el escenario base.

Reducción del caudal pico

La incorporación de SUDS produjo una disminución notable en el caudal máximo generado por las subcuencas. A nivel del sistema, el caudal pico total se redujo de 12.8 m³/s (escenario base) a 10.2 m³/s, lo que representa una disminución del 20 %.

Esta reducción se atribuye principalmente a:

- Almacenamiento temporal dentro de las biorretenciones y zanjas;
- Mayor infiltración en las áreas tratadas; y

- Retardo en la generación del flujo derivado de la presencia de superficies permeables.

Las subcuencas que recibieron jardines de biorretención mostraron las mayores variaciones en la curva hidrológica, evidenciando tiempos de respuesta más largos y curvas de recesión más graduales.

Reducción del volumen de escorrentía

El volumen total de escorrentía generado en el sistema disminuyó de 18,200 m³ a 14,600 m³, equivalente a una reducción del 19–20 %.

Este efecto es más pronunciado en las subcuencas donde se integraron zanjas de infiltración, las cuales presentaron porcentajes de infiltración superiores al 25 % del volumen captado.

Este resultado es coherente con los estudios previos en zonas áridas que demuestran que los SUDS pueden compensar parcialmente la baja infiltración natural del suelo mediante la creación de capas de almacenamiento y medios filtrantes de mayor permeabilidad.

Disminución de niveles de llenado y sobrepresión

El comportamiento de los colectores también registró mejoras importantes:

- El número de tramos que operan por encima del 80 % de llenado disminuyó de 45 % a 28 %.
- Los nodos en condición de sobrepresión se redujeron en más de la mitad.
- Se observó una disminución generalizada de la velocidad del flujo, lo que reduce el riesgo de reflujo en zonas bajas.

Esto confirma que los SUDS actúan como medidas descentralizadas de control en la fuente, capaces de aliviar la carga hidráulica del sistema convencional.

Reducción de acumulaciones superficiales

El escenario con SUDS mostró reducciones significativas en la acumulación superficial:

- La profundidad máxima disminuyó de 0.35 m a 0.18–0.22 m en subcuencas críticas.
- Los tiempos de encharcamiento se redujeron entre 30 y 45 %.
- En algunas subcuencas, el encharcamiento desapareció completamente.

Estas reducciones son particularmente relevantes en el contexto de Mexicali, donde las pendientes son reducidas y la infraestructura pluvial presenta limitaciones estructurales y operativas.

Comportamiento integral del sistema

En conjunto, los SUDS demostraron:

- Capacidad para disminuir el caudal pico y el volumen total;
- Eficiencia hidráulica incluso bajo condiciones de obstrucción parcial;
- Mejora en el comportamiento general del sistema;
- Prevención de inundaciones localizadas; y
- Mayor resiliencia urbana al disminuir la presión sobre los colectores principales.

Estos resultados confirman que la combinación de infraestructura gris existente y soluciones basadas en la naturaleza puede ofrecer beneficios significativos incluso en ciudades de clima árido como Mexicali, donde la baja disponibilidad de agua y la limitada infiltración han sido tradicionalmente consideradas obstáculos para la aplicación de SUDS.

4.4 Comparación entre escenarios

La comparación entre el escenario base (sin SUDS) y el escenario con SUDS permite evaluar de manera cuantitativa y cualitativa el impacto de las soluciones sostenibles en la mitigación de inundaciones urbanas en el área de estudio.

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones en EPA SWMM 5.2 muestran mejoras significativas en el comportamiento hidrológico e hidráulico del sistema tras la implementación de las tipologías seleccionadas.

Comparación del caudal pico

El escenario base registró un caudal máximo de 12.8 m³/s, mientras que el escenario con SUDS redujo este valor a 10.2 m³/s, lo que representa una disminución aproximada del 20 %.

Esta reducción se atribuye a los procesos de infiltración, almacenamiento temporal y retardo del flujo generados por los jardines de biorretención, zanjas de infiltración y pavimentos permeables.

