



INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

COORDINACIÓN DE SISTEMAS HÍDRICOS

SUBCOORDINACIÓN DE SISTEMAS HIDRÁULICOS E INFRAESTRUCTURA VERDE

INFORME FINAL DEL PROYECTO CH2312.1: SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA: HUMEDALES ARTIFICIALES E INFRAESTRUCTURA DE BAJO IMPACTO (LID) PARA LA DEPURACIÓN DE AGUA Y CONTROL DE INUNDACIONES

Participantes:

Estrada Arriaga, Edson Baltazar
Falcón Rojas, Axel
Figueroa Mendiola, Juan Manuel
Gómez Martínez, Juan Fco.
Gómez Rojas, Areli
González Correa, Cecilia
Llaguno Guilberto, Óscar Jesús
López López, Edgar Eduardo
López Zúñiga, Arturo
Medina Mendoza, Raúl (**Jefe de Proyecto**)
Mijangos Carro, Marco Antonio
Morales Rayo, Jomaelah
Peñaloza Rueda, Xóchitl
Rodríguez Varela, José Manuel
Sánchez Guzmán, Minerva

Diciembre de 2023



1. Índice general

1. Índice general	2
1.1 Índice de ilustraciones	4
1.2 Índice de tablas	6
2. Resumen ejecutivo	7
3. Introducción	9
4. Objetivos	9
4.1 Objetivo general.....	9
4.2 Objetivos específicos	10
5. Antecedentes	10
6. Metodología	11
6.1 Componente (a): Microhumedales experimentales.....	11
6.2 Componente (b) Microcuenca-Jardín -Infraestructura de Bajo Impacto (LID) 12	
7. Resultados	13
7.1 Muestreo de agua y medición de parámetros físicos, químicos y biológicos 13	
7.2 Tratamiento de la vegetación de las unidades experimentales.....	13
7.3 Mantenimiento del sistema de microhumedales.....	15
7.4 Análisis y evaluación de resultados de laboratorio.....	16
7.5 Consolidación de levantamiento topográfico en el jardín-microcuenca LID 24	
7.5.1 Modelo digital de elevación (MDE)	26
7.6 Consolidación de la componente vegetación de la microcuenca jardín.	28
7.7 Captación de aguas lluvia de sitio techado SCALL.....	28
7.8 Medición de parámetros hídricos en campo.....	40
7.9 Modelación hidrológica-hidráulica de la Microcuenca-Jardín -LID.....	43
7.9.1 Modelo SWMM.....	43
7.9.1.1. Gráficas de comportamiento del LID	63





8. Conclusiones..... 70

9. Bibliografía71

Anexo 1. Modelación en HEC RAS del Jardín-Microcuenca-LID en el IMTA..... 74

Anexo 2. Puntos topográficos de infraestructura nueva levantados en el terreno174

Anexo 3. Memoria fotográfica del levantamiento topográfico.....191

Anexo 4. Plano de vegetación en el Jardín-Microcuenca-LID.....194

Anexo 5. Paleta vegetal del Jardín Microcuenca LID195





1.1 Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Biomasa producida en los diferentes tratamientos14

Ilustración 2 Mantenimiento de las unidades experimentales15

Ilustración 3 Resultados en la remoción de fosfatos P-PO₄.....20

Ilustración 4 Resultados en la remoción de Amonio N-NH₄.....21

Ilustración 5 Resultados en la remoción de DQO22

Ilustración 6 Modelo digital de elevación (MDE) de la microcuenca del jardín de lluvia LID 27

Ilustración 7 Áreas tributarias en la bajada del estacionamiento33

Ilustración 8. Isoyetas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes33

Ilustración 9 Colocación de canaletas para la captación pluvial en el techo..... 36

Ilustración 10 Bajadas pluviales del techo..... 36

Ilustración 11 Tubería de 6 pulgadas de PVC con dirección hacia el LID..... 37

Ilustración 12 Colocación de tubería de 6 pulgadas 37

Ilustración 13 Reducción de tubería de 6 a 4 pulgadas en el puente peatonal 38

Ilustración 14 Tubería de 4 pulgadas que descarga en el LID 38

Ilustración 15 Aportación de la calle al sistema LID 39

Ilustración 16 Estructura antes de la pintura y b) estructura después de la pintura 39

Ilustración 17 Tubería de descarga al LID a) antes de la pintura y b) después de la pintura40

Ilustración 18 Instalación de pluviómetro totalizador en microcuenca40

Ilustración 19 Diseño de aforador a construir con material de triplay..... 42

Ilustración 20 Constantes para diseño del aforador 42

Ilustración 21 Ubicación espacial de las subcuencas de estudio..... 44

Ilustración 22 a) Bajadas pluviales y b) techo de estacionamiento utilizado para la captación de agua de lluvia 44

Ilustración 23 Tubería de 6 pulgadas que descarga a la cuenca SC2..... 45

Ilustración 24 a) boca de tormenta y b) tubería de 4 pulgadas para la descarga pluvial a SC2..... 45

Ilustración 25 Sección CJ62.87611..... 47

Ilustración 26 a) Vista frontal de los vertedores y b) vista lateral de los geocostales..... 47

Ilustración 27 Ubicación de los vertedores y características del vertedor en SC1 48

Ilustración 28 Modelo LID para el jardín de lluvia del IMTA..... 48

Ilustración 29 Vista del primer vertedor con su aforador en SC2..... 50

Ilustración 30 Perfil de flujo en el jardín microcuenca LID 50

Ilustración 31 Descarga del flujo de la tubería de 4 pulgadas al LID 51

Ilustración 32 Descarga de la tubería de 4 pulgadas al LID 51

Ilustración 33 Datos de la tubería que capta el agua de SC1-4..... 52

Ilustración 34 Hidrograma de la cuenca SC-2..... 52

Ilustración 35 Primer vertedor ubicado en SC2..... 53

Ilustración 36 Resultados del primer y segundo vertedor ante el evento del 14 de agosto del 2023..... 54

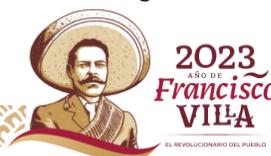




Ilustración 37 Descarga del flujo de la tubería de 4 pulgadas al LID el 14 de agosto del 2023 54

Ilustración 38 Descarga de la tubería de 6 pulgadas el 14 de agosto del 2023.....55

Ilustración 39 Tirantes y gasto en la tubería que descarga el flujo de la subcuenca SC1-4...55

Ilustración 40 Gasto de descarga de la subcuenca SC-2 56

Ilustración 41 Comparación de los hidrogramas de la subcuenca SC2 con y sin LID 57

Ilustración 42 Comparación de hidrogramas de la subcuenca SC2 con y sin LID 58

Ilustración 43 Comparación de los hidrogramas de la subcuenca SC4 con y sin LID..... 58

Ilustración 44 Comparación con y sin LID de la subcuenca SC2 para el periodo de retorno de 5 años 59

Ilustración 45 Flujo que pasa por el vertedor ubicado en SC2.....60

Ilustración 46 Comparación con y sin LID de la cuenca SC3 para un periodo de retorno de 5 años..... 60

Ilustración 47 Funcionamiento del vertedor 2. ubicado en SC3..... 61

Ilustración 48 Comparativa de los hidrogramas con y sin LID de la subcuenca SC4 para un periodo de retorno de 5 años..... 61

Ilustración 49 descarga del vertedor 3 ubicado en SC4..... 62

Ilustración 50 Subcuencas correspondientes al sistema LID 63

Ilustración 51 Relación pendiente-volumen en el sistema LID para la subcuenca SC2 64

Ilustración 52 Relación pendiente-volumen en el sistema LID para la subcuenca SC3 64

Ilustración 53 Relación pendiente-volumen en el sistema LID para la subcuenca SC4..... 65

Ilustración 54 Relación gastos- pendientes en la subcuenca SC4 65

Ilustración 55 Relación pendiente-gasto máximo en el vertedor 66

Ilustración 56 Relación pendiente-gasto máximo en el vertedor 2 67

Ilustración 57 Relación pendiente-gasto máximo en el vertedor 3 67

Ilustración 58 Relación pendiente (%) -volumen (l) en el vertedor 1 68

Ilustración 59 Relación pendiente (%) -volumen (l) en el vertedor 2 68

Ilustración 60 Relación pendiente (%) -volumen (l) en el vertedor 3..... 69

Ilustración 61 Relación pendiente (%) -volumen (l) de los vertedores en el sistema LID 69





1.2 Índice de tablas

Tabla 1. Resultados de la producción de biomasa vegetal de las unidades experimentales 14

Tabla 2. Concentración de P-PO₄, N-NH₄ y DQO en el agua residual cruda. Primer muestreo..... 16

Tabla 3. Concentración de P-PO₄, N-NH₄ y DQO en el efluente de las unidades experimentales. Primer muestreo..... 16

Tabla 4. Concentración de P-PO₄, N-NH₄ y DQO en el efluente de las unidades experimentales. Segundo muestreo..... 17

Tabla 5. Concentración de P-PO₄, N-NH₄ y DQO en el efluente. Tercer muestreo..... 17

Tabla 6. Concentración de P-PO₄, N-NH₄ y DQO en el efluente. Cuarto muestreo..... 18

Tabla 7. Concentración de P-PO₄, N-NH₄ y DQO en el efluente. Quinto muestreo..... 18

Tabla 8. Resultados en la remoción de P-PO₄ en los tratamientos con vegetación..... 19

Tabla 9. Resultados en la remoción de N-NH₄ en los tratamientos con vegetación..... 20

Tabla 10. Resultados en la remoción de DQO en los tratamientos con vegetación..... 21

Tabla 11. Resultados del análisis estadístico de la comparación del tratamiento T4 (*Typha latifolia*) vs los demás tratamientos..... 22

Tabla 12. Resultados del análisis de varianza para P-PO₄..... 23

Tabla 13. Resultados del análisis de varianza para N-NH₄..... 23

Tabla 14. Resultados del análisis de varianza para DQO..... 23

Tabla 15. Puntos topográficos levantados en campo (Ver anexo 2). 26

Tabla 16. Gastos máximos en el techo del estacionamiento 34

Tabla 17. Dimensiones de canaleta según intensidad de lluvia e inclinación 34

Tabla 18. Dimensionamiento de las canaletas consideradas 35

Tabla 19. Cálculo hidráulico del colector horizontal 35

Tabla 20. Resultados de humedad gravimétrica del mes más lluvioso históricamente 41

Tabla 21. Características generales de las subcuencas de la zona de estudio 43

Tabla 22. Tabla Parámetros de diseño para las 3 unidades 46

Tabla 23. Información general del modelo hidráulico 48

Tabla 24. Datos de lluvia a cada 10 minutos del evento del 04 de agosto de 2023..... 49

Tabla 25. Datos de la EMA el 14 de agosto del 2023..... 53

Tabla 26. Diferencia entre lo medido en campo y el modelo numérico 56

Tabla 27. Hietogramas utilizados para los escenarios para diferentes periodos de retorno 57

Tabla 28. Resumen del escenario de 2 años..... 59

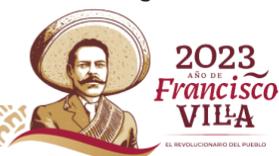
Tabla 29. Resumen del escenario de 5 años..... 62

Tabla 30. Resumen del escenario de 10 años 62

Tabla 31. Resumen del escenario de 20 años..... 62

Tabla 32. Resumen del escenario de 50 años..... 63

Tabla 33. Geometría de los vertedores en el sistema LID..... 66





2. Resumen ejecutivo

El presente proyecto consistió en la realización de dos componentes enmarcadas en la línea de las Soluciones Basadas en la Naturaleza: (SBN):

- (a): Humedales para depuración de aguas servidas e,
- (b): Infraestructura de bajo Impacto para coadyuvar al control de inundaciones en zonas urbanas.

En el caso de la componente (a) humedales para depuración de aguas servidas, se continuó con la segunda y última fase del ensayo sobre humedales artificiales instalado a escala de microcosmos, en cajas transparentes de vinilo de 85 l de capacidad, con seis tratamientos y sus respectivas repeticiones, integrados con agua residual doméstica, grava de tezontle y especies vegetales acuáticas: (*Scirpus maritimus*, *Schoenoplectus americanus*, *Typha latifolia*, *Juncus effusus* y *Arundo donax*), ello con el propósito principal de corroborar las tendencias de eficiencias de depuración de contaminantes por las plantas macrófitas nativas versus exótica, mostradas en la primera fase del ensayo realizada en el año 2022 cuando las plantas y el sistema completo del humedal no alcanzaban su madurez plena.

Las unidades experimentales (cajas) se abastecieron periódicamente con agua residual de origen doméstico utilizando la técnica de "batch" o vaciado-llenado completo de las cajas, hasta que las plantas alcanzaran su madurez fisiológica, caracterizada por la aparición de órganos reproductores, (espigas, inflorescencias, frutos), y una altura mayor a 2 metros. Se realizaron cinco muestreos tanto al influente (agua residual cruda) como al efluente de cada tratamiento para analizar en laboratorio la reducción de la concentración de los contaminantes Fosfato P-PO₄, Amonio NH₄ y Demanda Química de Oxígeno DQO, y así evaluar la eficiencia de depuración de las especies vegetales acuáticas. Posteriormente se cortó la vegetación al ras del piso para obtener la biomasa producida por cada especie y relacionarla con su eficiencia de depuración

Los resultados de laboratorio fueron sometidos a análisis estadísticos, iniciando con una prueba de varianza (ANOVA) entre los tratamientos y sus repeticiones para los parámetros N-NO₃, N-NH₄ y P-PO₄, encontrando que todos los tratamientos plantados con vegetación fueron significativamente iguales entre sí. Esta prueba mostró que con las repeticiones se redujo el error experimental y puede confiarse en los resultados obtenidos experimentalmente. Posteriormente se realizó un análisis de comparación de medias para identificar el mejor tratamiento para remoción de contaminantes, encontrando que el tratamiento T4 (plantado con *Typha latifolia*) y su repetición RT4, mostraron numéricamente mayores cantidades de remoción en los tres parámetros DQO N-NH₄ y P-PO₄ superando a los demás tratamientos. A partir de dicho análisis, se realizó una prueba de varianza para encontrar diferencias significativas entre el tratamiento T4 y los demás tratamientos con vegetación, encontrando que la especie *Typha latifolia* superó a todas las



demás especies en los tres parámetros evaluados demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno como amonio ($N-NH_4$) y fósforo como fosfato ($P-PO_4$)

Al finalizar los muestreos de los efluentes de las unidades experimentales, se hizo el corte de la biomasa producida en cada una de ellas, y se obtuvo el peso seco o biomasa, encontrando que la especie *Typha latifolia* produjo la mayor cantidad de materia seca que las demás especies acuáticas, con un 39% más biomasa que la especie inmediata del *Arundo donax*. Esto podría empezar a explicar la mayor capacidad de eliminación de contaminantes por esta especie, evidenciada con los análisis de laboratorio.

Los resultados alcanzados corroboraron la tendencia del año 2022 sobre la especie *Typha latifolia* (chuspata) que superó a todas las demás plantas acuáticas evaluadas, incluyendo a la especie exótica del carrizo (*Arundo donax*) en su capacidad de eliminar los principales contaminantes de las aguas residuales. La eficiencia de depuración de las especies fue la siguiente:

Typha latifolia > *Scirpus maritimus* + *Schoenoplectus americanus* > *Arundo donax* > *Juncus effusus*

En el caso de la componente (b) del proyecto Infraestructura de bajo Impacto para coadyuvar al control de inundaciones en zonas urbanas, se incorporaron elementos constructivos faltantes a la infraestructura establecida en el LID. Se construyó un sistema de captación de agua de lluvia (SCALL) incorporando los nuevos materiales del mercado de canaletas y soportes, en estacionamiento techado aledaño, para aprovechar mayor volumen de agua y conducir los escurrimientos hacia el sistema del LID. Se instaló un registro con su línea de tubería para interceptar escurrimientos superficiales de la calle e incorporarlos a la infraestructura del LID. Se consolidó la vegetación integrada al sistema, plantando especies nativas perennes ornamentales. Se realizó un levantamiento topográfico complementario para incorporar los nuevos elementos constructivos y obtener un nuevo Modelo Digital de Elevación (MDE) de la superficie. Asimismo se acopió información de campo de humedad antecedente del suelo, velocidad de infiltración y lámina de escurrimiento medida en aforador de pared delgada.

Con toda la información generada, se integró una base de datos tanto para realizar modelaciones con herramientas computacionales como el HEC-RAS y HEC-HMS, para evaluar la regulación hidrológica de los escurrimientos conducidos al sistema LID.

Asimismo, se corrió el modelo computacional SWMM con varios escenarios para estimar la contribución de esta infraestructura verde en el manejo y control de inundaciones. Los resultados arrojados con dicho SWMM para períodos de retorno menores (2 a 5 años) evidencian reducciones en el escurrimiento pico cercanos al 20%, y además se atenúa el hidrograma, con lo que se reduce el volumen de escurrimiento en proporciones cercanas al tiempo pico. Dichos resultados permiten deducir la pertinencia de utilizar este modelo para evaluar el funcionamiento hidrológico-hidráulico en infraestructura de bajo impacto para manejo y control de inundaciones en zonas urbanas.



3. Introducción

El papel de las plantas acuáticas macrófitas en los humedales artificiales o construidos, se consideró bastante pequeño durante mucho tiempo, sin embargo en las últimas tres décadas, se han realizado numerosas investigaciones sobre la contribución de las macrófitas en la capacidad de tratamiento de los humedales construidos. El efecto remediador de las macrófitas en dichos humedales depende de si la especie es adecuada para las condiciones climáticas y operativas específicas, así como de los rasgos botánicos y morfológicos de la especie.

Aparte de su valor estético, las macrófitas contribuyen al funcionamiento de los humedales debido a la presencia de condiciones aeróbicas alrededor de sus raíces a través de la liberación de oxígeno, lo que proporciona sitios de unión aptos con un entorno favorable y, por lo tanto, mejora la actividad bacteriana. Sus raíces también producen carbono y difunden iones para impulsar los procesos microbianos. Los tejidos subterráneos de macrófitas (raíces, tubérculos y rizomas) también afectan el patrón de flujo a través de los humedales construidos al mejorar la permeabilidad del medio. Las partes marchitas de la raíz también envuelven el área de la rizosfera en los inviernos, lo que permite sólo una caída menor en el rendimiento. Es muy importante la selección de macrófitas ya que éstas deben ser resistentes y eficientes bajo condiciones climáticas y operativas predominantes.

Se han realizado numerosos estudios sobre la eficiencia de eliminación de nutrimentos de diferentes plantas macrófitas en humedales construidos. La eficacia de las especies de plantas en la eliminación de nutrimentos depende de la biomasa total y la tasa de crecimiento. La eliminación general de nutrimentos del sistema humedal artificial mejora con la recolección múltiple de la cubierta vegetal. Diversos estudios de comparación de la efectividad de diferentes especies macrófitas en la remoción de nutrimentos en humedales construidos han llevado a la conclusión de que ciertas plantas son más eficientes en la remoción de ciertos nutrimentos en comparación con otras, y no existe consenso sobre mayor efectividad de plantas nativas versus plantas exóticas, ya que en múltiples estudios las especies nativas han superado en eficacia a las especies exóticas y en contrapartida otros estudios muestran el predominio de eficacia de las especies exóticas sobre las nativas.

En este proyecto se busca contribuir con generación de conocimiento para abonar en alguno de los dos casos anteriores.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Dar continuidad a las acciones y los resultados obtenidos en los proyectos realizados en el año 2022 en la línea de Soluciones Basadas en la Naturaleza con claves HC2209.1 "Evaluación



del potencial depurativo de humedales artificiales con vegetación acuática nativa del estado de Morelos” y, HC2211.1 “Implementación en campo de un sistema LID en el IMTA”.

4.2 Objetivos específicos

-Consolidar los resultados de la eficiencia de depuración de especies nativas en un sistema de microhumedales que han alcanzado su maduración en cuanto al desarrollo del sistema radical de la vegetación, así como de la formación de la biopelícula microbiana responsable de gran parte de los procesos fisicoquímicos dentro de los humedales construidos.

-Consolidar el conocimiento sobre la contribución de un jardín microcuenca como infraestructura verde, en el manejo y control de inundaciones, mediante la aplicación de modelos matemáticos hidrológicos e hidráulicos que permitan obtener la relación entre lluvia y escurrimiento, y el comportamiento de los escurrimientos regulados con pequeñas represas transversales en esta infraestructura de bajo impacto (LID).

5. Antecedentes

En seguimiento a los resultados obtenidos en los proyectos internos HC2209.1 “Evaluación del potencial depurativo de humedales artificiales con vegetación acuática nativa del estado de Morelos” y HC2211.1 “Implementación en campo de un sistema LID en el IMTA”, y para dar continuidad a los mismos, se requiere consolidar algunos componentes de estas tecnologías de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN), para integrarlas como oferta tecnológica del Instituto y aportar una contribución en la solución de los problemas hídricos del país, en concordancia con la misión del IMTA.

En específico se requiere corroborar las tendencias de eficiencia de depuración de las especies acuáticas utilizadas en el ensayo de microhumedales mostradas al corte administrativo del experimento y en el cual aún faltaba consolidar las componentes de desarrollo radical de la vegetación, así como la biopelícula que rodea al sustrato tezontle utilizado y alcanzar la madurez como sistema completo para obtener resultados concluyentes de dichas tendencias mostradas,

En el caso de la infraestructura de bajo impacto (LID) utilizada en el jardín microcuenca como modelo experimental de la regulación del caudal de escurrimiento, se identifica la necesidad de llevar a cabo mediciones de algunos parámetros hídricos en campo, como el contenido de humedad, precipitación in situ del LID, necesarios para realizar una estimación de los escurrimientos mediante la corrida de modelos matemáticos de flujo a superficie libre como son el HEC Hms, el HEC Ras y el modelo hidrológico-hidráulico SWMM, que permitan caracterizar la relación lluvia-escurrimiento. Esto con la finalidad de analizar cómo el escurrimiento se desplaza a través de los bordos transversales construidos para la



regulación de los flujos, hasta llegar al punto más bajo (salida) de la microcuenca, así como el ingreso de caudales de la calle y de techos aledaños al sistema LID.

El tratamiento de aguas residuales mediante el uso de humedales artificiales se realiza empleando especies de plantas acuáticas mayormente exóticas como Tule (*Typha sp*), lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) o carrizo (*Arundo donax*, *Phragmites australis*), las cuales en ambientes naturales son consideradas como malezas cuando se salen de control. Es importante ir avanzando en la utilización de vegetación nativa para diferentes usos y situaciones, por ello resulta conveniente emplear plantas acuáticas nativas en dichos procesos de tratamiento que además pueden igualar a las plantas exóticas en las tasas de remoción de nutrientes. Tal es el caso de *Polygonum punctatum* que, de acuerdo con la bibliografía, pueden remover hasta un 80% de nitrógeno total y hasta un 95% de fósforo total en aguas residuales en humedales artificiales (Zheng, 2013).

Considerando además que el IMTA impulsa el uso de este tipo de vegetación nativa debido a su condición de área destinada voluntariamente a la conservación, esta experiencia permitirá un aporte al conocimiento en la aplicación de la tecnología de humedales artificiales con vegetación nativa.

6. Metodología

El procedimiento metodológico para llevar a cabo este proyecto que abarcó dos grandes componentes, consistió en una secuencia de pasos que constituyen un procedimiento metodológico, mismo que se describe a continuación.

6.1 Componente (a): Microhumedales experimentales

1) Pruebas de tratamiento con las diferentes especies, muestreo de agua y medición de parámetros físicos, químicos y biológicos.

Los microhumedales establecidos (unidades experimentales) fueron monitoreados a partir de observar la maduración del sistema con la biopelícula y el sistema de raíces de las plantas nativas que formaron una simbiosis, lo cual ocurrió a finales del mes de marzo de 2023. Se hizo un monitoreo inicial de la calidad del agua residual (influyente con que se alimentaron las unidades experimentales y a cada cuatro a siete días a la salida (efluentes) de cada unidad experimental, hasta completar un ciclo de 5 muestreos que se consideran representativos de la depuración de este sistema. Las muestras fueron enviadas al laboratorio de calidad del agua del IMTA para su análisis. Los parámetros que se midieron directamente en campo fueron, oxígeno disuelto, pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos mediante sensor multiparamétrico y, por otra parte, demanda química de oxígeno (DQO), amonio y fosfatos, en el laboratorio.



2) Tratamiento de la vegetación de las unidades experimentales. Al finalizar los muestreos de los efluentes de las unidades experimentales, se cortó toda la biomasa producida en cada una de las cajas, se pesaron en estado húmedo, se pusieron a secar, se pesaron de nuevo para obtener el peso seco de la biomasa producida.

3) Mantenimiento del sistema de microhumedales. Se mantuvo el llenado de las unidades experimentales con agua residual cruda de origen urbano para continuar con el ensayo, realizando mediciones periódicas de amonio, fosfatos y DQO mediante kit de reactivos portátiles de la marca HACH, hasta fines del año.

4) Análisis y evaluación de resultados. Se sistematizó la información para determinar la eficiencia de remoción de contaminantes –principalmente nitrógeno y fósforo, de aguas residuales domésticas, por las especies nativas y la exótica utilizadas en los humedales artificiales experimentales.

6.2 Componente (b) Microcuenca-Jardín -Infraestructura de Bajo Impacto (LID)

5) Consolidación de levantamiento topográfico en el jardín- microcuenca_LID. Se realizó un levantamiento topográfico complementario al realizado durante el año 2022, con estación topográfica total, en puntos no considerados como son las represas bordo y una depresión o cuenca cerrada dentro del LID, así como tuberías de ingreso de caudal proveniente de la calle y de techo cercano.

6) Consolidación de la componente vegetación de la microcuenca jardín. Se sustituyeron las especies nativas ornamentales que cumplieron su ciclo vegetativo al ser de crecimiento anual. En su lugar se plantaron especies nativas ornamentales de crecimiento perenne, con lo que se terminará de consolidar esta componente del LID en su integración de infraestructura gris a infraestructura verde.

7) Captación de aguas lluvia de sitios techados SCALL. Se diseñó y construyó un sistema de captación de agua de lluvia (SCALL) con canaletas y conducción para captar las aguas lluvia de espacio techado de estacionamiento aledaño al LID para incorporar dicho volumen al caudal de la microcuenca jardín.

8) Medición de parámetros hídricos en campo. Se instaló un pluviómetro totalizador dentro del territorio de la microcuenca jardín, para medir in situ la precipitación ocurrida y se hizo un análisis de dichos datos junto con los de las estaciones automatizadas instaladas en el territorio cercano al LID. Asimismo, para conocer la humedad antecedente del suelo previa a los escurrimientos, se realizó un ciclo de medición de contenido de humedad del suelo en los primeros 20 cm durante el mes o período históricamente más lluvioso, que fue el mes de Septiembre. La determinación de esta variable se realizó mediante el método gravimétrico de laboratorio con secado en horno a 105° C.



9) Modelación hidrológica-hidráulica de la microcuenca jardín (LID). Se hizo acopio de toda la información previa del jardín microcuenca y se integró la información generada en este año de las variables hídricas, topográficas y de vegetación. Con dicha base de datos se realizó la modelación de flujo a superficie libre en dos dimensiones con HEC-RAS, la modelación en HEC-HMS para el análisis de transvaso entre microcuencas. Asimismo, se obtuvieron las variables para correr el modelo SWMM para estimar la contribución de esta infraestructura verde en el manejo y control de inundaciones.

10) Edición del informe final. Se sistematizó la información producida con la ejecución de los dos componentes del proyecto, y se hizo la redacción y edición del informe final conforme a los formatos oficiales del Instituto.

7. Resultados

7.1 Muestreo de agua y medición de parámetros físicos, químicos y biológicos

Se realizaron cinco monitoreos del efluente de agua de cada una de las unidades experimentales con sus correspondientes repeticiones, así como del influente (agua residual doméstica cruda) con que se alimentó cada caja. Se colectó una muestra del efluente de cada caja sin preservar con ácido sulfúrico como marca la Norma para análisis de los iones fosfato PO_4 , y otra muestra con la preservación del ácido para el caso del ión amonio NH_4 , obteniendo 24 muestras, más dos muestras adicionales del agua residual cruda, por cada muestreo, para dar un total de 26 muestras de agua en frascos

El número total de muestras en los cinco muestreos realizados fue de 65, las cuales fueron enviadas al laboratorio de calidad del agua del IMTA el cual cuenta con acreditación por la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA) para obtener la concentración de los iones: DQO (demanda química de oxígeno), $N-NH_4$ (amonio), $P-PO_4$ (fosfatos), que, de acuerdo con la literatura sobre humedales construidos, estos dos últimos son los contaminantes que mayormente se relacionan con la depuración por las plantas acuáticas.

7.2 Tratamiento de la vegetación de las unidades experimentales

Al finalizar los muestreos de los efluentes de las unidades experimentales, se cortó toda la biomasa producida en cada una de las cajas, se pesaron en estado húmedo, se pusieron a secar y se pesaron de nuevo para obtener el peso seco de la biomasa producida.



Ilustración 1. Biomasa producida en los diferentes tratamientos

Tabla 1. Resultados de la producción de biomasa vegetal de las unidades experimentales

TRATAMIENTO	PESO FRESCO (KG)	PESO SECO (kg)
T4	5.700	1.216
RT5	1.767	0.315
RT6	2.200	0.721
T5	1.192	0.213
RT4	4.54	1.120
RT3	1.950	0.481
T6	1.758	0.712
T3	1.586	0.390

Como se observa en la tabla anterior, el tratamiento T4 y su repetición RT4 correspondientes a la especie *Typha latifolia* fueron los que más biomasa produjeron, seguidos del *Arundo donax* o carrizo, después la mezcla de *Scirpus maritimus* + *Schoenoplectus americanus* y por último el tratamiento de *Juncus effusus* que produjo la menor cantidad de biomasa.

Estos resultados fueron de alguna forma los esperados, debido al comportamiento y evolución mostrados por las diferentes especies creciendo y desarrollándose bajo las condiciones del microcosmos durante todo el ensayo iniciado en el año 2022, donde la





especie *Typha* mostró una tasa de crecimiento superior al resto de las especies evaluadas y que podría empezar a explicar la mayor capacidad de eliminación de contaminantes de esta especie en las aguas residuales evidenciada con los análisis de laboratorio,

Aunque no se evaluó -debido a que no estaba considerada-, la producción de la biomasa del sistema radical (raíces, rizomas, estolones) se intuye que, la especie *Typha* desarrolló mayor cantidad de sistema de raíces y con ello una mayor superficie de contacto para la formación de biopelícula que es la mayormente responsable de la depuración de contaminantes de las aguas residuales.

7.3 Mantenimiento del sistema de microhumedales

Con el propósito de mantener en buenas condiciones el sistema de los microhumedales tanto en su componente vegetación como en la formación de la biopelícula, hasta que alcanzara su estado de madurez fisiológica, se abastecieron las cajas con los tratamientos con el agua residual doméstica utilizada en la primer fase de este ensayo en el año 2022 originaria de la misma planta de tratamiento localizada en una unidad habitacional cercana a las instalaciones del IMTA (y que de acuerdo a los análisis de laboratorio no está contaminada con desechos industriales manteniéndose con características de aguas de desecho de uso público urbano o aguas residuales domésticas).



Ilustración 2. Mantenimiento de las unidades experimentales



7.4 Análisis y evaluación de resultados de laboratorio

Los resultados analíticos efectuados a los efluentes de las cajas se presentan en las tablas siguientes

Tabla 2. Concentración de P-PO₄, N-NH₄ y DQO en el agua residual cruda. Primer muestreo.

No.		DESCRIPCIÓN	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	FOSFATO ORTO	NITRÓGENO COMO NITRÓGENO AMONIAICAL
			mg/L	mg/L	mg/L
1	ACR		336	11,57	19,7

Tabla 3. Concentración de P-PO₄, N-NH₄ y DQO en el efluente de las unidades experimentales. Primer muestreo.

No.	DESCRIPCIÓN	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	FOSFATO ORTO	NITRÓGENO COMO NITRÓGENO AMONIAICAL
		mg/L	mg/L	mg/L
1	63/2023-1 T6	60,6	6,40	0,585
2	63/2023-2 T3	<5,00	<0,92	<0,500
3	63/2023-3 T1	132	10,47	16,0
4	63/2023-4 RT1	153	9,73	15,7
5	63/2023-5 T2	26,5	3,18	1,17
6	63/2023-6 RT5	32,6	1,04	0,702
7	63/2023-7 RT6	103	6,33	0,702
8	63/2023-8 T4	49,6	<0,92	0,614
9	63/2023-9 RT4	75,8	<0,92	<0,500
10	63/2023-10 RT2	48,8	1,41	0,673
11	63/2023-11 RT3	46,7	<0,92	0,526
12	63/2023-12 T5	25,4	2,54	0,643
13	63/2023-13 AR	347	11,84	21,7





Tabla 4. Concentración de P-PO₄, N-NH₄ y DQO en el efluente de las unidades experimentales. Segundo muestreo.

LABORATORIO DE CALIDAD DEL AGUA		067/2023		
RESULTADOS				
AREA: QUÍMICA ANALÍTICA, FÍSICOQUÍMICOS				
CLIENTE Y/O PROYECTO: SUBCOORDINACIÓN DE SISTEMAS HIDRÁULICOS E INFRAESTRUCTURA VERDE				
DOMICILIO: PASEO CUAUHNÁHUAC NO. 8532 COL. PROGRESO JIUTEPEC, MORELOS C.P. 62550				
No. de CONTROL:		TIPO DE MUESTRA:	FECHA DE MUESTREO:	
067/2023		AGUAS RESIDUALES	2023/05/03	
		PARÁMETROS		
No	DESCRIPCIÓN	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	FOSFATO ORTO	NITRÓGENO COMO NITRÓGENO AMONICAL
		mg/L	mg/L	mg/L
1	067/2023-1 T6	88,9	6,36	1,35
2	067/2023-2 T3	<5,00	1,99	0,526
3	067/2023-3 T1	130	11,93	22,1
4	067/2023-4 RT1	122	14,57	22,5
5	067/2023-5 T2	17,4	4,56	3,36
6	067/2023-6 RT5	32,3	0,92	1,29
7	067/2023-7 RT6	103	12,24	1,05
8	067/2023-8 T4	38,6	<0,92	0,614
9	067/2023-9 RT4	62,4	<0,92	<0,500
10	067/2023-10 RT2	56,6	<0,92	3,07
11	067/2023-11 RT3	51,4	<0,92	<0,500
12	067/2023-12 RT5	13,5	3,73	2,11
13	067/2023-13 AR	305	11,57	22,1

Tabla 5. Concentración de P-PO₄, N-NH₄ y DQO en el efluente. Tercer muestreo.

LABORATORIO DE CALIDAD DEL AGUA		066/2023		
RESULTADOS				
AREA: QUÍMICA ANALÍTICA, FÍSICOQUÍMICOS				
CLIENTE Y/O PROYECTO: SUBCOORDINACIÓN DE SISTEMAS HIDRÁULICOS E INFRAESTRUCTURA VERDE				
DOMICILIO: PASEO CUAUHNÁHUAC NO. 8532 COL. PROGRESO JIUTEPEC, MORELOS C.P. 62550				
No. de CONTROL:		TIPO DE MUESTRA:	FECHA DE MUESTREO:	
066/2023		AGUAS RESIDUALES	2023/05/01	
		FECHA DE RECEPCIÓN:		
		2023/05/02		
		PARÁMETROS		
No	DESCRIPCIÓN	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	FOSFATO ORTO	NITRÓGENO COMO NITRÓGENO AMONICAL
		mg/L	mg/L	mg/L
1	066/2023-1	67,3	13,92	0,760
2	066/2023-2	46,6	0,92	0,585
3	066/2023-3	118	13,28	12,0
4	066/2023-4	130	<0,92	11,0
5	066/2023-5	52,8	11,56	2,49
6	066/2023-6	24,9	1,41	0,848
7	066/2023-7	113	12,85	0,702
8	066/2023-8	40,2	<0,92	<0,500
9	066/2023-9	58,6	<0,92	<0,500
10	066/2023-10	41,2	<0,92	1,32
11	066/2023-11	<5,00	<0,92	<0,500
12	066/2023-12	17,9	3,15	1,26
13	066/2023-13	376	14,84	27,1





Tabla 6. Concentración de P-PO₄, N-NH₄ y DQO en el efluente. Cuarto muestreo.

LABORATORIO DE CALIDAD DEL AGUA		067/2023		
RESULTADOS				
AREA: QUÍMICA ANALÍTICA, FÍSICOQUÍMICOS				
CLIENTE Y/O PROYECTO: SUBCOORDINACIÓN DE SISTEMAS HIDRÁULICOS E INFRAESTRUCTURA VERDE				
DOMICILIO: PASEO CUAUHNÁHUAC NO. 8532 COL. PROGRESO JIUTEPEC, MORELOS C.P. 62550				
No. de CONTROL: 067/2023		TIPO DE MUESTRA: AGUAS RESIDUALES	FECHA DE MUESTREO: 2023/05/03	FECHA DE RECEPCIÓN: 2023/05/04
PARÁMETROS				
No	DESCRIPCIÓN	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO mg/L	FOSFATO ORTO mg/L	NITRÓGENO COMO NITRÓGENO AMONICAL mg/L
1	067/2023-1 T6	88,9	6,36	1,35
2	067/2023-2 T3	<5,00	1,99	0,526
3	067/2023-3 T1	130	11,93	22,1
4	067/2023-4 RT1	122	14,57	22,5
5	067/2023-5 T2	17,4	4,56	3,36
6	067/2023-6 RT5	32,3	0,92	1,29
7	067/2023-7 RT6	103	12,24	1,05
8	067/2023-8 T4	38,6	<0,92	0,614
9	067/2023-9 RT4	62,4	<0,92	<0,500
10	067/2023-10 RT2	56,6	<0,92	3,07
11	067/2023-11 RT3	51,4	<0,92	<0,500
12	067/2023-12 RT5	13,5	3,73	2,11
13	067/2023-13 AR	305	11,57	22,1

Tabla 7. Concentración de P-PO₄, N-NH₄ y DQO en el efluente. Quinto muestreo

LABORATORIO DE CALIDAD DEL AGUA		068/2023		
RESULTADOS				
AREA: QUÍMICA ANALÍTICA, FÍSICOQUÍMICOS				
CLIENTE Y/O PROYECTO: SUBCOORDINACIÓN DE SISTEMAS HIDRÁULICOS E INFRAESTRUCTURA VERDE				
DOMICILIO: PASEO CUAUHNÁHUAC NO. 8532 COL. PROGRESO JIUTEPEC, MORELOS C.P. 62550				
No. de CONTROL: 068/2023		TIPO DE MUESTRA: AGUAS RESIDUALES	FECHA DE MUESTREO: 2023/05/05	FECHA DE RECEPCIÓN: 2023/05/08
PARÁMETROS				
No	DESCRIPCIÓN	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO mg/L	FOSFATO ORTO mg/L	NITRÓGENO COMO NITRÓGENO AMONICAL mg/L
1	068/2023-1	65,9	10,10	1,40
2	068/2023-2	47,7	2,42	<0,500
3	068/2023-3	156	13,25	18,0
4	068/2023-4	145	13,22	18,0
5	068/2023-5	46,2	6,73	3,83
6	068/2023-6	26,7	3,09	1,78
7	068/2023-7	63,9	15,45	0,819
8	068/2023-8	<5,00	1,04	<0,500
9	068/2023-9	50,3	<0,92	<0,500
10	068/2023-10	<5,00	6,40	4,21
11	068/2023-11	47,9	<0,92	<0,500
12	068/2023-12	<5,00	<0,92	2,22





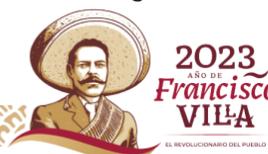
Estos resultados de laboratorio fueron sometidos a análisis estadísticos, iniciando con una prueba de varianza (ANOVA) entre los tratamientos y sus repeticiones para los parámetros DQO, N-NH₄ y P-PO₄, encontrando que todos los tratamientos plantados con vegetación fueron significativamente iguales entre sí. Esta prueba mostró que con las repeticiones se redujo el error experimental y puede confiarse en los resultados obtenidos experimentalmente.

Parámetro	Prueba	Réplica	Resultado
P-PO ₄	T3	RT3	Significativamente iguales
	T4	RT4	Significativamente iguales
	T5	RT5	Significativamente iguales
	T6	RT6	Significativamente iguales
N-NH ₄	T3	RT3	Significativamente iguales
	T4	RT4	Significativamente iguales
	T5	RT5	Significativamente iguales
	T6	RT6	Significativamente iguales
DQO	T3	RT3	Significativamente iguales
	T4	RT4	Significativamente iguales
	T5	RT5	Significativamente iguales
	T6	RT6	Significativamente iguales

Posteriormente se realizó un análisis simple de comparación de medias para identificar el mejor tratamiento para remoción de contaminantes, encontrando que el tratamiento T4 (plantado con *Typha latifolia*) y su repetición RT4, mostraron numéricamente mayores cantidades de remoción en los tres parámetros DQO N-NH₄ y P-PO₄, superando a los demás tratamientos.

Tabla 8. Resultados en la remoción de P-PO₄ en los tratamientos con vegetación

	Fosfatos							
	P-PO ₄ (mg/L)							
	T3	RT3	T4	RT4	T5	RT5	T6	RT6
26/04/2023	<0.92	<0.92	<0.92	<0.92	2.54	1.04	6.4	6.33
28/04/2023	<0.92	<0.92	2.51	<0.92	1.5	1.99	8.42	6.73
01/05/2023	<0.92	<0.92	<0.92	<0.92	3.15	1.41	13.92	12.85
03/05/2023	1.99	<0.92	<0.92	<0.92	3.73	0.92	6.36	12.24
05/05/2023	2.42	<0.92	1.04	<0.92	<0.92	3.09	10.1	15.45
T3 y RT3= Scirpus maritimus + Schoenoplectus americanus								
T4 y RT4= Typha latifolia								
T5 y RT5= Juncus effusus								
T6 y RT6= Carrizo								



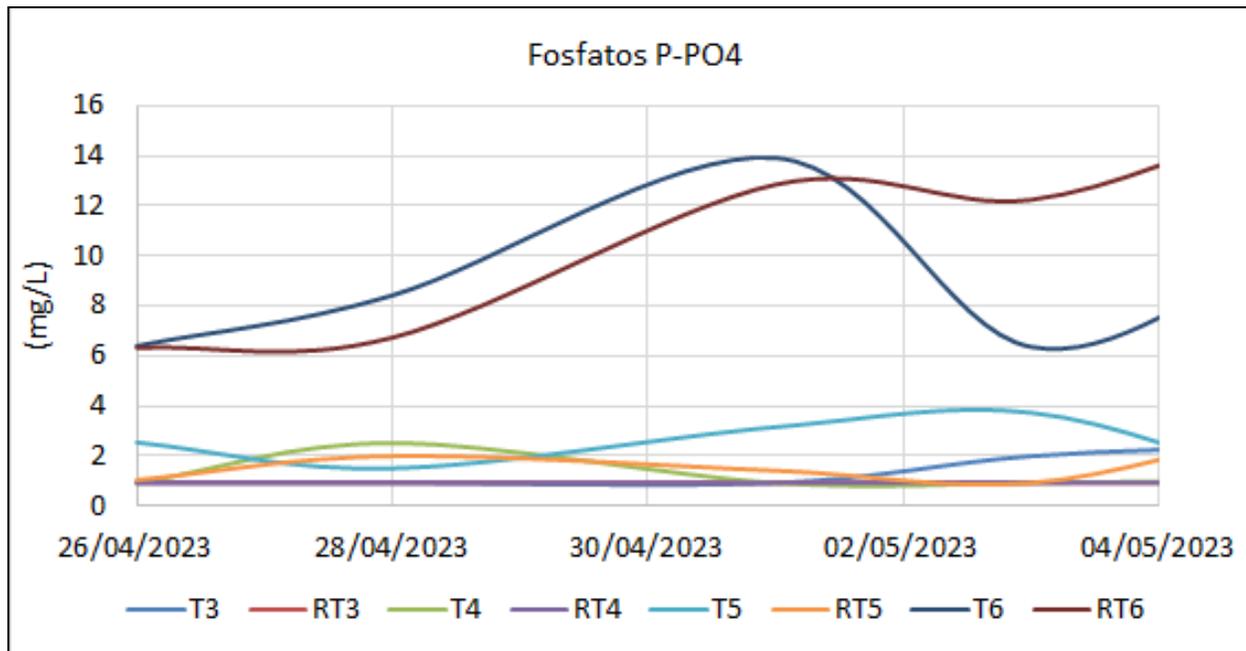


Ilustración 3 Resultados en la remoción de fosfatos P-PO₄

Tabla 9. Resultados en la remoción de N-NH₄ en los tratamientos con vegetación

	Nitrógeno Amoniacal							
	N-NH ₄ (mg/L)							
	T3	RT3	T4	RT4	T5	RT5	T6	RT6
26/04/2023	<0.5	0.526	0.614	<0.5	0.643	0.702	0.585	0.702
28/04/2023	<0.5	0.702	<0.5	0.702	1.14	0.848	0.585	0.643
01/05/2023	0.585	<0.5	<0.5	<0.5	1.26	0.848	0.76	0.702
03/05/2023	0.526	<0.5	0.614	<0.50	2.11	1.29	1.35	1.05
05/05/2023	<0.50	<0.50	<0.5	<0.5	2.22	1.78	1.4	0.819

T3 y RT3= Scirpus maritimus + Schoenoplectus americanus
T4 y RT4= Typha latifolia
T5 y RT5= Juncus effusus
T6 y RT6= Carrizo



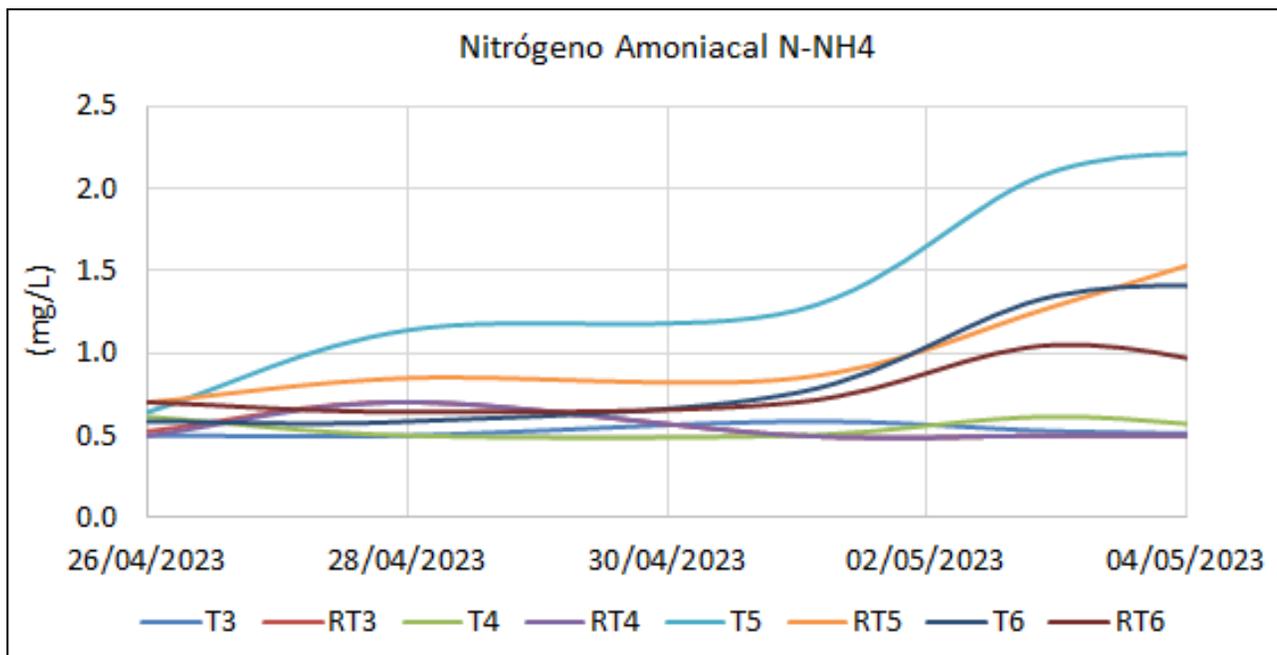


Ilustración 4. Resultados en la remoción de Amonio N-NH₄

Tabla 10. Resultados en la remoción de DQO en los tratamientos con vegetación

	Demanda Química de Oxígeno							
	DQO (mg/L)							
	T3	RT3	T4	RT4	T5	RT5	T6	RT6
26/04/2023	<5.0	46.7	49.6	75.8	25.4	32.6	60.6	103
28/04/2023	48.1	37.6	62.4	59.9	25.8	33.1	83.1	113
01/05/2023	46.6	<5.0	40.2	58.6	17.9	24.9	67.3	113
03/05/2023	88.9	51.4	38.6	62.4	13.5	32.3	88.9	103
05/05/2023	47.7	47.9	<5.0	50.3	<5.0	26.7	65.9	63.9

T3 y RT3= *Scirpus maritimus* + *Schoenoplectus americanus*
T4 y RT4= *Typha latifolia*
T5 y RT5= *Juncus effusus*
T6 y RT6= Carrizo



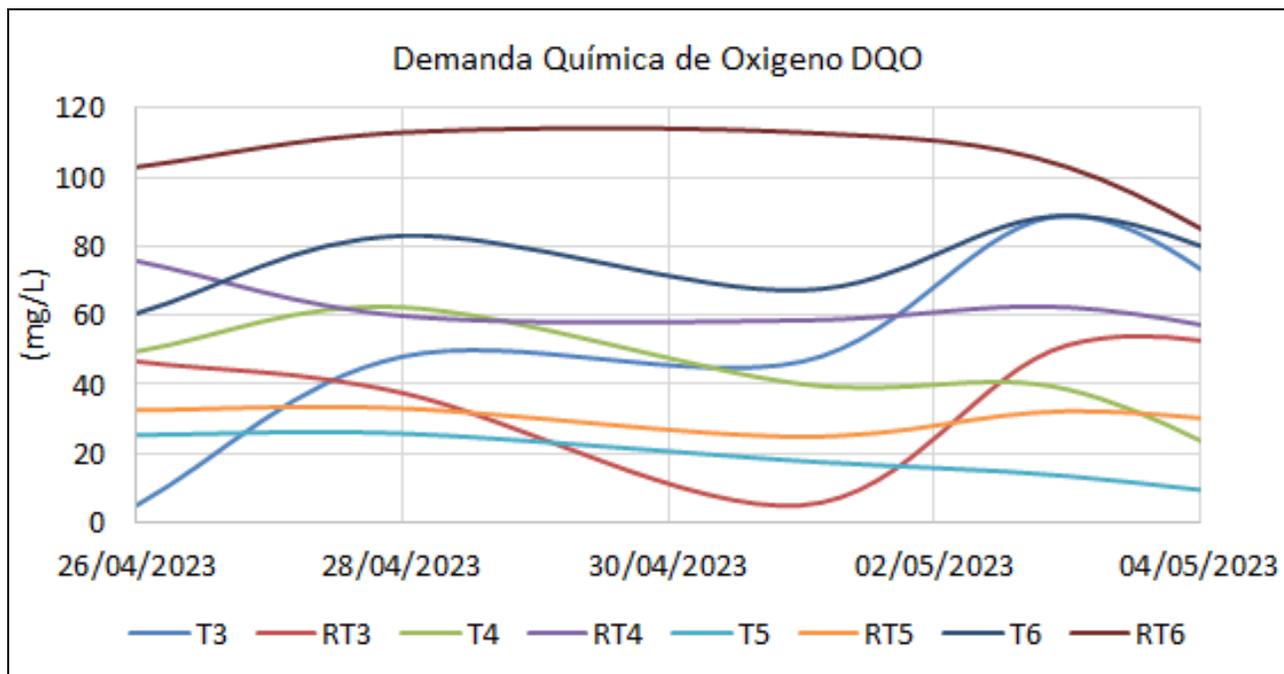


Ilustración 5. Resultados en la remoción de DQO

Con el objeto de conocer si existe diferencia significativa entre el tratamiento 4 y los otros 3 tratamientos utilizados se realizaron pruebas estadísticas de análisis de varianza ANOVA ($\alpha=0.05$), obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 11. Resultados del análisis estadístico de la comparación del tratamiento T4 (Typha latifolia) vs los demás tratamientos

Parámetro	Prueba	Réplica	Resultado
P-PO ₄	T4	T3	Existe diferencia significativa
	T4	T5	Existe diferencia significativa
	T4	T6	Existe diferencia significativa
N-NH ₄	T4	T3	Existe diferencia significativa
	T4	T5	Existe diferencia significativa
	T4	T6	Existe diferencia significativa
DQO	T4	T3	Existe diferencia significativa
	T4	T5	Existe diferencia significativa
	T4	T6	Existe diferencia significativa





Tabla 12. Resultados del análisis de varianza para P-PO₄

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	10.1772785	2	5.08863927	4.84915933	0.02861086	3.885293835
Dentro de los grupos	12.5926304	12	1.04938587			
Total	22.7699089	14				

Tabla 13. Resultados del análisis de varianza para N-NH₄

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	11.7382533	2	5.86912667	5.83319419	0.016994	3.88529383
Dentro de los grupos	12.07392	12	1.00616			
Total	23.8121733	14				

Tabla 14. Resultados del análisis de varianza para DQO

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	164.837333	2	82.4186667	8.68427245	0.00465364	3.885293835
Dentro de los grupos	113.8868	12	9.49056667			
Total	278.724133	14				





En resumen, los análisis de laboratorio y estadísticos realizados mostraron que la especie *Typha latifolia* fue más eficiente en remover los contaminantes P-PO₄, N-NH₄ y DQO en comparación con las otras especies probadas, incluyendo la especie exótica del carrizo *Arundo donax*.

