

Fratianni, Rocco

**Díaz Bustos Fierro, Francisco
Antonio**

**Evaluación del impacto
hidrológico de la
urbanización e
implementación de SUDS a
nivel de lote**

**Tesis para la obtención del título de
grado de Ingeniero Civil**

Director: Guillén, Nicolás Federico

Documento disponible para su consulta y descarga en Biblioteca Digital - Producción Académica, repositorio institucional de la Universidad Católica de Córdoba, gestionado por el Sistema de Bibliotecas de la UCC.



[Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-Sin
Obra Derivada 4.0 Internacional.](#)



UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE CÓRDOBA
Universidad Jesuita



**UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CÓRDOBA
JESUITAS**

Evaluación del Impacto Hidrológico de la Urbanización e Implementación de SUDS a Nivel de Lote

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CÁTEDRA DE TRABAJO FINAL

Autores:

Fratianni, Rocco

Díaz Bustos Fierro, Francisco Antonio

Tutores:

Dr. Ing. Guillén, Nicolás Federico



Agradecimientos

Rocco:

- A mi mamá, Alejandra Artal, por su apoyo incondicional a lo largo de todos estos años. Su dedicación, comprensión y acompañamiento constante fueron un pilar fundamental durante este proceso, brindándome siempre la fuerza necesaria para avanzar.
- A mi papá, Luis Fratianni, ingeniero civil y principal referente en mi formación profesional. Gracias por transmitirme su pasión por la ingeniería, por su guía permanente y por ofrecerme la oportunidad de desarrollarme dentro de la empresa familiar. Su confianza y ejemplo han sido decisivos en mi crecimiento personal y académico.
- A mi hermana, Chiara Fratianni, por su cariño, paciencia y presencia en cada etapa importante de mi vida. Su apoyo emocional ha sido esencial para mantener el equilibrio durante este camino.
- A mi mejor amigo, Franco Monti, por su amistad leal, por acompañarme en cada desafío y por estar presente tanto en los momentos de esfuerzo como en los de celebración. Su apoyo constante ha sido invaluable.

Francisco:

- A mi papá, Francisco Díaz Cardeilhac, ingeniero civil y dueño de la empresa donde trabajo y continúo formándome. Gracias por inculcarme la aspiración de convertirme en un verdadero profesional, por enseñarme cómo debo desenvolverme en el ámbito de la construcción y por ser un ejemplo constante de compromiso y excelencia. Su guía ha sido fundamental en mi desarrollo personal y académico.
- A mi mamá, Mariángel Bustos Fierro, por su apoyo incondicional y por acompañarme en cada etapa de mi vida. Su confianza en mí y su presencia permanente han sido un sostén esencial para alcanzar este objetivo.
- A mis hermanos menores, Ramiro, Facundo y Pedro, quienes impulsan diariamente mi espíritu emprendedor y me inspiran a buscar siempre una mejor versión de mí mismo. Su energía, admiración y cariño representan una motivación constante para seguir creciendo.

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 1 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Resumen

Este Trabajo Final aborda la evaluación del impacto hidrológico de la urbanización a escala de lote y la eficacia de las estrategias de drenaje urbano sostenible (SUDS), con el propósito de cuantificar su respuesta hidrológica y los impactos que genera la impermeabilización del suelo y sus potenciales factores de mitigación. Mediante la aplicación del modelo hidrológico e hidráulico EPA SWMM, se analizó la influencia de variables geométricas e hidrológicas —como el área, la pendiente, el número de curva (CN) y el factor de ocupación del suelo (FOS)— sobre el caudal pico generado en distintos escenarios de urbanización.

Se realizó un análisis de sensibilidad para identificar los parámetros más influyentes y se determinó la duración crítica de la lluvia para las condiciones representativas de la ciudad de Córdoba. Con estos resultados se elaboraron expresiones empíricas que permiten estimar el caudal pre y post urbanización, introduciendo un nuevo indicador denominado Urban Impact (UI), que cuantifica el incremento relativo del caudal debido a la impermeabilización. Posteriormente, se evaluó la incorporación de tanques retardadores a nivel de lote, determinando su volumen mínimo eficaz y su capacidad para reducir el caudal pico hasta alcanzar condiciones cercanas al estado natural. Finalmente, se comparó esta solución con el funcionamiento de lagunas de retardo tradicionales a nivel de loteo, verificando que la implementación combinada mejora la eficiencia hidráulica y reduce el volumen requerido de almacenamiento global.

El trabajo propone una metodología práctica y validada que integra hidrología urbana, modelación numérica y diseño sostenible, aportando criterios técnicos aplicables a futuras normativas municipales orientadas a la gestión pluvial sustentable.

Palabras clave

Hidrología de Diseño. Drenaje Urbano. Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS).

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 2 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Abstract

This thesis addresses the evaluation of the hydrological impact of urbanization at the lot scale and the effectiveness of Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), with the purpose of quantifying the hydrological response, the impacts generated by soil impermeabilization, and their potential mitigation factors. Using the EPA SWMM hydrologic and hydraulic model, the influence of geometric and hydrological variables —such as area, slope, Curve Number (CN), and Land Occupation Factor (FOS)— was analyzed to assess their effect on the peak discharge under different urbanization scenarios.

A sensitivity analysis was carried out to identify the most influential parameters, and the critical storm duration (30 minutes) was determined for representative conditions of the city of Córdoba. Based on these results, empirical expressions were developed to estimate pre- and post-urbanization flows, introducing a new indicator called Urban Impact (UI), which quantifies the relative increase in runoff caused by impermeabilization. Subsequently, the implementation of retention tanks at the lot scale was evaluated, determining their minimum effective volume and their capacity to reduce peak discharge to near-natural conditions. Finally, this solution was compared with the performance of traditional detention ponds at the subdivision scale, verifying that the combined implementation improves hydraulic efficiency and reduces the overall storage volume required.

The study proposes a practical and validated methodology that integrates urban hydrology, numerical modeling, and sustainable design, providing technical criteria applicable to future municipal regulations aimed at sustainable stormwater management.

Key words

Design Hydrology. Urban Drainage. Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS).

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 3 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Índice

| | |
|---|----|
| Capítulo 1. Marco referencial | 25 |
| 1.1. Introducción | 26 |
| 1.2. Hidrología de Diseño | 27 |
| 1.2.1. Caudal de diseño..... | 28 |
| 1.2.2. Cuenca hidrográfica | 29 |
| 1.2.3. Parámetros hidrológicos | 30 |
| 1.2.4. Lluvias de diseño..... | 37 |
| 1.2.5. Hietogramas e hidrogramas de diseño | 43 |
| 1.3. Modelo de pérdidas | 47 |
| 1.4. Modelo de transformación lluvia caudal | 52 |
| 1.4.1. Fundamentos del proceso lluvia-escorrentía | 53 |
| 1.5. Planteo de la Problemática de los Desagües Urbanos..... | 58 |
| 1.5.1. Inundaciones en áreas urbanas..... | 60 |
| 1.5.2. Impacto hidrológico de la urbanización | 61 |
| 1.5.3. Subsistemas de drenaje urbano: macro y micro drenaje | 62 |

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 4 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| | |
|--|----|
| 1.5.4. Factor de Ocupación de Suelo [F.O.S] | 64 |
| 1.5.5. Hacia un drenaje urbano sostenible: el enfoque LID..... | 66 |
| 1.6. Objetivos..... | 73 |
| 1.6.1. Objetivo general | 73 |
| 1.6.2. Objetivos específicos..... | 73 |
| 1.7. Metodología..... | 74 |

Capítulo 2. Análisis de sensibilidad del modelo EPA SWMM ante diferentes variables simuladas 76

| | |
|---|----|
| 2.1. Introducción | 76 |
| 2.2. Variables analizadas..... | 77 |
| 2.2.1. Área del lote | 78 |
| 2.2.2. Forma..... | 78 |
| 2.2.3. Modelo de pérdidas SCS – CN..... | 80 |
| 2.2.4. Pendiente | 80 |
| 2.2.5. FOS..... | 81 |
| 2.2.6. Coeficiente de rugosidad | 81 |
| 2.2.7. Duración de la lluvia [min]..... | 83 |

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 5 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| | |
|--|-----|
| 2.2.8. Intensidad media de precipitación (i) [mm/h]..... | 85 |
| 2.3. Escenarios simulados | 85 |
| 2.3.1. Introducción..... | 85 |
| 2.3.2. Variables simuladas | 90 |
| 2.4. Resultados..... | 94 |
| 2.4.1. Área..... | 94 |
| 2.4.2. Forma..... | 95 |
| 2.4.3. CN | 98 |
| 2.4.4. Pendiente | 100 |
| 2.4.5. FOS..... | 102 |
| 2.5. Análisis de resultados alcanzados | 104 |
| Capítulo 3. Determinación de la duración critica de la tormenta..... | 107 |
| 3.1. Introducción | 107 |
| 3.2. Lluvia de diseño implementada..... | 108 |
| 3.3. Escenarios simulados | 111 |
| 3.4. Resultados..... | 115 |

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 6 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| | |
|--|-----|
| Capítulo 4. Estimación de los caudales de diseño a nivel de lote pre y post urbanización | 119 |
| 4.1. Introducción | 119 |
| 4.2. Metodología y variables analizadas | 120 |
| 4.3. Análisis de resultados | 124 |
| 4.3.1. Caso base: lote de 250 m ² | 125 |
| 4.3.2. Resultados generales y análisis comparativo | 139 |
| 4.4. Ajuste de ecuaciones | 143 |
| 4.5. Aplicabilidad práctica del modelo | 149 |
| 4.6. Comentarios del capítulo | 150 |
| Capítulo 5. Evaluación de la implementación de tanques retardadores a nivel de lote | |
| | 152 |
| 5.1. Introducción | 152 |
| 5.2. Principio de funcionamiento del tanque..... | 153 |
| 5.3. Variables analizadas | 155 |
| 5.3.1. Variables del lote | 155 |
| 5.3.2. Variables del modelo hidráulico | 156 |
| 5.4. Resultados..... | 157 |

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 7 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| | | |
|-------------|--|-----|
| 5.4.1. | Caso base: lote de 250 m ² con FOS = 50%..... | 157 |
| 5.4.2. | Resultados generales y análisis comparativo | 175 |
| 5.4.3. | Indicadores de impacto hidrológico..... | 177 |
| 5.4.4. | Análisis de resultados – Tabla resumen | 179 |
| 5.4.5. | Ajuste de ecuaciones a partir de los resultados alcanzados | 182 |
| 5.4.6. | Conclusiones del capítulo..... | 193 |
| Capítulo 6. | Evaluación de la implementación de lagunas de retardo a nivel de loteo | |
| | 195 | |
| 6.1. | Introducción | 196 |
| 6.2. | Variables analizadas..... | 198 |
| 6.3. | Modelación | 200 |
| 6.3.1. | Caso base: loteo de 1000 lotes de 250 m ² y FOS = 50%..... | 200 |
| 6.4. | Resultados..... | 202 |
| 6.4.1. | Caso base: loteo de 1000 lotes de 250 m ² y FOS = 50%..... | 203 |
| 6.5. | Resultados generales | 234 |
| 6.6. | Conclusiones | 237 |
| Capítulo 7. | Conclusiones..... | 238 |

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 8 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| | | |
|------------------------------------|--|-----|
| 7.1. | Conclusiones del trabajo realizado | 238 |
| 7.2. | Conclusiones personales | 240 |
| 7.3. | Trabajos futuros | 242 |
| Capítulo 8. Bibliografía | | 244 |
| Capítulo 9. Anexo I: Figuras | | 246 |
| Capítulo 10. Anexo II: Tablas..... | | 0 |

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 9 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Cuenca hidrográfica | 29 |
| Figura 1.2 - Componentes de una cuenca..... | 31 |
| Figura 1.3 - Esquema cuenca: Perímetro y cauce principal..... | 31 |
| Figura 1.4 - Comparación de la forma de cuencas según valores del Coeficiente de Compacidad | 32 |
| Figura 1.5 - Influencia de la configuración de la red hidrológica en las descargas.... | 33 |
| Figura 1.6 - Ramificación de un cauce principal según el modelo de Strahler | 34 |
| Figura 1.7 - Curvas IDF para diseño hidrológico en Córdoba (INA CIRSA 2025) | 42 |
| Figura 1.8 - Hietogramas tipo de la Ciudad de Córdoba (INA CIRSA 2025) | 43 |
| Figura 1.9 - Hidrogramas..... | 44 |
| Figura 1.10 - Comportamiento hidrológico: hietograma e hidrograma | 45 |
| Figura 1.11 - Esquema general del proceso lluvia-escurrimiento..... | 52 |
| Figura 1.12 - Procesos del ciclo hidrológico | 55 |
| Figura 1.13 - Relación entre impermeabilización y aumento del escurrimiento superficial (Manual de drenaje urbano de Guayaquil, 2016) | 59 |
| Figura 1.14 - Impacto hidrológico de la urbanización (Betoni, 2004) | 60 |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 10 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| | |
|--|----|
| Figura 1.15 - Efecto de la urbanización sobre el hidrograma de escorrentía | 62 |
| Figura 1.16 - Subsistemas asociados al drenaje urbano (Bertoni, 2004) | 63 |
| Figura 1.17 - Pavimento permeable | 67 |
| Figura 1.18 - Zanja de infiltración | 67 |
| Figura 1.19 - Jardín de lluvia | 68 |
| Figura 1.20 - Tanque de retardo | 68 |
| Figura 1.21 - Cubierta verde..... | 69 |
| Figura 1.22 - Biorretención | 69 |
| Figura 1.23 - Esquema tanque de retardo | 71 |
| Figura 1.24 - Modelo de tanque de retardo en EPA SWMM | 72 |
| Figura 2.1 - Esquema de la forma en EPA SWMM..... | 79 |
| Figura 2.2 - Esquema de subcuenca en EPA SWMM con zonas permeable e impermeable..... | 82 |
| Figura 2.3 - Modelo de hietograma..... | 84 |
| Figura 2.4 - Definición de subcuenca y parámetros en EPA SWMM | 87 |
| Figura 2.5 - Hietograma TR=100 años d=120 min..... | 89 |
| Figura 2.6 - Relación Caudal Área para T.R. = 100 años | 95 |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 11 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| | |
|---|-----|
| Figura 2.7 - Relación Caudal–Forma para T.R. = 100 años..... | 97 |
| Figura 2.8 - Gráfico de variación del caudal pico en función del número de curva (CN) | 99 |
| Figura 2.9 - Gráfico de variación del caudal pico en función de la pendiente de la cuenca..... | 101 |
| Figura 2.10 - Gráfico de variación del caudal pico en función del FOS (%) A=360 m ² TR=100 años | 103 |
| Figura 3.1 - Curvas IDT de Córdoba (2024) | 109 |
| Figura 3.2 - IDT de Córdoba d=15 (min)..... | 111 |
| Figura 3.3 - Duración critica de lluvia-S=1%..... | 116 |
| Figura 3.4 - Duración critica de lluvia-S=1%..... | 117 |
| Figura 4.1 - Curvas de variación del impacto hidrológico (UI) en función del FOS para un lote de 250 m ² , considerando distintos tiempos de retorno (T5, T10 y T25) | 122 |
| Figura 4.2 - Curvas de variación del caudal de escorrentía (Q) en función del FOS para un lote de 250 m ² , considerando distintos tiempos de retorno (T5, T10 y T25) | 123 |
| Figura 4.3 -Configuración del modelo hidrológico en EPA SWMM 5.2 para el caso base (A = 250 m ²), mostrando las dos subcuenca utilizadas: una para la condición natural (Q_0) y otra para la condición urbanizada (Q) con variación del FOS | 125 |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 12 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| | |
|--|-----|
| Figura 4.4 - Ventana de propiedades de la subcuenca S1 (Q_0) correspondiente a la condición natural del lote ($A = 250 \text{ m}^2$), mostrando los parámetros geométricos e hidráulicos configurados en el modelo EPA SWMM | 127 |
| Figura 4.5 - Configuración de la tormenta (Rain Gage) en EPA SWMM 5.2, vinculado a la serie temporal $T=5-d=30$ correspondiente al evento de diseño con $T = 5$ años y duración de 30 minutos | 128 |
| Figura 4.6 - Ventana del módulo Time Series Editor en EPA SWMM 5.2, mostrando los valores de intensidad de lluvia (mm/h) ingresados para el evento de diseño $T = 5$ años y duración $d = 30$ min | 129 |
| Figura 4.7 - Hietograma de lluvia de diseño correspondiente al evento $T = 5$ años y duración $d = 30$ min, generado en el módulo Time Series Viewer de EPA SWMM | 130 |
| Figura 4.8 -Configuración del método de infiltración Curve Number en EPA SWMM 5.2, mostrando los parámetros utilizados en la simulación del caso base ($A = 250 \text{ m}^2$, CN = 70) | 131 |
| Figura 4.9 - Ventana de propiedades de S2 (Q), donde se observa la variación del porcentaje de área impermeable (%Imperv) utilizada para representar los distintos valores de FOS en el análisis..... | 132 |
| Figura 4.10 - Configuración de S2 (Q) en EPA SWMM 5.2, mostrando la variación del porcentaje de área impermeable (%Imperv) utilizada para representar los distintos valores del Factor de Ocupación del Suelo (FOS) en las simulaciones (10 %, 25 %, 50 %, 75%, 100 %) | 134 |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 13 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| | |
|---|-----|
| Figura 4.11 - Resultados del modelo hidrológico en EPA SWMM 5.2 para S1 (FOS = 0 %) y S2 (FOS = 50 %), mostrando los valores comparativos de infiltración, escorrentía y caudal pico | 135 |
| Figura 4.12 - Hidrogramas de escorrentía superficial obtenidos para S1 (FOS = 0%) y S2 (FOS = 50%) – Caso base A = 250 m ² , T = 5 años. Se observa el aumento del caudal pico y la reducción del tiempo de concentración con el incremento del FOS..... | 136 |
| Figura 4.13 - Curvas de variación del caudal de escorrentía (Q) en función del FOS para el lote de A = 250 m ² , considerando los períodos de retorno T5, T10 y T25 | 137 |
| Figura 4.14 - Curvas de variación del impacto hidrológico relativo (UI = Q/Q ₀) en función del FOS para el lote de A = 250 m ² , considerando los períodos de retorno T5, T10 y T25 | 138 |
| Figura 4.15 - Curvas de variación del impacto hidrológico (UI = Q/Q ₀) en función del FOS para distintos tamaños de lote, correspondientes al período de retorno T = 5 años... | 140 |
| Figura 4.16 - Curvas de variación del impacto hidrológico (UI = Q/Q ₀) en función del FOS para distintos tamaños de lote, correspondientes al período de retorno T = 10 años. | 141 |
| Figura 4.17 - Curvas de variación del impacto hidrológico (UI = Q/Q ₀) en función del FOS para distintos tamaños de lote, correspondientes al período de retorno T = 25 años. | 141 |
| Figura 4.18 - Relación entre los valores observados y estimados del caudal pre urbanización (Q ₀) obtenida a partir del modelo de regresión múltiple logarítmica. | 146 |
| Figura 4.19 - Relación entre los valores observados y estimados del parámetro Urban Impact (UI) obtenida a partir del modelo de regresión múltiple logarítmica | 148 |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 14 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| | |
|---|-----|
| Figura 5.1 - Esquema hidráulico del modelo con tanque retardador implementado en EPA SWMM..... | 154 |
| Figura 5.2 - Esquema general del modelo en EPA SWMM 5.2 para el análisis del lote de 250 m ² con tanque retardador. Se observa la incorporación de S3 y el sistema de almacenamiento y conducción asociados al tanque..... | 158 |
| Figura 5.3 - Propiedades de S3 en EPA SWMM 5.2, correspondiente al lote urbanizado con FOS = 50 % y tanque retardador..... | 160 |
| Figura 5.4 - Esquema hidráulico del modelo implementado en EPA SWMM para el lote con tanque retardador, mostrando la conexión de S3 con el sistema de derivación y almacenamiento | 162 |
| Figura 5.5 - Configuración de la unidad de almacenamiento (Storage Unit) en EPA SWMM 5.2, mostrando la selección de forma piramidal sin talud (tanque rectangular) y los parámetros geométricos empleados para la simulación..... | 163 |
| Figura 5.6 - Ventana de configuración de reglas de control (Control Rules) en EPA SWMM 5.2, utilizadas para simular el funcionamiento automático del flotante del tanque retardador en función del nivel de agua almacenado | 165 |
| Figura 5.7 - Curva característica de la bomba de descarga (HQ) configurada en EPA SWMM 5.2, mostrando la relación entre altura manométrica y caudal de bombeo | 166 |
| Figura 5.8 - Hidrogramas de escorrentía para los tres escenarios: lote natural (S1), lote urbanizado (S2) y lote urbanizado con tanque retardador (C3)..... | 168 |
| Figura 5.9 - Caudales máximos registrados en los nodos del sistema hidráulico ... | 169 |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 15 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| | |
|--|-----|
| Figura 5.10 - Hidrogramas internos del sistema correspondiente a la subcuenca S3 (tanque retardador) | 170 |
| Figura 5.11 - Variación temporal de la profundidad del tanque retardador durante el evento de lluvia ($T = 5$ años, FOS = 50 %) | 172 |
| Figura 5.12 - Relación entre el volumen del tanque retardador y el caudal pico para el caso base ($A = 250 \text{ m}^2$, FOS = 50 %) | 173 |
| Figura 5.13 - Relación entre el volumen mínimo del tanque (V_{min}) y el Factor de Ocupación del Suelo (FOS) para las distintas áreas analizadas | 176 |
| Figura 5.14 - Expresión de ajuste del volumen mínimo (V_{min}) en función del FOS y del área del lote | 185 |
| Figura 5.15 - Ábaco de relación entre área, FOS y volumen mínimo (V_{min}) | 186 |
| Figura 5.16 - Expresión de ajuste de LID_0 en función del FOS y del área del lote | 188 |
| Figura 5.17 - Expresión de ajuste de LID_f en función del FOS y del área del lote | 190 |
| Figura 5.18 - Expresión de ajuste de Atan/Atot en función del FOS y del área del lote | 192 |
| Figura 6.1 - Hidrogramas comparativos de aporte pre-urbanización, post-urbanización y post-laguna para TR = 25 años | 198 |
| Figura 6.2 - Propiedades de la subcuenca S1 en EPA SWMM para el lote tipo ($A = 250 \text{ m}^2$, FOS = 50 %, TR = 25 años, $t = 30 \text{ min}$) | 204 |
| Figura 6.3 - Resultados hidrológicos del lote tipo ante la lluvia de TR = 25 años.... | 205 |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 16 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| | |
|--|-----|
| Figura 6.4 - Hidrograma de escorrentía de la subcuenca S1 bajo lluvia de TR = 25 años | 206 |
| Figura 6.5 - Hidrograma sintético del loteo obtenido mediante el método HU-SCS | 207 |
| Figura 6.6 - Hidrograma del loteo preobra obtenido mediante el método HU-SCS (Q _p = 3,88 m ³ /s) | 209 |
| Figura 6.7 - Esquema geométrico de la laguna de retardo y dispositivos de descarga | 211 |
| Figura 6.8 - Relación volumen-altura de la laguna..... | 212 |
| Figura 6.9 - Hidrogramas de entrada y salida de la laguna para TR = 25 años | 213 |
| Figura 6.10 - Evolución del nivel de agua en la laguna y cota del vertedero para TR = 25 años..... | 214 |
| Figura 6.11 - Hidrogramas de entrada y salida de la laguna para TR = 5 años | 216 |
| Figura 6.12 - Evolución del nivel de agua en la laguna para TR = 5 años | 217 |
| Figura 6.13 - Hidrogramas de escorrentía para lluvia de 5 años: comparación entre lote con tanque de retardo y lote sin tanque (caudal en L/s) | 218 |
| Figura 6.14 - Propiedades de la subcuenca S3 para el lote individual con LID modelado en EPA SWMM..... | 220 |
| Figura 6.15 - Resultados hidrológicos del lote con LID para TR = 25 años (caudal pico, tiempo al pico y volumen total)..... | 221 |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 17 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| | |
|---|-----|
| Figura 6.16 - Comparación entre el hidrograma de escorrentía del lote y el caudal erogado por el tanque de retardo (TR = 25 años) | 221 |
| Figura 6.17 - Hidrograma sintético del loteo urbanizado con LID (método HU-SCS) | 223 |
| Figura 6.18 - Hidrogramas de entrada y salida de la laguna de retardo con LID (TR = 25 años)..... | 225 |
| Figura 6.19 - Evolución del nivel de agua en la laguna con LID para TR = 25 años | 226 |
| Figura 6.20 - Hidrogramas de entrada y salida de la laguna con LID para TR = 5 años | 227 |
| Figura 6.21 - Hidrogramas de entrada y salida de la laguna con LID para TR = 5 años | 228 |
| Figura 6.22 - Nivel en laguna diseñada sin LID, con lluvia TR = 5 años para loteo con LID (~0,60 m)..... | 230 |
| Figura 6.23 - Loteo de 1000 lotes con uso de LID y sin uso | 235 |
| Figura 6.24 - Loteo de 100 lotes con uso de LID y sin uso | 236 |
| Figura 9.1 - Relación Caudal–Área para T.R. = 10 años | 246 |
| Figura 9.2 - Gráfico de variación del caudal en función de la forma de la cuenca para un T.R. = 10 años y A = 1000 m ² | 247 |
| Figura 9.3 - Gráfico de variación del caudal en función de la forma de la cuenca para un T.R. = 100 años y A = 360 m ² | 247 |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 18 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| | |
|--|-----|
| Figura 9.4 - Gráfico de variación del caudal en función de la forma de la cuenca para un T.R. = 10 años y A = 360 m ² | 248 |
| Figura 9.5 - Gráfico comparativo de caudal pico en función del número de curva (CN) TR=10 años | 249 |
| Figura 9.6 - Gráfico comparativo de caudal pico en función del número de curva (CN) TR=100 años | 249 |
| Figura 9.7 - Gráfico comparativo de caudal pico en función del número de curva (CN) TR=10 años | 250 |
| Figura 9.8 - Gráfico de variación del caudal pico en función de la pendiente de la cuenca A=360 TR=10 años | 251 |
| Figura 9.9 - Gráfico de variación del caudal pico en función de la pendiente de la cuenca A=5000 m ² TR=100 años..... | 251 |
| Figura 9.10 - Gráfico de variación del caudal pico en función de la pendiente de la cuenca A=5000 m ² TR=10 años..... | 252 |
| Figura 9.11 - Gráfico de variación del caudal pico en función del FOS (%) A=360 m ² TR=10 años | 253 |
| Figura 9.12 - Gráfico de variación del caudal pico en función del FOS (%) A=10000 m ² TR=100 años | 253 |
| Figura 9.13 - IDT de Córdoba d=30 (min)..... | 254 |
| Figura 9.14 - IDT de Córdoba d=60 (min)..... | 254 |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 19 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| | |
|---|-----|
| Figura 9.15 - IDT de Córdoba d=120 (min)..... | 255 |
| Figura 9.16 - Duración critica de lluvia-S=0.1% | 256 |
| Figura 9.17 - Duración critica de lluvia-S=0.1% | 257 |
| Figura 9.18 - Duración critica de lluvia-S=5% | 258 |
| Figura 9.19 - Duración critica de lluvia-S=5% | 259 |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 20 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Índice de tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 1.1 - Determinación del Número de Curva..... | 50 |
| Tabla 2.1-Intensidad de lluvia TR=10 años | 90 |
| Tabla 2.2-Intensidad de precipitación TR=100 años..... | 90 |
| Tabla 2.3-Tabla resumen de variables y rangos analizados | 93 |
| Tabla 2.4-Resumen de variación del caudal pico en función del número de curva (CN) | 98 |
| Tabla 2.5-Variación del caudal pico en función de la pendiente de la cuenca | 100 |
| Tabla 2.6-Resumen de variación del caudal pico en función del FOS (%)..... | 102 |
| Tabla 2.7-Resumen de valores y sus rangos que se usarán a lo largo del Trabajo Final | 106 |
| Tabla 3.1-Parámetros fijos y variables utilizados en las simulaciones del análisis de duración crítica de la precipitación | 114 |
| Tabla 5.1-Relación entre el volumen mínimo del tanque (Vmin) y el Factor de Ocupación del Suelo (FOS) para las distintas áreas analizadas. | 180 |
| Tabla 6.1-Dimensiones geométricas adoptadas para la laguna de retardo..... | 211 |
| Tabla 6.2-Caudales máximos de entrada y salida y porcentaje de atenuación (TR = 25 años). | 214 |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 21 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



| | |
|--|-----|
| Tabla 6.3-Dimensiones adoptadas para la laguna de retardo en el escenario con LID. | 224 |
| Tabla 6.4-Resumen de resultados del caso base para los escenarios con y sin LID | 233 |
| Tabla 10.1-Variación del caudal en función del área de la cuenca para un T.R. = 100 años..... | 0 |
| Tabla 10.2-Variación del caudal en función del área de la cuenca para un T.R. = 10 años..... | 1 |
| Tabla 10.3-Variación del caudal en función de la forma de la cuenca para un T.R. = 100 años..... | 2 |
| Tabla 10.4-Variación del caudal en función de la forma de la cuenca para un T.R. = 10 años y A = 1000 m ² | 3 |
| Tabla 10.5-Variación del caudal en función de la forma de la cuenca para un T.R. = 100 años y A = 360 m ² | 4 |
| Tabla 10.6-Variación del caudal en función de la forma de la cuenca para un T.R. = 10 años y A = 360 m ² | 5 |
| Tabla 10.7-Variación del caudal pico en función del número de curva (CN) TR=100 años..... | 6 |
| Tabla 10.8-Variación del caudal pico en función del número de curva (CN) TR=10 años | 7 |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 22 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| | |
|---|----|
| Tabla 10.9-Variación del caudal pico en función del número de curva (CN) TR=100 años..... | 8 |
| Tabla 10.10-Variación del caudal pico en función del número de curva (CN) TR=10 años..... | 9 |
| <i>Tabla 10.11-Variación del caudal pico en función de la pendiente de la cuenca TR=100 A=360</i> | 10 |
| Tabla 10.12-Variación del caudal pico en función de la pendiente de la cuenca TR=10 A=360 m ² | 11 |
| Tabla 10.13-Variación del caudal pico en función de la pendiente de la cuenca TR=10 A=5000 m ² | 12 |
| Tabla 10.14-Variación del caudal pico en función de la pendiente de la cuenca TR=10 A=5000 m ² | 13 |
| Tabla 10.15-Variación del caudal pico en función del FOS (%) A=360 m ² TR=100 años | 14 |
| Tabla 10.16-Variación del caudal pico en función del FOS (%) A=360 m ² TR=10 años | 15 |
| Tabla 10.17-Variación del caudal pico en función del FOS (%) A=10000 m ² TR=100 años..... | 16 |
| Tabla 10.18-Variación del caudal pico en función del FOS (%) A=10000 m ² TR=10 años..... | 17 |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 23 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Tabla 10.19-Relaciones de micoembalses con uso y sin uso de LID para lotes 18

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 24 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Capítulo 1. Marco referencial

A continuación, se presenta el desarrollo del Capítulo 1: Marco referencial, que reúne los fundamentos teóricos necesarios para comprender los principales conceptos que se utilizaran en el Trabajo Final.