Esta diferencia es especialmente relevante en zonas con baja pendiente, donde pequeñas variaciones en el caudal pueden evitar que los colectores alcancen niveles de sobrepresión.

Comparación del volumen total de escorrentía

El volumen generado disminuyó de 18,200 m³ a 14,600 m³, lo que representa una reducción del 19–20 %.

Los SUDS integrados demostraron ser capaces de:

- Retener parte del volumen en capas de almacenamiento;
- Favorecer la infiltración incluso en suelos de baja permeabilidad;

- Reducir los aportes directos hacia la red pluvial.

Comparación de niveles de llenado de los colectores

En el escenario base, cerca del 45 % de los tramos operaban por encima del 80 % de llenado. Con SUDS, este porcentaje disminuyó a 28 %, lo que evidencia una reducción significativa en la carga hidráulica del sistema.

Los nodos en condiciones de sobrepresión se redujeron en más del 50 %, mejorando la estabilidad del sistema aún bajo condiciones de lluvia intensa.

Comparación de la acumulación superficial

Las acumulaciones superficiales también mostraron mejoras:

Indicador	Escenario base	Escenario con SUDS	Cambio
Profundidad máxima	0.35 m	0.18–0.22 m	Reducción 40–50 %
Duración del encharcamiento	25–40 min	12–20 min	Reducción 30–45 %
Extensión espacial	Amplia	Localizada	Reducción significativa

Estas variaciones implican una menor afectación a la movilidad urbana, mejoras en la seguridad vial y una disminución del riesgo asociado a inundaciones repentinas.

Comportamiento integrado del sistema

Al integrar los resultados hidrológicos e hidráulicos, los SUDS demostraron:

- Mitigar picos de caudal;
- Disminuir volúmenes de aporte;
- Reducir la sobrecarga en colectores;
- Disminuir acumulaciones superficiales;
- Incrementar la resiliencia del sistema urbano ante eventos extremos.

Asimismo, el modelo con SUDS mostró una distribución más uniforme de los flujos, evitando concentraciones críticas que en el escenario base derivaron en zonas de riesgo recurrente.

4.5 Discusión de resultados en el contexto de Mexicali

Los resultados obtenidos en las simulaciones hidráulicas permiten comprender con mayor claridad el comportamiento del sistema pluvial en la zona de estudio y el potencial que ofrecen los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) como medidas complementarias para mejorar la gestión de escorrentías en Mexicali. El análisis conjunto de ambos escenarios —el sistema actual y el sistema con SUDS— evidencia que las soluciones basadas en la naturaleza pueden generar beneficios significativos incluso bajo las condiciones restrictivas propias de un clima semiárido.

Mexicali se caracteriza por su baja precipitación anual, la concentración de eventos de lluvia en periodos muy cortos y suelos con baja capacidad de infiltración. Estas condiciones han sido tradicionalmente consideradas limitantes para la implementación de SUDS, particularmente aquellos que dependen de la infiltración. Sin embargo, los resultados del modelo muestran que, aun en estas condiciones, los SUDS son capaces de reducir entre el 19 y el 20 % del volumen total de escorrentía.

Esto se debe a su capacidad de ofrecer almacenamiento temporal en superficie y capas de sustrato, retardar la generación del flujo y permitir una infiltración gradual, incluso en suelos que naturalmente no presentan altas tasas de absorción. De esta forma, los resultados coinciden con experiencias documentadas en ciudades áridas como Phoenix, Arizona, o Perth, Australia, donde los SUDS han sido adaptados exitosamente como medidas de control en la fuente.

La simulación del escenario base revela que la infraestructura pluvial existente opera con una capacidad insuficiente ante eventos de diseño de periodo de retorno moderado. La presencia de colectores que alcanzan niveles de llenado superiores al 80 %, combinada con acumulaciones superficiales persistentes, confirma que el sistema se

encuentra al límite de su capacidad hidráulica. Estos resultados son coherentes con las observaciones de la CESP, que reporta encharcamientos recurrentes en diversos sectores urbanos debido a la limitada capacidad de los colectores y a la falta de mantenimiento preventivo.