7.5 Consolidación de levantamiento topográfico en el jardín-microcuenca LID

Antecedentes

Durante el desarrollo del proyecto HC2211.1 “Implementación en campo de un sistema Lid en el IMTA” (el cual se llevó a cabo en el año 2022), se realizó un estudio topográfico de la microcuenca del jardín de lluvia LID. Dicho estudio fue indispensable para determinar la configuración actual del terreno, y por consecuencia, el sentido o dirección de los escurrimientos. Con base en este nuevo levantamiento, se realizó el modelo digital de elevación (MDE), de la zona de interés.

Introducción

Este estudio se llevó a cabo en las instalaciones del IMTA, con el propósito de complementar la información levantada en campo durante el año 2022. Anteriormente, se habían levantado varios puntos de interés de la microcuenca que se está analizando, tales como: los límites del área de estudio, terreno natural (en donde se observaron cambios de elevación abruptos), infraestructura vial (carretera y banquetas), infraestructura hidráulica (pozos de visita y caja de válvulas), obra civil del humedal colindante, y cajas de cableado eléctrico. Para este año (2023), se levantaron tres represas o bordos, la geometría del vertedor para medir el caudal de entrada, puntos de descarga, diez sitios para pruebas de infiltración del suelo, ubicación del pluviómetro, límites con el humedal y muro de ladrillo.

Una vez concluidos los trabajos de campo, se continuó con el procesamiento de la información en gabinete, para ser presentada a través de diferentes planos topográficos. Además de lo anterior, este estudio sirvió de base para la actualización del modelo digital de elevación (MDE), el cuál fue fundamental para la elaboración de la modelación hidrológica e hidráulica, de la zona de estudio.

Es importante señalar que el levantamiento topográfico se realizó mediante el uso de una estación total, lo anterior debido a la extensión a levantar y a lo accidentado del terreno. Es importante subrayar que la estación utilizada (Marca TOPCON, modelo ES 105) tiene una precisión de 3 mm + 2 ppm, lo cual garantiza certidumbre en las mediciones realizadas.

Objetivo



Complementar el levantamiento topográfico del jardín-microcuenca-LID, con el propósito de conocer a detalle la configuración del terreno, y de esta manera, actualizar el modelo digital de elevación (MDE) del año 2022.

Equipo, herramientas y materiales utilizados

Para la correcta ejecución de levantamiento topográfico en campo se utilizaron los siguientes equipos, herramientas y materiales:

- ✓ Estación total marca TOPCON, modelo ES 105
- ✓ Prisma
- ✓ Baliza
- ✓ Tripié
- ✓ GPS
- ✓ Flexómetro
- ✓ Martillo
- ✓ Clavos
- ✓ Trozos de varillas de 3/8"

Procedimiento para la ejecución de los trabajos

En este apartado se presenta el procedimiento que se llevó a cabo para la realización del levantamiento topográfico. Es importante señalar que cualquier estudio topográfico se conforma por dos componentes principales: 1) Levantamiento topográfico en campo de la infraestructura de interés y 2) Tratamiento de la información en gabinete. Con base en lo anterior, se describen las principales actividades realizadas para la adecuada culminación de este estudio.

Reconocimiento del terreno o predio. Se recorrió en campo la zona de estudio y se identificaron los puntos de interés a levantar. Con base en lo anterior, se definieron los equipos, herramientas y materiales a utilizar, así como el procedimiento que se llevó a cabo para la correcta ejecución de los trabajos.

Selección de los puntos en donde se colocó la estación total. Para tener una mejor visión y poder levantar la mayor cantidad de puntos de interés, se eligieron seis puntos en donde se colocó la estación total.

Centrado, nivelado y configuración de la estación total. En cada uno de los puntos en donde se posicionó la estación fue necesario centrarla, nivelarla y configurarla para comenzar a visar los puntos de interés.



Levantamiento de información en campo. Como se mencionó, los puntos que se levantaron en campo fueron los límites de la microcuenca, terreno natural y la infraestructura situada dentro o en los límites de la zona de estudio.

Tratamiento de la información en gabinete. Una vez concluidos los trabajos de campo, se importaron las coordenadas de los puntos de interés al programa computacional AutoCAD y se elaboraron los planos correspondientes.

Elaboración de planos topográficos. Se realizaron tres planos topográficos en donde se presenta la planimetría y altimetría de la zona de estudio (ver Anexo 1).

Memoria fotográfica. Se presenta una serie de imágenes en donde se aprecia la infraestructura levantada durante el desarrollo del levantamiento topográfico. Cabe mencionar que aquí se muestran los puntos levantados más representativos, además de algunas imágenes ligadas a los trabajos de campo.

Las coordenadas de los puntos levantados son relacionadas en el Anexo 2 del presente informe. En dicha tabla se presentan las coordenadas de los puntos levantados durante el levantamiento topográfico, así como una breve descripción del tipo de punto observado.

7.5.1 Modelo digital de elevación (MDE)

Introducción

En este apartado, se presenta el modelo digital de elevación (MDE) de la microcuenca del jardín de lluvia LID, implementado en el IMTA. Para llevar a cabo este modelo, se utilizó como plataforma principal el estudio topográfico citado en el capítulo anterior.

Es importante mencionar que el MDE se realizó con ayuda del programa QGIS Desktop, versión 3.22.10. Este software es de dominio público, es decir, no requiere pago de licencia para su utilización.

Objetivo

Actualizar el modelo digital de elevación (MDE) con base en el complemento del estudio topográfico realizado durante este proyecto del año 2023. Dicho modelo se realizó con diferentes resoluciones (50 cm, 25 cm, 10 cm y 5 cm).

Metodología

A continuación, se describe el proceso que se llevó a cabo durante la elaboración del modelo digital de elevación (MDE) de la zona de estudio.





1. Una vez concluido el trabajo de campo, se descargaron los puntos topográficos de la estación total.
2. Se importaron los puntos en el programa AutoCAD, teniendo el complemento de CivilCAD, para el tratamiento de la información.
3. Se llevó a cabo la triangulación de los puntos, con su respectivo ajuste o afinación de las mismas.
4. En el programa QGIS se importaron las capas de puntos y triangulaciones. Se creó un nuevo proyecto y se le asignó un nombre.
5. Se crearon las curvas de nivel y se anotó en valor numérico de cada curva.
6. Se generaron cuatro modelos digitales de elevación (MDE) con diferentes resoluciones (50, 25, 10 y 5 cm, respectivamente).
7. Se agregó el mapa de fondo, para localización del MDE, a través de Google Satélite.
8. Finalmente, se editó el archivo, se le dio presentación y se concluyó satisfactoriamente.

En la ilustración siguiente se muestran los resultados de la elaboración del MDE de la zona de interés.



Ilustración 6 Modelo digital de elevación (MDE) de la microcuenca del jardín de lluvia LID





7.6 Consolidación de la componente vegetación de la microcuenca jardín.

Se realizó un diseño arquitectónico conceptual denominado “paleta de vegetación” de las especies a plantar en el jardín microcuenca-LID, que sirvió de base para sustituir las especies nativas ornamentales plantadas en el año 2022 y que cumplieron su ciclo vegetativo al ser de crecimiento anual, como es el caso de la Dalia. En su lugar se plantaron especies nativas ornamentales de crecimiento perenne, como son la *Asclepia curasavica*, conocida localmente como “quebramuelas” y que se caracteriza por atraer a las mariposas en especial a la monarca (*Danaus plexipius*) por el colorido de sus pequeñas flores, así como la *Canna indica* conocida vulgarmente como “platanillo” que requiere más humedad, Con la introducción de dichas especies se terminará de consolidar esta componente del LID en su integración de infraestructura gris a infraestructura verde.

7.7 Captación de aguas lluvia de sitio techado SCALL.

Con el propósito de incorporar mayor caudal al jardín microcuenca LID y evaluar con mayor precisión su efecto de regulación de escurrimientos, se diseñó un sistema de captación de agua de lluvia (SCALL), aprovechando el espacio techado de un estacionamiento cercano a la infraestructura LID.

Así, se realizó una primera aproximación, o diseño preliminar del cálculo de los escurrimientos y los materiales con una metodología utilizada para proyectos de ecotecnias que se han venido impulsando en el IMTA en las zonas rurales y que hacen énfasis en captar, almacenar, utilizar y reusar el agua de lluvia en los hogares de dichas zonas. De igual forma, se hizo una revisión de los nuevos materiales de construcción existentes en el mercado, encontrando una innovación de canaletas metálicas rectangulares con mejor diseño para hacer más eficiente la captura del escurrimiento de los techos con mínimo desperdicio sobre todo en eventos de lluvias intensas. Ello requirió también. diseñar los soportes especiales para su sostén ya que los existentes en el mercado no fueron adecuados ni convenientes.

El procedimiento metodológico de este diseño preliminar se presenta enseguida:

Con la finalidad de estimar los niveles y los volúmenes de agua que pueden conducirse al jardín microcuenca, a continuación se describe el cálculo de los volúmenes y niveles de escurrimiento pluvial máximos en el área de captación de los techos del estacionamiento del edificio de hidrometeorología del IMTA.

Se determina el volumen asociado a un nivel de captación factible de aprovechar por metro cuadrado de superficie, con base en el registro histórico de precipitación (1982 - 2021) de la Estación Climatológica del Progreso, Morelos “PROMR” y considerando los valores de las Normales Climatológicas por Estado SMN de la estación número 17071 “Progreso, Jiutepec” y cuyo registro histórico es de 1981 al 2010.”



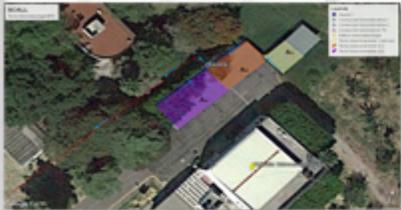
Secuencia metodológica primera aproximación

Clave estación	17071			Situación	Operando	Altura (msnm)	1366					
Nombre	Progreso			Año Registro	NORM 81-10	Longitud	18°52'48"					
Municipio	Jiutepec			Dato:	Precipitación normal	Latitud	99°09'12"					
Año / Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Promedio mensual (mm)	9.00	7.70	4.50	12.30	58.20	211.50	186.00	213.20	232.60	81.90	12.00	4.70
Promedio anual (mm)	1033.60											

Secuencia metodológica primera aproximación (continuación)

Caracterización del área de captación

El área de aportación para el presente análisis es la correspondiente al techo del estacionamiento del edificio de hidrometeorología del IMTA, que incluye las dos áreas techadas, como se puede observar en la siguiente figura. Esta es el área destinada para que el agua de lluvia sea captada y conducida al Jardín micro-cuenca del UID para su regulación y aprovechamiento.



Área Azotea			
Techo	Ancho (m)	Largo (m)	Área total (m ²)
At1	5	6	30.00
At2	7	12.7	88.90
At3	7	12.8	89.60
Total			208.50

Esta área no se considerará ya en esta...

Coeficiente de captación	
Tipo de material	Kc
Cubiertas metálicas o plásticas (Lámina de metal, lámina de fibras de plástico)	0.95
Techos impermeabilizados o cubiertos con materiales duros (Tejas, láminas de cartón)	0.9
Concreto hidráulico	0.9
Lámina corrugada	0.8
Vidrio	0.95
Fibrocemento	0.85
Impermeabilizantes derivados de plástico o grava	0.75
Asbesto	0.75

Precipitación promedio mensual

Mes												
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
6.80	6.14	5.91	9.72	90.13	195.57	178.55	195.24	217.67	74.59	13.12	1.22	
Promedio mensual anual (mm) =												954.85

Volumen promedio de captación (VA)

$$VA = \frac{p \cdot A \cdot Kc}{1000}$$

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

p: Precipitación promedio anual con distribución mensual, en mm

A: Área de la proyección horizontal de las instalaciones de captación, en m²

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

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
VA (m ³ /mes)	1.346	1.217	1.170	1.925	9.968	38.738	35.366	38.672	43.114	14.775	2.598	0.241
Sumatoria anual de captación =												189.131 m³





Secuencia metodológica primera aproximación (continuación)





Secuencia metodológica primera aproximación (continuación)

Tramo	Tipo	Velocidad real (m/s)	Longitud (m/s)	Longitud en proyección (m/s)	Cota (m)		Cota plantilla (m)	
					Inicial	Final	Inicial	Final
Conducto 1	Aéreo	0.843	5.00	5.00	0.00	-0.100	-	-
Conducto 2	Aéreo	1.285	12.70	12.70	0.00	-0.254	-	-
Conducto 3	Aéreo	1.140	12.80	12.80	0.00	-0.254	-	-
Conducto 4	Terreno	1.330	4.00	4.00	0.00	-0.080	1359.000	1358.920
Conducto 5	Terreno	1.330	30.00	30.01	-0.08	-0.680	1358.920	1358.320
En resumen, se requiere:								
<ul style="list-style-type: none"> - el conducto 1 un diámetro de 2 pulgadas (mínimo) y una longitud de 5 m - El conducto 2 un diámetro de 4 pulgadas (mínimo) y una longitud de 12.7 m - El conducto 3 un diámetro de 4 pulgadas (mínimo) y una longitud de 12.8 m - Una bajada de un diámetro de 6 pulgadas y una longitud de 2.5 m - Un registro a la bajada - El conducto 4 un diámetro de 6 pulgadas (mínimo) y una longitud de 4 m - Un registro en la esquina - El conducto 5 un diámetro de 6 pulgadas (mínimo) y una longitud de 60 m. 								

La metodología de este diseño preliminar se presenta de forma detallada y completa como un archivo anexo Excel para su consulta.





De la segunda aproximación de cálculo y diseño de SCALL, que se realizó, se tuvo la consideración que el destino de la captación de las aguas lluvia, era para descargar el volumen en el jardín microcuenca LID, con el propósito de incrementar el caudal que debía ser regulado con las represas bordo construidas en el LID. Por ello se utilizó una metodología simplificada para diseñar un conjunto de canaletas y conducciones para captar el agua de lluvia e incorporar dicho volumen al caudal de la microcuenca jardín.

Generalidades

De manera global el drenaje urbano está constituido por dos tipos de estructuras: las de localización y la de transferencia. La primera corresponde a los lugares donde el agua es retenida y la segunda es la que conecta a la anterior y está constituida por zanjas y canales de drenaje, alcantarillado y calles (Campos Aranda, 2010).

Drenaje de techos de edificios, estacionamientos y/o azoteas

Para el cálculo del gasto se considera el método racional en l/s, mediante la siguiente expresión:

$$Q = CIA$$

Donde, el coeficiente de escurrimiento por tipo de material, en este caso para cubiertas metálicas es de 0.95, de acuerdo a lo mencionado en la norma NMX-AA-164-SCFI-2013.

De acuerdo a la norma mencionada, los periodos de retorno (T_r) son indicadores de la frecuencia e intensidad de lluvia (un evento de lluvia). T_r 5 años es el valor de referencia para el dimensionamiento de obras hidráulicas como colectores pluviales y alcantarillado. Los T_r de mayor magnitud suelen emplearse para dimensionar obras de control y emergencias como tanques tormenta. De acuerdo a lo mencionado, la intensidad corresponderá a un periodo de retorno de 5 años y una duración de 5 minutos.

Cálculos de la bajada pluvial del estacionamiento

Se ha considerado la captación del estacionamiento mediante 3 áreas tributarias en el techo del estacionamiento de la Subcoordinación de Eventos Extremos y Cambio Climático del IMTA, mismos que se muestran en la ilustración 7.

La intensidad de la lluvia se obtuvo de las isoyetas de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT), en la cual se considera una intensidad de **155 mm/h** para un periodo de retorno de 10 años y una duración de 5 minutos (ver Ilustración 8).



Ilustración 7. Áreas tributarias en la bajada del estacionamiento

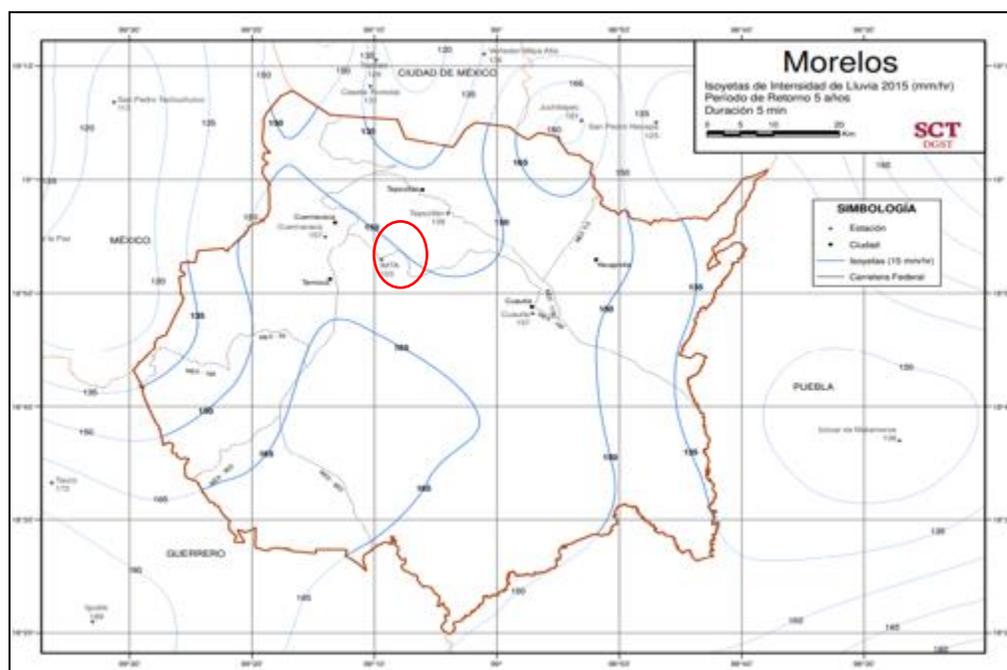


Ilustración 8. Isoyetas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes





La obtención de los gastos máximos captados en el techo del estacionamiento se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Gastos máximos en el techo del estacionamiento

Áreas de captación (m ²)	Área (m ²)	Q (l/s)
A1	30.00	1.23
A2	88.90	3.64
A3	89.60	3.66

Dimensionamiento de las canaletas

Para dimensionar las canaletas de tiene como referencia la siguiente tabla propuesta por Mechell et al, (2010):

Tabla 16. Dimensiones de canaleta según intensidad de lluvia e inclinación

		Máxima área de captación admisible para diferente intensidad				
Pendiente de inclinación de canaleta	Ancho de canaleta (pulgadas)	Intensidad 50 mm/h	Intensidad 75 mm/h	Intensidad 100 mm/h	Intensidad 125 mm/h	Intensidad 150 mm/h
1%	3	45	30	22	18	15
	4	95	63	47	38	32
	6	253	19	126	101	84
	8	521	348	260	208	174
2%	3	63	42	32	45	21
	4	134	89	67	54	45
	6	357	238	179	143	119
	8	740	494	370	296	247
4%	3	89	60	45	36	30
	4	190	126	95	76	63
	6	515	344	258	206	172
	8	1042	694	521	417	347

De acuerdo a la tabla anterior y con base en el área de captación y la intensidad considerada en la tabla 17, muestra el ancho de las canaletas de las 3 áreas de captación y una pendiente del 2%.

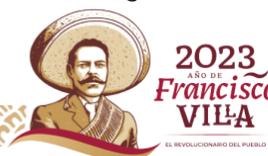


Tabla 17. Dimensionamiento de las canaletas consideradas

Áreas de captación (m ²)	Área (m ²)	Pendiente de inclinación de la canaleta (%)	Intensidad (mm/h)	Ancho de canaleta (pulgadas)
A1	30.00	2	155	4
A2	88.90	2	155	6
A3	89.60	2	155	6

Diámetros de la tubería pluvial

Definido el gasto de las bajadas, el diámetro (d) necesario del codo y tubo de bajada vertical se estima mediante la siguiente expresión:

$$d_v = 4.319 Q_d^{0.377}$$

Para tuberías de drenaje cuasihorizontales con pendiente S en cm/m su diámetro en cm se estima mediante la siguiente expresión:

$$d_h = 5.684 \frac{Q_d^{0.377}}{S^{0.188}}$$

Con base en las expresiones mencionadas, el tubo de la bajada vertical del área de captación A1 deberá ser de **2 pulgadas** y el que capta las aportaciones A2 y A3 será de **4 pulgadas**.

Para el colector horizontal se propone un diámetro de **4 pulgadas con una pendiente de 4%**, el cual realizará su descarga en el sistema LID del proyecto. El cálculo hidráulico del colector horizontal se muestra en la tabla 19.

Tabla 18. Cálculo hidráulico del colector horizontal

Colector	Q (l/s)	Øh (pulg)	Área (m ²)	Pm (pulg)	Rh (m)	n (adim)	S (cm/m)	Q 100% (l/s)	V 100% (l/s)	d/D
Horizontal	8.53	4	0.0079	0.3142	0.025	0.009	4	14.959	1.905	57%

Supervisión en campo de la colocación de las bajadas pluviales

Para recibir las aportaciones pluviales del techo del estacionamiento, se colocaron canaletas galvanizadas (ilustración 9), además de la colocación de tubos PTR que soportan el peso de estas. Con relación a las bajadas pluviales, se consideraron 3 tuberías de PVC de

4 pulgadas y 2 tuberías de PVC de 4 pulgadas, colocadas de manera horizontal que descargan en el registro construido para recibir las aportaciones del techo mencionado.



Ilustración 9. Colocación de canaletas para la captación pluvial en el techo

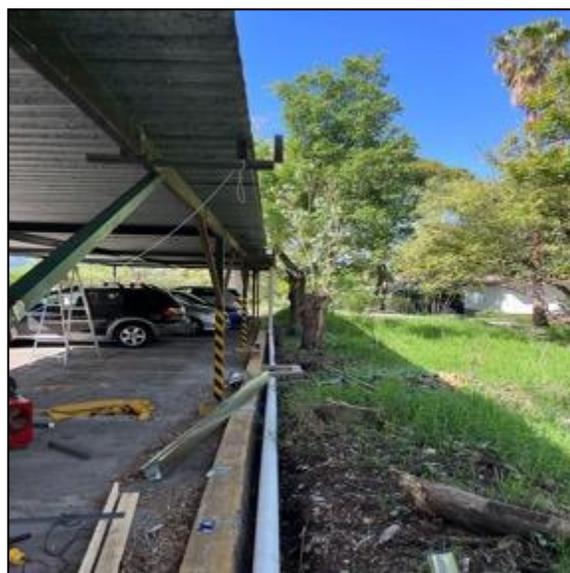
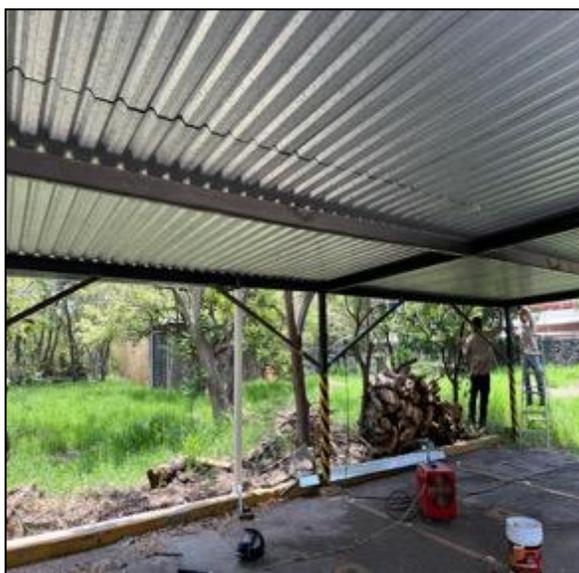


Ilustración 10. Bajadas pluviales del techo

Para la parte de conducción del agua pluvial hacia el jardín de lluvia, se construyó un registro de 60 x 60 cm con las llegadas de los dos tubos de 6 pulgadas de material PVC y salida con el mismo diámetro, la tubería de conducción que sale del registro hacia el



sistema de infraestructura verde es de PVC de 6 pulgadas, la cual cuenta con una pendiente de 4% en el primer tramo (ilustración 11).



Ilustración 11. Tubería de 6 pulgadas de PVC con dirección hacia el LID

El siguiente tramo, -abarca hasta el puente peatonal-, se continuó con la tubería PVC de 6 pulgadas considerando una pendiente de 2% (ilustración 10). Asimismo, se colocó una cama de arena como base y relleno.



Ilustración 12. Colocación de tubería de 6 pulgadas



En relación con la tubería colocada debajo del puente peatonal, se realizó una reducción de 6 a 4 pulgadas, esto con la finalidad de no realizar trabajos de corte o modificaciones actuantes, además de no interferir con la tubería PEAD corrugada existente y con otras tuberías de PVC transversal que se encuentran en el sitio (Ilustración 13).



Ilustración 13. Reducción de tubería de 6 a 4 pulgadas en el puente peatonal

Del tramo que inicia después del puente (a la altura del muro transversal) y que descarga en el sistema LID, se consideró una tubería de 4 pulgadas.



Ilustración 14. Tubería de 4 pulgadas que descarga en el LID

El sistema LID recibe dos aportaciones, una correspondiente a las bajadas pluviales de los techos del estacionamiento y otra de la aportación de la calle lateral, en donde se colocó un registro pluvial con una rejilla de 30 x 35 cm que conduce el escurrimiento por medio de un tubo de PVC hidráulico de 4 pulgadas (ilustración 15).



Ilustración 15. Aportación de la calle al sistema LID

Además, se realizaron trabajos de pintura a las bajadas pluviales, soportes de la canaleta, de la estructura del estacionamiento y del tramo final de descarga pluvial de la tubería de 6 pulgadas.



a)



b)

Ilustración 16. Estructura antes de la pintura y b) estructura después de la pintura



a)



b)

Ilustración 17. Tubería de descarga al LID a) antes de la pintura y b) después de la pintura

7.8 Medición de parámetros hídricos en campo.

Se instaló un pluviómetro totalizador dentro del territorio de la microcuenca jardín, para medir in situ la precipitación ocurrida y se hizo un análisis de dichos datos junto con los de las estaciones automatizadas instaladas en el territorio cercano al LID.



Ilustración 18. Instalación de pluviómetro totalizador en microcuenca



Asimismo, para conocer la humedad antecedente del suelo, previa a los escurrimientos, se realizó un ciclo de medición de contenido de humedad del suelo en los primeros 20 cm durante el mes o período históricamente más lluvioso, que fue el mes de septiembre. La determinación de esta variable se realizó en siete muestras distribuidas a lo largo del fondo y talud con terrazas, mediante el método gravimétrico de laboratorio a 105°C.

Tabla 19. Resultados de humedad gravimétrica del mes más lluvioso históricamente

Día	m1=PV1	m2=T1	m3=PV2	m4=T2	m5=PV3	m6=T3	m7=PV4
1							
2	37.2625	30.2508	35.3789	31.2021	37.1028	32.2565	33.4011
3							
4	39.1893	32.3678	34.4689	35.2784	31.5556	36.6677	34.4555
5							
6	40.967	34.4146	33.1484	38.3677	26.44	38.1094	46.7116
7							
8	41.1111	33.5789	35.1526	39.4578	33.1279	39.6845	40.6889
9							
10							
11	37.8735	32.2127	36.1506	40.3967	35.0799	40.3967	22.567
12							
13							
14	47.0008	35.2366	38.4289	41.0061	39.0938	36.7237	31.6154
15							
16	42.1129	32.201	31.7668	35.5798	36.0126	35.1015	36.3946
17							
18	37.8825	30.2057	25.067	31.5347	34.7486	33.1633	40.0897
19							
20							
21	46.6268	24.8309	30.1089	33.004	31.6718	28.816	32.1839
22							0
23	36.1573	25.9128	32.1717	30.7428	28.1234	26.1785	31.2671
24							
25	26.304	26.8788	35.0452	29.2727	26.9996	24.1801	40.7683
26							
27	23.879	20.0917	25.0952	23.5051	33.6619	26.0916	29.1393
28							
29	20.1786	18.1196	23.1273	20.5673	25.7124	20.1124	25.4328
30							
02-oct	33.0168	23.0363	26.9687	25.4599	37.716	18.1566	24.9768



De igual forma se diseñó y construyó un aforador con vertedor de pared delgada con contracciones construido con material de triplay, mismo que se instaló en el primer bordo-represa donde confluyen los gastos de la descarga del ingreso de la calle y del proveniente del SCALL. Vale la pena señalar que únicamente se tuvo vertido de escurrimiento por dicho aforador en un evento de lluvia, alcanzando un tirante de 1.5 cm, el cual fue medido en un sistema de tubos de PVC de ½” con vasos comunicantes.

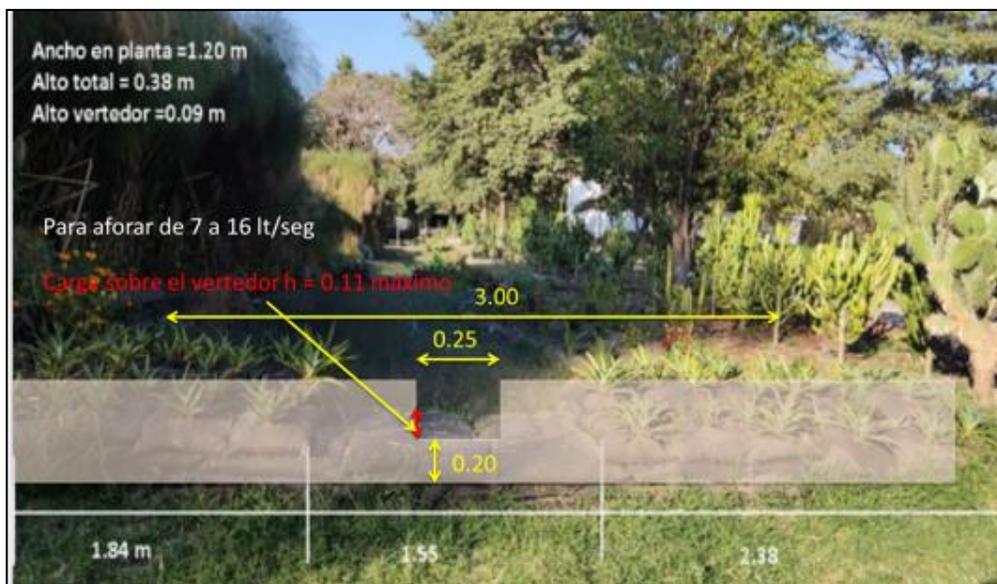


Ilustración 19. Diseño de aforador a construir con material de triplay

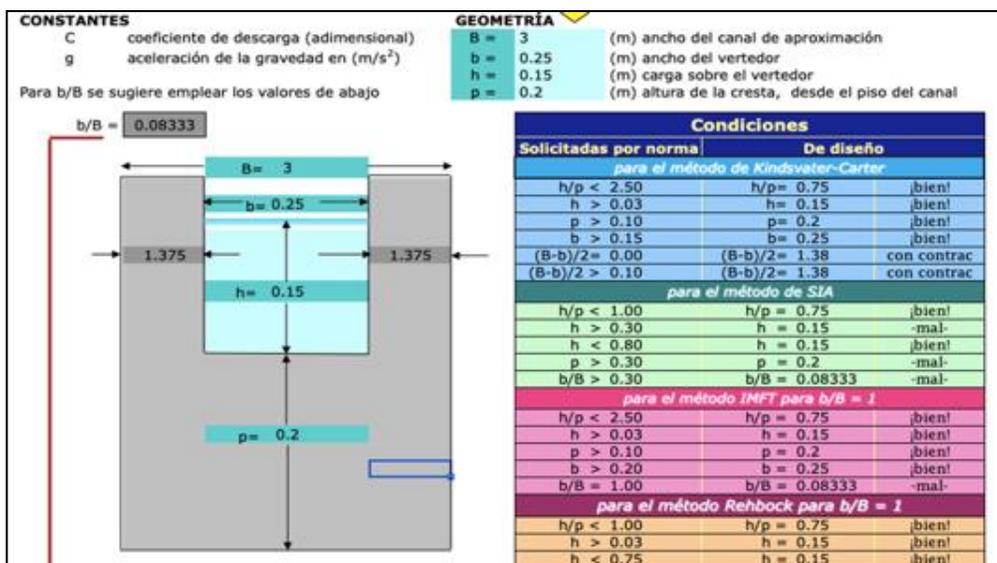


Ilustración 20. Constantes para diseño del aforador



7.9 Modelación hidrológica-hidráulica de la Microcuenca-Jardín -LID.

Se hizo acopio de toda la información previa del jardín microcuenca y se integró la información generada en este año de las variables hídricas, topográficas y de vegetación. Con dicha base de datos se realizó la modelación de flujo a superficie libre en dos dimensiones con HEC-RAS, la modelación en HEC-HMS para el análisis de transvaso entre microcuencas. Asimismo, se obtuvieron las variables para correr el modelo SWMM para estimar la contribución de esta infraestructura verde en el manejo y control de inundaciones

7.9.1 Modelo SWMM

En este capítulo, se explican los alcances y detalles del trabajo llevado a cabo durante 4 años en torno a poder mejorar el alcance del modelo hidrológico-hidráulico para el jardín de lluvia ubicado en las instalaciones del IMTA.

Caracterización de los parámetros de la cuenca

Subcuencas de estudio

Se han delimitado 6 subcuencas en la zona de estudio propuestos en el trabajo del IMTA (2021) que han sido actualizada de acuerdo a los trabajos de topografía explicado en capítulos anteriores. Las características de cada subcuenca se presentan a continuación.

Tabla 20. Características generales de las subcuencas de la zona de estudio

Nombre	Área (ha)	Ancho (m)	% impermeable	Pendiente (%)
SC1_2	0.0193	10.56	99	2
SC1_4	0.04	13.94	36.52	2.29
SC2	0.03	32.31	21.32	7.21
SC3	0.015	35.42	18.21	7.92
SC4	0.02	14.57	5.97	11.17
SC5	0.05	13.05	16.52	7.1

Espacialmente se han colocado en una distribución alargada las subcuencas que se estarán utilizado para el proceso lluvia escurrimiento (ver Ilustración 21).

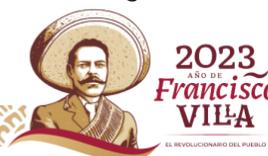




Ilustración 21. Ubicación espacial de las subcuencas de estudio

La cuenca SC1_2 se actualizó con ayuda de trabajos realizados con canaletas galvanizadas de 10 x 10 x 15 a la orilla del techo del estacionamiento y 3 bajadas pluviales de PVC hidráulico de 4 (ver Ilustración 22) pulgadas que se conectan y descargan a la cuenca SC2 con una tubería de PVC sanitaria de 6 pulgadas (ver Ilustración 23).



a)



b)

Ilustración 22. a) Bajadas pluviales y b) techo de estacionamiento utilizado para la captación de agua de lluvia



Ilustración 23. Tubería de 6 pulgadas que descarga a la cuenca SC2

Para la captación del escurrimiento de SC1_4 se construyó una boca de tormenta con una rejilla de 30 x 35 cm que conduce el agua a la cuenca SC2 por medio de un tubo de PVC hidráulico de 4 pulgadas.



a)



b)

Ilustración 24 a) boca de tormenta y b) tubería de 4 pulgadas para la descarga pluvial a SC2



Infraestructura verde

Para las condiciones de infraestructura verde se tomaron en cuenta los datos del trabajo realizado por el IMTA (2021) donde se realizaron estudios exploratorios de la zona de estudio para conocer parámetros geológicos y caracterizar cada subcuenca.

Tabla 21. Tabla Parámetros de diseño para las 3 unidades

Capa	Parámetro	Parámetros de diseño			Unidades
		SC2	SC3	SC4	
Surface	<i>Berm height</i>	304.8	304.8	304.8	mm
	<i>Vegetation volume fraction</i>	0.1	0.1	0.1	
	<i>Surface roughness</i>	0.027	0.027	0.027	
	<i>Surface slope</i>	6.67	4.28	5.81	%
Soil	<i>Thickness</i>	600	800	1050	mm
	<i>Porosity</i>	0.32	0.32	0.32	
	<i>Field capacity</i>	0.23	0.23	0.23	
	<i>Wilting point</i>	0.1	0.1	0.1	
	<i>Conductivity</i>	36	36	36	mm/hr
	<i>Conductivity slope</i>	30	30	30	
Storage	<i>Suction head</i>	88.9	88.9	88.9	mm
	<i>Thickness</i>	-	-	-	mm
	<i>Void ratio</i>	-	-	-	
	<i>Seepage rate</i>	36	36	36	mm/hr
	<i>Clogging</i>	-	-	-	

Configuración del terreno.

Para la configuración del terreno tomó en cuenta la información del levantamiento topográfico y realizaron las secciones representativas para el modelo unidimensional. La representación se realiza mediante tuberías.



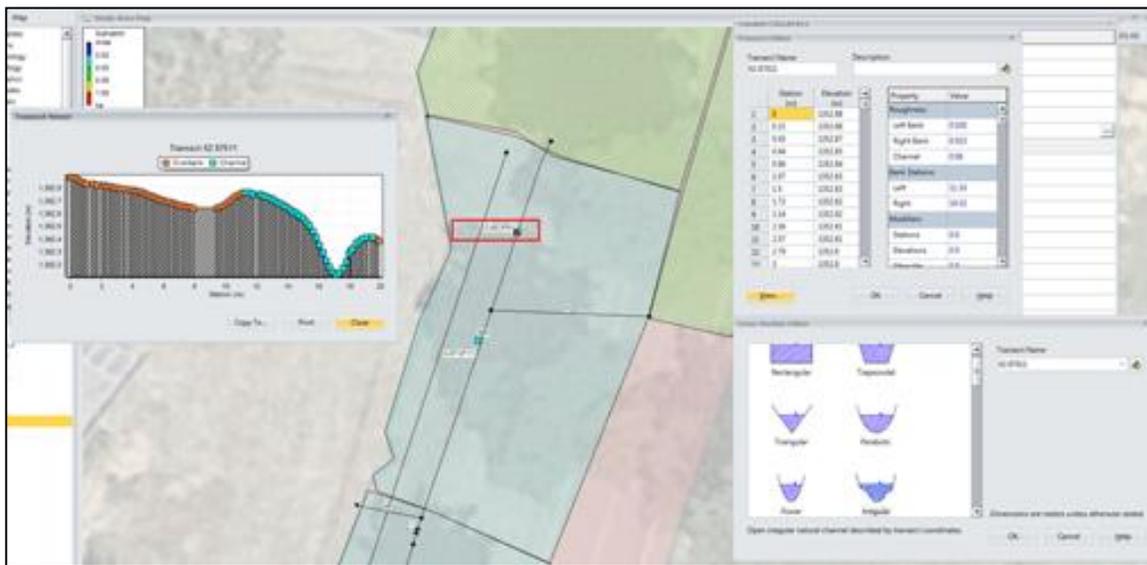


Ilustración 25. Sección CJ62.87611

Vertedores para la retención del flujo

Para la retención y regulación del flujo se prepararon geocostales que generen un obstáculo al paso del flujo.



a)



b)

Ilustración 26. a) Vista frontal de los vertedores y b) vista lateral de los geocostales

Esta información de las alturas y medidas de los geocostales se levantaron, se procesó la información y se agregaron 3 vertedores al programa SWMM.



Ilustración 27. Ubicación de los vertedores y características del vertedor en SC1

Con toda la información mencionada anteriormente se construyó un modelo que cuenta con la siguiente información:

Tabla 22. Información general del modelo hidráulico

Variable	Cantidad
Pluviómetro	1
Nodos	16
Salidas	5
Tuberías	16
Vertedores	3
LID	3
Subcuencas	6



Ilustración 28 Modelo LID para el jardín de lluvia del IMTA





Calibración del modelo

La calibración del modelo es un paso importante que nos ayuda conocer que tan alejado o acertado son nuestros resultados del modelo numérico con respecto a la realidad, por tal motivo se ha obtenido la información de dos lluvias que tuvieron lugar el 4 y 14 de agosto del año 2023.

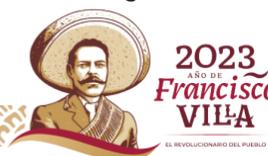
Evento del 04 de agosto del 2023.

El evento del 04 de agosto del 2023 comenzó a las 18:00 horas y de acuerdo con la información de la EMA del IMTA estos son los datos que se obtuvieron de precipitación para cada 10 minutos. El evento tuvo una duración de 4 horas con una precipitación total de 8.81 mm.

Tabla 23. Datos de lluvia a cada 10 minutos del evento del 04 de agosto de 2023

Fecha	Precipitación (mm)
04/08/2023 18:00	1.603
04/08/2023 18:10	3.607
04/08/2023 18:20	0.802
04/08/2023 18:30	0
04/08/2023 18:40	0.301
04/08/2023 18:50	0.1
04/08/2023 19:00	0.301
04/08/2023 19:10	0.501
04/08/2023 19:20	0.301
04/08/2023 19:30	0.2
04/08/2023 19:40	0.1
04/08/2023 19:50	0.1
04/08/2023 20:00	0.1
04/08/2023 20:10	0.301
04/08/2023 20:20	0.1
04/08/2023 20:30	0.2
04/08/2023 20:40	0.1
04/08/2023 20:50	0
04/08/2023 21:00	0
04/08/2023 21:10	0
04/08/2023 21:20	0.1
04/08/2023 21:30	0

Con respecto a la información de lo que aconteció en dicho evento se tiene lo siguiente.



Vertedor

En el primer vertedor se alcanza a observar todavía algo de retención en la zona cercana al vertedor, sin embargo, la huella del agua alcanza una zona de aproximadamente 4 metros del vertedor hacia aguas arriba, con respecto al tirante se vio en campo una marca de aproximadamente 18 cm con respecto al fondo del vertedor.



Ilustración 29. Vista del primer vertedor con su aforador en SC2

El modelo hidráulico presenta una altura de 21 cm en el vertedor ubicado en SC2, además de una huella de agua de aproximadamente 10 metros.

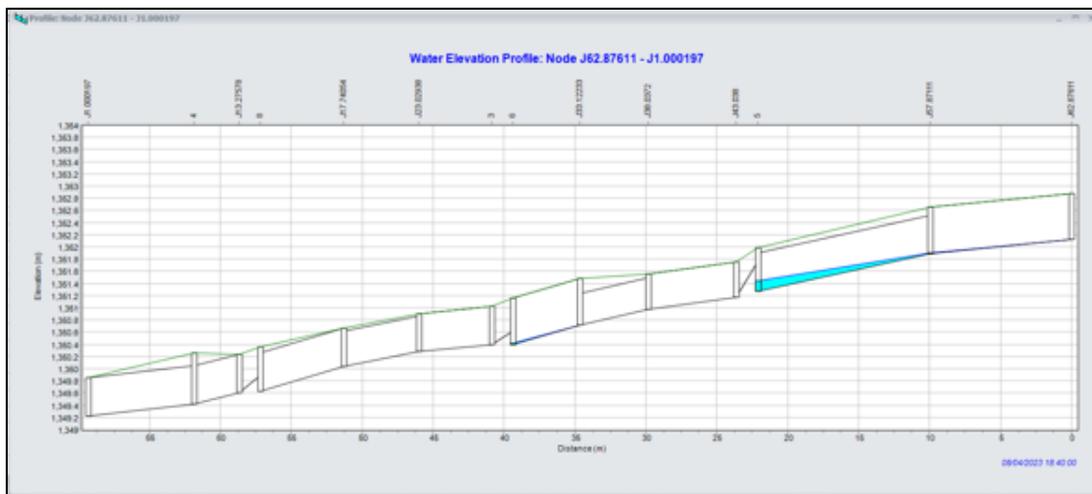


Ilustración 30. Perfil de flujo en el jardín microcuenca LID



Aportaciones de flujos al LID

Con respecto a los ingresos que se tienen por tuberías que provienen de la cuenca SC1-4 y llegan a la cuenca por medio de una tubería de 4 pulgadas se tiene un escurrimiento muy pequeño con una lámina en la tubería menor a 2 cm.



Ilustración 31. Descarga del flujo de la tubería de 4 pulgadas al LID

La cuenca SC1-2 se forma a partir de la captación del techo de los carros que se encuentra enfrente de la Subcoordinación de Eventos Extremos y Cambio Climático, ese escurrimiento es captado por canaletas y conducido por tuberías al inicio de la cuenca SC2.



Ilustración 32. Descarga de la tubería de 4 pulgadas al LID

El modelo hidráulico indica para la descarga proveniente de SC1-4 se tiene un flujo de 0.02 m de altura con un gasto de 0.87 l/s cuando se presentó la lámina mayo de lluvia en el evento.

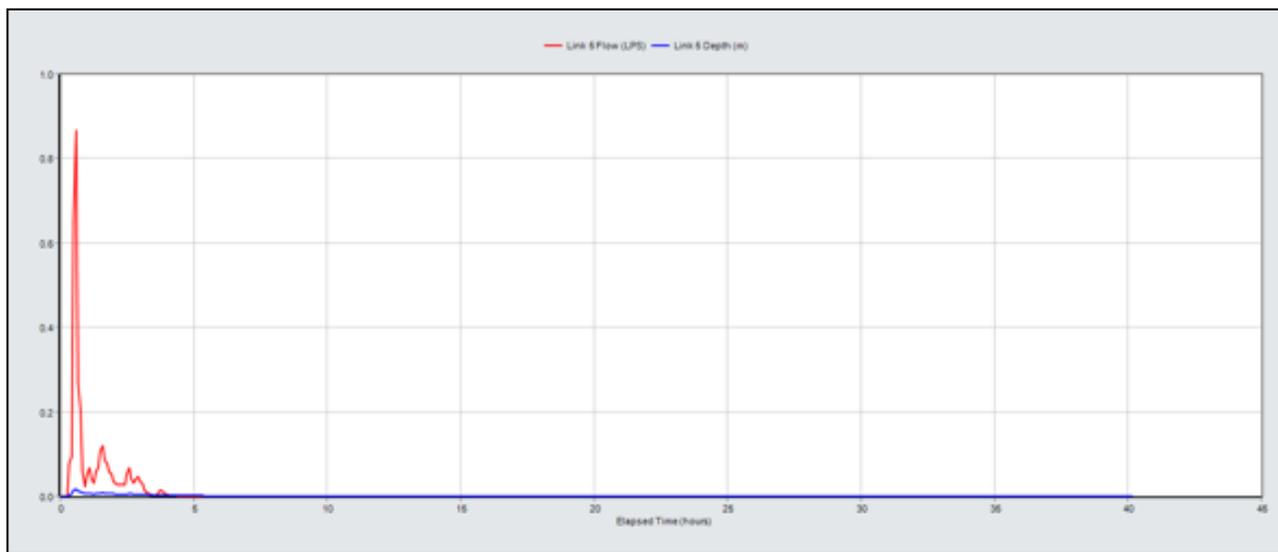


Ilustración 33. Datos de la tubería que capta el agua de SC1-4

La información de SC1-2 se presenta con un flujo de 0.33 l/s en el tiempo pico.

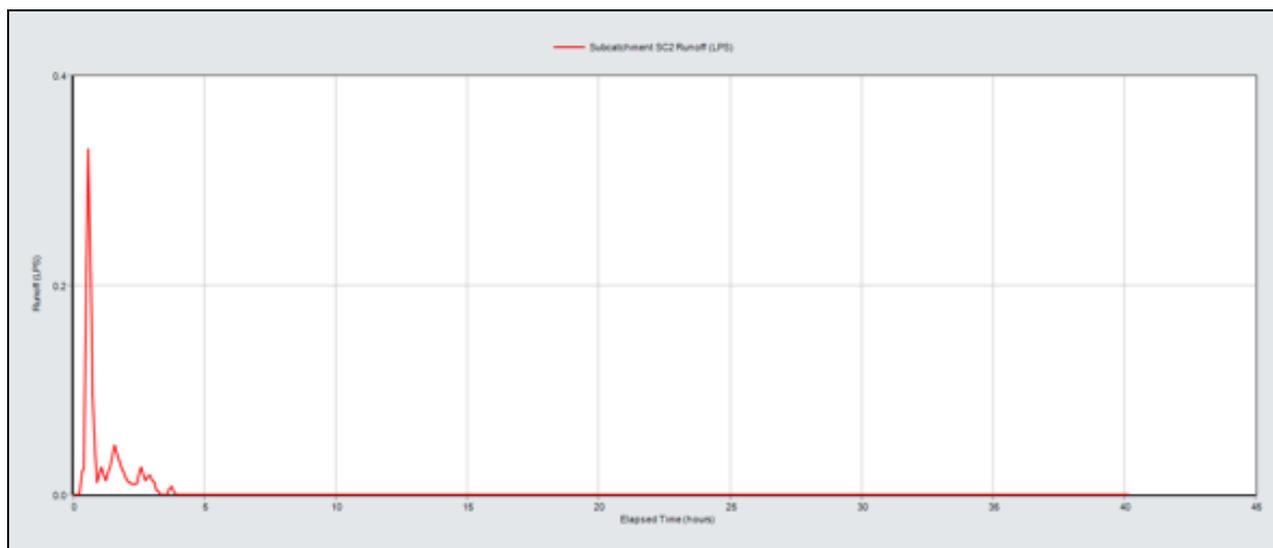


Ilustración 34. Hidrograma de la cuenca SC-2



Evento del 14 de agosto del 2023: De acuerdo al registro de la estación meteorológica automática (EMA), la duración del evento fue una hora y cuarenta minutos y una precipitación de 6.31 mm.

Tabla 24. Datos de la EMA el 14 de agosto del 2023

Fecha	Precipitación (mm)
14/08/2023 17:10	0
14/08/2023 17:20	0
14/08/2023 17:30	2.906
14/08/2023 17:40	3.307
14/08/2023 17:50	0
14/08/2023 18:00	0
14/08/2023 18:10	0
14/08/2023 18:20	0
14/08/2023 18:30	0
14/08/2023 18:40	0.1

Al realizar la modelación en el programa SWMM se obtienen los siguientes resultados. Vertedor

Con respecto a lo observado al tiempo del evento, se tiene una huella en el vertedor 1, ubicado en SC2 con una altura de aproximadamente 15 cm en altura (marca de agua) y a lo largo aproximadamente 4 metros de almacenamiento.



Ilustración 35. Primer vertedor ubicado en SC2



En el análisis numérico del primer vertedor se tiene un nivel de 0.18 m en el tiempo pico de la avenida y en el segundo vertedor se tiene 0.01 m.

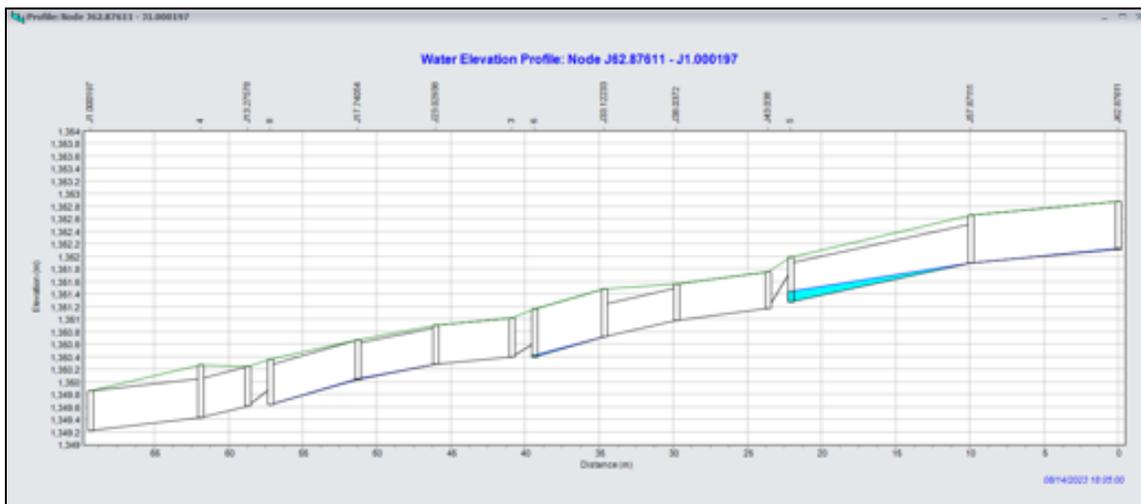


Ilustración 36. Resultados del primer y segundo vertedor ante el evento del 14 de agosto del 2023

Aportaciones de flujos al LID

En el lugar se pudo observar que la tubería que recolecta los flujos de la cuenca SCI-4 con un tirante menor a 1 cm.