El capítulo se organiza de forma secuencial, siguiendo el recorrido natural del proceso hidrológico del agua como recurso hídrico: desde la definición de la cuenca y sus características, hasta la transformación de la precipitación en caudal y su posterior escurrimiento a través de los sistemas de drenaje urbano.

En primer lugar, se aborda la lluvia de diseño, donde se establecen los criterios y parámetros que permiten definir una lluvia de cálculo representativa —su intensidad, duración y frecuencia— base indispensable para el dimensionamiento de cualquier infraestructura hidráulica.

Posteriormente, se presentan los modelos de transformación lluvia–caudal, que simulan cómo una precipitación dada se traduce en escorrentía superficial. En el caso de este Trabajo Final se ha utilizado el EPA SWMM.

El capítulo continúa con el planteo de la problemática de los desagües urbanos, en el que se examina el impacto hidrológico de la urbanización, la estructura del sistema pluvial —tanto a nivel de macro como microdrenaje— y los efectos que genera la impermeabilización del suelo sobre la capacidad natural de infiltración.

Finalmente, se introducen los conceptos de función básica y complementaria del drenaje y las estrategias de desarrollo urbano de bajo impacto (LID), que representan una

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 25 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



evolución en la gestión del agua de lluvia, orientada a recuperar el equilibrio hidrológico mediante soluciones sostenibles a escala local.

En conjunto, este capítulo proporciona el marco conceptual que sustenta todo el trabajo, articulando los principios de la hidrología urbana con las herramientas de diseño y gestión necesarias para alcanzar un enfoque de drenaje urbano sostenible y de impacto hidrológico nulo.

1.1. Introducción

El comportamiento del agua en la ciudad es el reflejo directo de cómo ocupamos y transformamos el territorio. Cada calle pavimentada, cada techo o vereda impermeable altera el ciclo natural del agua, reduciendo su capacidad de infiltración y acelerando el escurrimiento superficial. Lo que antes era un proceso gradual y equilibrado —donde la lluvia se infiltraba, evaporaba o fluía lentamente hacia los cauces naturales—, hoy se ha convertido en una respuesta inmediata y concentrada que sobrecarga los sistemas de drenaje urbano.

Este cambio de dinámica es uno de los principales desafíos de la ingeniería actual: diseñar ciudades capaces de convivir con el agua, en lugar de simplemente evacuarla. Para lograrlo, es necesario comprender el funcionamiento hidrológico de las cuencas, los procesos que intervienen en la generación de escorrentía y las variables que definen su magnitud e intensidad.

En este sentido, el presente capítulo introduce los fundamentos teóricos e hidrológicos sobre los que se construye el análisis posterior. Se abordan conceptos como la hidrología de diseño, las características físicas de las cuencas, las lluvias de diseño y los modelos de

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 26 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



transformación lluvia-caudal, herramientas que permiten estimar con precisión la respuesta hidrológica ante distintos escenarios de urbanización.

A partir de estos conceptos, se plantea el problema de los desagües urbanos como consecuencia del crecimiento y la impermeabilización del suelo, y se introducen los enfoques modernos de drenaje urbano sostenible (LID), que buscan restablecer el equilibrio hidrológico a través de soluciones distribuidas y de bajo impacto.

1.2. Hidrología de Diseño

En el contexto de este Trabajo Final, la hidrología de diseño constituye la base metodológica sobre la cual se analizan los efectos de la urbanización y se dimensionan las medidas de mitigación propuestas.

La hidrología de diseño es una rama de la hidrología que aplica principios científicos y análisis estadísticos para simular y predecir el comportamiento del agua en un entorno determinado. Su propósito principal es obtener información cuantitativa para diseñar de manera segura y eficiente obras hidráulicas y sistemas de gestión de recursos hídricos.

Permite establecer las condiciones críticas de precipitación y escorrentía que definen la respuesta hidrológica de los lotes urbanos, integrando variables como la intensidad, duración y frecuencia de la lluvia. De esta manera, la hidrología de diseño no solo proporciona los parámetros de cálculo, sino también el marco de comparación entre escenarios con y sin medidas sostenibles, posibilitando evaluar el impacto hidrológico nulo a nivel de lote.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 27 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



1.2.1. Caudal de diseño

El caudal representa el volumen de agua que atraviesa una sección del terreno o una conducción en un intervalo de tiempo. Es, en esencia, la forma en que medimos la “respuesta” del sistema ante un evento de lluvia.

Cuando precipita sobre una superficie, parte del agua se infiltra, otra parte se evapora o se almacena temporalmente, y el resto fluye como escorrentía superficial. El caudal resulta de ese proceso de transformación: cuánta agua logra finalmente escurrir y con qué rapidez.

El caudal de diseño es la magnitud de caudal que se utiliza para dimensionar y diseñar obras de ingeniería hidráulica y sistemas de manejo de agua. Este valor no es una simple medición, sino una estimación que se determina mediante complejos análisis hidrológicos y estadísticos. En la hidrología de diseño, el caudal de diseño es un dato crítico que garantiza que una estructura funcione de manera segura y eficiente a lo largo de su vida útil.

Desde el punto de vista hidrológico, conocer el caudal es entender el comportamiento dinámico del agua. Un mismo evento de lluvia puede generar respuestas completamente distintas dependiendo de las condiciones del terreno: su pendiente, su permeabilidad o su cobertura.

Por eso, el caudal no depende únicamente de la lluvia, sino también de dónde ocurre esa lluvia: la cuenca hidrográfica. Para poder estimar correctamente la cantidad de agua que se genera y cómo se comporta, primero debemos delimitar ese espacio físico donde el agua cae, se infiltra, se acumula y finalmente fluye. A continuación, se introduce el concepto de cuenca hidrográfica, punto de partida de todo análisis hidrológico, y las variables que determinan su respuesta ante un evento de precipitación.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 28 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



1.2.2. Cuenca hidrográfica

En términos generales, una cuenca es el área que drena hacia un mismo punto. En este Trabajo Final trabajamos con microcuenca, asociadas a lotes individuales, como los que un usuario podría adquirir para construir su vivienda. La forma, la pendiente y la cobertura superficial (suelo natural, hormigón, césped) condicionan la respuesta cuando llueve y definen cuánta agua se infiltra, se acumula o se escurre. En la Figura 1.1 se muestra una cuenca hidrográfica.



Figura 1.1 - Cuenca hidrográfica

Para entender de una mejor manera la cuenca, es necesario analizar: hacia dónde fluye el agua, qué obstáculos encuentra, cuánta pendiente presenta y qué superficies son permeables o impermeables. Este ejercicio, que podría parecer simple, determina por completo el comportamiento hidrológico posterior. Una cuenca con pendientes suaves y suelos porosos absorberá buena parte de la precipitación; en cambio, una cuenca urbana —pavimentada y encauzada por cordones— canalizará el agua con mayor velocidad y concentración.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 29 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Empezar por la cuenca no es casualidad. Todo lo demás —la lluvia de diseño, el método de cálculo o el modelo de simulación— depende de cuál sea el ámbito físico en estudio. Si se trata de una superficie pequeña y homogénea, bastan modelos empíricos simples; si el terreno es complejo o incluye distintos tipos de cobertura, conviene recurrir a herramientas de simulación más detalladas.

En definitiva, conocer la cuenca es conocer el punto de partida del problema hidrológico. Entonces ¿Qué implica conocer la cuenca? Básicamente consiste en definir las variables que condicionan su comportamiento, como en todo sistema físico. Las mismas se llaman parámetros hidrológicos y describen como la cuenca procesa, determinando qué parte se infiltra, cuánto se acumula y con qué velocidad se produce la escorrentía.

1.2.3. Parámetros hidrológicos

Como se mencionó anteriormente, los parámetros hidrológicos describen las propiedades físicas y geométricas que influyen en la respuesta de una cuenca frente a un evento de precipitación. En definitiva, explican por qué dos terrenos bajo una misma lluvia pueden comportarse de forma completamente distinta.

Entre los más relevantes se destacan:

- **Área de la cuenca:** Es la superficie del terreno en las aguas de las precipitaciones que concurren a un mismo punto de evacuación a través de cauces secundarios o quebradas que se unen a un cauce principal. A continuación en la Figura 1.2 se muestra gráficamente el área de una cuenca y sus componentes principales.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 30 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

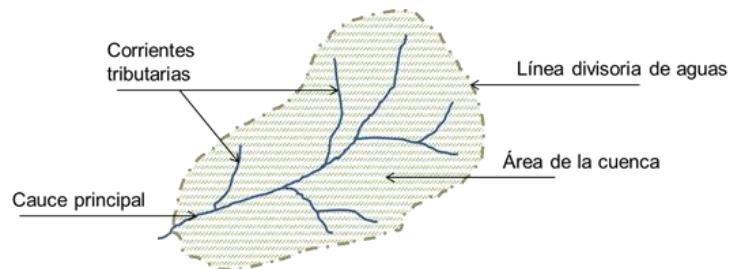


Figura 1.2 - Componentes de una cuenca

- **Longitud del cauce principal:** Este parámetro suele coincidir con la longitud del cauce más largo, y es un criterio muy representativo de la longitud de una cuenca. Puede medirse considerando toda la sinuosidad del cauce o la longitud del eje del mismo.
- **Perímetro de la cuenca:** Es la longitud de la línea divisoria de aguas y conforma el contorno del área de la cuenca. Cuando se compara cuencas de la misma área, este parámetro es útil para diferenciar la forma de la cuenca. Es decir, si es alargada o redondeada. A continuación, en la Figura 1.3 se deja un esquema en el cual se puede diferenciar el perímetro y el cauce principal.

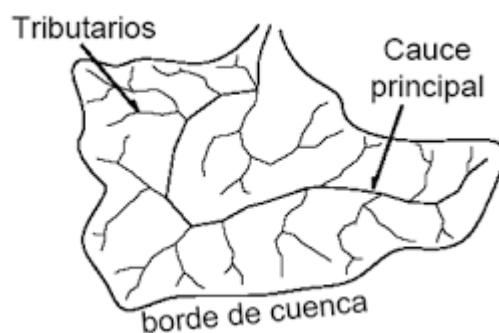


Figura 1.3 - Esquema cuenca: Perímetro y cauce principal

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 31 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



- **Forma de la cuenca:** Para identificar las características de forma se emplean varios parámetros asociados con la relación área, perímetro o la longitud del cauce de agua más largo que se define como la distancia desde el punto de la salida de desembocadura de la cuenca hasta el punto agua arriba más alejada. Los índices más usuales son:
 - a. **Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius:** Establece la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia de área equivalente a la superficie de la cuenca correspondiente. A continuación, en la Figura 1.4 se observa visualmente las diferencias existentes en cuencas con distintos coeficientes de compacidad.

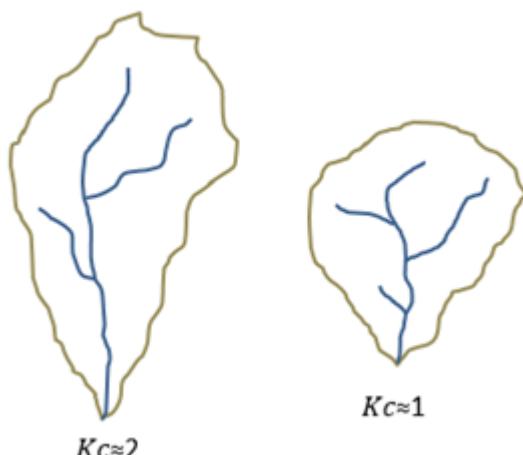


Figura 1.4 - Comparación de la forma de cuencas según valores del Coeficiente de Compacidad

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 32 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



b. Factor de forma: Es uno de los parámetros que explica la elongación de una cuenca. Se expresa como la relación entre el área de la cuenca y la longitud de la misma. Si la forma de la cuenca es aproximadamente circular, entonces el valor de F_f se acercará a uno. Mientras que, las cuencas más alargadas, tendrán un F_f menor. En las cuencas alargadas, las descargas son de menor volumen debido a que el cauce de agua principal es más largo que los cauces secundarios y los tiempos de concentración para eventos de precipitación son distintos. A continuación, en la Figura 1.5 se muestra la influencia en la variación de la forma de la cuenca debido a este factor.

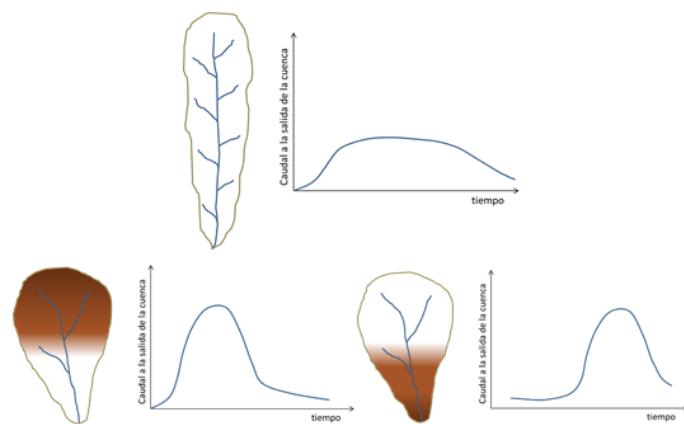


Figura 1.5 - Influencia de la configuración de la red hidrológica en las descargas

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 33 de 273 |
| <p>DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



- **Sistema de drenaje:** El sistema de drenaje está constituido por un cauce principal y sus cauces tributarios. Mientras más largo sea el cauce de agua principal, más ramificaciones tendrá la red de drenaje. Los parámetros más representativos son:
 - a) **Orden de los cauces:** Uno de los criterios empleados se basa en el modelo de Strahler que consiste en asignarle un número a cada uno de los cauces tributarios en forma creciente, desde el inicio de la línea divisoria de aguas hasta llegar al cauce principal de manera que el número final señale el orden de la red de drenaje en la cuenca. A continuación, en la Figura 1.6 se muestra una ramificación del cauce principal según el modelo de Strahler.

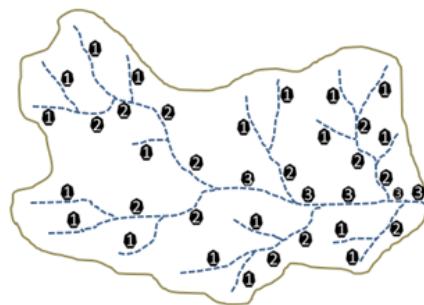


Figura 1.6 - Ramificación de un cauce principal según el modelo de Strahler

- **b) Razón de bifurcación:** Es un parámetro que resulta de la relación entre el número de cauces de un orden dado y el número de cauces del orden inmediatamente superior. Valores muy altos de esta relación, está determinado a terrenos escarpados, los suelos son muy erosionables. Además, que, estas cuencas presentan una amplia red hidrográfica con muchos cauces tributarios con rápida respuesta a la precipitación.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 34 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



- **Densidad de drenaje:** Este parámetro indica la relación entre la longitud total de los cursos de agua irregulares y regulares de la cuenca y la superficie total de la misma. De otra manera, expresa la capacidad de desalojar un volumen de agua dado. Este parámetro es muy representativo respecto a la topografía de la cuenca en los estudios. Valores mínimos de esta relación están asociados a regiones con materiales de suelo poco erosionables, baja cubierta de vegetación y pendientes planas. Mientras que, valores altos refieren a que las precipitaciones intervienen rápidamente sobre las descargas de los ríos.
- **Extensión media de escurrimiento superficial:** Este parámetro muestra la distancia media que el agua de la precipitación tendrá que transportarse hasta un cauce de agua cercano.
- **Frecuencia de ríos:** Este parámetro relaciona la sumatoria total del orden de todos los cauces; es decir el número total de todos los ríos de la cuenca, con la superficie total. Muestra el valor del número de ríos por Km^2 .
- **Elevación de los terrenos:** El análisis de las variaciones de la elevación de los terrenos con respecto al nivel del mar es una característica que influye en el resultado de la pendiente de una cuenca. El parámetro más representativo es el siguiente:
 - a) **Altitud media de la cuenca:** Este valor permite representar aspectos climáticos y naturales que están interrelacionados en la cuenca, a través de un patrón climático de la zona.
 - b) **Curva Hipsométrica:** Esta curva representa en el eje de las ordenadas, las elevaciones en metros sobre el nivel del mar y en el eje de las abscisas, el porcentaje del área de la cuenca que queda por encima de la elevación indicada. Caracteriza de algún modo el relieve.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 35 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



- c) **Polígono de frecuencia de Altitudes:** El diagrama del polígono de frecuencia de altitudes representa en el eje de las ordenadas, el porcentaje parcial del área de una cuenca en estudio y en el eje de las abscisas, las altitudes en metros sobre el nivel del mar comprendidas dentro de ese porcentaje.
- **Rectángulo equivalente:** Es la transformación geométrica de la cuenca en un rectángulo ideal que tiene la misma área y perímetro. En este rectángulo, las curvas de nivel se convierten en rectas paralelas al lado menor, siendo estas la primera y la última curva de nivel, respectivamente.
 - **Declividad de los cauces:** Una mayor declividad de los cauces, genera como consecuencia, una mayor rapidez del escurrimiento de agua en los mismos cauces. El parámetro más representativo es el siguiente:
 - a) **Pendiente media del cauce principal:** La influencia de la configuración topográfica en el proceso de erosión de una cuenca y en la formación de descargas altas, se presenta de acuerdo a los mayores o menores grados de pendiente.
 - **Declividad de los terrenos:**
 - a) **Pendiente media de la cuenca:** Este índice representa un valor medio de todas las pendientes que conforman las diversas zonas topográficas de la cuenca.
 - **Coeficiente de Torrencialidad:** Este parámetro resulta de la relación entre el número de cauces de agua de orden uno y el área de la cuenca. A mayor número de cauces de orden uno y menor área, la torrencialidad de la cuenca será mayor.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 36 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



- **Coeficiente de Masividad:** Este parámetro resulta de la relación entre la altitud media de la cuenca, que se calcula por medio de la curva hipsométrica, y el área de la misma. Su resultado es alto para cuencas de cumbres altas y bajo en cuencas donde predominan terrenos planos que presentan áreas similares.
- **Coeficiente de escorrentía (C):** representa la proporción de la lluvia total que se convierte en escorrentía superficial. Depende del tipo de suelo, pendiente, cobertura vegetal y grado de impermeabilización. En áreas urbanas, los valores de C suelen ser elevados (0.6 a 0.9) debido a la predominancia de superficies pavimentadas.
- **Tiempo de concentración (Tc):** es el tiempo que tarda una partícula de agua en recorrer la distancia más larga desde el punto más alejado de la cuenca hasta la salida. Define la duración crítica de la lluvia y determina el momento en que se alcanza el caudal máximo.

Una vez definido el límite y las características de la cuenca, podemos avanzar hacia el siguiente paso: imaginar la lluvia que pondrá a prueba su comportamiento.

1.2.4. Lluvias de diseño

La lluvia de diseño es una lluvia hipotética, determinada a partir de un análisis estadístico de registros históricos, que se utiliza en la hidrología para diseñar obras hidráulicas. El concepto no representa un evento real, sino una representación sintética de la precipitación más intensa que, estadísticamente, es probable que ocurra en un área determinada.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 37 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Con la cuenca delimitada, el siguiente paso es determinar con qué lluvia la vamos a simular. No cualquier lluvia sirve para diseñar: necesitamos una lluvia representativa, que tenga sentido estadístico y refleje la intensidad típica —o extrema— de la zona. En otras palabras, la lluvia de diseño no es una tormenta cualquiera, sino una lluvia “tipo” que sintetiza, en pocas horas, el comportamiento promedio o extremo de las precipitaciones que podrían afectar a nuestra cuenca.

Su elección depende de tres variables fundamentales: la **intensidad**, que define la magnitud de la lluvia; la **duración**, que indica cuánto tiempo persiste esa lluvia; y la frecuencia o **período de retorno**, que traduce en años la probabilidad de que ocurra un evento similar. Estas tres variables están íntimamente relacionadas, y su combinación da forma a las curvas IDF (Intensidad–Duración–Frecuencia), la herramienta principal para definir los escenarios de cálculo en hidrología urbana.

Cada una de estas variables responde a una lógica distinta: la intensidad describe la energía del fenómeno, la duración su extensión temporal, y la frecuencia su rareza o recurrencia. Comprender cómo se comportan y cómo interactúan es lo que nos permite construir una lluvia de diseño coherente, realista y, sobre todo, útil para poner a prueba el sistema de drenaje.

- Intensidad de lluvia

La intensidad de la lluvia mide la cantidad de agua que cae en un intervalo de tiempo determinado, normalmente expresada en milímetros por hora (mm/h). Es, en cierto sentido, el “ritmo” de la tormenta: cuanto más intensa, más rápidamente se acumula agua sobre la superficie, y más exigido estará el sistema de drenaje.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 38 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



La intensidad no es constante; cambia durante el evento. Las lluvias cortas suelen ser más intensas, mientras que las prolongadas tienden a ser más suaves pero acumulan mayor volumen. Por eso, al momento de diseñar, se considera la intensidad media correspondiente a la duración del evento que más impacto genera en la cuenca —aquella que se iguala o se aproxima al tiempo de concentración.

Además, la intensidad varía según el clima local, la altitud, la época del año e incluso el relieve. En Córdoba, por ejemplo, las tormentas convectivas de verano pueden descargar en pocos minutos la misma cantidad de agua que una lluvia frontal de horas en otra región. Captar esa variabilidad y traducirla en un número de diseño requiere del análisis estadístico que veremos más adelante, pero basta decir que la intensidad es la variable que determina directamente el caudal pico en la mayoría de los métodos hidrológicos.

- Duración crítica de la lluvia

La duración representa el tiempo durante el cual ocurre el evento de precipitación. Aunque parezca un dato secundario, tiene un peso muy importante en la respuesta hidrológica de la cuenca. Si la lluvia es demasiado breve, no alcanza a activar toda la superficie de escurrimiento; si se prolonga demasiado, el caudal se estabiliza y deja de crecer, transformándose en un evento de larga duración pero sin picos significativos.

Existe una duración para la cual se maximiza el caudal escurrido en una cuenca; y a la misma la llamamos **duración crítica**, y corresponde generalmente a un valor cercano al tiempo de concentración de la cuenca. Definir la duración critica, depende de diversos factores físicos, geomorfológicos e hidrológicos propios de cada cuenca.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 39 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



- Frecuencia y período de retorno

La frecuencia de una lluvia describe qué tan habitual o excepcional es un evento de cierta magnitud. Desde la ingeniería, esa frecuencia se expresa a través del período de retorno (T), que indica el intervalo de tiempo medio que debe transcurrir para que ocurra —o se supere— un evento de igual intensidad o volumen.

Por ejemplo, una lluvia con un período de retorno de 10 años no significa que ocurra exactamente cada 10 años, sino que tiene una probabilidad anual del 10% de presentarse en cualquier año. Cuanto mayor sea el período de retorno, menor será su frecuencia, pero mayor su severidad.

Definir el período de retorno adecuado es un ejercicio de equilibrio entre seguridad y costo. No todas las obras deben resistir el mismo nivel de exigencia: un sistema de sumideros urbanos puede diseñarse para lluvias de 5 años, mientras que una laguna de retardo o un canal troncal puede requerir 25 o 50 años de recurrencia. La clave está en seleccionar un valor que proteja a la comunidad sin sobredimensionar innecesariamente las infraestructuras.

- Curvas IDF

Las curvas IDF son relaciones entre la intensidad, duración y frecuencia de una lluvia en una determinada localización. Representan, cómo cambia la intensidad media de una lluvia según el tiempo que dura y la probabilidad de que ocurra.

Para construirlas, se analizan registros históricos de lluvias intensas obtenidos de estaciones pluviográficas. De esos datos se extraen las precipitaciones máximas observadas para distintas duraciones —por ejemplo, 5, 10, 30, 60 o 120 minutos— y luego se ajustan estadísticamente para diferentes períodos de retorno, aplicando distribuciones como Gumbel

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 40 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



o Log-Pearson tipo III. El resultado son familias de curvas que describen el comportamiento extremo de la lluvia en una región determinada.

Cada una de esas curvas permite responder una pregunta fundamental para el diseño:

¿qué intensidad puedo esperar si la lluvia dura “x” minutos y tiene una recurrencia de “T” años?

En la práctica, las curvas IDF se transforman en una especie de “catálogo” de lluvias posibles, del cual el proyectista elige el escenario más representativo para su estudio. Si la obra es menor, seleccionará duraciones cortas y períodos de retorno bajos; si se trata de una infraestructura estructural o de protección, adoptará valores mayores.

En definitiva, las curvas IDF condensan la historia climática de una región en una herramienta predictiva. Permiten traducir datos pasados en decisiones futuras, guiando el dimensionamiento de las obras pluviales y asegurando que cada sistema esté preparado para responder ante las lluvias más probables —y también ante las más críticas.

A continuación, en la Figura 1.7 se muestran las curvas IDF para el diseño hidrológico en Córdoba, proporcionados por el Centro de la Región Semiárida (CIRSA) del Instituto Nacional del Agua (INA) de Argentina.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 41 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

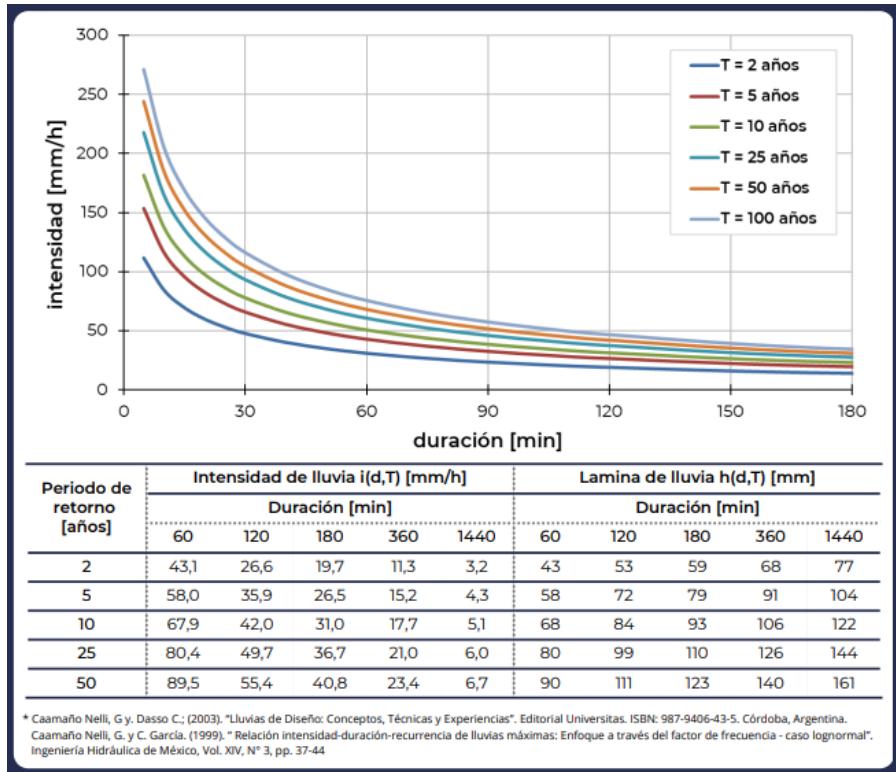


Figura 1.7 - Curvas IDF para diseño hidrológico en Córdoba (INA CIRSA 2025)

Hasta este punto, definimos cuánto puede llover (la intensidad), cuánto tiempo puede durar (la duración) y cada cuánto podría repetirse (la frecuencia). Sin embargo, todavía no sabemos cómo ocurre esa lluvia en el tiempo: si cae toda de golpe o si se reparte de manera más uniforme. Para poder analizar la respuesta de la cuenca necesitamos traducir esos valores —extraídos de las curvas IDF— en una distribución temporal. Es decir, pasar de un número promedio a una tormenta que evoluciona minuto a minuto. Ahí entran en escena dos herramientas fundamentales: el **hietograma**, que describe la evolución de la lluvia, y el **hidrograma**, que muestra la respuesta del terreno frente a ella.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 42 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



1.2.5. Hietogramas e hidrogramas de diseño

La distribución temporal de la precipitación se denomina hietograma. Este es una representación gráfica fundamental que analiza la evolución temporal de un evento de lluvia, mostrando como varía la precipitación a lo largo del evento. A continuación, en la Figura 1.8 se muestran los hietogramas tipo de la ciudad de Córdoba para duraciones de 60, 120, 180 y 360 minutos, proporcionados por el Centro de la Región Semiárida (CIRSA) del Instituto Nacional del Agua (INA) de Argentina.