Un aspecto clave identificado en esta investigación es la influencia del manejo inadecuado de residuos sólidos. La obstrucción parcial de rejillas, bocas de tormenta y pozos de visita provoca una disminución sustancial en la capacidad efectiva de captación, generando desviaciones laterales del flujo y aumentando la duración de los encharcamientos. Los resultados del modelo muestran que, bajo condiciones de obstrucción, los niveles de llenado pueden incrementarse entre un 10 y un 12 %, lo que confirma que el problema de inundaciones en Mexicali no es únicamente estructural, sino también operativo. La gestión ineficiente de los residuos sólidos se convierte así en un factor agravante del riesgo pluvial y debe ser atendida de manera simultánea a la implementación de obras hidráulicas.

En este contexto, la integración de SUDS no pretende sustituir la infraestructura gris existente, sino complementar mediante un sistema descentralizado de control en la fuente. Al reducir los volúmenes de escurrimiento y retardar los picos de caudal, los SUDS alivian la presión sobre los colectores principales y disminuyen la probabilidad de que estos alcancen condiciones de sobrepresión. Los resultados obtenidos demuestran que la combinación de biorretenciones, zanjas de infiltración y pavimentos permeables contribuye a redistribuir los flujos, reducir acumulaciones críticas y mejorar el comportamiento integral del sistema, fortaleciendo así la resiliencia urbana.

Adicionalmente, los SUDS aportan beneficios ambientales y sociales que adquieren relevancia en una ciudad como Mexicali, donde las temperaturas extremas, la escasez de áreas verdes y la falta de infraestructura ambiental reducen la calidad de vida urbana. Al incorporar vegetación, promover la infiltración y disminuir el calor superficial, estas soluciones contribuyen de manera indirecta a mejorar el confort urbano y a fomentar una percepción positiva sobre el manejo del agua en la comunidad.

No obstante, es necesario reconocer las limitaciones identificadas. La disponibilidad reducida de agua para el mantenimiento de vegetación, los costos asociados a la operación de SUDS a largo plazo y la falta de una normativa local específica para su diseño e implementación representan retos que deben abordarse mediante políticas públicas y lineamientos técnicos municipales. Asimismo, la coordinación interinstitucional entre CESP, IMPLAN y Obras Públicas es fundamental para garantizar el éxito de estas soluciones, ya que su funcionamiento depende de prácticas adecuadas de limpieza, inspección y mantenimiento.

En conjunto, los resultados de esta investigación demuestran que los SUDS representan una medida viable y efectiva para mejorar el manejo pluvial en Mexicali. Su aplicación estratégica puede contribuir a reducir riesgos de inundación, optimizar la operación de la infraestructura existente y promover una gestión más sostenible del agua urbana. La evidencia presentada constituye un argumento sólido para impulsar la adopción gradual de estas soluciones dentro de la planeación urbana, especialmente en zonas vulnerables donde el sistema actual presenta sobrecarga o condiciones recurrentes de encharcamiento.

Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones generales

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten concluir que la infraestructura pluvial existente en la zona de estudio de Mexicali presenta limitaciones hidráulicas significativas que se manifiestan en niveles elevados de llenado, sobrepresión en nodos críticos y acumulaciones superficiales persistentes durante eventos de lluvia de diseño moderado ($T = 25$ años). Estos hallazgos confirman que el sistema opera al límite de su capacidad, debido principalmente a la creciente impermeabilización urbana, el envejecimiento de la infraestructura y prácticas de mantenimiento insuficientes.

Las simulaciones realizadas en EPA SWMM demuestran que la incorporación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) —particularmente jardines de biorretención, zanjas de infiltración y pavimentos permeables— constituye una estrategia viable para mejorar el comportamiento hidráulico del sistema. Su implementación permitió reducir el caudal pico en aproximadamente 20 %, disminuir el volumen total de escurrimiento en un rango similar y disminuir significativamente las acumulaciones superficiales, reduciendo su altura y duración.