Ilustración 37 Descarga del flujo de la tubería de 4 pulgadas al LID el 14 de agosto del 2023



Con respecto a la tubería de 6 pulgadas que transporta el flujo recolectado de la cuenca SC-



Ilustración 38. Descarga de la tubería de 6 pulgadas el 14 de agosto del 2023

El modelo hidráulico indica para la descarga proveniente de SC1-4 se tiene flujo de 0.02 m de altura con un gasto de 0.80 l/s cuando se presentó la lámina mayo de lluvia en el evento.

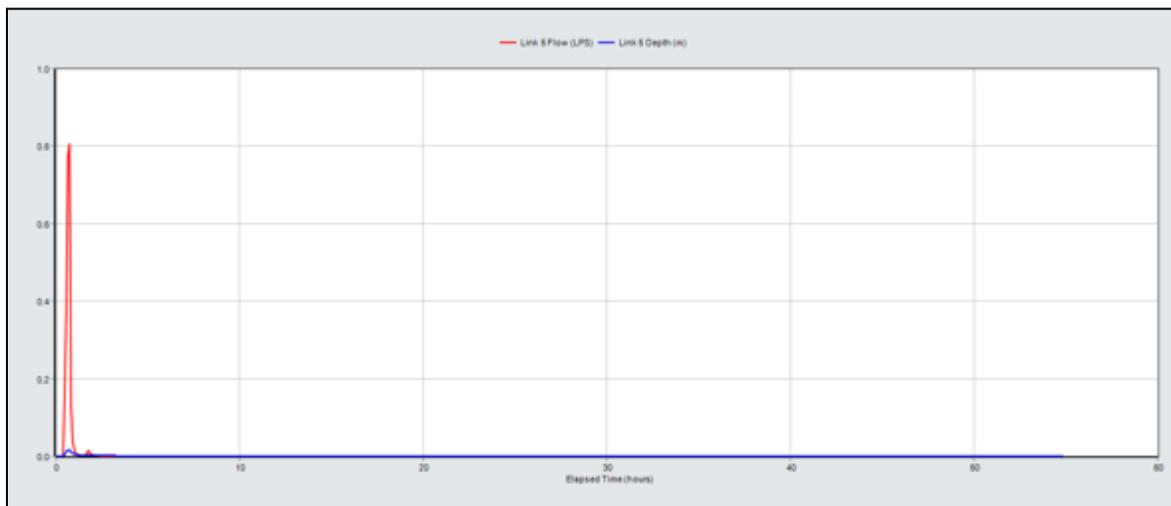


Ilustración 39. Tirantes y gasto en la tubería que descarga el flujo de la subcuenca SC1-4

Con respecto al flujo, lo que descarga la cuenca SC-2 en el valor pico es de 0.32 l/s que se presenta al tiempo de los valores máximos en el hietograma.

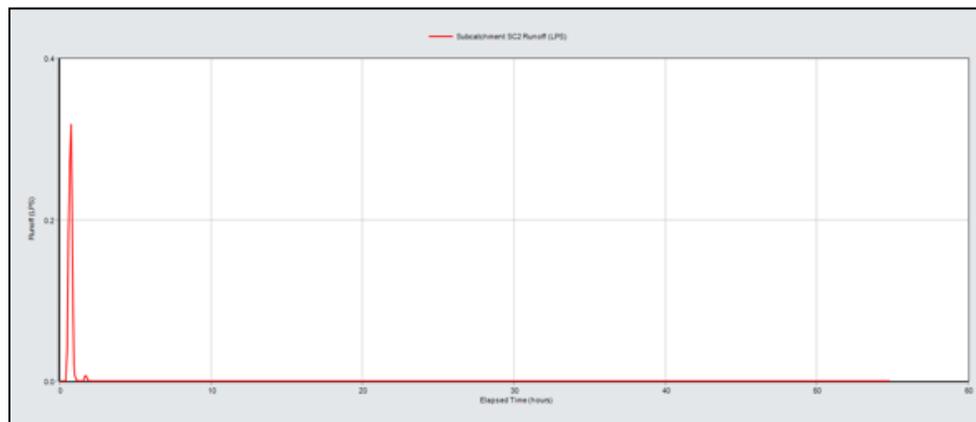


Ilustración 40. Gasto de descarga de la subcuenca SC-2

En resumen, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 25. Diferencia entre lo medido en campo y el modelo numérico

Lluvia	Pp total (mm)	En campo	Modelo	Error relativo
		H. Vertedor SC2 (cm)	H. Vertedor SC2 (cm)	SC2 (%)
04/08/2023	8.81	18	21	9.52
14/08/2023	6.63	15	18	11.11

El error relativo (ER) que se ha estipulado contempla una confianza del 85% lo que genera que los resultados obtenidos se encuentren dentro de una aceptación por lo que el modelo hidráulico se puede considerar calibrado y se utilizará para continuar los escenarios para diferentes periodos de retorno.

Como resumen de este apartado se puede notar la sensibilidad del primer vertedor ubicado en SC2 que genera la mayor retención de flujo en la cuenca por lo que se requiere para avenidas con mayor precipitación que se le dé un adecuado mantenimiento para su retención de volumen ideal.

Es importante señalar que por el momento no se tiene un sistema de monitoreo constante de parámetros dentro del LID (temperatura, precipitación, humedad relativa, evaporación que de acuerdo al IMTA (2020) su costo aproximado es de 71,174.70 pesos mexicanos (al valor de la moneda mexicana de noviembre del año 2020).

Por lo que será importante seguir registrando la información de otras lluvias en próximos años y observar la respuesta del LID.



Escenarios del jardín de lluvia con LID.

De acuerdo con los datos generados en capítulos previos del informe, se realizaron los estudios para poder establecer una duración más recurrente se retoma lo realizado por Ortiz B.V. (2023) donde indica que la duración es de 60 minutos.

Tabla 26. Hietogramas utilizados para los escenarios para diferentes periodos de retorno

Tiempo (hr)	2 años	5 años	10 años	20 años	50 años
0-10	4.2	5.5	6.4	7.2	8.2
10-20	6.7	8.9	10.3	11.6	13.3
20-30	8.8	11.6	13.4	15.1	17.3
30-40	4.9	6.5	7.5	8.5	9.7
40-50	3.4	4.5	5.2	5.9	6.7
50-60	2.7	3.5	4.1	4.6	5.3

Escenario para una lluvia vinculada a un periodo de retorno de 2 años

Tomado en cuenta las zonas con que cuenta el LID, se explicará la evolución de los hidrogramas para las subcuencas SC2, SC3 y SC4.

En la subcuenca SC2, se presenta un visible adelanto de 5 minutos en el tiempo pico al utilizarse el jardín de lluvia y una disminución en el valor pico decreciendo de 6.04 a 4.81 es decir una reducción cercana al 20% del valor pico de la avenida.

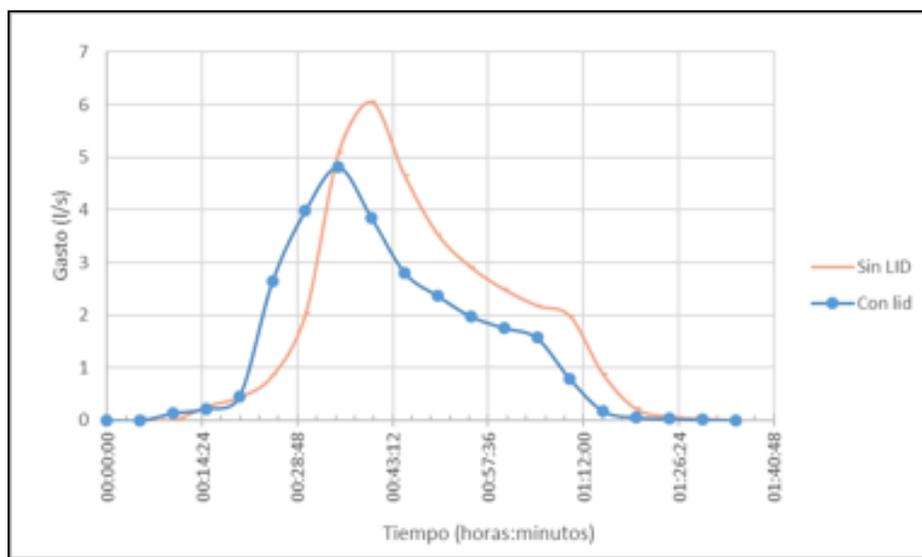


Ilustración 41. Comparación de los hidrogramas de la subcuenca SC2 con y sin LID



Con respecto a la reducción del volumen, éste pasa de 10.05 m³ a 8.27 m³ por lo tanto se estima una reducción del 20 % del volumen.

La subcuenca SC3: Esta subcuenca sufre una disminución de un valor cercano al 50 % del valor pico del hidrograma pasando de 1.93 a 1.08 l/s y teniendo un amortiguamiento visible del escurrimiento y pasando el tiempo pico un adelanto de 5 minutos.

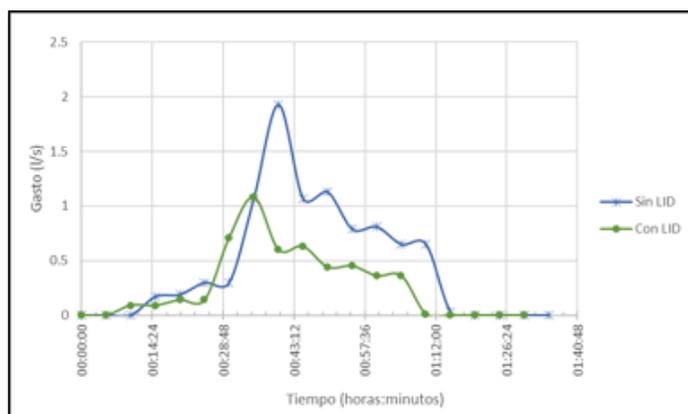


Ilustración 42. Comparación de hidrogramas de la subcuenca SC2 con y sin LID

Con respecto al volumen total del hidrograma decrece un 45 % con respecto al valor sin LID, pasando de 2.72 a 1.51 m³.

La subcuenca SC4, al igual que las otras subcuencas también presentan reducciones en los valores del hidrograma, en cuestión del valor pico sin LID es de 2.4 l/s y con Lid de 1.64 l/s, además que se aprecia una atenuación en todos los valores del hidrograma.

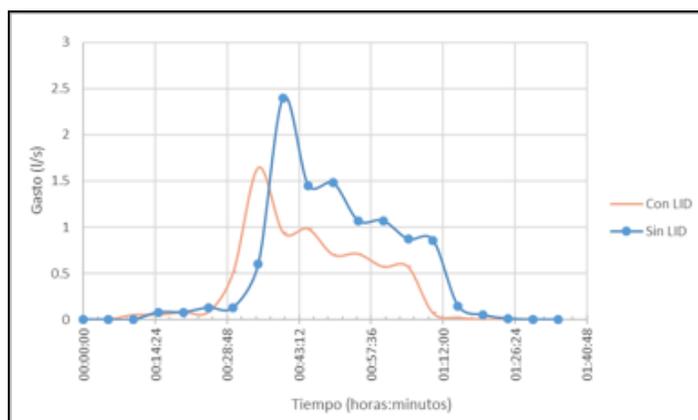


Ilustración 43. Comparación de los hidrogramas de la subcuenca SC4 con y sin LID

Y con respecto al volumen pasan de 3.11 m³ a 2.083 m³.

En resumen, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 27. Resumen del escenario de 2 años

Subcuenca	Tiempo pico (Hrs:min)		Gasto pico (l/s)		Volumen (m ³)	
	Con LID	Sin LID	Con LID	Sin LID	Con LID	Sin LID
SC2	00:35	00:40	4.81	6.04	8.27	10.05
SC3	00:35	00:40	1.08	1.93	1.51	2.72
SC4	00:35	00:40	1.64	2.4	2.08	3.12

Y con respecto a la salida del sistema de vertedores se tiene sin LID un valor de 18.567 m³ y con LID 15.77 m³, esto quiere decir que el sistema completo tiene una reducción del 15% en el volumen del escurrimiento que se presenta en el modelo hidráulico.

Escenario para una lluvia vinculada a un periodo de retorno 5 años

En subcuenca SC2 se analiza que los tiempos picos del escenario de 5 años con y sin LID se presenta el tiempo pico en el mismo intervalo, solo que el valor del gasto disminuye de 8.23 a 6.56, es decir una reducción del 20 en el valor pico del hidrograma.

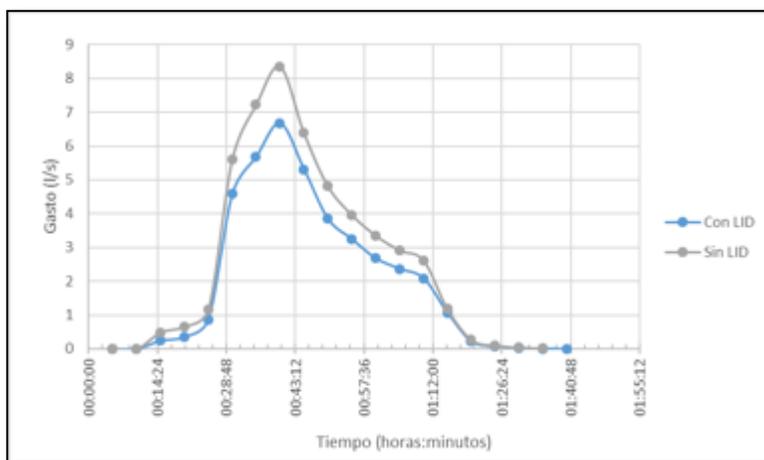


Ilustración 44. Comparación con y sin LID de la subcuenca SC2 para el periodo de retorno de 5 años

Con respecto al volumen se presenta una reducción de 14.42 a 11.52 m³, es decir un 20% en la reducción del volumen total del hidrograma que ayude a poder atenuar el hidrograma. Además, el vertedor 1 que se encuentra en SC2 con LID entra en funcionamiento con un valor pico de 12.98 l/s. Entonces, el vertedor 1 se encuentra sobrepasando el flujo después de sus 35 cm de altura.

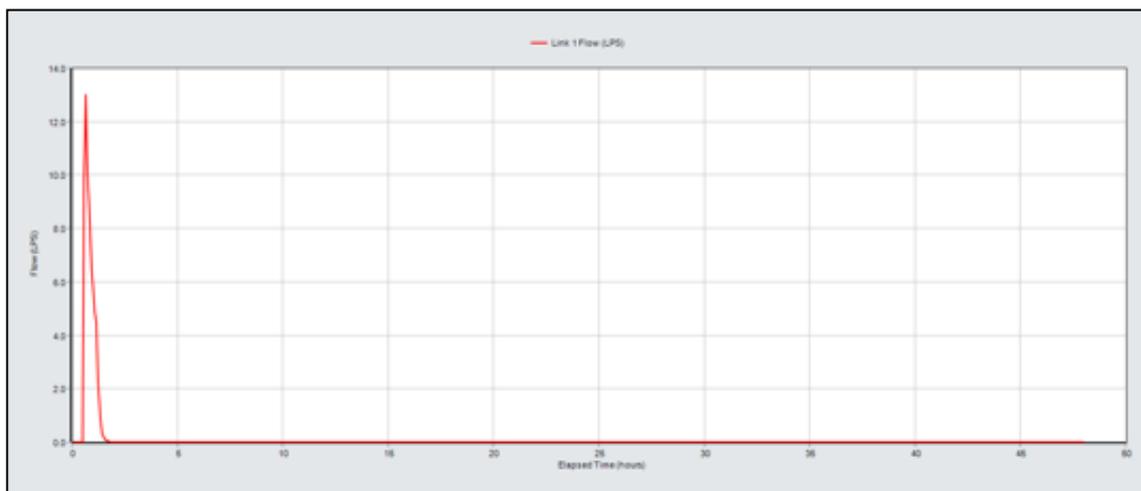


Ilustración 45. Flujo que pasa por el vertedor ubicado en SC2

Para la subcuenca SC3, se tiene el mismo valor del intervalo de tiempo en el que sucede el tiempo pico, aunque se presenta una reducción del valor del gasto considerable siendo un 45%.

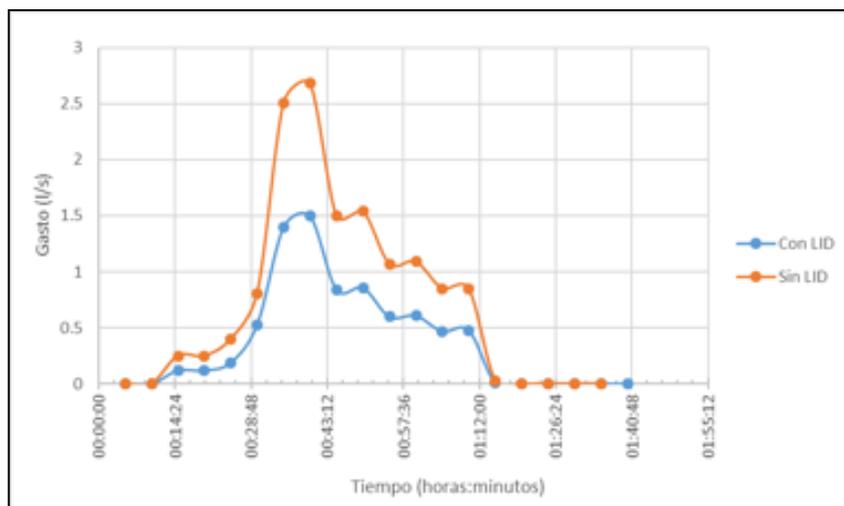


Ilustración 46. Comparación con y sin LID de la cuenca SC3 para un periodo de retorno de 5 años

Con respecto al volumen del hidrograma se tiene un valor de 4.11 m³ que fueron reducidos a 2.30 m³, es decir que también se presenta una reducción del 45%.

El vertedor 2, ubicado en SC3 presenta también funcionamiento con un gasto pico de 14.09 l/s y un tirante de 2 centímetros.



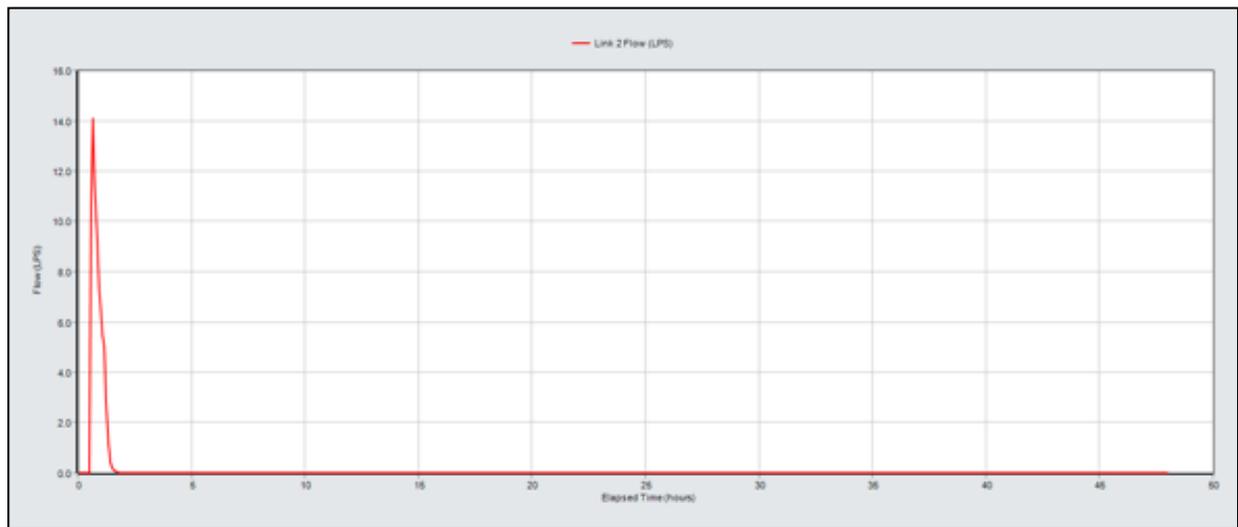


Ilustración 47. Funcionamiento del vertedor 2. ubicado en SC3

Para SC4, nuevamente con las anteriores subcuenas el intervalo en el que se presenta el tiempo pico es el mismo, donde se presenta una reducción significativa es en el valor del pico del hidrograma pasando de 3.52 a 2.33 l/s.

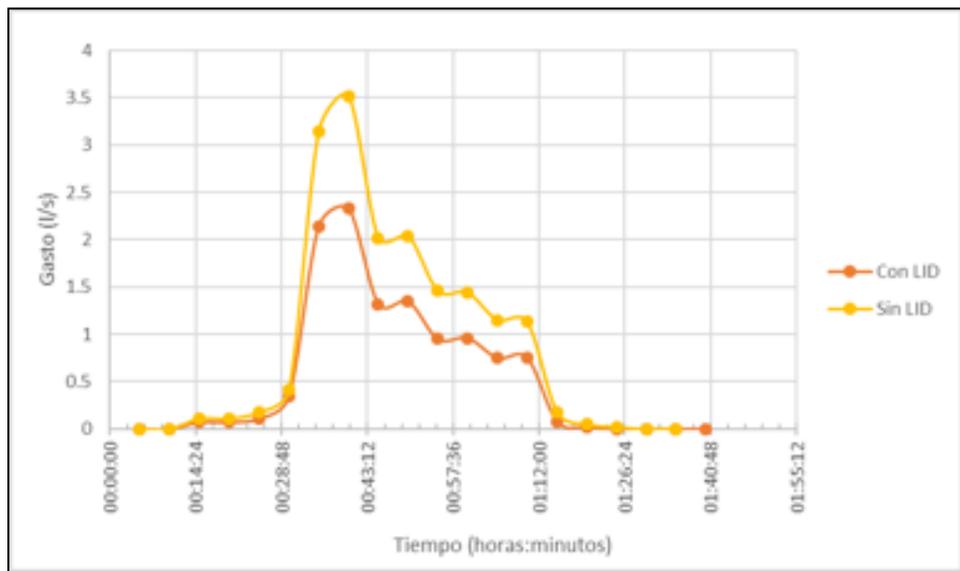


Ilustración 48. Comparativa de los hidrogramas con y sin LID de la subcuenca SC4 para un período de retorno de 5 años

El vertedor 3, ubicado en SC4 también entró en funcionamiento un tirante de 2 centímetros un tiempo pico de 15.88 l/s.



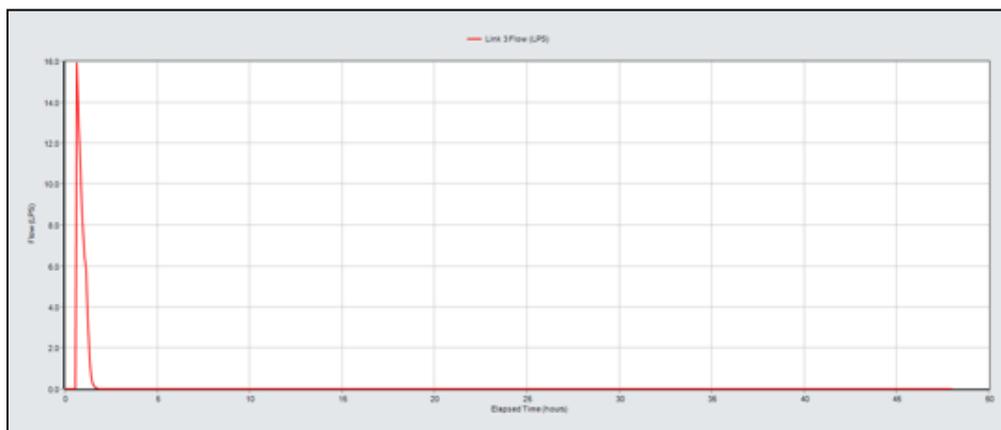


Ilustración 49. descarga del vertedor 3 ubicado en SC4

En resumen, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 28. Resumen del escenario de 5 años

Subcuenca	Tiempo pico (Hrs:min)		Gasto pico (l/s)		Volumen (m ³)	
	Con LID	Sin LID	Sin LID	Con LID	Sin LID	Con LID
SC2	00:35	00:40	8.23	6.55	14.42	11.52
SC3	00:35	00:40	2.68	1.50	4.11	2.30
SC4	00:35	00:40	3.52	2.33	5.07	3.36

Escenarios para una lluvia vinculada a un periodo de retorno 10, 20 y 50 años

Para los periodos de retorno de 10, 20 y 50 años se realizan tablas resumen de las condiciones en las que se encuentran los diferentes escenarios.

Tabla 29. Resumen del escenario de 10 años

Subcuenca	Tiempo pico (Hrs:min)		Gasto pico (l/s)		Volumen (m ³)	
	Con LID	Sin LID	Con LID	Sin LID	Con LID	Sin LID
SC2	00:35	00:35	7.62	9.60	14.19	17.52
SC3	00:35	00:35	1.77	3.16	2.87	5.19
SC4	00:35	00:35	2.76	4.16	4.306	6.47

Tabla 30. Resumen del escenario de 20 años

Subcuenca	Tiempo pico (Hrs:min)		Gasto pico (l/s)		Volumen (m ³)	
	Con LID	Sin LID	Con LID	Sin LID	Con LID	Sin LID
SC2	00:35	00:35	8.63	10.86	16.27	20.40
SC3	00:35	00:35	2.02	3.61	3.31	5.98
SC4	00:35	00:35	3.16	4.77	5.03	7.60

Tabla 31. Resumen del escenario de 50 años

Subcuenca	Tiempo pico (Hrs:min)		Gasto pico (l/s)		Volumen (m ³)	
	Con LID	Sin LID	Con LID	Sin LID	Con LID	Sin LID
SC2	00:30	00:30	9.93	12.50	18.78	23.67
SC3	00:30	00:30	2.34	4.17	4.12	7.34
SC4	00:30	00:30	3.66	5.53	6.13	9.19

7.9.1.1. Gráficas de comportamiento del LID

A continuación, se muestran los resultados obtenidos, considerando pendientes de 2, 4, 6,8 y 9 % en el sistema LID. Se analizaron 3 cuencas denominadas SC2, SC3 y SC4 las cuales tienen un área de aportación de 0.025, 0.015 y 0.02 Ha respectivamente. Para el análisis se está considerando una precipitación de 30.7 mm la cual se asocia al periodo de retorno de 2 años.



Ilustración 50. Subcuencas correspondientes al sistema LID

Relación pendiente-volumen

La subcuenca SC2 tiene un área de 0.025 Ha, con base en ello y considerando pendientes de 2,4,6,8 y 9%, en la ilustración 51 se muestra la relación de los volúmenes obtenidos a partir de las pendientes mencionadas.



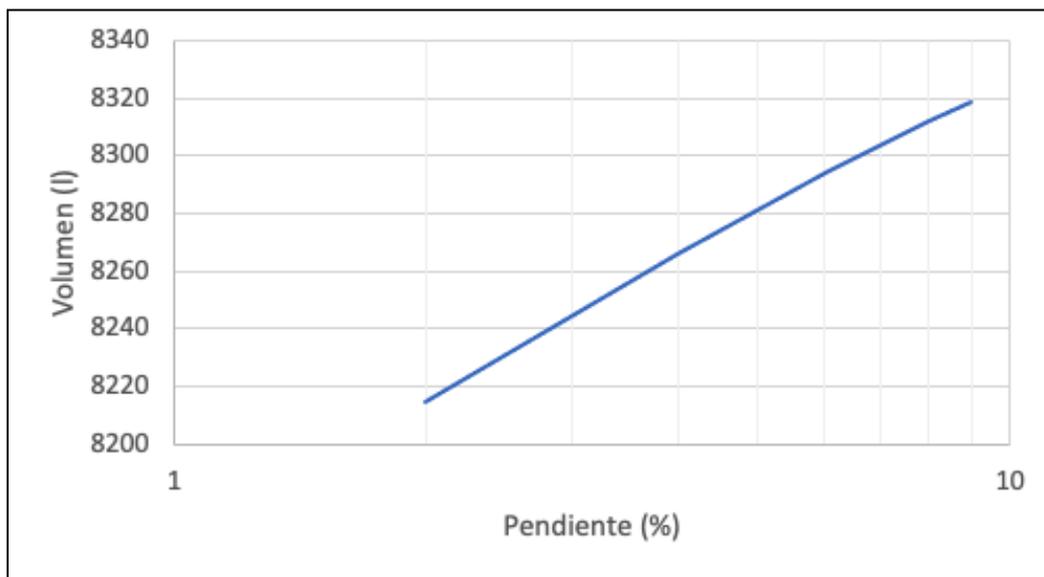


Ilustración 51. Relación pendiente-volumen en el sistema LID para la subcuenca SC2

La subcuenca SC3 tiene un área de 0.015 Ha, en la ilustración 52 se muestra la relación de los volúmenes y pendientes.

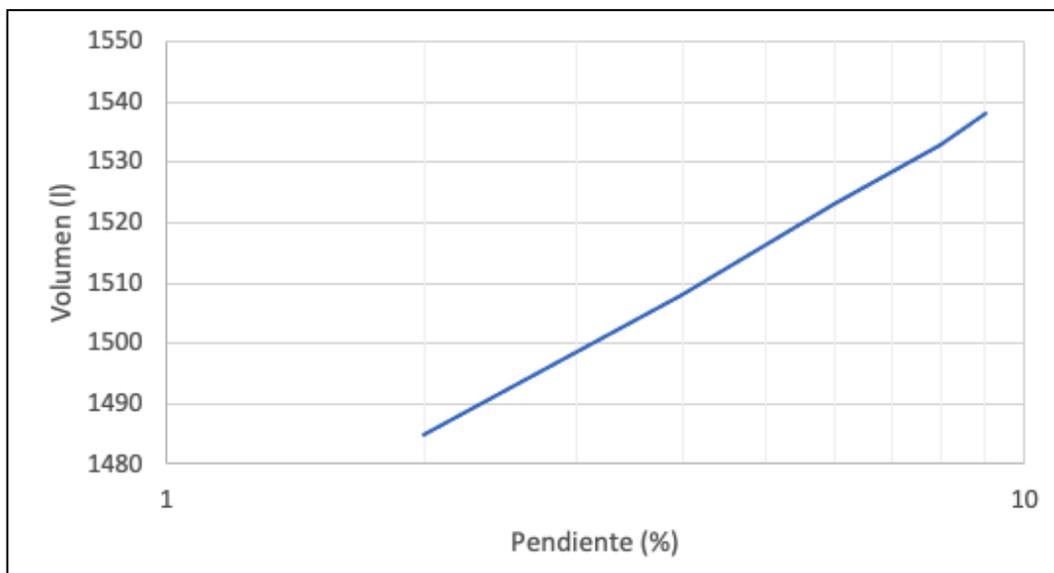


Ilustración 52. Relación pendiente-volumen en el sistema LID para la subcuenca SC3

En la subcuenca SC4, se está considerando un área de 0.015 Ha, la relación de los volúmenes y pendientes se muestra en la Ilustración **53**.



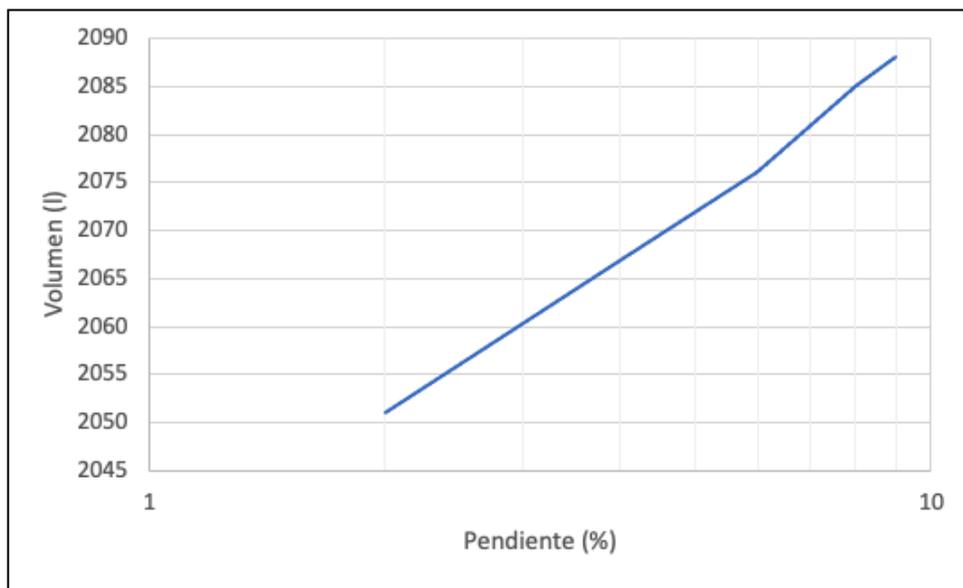


Ilustración 53. Relación pendiente-volumen en el sistema LID para la subcuenca SC4

Relación pendiente-gasto máximo

Como se observa, a partir del área de aportación considerada en cada subcuenca, existe un incremento del volumen a medida que se aumenta la pendiente. así mismo, se puede observar una leve variación del gasto máximo para la subcuenca SC4 (ver Ilustración 54), ubicada aguas debajo del sistema LID y la cual tiene un área de 0.02 Ha.

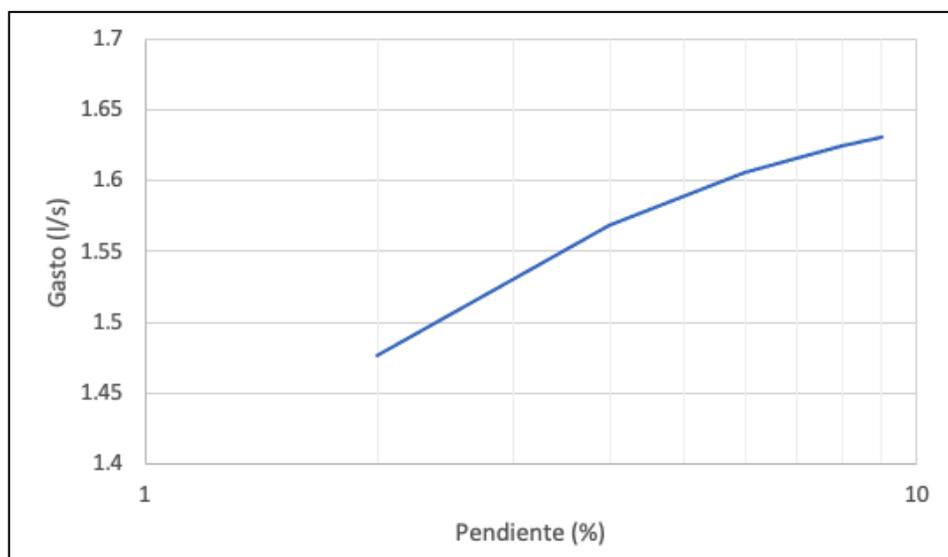


Ilustración 54. Relación gastos- pendientes en la subcuenca SC4



Relación pendiente-gasto máximo en vertedor

En el sistema LID, se cuenta con 3 vertedores tipo transversales. Su geometría de muestra en la ilustración 55.

Tabla 32. Geometría de los vertedores en el sistema LID

Nombre	Tipo	Altura (m)	Longitud (m)	Inlet Offset (m)
1	Transversal	0.22	3.26	0.35
2	Transversal	0.19	3.4	0.215
3	Transversal	0.16	4.62	0.255

Para la relación pendiente-gasto máximo en el vertedor, de las ilustraciones 55 a la 57 y se muestran los resultados obtenidos. De los gráficos obtenidos, se observa un incremento del gasto a medida que va aumentando la pendiente. Esto, de acuerdo con la geometría de cada vertedor analizado.

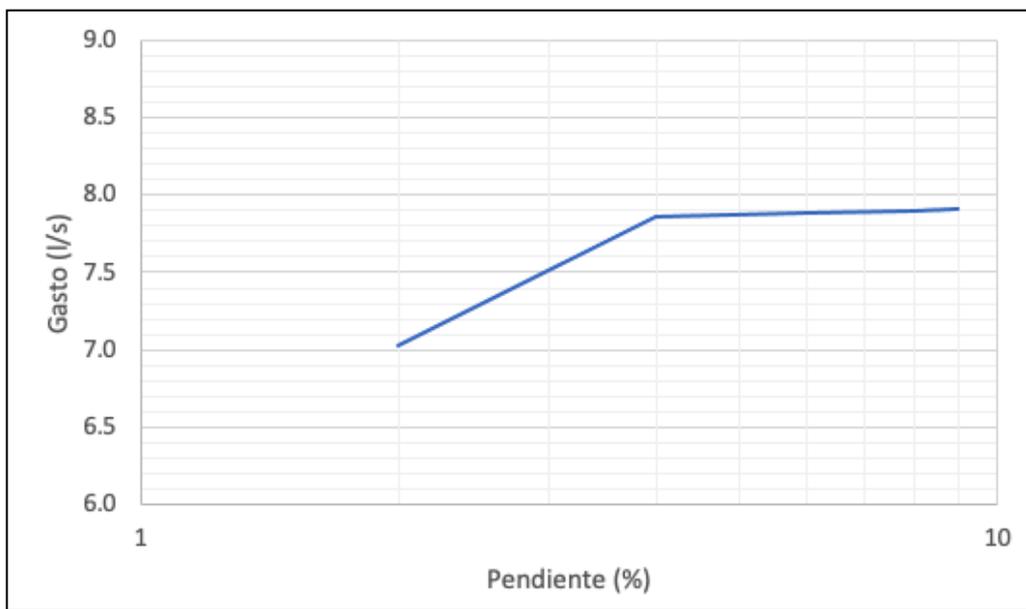


Ilustración 55. Relación pendiente-gasto máximo en el vertedor



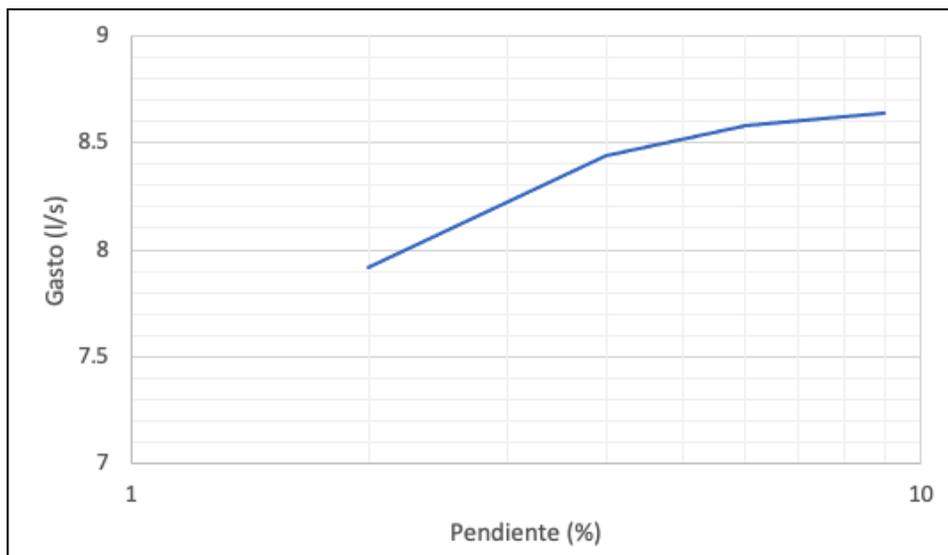


Ilustración 56. Relación pendiente-gasto máximo en el vertedor 2

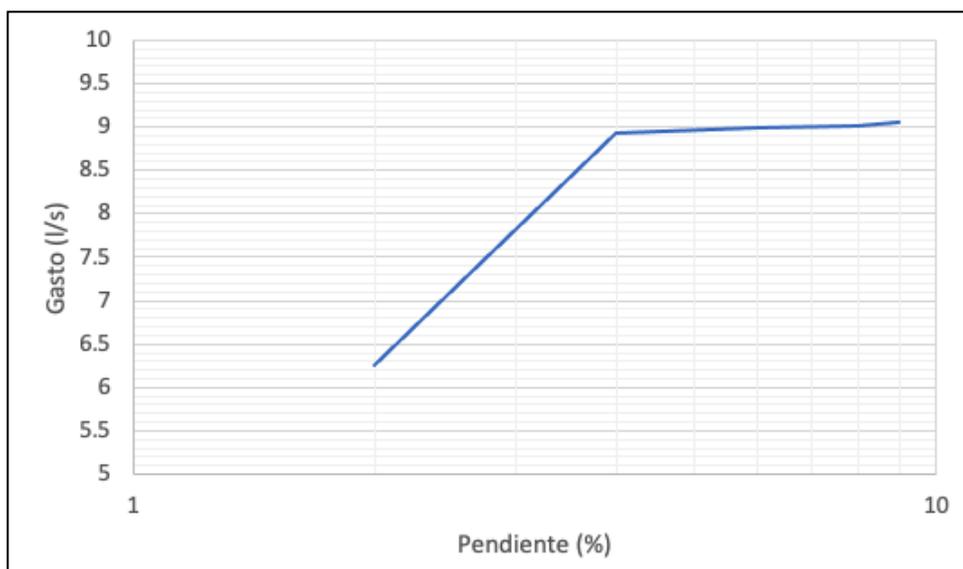


Ilustración 57. Relación pendiente-gasto máximo en el vertedor 3

Relación pendiente-volumen en el vertedor

La relación pendiente-volumen en los tres vertedores analizados, se muestra en las ilustraciones 58 a la 60. En los gráficos mostrados, se observa una disminución del volumen que transita en el vertedor a medida que la pendiente se va reduciendo.



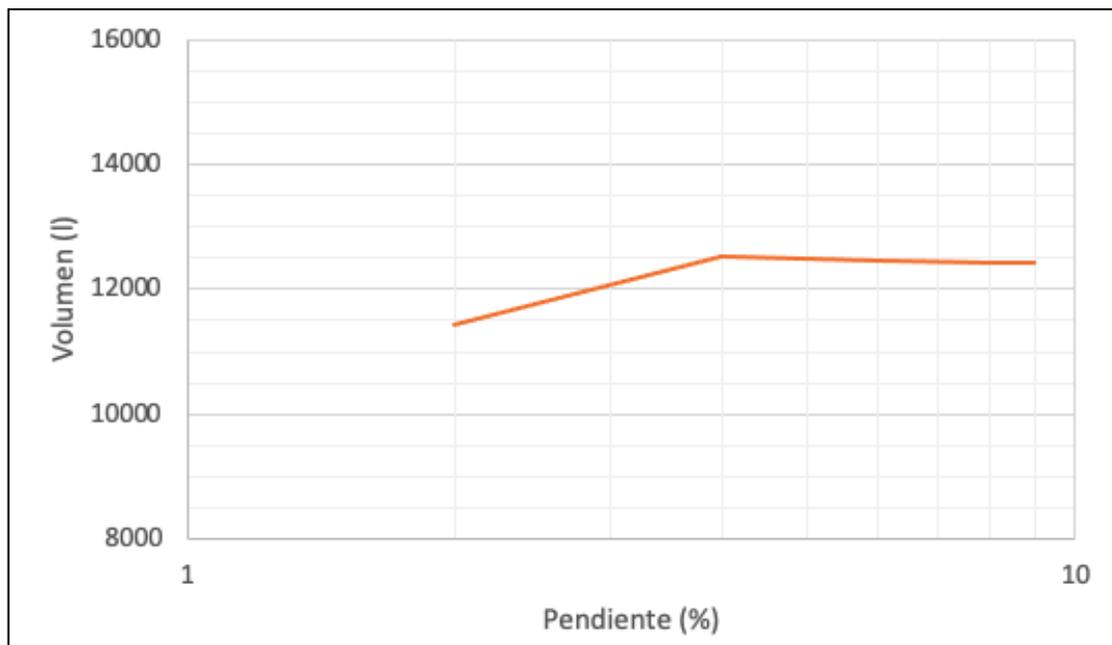


Ilustración 58. Relación pendiente (%)-volumen (l) en el vertedor 1

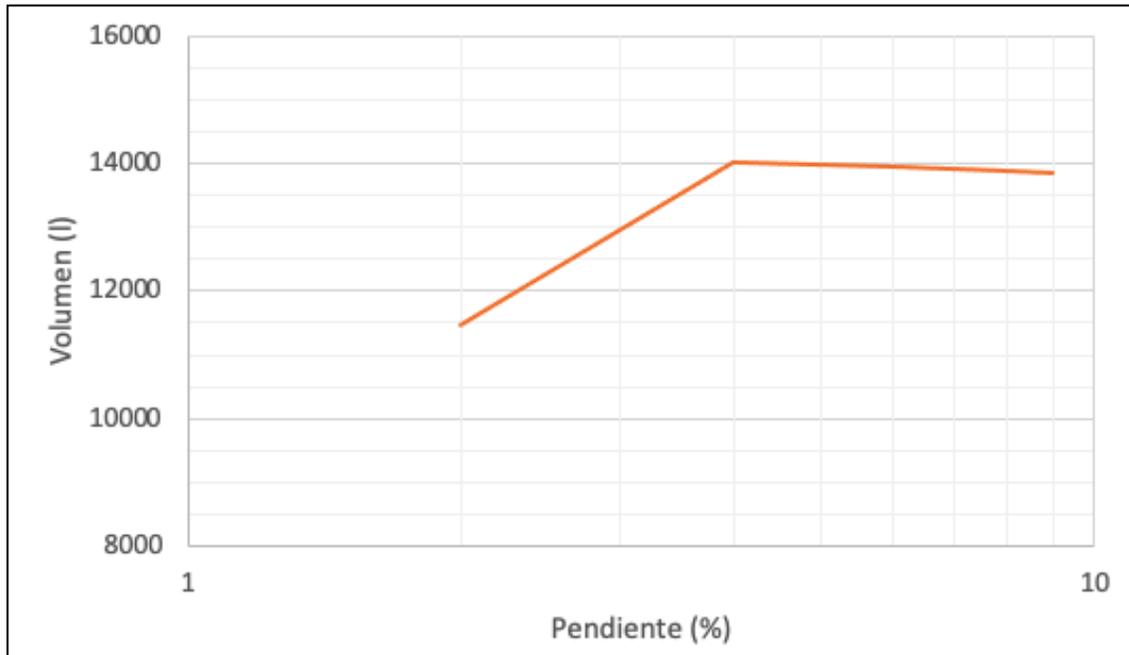


Ilustración 59. Relación pendiente (%)-volumen (l) en el vertedor 2



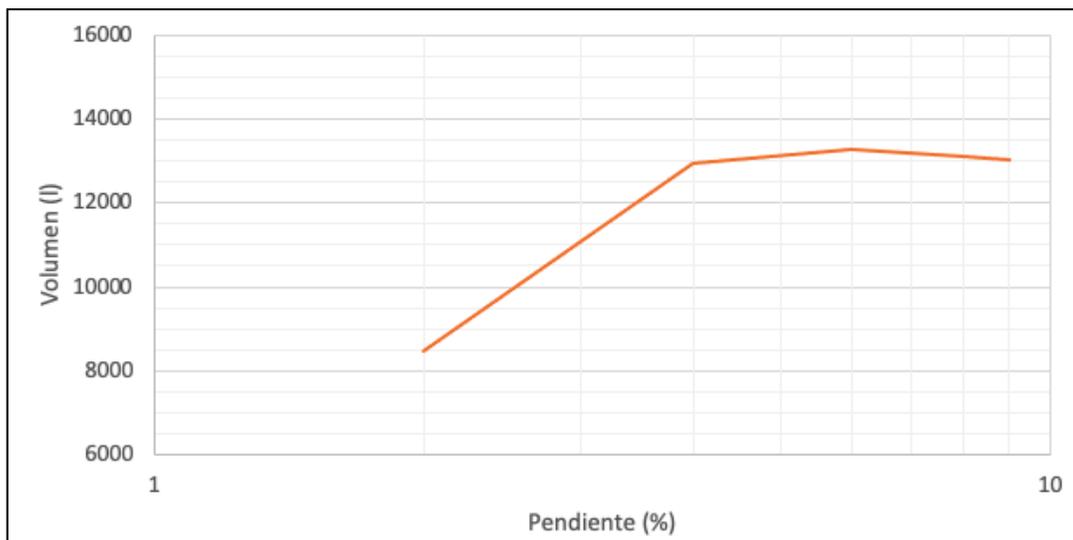


Ilustración 60. Relación pendiente (%)-volumen (l) en el vertedor 3

Del sistema LID considerado y de acuerdo con las características de los vertedores considerados, el funcionamiento de los 3 vertedores en el sistema para las pendientes de 2,4,6,8 y 9 % se muestran en la ilustración 61.

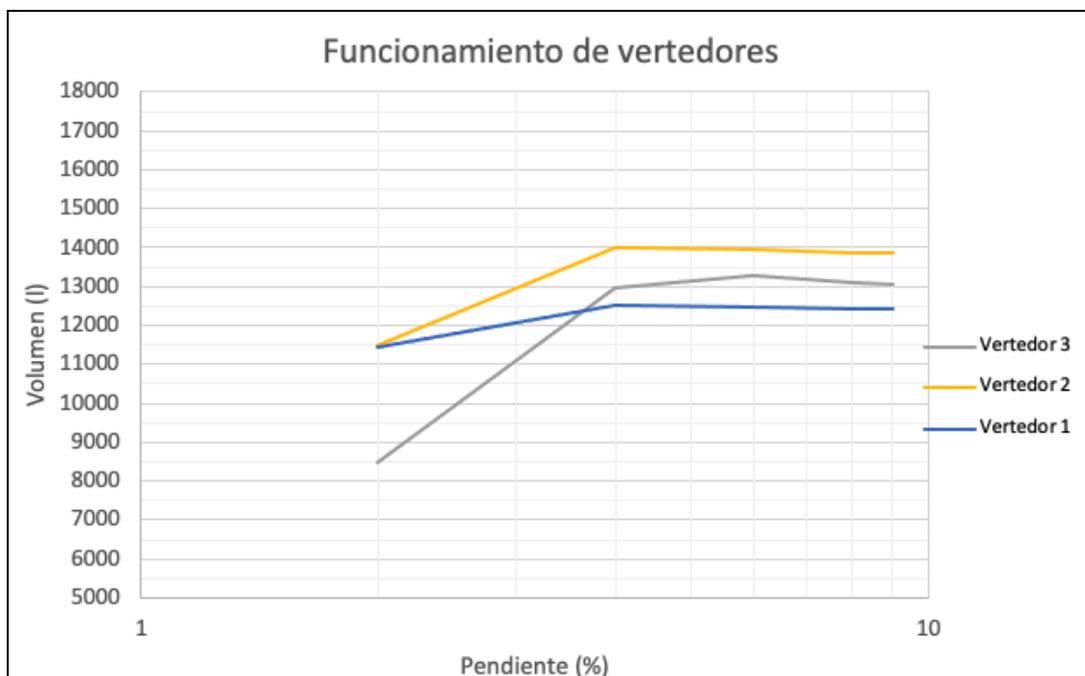


Ilustración 61. Relación pendiente (%)-volumen (l) de los vertedores en el sistema LID



8. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos con la realización de los dos componentes del proyecto (a) y (b), se destacan las siguientes conclusiones:

- 1) Para realizar investigación sobre comportamiento de vegetación en humedales artificiales, se ratifica que la escala de microcosmos es adecuada utilizando unidades experimentales como cajas de vinilo transparente, para evaluar los procesos que ocurren en estos sistemas y profundizar en el entendimiento de fenómenos específicos relacionados con sus componentes principales, como es en este caso la vegetación acuática vs vegetación exótica.
- 2) Una vez que la vegetación plantada en estos sistemas alcanzó su estado de madurez plena (aparición de frutos, espigas altura superior a dos metros) se ratificó la tendencia mostrada en el experimento del año 2022 de que el tratamiento plantado con la especie *Typha latifolia* fue más eficiente al eliminar los contaminantes fosfatos P-PO₄, amonio N-NH₄ y demanda química de oxígeno DQO en comparación con los demás tratamientos conteniendo las otras especies probadas, incluyendo la especie exótica del carrizo. El comportamiento de las especies en términos de eliminación de contaminantes de las aguas residuales fue el siguiente:

Typha latifolia > *Scirpus maritimus*+*Schoenoplectus americanus* > *Arundo donax* > *Juncus effusus*.

- 3) La mayor capacidad de depuración de contaminantes de las especies vegetales acuáticas, está muy vinculada a su desarrollo vegetativo y producción de biomasa ya que dicha situación propicia una mayor superficie de contacto en donde pueda crecer la biopelícula, así como mayor capacidad de absorción de los contaminantes que les sirven como alimento como el fosfato y el amonio.
- 4) Para un adecuado funcionamiento del sistema de jardín de lluvia la pendiente juega un papel importante, dado que se tiene una relación lineal entre el volumen y la pendiente de la subcuencas que cuentan con las técnicas LID. Con base en las fichas obtenidas se recomienda una pendiente del sistema del 4 al 6%.
- 5) Para periodos de retorno menores (2 y 5 años) se presentan reducciones en el tiempo pico cercanos al 20% y además se atenúa el hidrograma, con lo que se reduce el volumen en proporciones cercanas al tiempo pico, evidenciando la utilidad de estas obras de bajo impacto.
- 6) La instalación de un sistema de monitoreo continuo permitirá la recopilación de información que ayude a poder capturar información para ver el desempeño del jardín de lluvia para eventos más intensos. Además, es necesario contar con sensores de medición de gasto en las dos tuberías que descargan el flujo a la subcuenca SC2.