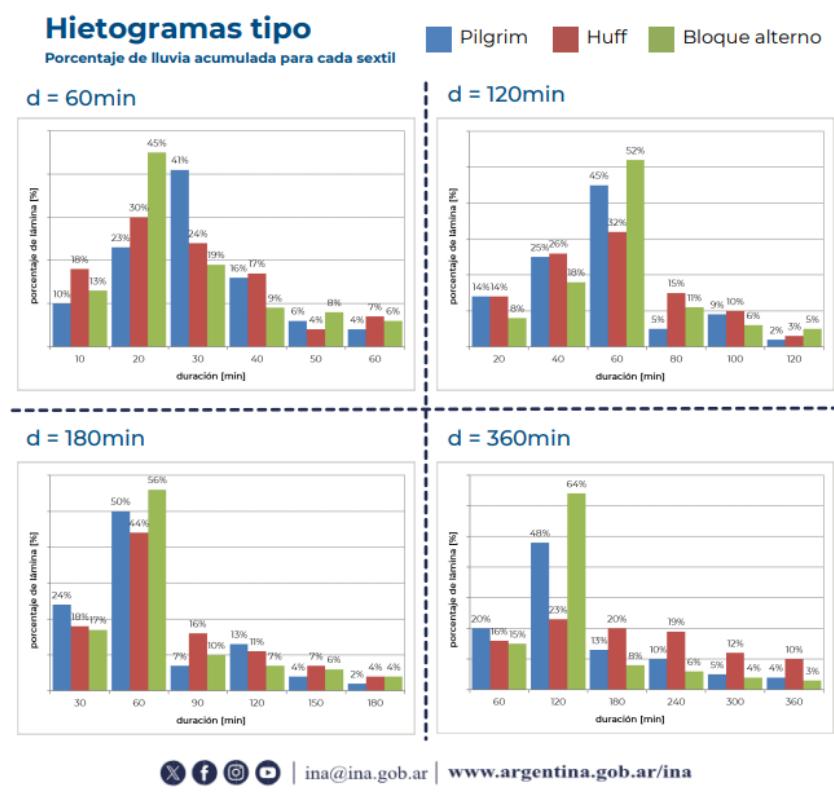


Figura 1.8 - Hietogramas tipo de la Ciudad de Córdoba (INA CIRSA 2025)

| | |
|--|-------------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | |



A su vez, se llama hidrograma a la variación temporal del caudal generado en un punto específico de la cuenca. Su forma depende de las características de la cuenca —pendiente, longitud, rugosidad, impermeabilización, etc. A continuación, en la Figura 1.9 se muestran distintos tipos de hidrogramas.

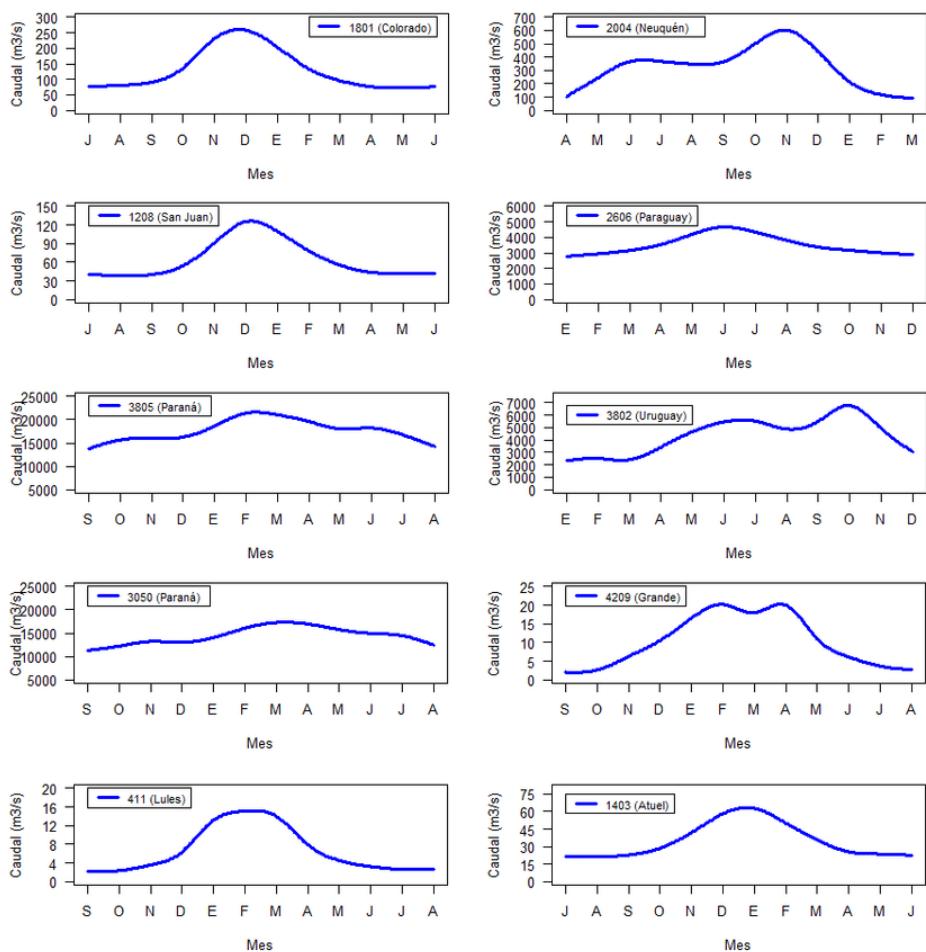


Figura 1.9 - Hidrogramas

| | |
|--|-------------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | |



En definitiva, el análisis conjunto de ambos gráficos permite comprender la evolución espacio temporal de un evento de tormenta en una cuenca. En la Figura 1.10 se representan ambos eventos en un solo gráfico.

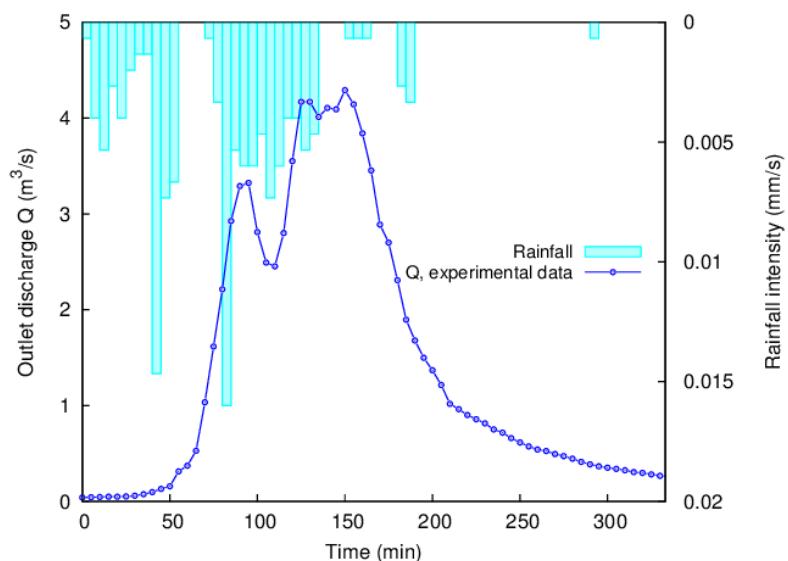


Figura 1.10 - Comportamiento hidrológico: hietograma e hidrograma

Desde una mirada ingenieril, el comportamiento hidrológico puede interpretarse como un sistema de transformación. En este sistema, la cuenca actúa como la función de transferencia que traduce una entrada en una salida.

- La entrada (variable independiente) es el hietograma, que representa la evolución temporal de la lluvia.
- La salida (variable dependiente) es el hidrograma, que muestra cómo esa lluvia se convierte en caudal a lo largo del tiempo.

En otras palabras, el hietograma describe cuándo y cuánto llueve, la cuenca define cómo responde el terreno, y el hidrograma refleja el resultado final de esa interacción. De allí

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 45 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



que, comprender la forma y las propiedades de la cuenca es equivalente a conocer la “ecuación” que transforma la precipitación en escorrentía, base sobre la cual se dimensionan todas las obras de drenaje urbano.

Una vez caracterizada la lluvia de diseño y representada su distribución temporal mediante el hietograma, y analizada la respuesta hidrológica de la cuenca a través del hidrograma, resulta necesario profundizar en los procesos que condicionan la cantidad de agua que efectivamente contribuye al escurrimiento. La simple comparación entre la precipitación total y el caudal generado evidencia que una parte significativa del agua que llega a la superficie terrestre no se transforma en flujo superficial inmediato.

Esto ocurre porque, antes de producirse el escurrimiento, el agua debe superar una serie de mecanismos naturales de retención, almacenamiento o transferencia al subsuelo. Dichos mecanismos, conocidos en conjunto como pérdidas, representan las porciones del volumen precipitado que se interceptan por la vegetación, se acumulan en depresiones superficiales, se infiltran en el suelo o se evaporan hacia la atmósfera.

La cuantificación de estas pérdidas es un paso esencial en cualquier modelo hidrológico, ya que determina el volumen neto de lluvia que se convertirá en escorrentía. Para ello, se emplean diversos modelos de pérdidas, desarrollados a partir de formulaciones empíricas o físicas, que buscan reproducir el comportamiento del suelo y las condiciones de la superficie frente a un evento pluvial. En las secciones siguientes se presentan los fundamentos de estos modelos y el criterio adoptado en la presente Trabajo Final para su aplicación.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 46 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



1.3. Modelo de pérdidas

En un evento de lluvia, no toda la precipitación registrada sobre una cuenca alcanza a convertirse en escorrentía superficial. Una parte significativa del agua se pierde antes de generar flujo sobre el terreno, debido a distintos procesos físicos que intervienen en la fase inicial del ciclo hidrológico. Estas pérdidas representan el conjunto de mecanismos mediante los cuales una porción del agua precipitada es retenida, infiltrada o devuelta a la atmósfera, reduciendo así el volumen efectivo que participa en el escurrimiento.

Entre las principales formas de pérdida pueden mencionarse:

- **Intercepción vegetal:** corresponde al agua retenida por la cobertura vegetal (hojas, ramas, tallos) que luego se evapora o se libera lentamente sin contribuir al escurrimiento directo.
- **Pérdidas superficiales o de almacenamiento inicial:** se refieren a la fracción de agua que se acumula en depresiones, irregularidades del terreno o rugosidades superficiales, la cual se evapora o infiltra antes de generar escurrimiento.
- **Infiltración:** proceso mediante el cual el agua penetra en el suelo y recarga los niveles freáticos o se almacena temporalmente en el perfil edáfico.
- **Evaporación:** pérdida directa del agua hacia la atmósfera por efecto de la radiación solar y el viento, tanto desde la superficie del suelo como desde la vegetación.

Estos procesos son fundamentales para el balance hídrico, y su cuantificación resulta esencial en la simulación de eventos pluviales. En consecuencia, existen numerosos métodos desarrollados para representar las pérdidas dentro de los modelos hidrológicos, que varían

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 47 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



en complejidad y en el nivel de información requerido. Algunos se basan en parámetros empíricos ajustados a observaciones locales, mientras que otros recurren a formulaciones físicas que describen la infiltración y la retención superficial con mayor detalle.

En el presente trabajo, las pérdidas fueron simuladas mediante el **método de la curva número SCS**, seleccionado por su adecuación al tipo de cuenca analizada y a la disponibilidad de datos. Este enfoque permitió representar de manera coherente el comportamiento del suelo y estimar con precisión el volumen de agua efectivamente transformado en escorrentía.

- Método SCS-CN

El método del Soil Conservation Service (SCS), también conocido como método del número de curva (CN), permite estimar el volumen de escorrentía directa a partir de la precipitación total, considerando las características del suelo, la cobertura vegetal y la humedad antecedente.

Su ecuación básica es:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

Donde:

Q : escorrentía directa (mm),

P : precipitación (mm),

S : almacenamiento potencial del suelo (mm), relacionado con el número de curva mediante:

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 48 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

El valor de CN (Curve Number) varía entre 30 (suelo muy permeable y vegetado) y 100 (superficie impermeable). En este trabajo se adoptó CN = 70 como valor representativo para condiciones medias de suelo urbano con áreas parcialmente impermeabilizadas.

El método SCS permite integrar de manera simple los procesos de infiltración en los modelos hidrológicos y fue utilizado para definir los parámetros de entrada en las simulaciones con SWMM. En la Tabla 1.1 se muestran los distintos valores de CN, en función de las características de vegetación del suelo.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 49 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Tabla 1.1 - Determinación del Número de Curva

TABLAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA

TABLA GENERAL PARA LA DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA
(Condición II de humedad y $P_0 = 0,2 * S$) (1/2)

| TIPO DE VEGETACIÓN | LABOREO | CONDICIÓN HIDROLÓGICA | TIPO DE SUELO | | | |
|---|------------|-----------------------|---------------|----|----|----|
| | | | A | B | C | D |
| Barbecho | desnudo | | 77 | 86 | 91 | 94 |
| | CR | pobre | 76 | 85 | 90 | 93 |
| | CR | bueno | 74 | 83 | 88 | 90 |
| Cultivos alineados | R | pobre | 72 | 81 | 88 | 91 |
| | R | bueno | 67 | 78 | 85 | 89 |
| | R + CR | pobre | 71 | 80 | 87 | 90 |
| | R + CR | bueno | 64 | 75 | 82 | 85 |
| | C | pobre | 70 | 79 | 84 | 88 |
| | C | bueno | 65 | 75 | 82 | 86 |
| | C + CR | pobre | 69 | 78 | 83 | 87 |
| | C + CR | bueno | 64 | 74 | 81 | 85 |
| | C + T | pobre | 66 | 74 | 80 | 82 |
| | C + T | bueno | 62 | 71 | 78 | 81 |
| | C + T + CR | pobre | 65 | 73 | 79 | 81 |
| | C + T + CR | bueno | 61 | 70 | 77 | 80 |
| | R | pobre | 65 | 76 | 84 | 88 |
| | R | bueno | 63 | 75 | 83 | 87 |
| Cultivos no alineados o con surcos pequeños o mal definidos | R + CR | pobre | 64 | 75 | 83 | 86 |
| | R + CR | bueno | 60 | 72 | 80 | 84 |
| | C | pobre | 63 | 74 | 82 | 85 |
| | C | bueno | 61 | 73 | 81 | 84 |
| | C + CR | pobre | 62 | 73 | 81 | 84 |
| | C + CR | bueno | 60 | 72 | 80 | 83 |
| | C + T | pobre | 61 | 72 | 79 | 82 |
| | C + T | bueno | 59 | 70 | 78 | 81 |
| | C + T + CR | pobre | 60 | 71 | 78 | 81 |
| | C + T + CR | bueno | 58 | 69 | 77 | 80 |
| Cultivos densos de leguminosas o prados en alternancia | R | pobre | 66 | 77 | 85 | 89 |
| | R | bueno | 58 | 72 | 81 | 85 |
| | C | pobre | 64 | 75 | 83 | 85 |
| | C | bueno | 55 | 69 | 78 | 83 |
| | C + T | pobre | 63 | 76 | 80 | 83 |
| | C + T | bueno | 51 | 67 | 76 | 80 |
| Pastizales o pastos naturales | | pobres | 68 | 79 | 86 | 89 |
| | | regulares | 49 | 69 | 79 | 84 |
| | | buenas | 39 | 61 | 74 | 80 |
| Pastizales | C | pobres | 47 | 67 | 81 | 88 |
| | C | regulares | 25 | 59 | 75 | 83 |
| | C | buenas | 6 | 35 | 70 | 79 |
| Prados permanentes | | | 30 | 58 | 71 | 78 |
| | | pobres | 48 | 67 | 77 | 83 |
| | | regulares | 35 | 56 | 70 | 77 |
| Matorral-herbazal, siendo el matorral preponderante | | buenas | 30 | 48 | 65 | 73 |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 50 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Hasta aquí se han recorrido los elementos que constituyen el punto de partida de todo análisis hidrológico: la cuenca como unidad espacial de estudio, sus parámetros físicos como condicionantes del comportamiento hidráulico, y la lluvia de diseño como evento desencadenante del proceso. A partir de las curvas IDF se comprendió la relación entre intensidad, duración y frecuencia, mientras que mediante los hietogramas e hidrogramas se representó la secuencia temporal del fenómeno: primero la precipitación, luego la respuesta del sistema en forma de escorrentía.

Sin embargo, entre ambos momentos —la lluvia que cae y el caudal que finalmente se concentra en la salida de la cuenca— intervienen diversos procesos intermedios que modifican la cantidad de agua efectivamente disponible para el escurrimiento. No toda la lluvia que incide sobre una superficie se convierte en escorrentía: una parte se pierde por intercepción vegetal, almacenamiento superficial, infiltración en el suelo y evaporación. Estas pérdidas representan el conjunto de mecanismos físicos que reducen el volumen de agua que alcanza el sistema de drenaje, y su adecuada estimación resulta fundamental para la correcta modelación hidrológica.

Por lo tanto, el paso siguiente consiste en analizar cómo la fracción de lluvia que supera dichas pérdidas se transforma en caudal. Este vínculo entre la atmósfera y el suelo, entre la precipitación y el escurrimiento, se estudia a través del modelo de transformación lluvia-caudal, que permite cuantificar y simular la respuesta hidrológica de la cuenca ante un evento determinado. En el apartado siguiente se desarrollan los fundamentos y la metodología aplicados para representar dicho proceso dentro del marco de este Trabajo Final.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 51 de 273 |
| <p>DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



1.4. Modelo de transformación lluvia caudal

Un modelo de transformación lluvia-caudal, también conocido como modelo hidrológico lluvia-escorrentía, es una representación matemática de los procesos que ocurren en una cuenca hidrográfica. Su propósito es simular cómo la precipitación (lluvia) se convierte en escorrentía superficial, generando un hidrograma o una serie de caudales en la salida de esa cuenca.

En términos simples, actúa como una función de transferencia: recibe un hietograma (la entrada) y produce un hidrograma (la salida), incorporando en ese proceso las características físicas del terreno, su capacidad de infiltración y sus condiciones iniciales de humedad. A continuación, en la Figura 1.11 se presenta un esquema general del proceso lluvia – escurrimiento.

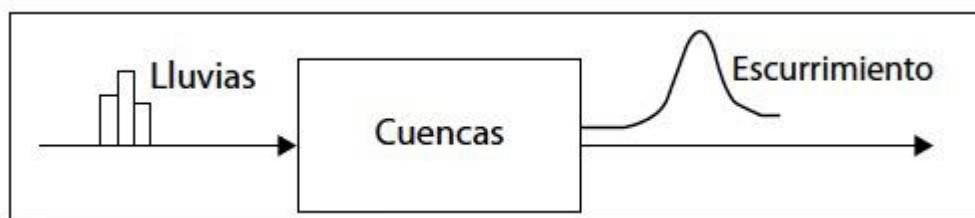


Figura 1.11 - Esquema general del proceso lluvia-escurrimiento

Cuando llueve sobre una superficie, no toda el agua se convierte en escorrentía. Parte se intercepta en la vegetación o en las cubiertas, otra parte se infiltra en el suelo, una fracción se almacena temporalmente en depresiones, y solo el excedente fluye por la superficie. El modelo lluvia–caudal busca representar matemáticamente este conjunto de procesos que, aunque ocurren simultáneamente, tienen efectos acumulativos sobre el caudal final.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 52 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



El proceso de lluvia–escorrentía describe la secuencia de fenómenos físicos que determinan qué parte del agua precipitada se pierde por infiltración o almacenamiento, y cuál termina convirtiéndose en escorrentía superficial. Cada etapa —intercepción, infiltración, almacenamiento y flujo— deja su huella en el resultado final, condicionando el volumen, la velocidad y el tiempo en que el agua alcanza el sistema de drenaje. Conocer estos fundamentos no solo permite entender la lógica interna de los modelos hidrológicos, sino también identificar dónde y cómo intervenir para mitigar el impacto de la urbanización sobre el ciclo del agua.

1.4.1. Fundamentos del proceso lluvia-escorrentía

El proceso de lluvia–escorrentía es el mecanismo mediante el cual la precipitación que cae sobre una superficie se transforma en caudal que fluye hacia un cauce o un sistema de drenaje.

El ciclo comienza con la **intercepción**, es decir, la porción de agua que queda retenida temporalmente en la vegetación, en techos o en otras superficies expuestas. Esta fracción no llega de inmediato al suelo y suele evaporarse o escurrir lentamente, reduciendo el volumen efectivo de precipitación que genera escorrentía.

Una vez que la lluvia supera la capacidad de retención superficial, el agua llega al terreno y comienza la **infiltración**, que es el proceso mediante el cual el agua penetra en el suelo. La velocidad de infiltración depende de la textura, la compactación, la humedad previa y el tipo de cobertura. En suelos naturales, porosos y vegetados, la infiltración puede absorber una fracción significativa de la lluvia; en cambio, en superficies urbanas pavimentadas, el fenómeno es prácticamente nulo, haciendo que casi toda la precipitación se convierta en escorrentía.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 53 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



El exceso que no se infiltra puede acumularse temporalmente en depresiones superficiales —pequeños bajos naturales o artificiales— dando lugar al **almacenamiento superficial**. Este volumen actúa como una especie de amortiguador del flujo, reteniendo parte del agua y liberándola gradualmente. Sin embargo, una vez que se colma la capacidad de almacenamiento, el excedente comienza a desplazarse cuesta abajo.

Ese desplazamiento constituye la **escorrentía superficial**, que se inicia cuando la intensidad de la lluvia supera la capacidad de infiltración y almacenamiento del terreno. En esta etapa el flujo comienza a organizarse: primero de forma difusa sobre la superficie, y luego concentrándose en pequeños cauces o conductos naturales y artificiales.

Finalmente, el agua entra en la fase de conducción y concentración, en la que las distintas trayectorias de escurrimiento convergen hacia un punto de salida o drenaje. Aquí el caudal se acumula y alcanza su valor máximo —el caudal pico—, cuya magnitud y tiempo de ocurrencia dependen de la intensidad de la lluvia, las características del suelo y la geometría de la cuenca.

En áreas urbanas, este proceso se ve profundamente alterado. Las calles, veredas y techos actúan como superficies impermeables que aceleran la generación de escorrentía, reducen el tiempo de concentración y aumentan el caudal pico. La falta de zonas verdes o de infiltración interrumpe el equilibrio natural del ciclo hidrológico, haciendo que las lluvias intensas se traduzcan casi instantáneamente en flujos que ponen a prueba la capacidad del sistema pluvial.

Comprender los fundamentos del proceso lluvia–escorrentía es esencial no solo para calcular caudales, sino también para diseñar estrategias de mitigación. Cualquier medida que favorezca la infiltración, el almacenamiento o el retardo del flujo —como zanjas, tanques o

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 54 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



pavimentos permeables— contribuye a reducir la escorrentía superficial y, con ella, el impacto hidrológico de la urbanización. A continuación, en la Figura 1.12 se observan los distintos procesos del ciclo hidrológico.

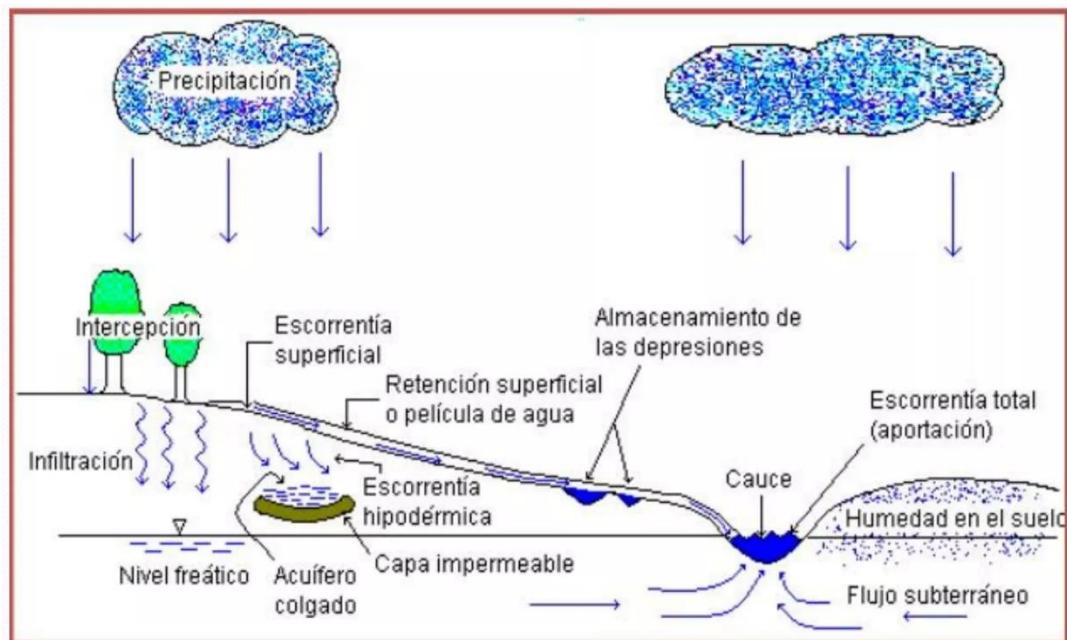


Figura 1.12 - Procesos del ciclo hidrológico

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 55 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Los modelos de transformación lluvia caudal pueden clasificarse en tres grandes grupos según su grado de complejidad y el nivel de detalle con el que representan el proceso hidrológico: empíricos, conceptuales y de simulación o distribuidos.

- **Empíricos:** basados en observaciones y correlaciones simples entre la precipitación y el caudal. Ejemplo: el método racional, recomendado para cuencas pequeñas y homogéneas.
- **Conceptuales:** representan los procesos hidrológicos mediante relaciones matemáticas simplificadas (pérdidas, almacenamiento, escorrentía). Ejemplo: el hidrograma unitario de Snyder.
- **Modelos de simulación o distribuidos:** emplean una descripción más detallada del sistema físico y permiten simular el comportamiento de cada componente del drenaje. Ejemplo: EPA SWMM, HEC-HMS.

La elección del modelo depende de la escala de la cuenca, la disponibilidad de datos y los objetivos del estudio. En este trabajo se emplean el modelo EPA SWMM, por su aplicabilidad en áreas urbanas y ser el más adecuado para cumplimentar los objetivos buscados. A continuación se presentan las principales características del programa.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 56 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



- **EPA SWMM**

El EPA SWMM (Storm Water Management Model) es un modelo hidrológico e hidráulico desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Permite simular, de manera continua o por evento, la generación y el transporte de escorrentía en sistemas de drenaje urbano.

El programa representa la cuenca como una red de subcuenas interconectadas que generan escorrentía a partir de datos de precipitación. Cada subcuenca se caracteriza por su área, pendiente, rugosidad, porcentaje de impermeabilización y capacidad de almacenamiento.

Entre sus principales componentes se destacan:

- **Módulo hidrológico:** transforma el hietograma de entrada en hidrogramas de escorrentía, considerando procesos de infiltración (Horton, Green-Ampt, Curve Number) y almacenamiento superficial.
- **Módulo hidráulico:** resuelve el flujo en conductos, sumideros, pozos y canales mediante las ecuaciones de Saint-Venant, permitiendo modelar el tránsito del caudal y las condiciones de sobrecarga.
- **Módulo de calidad del agua:** opcional, simula la generación y transporte de contaminantes.

Una ventaja significativa del SWMM es su capacidad para evaluar medidas de drenaje urbano sostenible (SUDS/LID), como pavimentos permeables, jardines de lluvia, zanjas de infiltración y tanques de retardo. Estas estructuras pueden representarse explícitamente en el modelo, lo que permite analizar su efecto en la reducción del caudal pico y del volumen de escorrentía.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 57 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



El uso del SWMM en esta investigación permite reproducir de forma realista el comportamiento hidrológico de un lote urbano bajo distintas condiciones de urbanización, y evaluando estrategias de impacto hidrológico nulo.

1.5. Planteo de la Problemática de los Desagües Urbanos

Hasta aquí recorrimos el camino que va desde la lluvia hasta el caudal, entendiendo cómo una cuenca responde ante un evento y cómo los modelos permiten representarlo. Sin embargo, cuando trasladamos estos procesos al entorno urbano, el equilibrio natural se rompe.

La urbanización no solo cambia el paisaje: modifica la dinámica del agua. Al impermeabilizar el suelo, canalizar los escurrimientos y concentrar los flujos en redes subterráneas, se produce un efecto de congestión hidráulica: cada nuevo desarrollo incrementa la presión sobre un sistema que, aun correctamente diseñado, recibe más caudal del que su entorno natural podría haber generado.

Las herramientas desarrolladas anteriormente —definición de cuenca, lluvia de diseño, parámetros hidrológicos y modelos de transformación— permiten cuantificar con precisión ese impacto: cuánto aumenta el caudal, cómo se acortan los tiempos de concentración y de qué manera crece el volumen de escorrentía a medida que la ciudad se densifica.

Por lo tanto, el verdadero problema no solo radica en los desagües en sí mismos, sino en la forma en que urbanizamos el territorio. Cada nuevo desarrollo modifica la dinámica natural del escurrimiento, sellando superficies que antes infiltraban y canalizando flujos que antes se distribuían de manera difusa. Así, la ciudad en su conjunto termina generando más agua superficial de la que el sistema puede evacuar sin alterar su equilibrio.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 58 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



El análisis que sigue busca comprender cómo se manifiesta esta congestión hidrológica urbana, cómo se estructura el sistema que la recibe y cuáles son los límites físicos y funcionales que definen su comportamiento. A continuación, en la Figura 1.13 se observa un esquema simple, donde se establece la relación entre la urbanización y el aumento del escurrimiento.