Estos resultados evidencian que los SUDS actúan como medidas eficaces de control en la fuente, capaces de complementar la infraestructura gris existente.

Asimismo, la simulación del escenario con obstrucciones parciales reveló que el manejo inadecuado de residuos sólidos urbanos constituye un factor crítico que agrava la problemática pluvial. La presencia de basura en rejillas y bocas de tormenta incrementa entre un 10 y un 12 % los niveles de llenado y prolonga los encharcamientos. Este fenómeno demuestra que la gestión pluvial en Mexicali no puede entenderse únicamente desde una perspectiva estructural, sino también desde una dimensión operativa y social.

Finalmente, los resultados muestran que los SUDS son técnicamente factibles en el contexto semiárido de Mexicali y ofrecen beneficios adicionales como mejora ambiental, reducción de isla de calor y aumento de áreas verdes. Su implementación gradual puede

fortalecer la resiliencia urbana y contribuir al cumplimiento de objetivos locales y globales de sostenibilidad.

5.2 Recomendaciones técnicas

A partir de los hallazgos obtenidos, se identifican las siguientes recomendaciones:

A. Implementación gradual de SUDS en zonas críticas

Se sugiere priorizar las subcuencas que mostraron mayores niveles de llenado y acumulación superficial. La instalación de jardines de biorretención y zanjas de infiltración en áreas estratégicas puede reducir la carga inmediata sobre los colectores más saturados.

B. Integración de SUDS en nuevos desarrollos urbanos

Los proyectos habitacionales y comerciales de Mexicali deberían incluir SUDS como parte del diseño obligatorio de drenaje pluvial, evitando incrementar la presión sobre el sistema existente.

C. Fortalecimiento del modelo híbrido gris-verde

Los SUDS no sustituyen la infraestructura gris; la complementan. Se recomienda que CESPMM utilice modelos combinados para la planeación de obras futuras, integrando soluciones descentralizadas que reduzcan aportes directos al sistema.

D. Generación de manuales municipales de diseño y mantenimiento de SUDS

La ausencia de normativas locales es una de las principales limitaciones detectadas. La elaboración de lineamientos específicos para Mexicali permitirá estandarizar diseños, materiales, capacidades de infiltración y procedimientos de mantenimiento.

E. Optimización de rutinas de limpieza y control de residuos

Los resultados demuestran que la eficiencia del sistema pluvial depende fuertemente del manejo adecuado de residuos sólidos. Es indispensable establecer:

1. Programas de limpieza previos a temporada de lluvias,
2. Planes de inspección periódica,
3. Protocolos de intervención rápida en puntos críticos.

F. Incorporación de monitoreo y modelación continua

Se recomienda actualizar periódicamente el modelo SWMM con información real proveniente de sensores, reportes de CESPМ y datos pluviométricos, lo que permitirá mejorar la capacidad de predicción y la toma de decisiones.

5.3 Perspectivas para investigaciones futuras

La presente investigación abre diversas oportunidades para continuar fortaleciendo el análisis del drenaje pluvial sostenible en Mexicali:

A. Evaluación de desempeño real de SUDS mediante pilotos físicos

Será necesario implementar SUDS en campo y monitorear su comportamiento en términos de infiltración, retención, operación y mantenimiento bajo condiciones reales de clima árido.

B. Integración de análisis económico y de ciclo de vida

Los costos de construcción, mantenimiento y beneficios ambientales deben evaluarse mediante herramientas de análisis costo–beneficio o costo–efectividad.

C. Modelación de eventos extremos asociados al cambio climático

Se recomienda incorporar escenarios de tormentas con mayor intensidad, analizando la resiliencia del sistema híbrido ante condiciones futuras.

D. Evaluación comunitaria y social de los SUDS

El éxito de los SUDS depende también de la aceptación ciudadana, por lo que futuros estudios pueden centrarse en:

1. Percepción pública,
2. Educación ambiental,
3. Participación comunitaria en mantenimiento.

E. Inclusión de tecnologías complementarias

Se sugiere evaluar alternativas como techos verdes extensivos, jardines lineales, cuencas de retención subterránea o sistemas modulares de infiltración para áreas con limitaciones espaciales.