- 7) Para un mayor aumento en la reducción del escurrimiento e infiltración del jardín de lluvia, será más evidente cuando exista un cambio en el uso de suelo, es decir, de suelo impermeable a permeable.
- 8) Los resultados obtenidos con el modelo HEC RAS permiten establecer lo siguiente:
 - Se logró atenuar un volumen de 0.003 m^3 (3 litros);
 - El caudal pico se desplazó 10 minutos, y
 - El caudal pico se atenuó de $0.028 \text{ m}^3/\text{s}$ (28 litros/s) a $0.027 \text{ m}^3/\text{s}$ (27 litros/s), lo que representa una reducción de $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ (1 litros/s), equivalentes al 3.6%.

9. Bibliografía

Aparicio M, F. J. (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie. Cd de México: LIMUSA.

Arias O. (2004). *Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales contruidos de flujo subsuperficial* (tesina). Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.

Brisson J, Chazarenc F. (2009). Maximizing pollutant removal in constructed wetlands: should we pay more attention to macrophyte species selection? *Sci Total Environ.* 2009 Jun 15; 407(13):3923-30. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.05.047. Epub 2008 Jul 14. PMID: 18625516.

Fenoglio F. (2000). *Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedales artificiales* (tesis de licenciatura), Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Fuentes Mariles, Ó., & Franco, V. (1999). Estudio hidrológico para obras de protección. México: Instituto de Ingeniería. UNAM.

Gómez Martínez, J. F., & Diéguez Jiménez, I. F. (2020). Estudio hidrológico para determinar los gastos de entrada al sistema de canales del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos: IMTA.

González Correa, C., Mocva Kurek, R. K., Medina Mendoza, R., Téllez Quintana, C., Centeno Álvarez, J. C., López Zúñiga, A., & Llaguno Guilberto, O. J. (2022). Implementación en campo de un sistema LID en el IMTA. Jiutepec, Morelos: Proyecto interno, IMTA

Huerto, R.; Medina, R.; "Vegetación nativa, terrestre y acuática del estado de Morelos, y su integración en la infraestructura verde para la gestión hídrica", Estudio del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2020). Jiutepec, Morelos.



IMTA (2020) Análisis y evaluación de infraestructura verde para mitigación de inundaciones. Proyecto interno. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos.

Kadlec R. and Knight (1996). *Treatment wetlands*. Lewis Publishers, Boca Raton, New York, London, Tokyo.

Lara B., J.A., (1999). Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. Tesis para obtener el grado de Master en Ingeniería y Gestión Ambiental del Instituto Catalán de Tecnología, Universidad Politécnica de Cataluña. España.

Llaguno Guilberto O.J., Maldonado Silvestre J., Santos Tellez R.U., García Velarde M.E., Medina Mendoza R., Rodríguez Varela J.M., Ortíz Burciaga V. (2021) Diseño de LID para mitigación de inundaciones. Proyecto interno. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos

Maltais G. Maranger R. Brisson J. and Chazarenc F. (2009). Nitrogen Transformations and retention in planted and artificially aerated constructed wetlands. *Water Res.*, (43), 535-545.

Medina Mendoza R., Téllez Quintanar. Prince Flores J.E., Gómez Rojas, A., Peñaloza Rueda, X., Rivas Hernández A., Estrada Arriaga E.B., López Zúñiga A. (2022): "Evaluación del potencial depurativo de humedales artificiales con vegetación acuática nativa del Estado de Morelos. Proyecto interno. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Natural Resources Conservation Service. (2004). Hydrologic Soil-Cover Complexes Pennsylvania: United States Department of Agriculture

Ortiz V. (2023) Análisis y evaluación de infraestructura verde para la mitigación de inundaciones en zonas urbanas, tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México. CDMX, 2023

Pérez, López M.E. (2009). "Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango". Tesis Doctoral. Centro de Investigación de Materiales Avanzados, S.C., Durango, México.

Reyes Chávez, L., Escalante Sandoval, & Agustín, C. (2014). Hidrología Básica. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Rey-Valencia, D., & Zambrano, J. (2018). Estudio de la respuesta hidrológica en la cuenca urbana de montaña San Luis-Palogrande. UIS Ingenierías. Universidad Industrial de Santander, 17(1).

Shelef, O.; Gross, A.; Rachmilevitch, S. (2013) Role of Plants in a Constructed Wetland: Current and New Perspectives. *Water*, 5, 405-419. <https://doi.org/10.3390/w5020405>





Shuh-Ren Jing, Ying-Feng Lin, Tze-Wen Wang, and Der-Yuan Lee. (2002) Microcosm Wetlands for Wastewater Treatment with Different Hydraulic Loading Rates and Macrophytes. *Wetlands and Aquatic Processes*

Stefanakis, A., Akratos, C.S. and Tsihrintzis, V. A. (2014). *Vertical Flow Constructed Wetlands. Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment (1ra ed.)*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

Ven Te Chow, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. Estados Unidos de América: McGraw-Hill

Vymazal, J. (2011) Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia* 674, 133–156. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0738-9>





Anexo 1. Modelación en HEC RAS del Jardín-Microcuenca-LID en el IMTA

En el presente informe-anexo se llevó a cabo un análisis hidrológico, mediante el cual se estimaron los caudales de ingreso al jardín microcuenca derivado del análisis en este sitio. Posteriormente el caudal estimado se transitó por el jardín microcuenca, mediante el Modelo Digital de Elevaciones, elaborado por el mismo equipo de trabajo y descrito en la sección correspondiente, esto con la finalidad de examinar su capacidad hidráulica y así, llevar a cabo comentarios pertinentes al mismo.

El presente análisis hidrológico e hidráulico forma parte del desarrollo del proyecto ejecutivo para analizar los hallazgos pertinentes y contiene el desarrollo de las consideraciones referentes a las características particulares de la microcuenca en estudio, topografía y geometría de las condiciones actuales al año 2023. Así, el análisis hidrológico hidráulico, permite dar continuidad y complementariedad al mismo tema abordado en el proyecto “Implementación en campo de un sistema LID en el IMTA”, elaborado en el año 2022 en el mismo sitio.

Objetivo

El objetivo del análisis fue llevar a cabo una revisión hidrológica-hidráulica con los datos de lluvia hasta los registros del año 2023 y con la topografía actualizada; es decir la capacidad para amortiguar y atrasar el tiempo de respuesta del caudal asociado a períodos de retorno de 2, 5, 10, 20 y 50 años.

Los períodos descritos en el párrafo anterior fueron seleccionados debido a que en el año 2020 se llevó a cabo un “Estudio hidrológico para determinar los gastos de entrada al sistema de canales del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua” (Gómez Martínez & Diéguez Jiménez, 2020), estudio en el cual se calcularon los gastos que ingresan al sistema de los dos grandes canales fluviales que atraviesan el territorio del IMTA para dichos períodos de retorno y se continúa el análisis con la infraestructura dentro de las instalaciones del IMTA.

Como propósito principal fue el de llevar a cabo una modelación en la cual se incluyeran todos los ingresos al jardín-microcuenca-LID con la finalidad de analizar la regulación hidrológica de los escurrimientos que tiene el mismo, a través del modelo HEC-RAS bidimensional y poder tener parámetros de comparación con otros modelos 2D como iber u otros modelos semejantes.



Estudio hidrológico

En el presente análisis hidrológico se actualizó la información del reporte del proyecto “Implementación en campo de un sistema LID en el IMTA” (González Correa, y otros, 2022), al año más reciente con información medida en el IMTA al año 2023 y, se actualizaron los hidrogramas de entrada en dos sitios de aportación sumando el volumen producto de la captación de agua de lluvia en la zona de aportación, mismos datos, se detallarán en el presente informe-anexo.

Cuencas hidrográficas

La cuenca en estudio, correspondiente al jardín microcuenca dentro de las instalaciones del IMTA, cuyas coordenadas UTM, se presentan en la siguiente tabla.

Tabla A 1. Ubicación geográfica de las cuencas en estudio

Nombre	Coordenada, m (X) UTM	Coordenada, m (Y) UTM	Elevación (msnm)
Jardín microcuenca	483,385.63	2,087,812.85	1,350

Generalidades

De acuerdo con las coordenadas mostradas en la anterior tabla, el punto hacia donde drena la cuenca de estudio del jardín LID es del tipo endorreica, los escurrimientos de esta corresponden a las subcuencas. Las áreas de cada subcuenca se pueden visualizar en la tabla siguiente, con un total de 2,594.5 m².

Tabla A 2. Áreas de cada Subcuenca del LID, IMTA

ID	Subcuenca número	Área, m²
1	1.00	1563.64
2	2.00	148.149
3	3.00	208.779
4	4.00	190.162
5	5.00	483.77



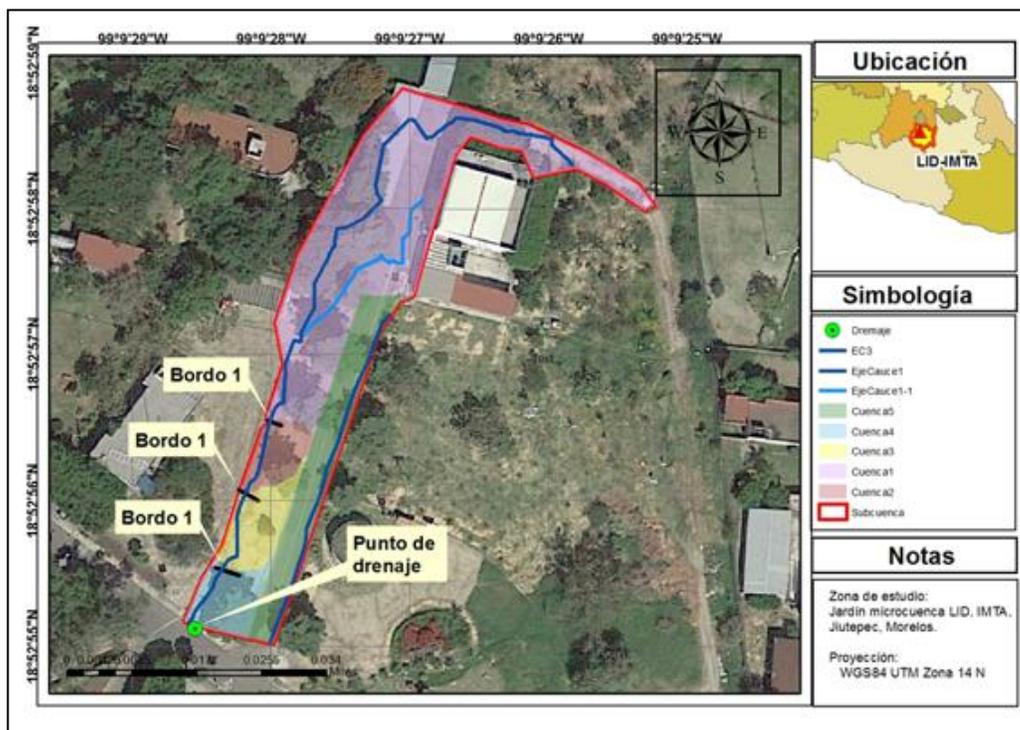


Ilustración A 1. Subcuencas del jardín microcuencia LID, IMTA

Las subcuencas de la figura anterior pertenecen a la Región Hidrológica número 18 “Balsas”.

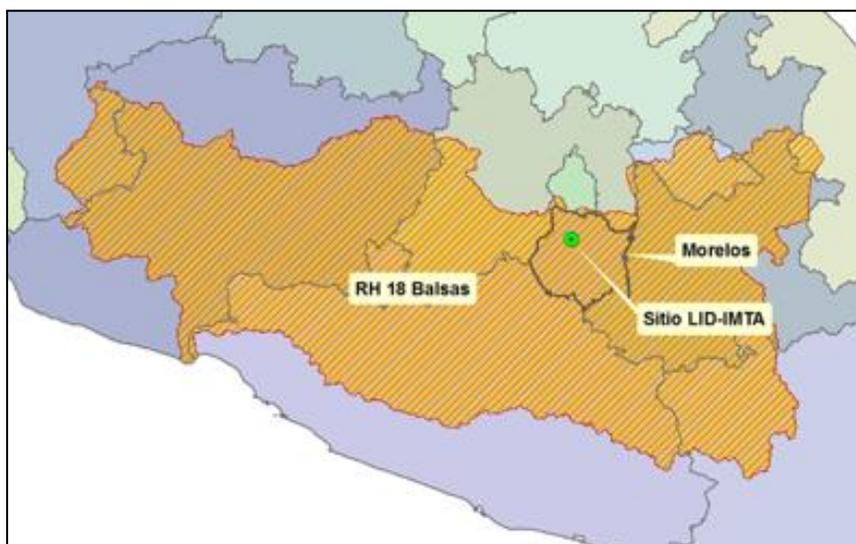


Ilustración A 2. Subregión hidrológica del estudio



Parámetros de la cuenca

En este apartado se muestran los resultados y fuentes de donde se obtuvieron los parámetros básicos de la cuenca como son: el área de aportación (A), longitud del cauce principal (Lc) y su pendiente promedio (Sc), tiempo de concentración o tiempo de respuesta de la cuenca (Tc) y determinación del número de escurrimiento (Nc).

Para el análisis hidrológico integral se realizó una división de la cuenca general en cinco (observar la ilustración 1), ya que se divide según la regulación de cada bordo y el límite de la banquetta, esto con la finalidad de delimitar los escurrimientos. Todas las subcuencas son reguladas mediante bordos de geotextiles y con la finalidad de almacenamiento y control de avenidas, el material y dimensiones de cada uno de los tres bordos quedó definido en el proyecto “Implementación en Campo de un Sistema LID en el IMTA” (González Correa, y otros, 2022).

Área

Para delimitar el área de la cuenca hasta el punto de interés se utilizaron programas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), asimismo se empleó el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) elaborado en el presente año y cuyo detalle se muestra en el apartado correspondiente.

Longitud del cauce principal

Con información del MDE se obtuvo las longitudes del cauce principal y los tributarios, con un valor de 168.06 m del cauce principal y 45.66 m del cauce secundario, tal cual se puede observar en la siguiente ilustración.

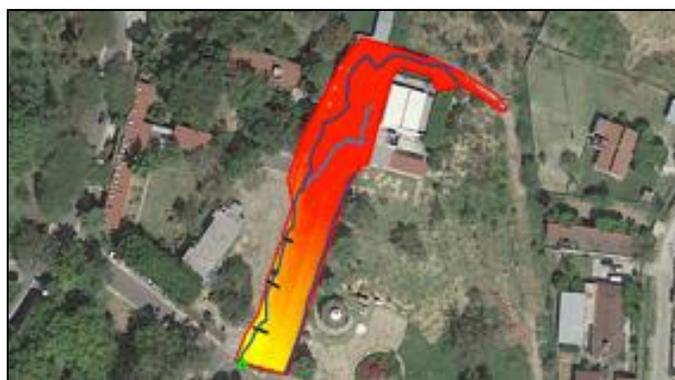


Ilustración A 3. Longitud de los cauces y MDE



Pendiente promedio del cauce

Para la obtención de la pendiente del cauce principal se emplearon tres métodos, el método de Pendiente Media, Pendiente Media Ponderada (método de las áreas compensadas) y Taylor-Schwarz, para éstos se consideró el Modelo Digital de Elevaciones MDE continuo con resolución de 5 centímetros, ver ilustración anterior.

Pendiente media o por desnivel

En general, la pendiente de un tramo de río se considera como el desnivel entre los extremos del tramo, dividido por la longitud horizontal de dicho tramo.

$$S = \frac{H}{L}$$

Ecuación 1

Donde:

S pendiente del cauce;

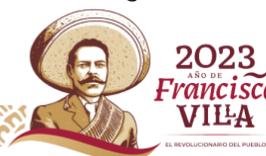
H desnivel entre los extremos del cauce, y

L Longitud horizontal del tramo del cauce.

En la siguiente tabla se observan los resultados

Tabla A 3. Pendiente media o por desnivel

TRAMO	CADENAMIENTO		LONGITUD	ELEVACIÓN		DESNIVEL
	INICIAL	FINAL	L _j	INICIAL	FINAL	
1	0	6	6	96.39	96.49	0.10
2	6	12	6	96.49	96.74	0.25
3	12	18	6	96.74	96.92	0.18
4	18	24	6	96.92	97.12	0.20
5	24	30	6	97.12	97.40	0.29
6	30	36	6	97.40	97.60	0.20
7	36	42	6	97.60	97.72	0.11
8	42	48	6	97.72	98.04	0.32
9	48	54	6	98.04	98.32	0.28
10	54	60	6	98.32	98.55	0.23
11	60	66	6	98.55	98.87	0.32
12	66	72	6	98.87	99.03	0.16
13	72	78	6	99.03	99.30	0.27





TRAMO	CADENAMIENTO		LONGITUD L _j	ELEVACIÓN		DESNIVEL
	INICIAL	FINAL		INICIAL	FINAL	
14	78	84	6	99.30	99.50	0.20
15	84	90	6	99.50	99.67	0.17
16	90	96	6	99.67	99.98	0.32
17	96	102	6	99.98	100.10	0.11
18	102	108	6	100.10	100.72	0.63
19	108	114	6	100.72	100.76	0.03
20	114	120	6	100.76	100.86	0.11
21	120	126	6	100.86	100.88	0.02
22	126	132	6	100.88	101.20	0.32
23	132	138	6	101.20	101.21	0.01
24	138	144	6	101.21	101.34	0.14
25	144	150	6	101.34	101.40	0.06
26	150	156	6	101.40	101.45	0.05
27	156	162	6	101.45	101.51	0.06
28	162	168	6	101.51	101.56	0.06

El resultado es:

$$S = \frac{H}{L} = \frac{5.174}{168} = 0.03079$$

Taylor-Schwarz

Este método considera que el río se forma de una serie de canales con pendiente uniforme, cuyo tiempo de concentración es igual al del río (Reyes Chávez, Escalante Sandoval, & Agustín, 2014).

Para el caso en que las longitudes de los tramos no sean iguales usar la siguiente ecuación.

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

Ecuación 2

Donde:





L_{CP} es la longitud del cauce principal;
 $l_i, i = 1, \dots, m$ = longitud de cada segmento;
 $S_i, i = 1, \dots, m$ pendiente de cada segmento i .

Los resultados se observan en la siguiente tabla:

Tabla A 4. Pendiente con el método de Taylor-Schwarz

Distancia	Elevación	Δx	Δy	$\Delta S = \Delta y / \Delta x$	$\Delta x / \sqrt{(\Delta S)}$
0	96.39	0.00			
6	96.49	6.00	0.10	0.02	46.48
12	96.74	6.00	0.25	0.04	29.45
18	96.92	6.00	0.18	0.03	34.93
24	97.12	6.00	0.20	0.03	32.95
30	97.40	6.00	0.29	0.05	27.53
36	97.60	6.00	0.20	0.03	32.54
42	97.72	6.00	0.11	0.02	43.34
48	98.04	6.00	0.32	0.05	25.82
54	98.32	6.00	0.28	0.05	27.87
60	98.55	6.00	0.23	0.04	30.85
66	98.87	6.00	0.32	0.05	26.06
72	99.03	6.00	0.16	0.03	36.63
78	99.30	6.00	0.27	0.05	28.23
84	99.50	6.00	0.20	0.03	32.95
90	99.67	6.00	0.17	0.03	35.75
96	99.98	6.00	0.32	0.05	26.10
102	100.10	6.00	0.11	0.02	43.53
108	100.72	6.00	0.63	0.10	18.58
114	100.76	6.00	0.03	0.01	78.56
120	100.86	6.00	0.11	0.02	45.14
126	100.88	6.00	0.02	0.00	116.19
132	101.20	6.00	0.32	0.05	25.94
138	101.21	6.00	0.01	0.00	189.74
144	101.34	6.00	0.14	0.02	40.00
150	101.40	6.00	0.06	0.01	61.03
156	101.45	6.00	0.05	0.01	67.08
162	101.51	6.00	0.06	0.01	61.03
168	101.56	6.00	0.06	0.01	61.03





Resultado:

$$S_{CP} = \left[\frac{168}{1325.31} \right]^2 = 0.0161$$

Pendiente media ponderada

Para la determinación de la Pendiente Media Ponderada del Cauce Principal, se determina el área debajo de la curva que define el perfil del cauce, esto se realiza utilizando el método de los trapecios.

Primero se determinan las alturas de cada segmento del perfil del cauce con la siguiente expresión:

$$\Delta y_i = h_i - h_{min}$$

Ecuación 3

Donde:

Δy_i es la altura del segmento $i = 1, \dots, n$

h_i es la elevación $i = 1, \dots, n$ del tramo del perfil del cauce.

h_{min} es la elevación mínima del perfil del cauce.

Se calculan las áreas por cada segmento obtenido con la siguiente expresión:

$$H_s = \frac{\sum_{i=1}^n At_i \cdot 2}{Lc}$$

Ecuación 4

Donde:

H_s es la altura del triángulo semejante.

Lc es la longitud del cauce principal.

Finalmente se calcula la pendiente media ponderada con la siguiente expresión.

$$S_{MP} = \frac{H_s}{Lc}$$

Ecuación 5

Donde:

S_{MP} es la pendiente media ponderada.



El resultado se puede observar a continuación.

Tabla A 5. Pendiente media ponderada (compensación por áreas)

Distancia	Elevación	Δh_i	ΔA_i
0	96.39	0.00	
6	96.49	0.10	0.30
12	96.74	0.35	1.35
18	96.92	0.53	2.63
24	97.12	0.72	3.75
30	97.40	1.01	5.21
36	97.60	1.21	6.67
42	97.72	1.33	7.63
48	98.04	1.65	8.95
54	98.32	1.93	10.75
60	98.55	2.16	12.27
66	98.87	2.48	13.90
72	99.03	2.64	15.34
78	99.30	2.91	16.64
84	99.50	3.11	18.05
90	99.67	3.28	19.15
96	99.98	3.59	20.61
102	100.10	3.71	21.90
108	100.72	4.33	24.12
114	100.76	4.37	26.10
120	100.86	4.47	26.53
126	100.88	4.49	26.89
132	101.20	4.81	27.90
138	101.21	4.82	28.88
144	101.34	4.95	29.31
150	101.40	5.01	29.89
156	101.45	5.06	30.20
162	101.51	5.12	30.52
168	101.56	5.17	30.87

$$H_s = \frac{30.87 \times 2}{168} = 5.91$$



$$S_{MP} = \frac{5.91}{168} = 0.035$$

Tabla A 6. Resumen del cálculo de la pendiente del cauce principal

Método de cálculo	Pendiente media del cauce principal (m/m)
Pendiente media	0.0308
Taylor-Schwarz	0.0161
Pendiente media ponderada	0.0352

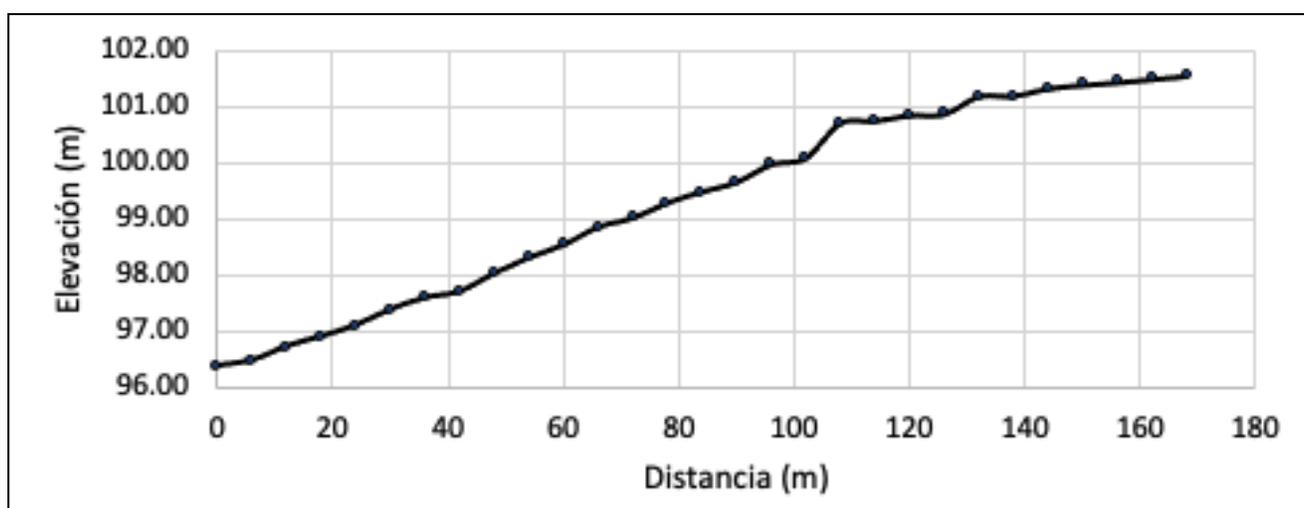


Ilustración A 4. Perfil geométrico del cauce principal

Tiempo de Concentración (Tc)

El tiempo de concentración asociado con cualquier tramo a analizar, se define como el tiempo que tarda una partícula de agua en viajar desde el punto más alejado de la cuenca, hasta el sitio de interés. De acuerdo con esta definición si se presenta una lluvia de intensidad constante, distribuida uniformemente en el área de aportación, al inicio del proceso solamente aportarán escurrimientos al tramo bajo análisis las zonas más cercanas a él, pero paulatinamente, el área de aportación se incrementará hasta que cuando la duración de la lluvia alcance el tiempo de concentración, contribuya toda el área, con un gasto igual al de diseño. Si la lluvia mantiene una duración mayor al de concentración, la descarga se mantendrá hasta que la lluvia cese.



En la práctica, es muy difícil calcular con precisión el tiempo que tarda el agua en escurrir por la superficie hasta llegar a los puntos de estudio; existen diversas expresiones que permiten estimar dicho tiempo, entre ellas destacan las de Rowe, Kirpich y SCS.

Ecuación de Rowe (Fuentes Mariles & Franco, 1999)

$$Tc = \left(\frac{0.87L^3}{D} \right)^{0.385}$$

Ecuación 6

Donde:

Tc: Tiempo de concentración, en horas.

D: Desnivel entre el punto más alejado y la salida de la cuenca, en metros

L: Longitud entre los puntos antes mencionados, en km.

Resultados:

$$Tc = \left(\frac{0.87(168)^3}{5.17} \right)^{0.385} = 0.064$$

Ecuación de Kirpich (Aparicio 1999)

$$Tc = 0.0003245 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77}$$

Ecuación 7

Donde:

Tc: Tiempo de concentración, en horas.

S: Pendiente media del cauce principal.

L: Longitud del cauce principal, en metros.

Resultados:

$$Tc = 0.0003245 \cdot \left(\frac{168}{\sqrt{0.0352}} \right)^{0.77} = 0.061$$

Ecuación del *Soil Conservation Service*





$$T_c = \left(\frac{L^{1.15}}{3085D^{0.38}} \right)$$

Ecuación 8

Donde:

- T_c : Tiempo de concentración, en h.
- L : Longitud del cauce principal, en m.
- D : Desnivel topográfico, en m.

Resultados:

$$T_c = \left(\frac{168^{1.15}}{3085(5.17)^{0.38}} \right) = 0.063$$

Para el cálculo del tiempo de concentración se utilizaron las fórmulas de Kirpich, Rowe y Servicio de conservación de Suelos (SCS). Para los cálculos correspondiente del tiempo de concentración (T_c) con las fórmulas propuestas se seleccionó el valor de la pendiente obtenida con el método de Pendiente media ponderada (Compensación por áreas), de lo cual se obtuvieron los valores que se muestran en la tabla 5. Enseguida se muestra un resumen de los tres métodos empleados:

Resumen del cálculo del tiempo de concentración

	Rowe	Kirpich	SCS
Tc (h)	0.064	0.061	0.063

Coefficiente de Escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento de una cuenca depende de las características y condiciones del suelo; a continuación, se menciona algunos de los procesos más importantes del ciclo hidrológico para reconocer la cantidad de factores involucrados en el C_e ; en principio, se tienen: intercepción, detención superficial, almacenamiento de la humedad en el suelo, escurrimiento superficial, infiltración, flujo subsuperficial, evapotranspiración y percolación.

La intercepción es el primer proceso que actúa redistribuyendo y modificando la precipitación sobre un área. La cantidad de precipitación que finalmente llega a la superficie del terreno depende en gran parte de la naturaleza y de la densidad de la



cubierta vegetal (si existe), o de las características de la cobertura artificial (casas, edificios, estacionamientos, carreteras con pavimentos, etc.).

La cobertura, natural o artificial, intercepta parte de la precipitación, deteniéndola temporalmente en su superficie, de donde se evapora para regresar a la atmósfera durante o después de la tormenta, o bien cae al terreno.

Otros factores que influyen en el coeficiente de escurrimiento son: intensidad de la lluvia, pendiente del terreno y proximidad del nivel freático; por todo lo anterior, debe seleccionarse con rigurosidad un coeficiente de escurrimiento razonable que logre representar los efectos integrados de todos estos factores.

Uno de los métodos para calcular el coeficiente de escurrimiento fue desarrollado por los hidrólogos del *U.S. Soil Conservation Service* (Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos) y es conocido como el “Método del número de curva” o “N” (valor relativo de escurrimiento directo que produce cada complejo hidrológico). Entre mayor sea el “N”, mayor será el volumen de escurrimiento de una tormenta en la cuenca. Por comodidad, los números de curva se tabulan en un rango de 0 a 100; para condiciones combinadas o especiales de la cuenca, los valores de “N” pueden ser “pesados” o estimados por interpolación (SARH, 1982, Maidment, 1993).

Número de Escurrimiento N

El número de escurrimiento N depende del uso, tipo y composición del suelo; así como, del tratamiento, pendiente y estado de humedad del terreno. En función de ellos y de la lluvia total se calcula la lluvia efectiva.

Para calcular el “N” (escurrimiento directo o lluvia en exceso) por este método, se necesitan datos de: uso del terreno, tratamiento o práctica, condición hidrológica y tipos de suelo. El uso del terreno se refiere a la cobertura de cualquier material (generalmente vegetal) que cubre el suelo y lo protege del impacto de la lluvia. El tratamiento tiene que ver con las diversas prácticas agrícolas usadas en los ranchos (surco, nivel, terraza).

La condición hidrológica indica el efecto que tienen en la infiltración y el escurrimiento, el tipo de cubierta y tratamiento; generalmente se estima de la densidad y cubierta de plantas.



Una condición hidrológica “buena” indica que el suelo favorece la infiltración, por lo que tiene un potencial bajo de escurrimiento; una condición “pobre” tiene baja infiltración, por lo que se incrementa el escurrimiento.

Los tipos de suelo a partir de los cuales se obtiene “N”, pueden ser 4 de acuerdo a la velocidad con que se infiltra el agua: A (alta), B (moderada), C (baja) y D (muy baja), tal como se muestra en la siguiente tabla, tomado de “Fundamentos de Hidrología de Superficie” (Aparicio Mijares, 1992).

Tabla A 7. Grupos hidrológicos de suelo

CN sin corrección	CN con corrección A	CN con corrección B
0	0	0
10	4	22
20	9	37
30	15	50
40	22	60
50	31	70
60	40	78
70	51	85
80	63	91
90	78	96
100	100	100

Para determinar el tipo de suelo es necesario apoyarse en las cartas edafológicas y la textura; además, para interpretar las unidades de los suelos presentadas en las cartas edafológicas del INEGI, es necesario consultar las claves de las unidades de suelos y su clasificación hidrológica enfocada a la determinación de N.

Para el cálculo del número de escurrimiento (N) se consideraron como referencia los valores N que se muestran en la tabla A.7 (tabla 9-1 del capítulo 9 “Hydrologic Soil-Cover Complexes” del *National Engineering Handbook* (Natural Resources Conservation Service, 2004)

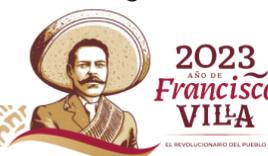




Tabla A 8. Promedio de número de curva para coberturas de suelo (tabla 1 de 2)

Table 9-1 Runoff curve numbers for agricultural lands ^{1/}				--CN for hydrologic soil group--			
covertype	Cover description treatment ^{2/}	hydrologic condition ^{3/}	A	B	C	D	
Fallow	Bare Soil	---	77	86	91	94	
	Crop residue cover (CR)	Poor	76	85	90	93	
		Good	74	83	88	90	
Row crops	Straight row (SR)	Poor	72	81	88	91	
		Good	67	78	85	89	
	SR + CR	Poor	71	80	87	90	
		Good	64	75	82	85	
	Contoured (C)	Poor	70	79	84	88	
		Good	65	75	82	85	
	C + CR	Poor	69	78	83	87	
		Good	64	74	81	85	
	Contoured & terraced (C & T)	Poor	66	74	80	82	
		Good	62	71	78	81	
C & T + CR	Poor	65	73	79	81		
	Good	61	70	77	80		
Small grain	SR	Poor	65	76	84	88	
		Good	63	75	83	87	
	SR + CR	Poor	64	75	83	86	
		Good	60	72	80	84	
	C	Poor	63	74	82	85	
		Good	61	73	81	84	
	C + CR	Poor	62	73	81	84	
		Good	60	72	80	83	
	C & T	Poor	61	72	79	82	
		Good	59	70	78	81	
C & T + CR	Poor	60	71	78	81		
	Good	58	69	77	80		
Close-seeded or broadcast legumes or rotation meadow	SR	Poor	66	77	85	89	
		Good	58	72	81	85	
	C	Poor	64	75	83	86	
		Good	55	69	78	83	
	C & T	Poor	63	73	80	83	
		Good	51	67	76	80	



Tabla A 9. Promedio de número de curva para coberturas de suelo (tabla 2 de 2)

Table 9-1 Runoff curve numbers for agricultural lands^{1/} — Continued

covertype	Cover description treatment ^{2/}	hydrologic condition ^{3/}	-- CN for hydrologic soil group --			
			A	B	C	D
Pasture, grassland, or range-continuous forage for grazing ^{4/}		Poor	68	79	86	89
		Fair	49	69	79	84
		Good	39	61	74	80
Meadow-continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay		Good	30	58	71	78
Brush-brush-forbs-grass mixture with brush the major element ^{5/}		Poor	48	67	77	83
		Fair	35	56	70	77
		Good	30 ^{6/}	48	65	73
Woods-grass combination (orchard or tree farm) ^{7/}		Poor	57	73	82	86
		Fair	43	65	76	82
		Good	32	58	72	79
Woods ^{8/}		Poor	45	66	77	83
		Fair	36	60	73	79
		Good	30	55	70	77
Farmstead—buildings, lanes, driveways, and surrounding lots		---	59	74	82	86
Roads (including right-of-way):						
Dirt		---	72	82	87	89
Gravel		---	76	85	89	91

- 1/ Average runoff condition, and $I_a=0.2s$.
- 2/ Crop residue cover applies only if residue is on at least 5 percent of the surface throughout the year.
- 3/ Hydrologic condition is based on combinations of factors that affect infiltration and runoff, including (a) density and canopy of vegetative areas, (b) amount of year-round cover, (c) amount of grass or close-seeded legumes, (d) percent of residue cover on the land surface (good $\geq 20\%$), and (e) degree of surface toughness.
 Poor: Factors impair infiltration and tend to increase runoff.
 Good: Factors encourage average and better than average infiltration and tend to decrease runoff.
 For conservation tillage poor hydrologic condition, 5 to 20 percent of the surface is covered with residue (less than 750 pounds per acre for row crops or 300 pounds per acre for small grain).
 For conservation tillage good hydrologic condition, more than 20 percent of the surface is covered with residue (greater than 750 pounds per acre for row crops or 300 pounds per acre for small grain).
- 4/ Poor: < 50% ground cover or heavily grazed with no mulch.
 Fair: 50 to 75% ground cover and not heavily grazed.
 Good: > 75% ground cover and lightly or only occasionally grazed.
- 5/ Poor: < 50% ground cover.
 Fair: 50 to 75% ground cover.
 Good: > 75% ground cover.
- 6/ If actual curve number is less than 30, use CN = 30 for runoff computation.
- 7/ CNs shown were computed for areas with 50 percent woods and 50 percent grass (pasture) cover. Other combinations of conditions may be computed from the CNs for woods and pasture.
- 8/ Poor: Forest litter, small trees, and brush are destroyed by heavy grazing or regular burning.
 Fair: Woods are grazed, but not burned, and some forest litter covers the soil.
 Good: Woods are protected from grazing, and litter and brush adequately cover the soil.





Con el apoyo de la cobertura edafológica desarrollada por el (INEGI) y al mapa desarrollado clasificado realizado por Hernández (2014) con base al Tr-55 (ver siguientes tablas).

Tabla A 10. Asignación del Número de Curva para los usos de suelo que se presenta en la República Mexicana y su correspondencia con el uso de suelo establecido en las tablas Tr-55 "Hidrología urbana para cuencas pequeñas" (tabla 1 de 3)

Clasificación INEGI	Uso de suelo TR-55	Tipo de vegetación INEGI (uso)	Condición Hidrológica	Número de Curva (NC) por grupo de suelo			
				A	B	C	D
Áreas forestales	Tierras Agrícolas: "Bosques"	Bosque de Oyamel	Pobre	45	66	77	83
		Bosque de Pino					
		Bosque de Pino-Encino					
		Bosque de Tascate					
		Bosque de Encino					
		Bosque cultivado					
		Bosque de Encino-Pino	Media	36	60	73	79
		Bosque Mesófilo de Montaña					
		Bosque de Mezquite					
		Selva mediana subperennifolia					
		Selva mediana perennifolia					
		Selva baja perennifolia					
		Selva alta subperennifolia	Buena	30	55	70	77
		Selva alta perennifolia					
		Selva mediana caducifolia					
		Selva baja caducifolia					
		Matorral subtropical					
		Selva mediana subcaducifolia					
Selva baja subcaducifolia							
Selva baja espinosa caducifolia							
Selva baja espinosa subperennifolia							
Mezquital tropical							
Palmar natural							





Tabla A 11. Asignación del Número de Curva para los usos de suelo que se presenta en la República Mexicana y su correspondencia con el uso de suelo establecido en las tablas Tr-55 "Hidrología urbana para cuencas pequeñas" (tabla 2 de 3)

Clasificación INEGI	Uso de suelo TR-55	Tipo de vegetación INEGI (uso)	Condición Hidrológica	Número de Curva (NC) por grupo de suelo			
				A	B	C	D
Matorral y Desiertos	Vegetación Árida y semiárida: "Arbusto o Matorral de desierto"	Chaparral	Pobre	63	77	85	88
		Matorral crasicaule					
		Matorral desértico micrófilo					
		Matorral desértico rosetófilo	Media	55	72	81	86
		Matorral espinoso tamaulipeco					
		Matorral rosetófilo costero					
		Matorral sarcocaula					
		Matorral sarco-crasicaule	Buena	49	68	79	84
		Matorral sarco-crasicaule de neblina					
	Matorral submontano						
Mezquital desértico	Vegetación Árida y semiárida: "Vegetación Herbácea"	Pobre	63 ¹	80	87	93	
Vegetación de desiertos arenosos		Media	55 ¹	71	81	89	
Vegetación de dunas costeras		Buena	49 ¹	62	74	85	
Vegetación gipsófila							
Vegetación halófila	Pastizales	Tierras Agrícolas: "Pastos y Praderas"	Pobre	68	79	86	89
Vegetación halófila xerófila			Media	49	69	79	84
Pastizal gipsófilo	Buena		39	61	74	80	
Pastizal halófilo							
Pastizal natural	Protegidos del pastoreo ²		30	58	71	78	
Pradera de alta montaña	Protegidos del pastoreo		30	58	71	78	
Sabana							
Pastizal cultivado	Pobre	45	66	77	83		
Vegetación Inducida	Tierras Agrícolas: "Bosques"	Bosque inducido	Media	36	60	73	79
		Palmar inducido	Buena	30	55	70	77
		Pastizal inducido	Pobre	68	79	86	89
	Tierras Agrícolas: "Pastos y Praderas"	Sabanoide	Media	49	69	79	84
			Buena	39	61	74	80
			Buena	39	61	74	80

¹ La tabla del TR-55 no considera un NC para un suelo del grupo A, en este caso se asignará los NC de arbustos y matorral de desiertos

² Los pastizales con desarrollo de la vegetación PRIMARIO no requieren condición hidrológica y se asignan con los valores de NC correspondientes pastizal protegido, como se marca en la metodología.

Tabla A 12. Asignación del Número de Curva para los usos de suelo que se presenta en la República Mexicana y su correspondencia con el uso de suelo establecido en las tablas Tr-55 "Hidrología urbana para cuencas pequeñas" (tabla 3 de 3)

Clasificación INEGI	Uso de suelo TR-55	Tipo de vegetación INEGI (uso)	Condición Hidrológica	Número de Curva (NC) por grupo de suelo			
				A	B	C	D
Vegetación Hidrófila y cuerpos de agua	"Área impermeable o cuerpo de agua"	Bosque de galería Selva de galería Vegetación de galería Tular Popal Vegetación de petén Vegetación halófila hidrófila Manglar Cuerpo de agua	N/A	98			
Cultivos	Tierras agrícolas cultivadas (cultivo en fila)	Agricultura de riego	Pobre	69	78	84	87
			Buena	64	74	81	84
	Tierras agrícolas cultivadas (granos pequeños)	Agricultura de temporal	Pobre	63	74	81	84
			Buena	60	72	80	83
	"Área impermeable o cuerpo de agua"	Agricultura de humedad Acuicola	N/A	98			
Zonas Urbanas	Áreas urbanas "Espacios abiertos"	Zona urbana Localidad Asentamientos humanos	N/A	52	70	80	84
Desprovisto de vegetación	Tierras Agrícolas: "Brush"	Desprovisto de vegetación	Pobre	48	67	77	83
Sin vegetación aparente	Áreas Urbanas del desierto occidental: "Desierto Natural"	Sin vegetación aparente (incluye vegetación efímera de desierto)	N/A	63	77	85	88

Donde:
N/A = No Aplica

Con base en la carta de uso de suelo la cual fue obtenida de la *Commission for Environmental Cooperation* (CCRS, 2017), carta edafológica y de cobertura del INEGI (ver siguientes ilustraciones); se determinó la cobertura del número de escurrimiento para la cuenca de estudio.



Ilustración A 5. Carta de edafología del INEGI (AH. Asentamientos humanos)



Ilustración A 6. Carta de edafología del INEGI (ZU. Zona Urbana)





Según la siguiente tabla resumen, y de acuerdo a las ilustraciones anteriores, se obtiene el número de curva ponderado de 79 para la cuenca de estudio.

Tabla A 13. Número de curva según tipo de suelo

1	Andosol umbrico	B	BOSQUE DE CONÍFERAS
2	Andosol umbrico	B	BOSQUE DE CONÍFERAS
3	Andosol umbrico	B	AGRÍCOLA-PECUARIA-FORESTAL
4	Phaeozem luvico leptico	C	AGRÍCOLA-PECUARIA-FORESTAL
5	Phaeozem luvico leptico	C	AGRÍCOLA-PECUARIA-FORESTAL
6	Zona Urbana	NA	ZONA URBANA
7	Zona Urbana	NA	ZONA URBANA
8	Andosol umbrico	B	BOSQUE DE CONÍFERAS
9	Andosol umbrico	B	BOSQUE DE CONÍFERAS
10	Andosol umbrico leptico	B	AGRÍCOLA-PECUARIA-FORESTAL
11	Andosol umbrico leptico	B	AGRÍCOLA-PECUARIA-FORESTAL
12	Andosol umbrico	B	AGRÍCOLA-PECUARIA-FORESTAL

También se obtuvo la diferencia máxima potencial entre la lluvia captada y la escorrentía generada, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$S = \frac{25.40}{N} - 254 = 67.52$$

Eventos climatológicos extraordinarios

De acuerdo a datos de la estación climatológica y la estación pluviográfica del IMTA (posteriormente se llevará a cabo una descripción de la recopilación y análisis de la información), la máxima tormenta del presente año se registró con una duración de las 06:20 horas del día 5 de agosto a las 05:50 horas del 6 de agosto, tal como se muestra en la siguiente tabla e ilustración.

Tabla A 14. Tormenta máxima en el año 2023

ID	Fecha	Hora	Precipitación (mm)	ID	Fecha	Hora	Precipitación (mm)
1	05/08/2023	06:20:00 p. m.	0.80	36	06/08/2023	12:10:00 a. m.	0.00
2	05/08/2023	06:30:00 p. m.	1.80	37	06/08/2023	12:20:00 a. m.	0.00
3	05/08/2023	06:40:00 p. m.	7.52	38	06/08/2023	12:30:00 a. m.	0.00
4	05/08/2023	06:50:00 p. m.	8.32	39	06/08/2023	12:40:00 a. m.	0.00
5	05/08/2023	07:00:00 p. m.	5.61	40	06/08/2023	12:50:00 a. m.	0.00



ID	Fecha	Hora	Precipitación (mm)	ID	Fecha	Hora	Precipitación (mm)
6	05/08/2023	07:10:00 p. m.	2.61	41	06/08/2023	01:00:00 a. m.	0.00
7	05/08/2023	07:20:00 p. m.	1.40	42	06/08/2023	01:10:00 a. m.	0.30
8	05/08/2023	07:30:00 p. m.	0.80	43	06/08/2023	01:20:00 a. m.	0.50
9	05/08/2023	07:40:00 p. m.	0.40	44	06/08/2023	01:30:00 a. m.	0.20
10	05/08/2023	07:50:00 p. m.	0.50	45	06/08/2023	01:40:00 a. m.	0.10
11	05/08/2023	08:00:00 p. m.	0.70	46	06/08/2023	01:50:00 a. m.	0.10
12	05/08/2023	08:10:00 p. m.	0.90	47	06/08/2023	02:00:00 a. m.	0.20
13	05/08/2023	08:20:00 p. m.	1.10	48	06/08/2023	02:10:00 a. m.	0.30
14	05/08/2023	08:30:00 p. m.	0.80	49	06/08/2023	02:20:00 a. m.	0.20
15	05/08/2023	08:40:00 p. m.	0.60	50	06/08/2023	02:30:00 a. m.	0.10
16	05/08/2023	08:50:00 p. m.	0.30	51	06/08/2023	02:40:00 a. m.	0.10
17	05/08/2023	09:00:00 p. m.	0.10	52	06/08/2023	02:50:00 a. m.	0.10
18	05/08/2023	09:10:00 p. m.	0.10	53	06/08/2023	03:00:00 a. m.	0.10
19	05/08/2023	09:20:00 p. m.	0.00	54	06/08/2023	03:10:00 a. m.	0.00
20	05/08/2023	09:30:00 p. m.	0.00	55	06/08/2023	03:20:00 a. m.	0.00
21	05/08/2023	09:40:00 p. m.	0.00	56	06/08/2023	03:30:00 a. m.	0.10
22	05/08/2023	09:50:00 p. m.	0.00	57	06/08/2023	03:40:00 a. m.	0.00
23	05/08/2023	10:00:00 p. m.	0.00	58	06/08/2023	03:50:00 a. m.	0.00
24	05/08/2023	10:10:00 p. m.	0.00	59	06/08/2023	04:00:00 a. m.	0.20
25	05/08/2023	10:20:00 p. m.	0.00	60	06/08/2023	04:10:00 a. m.	0.10
26	05/08/2023	10:30:00 p. m.	0.00	61	06/08/2023	04:20:00 a. m.	0.00
27	05/08/2023	10:40:00 p. m.	0.00	62	06/08/2023	04:30:00 a. m.	0.10
28	05/08/2023	10:50:00 p. m.	0.00	63	06/08/2023	04:40:00 a. m.	0.30
29	05/08/2023	11:00:00 p. m.	0.00	64	06/08/2023	04:50:00 a. m.	0.10
30	05/08/2023	11:10:00 p. m.	0.00	65	06/08/2023	05:00:00 a. m.	0.20
31	05/08/2023	11:20:00 p. m.	0.00	66	06/08/2023	05:10:00 a. m.	0.10
32	05/08/2023	11:30:00 p. m.	0.00	67	06/08/2023	05:20:00 a. m.	0.10
33	05/08/2023	11:40:00 p. m.	0.00	68	06/08/2023	05:30:00 a. m.	0.00
34	05/08/2023	11:50:00 p. m.	0.00	69	06/08/2023	05:40:00 a. m.	0.00
35	06/08/2023	12:00:00 a. m.	0.00	70	06/08/2023	05:50:00 a. m.	0.10



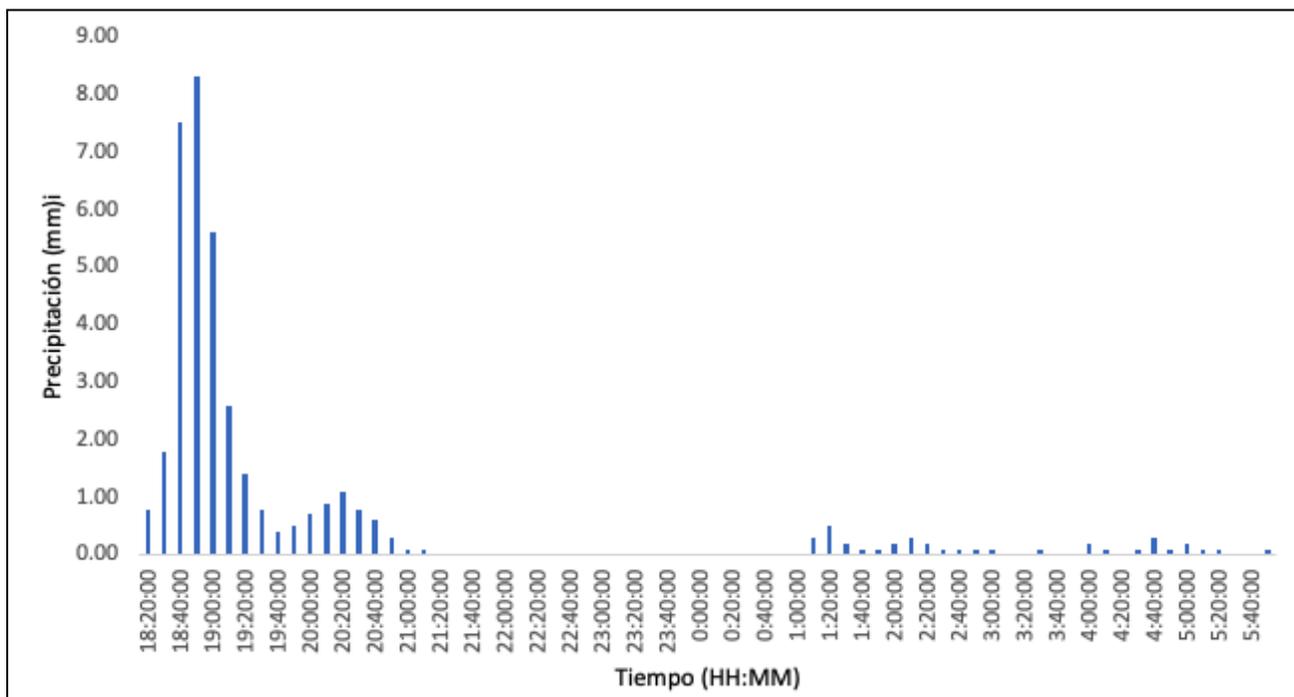


Ilustración A 7. Hietograma de la tormenta máxima en el año 2023

Análisis de Datos de Estaciones Climatológicas

En esta sección se hace una revisión referencia a la existencia y ubicación de estaciones pluviográficas y pluviométricas dentro de la cuenca y/o de las más cercanas de la región hidrológica y se recaban los siguientes datos hidrológicos:





- Registros de lluvias en las estaciones pluviográficas y pluviométricas, que contengan información, preferentemente de un periodo igual o mayor que la mitad del periodo de retorno que se establezca para el diseño hidráulico del puente, a mayor número de años de registro y menor área de cuenca, los datos serán más confiables.

Para el análisis de la cuenca delimitada anteriormente, se revisó la existencia de información climatológica a partir de la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), ver la siguiente ilustración.



Ilustración A 8. Base de datos del SMN (CLICOM, CONAGUA)

También se cuenta con la Estación Meteorológica Automatizada, ubicada dentro de las instalaciones del IMTA.

Estaciones climatológicas y EMAs disponibles en la zona de estudio

Mediante la delimitación del área de aportación de la cuenca permite obtener las ubicaciones de estaciones pluviográficas, pluviométricas o climatológicas dentro de la cuenca y/o de las cercanas de la región hidrológica, así como estaciones hidrométricas en la corriente en estudio o, en su defecto, en corrientes vecinas con

características fisiográficas semejantes. En la cuenca del sitio de estudio se cuenta con las siguientes estaciones climatológicas.