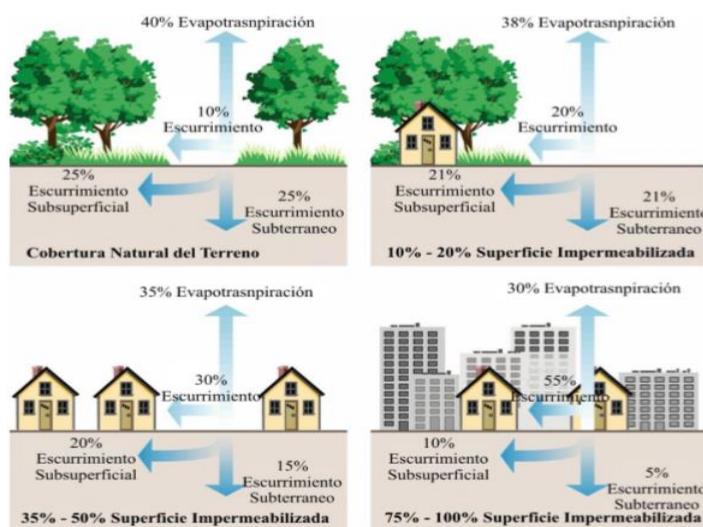


Figura 1.13 - Relación entre impermeabilización y aumento del escurrimiento superficial (Manual de drenaje urbano de Guayaquil, 2016)

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 59 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



En la Figura 1.14 se ve el impacto hidrológico de la urbanización mostrando los hidrogramas pre y post-urbanización.

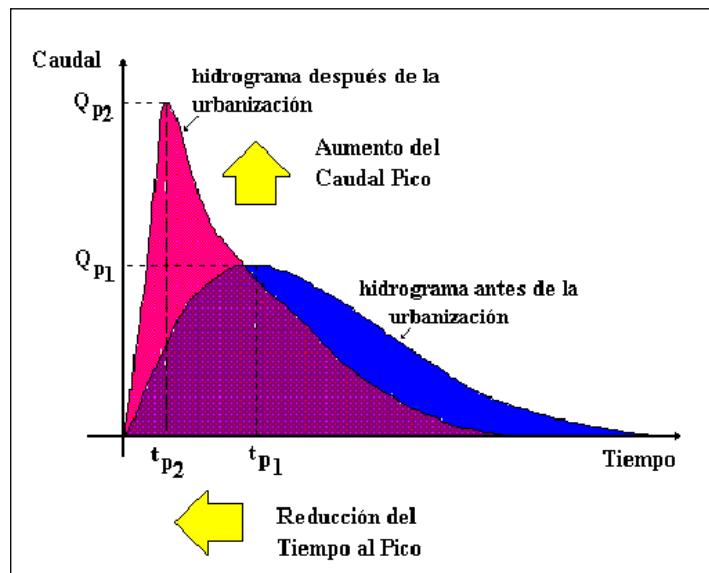


Figura 1.14 - Impacto hidrológico de la urbanización (Betoni, 2004)

1.5.1. Inundaciones en áreas urbanas

Las inundaciones urbanas son la expresión más evidente de la transformación hidrológica que produce la urbanización. Cuando una tormenta descarga sobre una ciudad densamente impermeabilizada, la escorrentía que antes se infiltraba en el suelo o se retenía en depresiones naturales ahora se convierte en flujo superficial inmediato. Todo ese volumen extra se canaliza simultáneamente hacia los desagües, generando un pico repentino de caudal que congestiona la red.

No es necesario que se trate de un evento extremo: incluso lluvias ordinarias pueden provocar anegamientos cuando la infraestructura opera al límite. Las calles se transforman en

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 60 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



cauces, las esquinas en pequeñas lagunas, y las bocas de tormenta —diseñadas para captar un caudal moderado— reciben aportes que exceden su capacidad de captación.

Este fenómeno evidencia cómo la ciudad fabrica su propio régimen hidrológico, independiente del clima o del terreno original. Las inundaciones, más que fallas puntuales, son la consecuencia de un desequilibrio estructural entre la cantidad de agua que la urbanización genera y la capacidad del sistema para evacuarla.

Para comprender la magnitud del problema y planificar medidas de mitigación, es necesario poder clasificar los distintos grados de afectación del territorio. De allí surge el concepto de niveles de inundabilidad.

1.5.2. Impacto hidrológico de la urbanización

La urbanización altera el balance hidrológico natural, modificando las proporciones entre infiltración, evapotranspiración y escorrentía. En una cuenca no urbanizada, gran parte del agua precipitada se infiltra o se evapora; en cambio, en áreas urbanas, la impermeabilización de las superficies genera una respuesta hidrológica mucho más rápida y concentrada.

El efecto más evidente es el incremento del caudal pico (Q_p) y la reducción del tiempo de concentración (T_c). Esto se traduce en hidrogramas más agudos, con picos pronunciados y menor tiempo entre el inicio y el máximo del evento. Además, el volumen total de escorrentía tiende a aumentar, generando una mayor presión sobre la infraestructura existente.

La Figura 1.15 representa el cambio de hidrograma entre condiciones naturales y urbanizadas, mostrando cómo el desarrollo urbano eleva el caudal máximo y adelanta su ocurrencia.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 61 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

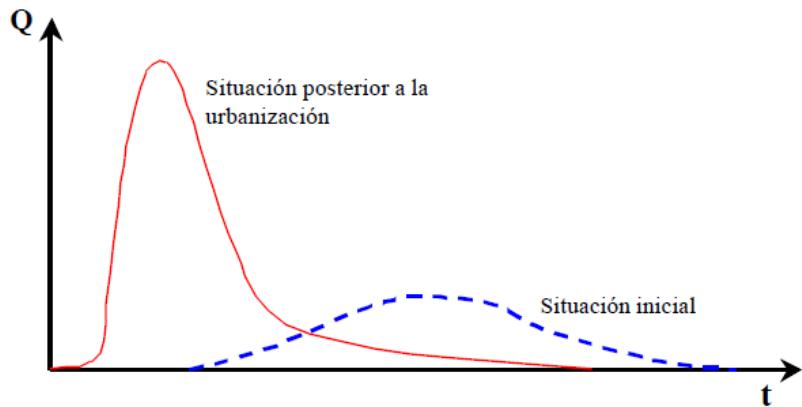


Figura 1.15 - Efecto de la urbanización sobre el hidrograma de escorrentía

La magnitud de este impacto depende del área impermeabilizada, la pendiente, el tipo de suelo y la conectividad de la red. Pero, sobre todo, depende de la escala del crecimiento urbano y de la falta de medidas locales de regulación. Para comprender cómo responde la infraestructura ante este nuevo régimen de escurrimiento, debemos analizar los subsistemas que componen el drenaje urbano.

1.5.3. Subsistemas de drenaje urbano: macro y micro drenaje

El drenaje urbano está formado por una red jerárquica de infraestructuras que trabajan en conjunto para evacuar el agua de lluvia.

- El **microdrenaje** capta el escurrimiento inicial mediante cunetas, cordones, bocas de tormenta y conductos secundarios.
- El **macrodrenaje**, en cambio, transporta grandes volúmenes a través de canales, colectores principales o lagunas de retardo, conduciendo el agua hacia los cauces naturales o puntos de descarga final.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 62 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Estas infraestructuras se representan esquemáticamente en la Figura 1.16.

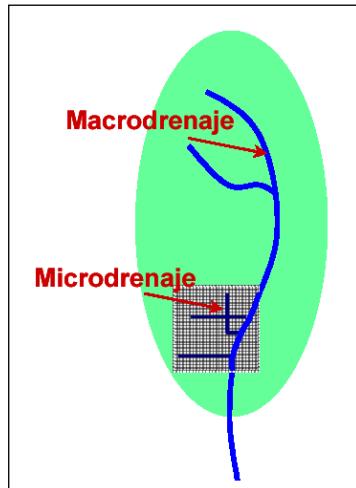


Figura 1.16 - Subsistemas asociados al drenaje urbano (Bertoni, 2004)

En equilibrio, ambos subsistemas garantizan que el agua fluya desde las superficies urbanas hasta los emisarios finales sin causar conflictos. Sin embargo, la urbanización altera este balance: el aumento de la escorrentía a nivel de lote satura el microdrenaje, que no alcanza a captar todo el flujo, generando acumulaciones locales y sobrecargando los tramos troncales.

El sistema, pensado originalmente para un régimen más moderado, se ve exigido por un nuevo patrón hidrológico que él mismo no generó. Ante este escenario, resulta evidente que no basta con ampliar conductos: se requiere repensar el funcionamiento del drenaje urbano desde su base más elemental, es decir, desde el origen mismo del escurrimiento.

Por ello, este Trabajo Final se enfoca en el nivel de lote, un ámbito previo incluso al microdrenaje. El objetivo es comprender y gestionar el comportamiento hidrológico directamente en el punto donde se genera la escorrentía, antes de que ésta ingrese a los

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 63 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



sistemas urbanos de captación. De este modo, se busca aportar una mirada que complemente la tradicional planificación del drenaje, incorporando estrategias de control y retención desde el nivel más local del sistema.

Al analizar la interacción entre los subsistemas de macro y microdrenaje, se advierte que su desempeño no depende únicamente de la capacidad hidráulica de las infraestructuras, sino también de las características del entorno urbano que alimenta dichos sistemas. Entre los factores más determinantes se encuentra el Factor de Ocupación del Suelo (FOS), parámetro urbanístico que define la proporción del terreno que puede ser ocupada por edificaciones u otras superficies impermeables dentro de un lote. Este indicador, aunque concebido principalmente desde la planificación territorial, tiene consecuencias directas sobre la generación de escorrentía y, en consecuencia, sobre la eficiencia de los sistemas de drenaje urbano.

1.5.4. Factor de Ocupación de Suelo [F.O.S]

El Factor de Ocupación del Suelo (FOS) es un índice que expresa la relación entre el área cubierta por edificaciones y la superficie total del terreno. En términos simples, determina qué porcentaje del lote puede ser ocupado por construcciones o superficies impermeables. De esta manera, el FOS constituye una herramienta de ordenamiento urbano que regula la densidad edificatoria y la morfología del tejido urbano.

Desde el punto de vista hidrológico, el FOS adquiere una relevancia particular, ya que condiciona de manera directa el grado de impermeabilización del suelo. A medida que aumenta el FOS, disminuye la superficie disponible para la infiltración y la retención natural del agua de lluvia, lo que provoca un incremento proporcional en el volumen y la velocidad del escurrimiento superficial. Este cambio repercute en todo el sistema de drenaje: el

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 64 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



microdrenaje recibe mayores caudales instantáneos, lo que puede generar anegamientos o sobrecargas locales, mientras que el macrodrenaje se ve sometido a mayores volúmenes acumulados y picos de caudal más pronunciados.

En consecuencia, el FOS actúa como un vínculo entre la planificación urbana y el comportamiento hidrológico. Su regulación no solo afecta la densidad de ocupación del territorio, sino también la capacidad del entorno construido para manejar el agua de lluvia. En zonas con altos valores de FOS, la escorrentía tiende a concentrarse más rápidamente, reduciendo el tiempo de concentración de la cuenca urbana y aumentando el riesgo de inundaciones. Por el contrario, políticas urbanas que promuevan valores moderados de FOS o que incentiven la incorporación de superficies permeables, techos verdes o sistemas de retardo en los lotes pueden contribuir significativamente a mejorar la resiliencia hidráulica del sistema urbano.

Por lo tanto, el análisis del FOS permite establecer un puente entre la escala urbanística y la escala hidrológica, aportando una visión integrada del manejo del agua en la ciudad. Considerar este factor en los estudios de drenaje urbano no solo permite dimensionar correctamente las infraestructuras, sino también orientar estrategias de diseño urbano más sostenibles, donde el control del escurrimiento comience desde el nivel del lote y se complemente con las obras de micro y macrodrenaje. En este Trabajo Final, el estudio del FOS se aborda precisamente como una variable clave en la generación de escorrentía.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 65 de 273 |
| <p>DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



1.5.5. Hacia un drenaje urbano sostenible: el enfoque LID

El recorrido realizado hasta aquí permite comprender una idea central: el problema hidrológico urbano no surge por el mal funcionamiento de los desagües, sino por la forma en que urbanizamos el territorio. Cada metro cuadrado impermeabilizado acelera la escorrentía, reduce la infiltración y desactiva los mecanismos naturales que amortiguaban los picos de lluvia. Las infraestructuras pluviales —pensadas para evacuar— terminan recibiendo un caudal mayor al previsto, y la ciudad responde con inundaciones cada vez más frecuentes y severas. De esta constatación nace un cambio de enfoque: si el problema se genera en cada lote, la solución también debe comenzar allí, con cada individuo aportando su grano de arena a objetos de solucionar este problema hidrológico. El desafío no consiste únicamente en ampliar conductos o construir nuevas lagunas, sino en restituir, dentro de lo posible, el comportamiento hidrológico natural del suelo.

A este principio responde el desarrollo urbano de bajo impacto, conocido como Low Impact Development (LID), un conjunto de prácticas que buscan manejar el agua de lluvia en el lugar donde cae, reduciendo el volumen y la velocidad de escurrimiento que llega a las redes. El enfoque LID propone descentralizar el control del drenaje, distribuyendo la gestión del agua entre múltiples dispositivos a pequeña escala, integrados en el paisaje urbano. De este modo, la ciudad deja de “luchar” contra el agua y pasa a convivir con ella, utilizando su almacenamiento temporal y su infiltración como herramientas de diseño.

- Principales dispositivos LID

Cada dispositivo LID persigue el mismo objetivo —reducir el caudal pico y el volumen de escorrentía—, aunque lo hace mediante distintos mecanismos físicos. A continuación, se presentan los más representativos y sus principios de funcionamiento:

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 66 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



- **Pavimentos permeables:** reemplazan las superficies impermeables tradicionales por materiales que permiten el paso del agua hacia capas inferiores. Facilitan la infiltración y reducen la escorrentía superficial, especialmente en estacionamientos y veredas. En la Figura 1.17 se muestra un pavimento permeable.



Figura 1.17 - Pavimento permeable

- **Zanjas de infiltración:** consisten en excavaciones lineales llenas con material granular que almacenan temporalmente el agua de lluvia, permitiendo su infiltración al subsuelo. Son ideales para áreas verdes o laterales de calles. En la Figura 1.18 se muestra una zanja de infiltración.



Figura 1.18 - Zanja de infiltración

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 67 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



- **Jardines de lluvia:** pequeñas depresiones vegetadas que captan el escurrimiento superficial y lo infiltran lentamente. Además de regular caudales, mejoran la calidad del agua al filtrar contaminantes. En la Figura 1.19 se muestra un jardín de lluvia.



Figura 1.19 - Jardín de lluvia

- **Cisternas o tanques de retardo:** estructuras de almacenamiento temporal que acumulan el excedente pluvial durante una tormenta, liberándolo gradualmente hacia la red. Son aplicables tanto a escala domiciliaria como en edificios o industrias. En la Figura 1.20 se muestra un tanque de retardo.



Figura 1.20 - Tanque de retardo

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 68 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



- **Cubiertas verdes:** techos vegetados que retienen parte de la precipitación, reduciendo el volumen de escorrentía y la temperatura superficial del entorno urbano. En la Figura 1.21 se muestra una cubierta verde.



Figura 1.21 - Cubierta verde

- **Microembalses o biorretenciones:** combinan almacenamiento, filtración y evapotranspiración, ofreciendo un triple beneficio hidrológico, ambiental y paisajístico. En la Figura 1.22 se muestra el caso de biorretención.



Figura 1.22 - Biorretención

Cada una de estas técnicas puede aplicarse de manera independiente o integrada, según la escala del proyecto. Lo relevante es que todas devuelven al sistema urbano parte de la capacidad natural de infiltración y retención del suelo, reduciendo la presión sobre los sistemas de drenaje convencionales.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 69 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



Lo que es importante marcar es que el enfoque LID no representa una solución aislada, sino un cambio de paradigma: pasar del drenaje reactivo al manejo preventivo del agua. En lugar de diseñar infraestructuras para evacuar el exceso, se busca evitar que el exceso ocurra, reproduciendo a pequeña escala las funciones hidrológicas naturales del terreno.

En este sentido, los capítulos siguientes profundizan en la cuantificación de ese impacto hidrológico: cuánto aumenta el caudal por efecto de la urbanización, cuánto puede reducirse mediante medidas LID, y cuál es el volumen mínimo de almacenamiento necesario para alcanzar una condición de impacto hidrológico nulo a nivel de lote.

Específicamente, este Trabajo Final propone analizar un tipo específico de técnica LID: el tanque de retardo. Este dispositivo permite almacenar temporalmente el escurrimiento superficial generado a nivel de lote, liberándolo luego de manera controlada hacia el sistema público de drenaje. De este modo, el tanque actúa como un mecanismo de regulación local, disminuyendo los caudales punta y contribuyendo a la estabilidad del sistema urbano en su conjunto.

Para una mejor comprensión, a continuación, se presenta la siguiente figura y esquema que ilustran el funcionamiento general del tanque de retardo —desde su ubicación dentro del lote hasta su interacción con las redes de drenaje existentes—. Así, cuando en los capítulos siguientes se aborden los aspectos técnicos y cuantitativos, el lector ya contará con una referencia visual y conceptual clara del elemento que constituye el eje central de esta investigación.

A continuación, en la Figura 1.23 se muestra el esquema de un tanque de retardo.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 70 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Figura 1.23 - Esquema tanque de retardo

El caño superior, de mayor diámetro, funciona como ingreso principal del caudal pluvial. Su ubicación elevada permite la entrada libre del agua proveniente de precipitaciones o escorrentías, minimizando pérdidas de carga y posibilitando la admisión rápida de grandes volúmenes durante los picos de lluvia. Desde allí, el flujo desciende por gravedad a través del módulo, favoreciendo la decantación y sedimentación interna.

Por su parte, el caño inferior, de menor diámetro, cumple la función de drenaje y se ubica en el punto más bajo para garantizar el vaciado total del sistema tras cada evento. Esta disposición evita la retención de agua residual, preservando la capacidad útil y asegurando que el dispositivo actúe con igual eficiencia ante nuevas precipitaciones. La diferencia de diámetros responde a criterios hidráulicos: mientras el conducto superior prioriza la admisión sin restricciones, el inferior regula un vaciado completo y controlado, logrando así un funcionamiento estable y repetible del sistema y disminuyendo los picos de caudal que en

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 71 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



definitiva es el objetivo principal. A continuación, en la Figura 1.24 se ilustra como fue configurado el modelo del tanque en el programa EPA SWMM.

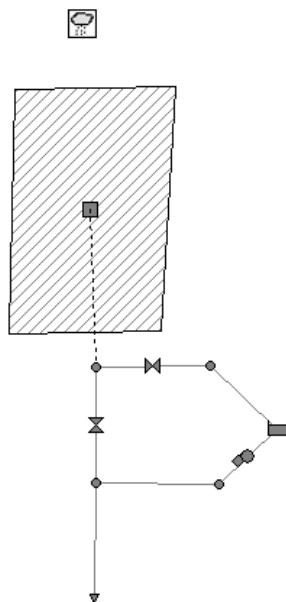


Figura 1.24 - Modelo de tanque de retardo en EPA SWMM

Para el modelado hidráulico del sistema se utilizó el software EPA SWMM. En el programa se representó el tanque mediante un esquema de almacenamiento interconectado con conductos y elementos de control de flujo, tal como se muestra en la figura. A partir de este modelo se realizaron los análisis de comportamiento hidráulico y de vaciado.

En los apartados posteriores, se profundizará en la cuantificación del impacto hidrológico a nivel de lote: cuánto aumenta el caudal debido a la urbanización, cuánto puede reducirse mediante la aplicación de medidas LID como el tanque de retardo, y cuál es el

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 72 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



volumen mínimo de almacenamiento necesario para alcanzar una condición de impacto hidrológico nulo.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

- Proponer un sistema de drenaje urbano sostenible a nivel de lote: evaluar el impacto hidrológico de la urbanización y estrategias de mitigación.

1.6.2. Objetivos específicos

- Analizar la influencia de diferentes variables hidrológicas en el caudal pico a nivel de lote.
- Determinar la duración crítica de la lluvia para distintos tamaños de lote.
- Evaluar el impacto hidrológico de la urbanización a nivel de lote.
- Evaluar el funcionamiento de tanques de retardo a nivel de lote.
- Analizar el efecto combinado entre tanques de retardo a nivel de lote y una laguna de retardo a nivel de loteo.
- Sintetizar los resultados y proponer lineamientos aplicables a normativas locales de drenaje sostenible.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 73 de 273 |
| <p>DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



1.7. Metodología

El desarrollo del trabajo se estructuró en distintas etapas metodológicas que permitieron avanzar desde el marco conceptual hasta la aplicación práctica del modelo. En primer lugar, en el **Capítulo 1**, se recopilaron y analizaron los fundamentos teóricos necesarios para comprender la problemática del drenaje urbano, abordando los conceptos de hidrología de diseño, modelos de transformación lluvia-caudal y las limitaciones actuales de la infraestructura pluvial a escala de lote. Esta revisión bibliográfica, junto con la recopilación de normativas locales y antecedentes técnicos, sirvió de base para definir los parámetros y criterios de análisis que orientaron el resto del estudio.

Posteriormente, en el **Capítulo 2**, se efectuó un análisis de sensibilidad mediante simulaciones hidrológicas realizadas con el programa EPA SWMM, evaluando la influencia de variables como el área, la forma del lote, la pendiente, el número de curva (CN) y el factor de ocupación del suelo (FOS) sobre el caudal pico generado. Esto permitió identificar cuáles de estas variables presentan mayor incidencia en el aumento de la escorrentía urbana y, por tanto, deben ser consideradas prioritarias al momento de diseñar soluciones sostenibles.

A continuación, en el **Capítulo 3** se determinó la duración crítica de lluvia correspondiente a la que genera el caudal máximo. Para ello, se utilizaron curvas IDF representativas de la ciudad de Córdoba, variando las duraciones de los eventos de lluvia con igual período de retorno y seleccionando aquella que produce el pico de escurrimiento más elevado. Este valor se adoptó como base de cálculo en las simulaciones posteriores.

Luego, en el **Capítulo 4** se analizó la relación entre el área del lote y el FOS, estableciendo la variación del caudal en función del grado de impermeabilización del terreno. A partir de los resultados obtenidos en SWMM, se generaron curvas y expresiones

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 74 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



matemáticas ajustadas que permiten estimar de forma práctica el incremento del caudal relativo respecto al terreno natural.

En la siguiente etapa correspondiente al **Capítulo 5**, se incorporaron tanques retardadores a los modelos simulados, con el objetivo de cuantificar su efecto en la reducción del impacto hidrológico. Se estudiaron distintos volúmenes y configuraciones de tanque, determinando el volumen mínimo necesario para devolver el comportamiento hidrológico del lote a condiciones similares a las naturales. Además, se analizaron los tiempos de vaciado y la eficiencia de las medidas de retardo en distintos escenarios de FOS y lluvias de diseño.

Finalmente, en el **Capítulo 6** la metodología se aplicó a un loteo urbano representativo, incorporando una laguna de retardo como medida de control a escala global. Se compararon dos escenarios: uno con tanques individuales en cada lote y otro sin ellos, evaluando el efecto combinado sobre el caudal total y la eficiencia hidráulica del sistema. Los resultados se integraron en un análisis comparativo que permitió establecer criterios técnicos aplicables al diseño urbano real.

El trabajo culminó con la síntesis e interpretación de los resultados, verificando el cumplimiento de los objetivos planteados y reflexionando sobre la aplicabilidad de las estrategias de drenaje sostenible propuestas. De este modo, la metodología adoptada permitió vincular el análisis teórico con la modelación práctica, generando una herramienta de diagnóstico y diseño orientada a la reducción del impacto hidrológico de la urbanización y a la promoción de soluciones sostenibles a escala de lote.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 75 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Capítulo 2. Análisis de sensibilidad del modelo EPA SWMM ante diferentes variables simuladas

A continuación, en el presente capítulo se desarrollará el análisis de sensibilidad, orientado a evaluar la influencia de las distintas variables hidrológicas y geométricas sobre el caudal pico de escorrentía urbana. En la primera parte se expone una descripción teórica de cada variable, sus rangos de valores característicos y su relevancia hidrológica en el proceso de generación de escorrentía. Posteriormente, se desarrolla el modelado numérico, especificando las variables que se mantuvieron fijas y aquellas que fueron objeto de variación, junto con la justificación de los valores adoptados. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos, destacando las variables de mayor influencia sobre el caudal pico y las implicancias que estos resultados tienen para el diseño y manejo del drenaje urbano sostenible.

2.1. Introducción

El análisis de sensibilidad es una herramienta metodológica que permite evaluar cómo varía el resultado de un modelo frente a modificaciones en los valores de sus variables de entrada. Su principal utilidad radica en identificar cuáles de estas variables ejercen una influencia significativa sobre el resultado final, de modo que el estudio pueda concentrarse en aquellos parámetros que realmente condicionan el comportamiento del sistema. En el contexto del presente Trabajo Final, el análisis de sensibilidad se aplicó al caudal pico de escorrentía urbana a escala de lote individual, con el objetivo de determinar cuáles de las variables hidrológicas y geométricas inciden en mayor medida sobre dicho caudal. De esta manera, se busca optimizar el alcance del estudio, enfocando el desarrollo en los parámetros

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 76 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



más influyentes y evitando un análisis innecesariamente extenso o redundante. Este enfoque permite comprender con mayor precisión el comportamiento hidrológico de la cuenca urbana, facilitando la identificación de los factores que determinan la magnitud del escurrimiento y, en consecuencia, la definición de estrategias de manejo o mitigación más efectivas frente al impacto de la urbanización. Para ello, se llevó a cabo un modelado hidrológico mediante el programa EPA SWMM, con el propósito de cuantificar la sensibilidad del caudal pico (Q_p) ante variaciones en las principales variables de entrada. En el modelo desarrollado con EPA SWMM, se incorporaron todas las variables relevantes identificadas para el análisis: área de aporte (A), pendiente media (S), forma de la cuenca (L/W), número de curva (CN), coeficiente de rugosidad de las superficies permeables (n_{perm}), coeficiente de rugosidad de las superficies impermeables (n_{imper}), duración de la lluvia, período de retorno (T.R.), intensidad media de precipitación (i) y factor de ocupación del suelo (FOS). De este conjunto de variables, cinco fueron seleccionadas para el análisis de sensibilidad por considerarse las de mayor incidencia sobre el caudal pico, mientras que las restantes se mantuvieron constantes con valores predeterminados, definidos según criterios técnicos y referencias bibliográficas que se detallan en los apartados siguientes.

2.2. Variables analizadas

A continuación, en el presente apartado se describen las principales variables hidrológicas y geométricas consideradas en el desarrollo del estudio, las cuales constituyen los parámetros de entrada del modelo empleado para la estimación de caudales de diseño. La identificación y caracterización de estas variables resulta esencial para comprender el comportamiento de la escorrentía superficial y establecer las condiciones representativas de los escenarios simulados.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 77 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



2.2.1. Área del lote

El área de aporte (A) representa la superficie total que contribuye al escurrimiento hacia el punto de salida o exotorio. Es una de las variables fundamentales en hidrología, dado que determina el volumen total de agua disponible para generar escorrentía. En términos generales, a mayor área de aporte, mayor será tanto el volumen como el caudal pico (Q_p) del escurrimiento superficial.

2.2.2. Forma

El programa utilizado para el modelado hidrológico, EPA SWMM (Storm Water Management Model), representa la forma de la cuenca mediante el parámetro W (ancho hidráulico equivalente), que traduce en el modelo el efecto geométrico de la morfología en planta. Cada subcuenca se conceptualiza como una superficie plana e inclinada que descarga hacia un punto de salida, donde el escurrimiento superficial se concentra según su ancho efectivo. En este esquema, el parámetro W no corresponde al ancho físico del terreno, sino a una medida hidráulica que expresa la anchura media de contribución al flujo. Matemáticamente, se define como la relación entre el área de la subcuenca (A) y la longitud promedio del recorrido del escurrimiento (L):

$$W = \frac{A}{L}$$

A continuación, en la Figura 2.1 se muestra un esquema de como materializa la forma el programa EPA SWMM.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 78 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

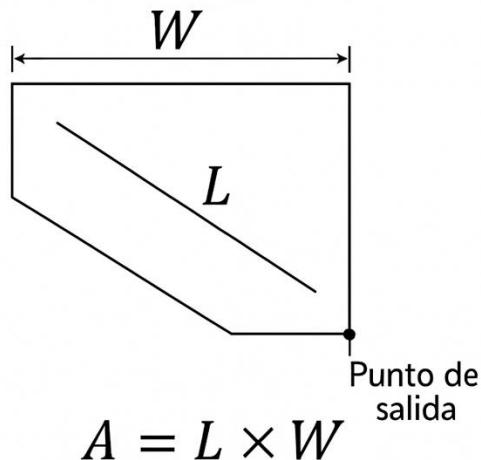


Figura 2.1 - Esquema de la forma en EPA SWMM

De esta forma, SWMM modela la forma de la cuenca a través de W , ya que este parámetro controla el tiempo de concentración y la magnitud del caudal pico. Valores elevados de W (cuenca compactas) generan respuestas rápidas y picos agudos, mientras que valores bajos (cuenca alargadas) producen hidrogramas más atenuados.

En el presente trabajo, el parámetro W se calculó a partir de la relación de forma

$$Forma = \frac{L}{W}$$

$$Area = L \times W$$

$$Area = forma \times W^2$$

$$W = \sqrt{\frac{Area}{forma}}$$

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 79 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



lo que garantiza la coherencia geométrica entre el área, la longitud y el grado de alargamiento de la cuenca, permitiendo reproducir en el modelo el efecto de la forma sobre la concentración del escurrimiento.

2.2.3. Modelo de pérdidas SCS – CN

El parámetro CN (Número de Curva) se utilizó en el modelo EPA SWMM para representar las pérdidas por infiltración y almacenamiento inicial del suelo, a través del método SCS-CN. Este enfoque permite estimar la fracción de lluvia que se transforma en escorrentía efectiva, en función de las características del terreno y su cobertura superficial.

Cabe destacar que el modelo de pérdidas SCS-CN fue desarrollado en detalle en el Capítulo 1 de este Trabajo Final, donde se explican sus fundamentos teóricos y las ecuaciones empleadas. En este capítulo, su aplicación se limita a la definición del parámetro CN como variable de entrada del modelo, utilizada para evaluar su influencia sobre el caudal pico y la respuesta hidrológica de la cuenca.