Referencias bibliográficas

- Ahiablame, L. M., Engel, B. A., & Chaubey, I. (2012). Effectiveness of Low Impact Development Practices: Literature Review and Suggestions for Future Research. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(7), 4253–4273. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1189-2>
- Alam, T., Mahmoud, A., Jones, K. D., Bezares-Cruz, J. C., & Guerrero, J. (2019). WinSLAMM Simulation of Hydrologic Performance of Permeable Pavements—A Case Study in the Semi-Arid Lower Rio Grande Valley of South Texas, United States. *Water*, 11(9), 1865. <https://doi.org/10.3390/w11091865>
- Alyaseri, I., & Zhou, J. (2016). Stormwater Volume Reduction in Combined Sewer Using Permeable Pavement: City of St. Louis. *Journal of Environmental Engineering*, 142(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001056](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001056)
- Cantú-Martínez, P. C. (2017). Gestión del riesgo como un instrumento para prever los estragos de las sequías y de las inundaciones en México. *Ambiente y Desarrollo*, 21(40), 27. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ayd21-40.grip>
- CIRIA. (2016). *The SuDs Manual* (Vol. 20). CIRIA.
- Comisión Nacional del Agua. (2020). *Programa Nacional Hidrico 2020-2024 DOF 30-12-2020*.
- Corinne Waelt, & Dorothee Spuhler. (2019). *Cuenca de retención*.
- Cubides, E., & Santos, G. (2018). Control de escorrentías urbanas mediante Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS): Pozos/Zanjas de infiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 12(24), 32–42. <https://doi.org/10.31908/19098367.3813>
- Erly Arner-Reyes. (2013). *RESILIENCIA URBANA: LA ADAPTACIÓN A CORTO PLAZO PARA LA RECUPERACIÓN A LARGO PLAZO DESPUÉS DE LAS INUNDACIONES EN CANADÁ*
URBAN RESILIENCE: THE SHORT TERM ADAPTATION FOR LONG TERM RECOVERY AFTER FLOODS IN CANADA.
- Estrada Díaz, G. (2018). *Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sustentable: Una estrategia adaptativa para incrementar la resiliencia de las zonas urbanas*.
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525–542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Forbes. (2017, June 1). *En México se pierden cada año 230 mdd por inundaciones*. Forbes Staff.