Ilustración A 9. Estaciones climatológicas y automatizadas cercanas al sitio de estudio

Tabla A 15. Estaciones Climatológicas cercanas a la cuenca de estudio

NP	Clave	Nombre	Tipo	Estado	Longitud	Latitud	Altitud (msnm)
1	S/C	INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL	Estación Meteorológica Automática	Morelos	099°09'25"	18°52'56"	1355
2	17071	PROGRESO	Convencional	Morelos	99° 9'11.87"	18°52'47.88"	1340

Los registros de lluvias en las estaciones pluviográficas y pluviométricas, que contengan información, preferentemente de un período igual o mayor que la mitad del período de retorno que se establezca para el diseño hidráulico del puente. A mayor número de años de registro y menos área de cuenca, los datos serán más confiables.



Características de la precipitación

La precipitación está caracterizada por la intensidad de las lluvias y su distribución en el tiempo, determinadas a partir de los datos obtenidos de las estaciones climatológicas regionalizadas para el análisis y estimación de escurrimientos empleados en el gasto de diseño de la obra, de acuerdo con las duraciones de las tormentas y los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20 y 50 años, ya que corresponde a los períodos de retorno empleados en el proyecto “Estudio hidrológico para determinar los gastos de entrada al sistema de canales del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua” (Gómez Martínez & Diéguez Jiménez, 2020), en el cual se emplearon dichos períodos de retorno con la finalidad de analizar la capacidad hidráulica de la infraestructura de canales del IMTA.

Precipitación

Se llevó a cabo el análisis de la precipitación para determinar las tormentas de diseño para los diferentes periodos de retorno, planteados en el presente informe.

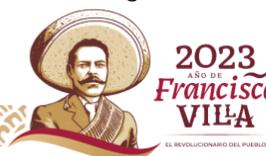
Precipitación Media mensual y anual

Se recopiló la información de la precipitación diaria de la estación climatológica convencional con clave 17071 “Progreso” y de la estación pluviográfica del IMTA. La información recopilada de ambas estaciones, corresponde al periodo del 5 de enero de 1982 al 16 de octubre de 2023.

Una vez que se cuenta con el registro completo se identifica el periodo de registros continuos, el cual se muestra en la siguiente tabla, en la cual se observa el conteo de datos por año-mes.

Tabla A 16. Revisión de datos completos para el registro de lluvia en el sitio de estudio

Año	Mes												Total general
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1982	27	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	361
1983	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
1984	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	366
1985	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
1986	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365





Año	Mes												Total general
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1987	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
1988	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	366
1989	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
1990	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
1991	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
1992	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	366
1993	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
1994	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
1995	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
1996	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	366
1997	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
1998	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
1999	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2000	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	366
2001	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2002	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2003	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2004	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	366
2005	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2006	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2007	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2008	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	366
2009	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2010	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2011	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2012	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	366
2013	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2014	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2015	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365





Año	Mes												Total general
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2016	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	366
2017	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2018	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2019	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2020	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	366
2021	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
2022	29	27	30	28	30	30	29	31	29	30	28	30	351
2023	30	25	30	30	30	27	28	29	29	15			273

Del registro completo presentado en la tabla anterior, en la siguiente tabla, se puede observar que precipitación media anual resultó de 949.15 mm, siendo el mes de septiembre el mes con la mayor precipitación media mensual que es de 216.32 mm. En la siguiente tabla se presentan los valores.

Tabla A 17. Precipitación media mensual y anual

Mes	Promedio mensual (mm)
Enero	6.88
Febrero	5.85
Marzo	6.40
Abril	10.45
Mayo	50.10
Junio	190.34
Julio	178.05
Agosto	194.77
Septiembre	216.32
Octubre	76.01
Noviembre	12.80
Diciembre	1.19



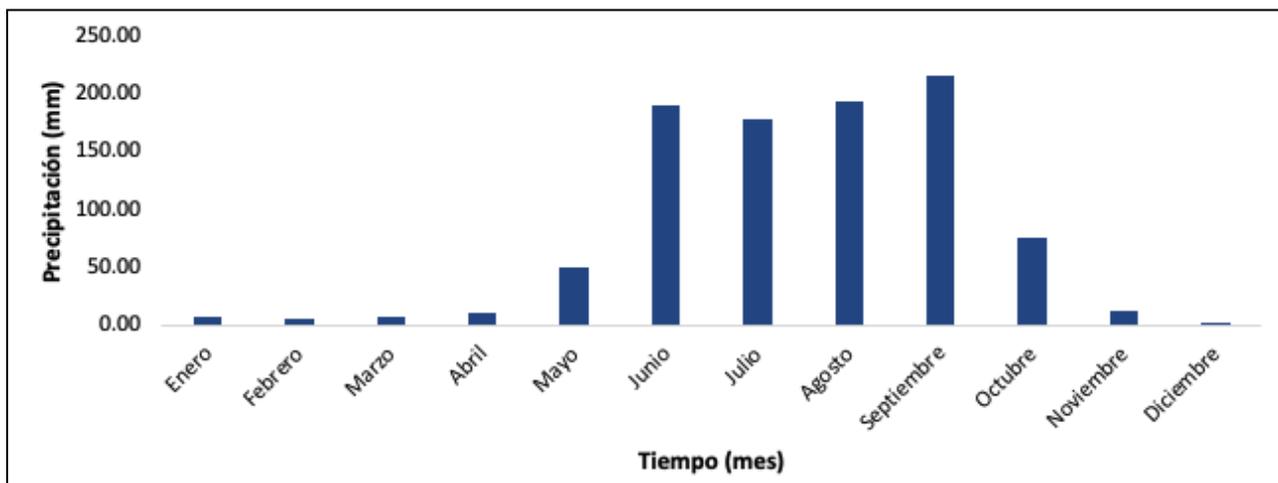


Ilustración A 10. Precipitación media mensual

Tormentas de diseño

Precipitación máxima en 24 horas

Con el objetivo de estimar los gastos para los periodos de retorno es necesario calcular las precipitaciones correspondientes a éstos (TR). En este caso para obtener la precipitación de diseño para un periodo mayor a 42 años de registro, fue necesario realizar un análisis de frecuencias de lluvias máximas anuales en 24 horas.

En la siguiente tabla se observa una actualización de los datos que se han tomado en los dos proyectos siguientes:

- En el 2020 se llevó a cabo el proyecto “Estudio hidrológico para determinar los gastos de entrada al sistema de canales del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua” en cual se contaba con un registro de 38 años, en un periodo comprendido de 1982 a 2019, y
- En el año 2022 se llevó a cabo el proyecto “Implementación en Campo de un Sistema LID en el IMTA” en cual se contaba con un registro de 40 años, en un periodo comprendido de 1982 a 2021,

Por tal motivo y aprovechando las mediciones de la estación instalada dentro del IMTA se actualizó la información al 2023.

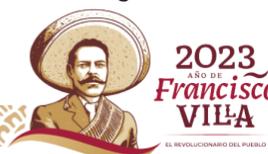




Tabla A 18. Registros de la precipitación máxima anual en 24 horas

Año	Precipitación máxima (mm)	Año	Precipitación máxima (mm)
1982	35.5	2004	76.7
1983	62.5	2005	98
1984	56.5	2006	54.5
1985	89.5	2007	49.7
1986	55.5	2008	70
1987	46.5	2009	66.5
1989	48.5	2010	93
1990	62	2011	70.4
1991	63.6	2012	54
1992	52	2013	54.5
1993	38.5	2014	82.5
1994	38.2	2015	48
1995	60.5	2016	90
1996	49	2017	71.5
1997	68.3	2018	50
1998	120	2019	95.7
1999	123.2	2020	111
2000	67	2021	91.1
2001	89.3	2022	54.1
2002	83	2023	37.6
2003	85	Máxima	123.2

Periodo de Retorno

Al representar la precipitación la cantidad de agua que llega al suelo ya sea de manera líquida o sólida en forma de lluvia, nieve, granizo. Mediante el proceso de condensación el vapor de agua regresa a la superficie nuevamente. Su distribución de deben a factores como la proximidad al mar, el relieve, las corrientes ascendentes de aire.

En la naturaleza los fenómenos hidrológicos constituyen procesos aleatorios que para la planificación y diseño están basados en eventos futuros, cuya magnitud y frecuencia no puede predecirse, por lo cual se emplean estudios de la probabilidad y frecuencia.





El concepto de Periodo de Retorno puede aplicarse a cualquier evento extremo como lo son las lluvias torrenciales, temperaturas extremas, huracanes, entre otros, con lo cual, el intervalo, duración o número de años que, en promedio, se cree que será igual o excedido, es decir, la frecuencia con la que se presenta un evento. De igual manera el grado de magnitud de un fenómeno extremo está relacionado de forma inversa con su frecuencia de ocurrencia (periodicidad), las precipitaciones de mayor magnitud ocurren con una frecuencia menor que aquellas de menor magnitud.

El grado óptimo de la seguridad de una estructura depende, por un lado, de su costo y, por otro, del costo de las pérdidas asociadas con una falla. La magnitud de un riesgo aceptable depende del balance entre el costo de la obra y el de los daños que se producirían al verificarse una falla, y para poder determinar cuál es el riesgo que se corre al proponer los parámetros de diseño de una obra, es necesario analizar estadísticamente los datos hidrológicos recabados en la zona de estudio. El número de años en que, en promedio, se presenta un evento dado, que pueda ser igualado o excedido, se llama periodo de retorno, que es el intervalo de recurrencia o simplemente frecuencia y se acostumbra a denotarlo con T_r . Probabilísticamente, si un evento dado ocurre una vez en T_r años, su probabilidad de ocurrencia P es igual a 1 en T_r casos, o sea que:

$$T_r = \frac{1}{P}$$

Ecuación 9

Análogamente, la probabilidad P' de no ocurrencia es igual a T_r casos menos 1 entre T_r casos, o bien 1 menos la probabilidad de ocurrencia P .

En una muestra determinada de datos, a cada miembro de la serie ordenada por magnitudes, se asigna un periodo de retorno el cual se basa en el número de orden " m " y el número " n " de años ordenados. Se han propuesto varias fórmulas para evaluar el periodo de retorno, pero el Método de Weibull es uno de los más ampliamente utilizados en hidrología, dicho método propone la siguiente expresión:

$$T_r = \frac{(n + 1)}{m}$$

Ecuación 10



Como bien se ha mencionado anteriormente el período de retorno para el presente proyecto será de 2, 5, 10, 20 y 50 años con el objetivo de que sea coincidente con el análisis hidráulico llevado a cabo en el “Estudio hidrológico para determinar los gastos de entrada al sistema de canales del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua” (Gómez Martínez & Diéguez Jiménez, 2020).

A continuación, se presentan los valores de las precipitaciones máximas en 24 horas registradas en la estación climatológica convencional Progreso y la estación automática del IMTA, así como la asignación del periodo de retorno mediante la formulación de Weibull.

Tabla A 19. Asignación del periodo de retorno a las precipitaciones máximas anuales registradas

Orden m	Precipitación máxima (mm)	Periodo de retorno (años)
1	123.2	42.0
2	120.0	21.0
3	111.0	14.0
4	98.0	10.5
5	95.7	8.4
6	93.0	7.0
7	91.1	6.0
8	90.0	5.3
9	89.5	4.7
10	89.3	4.2
11	85.0	3.8
12	83.0	3.5
13	82.5	3.2
14	76.7	3.0
15	71.5	2.8
16	70.4	2.6
17	70.0	2.5
18	68.3	2.3
19	67.0	2.2
20	66.5	2.1
21	63.6	2.0
22	62.5	1.9
23	62.0	1.8
24	60.5	1.8





Orden m	Precipitación máxima (mm)	Periodo de retorno (años)
25	56.5	1.7
26	55.5	1.6
27	54.5	1.6
28	54.5	1.5
29	54.1	1.4
30	54.0	1.4
31	52.0	1.4
32	50.0	1.3
33	49.7	1.3
34	49.0	1.2
35	48.5	1.2
36	48.0	1.2
37	46.5	1.1
38	38.5	1.1
39	38.2	1.1
40	37.6	1.1
41	35.5	1.0

Análisis de Frecuencias de precipitación máxima anual en 24 horas

Para el diseño de diferentes obras hidráulicas como es necesario determinar las avenidas o gastos de diseño o de escurrimiento en el sitio de interés. En el caso de que no se disponga de registros de escurrimiento para obtener los gastos de diseño, es necesario la aplicación de un modelo-lluvia escurrimiento, como es el caso del presente estudio.

Para el cálculo de las avenidas de diseño en la zona de estudio, se aplicará un modelo lluvia escurrimiento por motivo de seguridad, por lo cual es necesario recopilar la precipitación máxima anual en 24 horas en cada una de las estaciones, descritas anteriormente.

De acuerdo con las Estaciones Climatológicas Convencionales presentado en este informe se realizó el análisis de frecuencias, para lo cual se utilizaron las funciones de distribución de probabilidad siguientes:

- Normal;
- Lognormal 2 y 3 parámetros;





- Gamma de 2 y 3 parámetros;
- Log Pearson III;
- Gumbel, y
- Doble Gumbel.

A continuación, se describe a detalle las funciones de distribución de probabilidad.

Distribución Normal

Esta es la distribución, también llamada Gaussiana, más utilizada y más importante pues se pueden encontrar varias variables aleatorias que aparecen en relación con experimentos u observaciones prácticas que están distribuidas normalmente y otras que están distribuidas normalmente en forma aproximada.

La función de densidad de probabilidad (fdp) se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Ecuación 11

La fdp es válida para el rango $-\infty \leq x \leq \infty$

Esta función presenta un coeficiente de sesgo de $\gamma = 0$ y una curtosis $K = 3$

Al integrar la fdp se obtiene la función de probabilidad acumulada o simplemente función de distribución de probabilidad (FDP), la cual resulta:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx$$

Ecuación 12

Donde:

μ = Parámetro de ubicación

σ = Parámetro de escala





Para poder evaluar la FDP es necesario calcular la integral de la ecuación A.14 mediante algún método numérico.

Existen tablas publicadas las cuales resuelven la integral mencionada, para lo cual se define la siguiente variable estandarizada o reducida:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx$$

Ecuación 13

Donde

μ = Parámetro de ubicación

σ = Parámetro de escala

Para poder evaluar la FDP es necesario calcular la integral de la ecuación A.14 mediante algún método numérico.

Existen tablas publicadas las cuales resuelven la integral mencionada, para lo cual se define la siguiente variable estandarizada o reducida:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Ecuación 14

Entonces, la FDP se define como:

$$F(x) = F(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-z^2/2} dz$$

Ecuación 15

F(z) equivale al área bajo la curva de la fdp para un valor de z.

Con la transformación anterior es posible utilizar la misma tabla de valores para cualquier población que se ajuste a una FDP normal. En la siguiente tabla se presentan los valores de F(z) para diferentes valores de z.





Tabla A 20. Área bajo la curva de la función de distribución de probabilidad normal (Valores de F(z), calculados con Excel)

Z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.0	0.50000	0.50399	0.50798	0.51197	0.51595	0.51994	0.52392	0.52790	0.53188	0.53586
0.1	0.53983	0.54380	0.54776	0.55172	0.55567	0.55962	0.56356	0.56749	0.57142	0.57535
0.2	0.57926	0.58317	0.58706	0.59095	0.59483	0.59871	0.60257	0.60642	0.61026	0.61409
0.3	0.61791	0.62172	0.62552	0.62930	0.63307	0.63683	0.64058	0.64431	0.64803	0.65173
0.4	0.65542	0.65910	0.66276	0.66640	0.67003	0.67364	0.67724	0.68082	0.68439	0.68793
0.5	0.69146	0.69497	0.69847	0.70194	0.70540	0.70884	0.71226	0.71566	0.71904	0.72240
0.6	0.72575	0.72907	0.73237	0.73565	0.73891	0.74215	0.74537	0.74857	0.75175	0.75490
0.7	0.75804	0.76115	0.76424	0.76730	0.77035	0.77337	0.77637	0.77935	0.78230	0.78524
0.8	0.78814	0.79103	0.79389	0.79673	0.79955	0.80234	0.80511	0.80785	0.81057	0.81327
0.9	0.81594	0.81859	0.82121	0.82381	0.82639	0.82894	0.83147	0.83398	0.83646	0.83891
1.0	0.84134	0.84375	0.84614	0.84849	0.85083	0.85314	0.85543	0.85769	0.85993	0.86214
1.1	0.86433	0.86650	0.86864	0.87076	0.87286	0.87493	0.87698	0.87900	0.88100	0.88298
1.2	0.88493	0.88686	0.88877	0.89065	0.89251	0.89435	0.89617	0.89796	0.89973	0.90147
1.3	0.90320	0.90490	0.90658	0.90824	0.90988	0.91149	0.91309	0.91466	0.91621	0.91774
1.4	0.91924	0.92073	0.92220	0.92364	0.92507	0.92647	0.92785	0.92922	0.93056	0.93189
1.5	0.93319	0.93448	0.93574	0.93699	0.93822	0.93943	0.94062	0.94179	0.94295	0.94408
1.6	0.94520	0.94630	0.94738	0.94845	0.94950	0.95053	0.95154	0.95254	0.95352	0.95449
1.7	0.95543	0.95637	0.95728	0.95818	0.95907	0.95994	0.96080	0.96164	0.96246	0.96327
1.8	0.96407	0.96485	0.96562	0.96638	0.96712	0.96784	0.96856	0.96926	0.96995	0.97062
1.9	0.97128	0.97193	0.97257	0.97320	0.97381	0.97441	0.97500	0.97558	0.97615	0.97670
2.0	0.97725	0.97778	0.97831	0.97882	0.97932	0.97982	0.98030	0.98077	0.98124	0.98169
2.1	0.98214	0.98257	0.98300	0.98341	0.98382	0.98422	0.98461	0.98500	0.98537	0.98574
2.2	0.98610	0.98645	0.98679	0.98713	0.98745	0.98778	0.98809	0.98840	0.98870	0.98899
2.3	0.98928	0.98956	0.98983	0.99010	0.99036	0.99061	0.99086	0.99111	0.99134	0.99158
2.4	0.99180	0.99202	0.99224	0.99245	0.99266	0.99286	0.99305	0.99324	0.99343	0.99361
2.5	0.99379	0.99396	0.99413	0.99430	0.99446	0.99461	0.99477	0.99492	0.99506	0.99520
2.6	0.99534	0.99547	0.99560	0.99573	0.99585	0.99598	0.99609	0.99621	0.99632	0.99643
2.7	0.99653	0.99664	0.99674	0.99683	0.99693	0.99702	0.99711	0.99720	0.99728	0.99736
2.8	0.99744	0.99752	0.99760	0.99767	0.99774	0.99781	0.99788	0.99795	0.99801	0.99807
2.9	0.99813	0.99819	0.99825	0.99831	0.99836	0.99841	0.99846	0.99851	0.99856	0.99861
3.0	0.99865	0.99869	0.99874	0.99878	0.99882	0.99886	0.99889	0.99893	0.99896	0.99900
3.1	0.99903	0.99906	0.99910	0.99913	0.99916	0.99918	0.99921	0.99924	0.99926	0.99929
3.2	0.99931	0.99934	0.99936	0.99938	0.99940	0.99942	0.99944	0.99946	0.99948	0.99950
3.3	0.99952	0.99953	0.99955	0.99957	0.99958	0.99960	0.99961	0.99962	0.99964	0.99965
3.4	0.99966	0.99968	0.99969	0.99970	0.99971	0.99972	0.99973	0.99974	0.99975	0.99976
3.5	0.99977	0.99978	0.99978	0.99979	0.99980	0.99981	0.99981	0.99982	0.99983	0.99983
3.6	0.99984	0.99985	0.99985	0.99986	0.99986	0.99987	0.99987	0.99988	0.99988	0.99989
3.7	0.99989	0.99990	0.99990	0.99990	0.99991	0.99991	0.99992	0.99992	0.99992	0.99992
3.8	0.99993	0.99993	0.99993	0.99994	0.99994	0.99994	0.99994	0.99995	0.99995	0.99995
3.9	0.99995	0.99995	0.99996	0.99996	0.99996	0.99996	0.99996	0.99996	0.99997	0.99997
4.0	0.99997	0.99997	0.99997	0.99997	0.99997	0.99997	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998
4.1	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99999	0.99999
4.2	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999
4.3	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999
4.4	0.99999	0.99999	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

Nota: Los valores mostrados en la tabla anterior son válidos para z positivos, para valores de z negativos, el valor correcto de F(z) será restándole a la unidad el valor obtenido en la tabla para el valor de |z|. Por ejemplo, si se tiene un valor de Z=-2.5, el valor de F(z) será F(z)=1-0.99379=0.00621.



Estimación de los parámetros por el método de momentos y por máxima verosimilitud

Para esta FDP los parámetros tanto por momentos como por máxima verosimilitud se estiman como:

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Ecuación 16

Donde:

n es el número de datos de la muestra

\bar{x} es la media aritmética de los datos.

$\hat{\sigma}^2$ es la varianza de la muestra

Distribución Lognormal de 2 Parámetros

La distribución Lognormal corresponde a una variable aleatoria X cuyos logaritmos están distribuidos de una forma normal. Se ha encontrado que esta distribución describe la distribución de la conductividad hidráulica en un medio poroso (Freeze, 1975), la distribución del tamaño de las gotas de lluvia en una tormenta y otras variables hidrológicas.

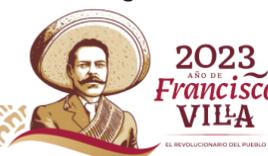
La distribución Lognormal tiene ventajas sobre la normal ya que está limitada a valores mayores a cero ($X > 0$) y de que la transformación logarítmica reduce la asimetría positiva que comúnmente se presenta en los datos hidrológicos pues la reducción con los logaritmos es más notable en los valores grandes que en los pequeños (Chow et al., 1988).

La función de densidad de probabilidad está dada por la siguiente ecuación:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(x)-\mu_y}{\sigma_y}\right]^2}$$

Ecuación 17

Para $x > 0$ y la FDP (función de distribución de probabilidad) es



$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(x)-\mu_y}{\sigma_y}\right]^2}$$

Ecuación 18

Donde:

 μ_y Parámetro de ubicación σ_y Parámetro de escalaEl coeficiente de sesgo es $\gamma > 0$

Estimación de los parámetros por momentos y máxima verosimilitud

Los parámetros de ubicación y escala estimados tanto por momentos como por máxima verosimilitud son:

$$\hat{\mu}_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i$$

Ecuación 19

$$\hat{\sigma}_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln x_i - \hat{\mu}_y)^2}{n}}$$

Ecuación 20

Al igual que en la FDP Normal la integral se debe calcular por métodos numéricos, pero si se define la variable estandarizada $Z = \frac{\ln(x) - \hat{\mu}_y}{\hat{\sigma}_y}$, entonces se puede utilizar la tabla anterior para evaluar la FDP log normal de 2 parámetros.

Distribución Exponencial de 1 Parámetro

Esta distribución también se conoce como distribución Exponencial Negativa. El tiempo de ocurrencia de fenómenos como la precipitación, pueden considerarse Procesos de Poisson ya que los eventos ocurren instantánea e independientemente en un horizonte de tiempo, a lo largo de una línea. El tiempo entre dichos eventos lo describe la distribución exponencial cuyo parámetro es la tasa media de ocurrencia de los eventos. La ventaja de la distribución exponencial radica en que es fácil estimar el parámetro a partir de la información observada. Su desventaja es que requiere que la ocurrencia de cada evento sea completamente independiente (Chow et al., 1988).

Página 111 de 199



La FDP (función de distribución de probabilidad) está dada por:

$$F(x) = 1 - e^{-\beta x}$$

Ecuación 21

La FDP es válida para el rango $0 \leq x < \infty$, es decir la variable no puede tomar valores negativos. La función de densidad de probabilidad resulta:

$$f(x) = \beta e^{-\beta x}$$

Ecuación 22

Donde: β es un parámetro de escala

La media y variancia de esta función se definen como:

$$\mu = \frac{1}{\beta} \text{ y } \sigma^2 = \frac{1}{\beta^2}$$

Estimación de los parámetros por el método de momentos y máxima verosimilitud

La estimación del parámetro tanto por momentos como por máxima verosimilitud es:

$$\hat{\beta} = \frac{1}{\bar{x}}$$

Ecuación 23

Donde \bar{x} es la media de la muestra.

Distribución Exponencial de 2 Parámetros o doble exponencial

La distribución doble exponencial también se conoce como distribución de Laplace, nombrada así en honor a Pierre Simón Laplace (1749-1827), matemático y astrónomo francés. El nombre de distribución doble exponencial se debe a que su gráfica es simétrica y similar a dos distribuciones exponenciales.

La FDP está dada por:





$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)} \quad x > 0$$

Ecuación 24

La FDP es válida para el rango $\alpha \leq x \leq \infty$, es decir la variable no puede tomar valores negativos, ya que $\alpha > 0$.

La función de densidad de probabilidad resulta:

$$f(x) = \frac{1}{\beta} e^{-\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)}$$

Ecuación 25

Donde:

α es el parámetro de ubicación
 β es el parámetro de escala

La media, la variancia y el sesgo de esta función son:

$$\mu = \alpha + \beta, \quad \sigma^2 = \beta^2, \quad \gamma = 2$$

Estimación de los parámetros por el método de momentos

Los parámetros por medio del método de momentos son:

$$\hat{\beta} = S \quad \text{y} \quad \hat{\alpha} = \bar{x} - S$$

Ecuación 26

Donde:

S es la desviación estándar de la muestra
 \bar{x} es la media de la muestra

Estimación de los parámetros por el método de momentos y máxima verosimilitud
Los parámetros de acuerdo con el método de máxima verosimilitud se calculan como:





$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{(1)})}{n-1}$$

Ecuación 27

$$\hat{\alpha} = x_{(1)} - \frac{\beta}{n-1}$$

Donde:

$x_{(1)}$ Primer valor de la muestra ordenada de menor a mayor

n Número total de datos

Distribución Gamma de 2 Parámetros

Toma su nombre de la función gamma ($\Gamma(\beta) = \int_0^{\infty} x^{\beta-1} e^{-x} dx$), y describe el tiempo de ocurrencia de un número β de eventos en un proceso de Poisson, la cual es la distribución de una suma de variables aleatorias independientes e idénticas, distribuidas exponencialmente. Tiene como límite inferior cero, siendo esto una desventaja para la aplicación a variables que tienen un límite inferior menor a cero (Chow et al., 1988). Esta distribución es de gran importancia en la teoría de colas y en los problemas de confiabilidad. (Walpole y Myers, 1992).

La función de densidad de probabilidad está dada por:

$$f(x) = \frac{x^{\beta-1} e^{-x/\alpha}}{\alpha^{\beta} \Gamma(\beta)} \quad 0 \leq x < \infty$$

Ecuación 28

$$\text{si } \alpha > 0 \rightarrow \gamma > 0$$

Por lo que la FDP (función de distribución de probabilidad) es:

$$F(x) = \int_0^x \frac{x^{\beta-1} e^{-x/\alpha}}{\alpha^{\beta} \Gamma(\beta)} dx = \frac{1}{\alpha^{\beta} \Gamma(\beta)} \int_0^x x^{\beta-1} e^{-x/\alpha} dx$$

Ecuación 29

Donde:





α Parámetro de escala,

β Parámetro de forma,

$\Gamma(\beta)$ Función Gamma completa

Sustituyendo $y = \frac{x}{\alpha}$, entonces la FDP queda

$$F(y) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \int_0^x y^{\beta-1} e^{-y} dx$$

Ecuación 30

La ecuación anterior tiene una función de distribución ji-cuadrada, con 2β grados de libertad y el valor de ji-cuadrada es $\chi^2 = 2y$.

Además, los valores de la media, desviación estándar y coeficiente de sesgo de la función están dados por:

$$\mu = \beta\alpha, \sigma^2 = \alpha^2 \beta \text{ y } \gamma = \frac{2}{\sqrt{\beta}}$$

Ecuación 31

Estimación de los parámetros por el método de momentos

El cálculo de los parámetros de ajuste de acuerdo con el método de momentos es:

$$\hat{\alpha} = \frac{S^2}{\bar{x}} \text{ y } \hat{\beta} = \left(\frac{\bar{x}}{S}\right)^2$$

Ecuación 32

Estimación de los parámetros por el método de máxima verosimilitud

Los parámetros por el método de máxima verosimilitud se calculan como:

$$\hat{\alpha} = \frac{\bar{x}}{\hat{\beta}}$$

Ecuación 33

El estimador $\hat{\beta}$ se obtiene al resolver:

$$F(\hat{\beta}) = \hat{\mu}_y - \ln(\hat{\mu}_x) + \ln(\hat{\beta}) - \psi(\hat{\beta}) = 0$$

Ecuación 34

Empleando como valor inicial del parámetro $\hat{\beta}$





$$\beta = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4}{3}C}}{4C}$$

Ecuación 35

$$C = \ln(\bar{x}) - \bar{\mu}_y$$

$$\bar{\mu}_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i)$$

$$\bar{\mu}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)$$

La aproximación de la función digamma de β es:

$$\psi(\beta) = \ln(\beta + 2) - \frac{1}{2(\beta + 2)} - \frac{1}{12(\beta + 2)^2} + \frac{1}{120(\beta + 2)^4} - \frac{1}{252(\beta + 2)^6} - \frac{1}{(\beta + 1)} - \frac{1}{\beta}$$

Ecuación 36

Distribución Gamma de 3 Parámetros

La función de densidad de probabilidad está dada por la siguiente ecuación:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left(\frac{x - x_0}{\alpha} \right)^{\beta - 1} e^{-\left(\frac{x - x_0}{\alpha} \right)} \quad x > 0$$

Ecuación 37

$$x_0 \leq x < \infty \text{ si } \alpha > 0 \text{ y } \beta > 0$$

Donde:

x_0 Parámetro de ubicación

α Parámetro de escala

β Parámetro de forma

Y la FDP (función de distribución de probabilidad) es:

$$F(x) = \int_{x_0}^x \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left(\frac{x - x_0}{\alpha} \right)^{\beta - 1} e^{-\left(\frac{x - x_0}{\alpha} \right)} dx$$

Ecuación 38

Página 116 de 199





Sustituyendo la variable

$$y = \frac{x - x_0}{\alpha}$$

Ecuación 39

en la ecuación 36, se tiene

$$F(y) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \int_{x_0}^x (y)^{\beta-1} e^{-y} dy$$

Ecuación 40

Donde la ecuación anterior tiene una función de distribución ji-cuadrada, con 2β grados de libertad y $\chi^2=2y$.

Los estadísticos de la FDP son:

$$\mu = x_0 + \alpha\beta \text{ (Media)}$$

$$\sigma^2 = \alpha^2 \beta \text{ (Varianza)}$$

$$g = \frac{2}{\sqrt{\beta}} \text{ (Coeficiente de asimetría)}$$

$$k = 3 \left(1 + \frac{g^2}{2} \right) \text{ (Coeficiente de curtosis)}$$

Estimación de los parámetros por el método de momentos

La estimación de los parámetros de ajuste por el método de momentos es:

$$\hat{\beta} = \frac{4}{g^2}, \hat{\alpha} = \frac{S}{\sqrt{\hat{\beta}}}, \hat{x}_0 = \bar{x} - S\sqrt{\hat{\beta}}$$

Ecuación 41

Estimación de los parámetros por el método de máxima verosimilitud

Por otra parte, los valores de los parámetros por el método de máxima verosimilitud son:

$$\hat{\beta} = \frac{1}{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_0)^n \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{x_i - \hat{x}_0} \right]}{n^2}}$$

Ecuación 42

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_0) - \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{(x_i - \hat{x}_0)} \right]}$$

Ecuación 43

El valor de \hat{x}_0 se obtiene al resolver:

$$F(\hat{\beta}) = \sum_{i=1}^n \ln(x_i - \hat{x}_0) - n \ln(\hat{\alpha}) - n\psi(\hat{\beta}) = 0$$

Ecuación 44

La aproximación de la función digamma de $\hat{\beta}$ es:

$$\psi(\hat{\beta}) = \ln(\hat{\beta} + 2) - \frac{1}{2(\hat{\beta} + 2)} - \frac{1}{12(\hat{\beta} + 2)^2} + \frac{1}{120(\hat{\beta} + 2)^4} - \frac{1}{252(\hat{\beta} + 2)^6} - \frac{1}{(\hat{\beta} + 1)} - \frac{1}{\hat{\beta}}$$

Ecuación 45

Distribución Log Pearson Tipo III

Si los logaritmos naturales de una variable x ($\ln x$) presentan una distribución Pearson tipo III entonces la variable x presentará una distribución Log Pearson tipo III. Estando una distribución de tres parámetros operando sobre los logaritmos de la variable, la Log Pearson tipo III parecerá ser una distribución extremadamente versátil. Sin embargo, su aplicación en hidrología está estrictamente limitada.

La función de densidad de la Log Pearson tipo III puede tomar forma de J, J invertida, U, U invertida, U invertida con inflexión, forma de campana con límite superior, forma de campana con límite inferior, etcétera. Para el análisis de frecuencias de inundaciones la única forma de interés es aquella que es unimodal, continua de 0 a $+\infty$.

Respecto a su aplicación, en 1967 el Federal Water Resources Council de Estados Unidos sugirió que las agencias de tipo gubernamental adoptaran la distribución



Log Pearson tipo III como la distribución de frecuencias estándar para inundaciones; a lo que Benson agrega que no existe un criterio estadístico riguroso en el cual basarse para la aplicación de la distribución Log Pearson tipo III y por lo tanto esta elección es hasta cierto punto subjetiva (Kite, 1988).

La función de densidad de probabilidad está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta) x} \left(\frac{\ln x - y_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{\ln x - y_0}{\alpha} \right)} \quad 0 < x < \infty \text{ y } \gamma > 0$$

Ecuación 46

donde:

- y_0 Parámetro de ubicación
- α Parámetro de escala
- β Parámetro de forma

Estimación de los parámetros por el método de momentos

Los parámetros de acuerdo al método de momentos se calculan como:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{A + 3}$$

Ecuación 47

$$\mu_r = \sum_{i=1}^n \frac{x_i^r}{n} \quad r = 1, 2, 3$$

$$B = \frac{\ln(\hat{\mu}_3) - 3\ln(\hat{\mu}_1)}{\ln(\hat{\mu}_2) - 2\ln(\hat{\mu}_1)}$$

$$C = \frac{1}{B - 3}$$

Si $3.5 < B \leq 6$

$$A = -0.23019 + 1.65262C + 0.20911C^2 - 0.04557C^3$$

Si $3 < B \leq 3.5$

$$A = -0.45157 + 1.99955C$$

y los otros dos parámetros se calculan como



$$\hat{\beta} = \frac{\ln(\hat{\rho}_2) - 2\ln(\hat{\rho}_1)}{\ln(1 - \hat{\alpha})^2 - \ln(1 - 2\hat{\alpha})}$$

Ecuación 48

$$\hat{y}_0 = \ln(\hat{\rho}_1) + \hat{\beta} \ln(1 - \hat{\alpha})$$

Ecuación 49

Cuando el valor de $B > 6$ o cuando $B < 3$ los parámetros se calculan con el método indirecto, es decir

$$\hat{\beta} = \frac{2}{S_y^2} \quad \hat{\alpha} = \frac{S_y}{\sqrt{\hat{\beta}}} \quad \hat{y}_0 = \bar{y} - S_y \sqrt{\hat{\beta}}$$

Ecuación 50

Estimación de los parámetros por el método de máxima verosimilitud

Por otra parte, los parámetros de acuerdo con el método de máxima verosimilitud se calculan mediante las siguientes expresiones

$$\hat{\beta} = \frac{1}{n^2} \frac{1}{\sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}_0] \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{y_i - \hat{y}_0} \right]}$$

Ecuación 51

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}_0] - \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{y_i - \hat{y}_0} \right]}$$

Ecuación 52

El estimador \hat{y}_0 se obtiene al resolver:

$$F(\hat{y}_0) = \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}_0] - n \ln(\hat{\alpha}) - n\psi(\hat{\beta}) = 0$$

Ecuación 53

$$y_i = \ln(x_i)$$

La aproximación de la función digamma de $\hat{\beta}$ es:

$$\psi(\hat{\beta}) = \ln(\hat{\beta} + 2) - \frac{1}{2(\hat{\beta} + 2)} - \frac{1}{12(\hat{\beta} + 2)^2} + \frac{1}{120(\hat{\beta} + 2)^4} - \frac{1}{252(\hat{\beta} + 2)^6} - \frac{1}{(\hat{\beta} + 1)} - \frac{1}{\hat{\beta}}$$

Ecuación 54

Página 120 de 199



Distribución Gumbel

La distribución de Valores Extremos Tipo I o Distribución Gumbel nace con Fisher y Tippett, en los años veinte con la Teoría de Valores Extremos. En los años treinta, Gumbel realiza aplicaciones prácticas usando los estadísticos de valores extremos de distribuciones del tiempo de duración de la vida humana y en 1941 publica algunos artículos con respecto a sus aplicaciones en el análisis de frecuencias de gastos máximos y mínimos. Jenkinson (1955) demostró que esta distribución es un caso especial de la Distribución General de valores Extremos (Chow et al., 1994).

La FDP (función de distribución de probabilidad) está dada por la siguiente ecuación:

$$F(x) = e^{-e^{-\left[\frac{x-\beta}{\alpha}\right]}} \quad \begin{matrix} -\infty < x < \infty \\ -\infty < \beta < \infty \\ \alpha > 0 \end{matrix}$$

Ecuación 55

Y su función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)} e^{-e^{-\left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)}}$$

Ecuación 56

Donde:

β Parámetro de ubicación

α Parámetro de escala

La variable reducida Gumbel es:

$$y_i = \frac{x_i - \beta}{\alpha}$$

Ecuación 57

Estimación de los parámetros por el método de momentos

Los valores de los parámetros de acuerdo con el método de momentos son:

$$\beta = \bar{x} - 0.45 S$$

Ecuación 58





$$\hat{\alpha} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S = 0.78S$$

Ecuación 59

Estimación de los parámetros por el método de máxima verosimilitud

Los parámetros por máxima verosimilitud considerando la variable reducida se obtienen mediante el siguiente proceso iterativo:

$$P = n - \sum_{i=1}^n e^{-y_i}$$

Ecuación 60

$$R = n - \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i e^{-y_i}$$

Ecuación 61

El criterio de convergencia es:

$$\frac{P}{\hat{\alpha}} \approx 0 \text{ y } \frac{-R}{\hat{\alpha}} \approx 0$$

Ecuación 62

Incrementos:

$$\delta_{\beta_j} = (1.11P_j - 0.26R_j) \frac{\alpha_i}{n}$$

Ecuación 63

$$\delta_{\alpha_j} = (0.26P_j - 0.61R_j) \frac{\alpha_i}{n}$$

Ecuación 64

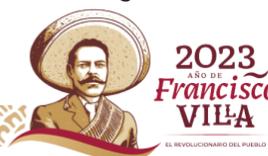
Nuevos valores:

$$\hat{\beta}_{j+1} = \hat{\beta}_j + \delta_{\beta_j} \quad \alpha_{j+1} = \alpha_j + \delta_{\alpha_j}$$

Ecuación 65

Distribución Gumbel Doble

En algunos casos, como por ejemplo en zonas costeras del Golfo de México y el Océano Pacífico se puede observar con claridad la existencia de dos grupos de datos con características diferentes, el primero originado por precipitaciones debido a los fenómenos dominantes en la región y el segundo, originado por precipitaciones de origen ciclónico, que comúnmente provocan las avenidas más grandes. Por ello, el ajuste de fdp de una población (por ejemplo, Gumbel) no resulta del todo satisfactorio. Por esto es necesario hacer análisis de frecuencias considerando que





los gastos máximos anuales se originan por dos procesos diferentes que dan lugar a una función de distribución mezclada o de dos poblaciones (Campos, 1989).

Para realizar el análisis de frecuencias, es posible aplicar la función de distribución doble Gumbel para dos poblaciones considerando que los grupos son mutuamente excluyentes, es decir el valor de la variable se debe a un evento ciclónico o no. La FDP (función de distribución de probabilidad) para una muestra que presente la presencia de dos poblaciones está definida como (Haan, 1977).

$$F(x) = P \exp \left\{ - \exp \left(- \frac{(x - \beta_1)}{\alpha_1} \right) \right\} + (1 - P) \exp \left\{ - \exp \left(- \frac{(x - \beta_2)}{\alpha_2} \right) \right\}$$

Ecuación 66

Donde:

P es la probabilidad de tener eventos no ciclónicos, adimensional.

x es la variable aleatoria para la cual se estima la probabilidad de no excedencia

α_1 es el parámetro de escala de la población no ciclónica

β_1 es el parámetro de ubicación de la población no ciclónica

α_2 es el parámetro de escala de la población ciclónica

β_2 es el parámetro de ubicación de la población ciclónica

y la función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \frac{P}{\alpha_1} \exp \left\{ - \frac{(x - \beta_1)}{\alpha_1} - \exp \left(- \frac{(x - \beta_1)}{\alpha_1} \right) \right\} + \frac{(1 - P)}{\alpha_2} \exp \left\{ - \frac{(x - \beta_2)}{\alpha_2} - \exp \left(- \frac{(x - \beta_2)}{\alpha_2} \right) \right\}$$

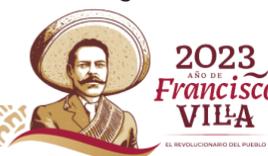
Ecuación 67

Estimación de los parámetros

Una vez que se ha planteado la función de distribución de probabilidad que se usará es necesario calcular sus respectivos parámetros para poder determinar los valores de las variables de diseño para diferentes periodos de retorno.

El método utilizado para calcular los parámetros será el conocido como "Error cuadrático mínimo".

Este criterio consiste en minimizar la suma de los errores cuadráticos pesados (*E*), entre los valores empíricos de la función de distribución de probabilidad acumulada *F(x)* (ecuación A.78) y los valores estimados, esto es (González, 1970):





Encontrar $P, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2$ y β_2 tales que minimicen la función:

$$E = \sum_{i=1}^n [\hat{F}(x_i) - F(x_i)]^2 W_i$$

Ecuación 68

Donde los valores estimados de la función de probabilidad acumulada están dados por:

$$\hat{F}(x_m) = 1 - \frac{m}{n+1}$$

Ecuación 69

donde:

$\hat{F}(x_m)$ = Valor estimado de la función de distribución de probabilidad para la variable máximo anual

m = Número de orden de los valores de la variable aleatoria x (vgr. gasto máximo anual), cuando estos son ordenados en forma decreciente

n = Número de registros

W_i = Peso asignado al error cometido, que es la estimación de la función de distribución en la variable de orden i . Aquí se considerará igual a 1, es decir, todos los valores de las variables tienen la misma importancia.

Existe un gran número de métodos para minimizar funciones como la dada por la ecuación A.80, de los cuales algunos ya han sido aplicados a este tipo de análisis como son el método del máximo ascenso (González, 1970), cuya característica es su lenta convergencia, además de que es necesario evaluar las derivadas de la función con respecto a cada parámetro a determinar, y el algoritmo de Rosenbrock (Campos, 1989), el cual se aplica a funciones de múltiples variables no restringidas y su característica principal es la búsqueda de la solución de forma directa y rápida, ya que no hay que evaluar las derivadas de la función.

El método utilizado en este software es el algoritmo de Rosenbrock, ya que conduce a valores menores del error estándar que el método del máximo ascenso (Campos, 1989).

Un procedimiento simplificado consiste en calcular los parámetros de cada uno de los dos grupos como si fuera una función Gumbel sencilla, esto es:





Si N es el número total de datos de la muestra y Nc es el número de datos debido a eventos ciclónicos, entonces el valor de P es (Aparicio, 1997)

$$P = \frac{(N - Nc)}{N}$$

Ecuación 70

y los valores de los parámetros restantes son

$$\alpha_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S_1 \qquad \beta_1 = x_1 - 0.5772 \alpha_1$$

Ecuación 71

$$\alpha_2 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S_2 \qquad \beta_2 = x_2 - 0.5772 \alpha_2$$

Ecuación 72

Actualización del análisis de la precipitación al 2023

Con la finalidad de disponer valores de precipitación para periodos de retorno mayores al máximo valor asignado a los registros (el cual fue de 42 años), se realizó un análisis de frecuencias de lluvias máximas anuales en 24 horas. El análisis se realizó con el programa AFA desarrollado por el IMTA, las funciones de distribución de probabilidad (FDP) que se utilizaron se muestran en la siguiente tabla, así como sus errores de ajuste.



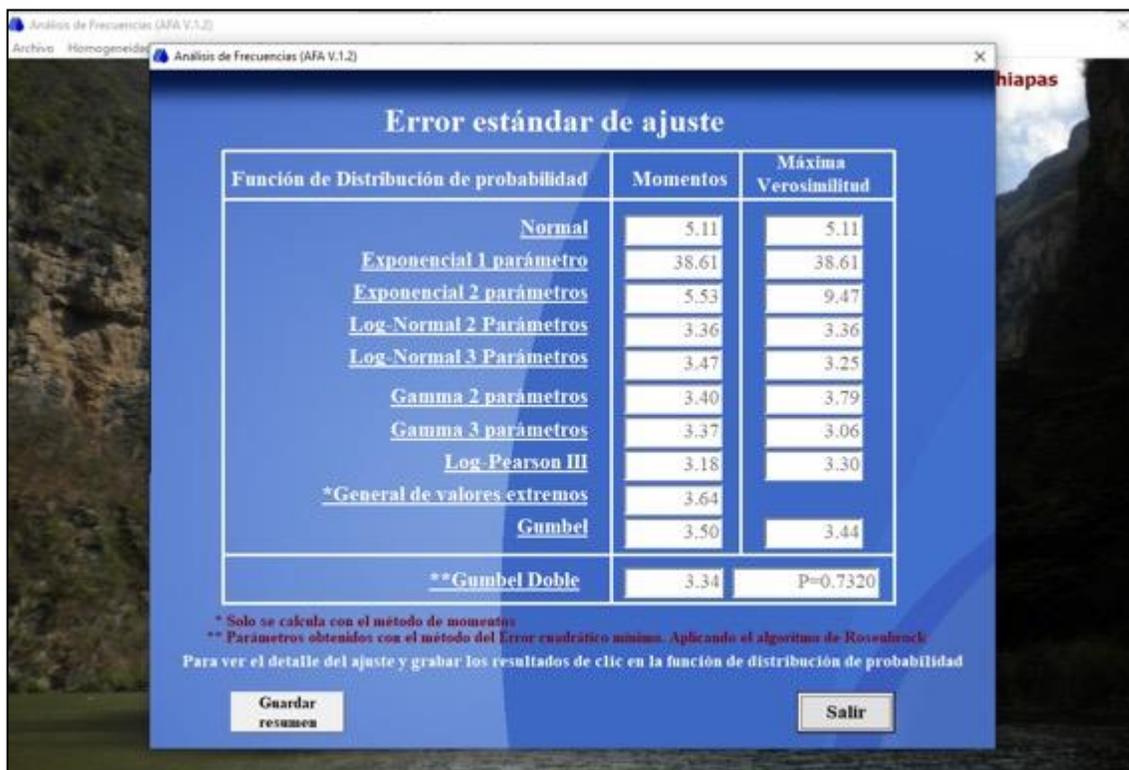


Ilustración A 11. Error estándar de ajuste (mm) del análisis de frecuencias

Tabla A 21. Error estándar de ajuste (mm) del análisis de frecuencias

Función de distribución de probabilidad	Momento	Verosimilitud
Normal	5.11	5.11
Exponencial 1 Parámetro	38.61	38.61
Exponencial 2 Parámetros	5.53	9.47
Log-Normal 2 Parámetros	3.36	3.36
Log-Normal 3 Parámetros	3.47	3.25
Gamma 2 Parámetros	3.4	3.79
Gamma 3 Parámetros	3.37	3.06
Log-Pearson III	3.18	3.3
General de valores extremos (GVE)	3.64	-
Gumbel	3.5	3.44
**Gumbel Doble	3.34	P = 0.7320

De acuerdo a los datos de la tabla anterior se recomienda valerse de los valores de la precipitación calculados con la FDP Gamma 3 parámetros por verosimilitud.



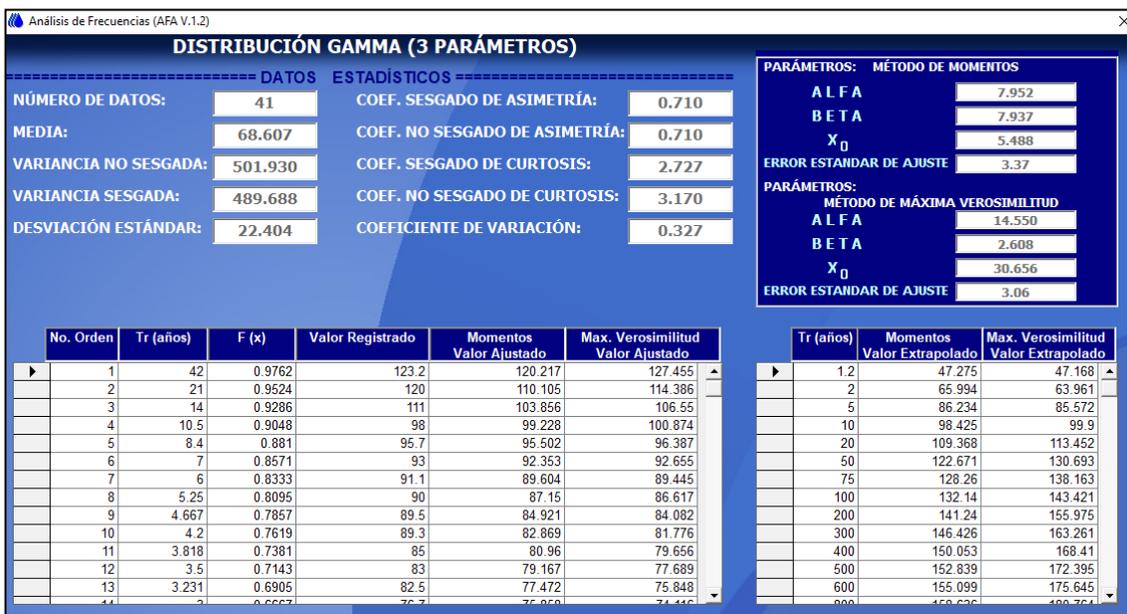


Ilustración A 12. Precipitación máxima (mm) en 24 horas para diferentes periodos para la FDP Gamma 3 parámetros por verosimilitud

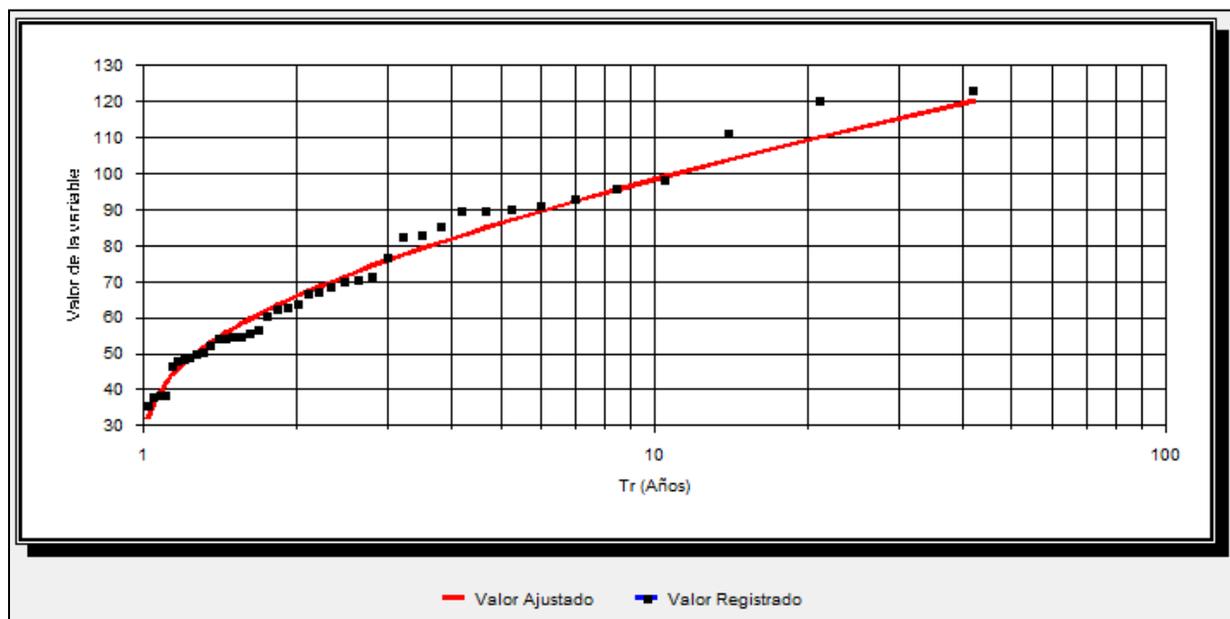


Ilustración A 13. Pantalla que muestra un ejemplo de los resultados de manera gráfica de un ajuste a una FDP



Tabla A 22. Precipitación máxima (mm) en 24 horas para diferentes periodos por las diferentes FDP

Periodo de retorno (años)	Precipitación (mm)
2	63.9
5	85.6
10	99.9
20	113.4
50	130.7

Distribución temporal de la precipitación

Análisis de la Estación Meteorológica Automática

Un factor importante en la determinación de la magnitud de los gastos para los periodos de retorno es la distribución de la precipitación en el tiempo. Dentro de la cuenca del jardín del LID del IMTA se localiza la Estación Meteorológica Automática (EMA) "IMTA" la cual contiene registros de precipitación a cada 10 minutos. La información recopilada de la EMA comprende el periodo actualizado desde abril de 1999 hasta abril de 2023, sin embargo, hay algunos meses en los que no existe información registrada, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla A 23. Disponibilidad de información de precipitación a cada 10 minutos en la EMA IMTA

Año/Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Juni	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1999	-	-	-	3781	4116	4289	4212	4421	4299	4441	3692	4421
2000	4457	3906	4211	4191	4364	4248	4000	4245	4284	4187	4281	4215
2001	3613	4030	4156	4258	4453	4034	4187	4432	4283	4061	3580	3686
2002	3512	3784	4365	4154	4090	3791	2615	4169	2861	2487	1365	1507
2003	3476	4022	3960	4208	3607	4320	4446	4464	4286	4469	4320	3457
2004	3203	3941	4175	3997	3881	4028	4104	4284	4068	3679	3348	3820
2005	3977	3762	4194	4062	3139	2153	3786	4166	4216	4176	3402	4176
2006	4158	3222	1225	-	-	-	-	-	-	-	2142	4144
2007	3753	36	-	-	-	432	-	-	-	-	1941	3813
2008	3604	3581	3795	3144	4014	3780	4002	3918	3768	3882	4320	4410
2009	3528	3240	3888	4266	4434	4320	3570	3990	4296	4104	2933	3584
2010	3561	3960	3942	4200	4452	3414	4434	4446	4248	4380	4302	4410
2011	4446	4032	4392	4188	4350	4272	4452	4446	4056	4296	4320	1782
2012	-	-	-	-	-	119	2949	4464	3927	3515	4104	4464



Año/Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Juni	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2013	4457	4018	3714	4320	4416	4053	4365	4284	4320	4440	4288	4422
2014	4452	3840	4380	4320	4452	3858	4452	4170	3120	3462	3486	3510
2015	2620	2666	4140	4050	4416	4284	4212	4332	4314	4398	3411	-
2016	-	-	-	-	2162	4151	3372	540	-	-	-	-
2017	-	-	-	-	2960	4308	3698	2902	4092	4278	4314	4162
2018	3797	4026	4464	3816	4124	4200	4169	3900	3744	3162	3612	4065
2019	4338	3972	4326	4290	4422	4314	4356	3828	4272	4446	4320	4410
2020	4428	4110	4284	4296	4464	4320	4452	4452	4296	4422	4314	4432
2021	3926	3990	4464	4314	4464	4302	4380	3282	3750	3731	4314	4458
2022	4464	4020	4458	4308	4164	4116	4338	4416	4160	4402	3142	4253
2023	4145	3468	4044	1485	-	-	-	-	-	-	-	-

Para cada uno de los meses y cada año, se calculó la precipitación máxima para duraciones a cada 10 minutos a partir de 10 minutos hasta 1,440 minutos (24 horas). Seleccionando aquellas tormentas cuya precipitación en 24 horas sea mayor a 50 mm, analizando así 36 tormentas. Posteriormente, cada una de las ordenadas de cada tormenta se dividió entre la precipitación en 24 horas, obteniendo así curvas masas unitarias (Ver siguiente ilustración).