2.2.4. Pendiente

El parámetro pendiente media (S) se empleó en el modelo EPA SWMM para representar la inclinación general del terreno y su efecto sobre la velocidad del escurrimiento superficial. Este valor influye directamente en el tiempo de concentración y, por ende, en la magnitud del caudal pico obtenido en cada simulación.

En términos funcionales, pendientes mayores generan una respuesta hidrológica más rápida y caudales picos más elevados, mientras que pendientes suaves favorecen la infiltración y la atenuación del flujo. La metodología completa para el cálculo de este parámetro

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 80 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



se presenta en el Capítulo 1, donde se desarrollan los fundamentos geomorfológicos y las expresiones empleadas para su determinación.

2.2.5.FOS

El Factor de Ocupación del Suelo (FOS) se incorporó en el modelo EPA SWMM como indicador del grado de impermeabilización del terreno. Este parámetro define la proporción del lote ocupada por superficies impermeables como techos, veredas o pavimentos y, por lo tanto, condiciona el volumen de escorrentía generado durante un evento de lluvia.

En el modelo, el FOS se utilizó para establecer la fracción permeable e impermeable de cada subcuenca, afectando directamente el coeficiente de escorrentía y la intensidad del caudal pico. Su definición y fundamentos se describen en detalle en el Capítulo 1, dentro del marco del análisis de la urbanización y su impacto hidrológico.

2.2.6.Coefficiente de rugosidad

El modelo EPA SWMM simula el escurrimiento superficial dividiendo cada subcuenca en dos zonas independientes: una permeable, donde se producen infiltración y retención superficial, y otra impermeable, donde la totalidad de la precipitación contribuye directamente a la escorrentía. Esta conceptualización permite representar con mayor realismo el comportamiento hidrológico de áreas urbanas, donde conviven suelos naturales con superficies pavimentadas o edificadas. A continuación, en la Figura 2.2 se representa un esquema de subcuenca en el programa con las zonas permeable e impermeable.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 81 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

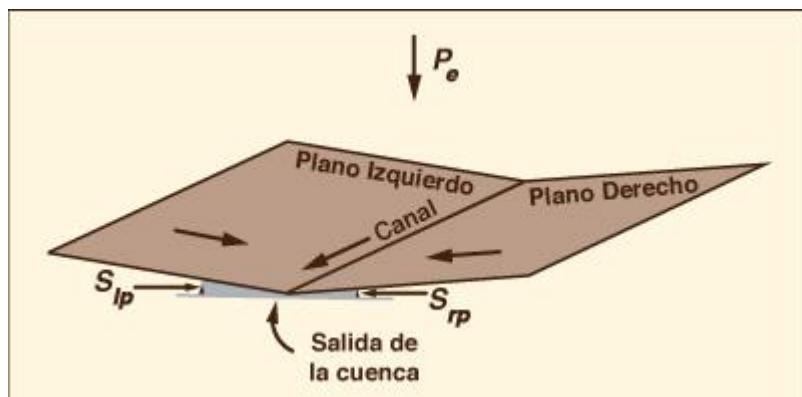


Figura 2.2 - Esquema de subcuenca en EPA SWMM con zonas permeable e impermeable

En cada zona, el modelo aplica un coeficiente de rugosidad de Manning (n) distinto que cuantifica la resistencia al flujo superficial. El coeficiente de rugosidad de Manning para superficies permeables (n_perm) representa la resistencia que ofrecen las coberturas naturales al flujo superficial, como el césped, los suelos desnudos o los jardines. Este coeficiente cuantifica la fricción ejercida por la vegetación y las irregularidades del terreno sobre el movimiento del agua. A medida que el valor de n_perm aumenta, el flujo superficial se vuelve más lento y menos eficiente, prolongando los tiempos de concentración y reduciendo la velocidad de escurrimiento. En modelos hidrológicos urbanos como EPA SWMM, este parámetro se emplea para distinguir las áreas permeables de las impermeables, permitiendo una representación más realista de la heterogeneidad del terreno. Existen diversas guías técnicas y manuales de drenaje urbano que recomiendan rangos de referencia para n_perm según el tipo de cobertura vegetal. En general, los valores típicos oscilan entre 0,01 y 0,03, siendo los menores representativos de superficies lisas o suelos desnudos, y los mayores correspondientes a césped alto o vegetación densa.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 82 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



El coeficiente de rugosidad de superficies impermeables (n_{imperm}) expresa la resistencia al escurrimiento sobre superficies pavimentadas o construidas, tales como calles, veredas o techos. Dado que estos materiales presentan texturas lisas y poca irregularidad superficial, su resistencia hidráulica es menor que la de las superficies naturales. En el modelo SWMM, el parámetro n_{imperm} se utiliza para caracterizar el flujo superficial en zonas impermeables y se define de forma independiente de n_{perm} . Los valores típicos reportados en la bibliografía para asfalto o concreto se sitúan entre 0,010 y 0,020, dependiendo del estado de conservación, la pendiente y el grado de rugosidad del material. Una adecuada elección de este parámetro es fundamental, ya que un valor excesivamente bajo puede sobreestimar las velocidades de escurrimiento, mientras que uno demasiado alto puede subestimar los caudales pico y los tiempos de concentración.

2.2.7. Duración de la lluvia [min]

La duración de la lluvia representa el tiempo total durante el cual se produce el evento de precipitación considerado en el modelo. Este parámetro permite distinguir entre distintos regímenes pluviométricos:

Lluvias de corta duración, típicamente intensas y concentradas (de tipo convectivo), que generan altos caudales pico en períodos breves.

Lluvias de larga duración, de menor intensidad, pero con mayores volúmenes acumulados, que pueden producir saturación del suelo o escurrimientos sostenidos.

En los análisis hidrológicos urbanos, se seleccionan distintas duraciones para identificar la tormenta crítica, es decir, aquella cuya duración genera el máximo caudal de

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 83 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



escorrentía. En general, se combinan duraciones breves y prolongadas para capturar tanto las respuestas rápidas como las de acumulación progresiva del sistema.

A continuación, se presenta un gráfico de hietograma que permite visualizar la evolución temporal de la precipitación y exemplificar el concepto de duración de la lluvia empleado en el análisis hidrológico. A continuación, en la Figura 2.3 se representa un modelo de hietograma.

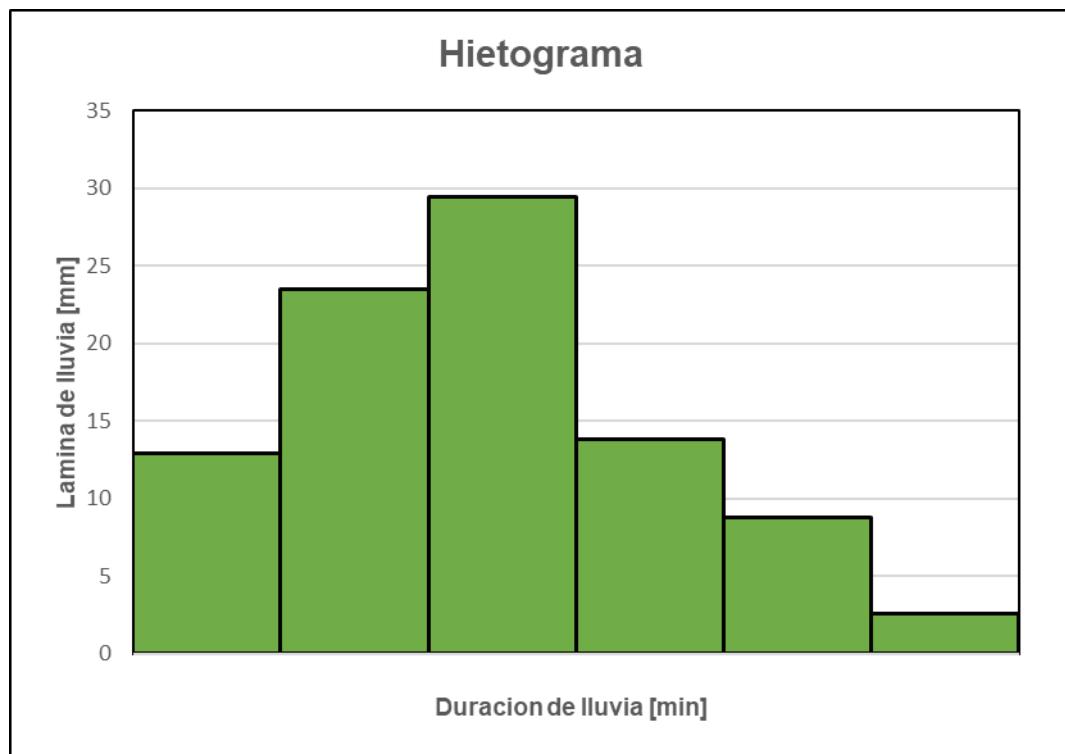


Figura 2.3 - Modelo de hietograma

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 84 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



2.2.8. Intensidad media de precipitación (i) [mm/h]

La intensidad media de precipitación (i) representa la tasa promedio de lluvia expresada en milímetros por hora, y se asocia directamente al período de retorno (T.R.) del evento. Este parámetro se obtiene a partir de las curvas IDT (Intensidad–Duración–Tiempo de recurrencia) locales, elaboradas a partir de registros pluviométricos históricos.

Si se multiplica la intensidad media de la precipitación por la duración total de la lluvia se obtiene como resultado la magnitud total de la lluvia caída (h), lo que representa la lámina total precipitada sobre la cuenca.

2.3. Escenarios simulados

A continuación, en el presente apartado se describen las simulaciones hidrológicas desarrolladas mediante el programa EPA SWMM, destinadas a analizar el comportamiento del escurrimiento superficial ante la variación de las principales variables geométricas e hidrológicas. Se presentan los criterios adoptados para la configuración de los escenarios, los parámetros considerados y las condiciones generales de modelado que servirán de base para el análisis posterior de resultados.

2.3.1. Introducción

Con el objetivo de evaluar la sensibilidad del caudal pico (Q_p) frente a las principales variables hidrológicas y geométricas, se desarrolló un modelado hidrológico en el programa EPA SWMM. En cada simulación, se varió individualmente una de las cinco variables principales área (A), forma de la cuenca (L/W), número de curva (CN), pendiente media (S) y

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 85 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



factor de ocupación del suelo (FOS), manteniendo las restantes constantes con valores representativos del contexto urbano de Córdoba. Este procedimiento permitió identificar el grado de influencia de cada parámetro sobre el caudal pico, garantizando la independencia de los resultados.

La Figura 2.4 muestra la interfaz del modelo en EPA SWMM, donde se visualizan los componentes principales y las variables definidas para las simulaciones, lo que permite comprender la estructura general del sistema y su configuración de entrada de datos.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 86 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

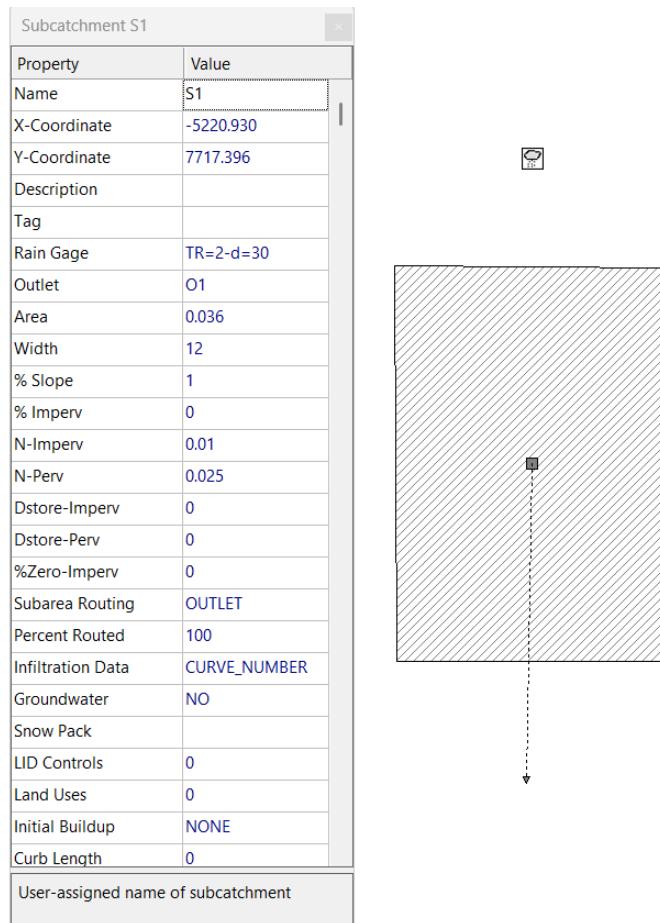


Figura 2.4 - Definición de subcuenca y parámetros en EPA SWMM

En todas las simulaciones realizadas, como anteriormente se mencionó algunas variables se mantuvieron fijas con el fin de aislar el efecto individual de aquellas seleccionadas para el análisis de sensibilidad. Los valores adoptados se definieron a partir de referencias técnicas y criterios hidrológicos aplicables al contexto urbano de la ciudad de Córdoba.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 87 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



A) Coeficiente de rugosidad de superficies permeables ($n_{perm} = 0,02$)

Se seleccionó este valor por representar superficies con vegetación moderada o césped bien mantenido, típicas de lotes urbanos. Manuales de drenaje urbano y guías de modelación hidrológica (EPA, 2015) recomiendan rangos de 0,01 a 0,03, por lo que 0,02 constituye un valor intermedio y representativo.

B) Coeficiente de rugosidad de superficies impermeables ($n_{imperm} = 0,014$)

Este valor corresponde a superficies pavimentadas o techos lisos, con baja resistencia al flujo. En la bibliografía, los valores para asfalto o concreto varían entre 0,010 y 0,020, por lo que 0,014 refleja una condición de superficie regular en buen estado.

C) Duración de la lluvia = 15 min y 120 min

Se consideraron estos dos escenarios para representar condiciones críticas opuestas: lluvias cortas e intensas (15 min), típicas de eventos convectivos de alta intensidad, y lluvias prolongadas (120 min), asociadas a procesos de acumulación o saturación del suelo. Esta selección permite capturar tanto la respuesta rápida como la respuesta extendida del sistema.

D) Intensidad media de precipitación (i)

Las intensidades se asociaron a períodos de retorno de 10 y 100 años, representando los eventos extremos más frecuentes y los más severos dentro de los rangos de diseño urbano. Los valores fueron obtenidos de las curvas IDT (Intensidad–Duración–Tiempo de recurrencia) de la ciudad de Córdoba, utilizadas para determinar las lluvias de diseño en los modelos.

En la Figura 2.5 se muestra el hietograma representativo de la provincia de Córdoba, para un período de retorno de 100 años y una duración de 120 minutos.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 88 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

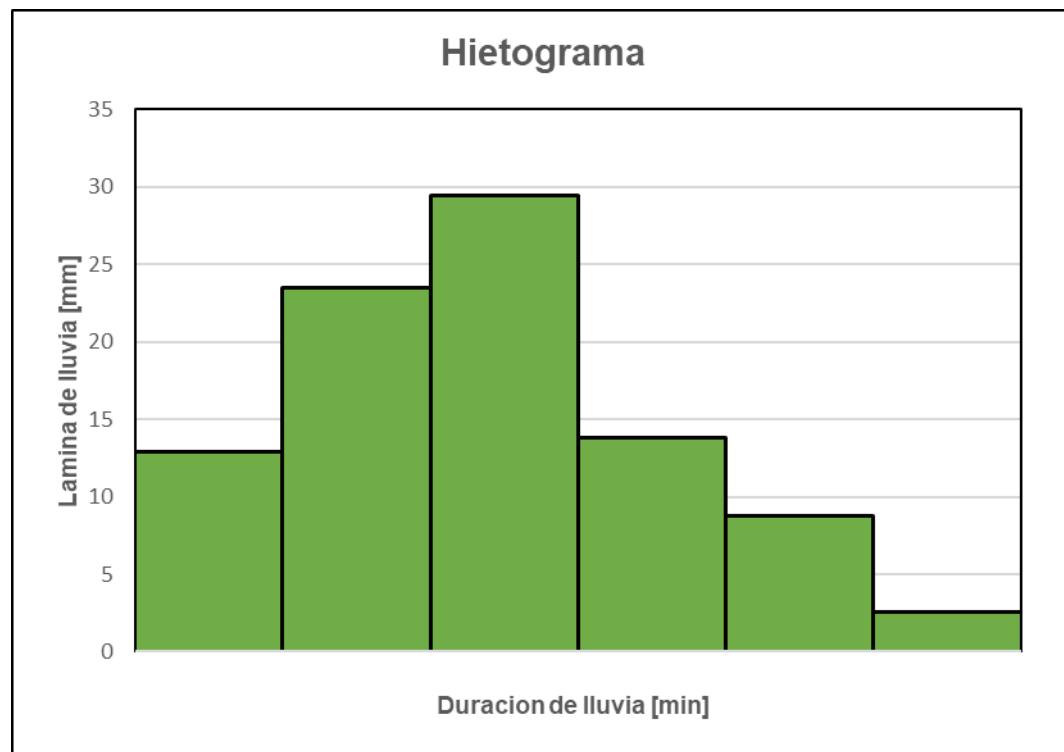


Figura 2.5 - Hietograma TR=100 años d=120 min

A modo de resumen, se presenta a continuación la Tabla 2.1 y Tabla 2.2 en la que se muestran las duraciones e intensidades de lluvia correspondientes a los distintos escenarios simulados.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 89 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Tabla 2.1-Intensidad de lluvia TR=10 años

| d [min] | Lamina de lluvia (mm) |
|---------|-----------------------|
| 5 | 10.5 |
| 10 | 10.5 |
| 15 | 9.0 |

Tabla 2.2-Intensidad de precipitación TR=100 años

| d [min] | Lamina de lluvia (mm) |
|---------|-----------------------|
| 20 | 12.87 |
| 40 | 23.53 |
| 60 | 29.42 |
| 80 | 13.79 |
| 100 | 8.73 |
| 120 | 2.55 |

2.3.2. Variables simuladas

A) Área (A)

Se analizó la respuesta hidrológica para superficies comprendidas entre 50 m² y 10 000 m², abarcando desde pequeños lotes individuales hasta sectores equivalentes a una hectárea completa. Los valores modelados fueron:

50, 100, 250, 360, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 2500, 5000 y 10 000 m².

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 90 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



B) Forma de la cuenca (L/W)

Se evaluó la influencia del cociente largo/ancho (L/W), representativo del grado de compacidad de la cuenca. Para el análisis se adoptaron dos grupos de simulaciones: uno con L/W constante = 2,5 (condición base) y otro con valores variables de 0,25 a 2,50, con incrementos de 0,25, abarcando desde cuencas compactas hasta alargadas.

Se tuvo en cuenta dos tipos de áreas de 1ha y de 360 m² para tener un mayor muestreo.

C) Número de curva (CN)

Se simuló la variación de la capacidad de infiltración y escurrimiento mediante valores de CN = 60, 65, 70, 75 y 80, cubriendo desde suelos de alta permeabilidad hasta condiciones predominantemente impermeables o urbanas.

D) Pendiente media (S)

La pendiente se expresó en valores adimensionales equivalentes a porcentajes comprendidos entre 0,1 % y 15 %, considerando desde superficies prácticamente planas hasta escenarios con fuerte inclinación. Los valores modelados fueron:

0,001 – 0,005 – 0,01 – 0,02 – 0,04 – 0,06 – 0,08 – 0,10 – 0,12 – 0,15.

E) Factor de ocupación del suelo (FOS)

Este parámetro, utilizado como indicador del grado de impermeabilización del lote, se varió en incrementos del 10 %, desde 0 (lote totalmente permeable) hasta 1 (impermeabilización total). Los valores simulados fueron:

0,10 – 0,20 – 0,30 – 0,40 – 0,50 – 0,60 – 0,70 – 0,80 – 0,90 – 1,00.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 91 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



A continuación, se presenta una tabla resumen que reúne los parámetros considerados en el modelo, diferenciando entre aquellos que se mantuvieron constantes y los que fueron modificados durante las simulaciones. Con el propósito de mejorar la comprensión, se incluyen además los rangos de valores adoptados para cada caso.

A continuación, en la Tabla 2.3 se presentan las variables y sus rangos analizados.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 92 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Tabla 2.3-Tabla resumen de variables y rangos analizados

| Categoría | Variable | Parámetro | Condición | Rango de valores analizados | Unidad |
|-----------------|--|-----------|--|--|----------------|
| Variables fijas | Coeficiente de rugosidad de superficies permeables | n_perm | Constante | 0.02 | Adimensional |
| | Coeficiente de rugosidad de superficies impermeables | n_imperm | Constante | 0.014 | Adimensional |
| | Duración de la lluvia | t | Constante (dos escenarios representativos) | 15 min y 120 min | min |
| | Intensidad media de precipitación | i | Constante (según T.R.) | Valores derivados de curvas IDT para T = 10 y 100 años | mm/h |
| | Período de retorno | T.R. | Constante (por caso) | 10 y 100 | años |
| Variables | Área del lote | A | Variable | 50 – 10 000 | m ² |
| | Forma de la cuenca | L/W | Variable | 0.25 – 2.50 | Adimensional |
| | Número de Curva | CN | Variable | 60 – 80 | Adimensional |
| | Pendiente media | S | Variable | 0.001 – 0.15 (0.1 % – 15 %) | m/m |
| | Factor de Ocupación del Suelo | FOS | Variable | 0.10 – 1.00 | Adimensional |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 93 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



2.4. Resultados

A continuación, en el presente apartado se exponen los principales resultados obtenidos a partir de las simulaciones hidrológicas realizadas en el programa EPA SWMM. Se presentan las tendencias observadas para cada variable analizada, destacando la relación entre los parámetros geométricos e hidrológicos y el caudal pico generado. Estos resultados constituyen la base para interpretar la respuesta del modelo y evaluar la coherencia de los distintos enfoques utilizados en el estudio.

2.4.1. Área

Los resultados obtenidos muestran una variación significativa del caudal pico (Q_p) en función del área de aporte. A medida que la superficie de la cuenca aumenta, el caudal crece de manera casi proporcional, pasando de 0,91 L/s para un área de 50 m² a 171,44 L/s para un área de 10 000 m² (1 ha). Esta tendencia confirma la relación proporcional entre el área y el caudal pico, coherente con la formulación del método racional, donde el caudal resulta directamente proporcional al área de drenaje.

En la Figura 2.6 se muestra la relación entre el caudal y el área para un período de retorno de 100 años. Los valores correspondientes a 10 años se incluyen en el Anexo.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 94 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

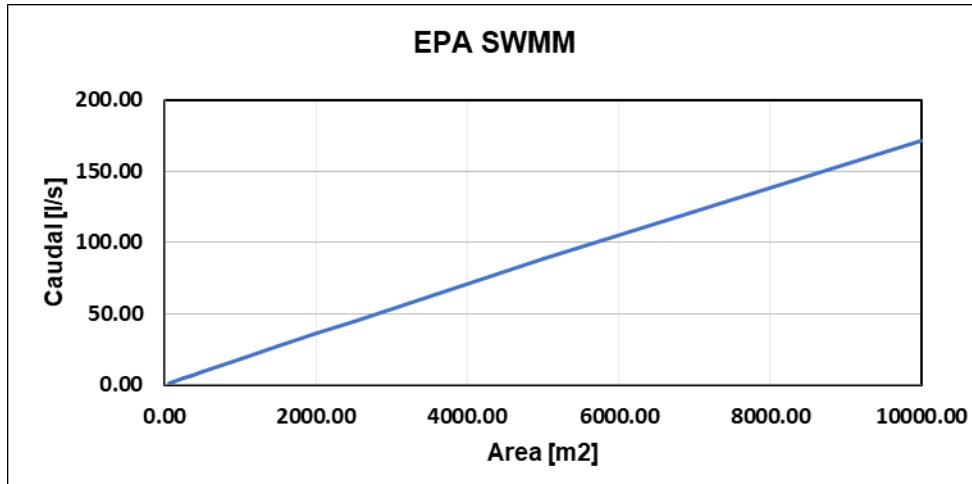


Figura 2.6 - Relación Caudal Área para T.R. = 100 años

2.4.2. Forma

En el caso de un área de 1 hectárea, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Para una relación $L/W = 0.25$, correspondiente a una cuenca menos alargada y más redondeada, el caudal pico alcanzó un valor de 180 L/s.
- Para una relación $L/W = 2.50$, asociada a una cuenca alargada, el caudal pico fue de 171 L/s.

La diferencia porcentual entre ambos casos fue de aproximadamente 5 %, lo que indica una variación poco significativa del caudal pico atribuible exclusivamente a la forma de la cuenca. Este comportamiento es coherente con la teoría hidrológica, que establece que las cuencas más compactas presentan tiempos de concentración menores y, por ende, una respuesta más rápida e intensa frente a un evento de precipitación.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 95 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Por otro lado, al repetir el análisis para un área constante de 360 m², tampoco se observaron variaciones significativas en el caudal pico ante los cambios en la relación L/W. Esto permite inferir que, para áreas reducidas (menores a 1 ha), el factor de forma no ejerce una influencia relevante sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca. Finalmente, es importante destacar que el presente Trabajo Final aborda el estudio a escala de lote urbano individual, donde las superficies analizadas se encuentran muy por debajo de una hectárea. En consecuencia, puede concluirse que, en este rango de análisis, la forma de la cuenca no constituye una variable determinante en la estimación del caudal pico, aunque su efecto podría adquirir mayor relevancia a escalas superiores de estudio.

A continuación, se presenta en la Figura 2.7 el análisis de la forma (L/W) para un área de 1 hectárea y período de retorno de 100 años, considerado como escenario principal.

Los resultados correspondientes a área = 360 m² (para T.R. = 10 y 100 años) y a área = 1 ha (para T.R. = 10 años) se incluyen en el Anexo.

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 96 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

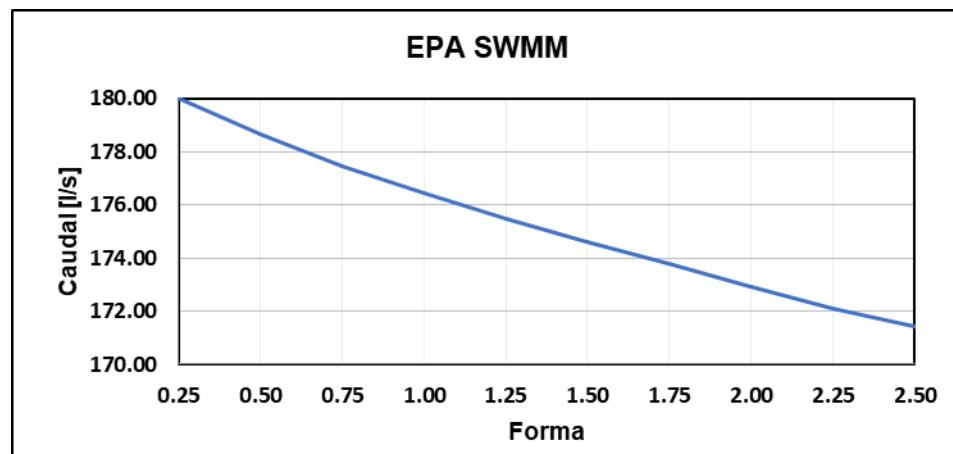


Figura 2.7 - Relación Caudal–Forma para T.R. = 100 años

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 97 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



2.4.3.CN

Los resultados evidencian una tendencia creciente del caudal pico a medida que aumenta el número de curva, confirmando que el CN es una variable de influencia hidrológica significativa. En ambos casos, el incremento del CN de 60 a 80 equivalente a una reducción en la capacidad de infiltración provocó aproximadamente una duplicación del caudal pico, tanto para la cuenca de 360 m² como para la de 1 ha. A continuación, se dejan expresados los resultados alcanzados para los distintos CN simulados en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4-Resumen de variación del caudal pico en función del número de curva (CN)

| Area (m ²) | CN | Qp (L/s) |
|------------------------|----|----------|
| 360 | 60 | 0.76 |
| | 80 | 1.5 |
| 10000 | 60 | 21 |
| | 80 | 41.75 |

Esta relación directa se explica porque un mayor CN implica una menor retención inicial y un volumen de escorrentía más alto, lo que incrementa el flujo superficial que converge hacia el punto de salida. Además, la diferencia observada entre las áreas analizadas refuerza que, a medida que aumenta la superficie de aporte, el efecto del CN sobre el caudal se amplifica, ya que el incremento del volumen escurrido es proporcionalmente mayor.

Por lo tanto, puede concluirse que el número de curva es una de las variables más influyentes en la estimación del caudal pico, especialmente en escenarios urbanos o con alto grado de impermeabilización, donde pequeñas variaciones en la cobertura o el tipo de suelo pueden generar cambios significativos en la respuesta hidrológica de la cuenca. En el caso del lote urbano, se seleccionó CN = 80 como representación de condiciones de zona urbana

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 98 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



con césped y cobertura normal, por considerarse que es un valor representativo dentro del rango observado en desarrollos residenciales con superficies permeables parciales.

A continuación, se presenta en la Figura 2.8 el gráfico de resultados correspondiente al análisis del número de curva (CN) para un área de 360 m² y un período de retorno de 100 años, considerada como escenario principal del estudio.

Las planillas asociadas a los casos de área = 1000 m² (T.R. = 100 años) y a áreas de 360 m² y 1000 m² (T.R. = 10 años) se incluyen en el Anexo.