- Jiménez Ariza, S. L., Martínez, J. A., Muñoz, A. F., Quijano, J. P., Rodríguez, J. P., Camacho, L. A., & Díaz-Granados, M. (2019). A Multicriteria Planning Framework to Locate and Select Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Consolidated Urban Areas. *Sustainability*, 11(8), 2312. <https://doi.org/10.3390/su11082312>
- Ley García, J., Denegri De Dios, F. M., Judith, M., & García, O. (2011a). *Atlas de riesgos del municipio de Mexicali*. <https://doi.org/10.13140/2.1.3544.8968>
- Ley García, J., Denegri De Dios, F. M., Judith, M., & García, O. (2011b). *Atlas de riesgos del municipio de Mexicali*. <https://doi.org/10.13140/2.1.3544.8968>
- Li, H., Ding, L., Ren, M., Li, C., & Wang, H. (2017). Sponge City Construction in China: A Survey of the Challenges and Opportunities. *Water*, 9(9), 594. <https://doi.org/10.3390/w9090594>
- Lira, J. M. S., Briones, C. S., Gibert, J. M. R., Sotelo, S. E. C., & Banda, M. A. L. (2024). FACTIBILIDAD TÉCNICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS SUDS PARA MITIGACIÓN DE INUNDACIONES. *International Journal of Professional Business Review*, 9(12), e05141. <https://doi.org/10.26668/businessreview/2024.v9i12.5141>
- Mora Reyes, J. Á. (2004). *EL PROBLEMA DE LA BASURA EN LA CIUDAD DE MÉXICO*.
- Morison, P. J., & Brown, R. R. (2011). Understanding the nature of publics and local policy commitment to Water Sensitive Urban Design. *Landscape and Urban Planning*, 99(2), 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.08.019>
- Nabinejad, S., & Schüttrumpf, H. (2023). Flood Risk Management in Arid and Semi-Arid Areas: A Comprehensive Review of Challenges, Needs, and Opportunities. *Water*, 15(17), 3113. <https://doi.org/10.3390/w15173113>
- Ojeda De La Cruz, A., Rosalía Álvarez Chávez, C., Carlos, D., & Llano, O. (2020). *Drenaje pluvial sostenible. Una alternativa de gestión del agua de lluvia en la Universidad de Sonora*.
- Olivares-Cerpa, G., Russo, B., Martínez-Puentes, M., Bladé, E., & Sanz-Ramos, M. (2022). “SUDS-lineales” para reducir el riesgo de inundación considerando escenarios de Cambio Climático. *Ingeniería Del Agua*, 26(2), 77–90. <https://doi.org/10.4995/ia.2022.17058>
- ONU HÁBITAT. (2020). *Proyecto de programa de trabajo anual del Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos y proyecto de presupuesto de la Fundación de las Naciones Unidas para el Hábitat y los Asentamientos Humanos para 2021*.
- Our Future Water Intelligence. (2025). *Greening Flood & Stormwater Infrastructure in Doha: Hybrid Solutions, Governance, and Financing for Climate-Resilient Cities*. 2025.
- Phonphoton, N., & Pharino, C. (2019). A system dynamics modeling to evaluate flooding impacts on municipal solid waste management services. *Waste Management*, 87, 525–536. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.036>

- Piacentini, S. M., & Rossetto, R. (2020). Attitude and Actual Behaviour towards Water-Related Green Infrastructures and Sustainable Drainage Systems in Four North-Western Mediterranean Regions of Italy and France. *Water*, 12(5), 1474. <https://doi.org/10.3390/w12051474>
- Rodríguez Varela, J. M., Alcocer Yamanaka, V. H., Albornoz Góngora, P., Jesús Llaguno, G. O., & Silvestre Maldonado, J. (2021). Problemática de inundaciones en zonas urbanas y propuestas de solución desde un enfoque matemático. *Instituto Mexicano de Tecnología Del Agua (IMTA)*, 1–7.
- Sagastume Puerta, D., Salazar Briones, C., & Ruiz Gibert, J. M. (2022). *Desafíos en la implementación de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SuDS) en ciudades de países en desarrollo* [Texto]. Universidad Autónoma de Baja California.
- Schiffman, R. (2024, March 21). Una nueva estrategia contra las inundaciones: las “ciudades esponja.” *The New York Times*.
- SEMARNAT. (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030*. www.semarnat.gob.mx/www.conagua.gob.mx/www.conagua.gob.mx/conagua07/temas/programa_hidricosregionales2030.pdf
- Tellman, B., Sullivan, J. A., Kuhn, C., Kettner, A. J., Doyle, C. S., Brakenridge, G. R., Erickson, T. A., & Slayback, D. A. (2021). Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature*, 596(7870), 80–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w>
- Tendero Peiró, C. (2018). *Los SUDS como estrategia de gestión y adaptación frente al riesgo de inundación: Alzira (Comunitat Valenciana) como estudio de caso* [Info:eu-repo/semantics/masterThesis]. Universidad de Alicante.
- Zambrano, L., Pacheco-Muñoz, R., & Fernández, T. (2018). Influence of solid waste and topography on urban floods: The case of Mexico City. *Ambio*, 47(7), 771–780. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1023-1>
- Zhou, Q. (2014a). A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts. *Water*, 6(4), 976–992. <https://doi.org/10.3390/w6040976>
- Zhou, Q. (2014b). A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts. *Water*, 6(4), 976–992. <https://doi.org/10.3390/w6040976>