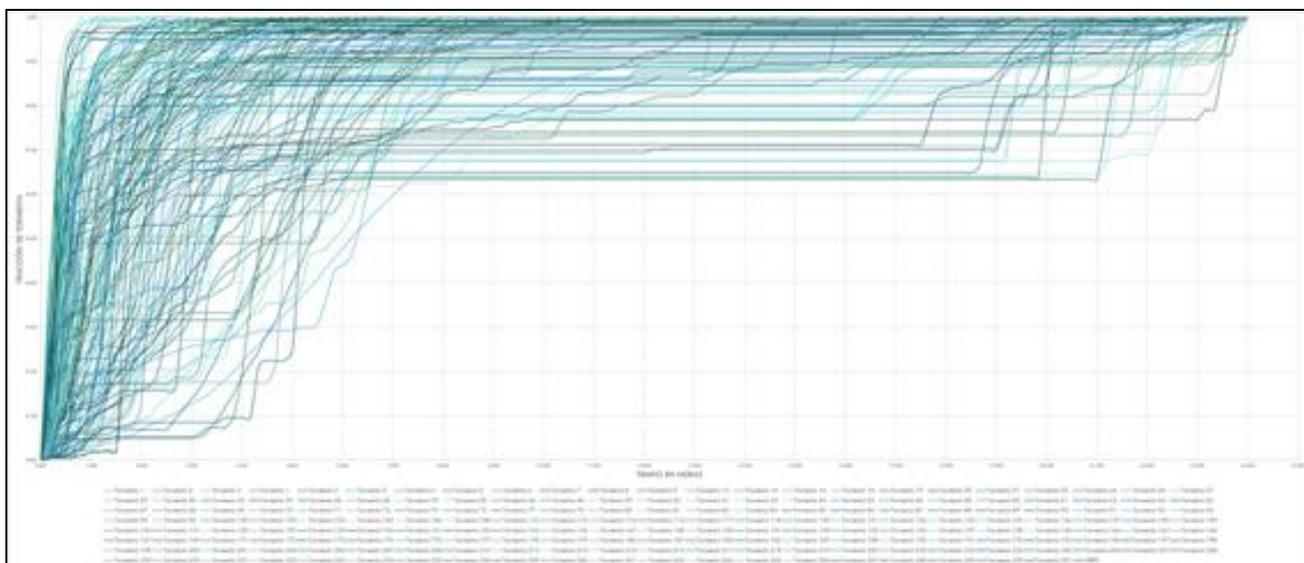


Ilustración A 14. Tormentas seleccionadas (36) para la determinación de la distribución temporal de la precipitación



Posteriormente se realizó un promedio para cada tiempo (desde 0 a 1440 minutos) de todas las tormentas (a excepción de la tormenta de septiembre de 2005 por no seguir el mismo patrón del resto de las tormentas, obteniendo así un patrón representativo de la precipitación (ver siguiente ilustración y tabla, el cual será utilizado para distribuir la precipitación en 24 horas.

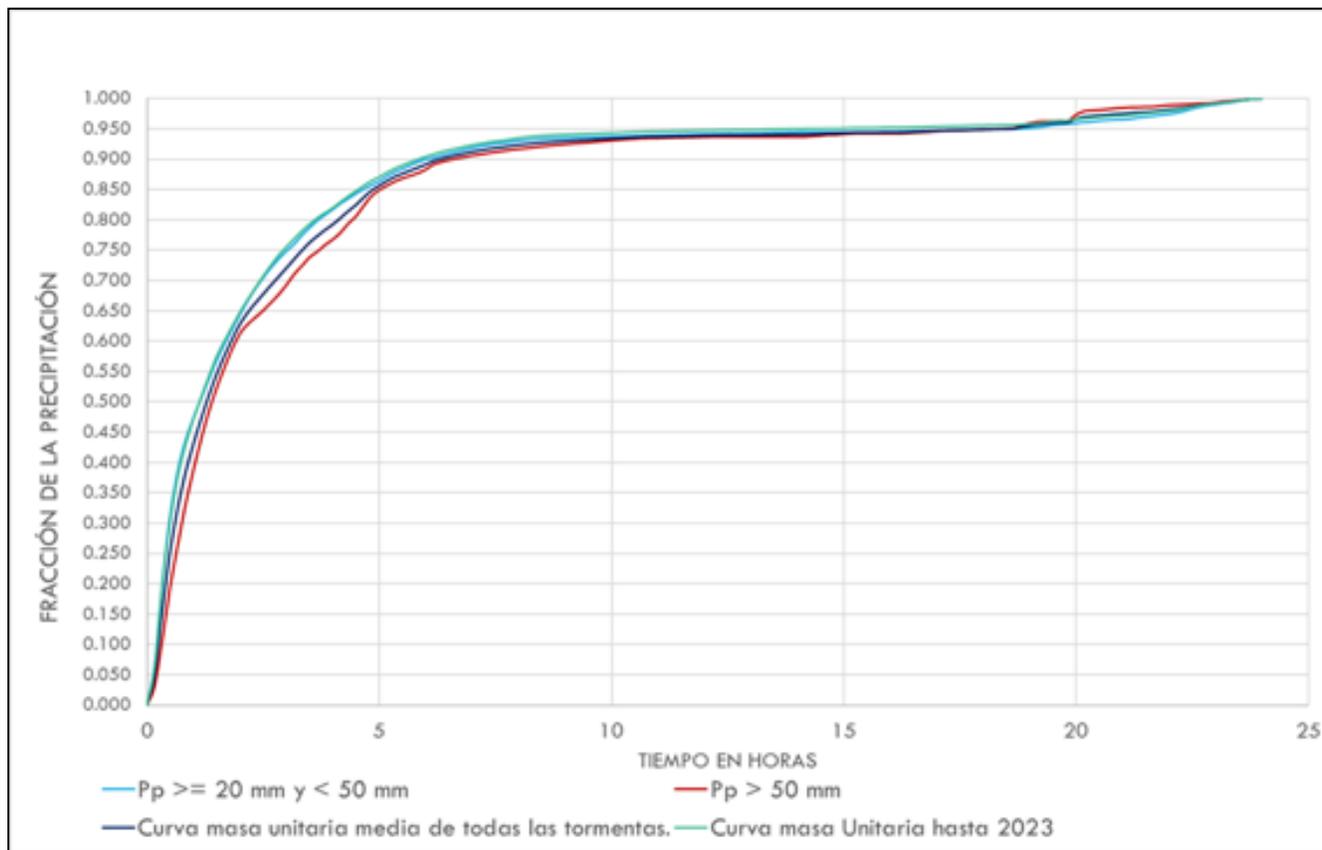


Ilustración A 15. Patrón de distribución de la lluvia en la EMA del IMTA

A continuación, se construye el hietograma unitario hasta el 2023 y se observa en la siguiente tabla y figura.



Tabla A 24. Relación de la precipitación horaria respecto a la de 24 horas (Pd/P24) de la EMA IMTA

Tiempo (h)	Curva masa unitaria	Hietograma unitario
0.00	0	0
0.17	0.0641	0.0641
0.33	0.1988	0.1347
0.50	0.3022	0.1034
0.67	0.3774	0.0752
0.83	0.4299	0.0525
1.00	0.4710	0.0411
1.17	0.5074	0.0364
1.33	0.5422	0.0348
1.50	0.5741	0.0319
1.67	0.6000	0.0259
1.83	0.6239	0.0238
2.00	0.6473	0.0234
2.17	0.6685	0.0212
2.33	0.6878	0.0193
2.50	0.7070	0.0192
2.67	0.7246	0.0176
2.83	0.7416	0.0170
3.00	0.7554	0.0138
3.17	0.7682	0.0128
3.33	0.7817	0.0135
3.50	0.7928	0.0111
3.67	0.8033	0.0105
3.83	0.8115	0.0082
4.00	0.8198	0.0083
4.17	0.8296	0.0097
4.33	0.8388	0.0092
4.50	0.8477	0.0089
4.67	0.8562	0.0085
4.83	0.8642	0.0080
5.00	0.8705	0.0063
5.17	0.8779	0.0075
5.33	0.8846	0.0066
5.50	0.8898	0.0053





Tiempo (h)	Curva masa unitaria	Hietograma unitario
5.67	0.8950	0.0051
5.83	0.8998	0.0048
6.00	0.9041	0.0044
6.17	0.9082	0.0040
6.33	0.9120	0.0038
6.50	0.9149	0.0029
6.67	0.9177	0.0028
6.83	0.9206	0.0029
7.00	0.9233	0.0027
7.17	0.9256	0.0023
7.33	0.9277	0.0021
7.50	0.9295	0.0018
7.67	0.9309	0.0014
7.83	0.9329	0.0020
8.00	0.9350	0.0021
8.17	0.9366	0.0016
8.33	0.9379	0.0013
8.50	0.9390	0.0010
8.67	0.9397	0.0007
8.83	0.9402	0.0005
9.00	0.9407	0.0006
9.17	0.9410	0.0003
9.33	0.9415	0.0005
9.50	0.9419	0.0004
9.67	0.9422	0.0004
9.83	0.9430	0.0008
10.00	0.9434	0.0004
10.17	0.9438	0.0005
10.33	0.9445	0.0006
10.50	0.9451	0.0006
10.67	0.9455	0.0005
10.83	0.9460	0.0004
11.00	0.9462	0.0002
11.17	0.9464	0.0002
11.33	0.9467	0.0003
11.50	0.9470	0.0003
11.67	0.9471	0.0002





Tiempo (h)	Curva masa unitaria	Hietograma unitario
11.83	0.9475	0.0004
12.00	0.9477	0.0002
12.17	0.9478	0.0002
12.33	0.9480	0.0002
12.50	0.9481	0.0001
12.67	0.9483	0.0001
12.83	0.9483	0.0001
13.00	0.9484	0.0001
13.17	0.9486	0.0001
13.33	0.9492	0.0006
13.50	0.9494	0.0003
13.67	0.9496	0.0002
13.83	0.9498	0.0002
14.00	0.9500	0.0002
14.17	0.9502	0.0002
14.33	0.9503	0.0001
14.50	0.9504	0.0001
14.67	0.9507	0.0003
14.83	0.9507	0.0000
15.00	0.9509	0.0002
15.17	0.9514	0.0005
15.33	0.9516	0.0001
15.50	0.9517	0.0001
15.67	0.9517	0.0001
15.83	0.9521	0.0004
16.00	0.9523	0.0001
16.17	0.9524	0.0001
16.33	0.9526	0.0002
16.50	0.9530	0.0004
16.67	0.9533	0.0002
16.83	0.9535	0.0003
17.00	0.9539	0.0004
17.17	0.9541	0.0002
17.33	0.9544	0.0003
17.50	0.9545	0.0001
17.67	0.9549	0.0004
17.83	0.9554	0.0005





Tiempo (h)	Curva masa unitaria	Hietograma unitario
18.00	0.9556	0.0002
18.17	0.9558	0.0002
18.33	0.9560	0.0001
18.50	0.9561	0.0002
18.67	0.9564	0.0003
18.83	0.9572	0.0008
19.00	0.9580	0.0008
19.17	0.9592	0.0012
19.33	0.9607	0.0015
19.50	0.9624	0.0016
19.67	0.9630	0.0007
19.83	0.9638	0.0008
20.00	0.9657	0.0018
20.17	0.9674	0.0018
20.33	0.9682	0.0008
20.50	0.9697	0.0014
20.67	0.9708	0.0011
20.83	0.9716	0.0008
21.00	0.9720	0.0004
21.17	0.9732	0.0012
21.33	0.9747	0.0015
21.50	0.9758	0.0011
21.67	0.9770	0.0012
21.83	0.9784	0.0014
22.00	0.9797	0.0013
22.17	0.9811	0.0014
22.33	0.9834	0.0022
22.50	0.9863	0.0029
22.67	0.9886	0.0023
22.83	0.9903	0.0018
23.00	0.9918	0.0015
23.17	0.9933	0.0016
23.33	0.9946	0.0012
23.50	0.9967	0.0021
23.67	0.9983	0.0016
23.83	0.9994	0.0010
24.00	1.0000	0.0006



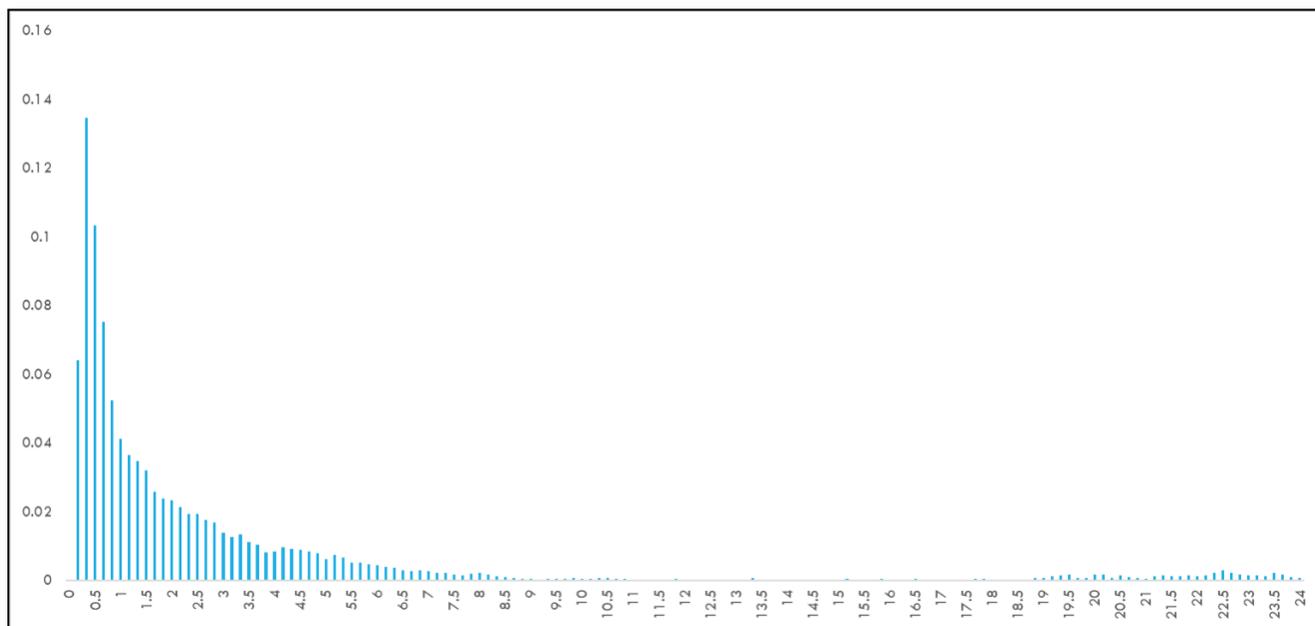


Ilustración A 16. Hietograma unitario hasta 2023

Método de Cheng

El gasto teórico de diseño, que hidrológicamente es el máximo que ha de esperarse durante la etapa de operación del jardín microcuenca del LID por evaluar, se calculará para los períodos de retorno planteados en este mismo informe (2, 5, 10, 20 y 50 años).

Debido a que la densidad de distribución de las estaciones es muy baja sobre las cuencas, en este caso particular se emplearán las isoyetas medias anuales desarrolladas por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes y la distribución temporal de la precipitación se realizó mediante la formulación de Cheng.

En hidrología se han utilizado varias fórmulas para representar la relación entre la duración de una tormenta, su intensidad y el período de retorno en la misma, una de las formulaciones es la Cheng Lung Cheng (Gómez Martínez & Diéguez Jiménez, 2020).

Se requiere los siguientes factores:



- Relación Lluvia – duración (R)

$$R = \frac{P_1^{Tr}}{P_{24}^{Tr}}$$

Ecuación 73

Donde:

P_1^{Tr} Es la precipitación de duración de una hora para un cierto periodo de retorno. Este valor se puede obtener de las curvas intensidad – duración – periodo de retorno editado por la SCT (2020).

P_{24}^{Tr} Es la precipitación de duración de 24 horas para el mismo periodo de retorno, la cual se obtiene de las curvas de SCT.

- Lluvia – período de retorno (F)

$$F = \frac{P_t^{100}}{P_t^{10}}$$

Ecuación 74

Donde:

P_t^{100} Es la precipitación de duración de 24 horas para el periodo de retorno de 100 años. Este valor se puede obtener del análisis de frecuencias (apartado anterior).

P_t^{10} Es la precipitación de duración de 24 horas para el periodo de retorno de 10 años. Este valor se puede obtener del análisis de frecuencias (apartado anterior).

Posteriormente se aplica la fórmula propuesta por Cheng que permite calcular la precipitación para duraciones de tormentas de t (en minutos) y periodo de retorno Tr, la cual está dada por la siguiente ecuación:

$$P_t^{Tr} = \frac{a * P_1^{10} \log(10^{2-F} * Tr^{F-1})t}{60(t + b)^c}$$

Ecuación 75

En la referencia de Campos (1987) viene un programa en el lenguaje de programación Basic, en el cual, se utiliza los logaritmos naturales la siguiente ecuación:



$$P_t^{Tr} = \frac{a * P_1^{10} \ln(10^{2-F} * Tr^{F-1})t}{60(t + b)^c \ln(10)}$$

Ecuación 76

Donde P_1^{10} es la lluvia de duración de una hora y período de retorno de 10 años, en milímetros; a, b y c son parámetros función del coeficiente R, que pueden estimarse mediante las siguientes ecuaciones (Campos, 1987):

$$a = 1.13171955 + 37.2614945R - 58.2203446R^2 + 387.242993R^3 - 357.121482R^4$$

Ecuación 77

$$b = -7.784969 + 59.5314751R - 120.215256R^2 + 246.112571R^2 + 246.112571R^3 - 203.278193R^4$$

Ecuación 78

$$c = 0.000507846976 + 3.92287365R - 9.60400232R^2 + 14.7036951R^3 - 9.2783025R^4$$

Ecuación 79

Para la determinación del parámetro R de la fórmula de Cheng, se utilizaron los planos de Isoyetas de la SCT (ver siguientes figuras) en los cuales se tiene que la precipitación con duración de 1 hr y $Tr=10$ años es de 65.0 mm, y para la de duración de 24 hr e igual período de retorno tiene un valor de 100.0 mm, por lo cual el valor del cociente R es de $R=65.0/100.0=0.65$.

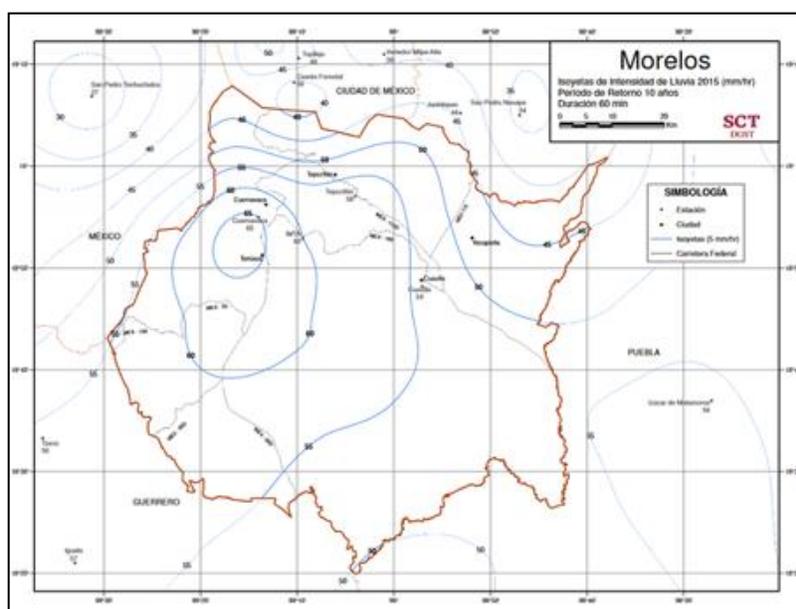


Ilustración A 17. Isoyetas de intensidad para un periodo de retorno de 10 años y una duración de 24 horas para el estado de Morelos (SCT, 2022)



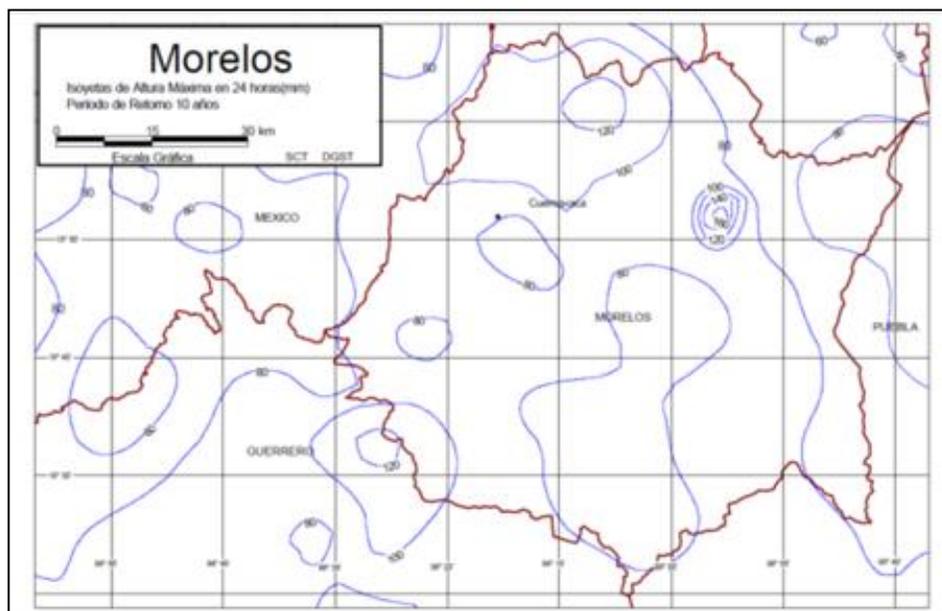


Ilustración A 18. Isoyetas de precipitación para un periodo de retorno de 10 años y una duración de 24 hora para el estado de Morelos (SCT, 2015)

Entonces los valores de los parámetros a, b y c son:

$$a = 43.3516, \quad b = 11.4218 \text{ y } c = 0.8745$$

El parámetro F se determinó con los valores para las precipitaciones con duración de 24 hr y períodos de retorno de 10 y 100 años (calculado con el análisis de frecuencias), por lo que:

$$F = \frac{P_t^{100}}{P_t^{10}} = \frac{143.42}{99.9} = 1.436$$

El valor de P_1^{10} que es la precipitación para el periodo de retorno de 10 años con una duración de 1 hora, se calcula multiplicando el factor R por la precipitación obtenida del análisis de frecuencias una vez corregida por el intervalo fijo de observación.

$$P_1^{10} = R(P_{24}^{10}) = 0.65(99.9) = 64.935mm$$

Sustituyendo el valor de F y los valores de los parámetros a, b, y c, en la fórmula de Cheng, se obtiene la precipitación total correspondiente a cualquier duración que en este caso es de 24 horas (con intervalos de tiempo de 10 minutos).



Al aplicar el método de Cheng, se obtiene el siguiente resultado:

Tabla A 25. Precipitaciones máximas en mm para duraciones en minutos

Período de retorno (años)	Precipitaciones máximas en mm para duraciones en minutos				
	10	30	60	90	120
2	22.377	37.712	46.839	51.702	54.958
5	27.954	47.112	58.514	64.590	68.657
10	32.174	54.223	67.346	74.338	79.020
20	36.393	61.334	76.177	84.087	89.383
50	41.971	70.735	87.852	96.975	103.082
100	46.190	77.846	96.684	106.724	113.445

Tabla A 26. Precipitaciones máximas en mm para duraciones en minutos

Período de retorno (años)	Precipitaciones máximas en mm para duraciones en minutos				
	10	30	60	90	120
2	134.260	75.424	46.839	34.468	27.479
5	167.725	94.225	58.514	43.060	34.329
10	193.041	108.447	67.346	49.559	39.510
20	218.357	122.669	76.177	56.058	44.692
50	251.823	141.469	87.852	64.650	51.541
100	277.139	155.691	96.684	71.149	56.723

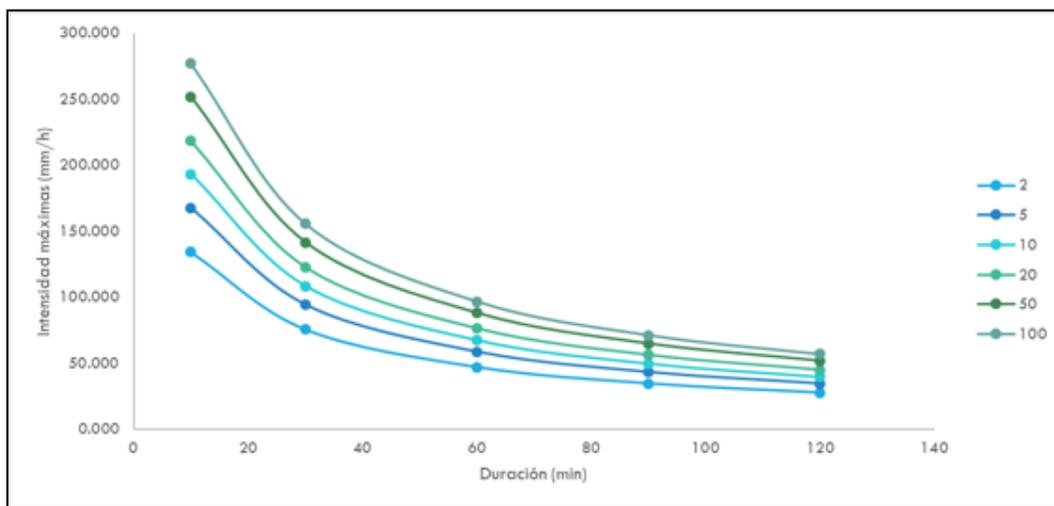


Ilustración A 19. Curvas IDT método de Cheng



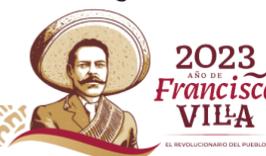


Si las curva masa obtenidas con la aplicación de la fórmula de Cheng se divide entre la precipitación total en las 24 horas, entonces se obtienen curvas masas unitarias, que para el caso de la ciudad de Jiutepec se muestran en el “Estudio hidrológico para determinar los gastos de entrada al sistema de canales del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua” (Gómez Martínez & Diéguez Jiménez, 2020).

A partir de las intensidades calculadas y presentadas en la imagen anterior, se calcularon las alturas de precipitación para cada período de retomo, como se pueden visualizar en la siguiente tabla.

Tabla A 27. Precipitación a partir del método de Cheng

Tiempo(minutos)	TR = 2 años		TR = 5 años		TR = 10 años		TR = 20 años		TR = 50 años	
	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.50	150.70	16.30	187.60	20.30	215.50	23.30	243.40	26.40	280.30	30.40
13.00	115.30	25.00	143.50	31.10	164.80	35.70	186.10	40.30	214.30	46.40
19.50	93.80	30.50	116.80	38.00	134.20	43.60	151.50	49.20	174.50	56.70
26.00	79.40	34.40	98.80	42.80	113.50	49.20	128.20	55.60	147.60	64.00
32.50	69.00	37.40	85.90	46.50	98.60	53.40	111.40	60.30	128.30	69.50
39.00	61.10	39.70	76.10	49.40	87.40	56.80	98.70	64.10	113.60	73.90
45.50	54.90	41.70	68.40	51.80	78.50	59.60	88.70	67.30	102.10	77.40
52.00	49.90	43.30	62.20	53.90	71.40	61.90	80.60	69.90	92.90	80.50
58.50	45.80	44.70	57.00	55.60	65.50	63.90	74.00	72.10	85.20	83.10
65.00	42.40	45.90	52.70	57.10	60.60	65.60	68.40	74.10	78.80	85.30
71.50	39.40	47.00	49.10	58.50	56.40	67.20	63.60	75.80	73.30	87.30
78.00	36.90	47.90	45.90	59.70	52.70	68.50	59.50	77.40	68.60	89.10
84.50	34.70	48.80	43.10	60.80	49.60	69.80	56.00	78.80	64.40	90.80
91.00	32.70	49.60	40.70	61.70	46.80	70.90	52.80	80.10	60.80	92.20
97.50	31.00	50.30	38.60	62.60	44.30	72.00	50.00	81.30	57.60	93.60
104.00	29.40	51.00	36.60	63.50	42.10	72.90	47.50	82.40	54.70	94.80
110.50	28.00	51.60	34.90	64.30	40.10	73.80	45.30	83.40	52.10	96.00
117.00	26.80	52.20	33.30	65.00	38.30	74.60	43.20	84.30	49.80	97.10
123.50	25.60	52.80	31.90	65.70	36.60	75.40	41.40	85.20	47.70	98.10
130.00	24.60	53.30	30.60	66.30	35.10	76.20	39.70	86.00	45.70	99.00
136.50	23.60	53.70	29.40	66.90	33.80	76.80	38.10	86.80	43.90	99.90
143.00	22.70	54.20	28.30	67.50	32.50	77.50	36.70	87.50	42.30	100.80
149.50	21.90	54.60	27.30	68.00	31.30	78.10	35.40	88.20	40.80	101.60
156.00	21.20	55.00	26.30	68.50	30.30	78.70	34.20	88.90	39.40	102.30





Tiempo(minutos)	TR = 2 años		TR = 5 años		TR = 10 años		TR = 20 años		TR = 50 años	
	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)
162.50	20.50	55.40	25.50	69.00	29.30	79.30	33.10	89.50	38.10	103.10
169.00	19.80	55.80	24.70	69.50	28.30	79.80	32.00	90.10	36.80	103.80
175.50	19.20	56.20	23.90	69.90	27.50	80.30	31.00	90.70	35.70	104.40
182.00	18.60	56.50	23.20	70.30	26.60	80.80	30.10	91.20	34.60	105.10
188.50	18.10	56.80	22.50	70.70	25.90	81.30	29.20	91.80	33.60	105.70
195.00	17.60	57.10	21.90	71.10	25.10	81.70	28.40	92.30	32.70	106.30
201.50	17.10	57.50	21.30	71.50	24.50	82.10	27.60	92.80	31.80	106.80
208.00	16.70	57.70	20.70	71.90	23.80	82.60	26.90	93.20	31.00	107.40
214.50	16.20	58.00	20.20	72.20	23.20	83.00	26.20	93.70	30.20	107.90
221.00	15.80	58.30	19.70	72.60	22.60	83.40	25.60	94.10	29.40	108.40
227.50	15.40	58.60	19.20	72.90	22.10	83.70	24.90	94.60	28.70	108.90
234.00	15.10	58.80	18.80	73.20	21.60	84.10	24.40	95.00	28.00	109.40
240.50	14.70	59.10	18.30	73.50	21.10	84.50	23.80	95.40	27.40	109.80
247.00	14.40	59.30	17.90	73.80	20.60	84.80	23.30	95.80	26.80	110.30
253.50	14.10	59.50	17.50	74.10	20.20	85.10	22.80	96.20	26.20	110.70
260.00	13.80	59.80	17.20	74.40	19.70	85.50	22.30	96.50	25.60	111.10
266.50	13.50	60.00	16.80	74.70	19.30	85.80	21.80	96.90	25.10	111.60
273.00	13.20	60.20	16.50	74.90	18.90	86.10	21.40	97.20	24.60	112.00
279.50	13.00	60.40	16.10	75.20	18.50	86.40	20.90	97.60	24.10	112.40
286.00	12.70	60.60	15.80	75.50	18.20	86.70	20.50	97.90	23.70	112.70
292.50	12.50	60.80	15.50	75.70	17.80	87.00	20.10	98.20	23.20	113.10
299.00	12.20	61.00	15.20	76.00	17.50	87.20	19.80	98.50	22.80	113.50
305.50	12.00	61.20	15.00	76.20	17.20	87.50	19.40	98.80	22.40	113.80
312.00	11.80	61.40	14.70	76.40	16.90	87.80	19.10	99.10	22.00	114.20
318.50	11.60	61.60	14.40	76.60	16.60	88.00	18.70	99.40	21.60	114.50
325.00	11.40	61.80	14.20	76.90	16.30	88.30	18.40	99.70	21.20	114.80
331.50	11.20	61.90	14.00	77.10	16.00	88.60	18.10	100.00	20.80	115.20
338.00	11.00	62.10	13.70	77.30	15.80	88.80	17.80	100.30	20.50	115.50
344.50	10.80	62.30	13.50	77.50	15.50	89.00	17.50	100.60	20.20	115.80
351.00	10.70	62.40	13.30	77.70	15.30	89.30	17.20	100.80	19.80	116.10
357.50	10.50	62.60	13.10	77.90	15.00	89.50	17.00	101.10	19.50	116.40
364.00	10.30	62.80	12.90	78.10	14.80	89.70	16.70	101.30	19.20	116.70
370.50	10.20	62.90	12.70	78.30	14.60	89.90	16.50	101.60	18.90	117.00
377.00	10.00	63.10	12.50	78.50	14.30	90.20	16.20	101.80	18.70	117.30
383.50	9.90	63.20	12.30	78.70	14.10	90.40	16.00	102.10	18.40	117.50
390.00	9.70	63.40	12.10	78.90	13.90	90.60	15.70	102.30	18.10	117.80





Tiempo(minutos)	TR = 2 años		TR = 5 años		TR = 10 años		TR = 20 años		TR = 50 años	
	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)
396.50	9.60	63.50	12.00	79.00	13.70	90.80	15.50	102.50	17.90	118.10
403.00	9.50	63.60	11.80	79.20	13.50	91.00	15.30	102.80	17.60	118.30
409.50	9.30	63.80	11.60	79.40	13.40	91.20	15.10	103.00	17.40	118.60
416.00	9.20	63.90	11.50	79.60	13.20	91.40	14.90	103.20	17.10	118.90
422.50	9.10	64.10	11.30	79.70	13.00	91.60	14.70	103.40	16.90	119.10
429.00	9.00	64.20	11.20	79.90	12.80	91.80	14.50	103.70	16.70	119.40
435.50	8.90	64.30	11.00	80.10	12.70	92.00	14.30	103.90	16.50	119.60
442.00	8.70	64.40	10.90	80.20	12.50	92.10	14.10	104.10	16.30	119.80
448.50	8.60	64.60	10.80	80.40	12.40	92.30	13.90	104.30	16.10	120.10
455.00	8.50	64.70	10.60	80.50	12.20	92.50	13.80	104.50	15.90	120.30
461.50	8.40	64.80	10.50	80.70	12.00	92.70	13.60	104.70	15.70	120.50
468.00	8.30	64.90	10.40	80.80	11.90	92.90	13.40	104.90	15.50	120.80
474.50	8.20	65.10	10.20	81.00	11.80	93.00	13.30	105.10	15.30	121.00
481.00	8.10	65.20	10.10	81.10	11.60	93.20	13.10	105.30	15.10	121.20
487.50	8.00	65.30	10.00	81.30	11.50	93.40	13.00	105.40	14.90	121.40
494.00	7.90	65.40	9.90	81.40	11.40	93.50	12.80	105.60	14.80	121.60
500.50	7.90	65.50	9.80	81.60	11.20	93.70	12.70	105.80	14.60	121.80
507.00	7.80	65.60	9.70	81.70	11.10	93.80	12.50	106.00	14.40	122.00
513.50	7.70	65.70	9.60	81.80	11.00	94.00	12.40	106.20	14.30	122.30
520.00	7.60	65.90	9.50	82.00	10.90	94.20	12.30	106.30	14.10	122.50
526.50	7.50	66.00	9.40	82.10	10.70	94.30	12.10	106.50	14.00	122.70
533.00	7.40	66.10	9.30	82.20	10.60	94.50	12.00	106.70	13.80	122.90
539.50	7.40	66.20	9.20	82.40	10.50	94.60	11.90	106.90	13.70	123.00
546.00	7.30	66.30	9.10	82.50	10.40	94.80	11.80	107.00	13.50	123.20
552.50	7.20	66.40	9.00	82.60	10.30	94.90	11.60	107.20	13.40	123.40
559.00	7.10	66.50	8.90	82.70	10.20	95.00	11.50	107.40	13.30	123.60
565.50	7.10	66.60	8.80	82.90	10.10	95.20	11.40	107.50	13.10	123.80
572.00	7.00	66.70	8.70	83.00	10.00	95.30	11.30	107.70	13.00	124.00
578.50	6.90	66.80	8.60	83.10	9.90	95.50	11.20	107.80	12.90	124.20
585.00	6.90	66.90	8.50	83.20	9.80	95.60	11.10	108.00	12.80	124.30
591.50	6.80	67.00	8.50	83.40	9.70	95.70	11.00	108.10	12.60	124.50
598.00	6.70	67.10	8.40	83.50	9.60	95.90	10.90	108.30	12.50	124.70
604.50	6.70	67.20	8.30	83.60	9.50	96.00	10.80	108.40	12.40	124.90
611.00	6.60	67.20	8.20	83.70	9.40	96.10	10.70	108.60	12.30	125.00
617.50	6.50	67.30	8.10	83.80	9.40	96.30	10.60	108.70	12.20	125.20
624.00	6.50	67.40	8.10	83.90	9.30	96.40	10.50	108.90	12.10	125.40





Tiempo(minutos)	TR = 2 años		TR = 5 años		TR = 10 años		TR = 20 años		TR = 50 años	
	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)
630.50	6.40	67.50	8.00	84.00	9.20	96.50	10.40	109.00	11.90	125.50
637.00	6.40	67.60	7.90	84.10	9.10	96.70	10.30	109.20	11.80	125.70
643.50	6.30	67.70	7.90	84.30	9.00	96.80	10.20	109.30	11.70	125.90
650.00	6.30	67.80	7.80	84.40	8.90	96.90	10.10	109.50	11.60	126.00
656.50	6.20	67.90	7.70	84.50	8.90	97.00	10.00	109.60	11.50	126.20
663.00	6.10	68.00	7.70	84.60	8.80	97.20	9.90	109.70	11.40	126.40
669.50	6.10	68.00	7.60	84.70	8.70	97.30	9.80	109.90	11.30	126.50
676.00	6.00	68.10	7.50	84.80	8.60	97.40	9.80	110.00	11.20	126.70
682.50	6.00	68.20	7.50	84.90	8.60	97.50	9.70	110.10	11.10	126.80
689.00	5.90	68.30	7.40	85.00	8.50	97.60	9.60	110.30	11.10	127.00
695.50	5.90	68.40	7.30	85.10	8.40	97.70	9.50	110.40	11.00	127.10
702.00	5.90	68.40	7.30	85.20	8.40	97.90	9.40	110.50	10.90	127.30
708.50	5.80	68.50	7.20	85.30	8.30	98.00	9.40	110.70	10.80	127.40
715.00	5.80	68.60	7.20	85.40	8.20	98.10	9.30	110.80	10.70	127.60
721.50	5.70	68.70	7.10	85.50	8.20	98.20	9.20	110.90	10.60	127.70
728.00	5.70	68.80	7.10	85.60	8.10	98.30	9.20	111.00	10.50	127.90
734.50	5.60	68.80	7.00	85.70	8.00	98.40	9.10	111.20	10.50	128.00
741.00	5.60	68.90	6.90	85.80	8.00	98.50	9.00	111.30	10.40	128.10
747.50	5.50	69.00	6.90	85.90	7.90	98.60	8.90	111.40	10.30	128.30
754.00	5.50	69.10	6.80	86.00	7.90	98.70	8.90	111.50	10.20	128.40
760.50	5.50	69.10	6.80	86.10	7.80	98.80	8.80	111.60	10.10	128.60
767.00	5.40	69.20	6.70	86.10	7.70	99.00	8.70	111.80	10.10	128.70
773.50	5.40	69.30	6.70	86.20	7.70	99.10	8.70	111.90	10.00	128.80
780.00	5.30	69.40	6.60	86.30	7.60	99.20	8.60	112.00	9.90	129.00
786.50	5.30	69.40	6.60	86.40	7.60	99.30	8.60	112.10	9.80	129.10
793.00	5.30	69.50	6.50	86.50	7.50	99.40	8.50	112.20	9.80	129.20
799.50	5.20	69.60	6.50	86.60	7.50	99.50	8.40	112.30	9.70	129.40
806.00	5.20	69.60	6.50	86.70	7.40	99.60	8.40	112.50	9.60	129.50
812.50	5.10	69.70	6.40	86.80	7.40	99.70	8.30	112.60	9.60	129.60
819.00	5.10	69.80	6.40	86.90	7.30	99.80	8.30	112.70	9.50	129.70
825.50	5.10	69.80	6.30	86.90	7.30	99.90	8.20	112.80	9.40	129.90
832.00	5.00	69.90	6.30	87.00	7.20	100.00	8.10	112.90	9.40	130.00
838.50	5.00	70.00	6.20	87.10	7.20	100.10	8.10	113.00	9.30	130.10
845.00	5.00	70.00	6.20	87.20	7.10	100.20	8.00	113.10	9.20	130.30
851.50	4.90	70.10	6.10	87.30	7.10	100.20	8.00	113.20	9.20	130.40
858.00	4.90	70.20	6.10	87.40	7.00	100.30	7.90	113.30	9.10	130.50





Tiempo(minutos)	TR = 2 años		TR = 5 años		TR = 10 años		TR = 20 años		TR = 50 años	
	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)
864.50	4.90	70.20	6.10	87.40	7.00	100.40	7.90	113.40	9.10	130.60
871.00	4.80	70.30	6.00	87.50	6.90	100.50	7.80	113.50	9.00	130.70
877.50	4.80	70.40	6.00	87.60	6.90	100.60	7.80	113.60	8.90	130.90
884.00	4.80	70.40	6.00	87.70	6.80	100.70	7.70	113.70	8.90	131.00
890.50	4.80	70.50	5.90	87.80	6.80	100.80	7.70	113.80	8.80	131.10
897.00	4.70	70.60	5.90	87.80	6.70	100.90	7.60	114.00	8.80	131.20
903.50	4.70	70.60	5.80	87.90	6.70	101.00	7.60	114.10	8.70	131.30
910.00	4.70	70.70	5.80	88.00	6.70	101.10	7.50	114.20	8.70	131.40
916.50	4.60	70.80	5.80	88.10	6.60	101.20	7.50	114.30	8.60	131.60
923.00	4.60	70.80	5.70	88.10	6.60	101.20	7.40	114.40	8.60	131.70
929.50	4.60	70.90	5.70	88.20	6.50	101.30	7.40	114.40	8.50	131.80
936.00	4.50	70.90	5.70	88.30	6.50	101.40	7.30	114.50	8.50	131.90
942.50	4.50	71.00	5.60	88.40	6.50	101.50	7.30	114.60	8.40	132.00
949.00	4.50	71.10	5.60	88.40	6.40	101.60	7.30	114.70	8.40	132.10
955.50	4.50	71.10	5.60	88.50	6.40	101.70	7.20	114.80	8.30	132.20
962.00	4.40	71.20	5.50	88.60	6.30	101.80	7.20	114.90	8.30	132.30
968.50	4.40	71.20	5.50	88.70	6.30	101.80	7.10	115.00	8.20	132.50
975.00	4.40	71.30	5.50	88.70	6.30	101.90	7.10	115.10	8.20	132.60
981.50	4.40	71.30	5.40	88.80	6.20	102.00	7.00	115.20	8.10	132.70
988.00	4.30	71.40	5.40	88.90	6.20	102.10	7.00	115.30	8.10	132.80
994.50	4.30	71.50	5.40	88.90	6.20	102.20	7.00	115.40	8.00	132.90
1001.00	4.30	71.50	5.30	89.00	6.10	102.30	6.90	115.50	8.00	133.00
1007.50	4.30	71.60	5.30	89.10	6.10	102.30	6.90	115.60	7.90	133.10
1014.00	4.20	71.60	5.30	89.20	6.10	102.40	6.80	115.70	7.90	133.20
1020.50	4.20	71.70	5.20	89.20	6.00	102.50	6.80	115.80	7.80	133.30
1027.00	4.20	71.70	5.20	89.30	6.00	102.60	6.80	115.90	7.80	133.40
1033.50	4.20	71.80	5.20	89.40	6.00	102.70	6.70	115.90	7.80	133.50
1040.00	4.10	71.90	5.20	89.40	5.90	102.70	6.70	116.00	7.70	133.60
1046.50	4.10	71.90	5.10	89.50	5.90	102.80	6.70	116.10	7.70	133.70
1053.00	4.10	72.00	5.10	89.60	5.90	102.90	6.60	116.20	7.60	133.80
1059.50	4.10	72.00	5.10	89.60	5.80	103.00	6.60	116.30	7.60	133.90
1066.00	4.10	72.10	5.00	89.70	5.80	103.00	6.60	116.40	7.50	134.00
1072.50	4.00	72.10	5.00	89.80	5.80	103.10	6.50	116.50	7.50	134.10
1079.00	4.00	72.20	5.00	89.80	5.70	103.20	6.50	116.50	7.50	134.20
1085.50	4.00	72.20	5.00	89.90	5.70	103.30	6.40	116.60	7.40	134.30
1092.00	4.00	72.30	4.90	90.00	5.70	103.30	6.40	116.70	7.40	134.40





Tiempo(minutos)	TR = 2 años		TR = 5 años		TR = 10 años		TR = 20 años		TR = 50 años	
	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)
1098.50	4.00	72.30	4.90	90.00	5.60	103.40	6.40	116.80	7.30	134.50
1105.00	3.90	72.40	4.90	90.10	5.60	103.50	6.30	116.90	7.30	134.60
1111.50	3.90	72.40	4.90	90.20	5.60	103.60	6.30	117.00	7.30	134.70
1118.00	3.90	72.50	4.80	90.20	5.60	103.60	6.30	117.00	7.20	134.80
1124.50	3.90	72.50	4.80	90.30	5.50	103.70	6.20	117.10	7.20	134.90
1131.00	3.90	72.60	4.80	90.30	5.50	103.80	6.20	117.20	7.20	135.00
1137.50	3.80	72.60	4.80	90.40	5.50	103.80	6.20	117.30	7.10	135.10
1144.00	3.80	72.70	4.70	90.50	5.50	103.90	6.20	117.40	7.10	135.20
1150.50	3.80	72.70	4.70	90.50	5.40	104.00	6.10	117.50	7.10	135.20
1157.00	3.80	72.80	4.70	90.60	5.40	104.10	6.10	117.50	7.00	135.30
1163.50	3.80	72.80	4.70	90.70	5.40	104.10	6.10	117.60	7.00	135.40
1170.00	3.70	72.90	4.70	90.70	5.30	104.20	6.00	117.70	6.90	135.50
1176.50	3.70	72.90	4.60	90.80	5.30	104.30	6.00	117.80	6.90	135.60
1183.00	3.70	73.00	4.60	90.80	5.30	104.30	6.00	117.80	6.90	135.70
1189.50	3.70	73.00	4.60	90.90	5.30	104.40	5.90	117.90	6.80	135.80
1196.00	3.70	73.10	4.60	91.00	5.20	104.50	5.90	118.00	6.80	135.90
1202.50	3.60	73.10	4.50	91.00	5.20	104.50	5.90	118.10	6.80	136.00
1209.00	3.60	73.20	4.50	91.10	5.20	104.60	5.90	118.20	6.80	136.10
1215.50	3.60	73.20	4.50	91.10	5.20	104.70	5.80	118.20	6.70	136.10
1222.00	3.60	73.30	4.50	91.20	5.10	104.70	5.80	118.30	6.70	136.20
1228.50	3.60	73.30	4.50	91.20	5.10	104.80	5.80	118.40	6.70	136.30
1235.00	3.60	73.40	4.40	91.30	5.10	104.90	5.80	118.50	6.60	136.40
1241.50	3.50	73.40	4.40	91.40	5.10	104.90	5.70	118.50	6.60	136.50
1248.00	3.50	73.50	4.40	91.40	5.00	105.00	5.70	118.60	6.60	136.60
1254.50	3.50	73.50	4.40	91.50	5.00	105.10	5.70	118.70	6.50	136.70
1261.00	3.50	73.50	4.40	91.50	5.00	105.10	5.70	118.80	6.50	136.70
1267.50	3.50	73.60	4.30	91.60	5.00	105.20	5.60	118.80	6.50	136.80
1274.00	3.50	73.60	4.30	91.60	5.00	105.30	5.60	118.90	6.40	136.90
1280.50	3.50	73.70	4.30	91.70	4.90	105.30	5.60	119.00	6.40	137.00
1287.00	3.40	73.70	4.30	91.80	4.90	105.40	5.50	119.00	6.40	137.10
1293.50	3.40	73.80	4.30	91.80	4.90	105.50	5.50	119.10	6.40	137.20
1300.00	3.40	73.80	4.20	91.90	4.90	105.50	5.50	119.20	6.30	137.20
1306.50	3.40	73.90	4.20	91.90	4.80	105.60	5.50	119.30	6.30	137.30
1313.00	3.40	73.90	4.20	92.00	4.80	105.70	5.50	119.30	6.30	137.40
1319.50	3.40	73.90	4.20	92.00	4.80	105.70	5.40	119.40	6.30	137.50
1326.00	3.30	74.00	4.20	92.10	4.80	105.80	5.40	119.50	6.20	137.60





Tiempo(minutos)	TR = 2 años		TR = 5 años		TR = 10 años		TR = 20 años		TR = 50 años	
	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)	i(mm/hr)	H(mm)
1332.50	3.30	74.00	4.10	92.10	4.80	105.80	5.40	119.50	6.20	137.60
1339.00	3.30	74.10	4.10	92.20	4.70	105.90	5.40	119.60	6.20	137.70
1345.50	3.30	74.10	4.10	92.20	4.70	106.00	5.30	119.70	6.10	137.80
1352.00	3.30	74.20	4.10	92.30	4.70	106.00	5.30	119.70	6.10	137.90
1358.50	3.30	74.20	4.10	92.30	4.70	106.10	5.30	119.80	6.10	138.00
1365.00	3.30	74.20	4.10	92.40	4.70	106.10	5.30	119.90	6.10	138.00
1371.50	3.20	74.30	4.00	92.50	4.60	106.20	5.20	119.90	6.00	138.10
1378.00	3.20	74.30	4.00	92.50	4.60	106.30	5.20	120.00	6.00	138.20
1384.50	3.20	74.40	4.00	92.60	4.60	106.30	5.20	120.10	6.00	138.30
1391.00	3.20	74.40	4.00	92.60	4.60	106.40	5.20	120.20	6.00	138.40
1397.50	3.20	74.40	4.00	92.70	4.60	106.40	5.20	120.20	5.90	138.40
1404.00	3.20	74.50	4.00	92.70	4.60	106.50	5.10	120.30	5.90	138.50
1410.50	3.20	74.50	3.90	92.80	4.50	106.60	5.10	120.30	5.90	138.60
1417.00	3.20	74.60	3.90	92.80	4.50	106.60	5.10	120.40	5.90	138.70
1423.50	3.10	74.60	3.90	92.90	4.50	106.70	5.10	120.50	5.80	138.70
1430.00	3.10	74.70	3.90	92.90	4.50	106.70	5.10	120.50	5.80	138.80
1436.50	3.10	74.70	3.90	93.00	4.50	106.80	5.00	120.60	5.80	138.90

Tormentas para duraciones de 1 a 4 horas

Con el patrón temporal de las tormentas, considerando una tormenta centrada y con los valores de la precipitación en 24 horas calculados con el análisis de frecuencias, se calcularon las tormentas para duraciones de 1 a 4 horas y para los periodos de retorno de 5 a 50 años. En las siguientes 4 tablas se presentan las tormentas.