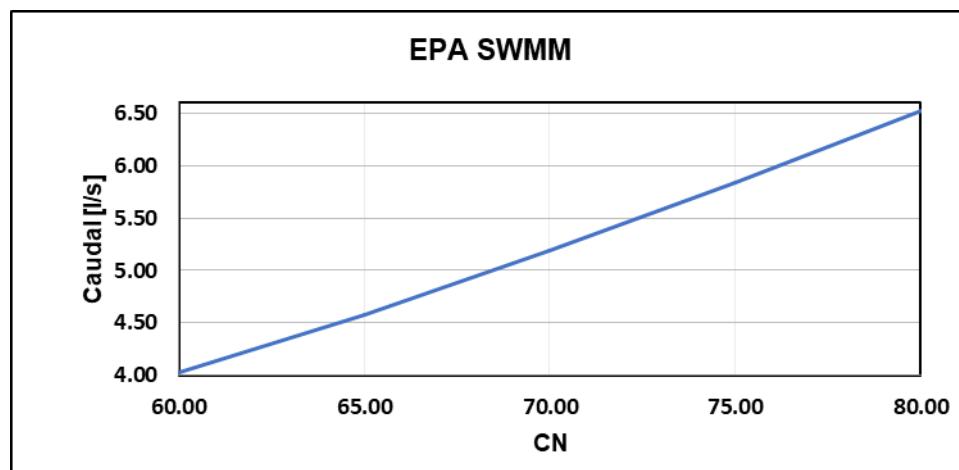


Figura 2.8 - Gráfico de variación del caudal pico en función del número de curva (CN)

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 99 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



2.4.4. Pendiente

Los resultados obtenidos se presentan a continuación en la Tabla 2.5. A modo resumen se presentan los principales resultados alcanzados.

Tabla 2.5-Variación del caudal pico en función de la pendiente de la cuenca

| Área (m ²) | Pendiente (%) | Q _p (L/s) |
|------------------------|---------------|----------------------|
| 360 | 0.1 | 5.65 |
| | 2 | 5.84 |
| | 15 | 5.88 |
| 5000 | 0.1 | 65.12 |
| | 2 | 79 |
| | 15 | 81 |

Las variaciones porcentuales:

Para 360 m²:

- Entre 0.1 % y 2 % → incremento de 3.36 %
- Entre 2 % y 15 % → incremento de 0.68 %

Para 5000 m²:

- Entre 0.1 % y 2 % → incremento de 21.3 %
- Entre 2 % y 15 % → incremento de 2.5 %

Los resultados muestran que el incremento del caudal pico con la pendiente es notorio hasta valores cercanos al 2 %, a partir del cual, para valores mayores la variación se vuelve mínima. Esto se debe a que el aumento de la velocidad de escurrimiento con la pendiente reduce el tiempo de concentración y, por ende, eleva el caudal pico; sin embargo, una vez alcanzado una pendiente del orden del 2%, el efecto adicional de incrementar la pendiente se

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 100 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



vuelve insignificante. En consecuencia, puede considerarse que el 2 % constituye el límite de pendiente a partir del cual el flujo alcanza su velocidad máxima práctica en condiciones urbanas. Más allá de ese valor, el aumento de la pendiente no produce variaciones relevantes en el caudal pico. Por este motivo, y considerando que los lotes urbanos de Córdoba capital rara vez superan pendientes del 1 %, se adoptó dicho valor como pendiente representativa y condición crítica para el desarrollo del resto del estudio. Este enfoque garantiza un análisis conservador y coherente con las características topográficas de la zona urbana analizada.

A continuación, se presenta en la Figura 2.9 el gráfico de resultados del análisis de la pendiente media (S) para un área de 360 m^2 y un período de retorno de 100 años, correspondiente al escenario principal de evaluación.

Los resultados complementarios para área = 360 m^2 (T.R. = 10 años) y área = 5000 m^2 (T.R. = 10 y 100 años) se incluyen en el Anexo.

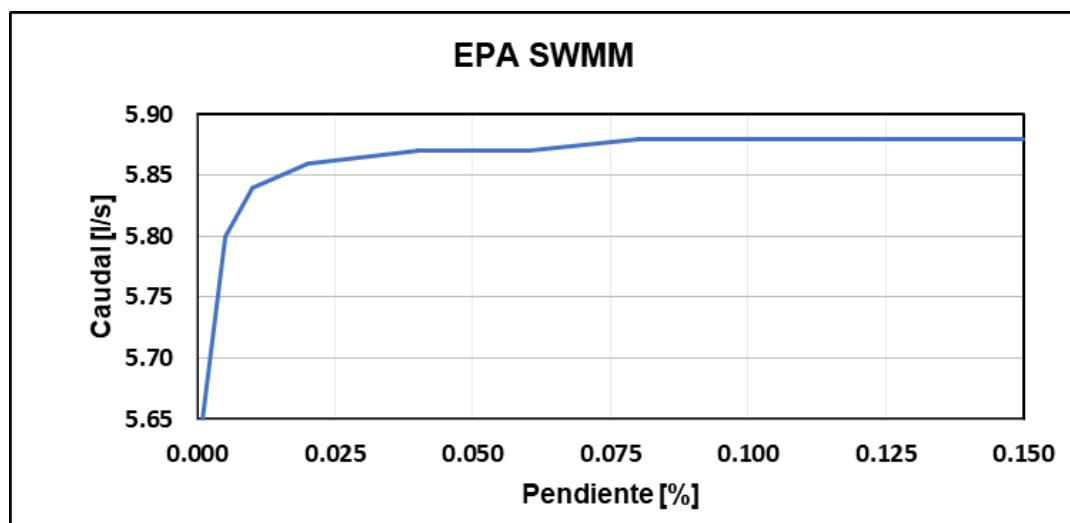


Figura 2.9 - Gráfico de variación del caudal pico en función de la pendiente de la cuenca

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 101 de 273 |
| <p>DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



2.4.5. FOS

Los resultados obtenidos se presentan a continuación en la Tabla 2.6. A modo resumen se presentan los principales resultados alcanzados.

Tabla 2.6-Resumen de variación del caudal pico en función del FOS (%)

| Area (m ²) | FOS (%) | Q _p (L/s) |
|------------------------|---------|----------------------|
| 360 | 20 | 0.5 |
| | 40 | 0.42 |
| 10000 | 20 | 13.8 |
| | 40 | 11.6 |

Las variaciones porcentuales:

Para 360 m²:

- Entre 0 % y 50 % → incremento de 24.2 %
- Entre 0 % y 100 % → incremento total de 51.6 %

Para 10 000 m²:

- Entre 0 % y 50 % → incremento de 24.3 %
- Entre 0 % y 100 % → incremento total de 52.0 %

Los resultados evidencian que el FOS ejerce una influencia directa y proporcional sobre el caudal pico, ya que el incremento del área impermeable reduce las pérdidas por infiltración y almacenamiento superficial, provocando un mayor volumen de escorrentía y, por ende, un aumento del caudal máximo. El comportamiento observado es claramente lineal dentro del rango analizado, lo que permite afirmar que la impermeabilización del terreno es una de las variables más determinantes en la respuesta hidrológica de un lote urbano. En

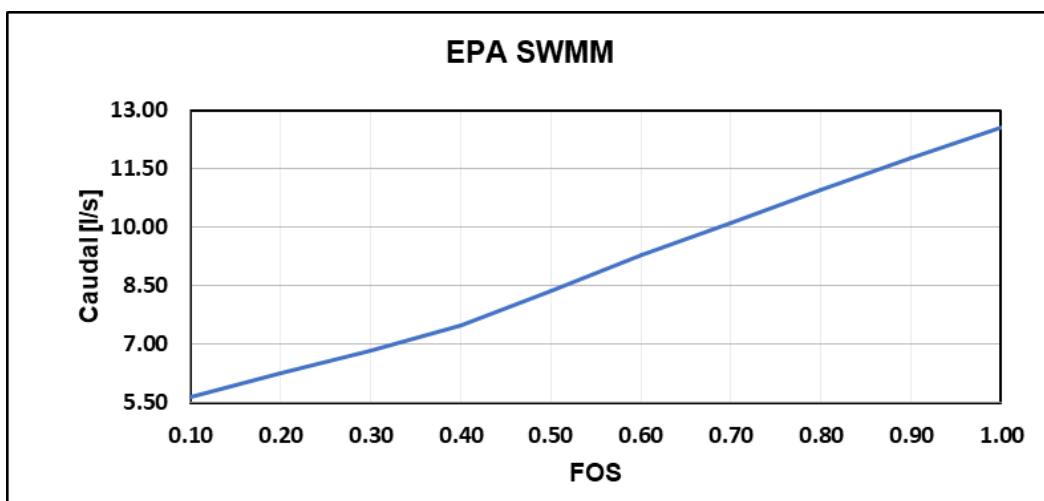
| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 102 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



terminos prácticos, el aumento del FOS de 0 % a 100 % generó un incremento del caudal pico del orden del 50 %, tanto para áreas pequeñas como mayores, lo que demuestra la alta sensibilidad del caudal frente a la impermeabilización. Estos resultados refuerzan la necesidad de incorporar medidas de drenaje urbano sostenible (SUDS) en zonas de alta ocupación del suelo, con el fin de compensar el aumento del escurrimiento superficial y mitigar los impactos derivados del crecimiento urbano.

A continuación, se presenta en la Figura 2.10 el gráfico de resultados del análisis del factor de ocupación del suelo (FOS) para un área de 360 m² y un período de retorno de 100 años, correspondiente al escenario principal del estudio.

Los resultados adicionales para área = 360 m² (T.R. = 10 años) y área = 1 ha (T.R. = 10 y 100 años) se incluyen en el Anexo.



| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 103 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



2.5. Análisis de resultados alcanzados

A partir del análisis de sensibilidad realizado, se definieron las variables con sus respectivos valores de referencia que se utilizarán en las etapas siguientes del Trabajo Final, diferenciando aquellas variables que deben mantenerse constantes de las que requieren un tratamiento particular según cada caso de estudio.

Algunas variables, como el área de aporte, la pendiente media del lote y el factor de ocupación del suelo (FOS), presentan una influencia significativa sobre el caudal pico (Q_p), por lo que no pueden adoptarse como valores fijos. En consecuencia, su efecto deberá evaluarse de forma específica y diferenciada para cada lote o escenario analizado, a fin de representar con mayor precisión la realidad hidrológica de cada emplazamiento. Por otro lado, el factor de forma (L/W) se estableció en 2,5, correspondiente a una cuenca relativamente alargada, con el propósito de mantener una configuración geométrica coherente con la morfología típica de los lotes urbanos y evitar que esta variable interfiera en la determinación de la duración crítica de la lluvia. Finalmente, el número de curva (CN) adoptado fue 80, en concordancia con los valores propuestos por el Soil Conservation Service (SCS) en el método TR-55, que asigna dicho rango a zonas urbanas con cobertura vegetal parcial y suelos moderadamente compactados. Este valor representa adecuadamente las condiciones hidrológicas de lotes residenciales urbanos, con una superficie predominantemente permeable, pero con cierto grado de compactación superficial.

En síntesis, los valores definidos permiten establecer un escenario base representativo del contexto urbano de Córdoba, sobre el cual se desarrollarán las simulaciones posteriores orientadas a determinar la duración crítica de la tormenta y evaluar las medidas de control de

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 104 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



escorrentía a escala de lote. En la Tabla 2.7 se resumen las variables con los valores y rangos que se utilizarán en todo el Trabajo Final.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 105 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Tabla 2.7-Resumen de valores y sus rangos que se usarán a lo largo del Trabajo Final

| Categoría | Variable | Parámetro | Condición | Rango de valores analizados | Unidad |
|-----------------|--|-----------|--|--|----------------|
| Variables fijas | Coeficiente de rugosidad de superficies permeables | n_perm | Constante | 0.02 | Adimensional |
| | Coeficiente de rugosidad de superficies impermeables | n_imperm | Constante | 0.014 | Adimensional |
| | Duración de la lluvia | t | Constante (dos escenarios representativos) | 15 min y 120 min | min |
| | Intensidad media de precipitación | i | Constante (según T.R.) | Valores derivados de curvas IDT para T = 10 y 100 años | mm/h |
| | Período de retorno | T.R. | Constante (por caso) | 10 y 100 | años |
| Variables | Área del lote | A | Variable | 50 – 10 000 | m ² |
| | Forma de la cuenca | L/W | Variable | 2.5 | Adimensional |
| | Número de Curva | CN | Variable | 70 | Adimensional |
| | Pendiente media | S | Variable | 0.1%-0.5%-1%-2% | m/m |
| | Factor de Ocupación del Suelo | FOS | Variable | 0.10 – 1.00 | Adimensional |

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 106 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Capítulo 3. Determinación de la duración crítica de la tormenta

A continuación, en el presente capítulo se desarrollará el estudio de la duración crítica de la lluvia, parámetro fundamental para comprender la respuesta hidrológica de una cuenca ante distintos eventos de precipitación. El análisis busca determinar el tiempo de lluvia que genera el caudal pico máximo, permitiendo establecer la condición más desfavorable para el diseño y dimensionamiento de sistemas de drenaje urbano.

3.1. Introducción

La duración crítica de la tormenta es un parámetro fundamental en el análisis hidrológico, ya que define el tiempo de lluvia que genera el caudal pico máximo en una cuenca determinada. En otras palabras, se trata de la duración del evento de precipitación cuya combinación entre intensidad y tiempo de escurrimiento produce la respuesta hidrológica más severa, en términos de caudal máximo.

La identificación de esta duración es esencial para el diseño de sistemas de drenaje urbano y obras hidráulicas, ya que permite asegurar que las infraestructuras sean dimensionadas para soportar el escenario más desfavorable posible dentro de los rangos de lluvias que pueden presentarse.

En términos conceptuales, cuando la duración de la tormenta es menor al tiempo de concentración (t_a), solo una parte de la cuenca alcanza a contribuir al escurrimiento, generando un caudal menor. En cambio, si la duración supera el tiempo de concentración, la

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 107 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



intensidad promedio de la lluvia disminuye y el caudal también tiende a reducirse. Por lo tanto, el caudal máximo se alcanza cuando la duración de la lluvia es del mismo orden del tiempo de concentración de la cuenca, lo que se denomina duración de la tormenta crítica. (Schmid, 1997)

En el marco de este Trabajo Final, la determinación de la duración crítica se realizó utilizando el modelo hidrológico EPA SWMM para distintas configuraciones de cuenca. Se evaluaron diferentes duraciones de lluvia, manteniendo constantes las restantes variables geométricas e hidrológicas (área, pendiente, CN, FOS, rugosidades y período de retorno), con el fin de identificar aquella duración que genera el máximo caudal pico (Q_p).

3.2. Lluvia de diseño implementada

Para la determinación de la lluvia crítica de diseño correspondiente a la ciudad de Córdoba, el primer paso consistió en disponer de las curvas de Intensidad–Duración–Tiempo de recurrencia (I–D–T) representativas de la región. Estas curvas constituyen la base para el cálculo de la intensidad media de precipitación asociada a diferentes duraciones de lluvia y tiempos de recurrencia, y son fundamentales para la definición de los eventos de diseño en estudios hidrológicos urbanos.

En el marco del presente trabajo, se utilizó la curva IDT de la ciudad de Córdoba actualizada al año 2024. La misma fue descargada de la página web del INA CIRSA y se muestra en la Figura 3.1 a continuación:

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 108 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Lluvias para diseño hidrológico
Relación intensidad-duración-Frecuencia (IDF)

Córdoba - Pcia. Córdoba

Estación: Córdoba Observatorio (87345 SMN)
(31°25'15" S; 64°11'54" O; 425 msnm)

Período: 1960-2014

Longitud de registro: 55 años



Modelo DIT*

$$\ln i_{d,T} = A \cdot \phi_T - B \cdot \delta_d + C$$

$$\phi_T = 2,584458 \cdot (\ln T)^{3/8} - 2,252573$$

$$\delta_d = (\ln d)^{5/3}$$

i = intensidad [mm/h], d = duración [min], T = recurrencia [años]

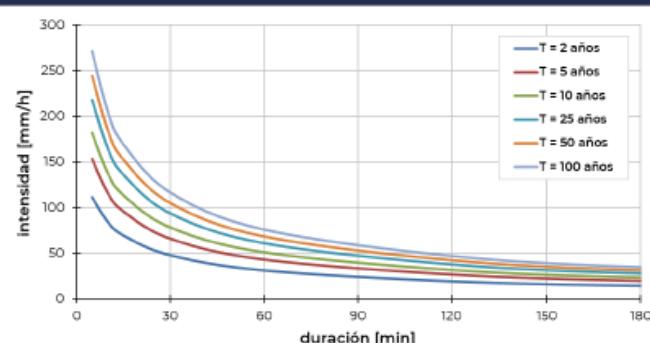
Curva IDF

Parámetros ajustados

$$A = 0,381 \quad \mu = 4,262$$

$$B = 0,154 \quad \sigma = 0,381$$

$$C = 5,054$$



| Período de retorno [años] | Intensidad de lluvia $i(d,T)$ [mm/h] | | | | | Lamina de lluvia $h(d,T)$ [mm] | | | | |
|---------------------------|--------------------------------------|------|------|------|------|--------------------------------|-----|-----|-----|------|
| | 60 | 120 | 180 | 360 | 1440 | 60 | 120 | 180 | 360 | 1440 |
| 2 | 31,2 | 19,3 | 14,2 | 8,1 | 2,3 | 31 | 39 | 43 | 49 | 56 |
| 5 | 42,9 | 26,5 | 19,6 | 11,2 | 3,2 | 43 | 53 | 59 | 67 | 77 |
| 10 | 50,8 | 31,4 | 23,2 | 13,3 | 3,8 | 51 | 63 | 70 | 80 | 91 |
| 25 | 60,8 | 37,6 | 27,7 | 15,9 | 4,6 | 61 | 75 | 83 | 95 | 109 |
| 50 | 68,3 | 42,2 | 31,2 | 17,8 | 5,1 | 68 | 84 | 93 | 107 | 123 |

* Casmaño Nelli, G. y Dasso C.: (2003). "Lluvias de Diseño: Conceptos, Técnicas y Experiencias". Editorial Universitas. ISBN: 987-9406-43-5. Córdoba, Argentina.
Casmaño Nelli, G. y C. García. (1999). "Relación Intensidad-duración-recurrencia de lluvias máximas: Enfoque a través del factor de frecuencia - caso lognormal". Ingeniería Hidráulica de México, Vol. XIV, N° 3, pp. 37-44

Figura 3.1 - Curvas IDT de Córdoba (2024)

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 109 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



A partir de la IDT se obtuvieron los valores de intensidad (*i*) correspondientes a las duraciones de 15, 30, 60 y 120 minutos, y a los tiempos de recurrencia, los cuales fueron empleados en las simulaciones de modelado hidrológico. A continuación, se presentan los resultados correspondientes a las curvas Intensidad-Duración-Tasa (IDT) obtenidas para la ciudad de Córdoba, considerando una duración de lluvia de 15 minutos.

En el gráfico se muestran las alturas de precipitación acumulada (*h*) en función del intervalo de análisis (*d*) para distintos tiempos de recurrencia (T_r), expresados en años.

Este conjunto de curvas permite visualizar la variación de la intensidad de la lluvia con el incremento del período de retorno, lo que constituye una herramienta fundamental para el diseño hidrológico de obras urbanas y pluviales.

En la Figura 3.2 se muestran las IDT de Córdoba para lluvias de duración de 15 minutos para distintos períodos de recurrencia.

Los gráficos correspondientes a las duraciones de 30, 60 y 120 minutos se incluyen en el Anexo.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 110 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

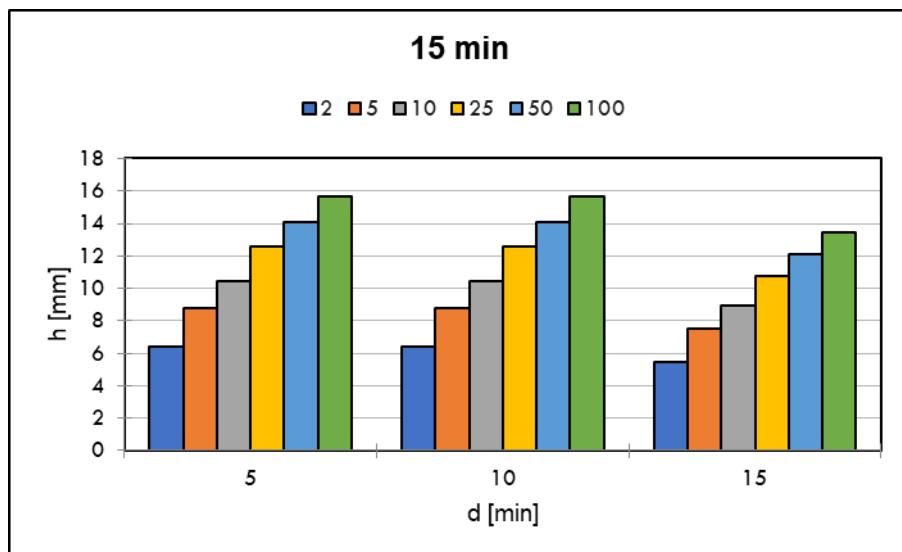


Figura 3.2 - IDT de Córdoba d=15 (min)

3.3. Escenarios simulados

El análisis de la duración crítica de la tormenta se desarrolló mediante simulaciones hidrológicas en el programa EPA SWMM, utilizando un enfoque paramétrico que permitió evaluar la respuesta del caudal pico frente a diferentes duraciones de lluvia. Las variables del modelo y los valores adoptados se seleccionaron en función de condiciones típicas de la ciudad de Córdoba y de criterios técnicos respaldados por bibliografía especializada.

Las superficies analizadas abarcaron áreas de 50, 100, 250, 360, 500, 750, 1000, 2000, 2500, 5000 y 10 000 m², representando desde pequeños lotes urbanos hasta unidades de escala intermedia. En las simulaciones se consideraron tres pendientes medias de la cuenca: 0,1 %, 1 % y 5 %, con el fin de analizar la influencia de la topografía sobre la respuesta hidrológica. El valor de 1 % se tomó como representativo de los lotes residenciales de Córdoba

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 111 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



capital, donde las pendientes naturales rara vez superan dicho valor debido a la topografía suavemente ondulada del área urbana. Este valor además constituye una condición crítica, ya que pendientes mayores aceleran el escurrimiento y reducen el almacenamiento superficial, lo que disminuiría la sensibilidad del modelo.

El factor de forma (L/W) se estableció en 2.5, correspondiente a una cuenca relativamente alargada, con el propósito de mantener una configuración geométrica coherente con la morfología típica de los lotes urbanos y evitar que la variable forma interfiera en la determinación de la duración crítica.

El número de curva (CN) se adoptó igual a 80, en concordancia con los valores propuestos por el Soil Conservation Service (SCS) en el método TR-55, que asigna ese rango a zonas urbanas con cobertura vegetal parcial y suelos moderadamente compactados. Este valor refleja adecuadamente las condiciones hidrológicas de lotes urbanos con superficie predominantemente permeable, pero con cierta compactación, propias de áreas residenciales.

El coeficiente de rugosidad de las superficies permeables (n_{perm}) se fijó en 0.02, valor que representa un terreno cubierto por césped o vegetación corta en buen estado, según los rangos recomendados por el Manual de Usuario de SWMM (EPA, 2015) y por manuales de drenaje urbano, donde se indican valores típicos de entre 0.01 y 0.03 para superficies permeables.

El coeficiente de rugosidad de las superficies impermeables (n_{imper}) se consideró nulo, dado que el factor de ocupación del suelo (FOS) se fijó en 0, es decir, sin superficies impermeables. De este modo, el modelo representó un lote completamente permeable, lo que

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 112 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



permitió aislar el efecto de la duración de la lluvia sobre el caudal pico, sin la influencia de la impermeabilización superficial.

Las duraciones de lluvia analizadas fueron 15, 30, 60 y 120 minutos, seleccionadas con el objetivo de identificar el intervalo temporal que genera el caudal máximo de escorrentía. Las duraciones cortas representan lluvias de tipo convectivo, intensas y localizadas, mientras que las más prolongadas corresponden a eventos frontal o estratiformes, característicos de lluvias de menor intensidad, pero mayor volumen total.

El tiempo de recurrencia (T.R.) utilizado fue de 25 años, correspondiente a un evento de precipitación de diseño de intensidad media-alta, comúnmente empleado en estudios de drenaje urbano. Este valor permite representar una situación crítica razonable sin caer en extremos poco probables (como los de 100 años), que suelen reservarse para obras hidráulicas mayores.

Finalmente, se mantuvo el FOS = 0, con el propósito de estudiar el comportamiento hidrológico del lote en condiciones totalmente permeables y así determinar la duración crítica de la tormenta sin influencia del grado de impermeabilización.

En conjunto, esta configuración de parámetros permitió realizar un análisis robusto y controlado, donde la única variable modificada fue la duración de la lluvia, con el fin de identificar aquella que produce el caudal pico máximo (Q_p) para las condiciones representativas de los lotes urbanos de Córdoba.

En la Tabla 3.1 se muestran los parámetros fijos y variables utilizados en las simulaciones del análisis de duración crítica de la precipitación.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 113 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



Tabla 3.1-Parámetros fijos y variables utilizados en las simulaciones del análisis de duración crítica de la precipitación

| Categoría | Variable | Parámetro | Condición | Rango de valores analizados | Unidad |
|-----------------|--|-----------|--|-----------------------------|----------------|
| Variables fijas | Coeficiente de rugosidad de superficies permeables | n_perm | Constante | 0.02 | Adimensional |
| | Coeficiente de rugosidad de superficies impermeables | n_imperm | Constante | 0 | Adimensional |
| | Período de retorno | T.R. | Constante (por caso) | 25 | años |
| | Forma de la cuenca | L/W | Variable | 2.5 | Adimensional |
| | Número de Curva | CN | Variable | 80 | Adimensional |
| | Factor de Ocupación del Suelo | FOS | Variable | 0 | Adimensional |
| Variables | Área del lote | A | Variable | 50 – 10 000 | m ² |
| | Pendiente media | S | Variable | 0.1%, 1% y 5% | m/m |
| | Duración de la lluvia | t | Constante (dos escenarios representativos) | 15, 30 , 60,120 | min |

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 114 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



3.4. Resultados

A partir del modelado realizado en EPA SWMM, se determinó que la duración crítica de la lluvia para las condiciones analizadas es de 30 minutos. Este valor fue obtenido mediante la comparación de los caudales pico generados por diferentes duraciones de lluvia (15, 30, 60 y 120 minutos) y pendientes medias del terreno (0,1 %, 1 % y 5 %), manteniendo constantes las restantes variables hidrológicas y geométricas del modelo. Los resultados mostraron que, para todas las pendientes analizadas, la lluvia de 30 minutos produce el caudal máximo de escorrentía (Q_p) en los distintos escenarios de área evaluados, por lo que se la adopta como duración crítica de diseño para los lotes urbanos representativos de la ciudad de Córdoba.