Tabla A 28. Tormentas para una duración de 1 hora

Tiempo (hr)	2 años	5 años	10 años	20 años	50 años
0-10	4.2	5.5	6.4	7.2	8.2
10-20	6.7	8.9	10.3	11.6	13.3
20-30	8.8	11.6	13.4	15.1	17.3
30-40	4.9	6.5	7.5	8.5	9.7
40-50	3.4	4.5	5.2	5.9	6.7
50-60	2.7	3.5	4.1	4.6	5.3
Total 1 hr	30.7	40.6	47.0	53.0	60.6





Tabla A 29. Tormentas para una duración de 2 horas

Tiempo (min)	2 años	5 años	10 años	20 años	50 años
0-10	1.5	2.0	2.3	2.6	3.0
10-20	1.6	2.1	2.4	2.7	3.1
20-30	2.1	2.7	3.2	3.6	4.1
30-40	2.4	3.1	3.6	4.1	4.7
40-50	4.2	5.5	6.4	7.2	8.2
50-60	6.7	8.9	10.3	11.6	13.3
60-70	8.8	11.6	13.4	15.1	17.3
70-80	4.9	6.5	7.5	8.5	9.7
80-90	3.4	4.5	5.2	5.9	6.7
90-100	2.7	3.5	4.1	4.6	5.3
100-110	2.3	3.0	3.5	3.9	4.5
110-120	1.7	2.2	2.6	2.9	3.3
Total 2 hr	42.2	55.7	64.5	72.8	83.2

Tabla A 30. Tormentas para una duración de 3 horas

Tiempo (min)	2 años	5 años	10 años	20 años	50 años
0-10	0.9	1.2	1.4	1.6	1.8
10-20	1.1	1.5	1.7	1.9	2.2
20-30	1.3	1.7	1.9	2.2	2.5
30-40	1.4	1.8	2.1	2.4	2.7
40-50	1.6	2.1	2.4	2.7	3.1
50-60	2.1	2.7	3.2	3.6	4.1
60-70	2.4	3.1	3.6	4.1	4.7
70-80	3.4	4.5	5.2	5.9	6.7
80-90	6.7	8.9	10.3	11.6	13.3
90-100	8.8	11.6	13.4	15.1	17.3
100-110	4.2	5.5	6.4	7.2	8.2
110-120	4.9	6.5	7.5	8.5	9.7
120-130	2.7	3.5	4.1	4.6	5.3
130-140	2.3	3.0	3.5	3.9	4.5
140-150	1.7	2.2	2.6	2.9	3.3
150-160	1.5	2.0	2.3	2.6	3.0
160-170	1.3	1.7	1.9	2.2	2.5
170-180	1.1	1.5	1.8	2.0	2.3
Total 3 hr	49.3	65.0	75.3	85.0	97.1





Tabla A 31. Tormentas para una duración de 4 horas

Tiempo (min)	2 años	5 años	10 años	20 años	50 años
0-10	0.5	0.7	0.8	0.9	1.1
10-20	0.7	0.9	1.0	1.2	1.3
20-30	0.9	1.2	1.3	1.5	1.7
30-40	0.9	1.2	1.4	1.6	1.8
40-50	1.1	1.5	1.8	2.0	2.3
50-60	1.3	1.7	1.9	2.2	2.5
60-70	1.5	2.0	2.3	2.6	3.0
70-80	1.7	2.2	2.6	2.9	3.3
80-90	2.3	3.0	3.5	3.9	4.5
90-100	2.7	3.5	4.1	4.6	5.3
100-110	4.9	6.5	7.5	8.5	9.7
110-120	6.7	8.9	10.3	11.6	13.3
120-130	8.8	11.6	13.4	15.1	17.3
130-140	4.2	5.5	6.4	7.2	8.2
140-150	3.4	4.5	5.2	5.9	6.7
150-160	2.4	3.1	3.6	4.1	4.7
160-170	2.1	2.7	3.2	3.6	4.1
170-180	1.6	2.1	2.4	2.7	3.1
180-190	1.4	1.8	2.1	2.4	2.7
190-200	1.3	1.7	1.9	2.2	2.5
200-210	1.1	1.5	1.7	1.9	2.2
210-220	0.8	1.1	1.3	1.4	1.6
220-230	0.7	1.0	1.1	1.2	1.4
230-240	0.5	0.7	0.8	0.9	1.1
Total 4 hr	53.5	70.6	81.8	92.2	105.4

Se tomarán duraciones para 1 y 2 horas debido a que el tiempo de concentración es de 0.8 a 1.4 horas de acuerdo al cálculo del tiempo de concentración efectuado anteriormente y reportado en el presente informe en la sección correspondiente.

Cálculo de las avenidas de diseño

En este apartado se hace el cálculo la avenida o gasto máximo que podría ingresar al IMTA correspondiente a períodos de retorno de 2, 5, 10, 20 y 50 años, este gasto se utilizará en la revisión o rediseño del jardín microcuenca del LID, actualizando la información al 2023.





La conformación del modelo hidráulico-hidrológico comprende desde la recopilación e información fisiográfica e hidrológica, con la finalidad de llevar a cabo un análisis hidrológico e hidráulico, que permita precisar las características del flujo en el cauce, tal cual se estimaron el subcapítulo correspondiente dentro de este mismo informe.

La determinación de los gastos de diseño para jardín LID del IMTA cuyas necesidades han quedado plasmada en el proyecto “Implementación en Campo de un Sistema LID en el IMTA” (Gómez Martínez & Diéguez Jiménez, 2020) y que, para tales efectos y alcances descritos, la herramienta HEC-RAS, representa una herramienta efectiva, que, mediante procesos iterativos aplicados a fórmulas tradicionales de la hidráulica, permite calcular los perfiles hidráulicos del río analizado. Esto permite comprender el comportamiento de la microcuenca.

Para llevar a cabo los objetivos plasmados, se emplea HEC-Ras, con el objetivo de transitar el gasto en el sitio de interés con el modelo alimentado con las características fisiográficas de la cuenca y los datos de la topografía llevada a cabo en campo.

HEC-RAS 4.1.0 ha sido desarrollado para el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE) y desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidráulica de Ingenieros (*Hydrologic Engineering Center, HEC*), software que está disponible de manera gratuita.

Marco Teórico: Metodología de Cálculo del Modelo HEC-RAS

El cálculo de la elevación de la superficie de agua en una sección transversal se realiza de forma iterativa, mediante las siguientes dos ecuaciones.

$$Y_2 + Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_e$$

Ecuación 80

Donde:

Y_2 y Y_1 representa la profundidad del agua en la sección transversal analizada

Z_2 y Z_1 es la elevación del terreno en el tramo analizado

V_2 y V_1 son las velocidades promedio en la sección analizada ($V=Q/A$)

α_2 y α_1 son los coeficientes de velocidad

g es la aceleración de la gravedad

h_e es la pérdida de energía entre la sección 1 y 2.





La pérdida principal de energía h_e entre dos secciones transversales está relacionada con pérdidas por fricción y pérdidas por contracción y expansión:

$$h_e = LS_f + C \left[\alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \right]$$

Ecuación 81

Donde:

L es la longitud del tramo de la sección analizada

S_f es la pendiente de fricción entre ambas secciones

C es el coeficiente de pérdida por expansión o por contracción.

El procedimiento computacional es:

- Se asume una elevación de superficie de agua aguas arriba de la sección transversal (o aguas debajo de la sección transversal, si se desea calcular un perfil supercrítico);
- Basados en esta elevación asumida, se determina la capacidad de transporte total y así como la velocidad principal;
- Con los valores obtenidos en el paso anterior, se calcula la pendiente de fricción y se resuelve la ecuación de pérdida de energía;
- Con los valores obtenidos en los dos pasos anteriores, se resuelve la ecuación de la energía, y
- Se comparan los valores calculados del tirante de agua con los valores asumidos en el primer paso. Se repiten todos los pasos de manera iterativa, hasta que la diferencia entre ellos sea mínima.

El criterio empleado, como se describió en los incisos anteriores es un proceso iterativo. El primer intento de superficie de agua está basado en proyectar la profundidad del agua de una sección transversal, sobre la siguiente sección transversal. Para el segundo intento, el programa vuelve a asumir la elevación de la superficie de agua, pero añadida a un 70% del error obtenido en el primer intento (elevación calculada – elevación asumida). En otras palabras, la elevación nueva será igual a la elevación asumida + 0.70 x (elevación calculada – elevación asumida). El tercer y subsiguiente intento es generalmente basado en un método de la secante proyectando la relación de cambio de las diferencias entre las elevaciones calculadas y asumidas para los dos primeros intentos.





La siguiente ecuación resume el método de la secante:

$$WS_1 = \frac{WS_{1-2} - Err_{1-2} \times ErrAsumido}{Diferencia\ de\ Errores}$$

Ecuación 82

Donde:

WS_1 es la nueva superficie de agua asumida

WS_{1-2} es la superficie de agua asumida en la iteración previa

Err_{1-2} es el error de dos intentos atrás (superficie de agua calculada menos la asumida en la iteración 1-2)

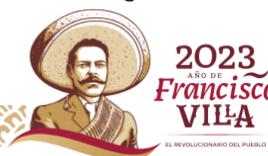
$ErrAsumido$ es la diferencia entre las superficies de agua obtenidas en los dos intentos previos

$Diferencia\ de\ Errores$ es la superficie de agua asumida menos la superficie de agua calculada en la iteración previa, más el error dos intentos previos.

El cambio desde un intento al siguiente está restringido en un máximo del 50.00 % de la profundidad asumida en el intento previo. Si el valor de la Diferencia de Errores es muy pequeño, el método puede fallar, si este valor es menor que $1.0E^{-2}$, no se deberá utilizar este método. Si ocurre esto, el programa calculará un nuevo valor asumido, tomando en cuenta el promedio de los valores de superficie de agua asumido y computado en las iteraciones previas.

El programa está restringido a un número máximo de iteraciones (el número predeterminado es 20) para balancear el perfil hidráulico. Mientras el programa realiza las iteraciones, mantiene un nivel de superficie de agua tal que produce un mínimo de error entre los valores asumidos y calculados. Esta superficie de agua es llamada "superficie de agua con mínimo error". Si el número máximo de iteraciones es alcanzado antes de que se produzca un balance, el programa calculará entonces una profundidad crítica.

El programa verificará entonces si el error asociado con la superficie de agua con error mínimo se encuentra entre uno los rangos de tolerancia predefinida (el programa lo asume con 0.10 m). Si el error mínimo de superficie de agua tuvo un error asociado menor a la tolerancia predeterminada, y esta a su vez se encuentra en el lado correcto de la altura crítica, entonces el programa utilizará esta superficie de agua como una respuesta final, y enviará un mensaje de aviso si esto ocurriese. Si, al contrario, la superficie de agua de error mínimo tuvo un error asociado mayor a la tolerancia predeterminada, o si esta se encuentra en el lado erróneo de la altura crítica, el programa utilizará a la altura crítica como resultado final para la sección





transversal, enviando un mensaje de aviso si esto ocurriese. Tanto la superficie de error mínimo como la altura crítica son únicamente utilizadas en aquellas situaciones en las que se le permite al programa el continuar con la solución de los perfiles hidráulicos.

Cuando se llega a la elevación balanceada para una sección transversal, se realizan verificaciones para asegurar que la elevación se encuentra en el lado correcto del perfil de altura crítica, en caso de requerirse un perfil subcrítico). Si la elevación balanceada se encuentra en el lado erróneo de la superficie de altura crítica, se asume la altura crítica para la sección transversal.

Para un perfil subcrítico, una verificación preliminar para un adecuado régimen de flujo envuelve el análisis del número de Froude. El programa calcula el número de Froude de las superficies de agua “balanceadas”, tanto para el canal principal, como para la sección transversal completa. Si alguno de estos dos números de Froude es mayores que 0.94, entonces el programa verificará el régimen de flujo, mediante el cálculo de una altura crítica con mayor precisión, usando el método de la mínima energía específica. Un número de Froude de 0.94 es usado en vez de 1.00, debido a que los cálculos del número de Froude en canales irregulares no son muy precisos. De esta manera, el uso de un valor de 0.94 se considera conservador, en tanto que el programa calculará una altura crítica con mayor frecuencia de la que podría necesitar.

Clasificación de flujo

La importancia de la clasificación del flujo radica en que el comportamiento hidráulico se analiza bajo distintas concepciones o modelos de flujo, cuyo grado de dificultad aumenta en la medida que las hipótesis se ajustan mejor a la realidad. Los tipos de flujo que se describen a continuación son de principal interés para el objetivo de este trabajo.

- Flujo permanente y no permanente. Esta clasificación obedece a la utilización del tiempo como criterio. Es permanente cuando la velocidad media V en una sección dada se mantiene constante en el tiempo o en un lapso especificado ($\delta V/\delta t=0$). Lo contrario sucede cuando es no permanente o impermanente ($\delta V/\delta t \neq 0$);
- Flujo laminar y turbulento. El movimiento del agua en un canal se rige por la importancia de las fuerzas viscosas o de gravedad, respecto a la inercia. La tensión superficial del agua afecta el comportamiento en el caso de velocidad



y tirante (o sección transversal) pequeños, pero no tiene una función importante en la mayoría de los problemas, y

- Flujo subcrítico y supercrítico. La importancia de la fuerza de la inercia respecto de la gravedad, ambas por unidad de masa, se mide a través del número de *Froude*.

La asignación de los coeficientes de rugosidad es un aspecto fundamental para la modelación, debido a que está relacionado con la resistencia que presentará el flujo al circular a través de la sección. Para su determinación fue necesario acudir al sitio de estudio y observar el material y las condiciones de vegetación predominantes en las secciones del levantamiento, estas fueron fotografiadas y anotadas.

Tabla A 32. Valores del Coeficiente *n* de Manning. Cauces Naturales, según Chow.
Fuente: Hidráulica de Canales de Gilberto Sotelo Ávila

Descripción de la corriente	Mínimo	Normal	Máximo
A Cauces naturales			
A.1 Cursos secundarios (ancho de la superficie libre en crecida < 30 m)			
A.1.1 Cursos en planicies			
- Limpios, rectos, sin fallas ni pozos	0,025	0,030	0,033
- Rectos con algunas piedras y pastos	0,030	0,035	0,040
- Limpios con meandros, con algunos pozos y banos	0,033	0,040	0,045
- Meandros con algunas piedras y pastos	0,035	0,045	0,050
- Meandros con muchas piedras	0,045	0,050	0,060
- Tramos sacios, con pastos y pozos profundos	0,050	0,070	0,080
- Tramo con mucho pasto, pozos profundos y cauce en crecida con muchos arbustos y matorral	0,075	0,100	0,150
A.1.2 Cursos montañosos, carentes de vegetación en el fondo, laderas con pendientes pronunciadas y árboles y arbustos en las laderas que se sumergen en niveles de crecida			
- Cauce de grava, cantos rodados y algunas rocas	0,030	0,040	0,050
- Cauce de cantos rodados, con grandes rocas	0,040	0,050	0,070
A.2 Cursos en planicies inundadas			
A.2.1 Zonas de pastos, sin arbustos			
- Pasto coeto	0,025	0,030	0,035
- Pasto alto	0,030	0,035	0,050
A.2.2 Zonas cultivadas			
- Sin cultivo	0,020	0,030	0,030
- Cultivos sembrados en línea en fase de madurez fisiológica	0,025	0,035	0,045
- Cultivos sembrados a voleo en fase de madurez fisiológica	0,030	0,040	0,050
A.2.3 Zonas arbustivas			
- Escasos arbustos y pasto abundante	0,035	0,050	0,070
- Pequeños árboles y arbustos sin follaje (panda invernal)	0,035	0,050	0,060
- Pequeños árboles y arbustos con follaje (fase vegetativa)	0,040	0,060	0,080
- Arbustos medianos a densos durante la parada invernal	0,045	0,070	0,110
- Arbustos medianos a densos durante la fase vegetativa	0,070	0,100	0,160
A.2.4 Zonas arbóreas			
- Saucedos densos, temporada invernal	0,110	0,150	0,200
- Terreno claro con ramas sin brotes	0,030	0,040	0,050
- Terreno claro con ramas con gran crecimiento de brotes	0,050	0,060	0,080
- Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación por debajo de las ramas	0,080	0,100	0,120
- Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación que alcanzan a las ramas	0,100	0,120	0,160
A.3 Cursos importantes (ancho de la superficie libre en crecida > 30 m)			
En este caso, los valores del coeficiente <i>n</i> son inferiores a los correspondientes de cauces secundarios análogos, ya que los bancos ofrecen una resistencia efectiva menor,			
- Sección regular sin rocas ni arbustos	0,025		0,060
- Sección irregular y rugosa	0,035		0,100



De la tabla anterior se tomó un $n=0.030$, correspondiente al coeficiente de rugosidad normal para corrientes en planicie.

En la siguiente ilustración se puede observar un *shapefile* con la asignación de los coeficientes de rugosidad.



Ilustración A 20. Asignación de los coeficientes de rugosidad en la microcuenca del LID

Existen distintos métodos de análisis para transformar lluvia en escurrimiento, uno mediante el diseño de una tormenta distribuida en el tiempo (hietograma) al tiempo de concentración y el segundo mediante una tormenta constante (tormenta de un bloque) al tiempo de concentración. Considerando lo expuesto los métodos utilizados para el cálculo del hidrograma de ingreso a cada cuenca de aportación del LID se describe a continuación.

Los cálculos fueron realizados mediante el programa HEC-HMS V. 4.8, el cual fue desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos (US Army Corps of Engineers), para simular los procesos hidrológicos que ocurren en las cuencas hidrográficas. En el caso particular, se realizó la simulación del proceso lluvia-escurrimiento con la finalidad de obtener los hidrogramas de salida de la



cuenca al presentarse precipitaciones correspondientes a períodos de retorno de 2, 5, 10, 20 y 50 años.

Integración del modelo en HEC HMS

A continuación se describen las etapas:

- Se ingresan los datos de la cuenca, ingresar los hietogramas de diseño y especificar el formato de salida para los resultados.
- Se ingresaron los datos de la cuenca en formato gráfico (como se muestra en la siguiente ilustración) y los valores correspondientes al área, el valor de la abstracción inicial, el número de curva N, el porcentaje impermeable de la cuenca y el tiempo de retraso en minutos.

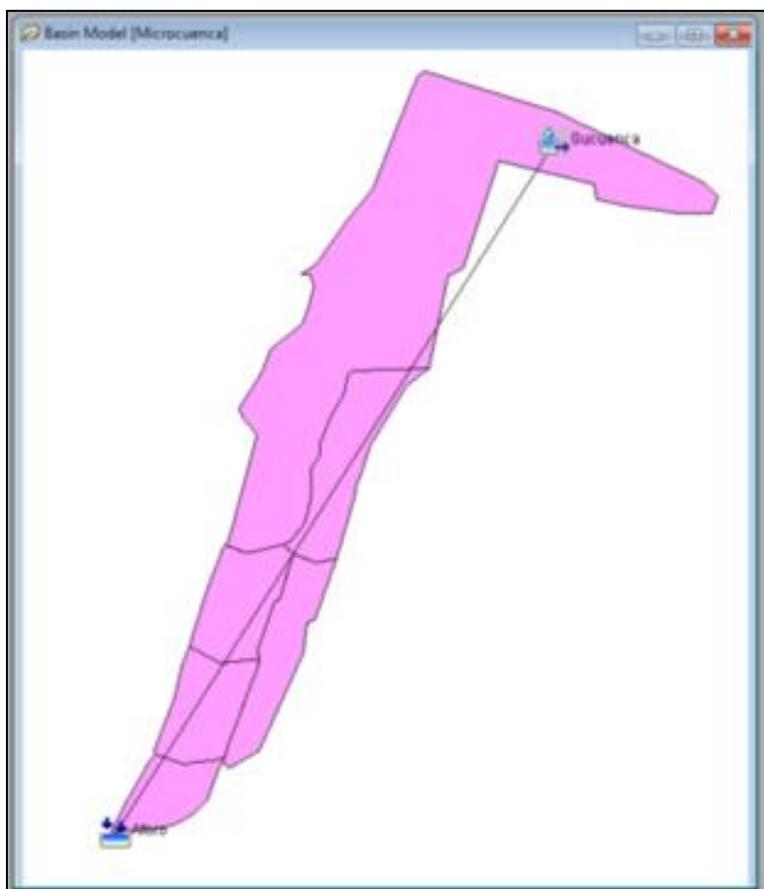


Ilustración A 21. Microcuencas LID en HEC HMS

El modelo meteorológico se estableció especificando el hietograma para cada modelación correspondiente a cada uno de los periodos de retorno, cuya modelación se realizó para una duración de 2 horas con intervalo de 10 minutos.

En el modelo HEC-HMS se consideraron las cuencas de aportación aguas arriba de los broco (cuenca uno) y las aportaciones provenientes del escurrimiento pluvial, proveniente de la vialidad contigua al LID.

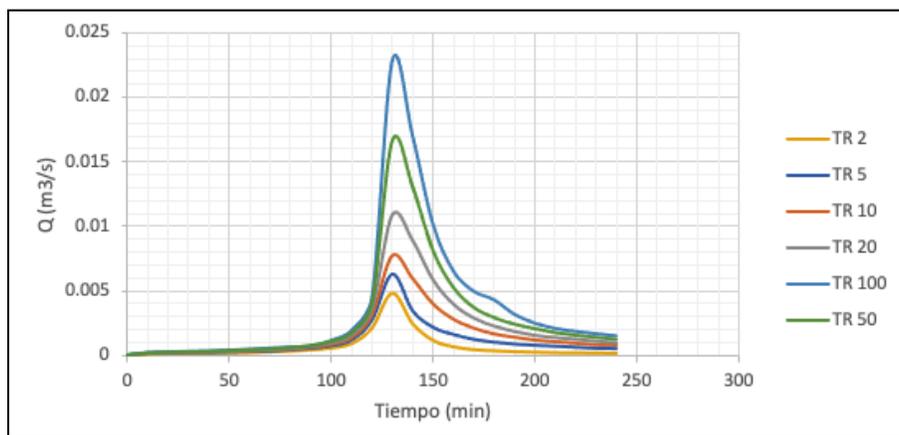


Ilustración A 22. Hidrogramas de aportación al LID para diferentes períodos de retorno de la subcuenca 1

Los resultados obtenidos de la modelación en HEC-HMS V. 4.8 para la subcuenca 2 se presentan en la tabla 6, donde se indican los gastos calculados para cada período de retorno en un intervalo de 10 minutos hasta 240 minutos.

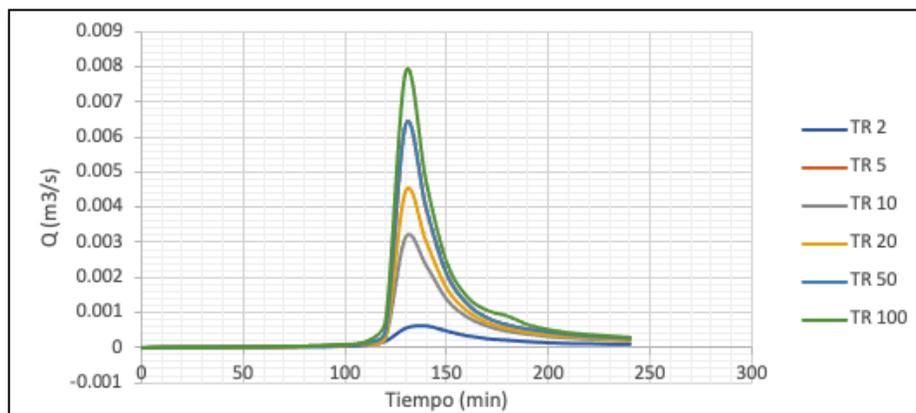


Ilustración A 23. Hidrogramas de aportación al LID para diferentes períodos de retorno de la subcuenca 2



Modelo en HEC RAS 2D

Se utilizó el modelo HEC-RAS 6.3 para el modelado hidrológico de flujo de lluvia desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica dentro del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los E.U.A. (*US Army Corps of Engineers*), disponible de forma gratuita.

Modelo digital de elevaciones

Se agregó la última versión del Modelo Digital de Elevaciones realizado en este año 2023, como se puede observar en la siguiente ilustración.

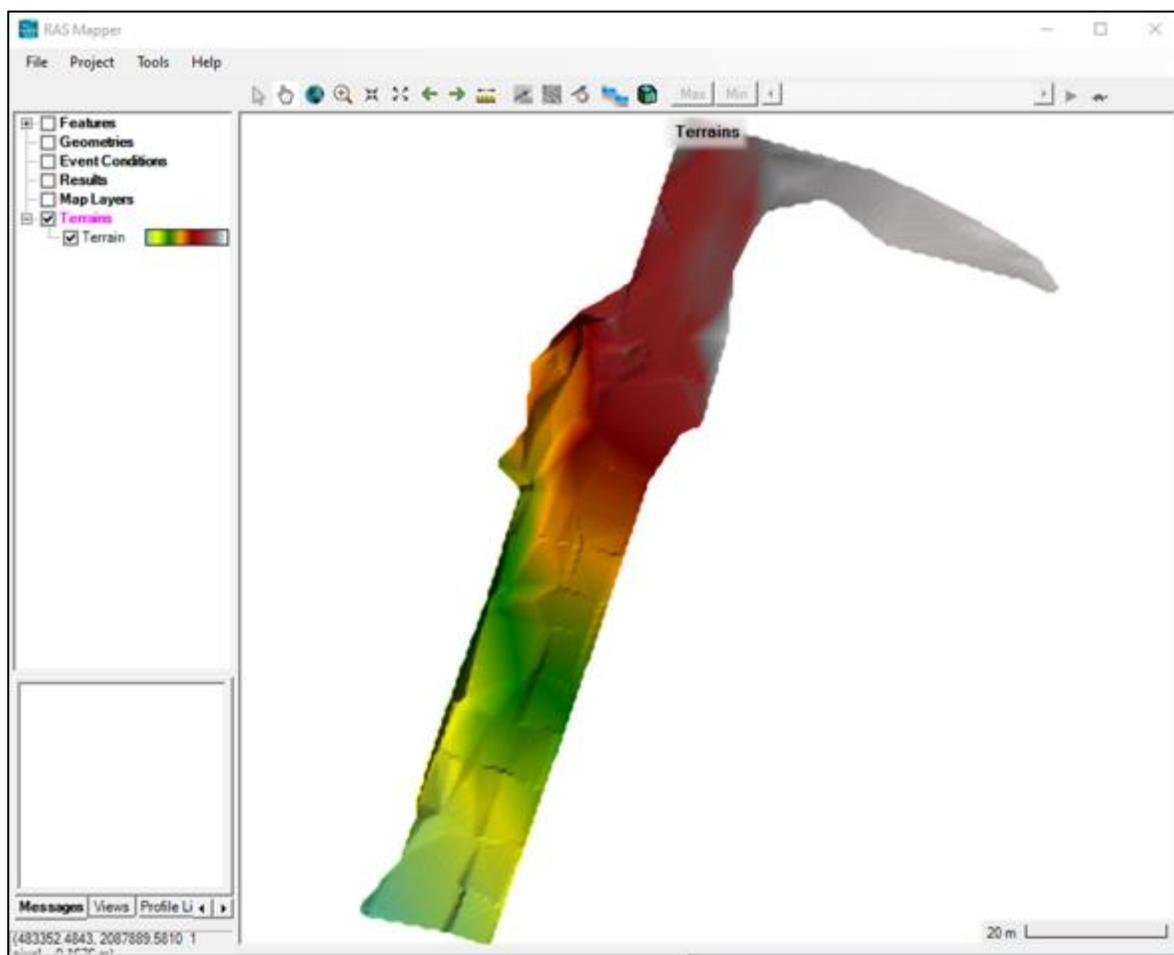


Ilustración A 24. Modelo Digital de Elevaciones LID-2023



Coeficiente de rugosidad

Antes de definir la geometría, se hizo un shape, en el cual se definió el coeficiente de Manning, en función de la superficie de la microcuenca. Para la velocidad (V) en metros por segundo y radio hidráulico (R) en metros, la ecuación de Manning se escribe de la siguiente manera:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2}$$

Ecuación 83

Donde

S_f es la pendiente hidráulica del conducto abierto o río, adimensional, y n es el coeficiente de rugosidad de Manning para diferentes superficies, adimensional (Ver siguiente tabla).

Tabla A 33. Coeficiente de rugosidad de Manning para diferentes superficies.
Fuente: (Ven Te Chow, Maidment, & Mays, 1988)

Coeficiente de rugosidad de Manning para diferentes superficies	
Material	Coeficiente tipo
Concreto	0.012
Fondo de grava con	
- Concreto	0.02
- Piedra de mortero	0.023
- Cemento	0.033
Canales de arroyos naturales	
- Corriente limpia y recta	0.03
- Corriente limpia y sinuosa	0.04
- Sinuosos con malezas y charcos	0.05
- Con maleza pesada y madera	0.1
Planicies de inundación	
-Pasto	0.035
- Cultivos de campo	0.04
- Con maleza y maleza ligera	0.05
- Maleza densa	0.07
- Con árboles densos	0.1





Para cuencas urbanas y semi-urbanas se tomó en cuencas la siguiente tabla de valores.

Tabla A 34. Coeficiente de rugosidad de Manning (n) según el tipo de suelo.

Fuente: (Rey-Valencia & Zambrano, 2018)

Uso de suelo	Descripción	Coeficiente de rugosidad de Manning (n)
Bosques	Áreas caracterizadas por cobertura arbórea (vegetación boscosa natural o semi natural, generalmente de alturas mayores a 6 m)	0.600
Matorrales	Áreas dominadas por matorrales. La cobertura será del 25-100% del total	0.055
Urbano baja intensidad	Áreas con mezcla entre urbanización y vegetación, mayoritariamente esta última. Se tendrá superficie impermeable del 20%	0.120
Urbano intensidad media	Áreas con mezcla entre urbanización y vegetación. La superficie impermeable será de alrededor del 50-79% del total de cobertura.	0.150

Tabla A 35. Parámetros hidráulicos calibrados según el uso de suelo.

Fuente: (Rey-Valencia & Zambrano, 2018)

Uso de suelo	Coeficiente de rugosidad de Manning (n)
Bosques	0.300
Matorrales	0.055
Urbano Intensidad Media	0.040
Urbano Intensidad Baja	0.012

Se realizó una ponderación de los tipos de suelo, de acuerdo a lo que se observa en la siguiente figura. Se optó por esta técnica ya que el shape de uso de suelo de INEGI tiene una resolución mayor a la que se necesita para este caso. En la siguiente ilustración se puede observar la asignación del coeficiente en función del contenido de las tablas anteriores.





Ilustración A 25. Porcentaje de áreas permeable e impermeables.
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la ilustración anterior se contabilizó el 36.6 % de área impermeable y 63.4 % de área permeable.



Ilustración A 26. Asignación del coeficiente rugosidad de Manning para la microcuenca del LID. Fuente: Elaboración propia

Definición de la geometría

Se definió la geometría para representar el flujo en dos dimensiones. Se delimitó el área de interés, que sirve como dominio que el modelo utilizará para propagar los hidrogramas y no fue necesaria una refinación de la malla ya que los hidrogramas de entrada ya se calcularon previamente en el área respectiva de escurrimiento. Es importante mencionar que la malla generada sólo se modeló en la zona del LID que en donde el caudal de ingreso será regulado, tal como se puede observar en la siguiente ilustración.



Ilustración A 27. Geometría de la microcuenca del LID

Condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo

Se agregaron dos condiciones de frontera aguas arriba y una aguas abajo, tal como se observa en la siguiente ilustración.

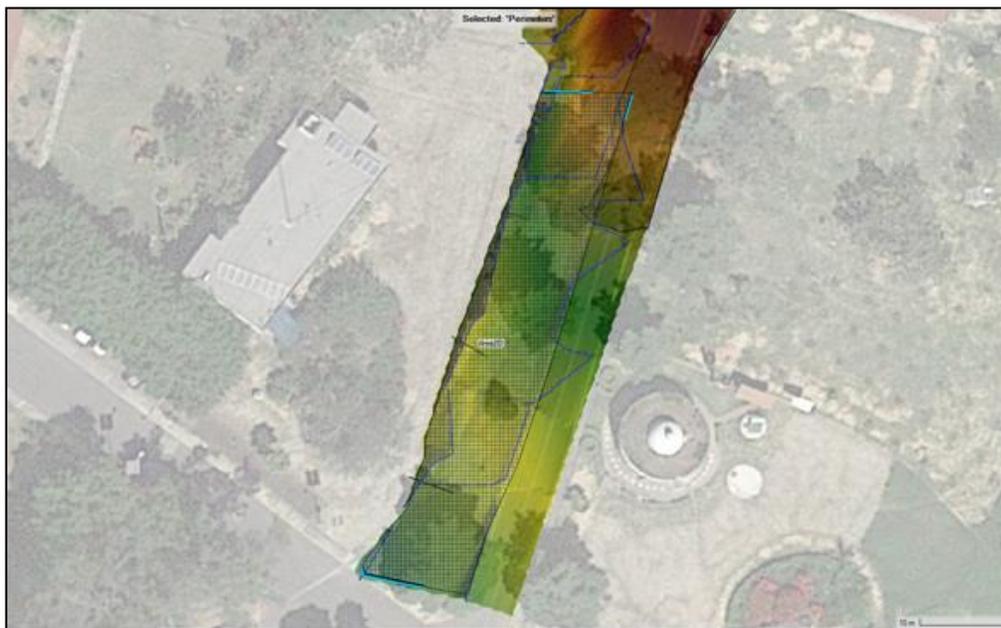


Ilustración A 28. Delimitación de condiciones de frontera

Una de las condiciones de entrada aguas arriba corresponde al agua que escurre en el área sombreada (tal como se puede observar a continuación) y corresponde a los escurrimientos que ingresan por el primer bordo de regulación.

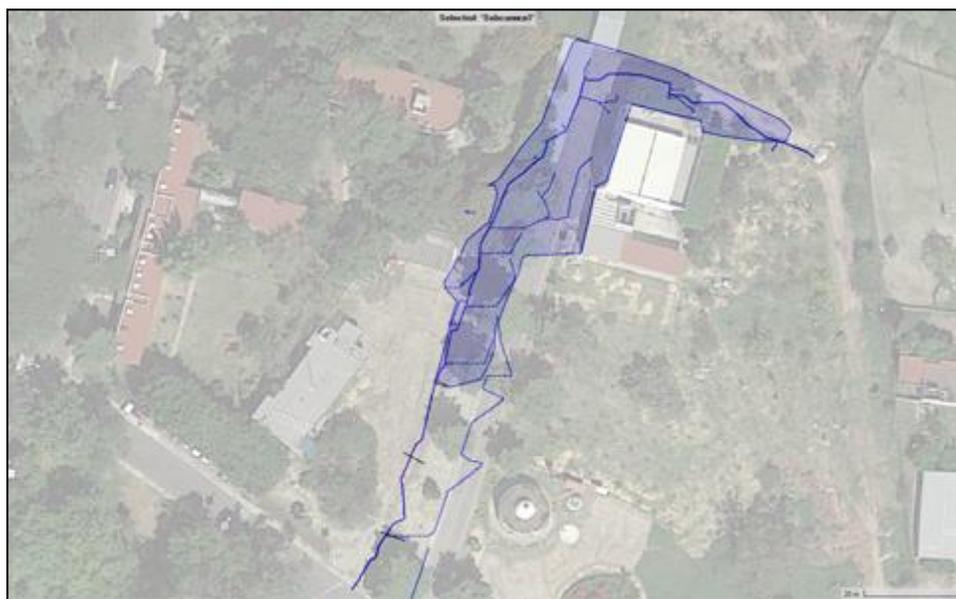


Ilustración A 29. Ingreso de caudal al jardín del LID de escurrimiento 1



Mientras que la segunda condición de frontera aguas arriba es la que corresponde al agua de lluvia que escurre de la calle (como se observa en la siguiente ilustración) y su ingreso corresponde al canal que se apertura con la finalidad que dicho caudal ingrese y sea regulado en la microcuenca del LID.



Ilustración A 30. Ingreso de caudal al jardín del LID de escurrimiento 2

En las siguientes ilustraciones se observa el conducto por el que se ingresa caudal producto del escurrimiento en la calle al LID, el cual será regulado por los bordos de geotextiles.





Ilustración A 31. Canal de ingreso del caudal producto del escurrimiento en la calle al LID

Régimen no permanente

Con los hidrogramas mostrados anteriormente y bajo régimen no permanente se ingresaron los datos en HEC-RAS 6.3. Los datos de ingreso en las condiciones de frontera, se pueden observar en la siguiente tabla.





Tabla A 36. Condiciones de frontera para el LID

Condición de frontera	Caudal	Pendiente
Ingreso Subcuenca 1	Hidrograma Subcuenca 1	0.04
Ingreso Subcuenca 2	Hidrograma Subcuenca 1	0.04
Salida	Condición "Normal Depth"	0.01

El modelo en HEC-RAS 6.3 se analizó para un flujo no permanente.

Resultados obtenidos con el Modelo HEC RAS

Análisis de resultados

Se modeló la microcuenca del LID con la finalidad de aprovechar las ventajas que presenta el Software HEC-RAS 6.3 y poder llevar a cabo una comparación con los resultados efectuados en el modelo IBER. El modelo HEC-RAS 6.3 presenta un módulo en 2D que permite realizar un modelado de canales detallado en dos dimensiones con la posibilidad de desarrollar una malla computacional 2D y luego vincular las áreas de flujo 2D a los elementos del modelo 1D. Así mismo, a través de las ecuaciones de ondas de difusión, permite una ejecución más rápida y estable (Hydrologic Engineering Centes - Institute for Water Resources, 2024).

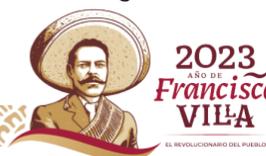
Las limitaciones actuales del software HEC RAS 2D, se enlistan a continuación:

- No se puede llevar a cabo el análisis de mecanismos de erosión/sedimentación en áreas con flujo 2D;
- No se puede modelar calidad del agua;
- No se pueden conectar estaciones de bombeo a celdas de área de flujo 2D,
- Se pueden modelar alcantarillas, vertederos, pero no LIDs.

En relación con las ventajas y desventajas del HEC RAS 2D descritas anteriormente, se lleva a cabo la hipótesis de que este software es adecuado para modelar el flujo en la microcuenca del LID.

Una vez terminado la ejecución del modelo en flujo no permanente y los resultados en 2D solo pueden ser visualizados en RAS Mapper (ver figura25).

Análisis de resultados de la modelación en el software HEC-RAS 2D



Como parte de los resultados, se evalúa el comportamiento hidráulico de los hidrogramas de salida del estudio hidrológico, esta información fue cargada al modelo para reconocer las trayectorias de los escurrimientos, velocidades, tirantes y variables hidráulicas que se presentan en el sitio de estudio, así mismo, se presenta el comportamiento del hidrograma de salida en comparación con el de entrada para identificar la variación del comportamiento de ambos. A continuación, se describen los datos encontrados como resultado de las modelaciones.

El ingreso de los hidrogramas, se llevó a cabo como bien se ha mencionado del escurrimiento de la calle aledaña y de la cuenca aguas arriba. En la siguiente figura se observan las condiciones de frontera en las cuales se ingresaron los datos de los hidrogramas de diseño (Ingreso “Cuenca1” para los escurrimientos de aguas arriba del LID y “Cuenca 2” para los escurrimientos provenientes de los de la calle aledaña aguas arriba del LID).

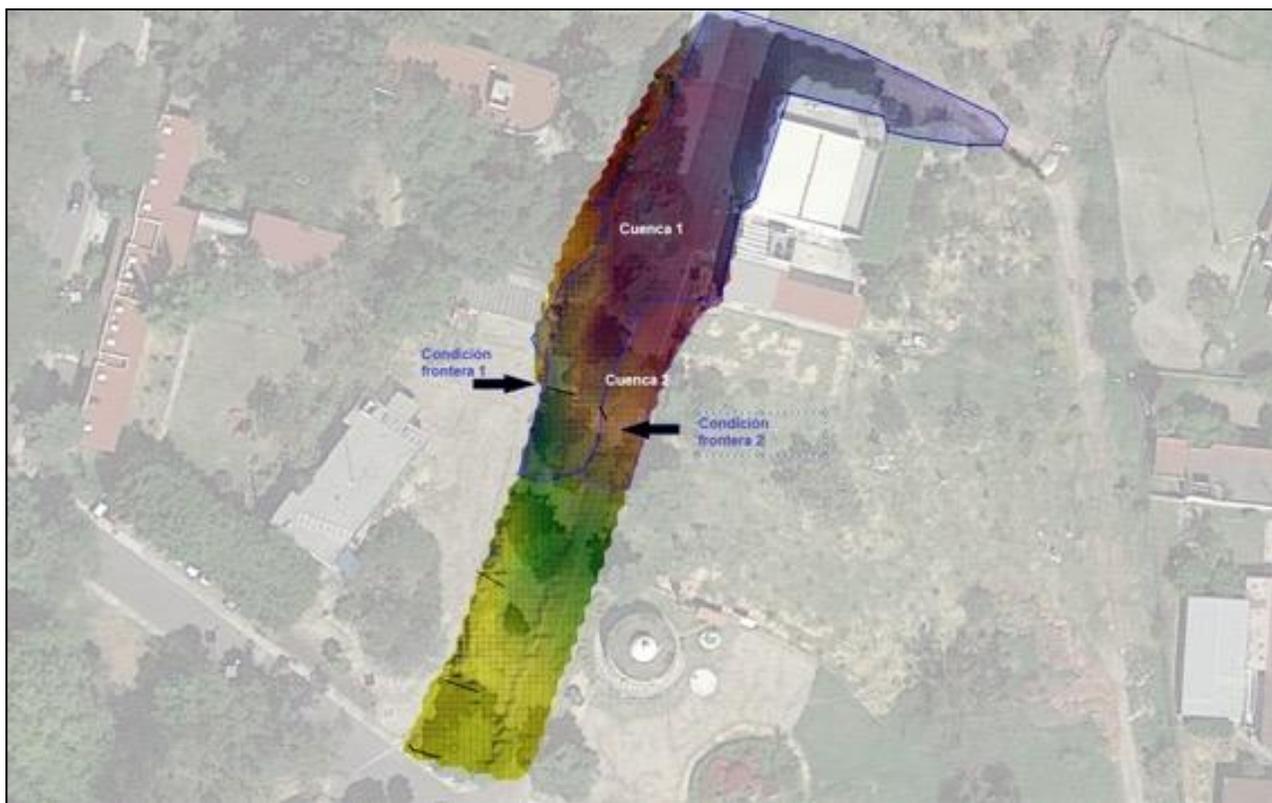


Ilustración A 32. Condiciones de frontera para el modelo hidráulico LID

Los hidrogramas de ingreso para ambas condiciones de fronteras (mostradas en la ilustración anterior), se muestran en las siguientes ilustraciones:

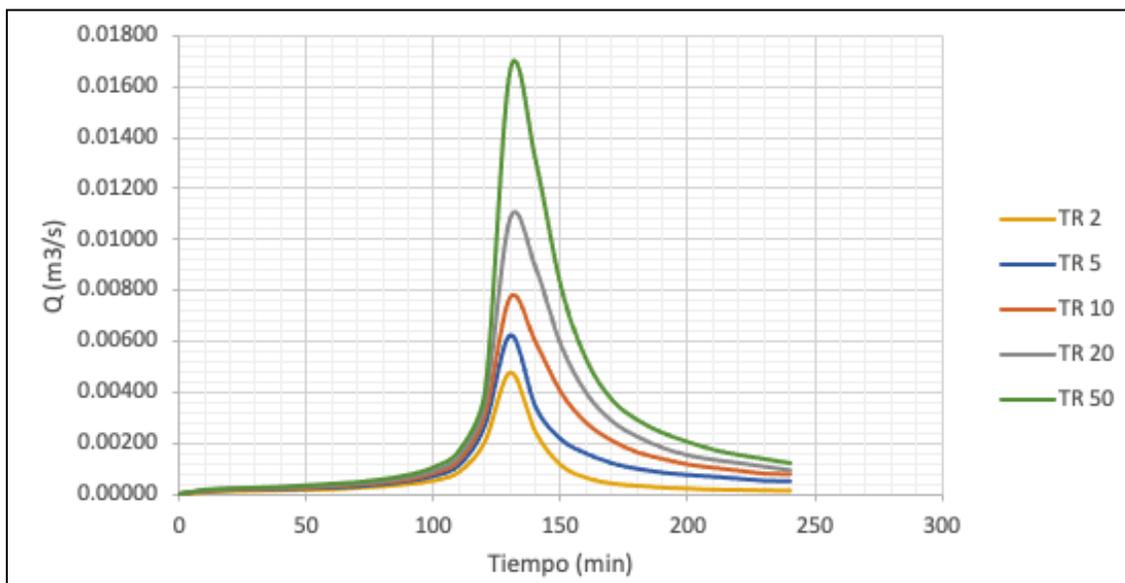


Ilustración A 33. Hidrograma de entrada para la condición de frontera 1 al LID

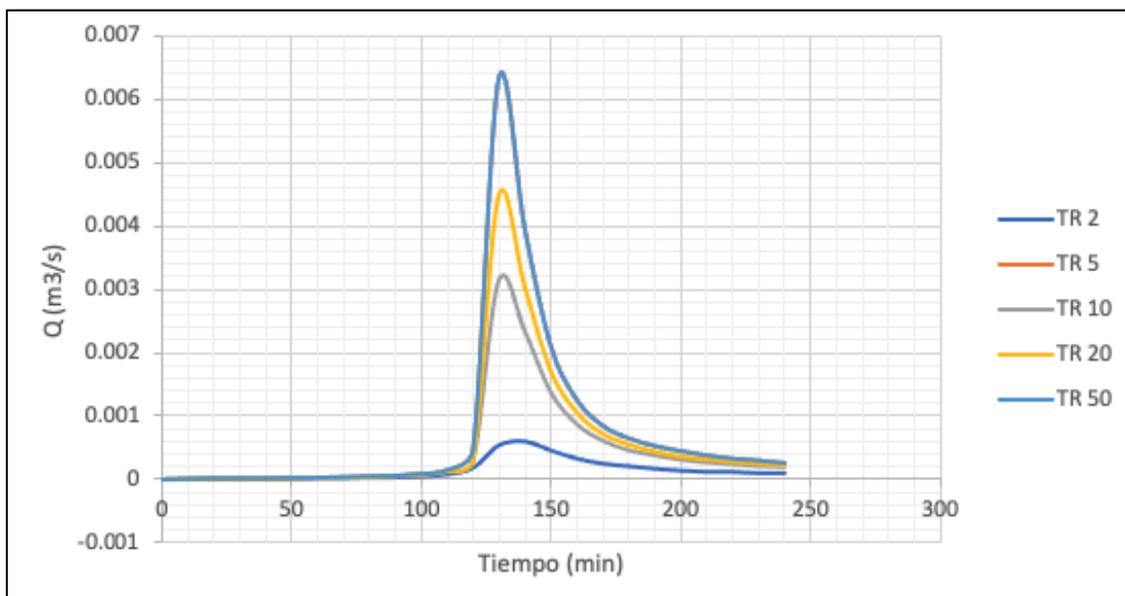


Ilustración A 34. Hidrograma de entrada para la condición de frontera 2 al LID

Con los hidrogramas de entrada asignados en cada condición de frontera al ingreso del LID y mencionados en los párrafos anteriores, se obtuvieron resultados de máxima profundidad del agua y de volumen de ingreso y egreso en los siguientes puntos de control y mismos que pueden visualizarse en la ilustración siguiente:



- **Sección A:** Condición de frontera 1 (escurrimiento de la cuenca proveniente aguas arriba del Bordo 1);
- **Sección B:** Condición de frontera 2 (escurrimiento de la cuenca proveniente aguas arriba del Bordo 2);
- **Sección C:** de regulación (bordo 1);
- **Sección D:** de regulación (bordo 2);
- **Sección E:** de regulación (bordo 3), y
- **Sección F:** salida de la Cuenca LID.



Ilustración A 35. Secciones de control para visualización de resultados del LID

Los resultados de tirante o profundidad máxima que alcanza el agua a lo largo de la modelación, en cada sección mencionada en la ilustración anterior y en el párrafo anterior se observa y detalla a continuación.