A continuación, en la Figura 3.3 y Figura 3.4 se presentan los gráficos que muestran la variación del caudal pico en función de la duración de la precipitación para una pendiente constante de 1 %, considerada representativa del entorno urbano local. Las curvas correspondientes a las pendientes de 0,1 % y 5 % se incluyen en el Anexo, a fin de complementar el análisis comparativo de la influencia de la topografía sobre la respuesta hidrológica.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 115 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

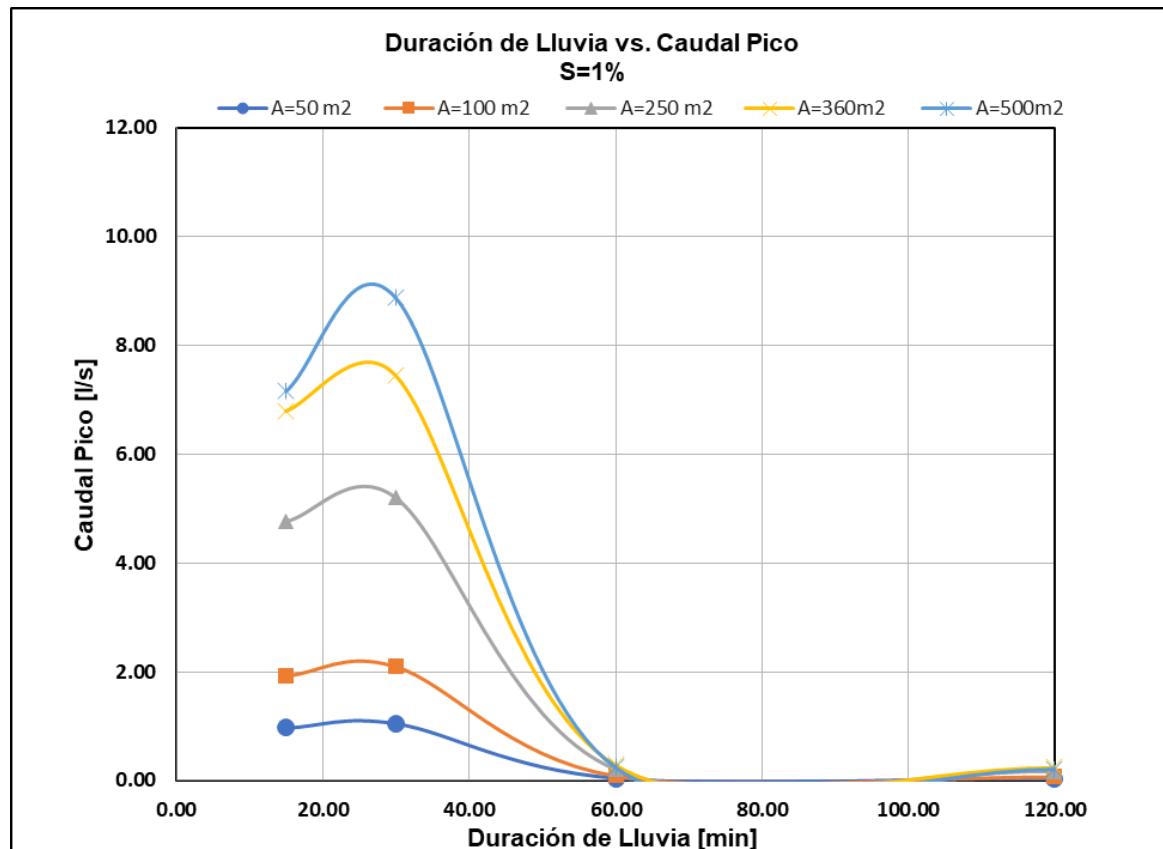


Figura 3.3 - Duración critica de lluvia-S=1%

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 116 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

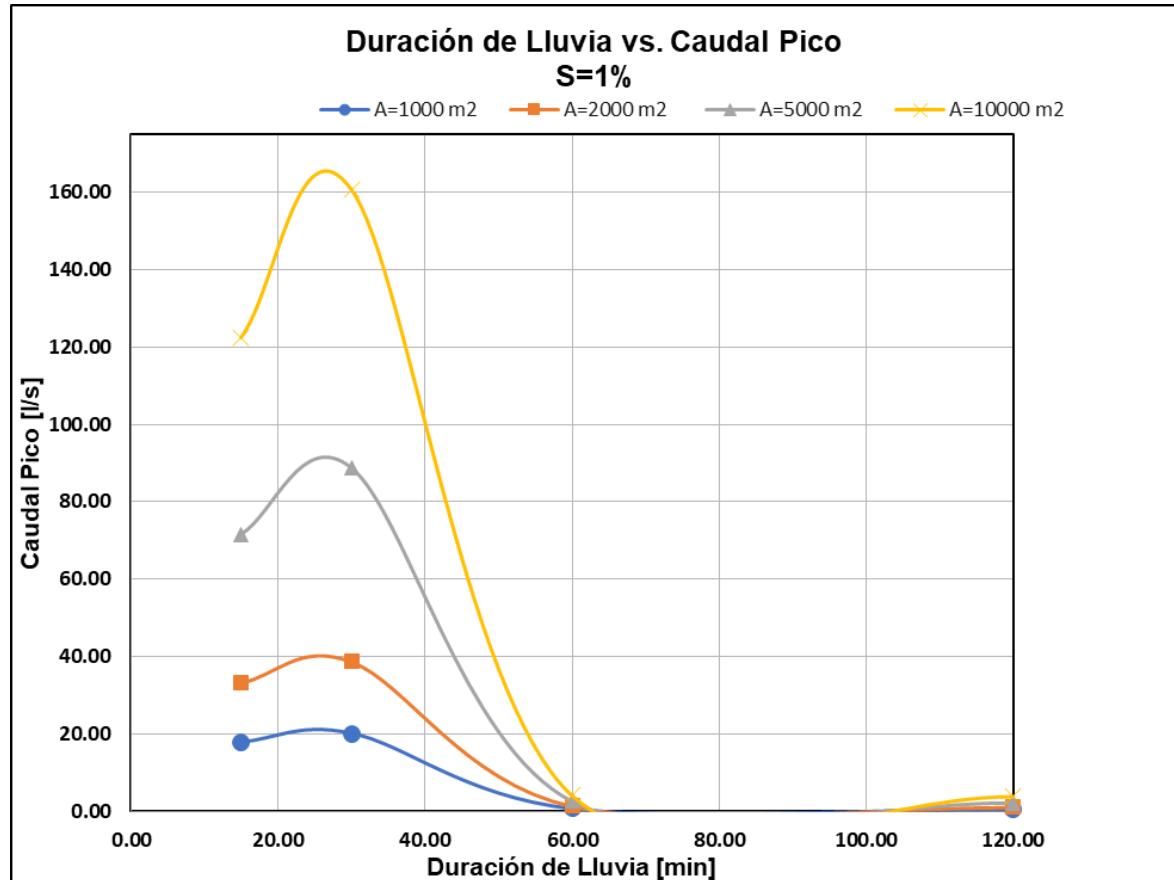


Figura 3.4 - Duración crítica de lluvia-S=1%

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 117 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



A modo de síntesis, en la siguiente tabla se presentan los valores obtenidos de caudal pico máximo correspondientes a la duración crítica de lluvia de 30 minutos, determinada previamente mediante el análisis comparativo de las diferentes duraciones simuladas. Los resultados se exponen en función del área del lote analizada, permitiendo identificar la variación del caudal máximo con la escala de drenaje considerada.

Como conclusión del análisis, se adopta la lluvia de 30 minutos como duración representativa de diseño, la cual será utilizada en los capítulos siguientes para el desarrollo de las simulaciones y evaluaciones hidrológicas del presente Trabajo Final.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 118 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Capítulo 4. Estimación de los caudales de diseño a nivel de lote pre y post urbanización

A continuación, en el presente capítulo se desarrollará la estimación de los caudales de diseño a nivel de lote, tanto en condiciones naturales como posteriores a la urbanización. Este análisis tiene por objetivo comprender cómo las modificaciones morfológicas y constructivas del terreno —principalmente el aumento de la impermeabilización— modifican la respuesta hidrológica de los lotes urbanos. El capítulo presenta las variables analizadas, la metodología implementada, los escenarios evaluados y los criterios adoptados para representar el impacto de la urbanización sobre el caudal de escorrentía. De esta forma, se establece un marco metodológico que permite identificar la influencia de las variables geométricas e hidrológicas en la generación de escorrentía y su aplicación en el diseño de sistemas de drenaje urbano sostenibles.

4.1. Introducción

El capítulo aborda el estudio del comportamiento hidrológico a escala de lote mediante la estimación de los caudales pico de escorrentía en escenarios pre y post urbanización. Para ello, se emplearon simulaciones hidrológicas realizadas con el programa EPA SWMM, aplicadas a distintos tamaños de lote y configuraciones geométricas. En cada caso, se mantuvieron constantes las condiciones de precipitación y las características del suelo, variando parámetros como la pendiente media, el factor de ocupación del suelo (FOS) y el área de aporte, con el fin de analizar cómo su modificación incide en la magnitud del caudal generado. El desarrollo del capítulo contempla, además, la incorporación de un nuevo

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 119 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



parámetro denominado Urban Impact (UI), que cuantifica el incremento relativo del caudal producto de la urbanización. A partir de este enfoque, se evalúan tendencias y comportamientos hidrológicos asociados a la impermeabilización progresiva de los lotes, observando cómo las variaciones del FOS modifican la relación entre área, pendiente y escorrimiento. Este procedimiento permitió establecer una base metodológica que vincula la configuración física de los lotes con su capacidad de generar escorrentía, ofreciendo criterios de referencia para el diseño y la planificación de sistemas urbanos con impacto hidrológico reducido.

4.2. Metodología y variables analizadas

El análisis se realizó mediante simulaciones hidrológicas en el programa EPA SWMM, con el fin de comparar resultados y verificar coherencia entre ambos enfoques.

Se consideraron seis tamaños de lote: 250 m², 360 m², 500 m², 1000 m², 2000 m² y 5000 m², abarcando desde parcelas residenciales pequeñas hasta superficies de mayor escala. Para todos los casos se definió una relación geométrica L/W = 2,50, a partir de la cual se determinó el ancho característico de cada cuenca.

Los parámetros fijos empleados en las simulaciones fueron los siguientes:

- Número de Curva (CN): 70
- Coeficiente de rugosidad (n) permeable: 0,025
- Coeficiente de rugosidad (n) impermeable: 0,010
- Duración de lluvia: 30 minutos (correspondiente a la duración crítica)
- Período de retorno: 5 años
- FOS analizados: 0,00 – 0,25 – 0,50 – 0,75 – 1,00

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 120 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



- Pendientes del lote: 0,1%, 0,5%, 1% y 2%

De esta manera, se generó un conjunto de simulaciones que combina tres grupos de variables:

1. Área (A): representa la escala de análisis.
2. FOS: indica el grado de impermeabilización.
3. Pendiente (S): refleja el efecto de la topografía en el escurrimiento.

Las demás variables se mantuvieron constantes con el fin de aislar el efecto de cada una sobre el caudal pico. El modelo EPA SWMM permitió obtener el caudal pico (Q) y el coeficiente de escorrentía (C) para cada combinación de parámetros. Las intensidades de lluvia se determinaron a partir de las curvas IDT de Córdoba Capital, correspondientes a 3 períodos de retorno (5, 10 y 25 años).

A partir de las simulaciones realizadas en EPA SWMM, se obtuvieron los valores de caudal pico (Q) para cada combinación de área, pendiente y FOS. Con esta información se definió un nuevo parámetro denominado Urban Impact (UI), desarrollado específicamente en el marco de este trabajo como una herramienta para cuantificar de manera simple el efecto de la urbanización sobre el drenaje pluvial a escala de lote.

El UI representa el incremento porcentual del caudal de escorrentía respecto al estado previo a la urbanización, y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$UI = \frac{Q - Q_0}{Q_0}$$

Donde:

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 121 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Q = caudal pico del lote urbanizado.

Q_0 = caudal pico del terreno natural (FOS = 0)

Este parámetro permite interpretar el grado de alteración hidrológica producido por el cambio en las condiciones del suelo, funcionando como un indicador cuantitativo del impacto hidrológico urbano.

Los resultados de cada simulación fueron sistematizados en planillas de cálculo, obteniéndose tanto los valores de UI como los de Q para todas las combinaciones de variables. Con estos datos se elaboraron dos familias de curvas:

- **Curvas de variación de UI en función del FOS**, que permiten visualizar el incremento relativo del impacto hidrológico asociado a la impermeabilización progresiva del lote, para los distintos tiempos de retorno analizados. A continuación, en la Figura 4.1 se adjuntan las curvas para $A = 250 \text{ m}^2$ como ejemplo.

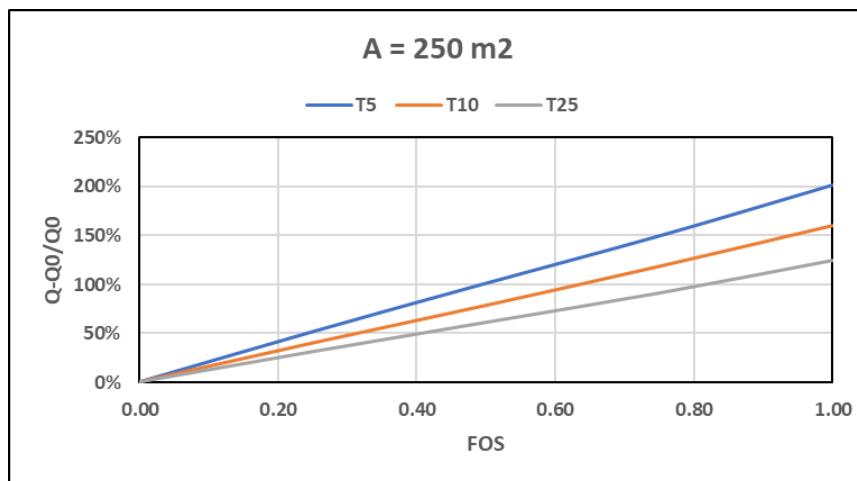


Figura 4.1 - Curvas de variación del impacto hidrológico (UI) en función del FOS para un lote de 250 m^2 , considerando distintos tiempos de retorno (T5, T10 y T25)

| | |
|--|-------------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | |



- **Curvas de variación de Q en función del FOS**, que expresan el comportamiento absoluto del caudal generado bajo distintas condiciones de ocupación, para los distintos tiempos de retorno analizados. A continuación, en la Figura 4.2 se adjuntan las curvas para $A = 250 \text{ m}^2$ como ejemplo.

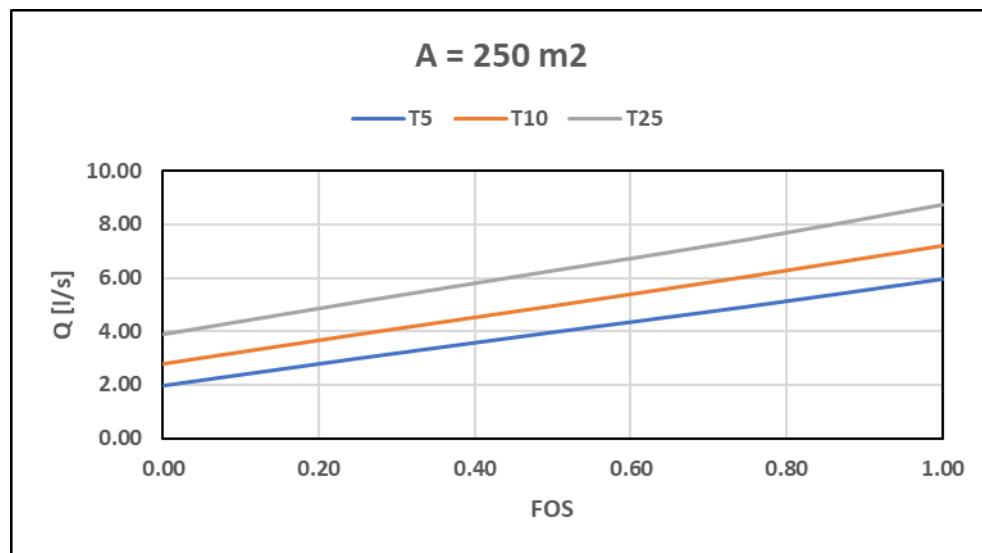


Figura 4.2 - Curvas de variación del caudal de escorrentía (Q) en función del FOS para un lote de 250 m², considerando distintos tiempos de retorno (T5, T10 y T25)

Estas curvas permitieron analizar la sensibilidad del sistema ante modificaciones en el FOS, así como comparar los resultados entre lotes de diferentes áreas y pendientes.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 123 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



4.3. Análisis de resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del procesamiento de datos luego de la modelación hidrológica mediante EPA SWMM, con el objetivo de evaluar el impacto de la urbanización sobre el escurrimiento superficial a escala de lote.

A priori se desarrolla un caso base representativo, correspondiente a un lote de 250 m², a fin de describir en detalle el procedimiento de cálculo, la obtención de las curvas características y la interpretación de los resultados obtenidos. Este caso permite ilustrar de manera clara la metodología aplicada y comprender el comportamiento hidrológico típico frente a la variación del Factor de Ocupación del Suelo (FOS). Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos para las demás superficies analizadas, los cuales se sintetizan en una tabla comparativa que permite identificar las tendencias generales para los distintos tamaños de lote y períodos de retorno considerados.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 124 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



4.3.1.Caso base: lote de 250 m²

Para ilustrar el procedimiento de modelado y análisis, se presenta a continuación el desarrollo completo del caso correspondiente a un lote de $A = 250 \text{ m}^2$, considerando un Factor de Ocupación del Suelo (FOS) variable entre 0 y 1 y tiempos de retorno (T) de 5 años con una duración de lluvia de 30 minutos correspondiente a la duración crítica determinada en el capítulo anterior.

El modelo fue implementado en EPA SWMM, configurando las condiciones de borde, las características geométricas y los parámetros de infiltración correspondientes a cada escenario, los cuales fueron previamente definidos en el apartado 4.2.

a) Configuración del modelo en EPA SWMM

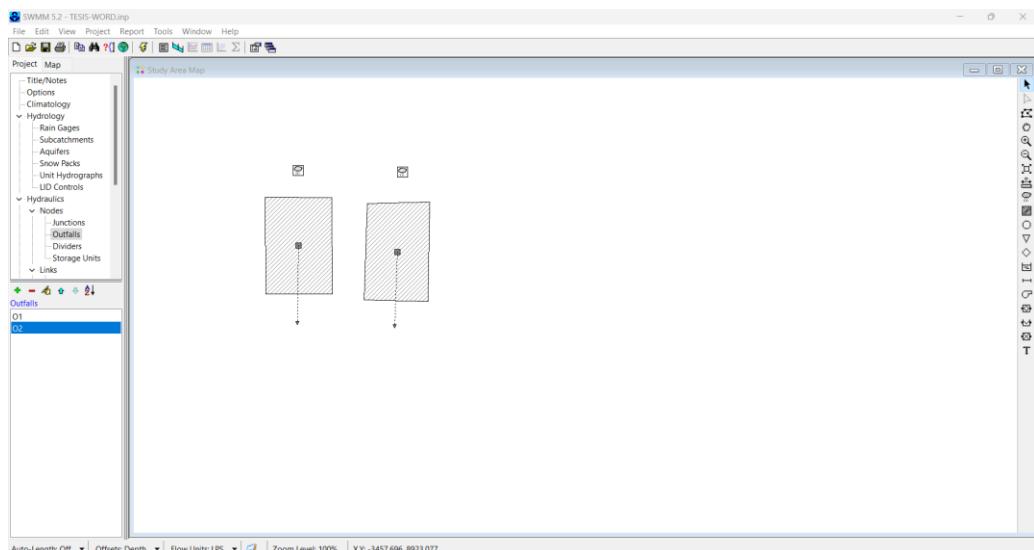


Figura 4.3 -Configuración del modelo hidrológico en EPA SWMM 5.2 para el caso base ($A = 250 \text{ m}^2$), mostrando las dos subcuencas utilizadas: una para la condición natural (Q_0) y otra para la condición urbanizada (Q) con variación del FOS

| | |
|--|-------------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | |



En la Figura 4.3 se muestra el esquema general del modelo correspondiente al caso base ($A = 250 \text{ m}^2$). El dominio de estudio se representa mediante dos *subcuencas* (cuencas) independientes, pero que representan el mismo lote:

- *Subcuenca 1 (Q_0)*: representa la condición natural o sin urbanización, con un FOS = 0, utilizado para calcular el caudal base o pre urbanización.
- *Subcuenca 2 (Q)*: representa la condición urbanizada del mismo lote, donde se varía progresivamente el FOS entre 0 y 1 con el fin de evaluar el efecto de la impermeabilización sobre el escurrimiento superficial.

Ambas subcuencas descargan en un nodo de descarga (O1 y O2, respectivamente), que actúa como punto de salida del sistema y permite registrar el caudal de escorrentía generado en cada simulación. Esta configuración facilita la comparación directa entre las condiciones natural y urbanizada bajo los mismos parámetros de lluvia, pendiente y área, aislando el efecto del FOS como variable de análisis.

A continuación, en la Figura 4.4 se presenta la ventana de propiedades configurada para la subcuenca S1, donde se detallan los parámetros geométricos e hidráulicos utilizados en el modelo.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 126 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| Subcatchment S1 | |
|-------------------|--------------|
| Property | Value |
| Name | S1 |
| X-Coordinate | -5221.010 |
| Y-Coordinate | 7775.148 |
| Description | |
| Tag | |
| Rain Gage | T=5-d=30 |
| Outlet | O1 |
| Area | 0.025 |
| Width | 10 |
| % Slope | 1 |
| % Imperv | 0 |
| N-Imperv | 0.01 |
| N-Perv | 0.025 |
| Dstore-Imperv | 0 |
| Dstore-Perv | 0 |
| %Zero-Imperv | 0 |
| Subarea Routing | OUTLET |
| Percent Routed | 100 |
| Infiltration Data | CURVE_NUMBER |
| Groundwater | NO |
| Snow Pack | |
| LID Controls | 0 |
| Land Uses | 0 |
| Initial Buildup | NONE |
| Curb Length | 0 |
| N-Perv Pattern | |
| Dstore Pattern | |
| Infil. Pattern | |

Width of overland flow path (m)

Figura 4.4 - Ventana de propiedades de la subcuenca S1 (Q_0) correspondiente a la condición natural del lote ($A = 250 \text{ m}^2$), mostrando los parámetros geométricos e hidráulicos configurados en el modelo EPA SWMM

En este caso se observa que la subcuenca S1 representa el escenario sin urbanización ($\%Imperv = 0$), es decir, completamente permeable. La superficie total es de 250 m^2 , con una pendiente del 1% y un ancho hidráulico efectivo ($Width$) de 10 m. Los coeficientes de rugosidad de Manning adoptados son $n_{perv} = 0,025$ y $n_{imperv} = 0,010$, reflejando condiciones de suelo natural con cobertura vegetal. El flujo superficial se dirige completamente hacia el nodo de salida O1.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 127 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



S1 se encuentra vinculado al pluviógrafo “T=5-d=30”, correspondiente al evento de diseño de 5 años de período de retorno y 30 minutos de duración. Esta lluvia de diseño se asoció a una configuración en el módulo *Rain Gage* del programa EPA SWMM, en el que se cargaron los valores de intensidad de lluvia derivados de las curvas IDF locales mediante el método del bloque alterno, de modo de reproducir la distribución temporal del evento. Esta configuración se observa en la Figura 4.5.

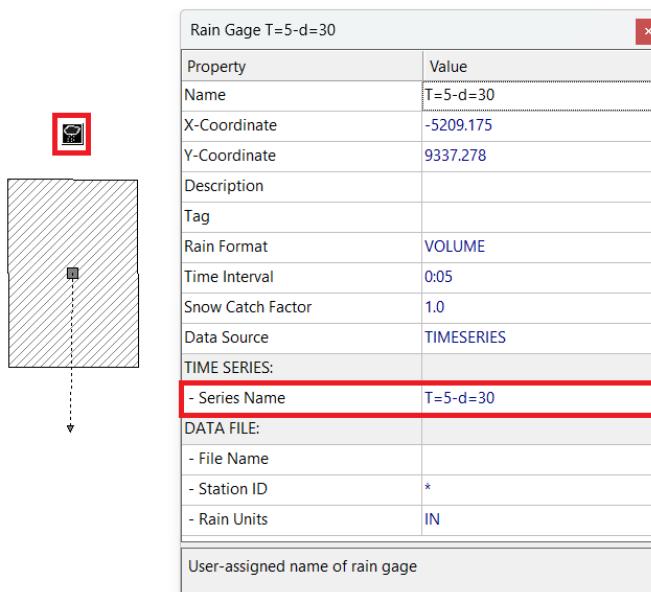


Figura 4.5 - Configuración de la tormenta (Rain Gage) en EPA SWMM 5.2, vinculado a la serie temporal T=5-d=30 correspondiente al evento de diseño con T = 5 años y duración de 30 minutos

Los valores de intensidad fueron ingresados manualmente en el módulo *Time Series Editor* de *EPA SWMM*, como se observa en la Figura 4.6.

| | |
|--|-------------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | |

Figura 4.6 - Ventana del módulo Time Series Editor en EPA SWMM 5.2, mostrando los valores de intensidad de lluvia (mm/h) ingresados para el evento de diseño $T = 5$ años y duración $d = 30$ min

El hietograma resultante (Figura 4.7) muestra la variación temporal de la intensidad durante el evento, con un pico máximo de 7,2 mm/h a los 15 minutos, reflejando la distribución característica del bloque alterno. Este registro fue luego asignado al pluviógrafo del modelo para forzar las condiciones de lluvia sobre las subcuenas.

Cabe destacar que, además de esta lluvia de diseño ($T = 5$ años, $d = 30$ min), se analizaron también los eventos correspondientes a $T = 10$ años y $T = 25$ años, manteniendo la misma duración de 30 minutos. Sin embargo, estos casos se presentarán más adelante en el resumen comparativo de resultados, mientras que en esta sección se desarrolla en detalle únicamente el caso base para fines ilustrativos.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 129 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

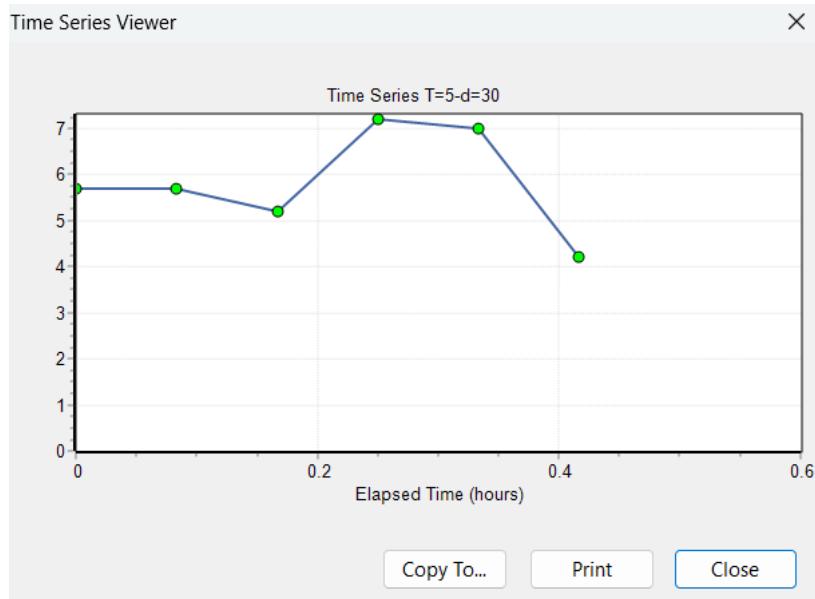


Figura 4.7 - Hietograma de lluvia de diseño correspondiente al evento $T = 5$ años y duración $d = 30$ min, generado en el módulo Time Series Viewer de EPA SWMM

La infiltración se modeló mediante el método del *Curve Number* (CN), seleccionado por su adecuada representación de las condiciones de escurrimiento en áreas urbanas con distintos grados de ocupación. Este método permite estimar la abstracción inicial y la capacidad de infiltración del suelo a partir de un parámetro adimensional (CN), que depende del tipo de suelo, el uso del suelo y la humedad antecedente.

Para el caso base, se adoptó un valor $CN = 70$ tanto para $S1 (Q_0)$ como para $S2 (Q)$. Esa configuración se observa en la Figura 4.8. De esta manera, se mantuvieron constantes las condiciones de infiltración del suelo en ambas simulaciones, de modo que las diferencias en los resultados se deban exclusivamente a la variación del Factor de Ocupación del Suelo (FOS) y no a cambios en las propiedades del terreno.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 130 de 273 |
| <p>DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

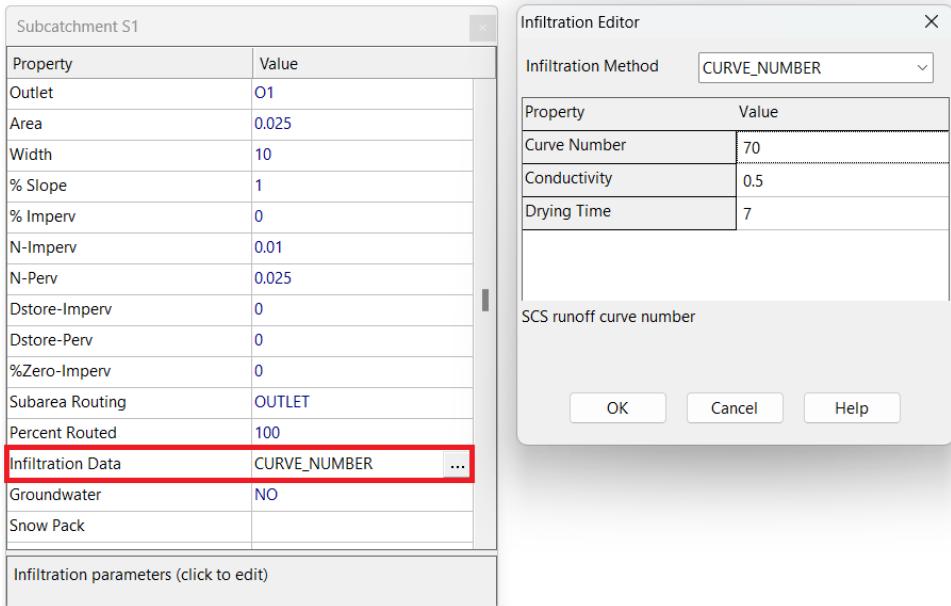


Figura 4.8 -Configuración del método de infiltración Curve Number en EPA SWMM 5.2, mostrando los parámetros utilizados en la simulación del caso base ($A = 250 \text{ m}^2$, CN = 70)

El modelo considera además una profundidad de almacenamiento superficial nula (0 mm), tanto para las áreas permeables como impermeables, con el fin de aislar el efecto del FOS sobre el escurrimiento superficial. Esta configuración permite evaluar de manera directa la relación entre el aumento de la impermeabilización y la respuesta hidrológica del lote.