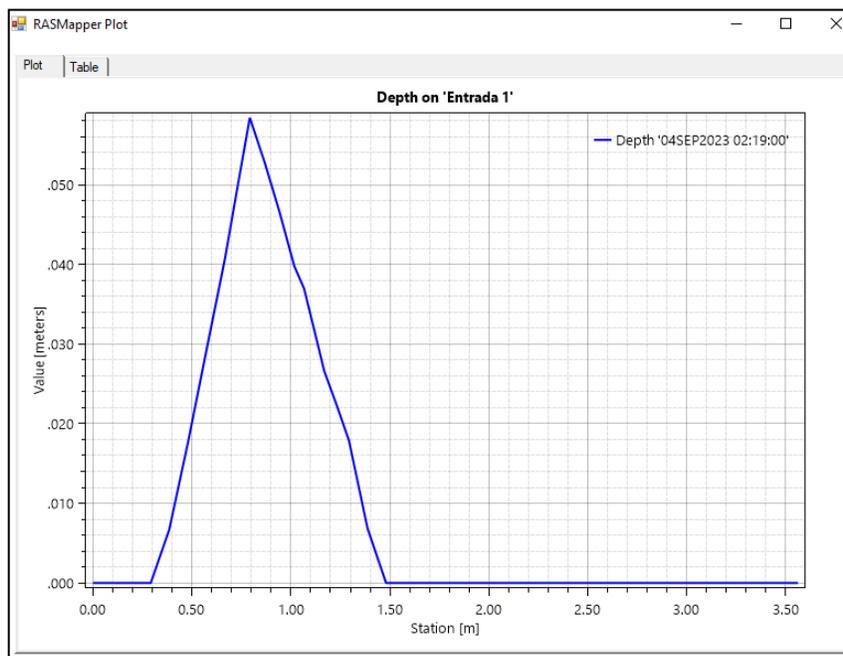


Ilustración A 36. Máxima profundidad presente en la condición de frontera 1

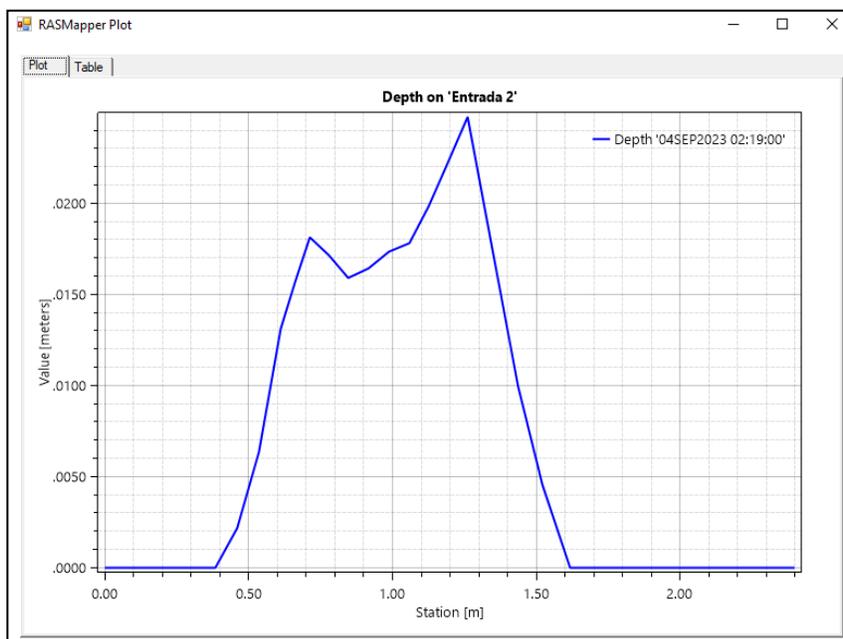


Ilustración A 37. Máxima profundidad presente en la condición de frontera 2

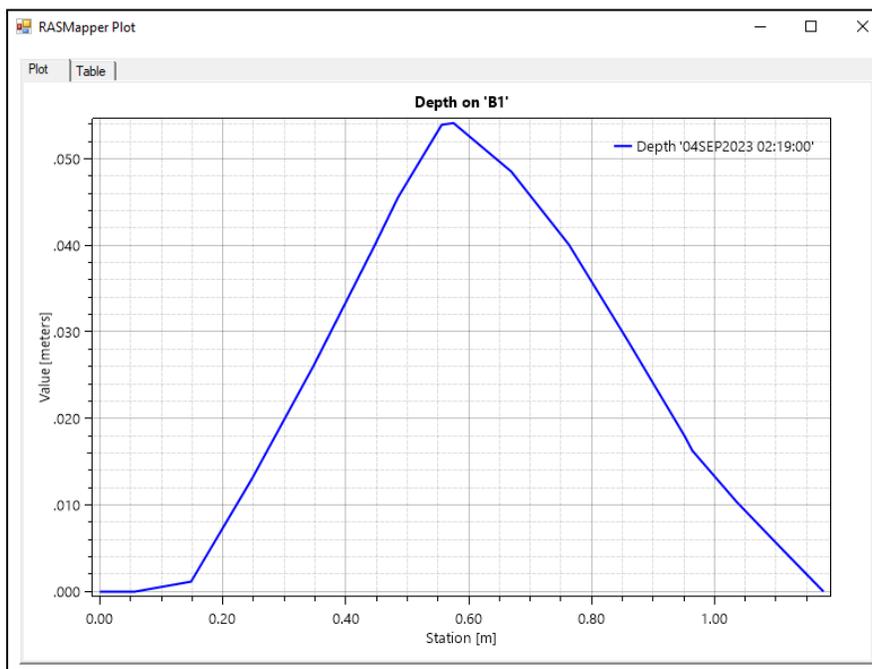


Ilustración A 38. Máxima profundidad presente en la sección de control: Bordo 1

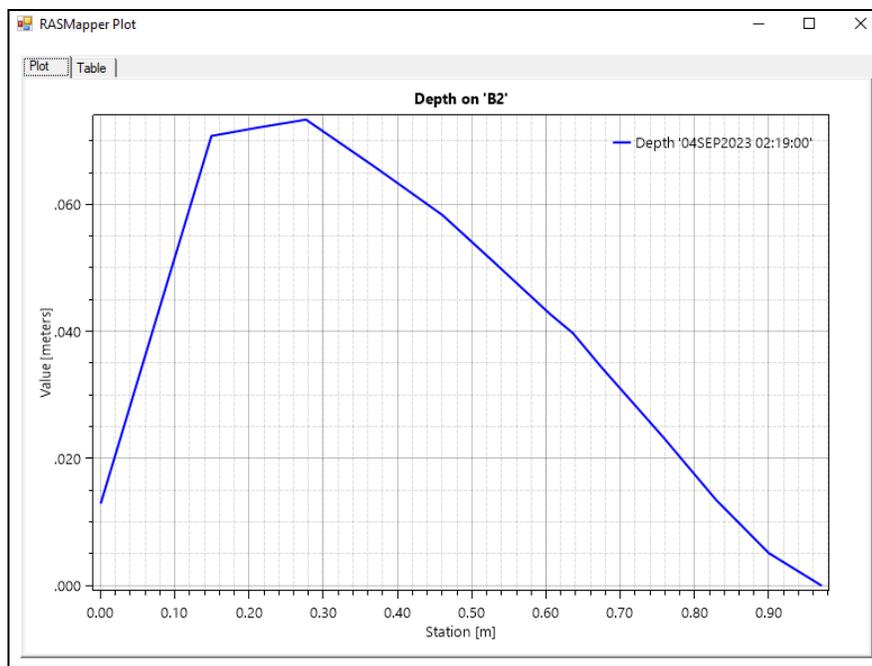


Ilustración A 39. Máxima profundidad presente en la sección de control: Bordo 2

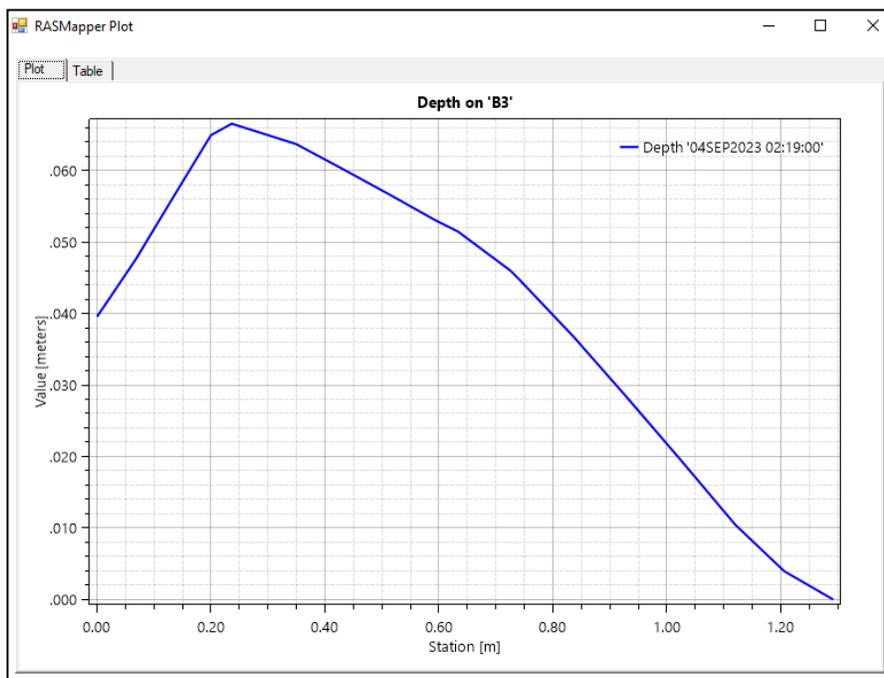


Ilustración A 40. Máxima profundidad presente en la sección de control: Bordo 3

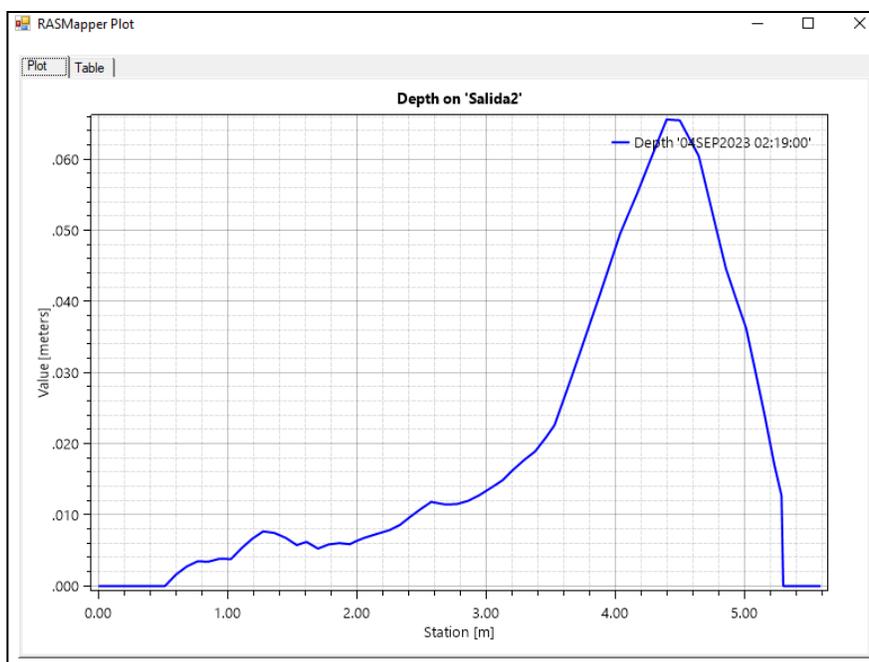


Ilustración A 41. Máxima profundidad presente en la sección de salida de la cuenca del LID

Finalmente, en la siguiente ilustración, se observa los hidrogramas de entrada y de salida.

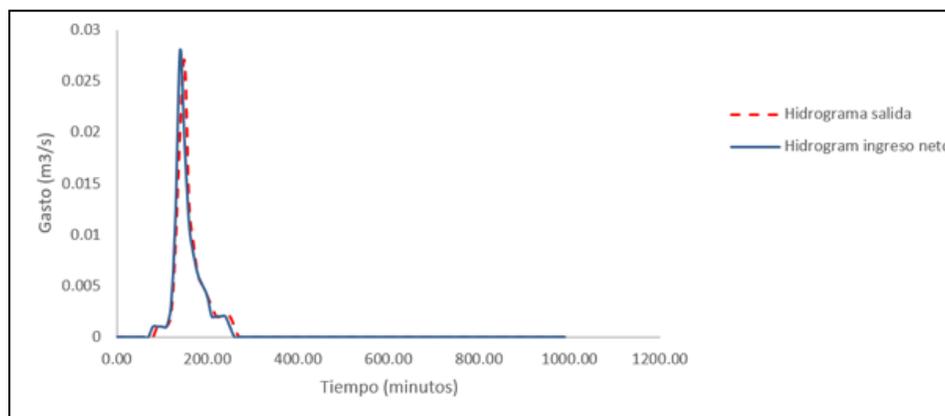


Ilustración A 42. Resultados en los hidrogramas de entrada y de salida en la microcuenca del LID

De la gráfica anterior se observa que el caudal neto de ingreso es $0.028 \text{ m}^3/\text{s}$ y se presenta a los 140 minutos de iniciar el modelo (02:20 horas) y el caudal de salida de $0.027 \text{ m}^3/\text{s}$ se presenta a los 150 minutos de iniciar el modelo (02:30 horas); es decir que los bordos de retención lograron atenuar los caudales de ingresos (dos entradas) y atenuar el pico 10 minutos.

En términos de volumen, por entradas se registra un volumen acumulado de 0.053 m^3 al ingreso de la cuenca 1, un volumen acumulado de 0.054 m^3 al ingreso de la cuenca 1 y un volumen a la salida de 0.064 m^3 , como se puede observar en la siguiente ilustración.

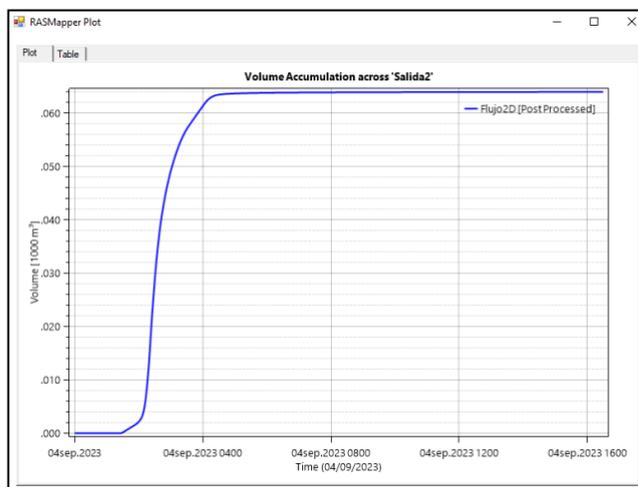


Ilustración A 43. Volumen acumulado a la salida de la cuenca del LID



Comentarios y conclusiones

Se implementó dentro de las instalaciones del IMTA, al lado del humedal que se ubica enfrente de la casa ecológica urbana, un modelo experimental de jardín microcuenca de regulación del caudal de escurrimiento por las calles aledañas a su ubicación, basado en los principios del LID (*Low Impact Development*, por sus siglas en inglés), por lo que se denomina sistema LID. Inicialmente, derivado de los proyectos internos antecedentes, se planteó la idea de implementación de un jardín de lluvia, sin embargo, basado en los resultados del análisis del suelo de la zona de estudio realizado en el proyecto antecedente, se identificó que el suelo no proporciona condiciones para elevada infiltración. Por lo anterior, se llevó a cabo la IMPLEMENTACIÓN EN CAMPO DE UN SISTEMA LID EN EL IMTA. (Página 136 de 141 diciembre, 2022 Clave: HC2211.1) sistema basado en las características de un jardín microcuenca para la regulación de los escurrimientos, respetando las condiciones naturales del terreno.

Estos jardines son conformados por cavidades en el terreno que tienen como objetivo alcanzar un nivel inferior que el de las superficies adyacentes para captar y detener los escurrimientos derivados de las lluvias (IMPLAN-HERMOSILLO, 2019).

De los resultados plasmados en la sección anterior se puede concluir lo siguiente:

1. Se logró atenuar un volumen de 0.003 m^3 (3 l);
2. El caudal pico se desplazó 10 min, y
3. El caudal piso se atenuó de $0.028 \text{ m}^3/\text{s}$ (28 l/s) a $0.027 \text{ m}^3/\text{s}$ (27 l/s), lo que representa una reducción de $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ (1 l/s).

De los resultados anteriores la disminución en el caudal y en el volumen acumulado se puede deber a precisión en los resultados decimales o bien a una pérdida por infiltración, la cual es prácticamente nula y el HEC-RAS presenta un punto para mejorar en pensar en el ingreso de pérdidas por infiltración o evaporación.





Anexo 2. Puntos topográficos de infraestructura nueva levantados en el terreno

Punto	Coordenada			Descripción
	X	Y	Z	
1	483376.127	2087774.768	96.808	Banqueta
2	483377.337	2087774.520	96.822	Banqueta
3	483377.398	2087774.572	96.638	Banqueta
4	483382.093	2087772.903	96.866	Banqueta
5	483382.184	2087772.955	96.951	Banqueta
6	483383.356	2087772.670	96.956	Banqueta
7	483385.105	2087778.079	97.301	Banqueta
8	483384.083	2087778.608	97.222	Banqueta
9	483384.092	2087778.632	97.117	Banqueta
A	483403.161	2087832.292	100.000	Estación
B	483410.034	2087844.720	100.996	Estación
C	483403.783	2087854.605	101.113	Estación
D	483422.128	2087883.910	101.306	Estación
E	483398.248	2087863.853	101.261	Estación
F	483378.907	2087796.233	97.661	Estación
10	483379.667	2087781.039	96.884	Banqueta
11	483379.568	2087781.069	97.038	Banqueta
12	483378.531	2087781.848	97.051	Banqueta
13	483380.774	2087788.135	97.363	Banqueta
14	483381.933	2087787.826	97.408	Banqueta
15	483382.045	2087787.971	97.312	Banqueta
16	483387.074	2087787.252	97.576	Banqueta
17	483387.106	2087787.294	97.641	Banqueta
18	483388.359	2087786.996	97.648	Banqueta
19	483390.748	2087794.302	98.042	Banqueta
20	483389.715	2087794.879	98.051	Banqueta
21	483389.695	2087794.974	97.930	Banqueta





Punto	Coordenada			Descripción
	X	Y	Z	
22	483385.214	2087797.375	97.809	Banqueta
23	483385.187	2087797.448	97.997	Banqueta
24	483384.221	2087798.027	98.001	Banqueta
25	483386.348	2087804.404	98.348	Banqueta
26	483387.478	2087804.071	98.361	Banqueta
27	483387.557	2087804.132	98.151	Banqueta
28	483392.431	2087803.121	98.257	Banqueta
29	483392.574	2087803.241	98.361	Banqueta
30	483393.672	2087802.957	98.407	Banqueta
31	483395.678	2087808.764	98.668	Banqueta
32	483394.568	2087809.227	98.723	Banqueta
33	483394.532	2087809.320	98.583	Banqueta
34	483390.008	2087811.424	98.597	Banqueta
35	483389.929	2087811.514	98.754	Banqueta
36	483388.970	2087811.838	98.744	Banqueta
37	483390.748	2087817.870	98.978	Banqueta
38	483392.059	2087817.659	98.993	Banqueta
39	483392.078	2087817.754	98.889	Banqueta
40	483396.919	2087816.421	98.943	Banqueta
41	483397.018	2087816.386	99.077	Banqueta
42	483398.211	2087816.153	99.082	Banqueta
43	483399.740	2087820.581	99.309	Banqueta
44	483398.632	2087821.118	99.313	Banqueta
45	483398.594	2087821.160	99.196	Banqueta
46	483393.914	2087823.077	99.209	Banqueta
47	483393.892	2087823.165	99.316	Banqueta
48	483392.721	2087823.610	99.300	Banqueta
49a	483395.437	2087831.026	99.520	Banqueta
49b	483395.437	2087831.026	99.620	Banqueta
49c	483395.325	2087830.685	99.500	Banqueta





Punto	Coordenada			Descripción
	X	Y	Z	
49d	483394.947	2087829.528	99.581	Banqueta
49e	483395.325	2087830.685	99.600	Banqueta
50	483395.995	2087829.379	99.595	Banqueta
51a	483396.672	2087831.416	99.570	Banqueta
51b	483396.786	2087831.449	99.570	Banqueta
51c	483396.060	2087829.406	99.501	Banqueta
51d	483396.555	2087831.064	99.550	Banqueta
51e	483396.639	2087831.051	99.550	Banqueta
52	483400.939	2087827.876	99.604	Banqueta
53	483400.976	2087827.949	99.721	Banqueta
54	483402.125	2087827.651	99.702	Banqueta
55	483405.739	2087838.243	100.366	Banqueta
56	483404.568	2087838.463	100.388	Banqueta
57	483404.489	2087838.684	100.301	Banqueta
58	483399.730	2087840.312	100.167	Banqueta
59a	483399.614	2087840.263	100.281	Banqueta
59b	483404.481	2087854.714	101.258	Banqueta
60	483398.624	2087840.772	100.261	Banqueta
61	483403.449	2087855.139	101.121	Banqueta
62	483404.597	2087854.763	101.148	Banqueta
63	483409.613	2087852.969	101.145	Banqueta
64	483409.720	2087852.808	101.205	Banqueta
65	483410.643	2087852.454	101.235	Banqueta
66	483409.224	2087852.624	101.113	Banqueta
67	483409.305	2087852.541	101.179	Banqueta
68	483410.419	2087852.062	101.205	Banqueta
69	483394.993	2087835.496	99.957	Terreno natural
70	483392.328	2087836.468	99.748	Terreno natural
71	483390.756	2087836.969	99.274	Terreno natural
72	483389.183	2087836.669	99.006	Terreno natural





Punto	Coordenada			Descripción
	X	Y	Z	
75	483388.708	2087837.967	99.292	Pozo de visita
78	483392.649	2087830.131	99.533	Zanja
79	483392.497	2087829.783	99.549	Zanja
80	483390.192	2087830.476	99.423	Zanja
81	483390.058	2087830.099	99.394	Zanja
82	483388.598	2087830.572	98.962	Terreno natural
83	483387.027	2087830.712	98.732	Terreno natural
84	483386.009	2087831.127	98.719	Terreno natural
85	483385.641	2087831.469	98.936	Terreno natural
86	483385.503	2087831.518	98.935	Cadena
87	483385.434	2087831.608	99.216	Cadena
88	483389.378	2087821.474	99.112	Terreno natural
89	483387.221	2087821.725	98.945	Terreno natural
90	483385.848	2087823.588	98.617	Terreno natural
91	483385.494	2087823.529	98.403	Terreno natural
92	483384.210	2087822.986	98.357	Terreno natural
93	483383.825	2087822.790	98.415	Terreno natural
94	483382.929	2087822.126	98.408	Terreno natural
95	483382.749	2087822.336	98.941	Terreno natural
96	483382.261	2087821.128	98.921	Cadena
97	483382.325	2087821.192	99.147	Cadena
98	483382.423	2087819.477	98.226	Pozo de visita
99	483383.890	2087805.225	98.276	Terreno natural
100	483381.315	2087806.011	98.085	Terreno natural
101	483379.949	2087806.860	97.718	Terreno natural
102	483379.947	2087808.024	97.705	Terreno natural
103	483379.782	2087808.021	97.582	Terreno natural
104	483378.453	2087806.906	97.541	Terreno natural
105	483378.174	2087807.050	97.629	Terreno natural
106	483377.739	2087807.330	97.623	Terreno natural





Punto	Coordenada			Descripción
	X	Y	Z	
107	483377.434	2087807.591	97.952	Terreno natural
108	483377.355	2087807.614	98.074	Cadena
109	483377.434	2087807.591	97.952	Cadena
110	483375.890	2087800.868	97.361	Pozo de visita
111	483381.195	2087798.413	97.847	Terreno natural
112	483379.612	2087799.045	97.864	Terreno natural
113	483377.633	2087799.299	97.430	Terreno natural
114	483375.729	2087799.019	97.339	Terreno natural
115	483374.995	2087799.211	97.320	Terreno natural
116	483374.743	2087799.464	97.496	Terreno natural
117	483374.645	2087799.656	97.498	Cadena
118	483374.547	2087799.769	97.689	Cadena
119	483376.745	2087788.558	97.147	Terreno natural
120	483376.257	2087791.678	97.077	Terreno natural
121	483373.919	2087790.674	96.861	Terreno natural
122	483372.414	2087791.015	97.052	Terreno natural
123	483372.727	2087793.259	97.397	Terreno natural
124	483372.735	2087793.506	97.405	Cadena
125	483372.592	2087793.583	97.714	Cadena
126	483370.365	2087785.339	96.714	Pozo de visita
127	483365.172	2087779.233	96.444	Terreno natural
128	483366.298	2087778.435	96.334	Terreno natural
129	483364.538	2087777.549	96.395	Banqueta
130	483365.194	2087776.994	96.330	Banqueta
131	483365.282	2087777.188	96.464	Banqueta
132	483364.438	2087777.815	96.456	Banqueta
133a	483421.718	2087876.029	103.140	Edificio
133b	483421.718	2087876.029	101.306	Edificio
134	483416.536	2087858.542	101.523	Edificio
135	483412.992	2087846.022	101.223	Edificio





Punto	Coordenada			Descripción
	X	Y	Z	
136	483389.284	2087838.586	99.156	Terreno natural
137	483387.564	2087839.490	99.172	Terreno natural
138	483383.628	2087840.742	98.883	Terreno natural
139	483398.589	2087841.033	100.213	Terreno natural
140	483394.445	2087842.727	100.435	Terreno natural
141	483391.925	2087843.557	99.415	Terreno natural
142	483389.384	2087844.566	99.447	Terreno natural
143	483387.802	2087845.500	99.873	Terreno natural
144	483389.106	2087849.512	100.017	Terreno natural
145	483391.920	2087848.759	99.589	Terreno natural
146	483394.904	2087847.228	99.900	Terreno natural
147	483397.808	2087846.456	100.528	Terreno natural
148	483400.853	2087851.814	100.880	Terreno natural
149	483398.350	2087851.447	100.914	CFE
150	483396.507	2087852.837	100.193	Terreno natural
151	483394.232	2087852.968	99.800	Terreno natural
152	483393.723	2087853.233	99.906	Terreno natural
153	483392.949	2087854.175	99.681	Válvula
154	483390.845	2087854.830	99.862	Terreno natural
155	483388.724	2087855.077	99.481	Terreno natural
156	483392.604	2087857.320	99.893	Terreno natural
157	483394.903	2087856.698	100.384	Terreno natural
158	483394.902	2087856.699	100.384	Pozo de visita
159	483395.884	2087856.584	100.102	Terreno natural
160	483398.137	2087852.298	100.711	Barda
161	483397.918	2087851.933	100.706	Barda
162	483395.551	2087860.311	100.246	Barda
163	483395.288	2087860.304	100.238	Barda
164	483395.375	2087862.067	101.121	CFE
165	483395.880	2087860.241	100.268	Terreno natural





Punto	Coordenada			Descripción
	X	Y	Z	
166	483400.923	2087853.091	100.995	Terreno natural
167	483401.455	2087854.460	101.053	Terreno natural
168	483402.072	2087856.481	101.263	Terreno natural
169	483398.662	2087854.753	100.942	Terreno natural
170	483397.580	2087855.396	100.689	Terreno natural
171	483399.130	2087856.281	101.045	Terreno natural
172	483397.802	2087856.955	100.705	Terreno natural
173	483403.786	2087854.574	101.113	Estacionamiento
174	483405.376	2087856.912	101.079	Banqueta
175	483405.351	2087856.872	101.155	Banqueta
176	483405.117	2087856.809	101.158	Banqueta
177	483404.604	2087858.060	101.087	Banqueta
178	483404.567	2087857.997	101.185	Banqueta
179	483404.497	2087857.871	101.189	Banqueta
180	483400.008	2087861.105	101.191	Banqueta
181	483399.986	2087861.057	101.261	Banqueta
182	483399.848	2087860.980	101.265	Banqueta
183	483409.952	2087853.230	101.071	Banqueta
184	483409.934	2087853.146	101.174	Banqueta
185	483409.886	2087852.918	101.174	Banqueta
186	483413.223	2087852.062	101.175	Banqueta
187	483413.261	2087851.980	101.228	Banqueta
188	483413.256	2087851.889	101.212	Banqueta
189	483410.577	2087889.838	101.301	Banqueta
190	483410.491	2087889.828	101.479	Banqueta
192	483406.679	2087878.193	101.129	Banqueta
193	483406.608	2087878.195	101.289	Banqueta
194a	483406.329	2087878.606	100.955	Banqueta
194b	483406.448	2087878.185	101.272	Banqueta
194c	483406.319	2087878.606	101.295	Banqueta





Punto	Coordenada			Descripción
	X	Y	Z	
194d	483406.184	2087878.169	100.955	Banqueta
194e	483406.737	2087878.470	100.955	Banqueta
194f	483406.969	2087878.392	100.955	Banqueta
194g	483406.959	2087878.392	101.130	Banqueta
194h	483406.581	2087878.033	101.130	Banqueta
194i	483406.174	2087878.169	101.295	Banqueta
194j	483406.591	2087878.033	100.955	Banqueta
194k	483406.727	2087878.470	101.130	Banqueta
194l	483406.824	2087877.956	100.955	Banqueta
194m	483406.814	2087877.956	101.130	Banqueta
195	483402.912	2087866.493	101.045	Banqueta
196	483402.761	2087866.450	101.195	Banqueta
197	483402.632	2087866.447	101.231	Banqueta
198	483408.154	2087853.720	101.084	Estacionamiento
199a	483403.915	2087854.374	0.000	Estacionamiento
199b	483406.210	2087854.420	101.080	Estacionamiento
200	483414.279	2087856.486	101.188	Estacionamiento
201	483410.602	2087858.296	101.157	Estacionamiento
202	483406.251	2087860.329	101.141	Estacionamiento
203	483402.166	2087862.395	101.156	Estacionamiento
204	483415.773	2087862.520	101.242	Estacionamiento
205	483412.271	2087864.202	101.228	Estacionamiento
206	483408.269	2087866.082	101.182	Estacionamiento
207	483404.585	2087867.370	101.066	Estacionamiento
208	483417.672	2087868.857	101.236	Estacionamiento
209	483413.806	2087870.414	101.251	Estacionamiento
210	483409.565	2087871.930	101.182	Estacionamiento
211	483419.838	2087876.120	101.195	Estacionamiento
212	483416.555	2087877.855	101.216	Estacionamiento
213	483411.716	2087879.380	101.177	Estacionamiento





Punto	Coordenada			Descripción
	X	Y	Z	
214	483420.717	2087882.600	101.262	Estacionamiento
215	483416.829	2087884.679	101.238	Estacionamiento
216	483413.272	2087884.481	101.180	Estacionamiento
217	483420.222	2087886.880	101.300	Estacionamiento
218	483415.383	2087888.166	101.232	Estacionamiento
219	483425.375	2087884.865	101.439	Terreno natural
220	483425.555	2087883.482	101.323	Terreno natural
221	483424.919	2087879.956	101.472	Terreno natural
222	483431.504	2087883.388	101.484	Terreno natural
223	483431.369	2087881.762	101.428	Terreno natural
224	483430.630	2087877.848	101.448	Terreno natural
225	483437.197	2087882.181	101.495	Terreno natural
226	483436.671	2087880.485	101.489	Terreno natural
227	483435.854	2087876.748	101.492	Terreno natural
228	483442.557	2087879.384	101.545	Terreno natural
229	483442.150	2087878.160	101.557	Terreno natural
230	483440.690	2087874.385	101.575	Terreno natural
231	483448.370	2087876.903	101.616	Terreno natural
232	483448.031	2087875.382	101.606	Terreno natural
233	483447.416	2087873.120	101.582	Terreno natural
234	483454.350	2087873.670	101.618	Terreno natural
235	483454.060	2087872.222	101.687	Terreno natural
236	483453.453	2087869.836	101.603	Terreno natural
237	483460.508	2087869.680	101.617	Terreno natural
238	483459.817	2087868.031	101.651	Terreno natural
239	483458.649	2087866.057	101.550	Terreno natural
240	483463.797	2087865.362	101.673	Terreno natural
241	483463.058	2087864.519	101.578	Terreno natural
242	483461.731	2087864.112	101.591	Terreno natural
243	483438.374	2087871.293	101.592	Edificio





Punto	Coordenada			Descripción
	X	Y	Z	
245	483398.568	2087857.959	100.709	Terreno natural
246	483401.623	2087857.265	101.163	Terreno natural
247	483403.715	2087856.100	101.072	Terreno natural
500	483406.603	2087877.980	101.128	Banqueta
501a	483406.571	2087878.033	101.295	Banqueta
501b	483406.564	2087877.982	101.295	Banqueta
501c	483406.717	2087878.470	101.295	Banqueta
502	483406.404	2087878.016	101.289	Banqueta
503	483406.784	2087878.494	101.134	Banqueta
504	483406.744	2087878.521	101.290	Banqueta
505	483406.586	2087878.569	101.285	Banqueta
506	483406.264	2087877.781	101.191	Zanja
507	483406.346	2087877.997	101.184	Zanja
508	483406.405	2087878.151	101.133	Zanja
509	483406.534	2087878.600	101.125	Zanja
510	483406.621	2087878.720	101.202	Zanja
511	483406.917	2087878.983	101.235	Zanja
512a	483405.860	2087877.716	101.240	Zanja
512b	483405.860	2087877.716	101.295	Zanja
513a	483406.195	2087878.057	202.355	Zanja
513b	483406.340	2087878.493	202.355	Zanja
513c	483406.013	2087878.093	101.235	Zanja
514	483406.191	2087878.274	100.894	Zanja
515	483406.353	2087878.584	100.900	Zanja
516	483406.307	2087878.815	101.201	Zanja
517a	483406.372	2087879.126	101.295	Zanja
517b	483406.372	2087879.126	101.249	Zanja
518a	483403.040	2087879.154	101.160	Zanja
518b	483403.040	2087879.154	100.832	Zanja
519a	483403.262	2087878.723	100.860	Zanja





Punto	Coordenada			Descripción
	X	Y	Z	
519b	483403.262	2087878.723	101.160	Zanja
520a	483402.998	2087879.317	100.604	Zanja
520b	483402.998	2087879.317	100.820	Zanja
521a	483402.658	2087879.638	100.820	Zanja
521b	483402.658	2087879.638	100.636	Zanja
522a	483402.579	2087879.834	100.853	Zanja
522b	483402.579	2087879.834	101.160	Zanja
523a	483402.415	2087880.217	100.843	Zanja
523b	483402.415	2087880.217	101.160	Zanja
524a	483401.537	2087872.231	100.980	Zanja
524b	483401.537	2087872.231	100.928	Zanja
525a	483400.885	2087872.427	100.704	Zanja
525b	483400.885	2087872.427	100.980	Zanja
526a	483400.750	2087872.444	100.475	Zanja
526b	483400.750	2087872.444	100.640	Zanja
527a	483400.403	2087872.594	100.640	Zanja
527b	483400.403	2087872.594	100.417	Zanja
528a	483400.251	2087872.639	100.980	Zanja
528b	483400.251	2087872.639	100.617	Zanja
529a	483399.825	2087872.746	100.700	Zanja
529b	483399.825	2087872.746	100.980	Zanja
530a	483399.695	2087866.044	100.855	Zanja
530b	483399.695	2087866.044	100.868	Zanja
531a	483399.197	2087866.307	100.855	Zanja
531b	483399.197	2087866.307	100.752	Zanja
532a	483398.988	2087866.446	100.515	Zanja
532b	483398.988	2087866.446	100.535	Zanja
534a	483398.240	2087866.773	100.332	Zanja
534b	483398.240	2087866.773	100.515	Zanja
535a	483398.142	2087866.856	100.600	Zanja





Punto	Coordenada			Descripción
	X	Y	Z	
535b	483398.142	2087866.856	100.855	Zanja
536a	483397.325	2087867.191	100.626	Zanja
536b	483397.325	2087867.191	100.855	Zanja
537	483397.049	2087861.491	100.065	Descarga
538	483396.813	2087860.123	100.247	Descarga
540	483396.360	2087858.125	100.400	Descarga
542	483396.027	2087857.549	100.181	Descarga
543	483395.245	2087854.623	99.957	Descarga
544	483394.053	2087851.115	99.703	Descarga
545	483393.434	2087847.871	99.498	Infiltrómetro
546	483388.116	2087833.697	98.834	Infiltrómetro
547	483388.552	2087828.341	98.951	Infiltrómetro
548	483384.502	2087822.963	98.278	Infiltrómetro
549	483381.768	2087815.946	97.901	Infiltrómetro
550a	483383.567	2087813.778	98.201	Infiltrómetro
550b	483381.868	2087807.686	97.950	Infiltrómetro
551	483379.314	2087808.239	97.535	Infiltrómetro
552	483376.102	2087798.868	97.259	Infiltrómetro
553	483377.652	2087796.016	97.533	Infiltrómetro
554	483374.676	2087792.756	96.919	Infiltrómetro
555	483381.604	2087814.690	97.883	Infiltrómetro
556	483381.604	2087814.688	97.884	Pluviómetro
557	483385.780	2087820.890	98.551	Bordo
558	483385.653	2087820.851	98.723	Bordo
559	483384.958	2087821.135	98.745	Bordo
560	483384.891	2087821.163	98.538	Bordo
561	483384.971	2087821.216	98.385	Bordo
562	483383.766	2087821.726	98.291	Bordo
563a	483384.126	2087821.454	98.540	Bordo
563b	483383.752	2087821.596	98.540	Bordo





Punto	Coordenada			Descripción
	X	Y	Z	
563c	483382.630	2087822.023	98.800	Bordo
563d	483384.369	2087821.361	98.800	Bordo
563e	483384.126	2087821.454	98.800	Bordo
563f	483385.836	2087820.803	98.800	Bordo
563g	483384.369	2087821.361	98.540	Bordo
564	483383.682	2087821.607	98.685	Bordo
565	483382.872	2087822.028	98.354	Bordo
566	483382.610	2087822.030	98.722	Bordo
567	483385.354	2087819.860	98.655	Bordo
568	483385.336	2087819.792	98.528	Bordo
569	483384.589	2087820.147	98.581	Bordo
570	483384.529	2087820.160	98.489	Bordo
571	483384.518	2087820.109	98.361	Bordo
572	483383.323	2087820.613	98.566	Bordo
573	483383.374	2087820.578	98.507	Bordo
574	483383.355	2087820.527	98.324	Bordo
576	483382.389	2087820.863	98.610	Bordo
577	483382.406	2087820.873	98.301	Bordo
578	483385.463	2087820.212	98.744	Bordo
579	483385.467	2087820.170	98.680	Bordo
580	483385.520	2087820.162	98.592	Bordo
581	483384.739	2087820.528	98.732	Bordo
582	483384.695	2087820.484	98.634	Bordo
583	483384.682	2087820.539	98.524	Bordo
584a	483383.481	2087821.007	98.730	Bordo
584b	483383.481	2087821.007	98.630	Bordo
585	483383.490	2087820.957	98.511	Bordo
586	483382.396	2087821.409	98.712	Bordo
587	483382.445	2087821.336	98.644	Bordo
588	483385.357	2087818.103	98.524	Zanja





Punto	Coordenada			Descripción
	X	Y	Z	
589	483385.407	2087817.621	98.590	Zanja
590	483385.348	2087818.437	98.518	Zanja
591	483385.347	2087818.929	98.527	Zanja
592	483391.500	2087820.204	99.035	Zanja
593	483391.428	2087820.847	99.006	Zanja
594	483391.472	2087819.946	99.033	Zanja
595	483391.250	2087819.356	98.992	Zanja
596a	483396.672	2087831.416	99.670	Zanja
596b	483396.715	2087831.426	99.670	Zanja
598a	483396.604	2087831.081	99.650	Zanja
598b	483396.555	2087831.064	99.650	Zanja
600a	483390.011	2087829.316	99.410	Zanja
600b	483390.011	2087829.316	99.310	Zanja
600c	483390.011	2087829.316	99.312	Zanja
601	483389.965	2087829.836	99.313	Zanja
602a	483390.031	2087829.053	99.314	Zanja
602b	483390.031	2087829.053	99.410	Zanja
602c	483390.031	2087829.053	99.290	Zanja
602	483389.671	2087828.638	99.310	Zanja
603	483389.974	2087828.448	99.290	Zanja
604	483396.400	2087830.737	99.631	Registro
606	483392.873	2087820.403	99.115	Registro
607	483392.711	2087819.935	99.088	Registro
608	483382.405	2087821.386	98.636	Bordo
609	483381.994	2087820.986	98.267	Muro
610a	483381.991	2087821.034	98.541	Muro
610b	483381.993	2087821.040	99.190	Muro
611a	483381.877	2087821.071	99.190	Muro
611b	483381.876	2087821.065	98.539	Muro
612	483381.031	2087818.234	98.222	Muro





Punto	Coordenada			Descripción
	X	Y	Z	
613	483380.995	2087818.250	98.534	Muro
614	483380.901	2087818.278	98.535	Muro
615	483377.394	2087807.067	97.654	Bordo
616	483377.257	2087807.041	97.870	Bordo
617	483378.072	2087806.810	97.501	Bordo
618	483378.093	2087806.764	97.676	Bordo
619	483378.073	2087806.790	97.752	Bordo
620	483378.029	2087806.748	97.867	Bordo
621	483379.269	2087806.378	97.559	Bordo
622	483379.248	2087806.353	97.710	Bordo
623	483379.293	2087806.346	97.776	Bordo
624	483379.286	2087806.303	97.881	Bordo
625	483380.335	2087805.997	97.772	Bordo
626	483380.450	2087805.885	97.920	Bordo
627	483380.212	2087805.195	97.894	Bordo
628	483379.056	2087805.666	97.901	Bordo
629	483379.031	2087805.671	97.835	Bordo
630	483379.014	2087805.683	97.707	Bordo
631	483377.878	2087806.094	97.693	Bordo
632	483377.833	2087806.076	97.823	Bordo
633	483377.806	2087806.080	97.881	Bordo
634	483377.083	2087806.374	97.851	Bordo
635	483376.799	2087805.990	97.563	Bordo
636	483376.969	2087805.994	97.758	Bordo
637	483377.288	2087805.871	97.744	Bordo
638	483377.319	2087805.809	97.529	Bordo
639	483377.716	2087805.721	97.739	Bordo
640	483377.737	2087805.688	97.685	Bordo
641	483377.695	2087805.628	97.496	Bordo
642	483378.902	2087805.214	97.535	Bordo





Punto	Coordenada			Descripción
	X	Y	Z	
643	483378.871	2087805.273	97.696	Bordo
644	483378.902	2087805.264	97.784	Bordo
645	483379.979	2087804.841	97.694	Bordo
646	483380.072	2087804.867	97.861	Bordo
647	483380.332	2087804.790	97.859	Bordo
648	483376.902	2087789.160	97.195	Bordo
649	483376.837	2087789.111	97.334	Bordo
650	483376.029	2087789.486	97.011	Bordo
651	483375.998	2087789.415	97.379	Bordo
652	483374.748	2087790.007	96.885	Bordo
653	483374.650	2087789.936	97.143	Bordo
654	483374.700	2087789.910	97.305	Bordo
655a	483373.269	2087790.535	96.857	Bordo
655b	483373.269	2087790.535	97.305	Bordo
655c	483373.269	2087790.535	97.143.000	Bordo
655d	483373.269	2087790.535	97.125	Bordo
656	483371.982	2087791.000	97.072	Bordo
657	483371.529	2087791.094	97.373	Bordo
658	483371.282	2087790.437	97.340	Bordo
659	483371.255	2087790.322	97.206	Bordo
660	483372.985	2087789.831	97.278	Bordo
661	483372.986	2087789.789	97.216	Bordo
662	483373.018	2087789.806	97.125	Bordo
663a	483374.396	2087789.273	97.111	Bordo
663b	483374.421	2087789.225	97.235	Bordo
664	483374.421	2087789.225	97.235	Bordo
665	483374.457	2087789.259	97.298	Bordo
666	483376.011	2087788.663	97.369	Bordo
667	483375.955	2087788.674	97.250	Bordo
668	483376.616	2087788.376	97.287	Bordo





Punto	Coordenada			Descripción
	X	Y	Z	
669	483376.641	2087788.324	97.184	Bordo
670	483376.583	2087788.136	97.122	Bordo
671	483376.301	2087788.131	96.991	Bordo
672	483376.279	2087788.188	97.176	Bordo
673	483374.305	2087788.828	96.898	Bordo
674	483374.297	2087788.889	97.103	Bordo
675	483374.362	2087788.908	97.173	Bordo
676	483372.851	2087789.407	96.850	Bordo
677	483372.863	2087789.437	97.065	Bordo
678	483372.821	2087789.458	97.153	Bordo
679	483371.138	2087790.018	96.865	Bordo
680	483371.171	2087790.122	97.172	Bordo
681	483376.987	2087787.864	97.211	Terreno natural
682	483376.050	2087787.765	96.881	Terreno natural
683	483373.211	2087788.298	96.742	Terreno natural
684	483369.727	2087789.077	96.756	Terreno natural
685	483376.184	2087783.003	96.752	Terreno natural
686	483372.262	2087785.668	96.629	Terreno natural
687	483368.380	2087786.975	96.630	Terreno natural
688a	483371.163	2087790.103	97.686	Humedal
688b	483376.632	2087805.915	98.186	Humedal
688c	483380.997	2087818.250	98.186	Humedal
688d	483376.629	2087805.908	97.686	Humedal
689a	483371.003	2087790.142	97.689	Humedal
689b	483380.904	2087818.276	98.189	Humedal
689c	483376.471	2087805.954	98.189	Humedal
689d	483376.468	2087805.947	97.689	Humedal
690	483387.719	2087838.010	99.181	Humedal
691	483387.575	2087838.067	99.183	Humedal





Anexo 3. Memoria fotográfica del levantamiento topográfico

En las siguientes ilustraciones se presentan los puntos levantados durante el desarrollo de los trabajos en campo. Como ya se había mencionado, se levantó la superficie que abarca la microcuenca, los límites y la infraestructura inmersa en la misma.



Recorrido para reconocimiento de terreno



Centrado, nivelado, configuración y toma de puntos topográficos



Vista hacia aguas abajo de la microcuenca



Vista hacia aguas arriba de la microcuenca



Infraestructura vial



Vista lateral (microcuenca y vialidad)



Caja de CFE



Pozo de visita



Caja de operación de válvulas



Límites de la microcuenca con el humedal





Bordo situado en el límite aguas abajo



Límite aguas abajo del humedal



Estacionamiento de hidrometeorología



Parte alta de la microcuenca



Ubicación de estación total (Estación C)

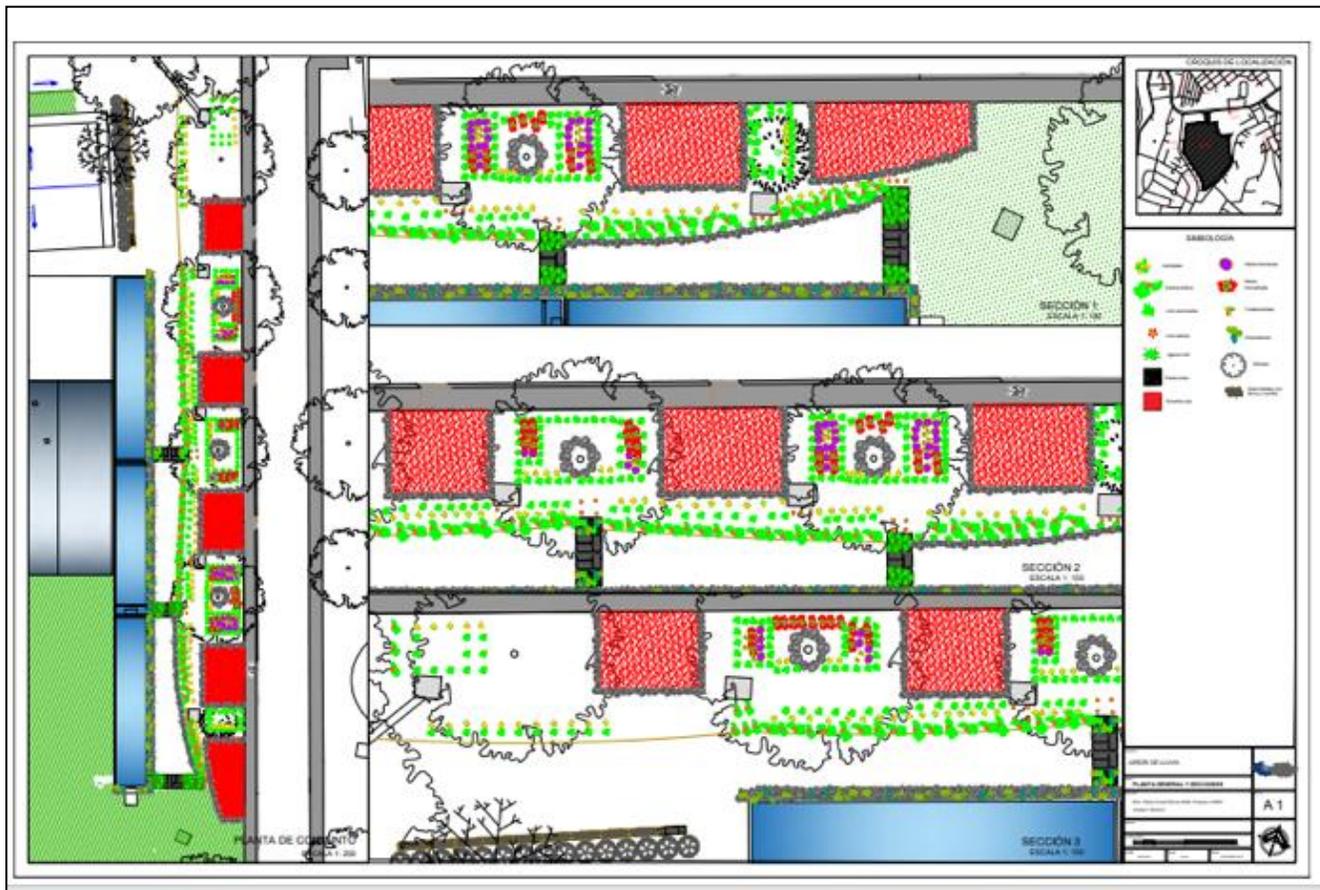


Ubicación de estación total (Estación A)





Anexo 4. Plano de vegetación en el Jardín-Microcuenca-LID





Anexo 5. Paleta vegetal del Jardín Microcuenca LID



Paleta vegetal



Asclepias	<p>Nombre científico: <i>Asclepias curassavica</i></p> <p>Hábitat: Ruderal en sitios húmedos.</p> <p>Origen: América tropical</p>	<p>Dimensiones:</p> <p>Alcanzan los 30 a 60 cm de altura.</p> 	Paleta vegetal
		<p>Características</p> <p>Los tallos pueden ser simples o ramificados. Las hojas, de forma aovada o lineal-lanceolada, se hallan dispuestas en forma espiralada a lo largo de los tallos o pueden ser dísticas, con la lámina foliar entera y sésil o raramente peciolada..</p>	

Tradescantia	<p>Nombre científico: <i>Tradescantia crassifolia</i></p> <p>Hábitat: Ruderal y arvense.</p> <p>Origen: De México a Guatemala.</p>	<p>Dimensiones:</p> <p>Alcanzan los 30 a 60 cm de altura</p>	Paleta vegetal
		<p>Características</p> <p>Tiene hojas opuestas, lanceoladas u oblongo-lanceoladas, y en las extremidades acuminadas o agudas. Las flores surgen en cimas terminales con 10 a 20 flores cada una. Las corolas pueden ser de color púrpura o rojo y los lóbulos de la corona amarillos o naranja por lo que también se la llama bandera española.</p>	



Canna indica	<p>Nombre científico: <i>Canna edulis</i> <i>Salvia microphylla</i></p> <p>Hábitat: Generalmente en terrenos cenagosos perturbados, cercanos a corrientes de agua. Se encuentra frecuentemente en las zanjas que acompañan a carreteras, o en las orillas de canales de riego.</p> <p>Origen: México, Centroamérica, Sudamérica y las Antillas.</p>	<p>Dimensiones:</p> <p>De 30 a 75 cm de largo.</p>	Paleta vegetal
		<p>Características</p> <p>Flores grandes y vistosas, de hasta 8 cm de largo, sésiles o sobre pedicelos cortos; el cáliz de 3 sépalos, a veces uno de ellos más pequeño (persistentes en el ápice del ovario), verdosos o rojizos; la corola con un tubo corto en la base y 3 pétalos, generalmente uno de ellos más pequeño, alternos con los sépalos, angostos, rectos y apuntando hacia arriba, variando en el color del amarillo fuerte al anaranjado o rojo intenso.</p>	

Salvia microphylla	<p>Nombre científico: <i>Salvia microphylla</i></p> <p>Hábitat: Zona montañosa</p> <p>Origen: Oeste y sur de México.</p>	<p>Dimensiones:</p> <p>Pueden alcanzar los 120 cm de altura de largo.</p>	Paleta vegetal
		<p>Características</p> <p>Las hojas son más o menos ovaladas con olor a menta. Los tallos son pubescentes y pueden presentar coloraciones rojizas. Las flores, de color rojo intenso, se disponen de forma opuesta en racimos alargados de hasta 20 cm.</p>	



Salvia farinacea	<p>Nombre científico: tacote y tapachichi</p> <p>Hábitat: Preferentemente en lugares perturbados.</p> <p>Origen: México.</p>	<p>Dimensiones:</p> <p>De 50 a 90 cm de largo.</p>	Paleta vegetal
		<p>Características</p> <p>Flores sobre pedicelos, el cáliz es un tubo acampanado, ligeramente comprimido lateralmente, con pelillos a lo largo de las venas, hacia el ápice se divide en 2 labios, el superior puntiagudo y el inferior terminado en 2 dientes largos; corola azul, con abundantes pelos, de más de 2.5 cm de largo, es un tubo algo abultado hacia su ápice y dividido en 2 labios, el superior en forma de capuchón, el inferior dividido en 3 lóbulos.</p>	

Lirio caminante	<p>Nombre científico: <i>Trimezia sincorana</i></p> <p>Hábitat: Junto a estanques, en rocallas y en sotobosques.</p> <p>Origen: México, Centroamérica, Colombia y Venezuela.</p>	<p>Dimensiones:</p> <p>De 50 a 60 cm de largo.</p>	Paleta vegetal
		<p>Características</p> <p>Flores de color amarillo con marcas marrones en el centro, nacen en lo alto de los tallos redondeados.</p>	



Lirio azteca	<p>Nombre científico: <i>Sprekelia formosissima</i></p> <p>Hábitat: Lugares rocosos, vegetación secundaria derivada de bosque mesófilo, pastizales.</p> <p>Origen: México a Guatemala.</p>	<p>Dimensiones:</p> <p>De 20 a 75 cm de largo...</p>	Paleta vegetal
		<p>Características</p> <p>Flores solitarias (muy raramente 2 o 3 en el mismo escapo), de color rojo escarlata, con simetría bilateral, bisexuales, de 7.5 a 13 cm de largo, los tépalos son 6, libres, casi iguales, 3 tépalos erectos y curvados hacia atrás (reflexos), los otros 3 (al igual que los estambres y el estilo).</p>	

Crasuláceas	<p>Nombre científico: <i>Sprekelia formosissima</i></p> <p>Hábitat: Zonas secas y calurosas, donde el agua es escasa</p> <p>Origen: hemisferio norte y África meridional</p>	<p>Dimensiones:</p> <p>De 5 a 10 cm de largo.</p> 	Paleta vegetal
		<p>Características</p> <p>Hojas simples de disposición varia, alternas, opuestas o en roseta basal, sin estípulas. Flores hermafroditas, regulares; perianto diclamídeo, con frecuencia pentámero, a veces tetramero, hexámero y raramente multímero.</p>	