En cuanto a la ventana de propiedades de S2 (Q), se mantuvieron las mismas características geométricas, hidráulicas e hidrológicas que en el caso S1, garantizando la consistencia entre ambos casos. La única diferencia radica en la variación del porcentaje de área impermeable (%Imperv), que se modificó en cada simulación de acuerdo con el Factor de Ocupación del Suelo (FOS) definido para el análisis. Estas variaciones se observan en la Figura 4.9. De esta manera, se evaluó de forma controlada la influencia del incremento

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 131 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



progresivo del FOS sobre el caudal de escorrentía generado (Q), manteniendo invariables todas las demás condiciones del modelo.

| Subcatchment S2 | |
|---------------------------------|--------------|
| Property | Value |
| Name | S2 |
| X-Coordinate | -3040.932 |
| Y-Coordinate | 7575.362 |
| Description | |
| Tag | |
| Rain Gage | T=5-d=30 |
| Outlet | O2 |
| Area | 0.025 |
| Width | 10 |
| % Slope | 1 |
| % Imperv | 25 |
| N-Imperv | 0.01 |
| N-Perv | 0.025 |
| Dstore-Imperv | 0 |
| Dstore-Perv | 0 |
| %Zero-Imperv | 0 |
| Subarea Routing | OUTLET |
| Percent Routed | 100 |
| Infiltration Data | CURVE_NUMBER |
| Groundwater | NO |
| Snow Pack | |
| LID Controls | 0 |
| Land Uses | 0 |
| Initial Buildup | NONE |
| Curb Length | 0 |
| N-Perv Pattern | |
| Dstore Pattern | |
| Infil. Pattern | |
| Width of overland flow path (m) | |

Figura 4.9 - Ventana de propiedades de S2 (Q), donde se observa la variación del porcentaje de área impermeable (%Imperv) utilizada para representar los distintos valores de FOS en el análisis

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 132 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



b) Hidrogramas de escorrentía y resultados del modelo

Una vez configuradas las condiciones del modelo, se realizaron las simulaciones hidrológicas correspondientes para el lote de $A = 250 \text{ m}^2$ variando en S2 el Factor de Ocupación del Suelo (FOS), o equivalentemente $\%Imperv$ en el EPA SWMM, en $0,10 - 0,25 - 0,50 - 0,75 - 1,00$. Estas variaciones se observan en las propiedades de la Figura 4.10.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 133 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

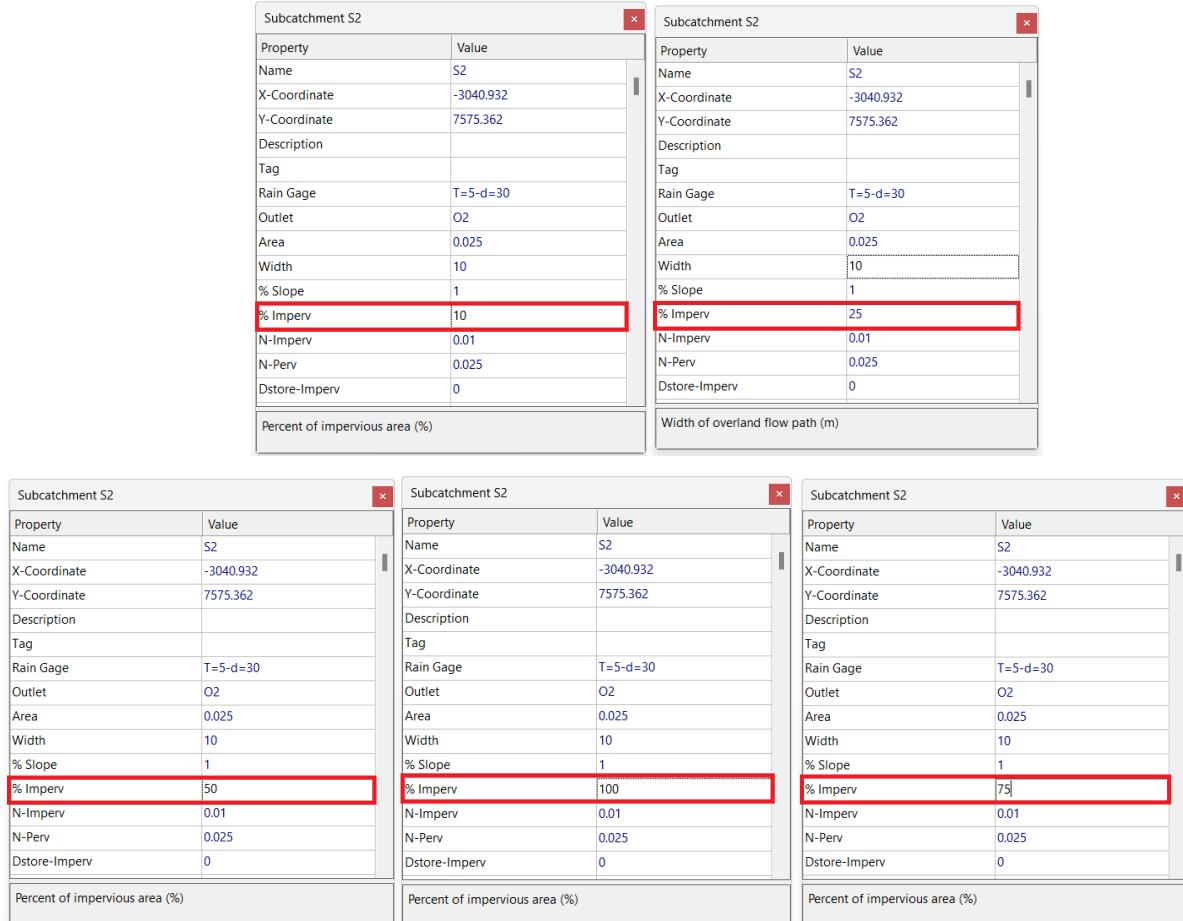


Figura 4.10 - Configuración de S2 (Q) en EPA SWMM 5.2, mostrando la variación del porcentaje de área impermeable (%Imperv) utilizada para representar los distintos valores del Factor de Ocupación del Suelo (FOS) en las simulaciones (10 %, 25 %, 50 %, 75%, 100 %)

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 134 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Para cada variación de %*Imperv* se inició una simulación distinta y se observaron los resultados obtenidos. A continuación, se presenta el resultado de una de las simulaciones en la Figura 4.11, donde se comparan las principales variables hidrológicas entre el S1 (FOS = 0 %) y S2 (FOS = 50 %).

| Subcatchment | Total Precip mm | Total Runon mm | Total Evap mm | Total Infil mm | Imperv Runoff mm | Perv Runoff mm | Total Runoff mm | Total Runoff 10^6 ltr | Peak Runoff LPS | Runoff Coeff |
|--------------|-----------------|----------------|---------------|----------------|------------------|----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|--------------|
| S1 | 35.00 | 0.00 | 0.00 | 27.45 | 0.00 | 7.55 | 7.55 | 0.00 | 1.98 | 0.216 |
| S2 | 35.00 | 0.00 | 0.00 | 13.48 | 17.54 | 4.02 | 21.56 | 0.01 | 3.98 | 0.616 |

Figura 4.11 - Resultados del modelo hidrológico en EPA SWMM 5.2 para S1 (FOS = 0 %) y S2 (FOS = 50 %), mostrando los valores comparativos de infiltración, escorrentía y caudal pico

Puede observarse que, manteniendo la misma precipitación total (35 mm), la infiltración disminuye notablemente al aumentar el FOS, pasando de 27,45 mm en el caso natural a 13,48 mm en el escenario urbanizado. En consecuencia, el volumen total de escorrentía se incrementa de 7,55 mm a 21,56 mm, lo que representa un aumento de casi tres veces respecto a la condición sin impermeabilización. Asimismo, el caudal pico (*Peak Runoff*) muestra un incremento de 1,98 L/s a 3,98 L/s, evidenciando la aceleración en la respuesta del sistema y la reducción del tiempo de concentración. El coeficiente de escorrentía (*Runoff Coeff.*) también aumenta de 0,216 a 0,616, indicando una menor capacidad de infiltración y mayor generación de flujo superficial.

Estos resultados confirman la relación directa entre el incremento del FOS y el aumento del caudal de escorrentía, tendencia que se mantiene en todos los escenarios simulados y que será analizada de forma integral en el apartado siguiente, mediante las curvas Q–FOS y UI–FOS.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 135 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Como información complementaria a la tabla, la comparación de los hidrogramas correspondientes a S1 (condición natural) y S2 (escenario con FOS = 50%) se muestra en la Figura 4.12. En ella se observa un aumento significativo del caudal pico y una reducción del tiempo al pico al incrementarse el grado de impermeabilización del lote. Mientras que en la condición natural (S1) el caudal máximo alcanza aproximadamente 1,98 L/s, en el escenario urbanizado (S2) se eleva hasta 3,98 L/s, duplicando prácticamente la magnitud del flujo superficial. Asimismo, el área bajo la curva —representativa del volumen total de escorrentía— también se incrementa notablemente, evidenciando una menor capacidad de infiltración y retención.

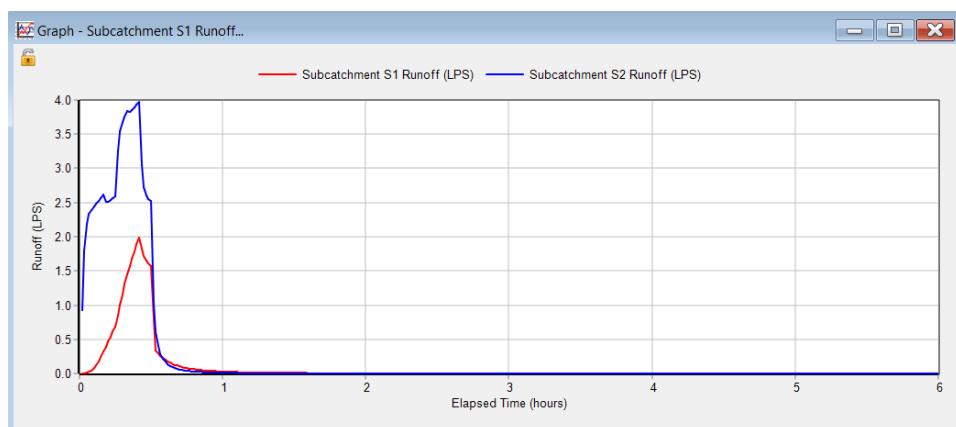


Figura 4.12 - Hidrogramas de escorrentía superficial obtenidos para S1 (FOS = 0%) y S2 (FOS = 50%) – Caso base A = 250 m², T = 5 años. Se observa el aumento del caudal pico y la reducción del tiempo de concentración con el incremento del FOS

Los resultados se registraron en planillas de cálculo, lo que permitió construir diferentes curvas donde se representaba de manera visual las variaciones interpretadas del programa. Si bien el caso base desarrollado en el apartado anterior (FOS = 50%) permitió analizar en detalle el comportamiento hidrológico del lote y comprender el procedimiento de modelado, dicho escenario representa un único punto dentro de las curvas de variación Q–

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 136 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



FOS y UI-FOS. Para construir las curvas completas, fue necesario repetir el proceso de simulación en EPA SWMM variando sistemáticamente el Factor de Ocupación del Suelo (FOS) desde 0,00 hasta 1,00, manteniendo constantes las demás condiciones del modelo (geometría, pendiente, parámetros de infiltración y evento de lluvia).

Cada simulación generó un valor de caudal de escorrentía (Q) asociado a un determinado FOS, lo que permitió obtener la evolución del caudal absoluto y del impacto hidrológico relativo ($UI = Q/Q_0$) en función del grado de impermeabilización. A partir de los resultados obtenidos, se elaboraron en planillas de cálculo las curvas de variación del caudal (Q) y del impacto hidrológico (UI) para los tres períodos de retorno considerados ($T = 5, 10$ y 25 años). Estas curvas representadas en la Figura 4.13 y Figura 4.14 resumen la respuesta hidrológica del lote de $A = 250 \text{ m}^2$ ante distintos niveles de ocupación del suelo y constituyen la representación sintética del proceso modelado.

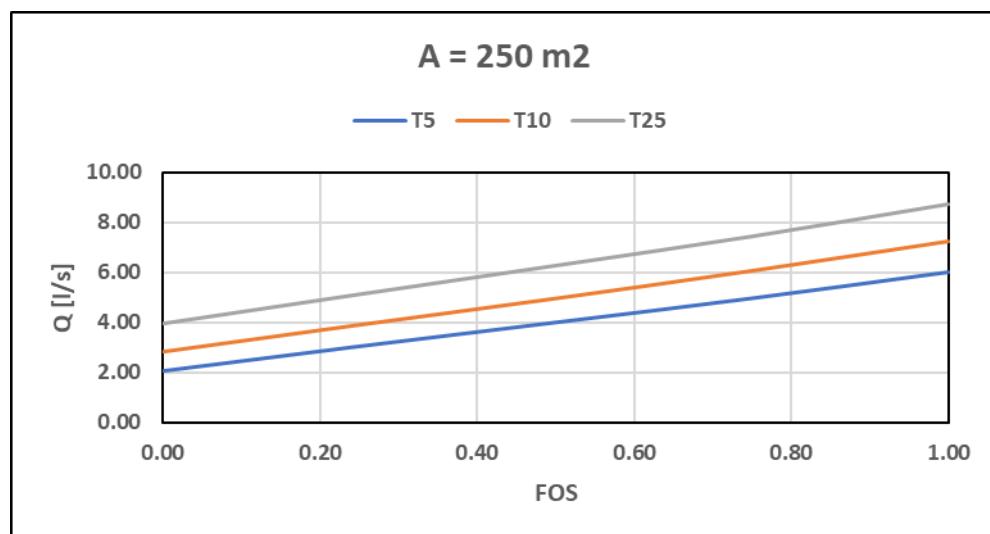


Figura 4.13 - Curvas de variación del caudal de escorrentía (Q) en función del FOS para el lote de $A = 250 \text{ m}^2$, considerando los períodos de retorno T5, T10 y T25

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 137 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

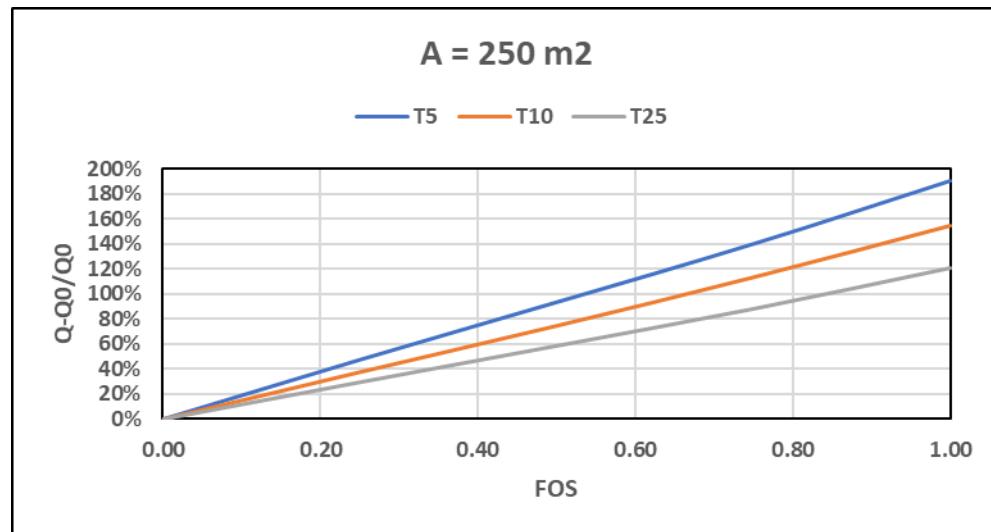


Figura 4.14 - Curvas de variación del impacto hidrológico relativo ($UI = Q/Q_0$) en función del FOS para el lote de $A = 250 \text{ m}^2$, considerando los períodos de retorno T5, T10 y T25

De las figuras se observa que, a medida que aumenta el FOS, el caudal de escorrentía crece de manera prácticamente lineal, mientras que el impacto hidrológico relativo muestra una tendencia de tipo logarítmica. Esto evidencia que los incrementos iniciales del FOS producen aumentos significativos en el caudal, pero al alcanzar niveles altos de impermeabilización, el crecimiento del UI se atenúa debido a la pérdida casi total de infiltración.

En síntesis, el análisis desarrollado para el caso base permitió validar el procedimiento de modelado y establecer la relación entre el Factor de Ocupación del Suelo (FOS) y la respuesta hidrológica del lote. A partir de la comparación entre S1 (FOS = 0%) y S2 (FOS = 50%), se comprobó que el incremento del FOS produce un aumento significativo en el caudal pico, una reducción en el tiempo de concentración y una disminución de la infiltración total, efectos que se intensifican conforme crece la impermeabilización de la superficie. En

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 138 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



definitiva, los resultados obtenidos en esta etapa constituyen la base metodológica para el análisis de los restantes escenarios, que consideran distintas superficies de lote y diferentes períodos de retorno ($T = 5, 10$ y 25 años), y, por ende, lluvias de diseño.

4.3.2. Resultados generales y análisis comparativo

Una vez validado el procedimiento mediante el caso base, se aplicó la misma metodología de modelado y procesamiento de datos a las demás superficies de lote analizadas ($A = 360, 500, 1000, 2000$ y 5000 m^2) y a los distintos períodos de retorno ($T = 5, 10$ y 25 años). Para cada combinación de área y tiempo de retorno se realizaron simulaciones sucesivas en EPA SWMM, variando el Factor de Ocupación del Suelo (FOS) desde $0,00$ hasta $1,00$, con incrementos de $0,25$. A partir de los resultados obtenidos, se calcularon los valores relativos de impacto hidrológico $UI = (Q - Q_0) / Q_0$, los cuales fueron sistematizados en planillas de cálculo y utilizados para la elaboración de las curvas comparativas.

En todos los casos se mantuvieron fijas las condiciones del modelo definidas en el caso base, incluyendo los parámetros de infiltración (método Curve Number, $CN = 70$), la rugosidad superficial, el formato del hietograma (bloque alterno con duración de 30 minutos) y la configuración general del sistema. Por otro lado, la pendiente se varió en $0,1\%$, $0,5\%$, 1% y 2% . De este modo, las alteraciones observadas en los resultados responden exclusivamente a los cambios en el FOS y en la superficie del lote, garantizando la consistencia del análisis comparativo.

La Figura 4.15, Figura 4.16 y Figura 4.17 muestran las curvas de variación del impacto hidrológico (UI) en función del FOS para los distintos tamaños de lote y para cada período de retorno considerado ($T = 5, 10$ y 25 años). Estas curvas permiten observar la evolución del

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 139 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



incremento relativo del caudal de escorrentía con el aumento de la impermeabilización y visualizar las diferencias de comportamiento hidrológico entre los lotes de distinta superficie.

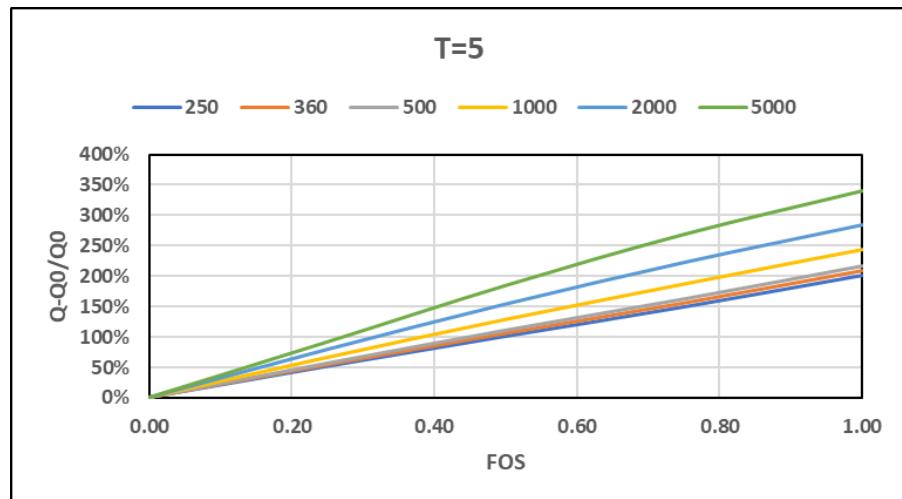


Figura 4.15 - Curvas de variación del impacto hidrológico ($UI = Q/Q_0$) en función del FOS para distintos tamaños de lote, correspondientes al período de retorno $T = 5$ años

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 140 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

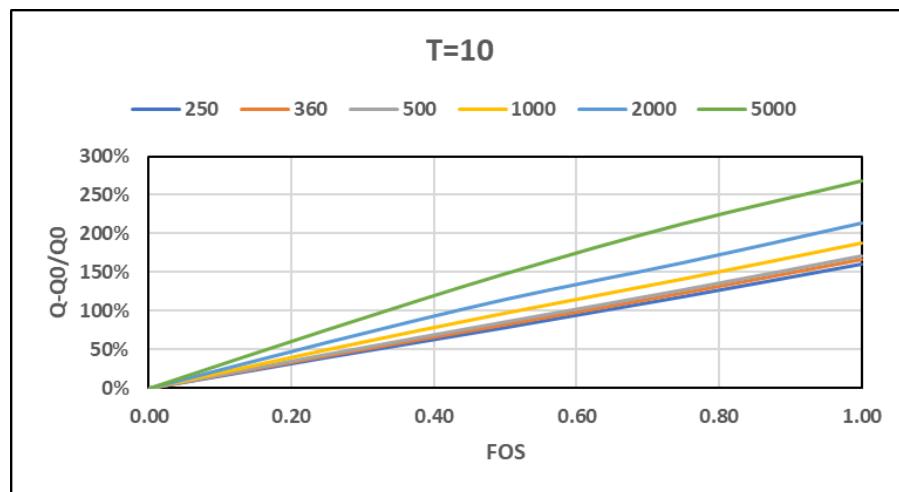


Figura 4.16 - Curvas de variación del impacto hidrológico ($UI = Q/Q_0$) en función del FOS para distintos tamaños de lote, correspondientes al período de retorno $T = 10$ años

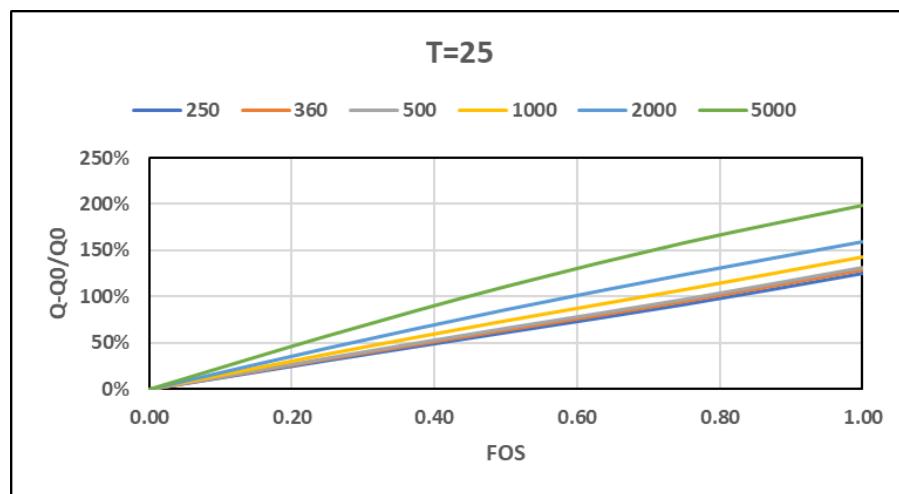


Figura 4.17 - Curvas de variación del impacto hidrológico ($UI = Q/Q_0$) en función del FOS para distintos tamaños de lote, correspondientes al período de retorno $T = 25$ años

| | |
|--|-------------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | |



Los resultados muestran que la relación entre el FOS y el UI presenta una tendencia directamente proporcional, evidenciando que a medida que aumenta el grado de ocupación del suelo, el caudal de escorrentía se incrementa de forma sostenida. Este comportamiento refleja que el incremento del FOS produce un aumento casi uniforme en el impacto hidrológico, dado que la reducción progresiva de áreas permeables disminuye la capacidad del terreno para infiltrar y almacenar el agua de lluvia, generando mayores volúmenes y picos de escorrentía superficial.

Asimismo, puede apreciarse que, para un mismo valor de FOS, los lotes de mayor superficie (5000 m^2 y 2000 m^2) presentan valores de UI más elevados, lo cual indica que el efecto acumulativo del escurrimiento es más significativo en terrenos amplios, donde los volúmenes absolutos generados son mayores. En contraste, los lotes pequeños (250 a 500 m^2) muestran una respuesta más moderada, aunque mantienen la misma tendencia general.

Por otro lado, al incrementar el período de retorno (T), las curvas muestran una ligera disminución de la pendiente relativa, lo que sugiere que el efecto de la urbanización tiende a ser más notorio en eventos de menor magnitud ($T = 5$ años), mientras que en lluvias más intensas o extremas ($T = 25$ años) el peso relativo del FOS sobre el caudal total disminuye, dado que el volumen de escorrentía global domina el proceso.

En conjunto, los resultados gráficos confirman la validez y utilidad del parámetro UI (Urban Impact) como un indicador práctico y representativo del impacto hidrológico de la urbanización. Su comportamiento coherente frente a distintas áreas y recurrencias demuestra que puede emplearse como una herramienta comparativa de evaluación del efecto de la impermeabilización a escala de lote, aportando criterios técnicos objetivos para el diseño y control de drenaje urbano sostenible.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 142 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Una vez obtenidas y analizadas las curvas de variación del caudal (Q) y del impacto hidrológico (UI) para las distintas áreas de lote y períodos de retorno, se procedió a sintetizar los resultados mediante expresiones analíticas de ajuste. El objetivo de esta etapa es representar de manera matemática el comportamiento observado en los modelos, permitiendo estimar los valores de Q_0 y UI en función de las variables más influyentes: el Factor de Ocupación del Suelo (FOS), la superficie del lote (A) y el tiempo de retorno (T).

Estas ecuaciones constituyen una herramienta práctica para la evaluación rápida del impacto hidrológico de la urbanización, sin necesidad de realizar simulaciones completas en SWMM, y facilitan la aplicación de los resultados del estudio a distintos contextos urbanos.

A continuación, en el apartado siguiente, se presentan los ajustes obtenidos para las variables Q_0 y UI, junto con el procedimiento adoptado para la determinación de los parámetros de regresión y la validación estadística de los modelos propuestos.

4.4. Ajuste de ecuaciones

Como etapa final del análisis, se desarrollaron expresiones matemáticas de ajuste a partir de los resultados obtenidos en las simulaciones, que permiten estimar de manera sencilla tanto el caudal pre urbanización (Q_0) como el impacto urbano (UI) de un lote, a partir de variables fácilmente estimadas, de tal manera de poder cuantificar ambas variables a partir de una ecuación simplificada, la cual nos dé rápidamente una idea tanto del caudal pre urbanización como del post desarrollo urbano del lote.

El objetivo de este desarrollo fue traducir los resultados de las simulaciones numéricas en herramientas de aplicación práctica, accesibles para técnicos, municipios o propietarios

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 143 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



particulares, sin necesidad de recurrir a programas de modelación hidrológica como EPA SWMM.

Estas expresiones constituyen un aporte central del trabajo, ya que permiten evaluar el impacto hidrológico de una obra en su propio lote, algo que hasta el momento no contaba con una metodología simplificada a nivel local. De esta manera, cualquier usuario puede conocer el caudal que genera su parcela y cómo este varía en función del grado de ocupación (FOS), de la intensidad de lluvia y de la pendiente del terreno. Para esto, se ingresaron los resultados de las 80 simulaciones para estimar el Q_0 , y 290 simulaciones para estimar el UI, en un software de ajuste estadístico y a continuación se presentan los principales resultados alcanzados.

- **Expresión para el caudal pre urbanización (Q_0)**

El primer ajuste se realizó para el caudal pre urbanización del lote (Q_0), en función del área (A), la intensidad de lluvia (I) y la pendiente (S).

El modelo se obtuvo mediante una regresión múltiple logarítmica utilizando el software en línea StatsKingdom, resultando en la siguiente ecuación general:

$$\ln(Q_0) = -4.669172 + 0.855676\ln(A) + 2.005455\ln(I) + 0.149267\ln(S)$$

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 144 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Donde:

Q_0 es el caudal natural del lote [l/s]

A es el área del lote [m^2]

I es la intensidad de precipitación [mm/h]

S es la pendiente media del terreno [%]

Y su forma potencial equivalente:

$$Q_0 = 0.00938003 \cdot A^{0.855676} \cdot I^{2.005455} \cdot S^{0.149267}$$

Esta relación presenta un coeficiente de determinación $R^2 = 0.997$, lo cual evidencia una excelente correspondencia entre los valores observados y los estimados.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 145 de 273 |
| <p>DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

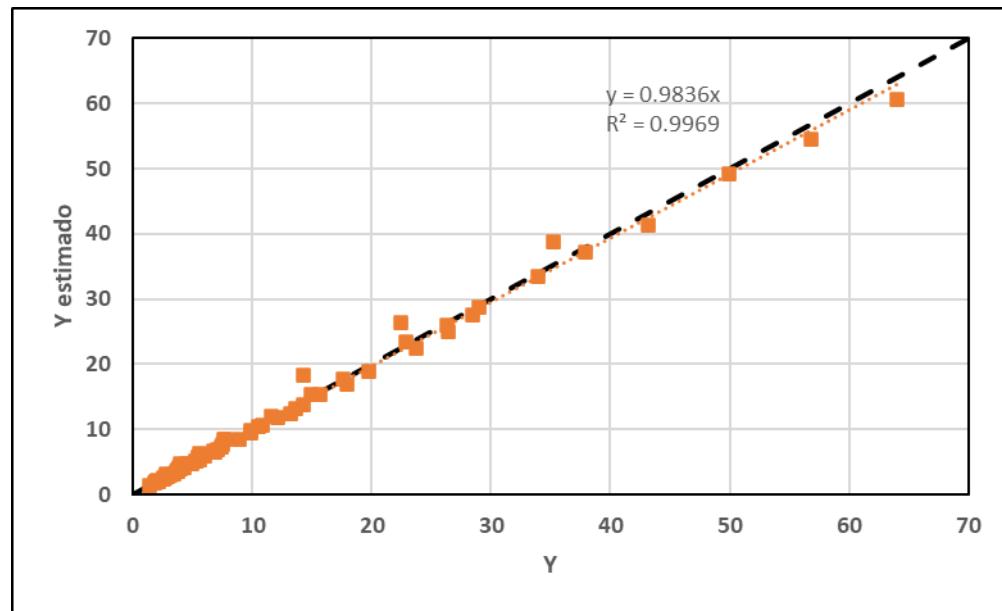


Figura 4.18 - Relación entre los valores observados y estimados del caudal pre urbanización (Q_0) obtenida a partir del modelo de regresión múltiple logarítmica.

En la Figura 4.18 se muestra la comparación entre los valores simulados y los calculados mediante la expresión obtenida. Los puntos se alinean prácticamente sobre la recta identidad ($Y = X$), lo que indica una muy buena precisión del modelo y una mínima dispersión de los datos. Esta verificación confirma que la expresión ajustada reproduce adecuadamente los resultados del programa EPA SWMM, pudiendo utilizarse para estimar caudales naturales en lotes de distintas características geométricas.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 146 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



- **Expresión para el parámetro Urban Impact (UI)**

El segundo ajuste corresponde al parámetro Urban Impact (UI), desarrollado en este trabajo como un indicador propio que representa el incremento relativo del caudal provocado por la urbanización. Para su determinación, se consideraron como variables independientes el área (A), el Factor de Ocupación del Suelo (FOS), la intensidad de lluvia (I) y la pendiente (S).

La ecuación ajustada resultó:

$$\ln(UI) = 7.468502 + 0.204822\ln(A) + 0.952531\ln(FOS) - 1.425798\ln(I) - 0.21032\ln(S)$$

Donde:

Q_0 es el caudal natural del lote [L/s]

A es el área del lote [m^2]

I es la intensidad de precipitación [mm/h]

S es la pendiente media del terreno [%]

Con su forma potencial equivalente:

$$UI = 1751.980283 \cdot A^{0.204822} \cdot FOS^{0.952531} \cdot I^{-1.425798} \cdot S^{-0.21032}$$

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 147 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

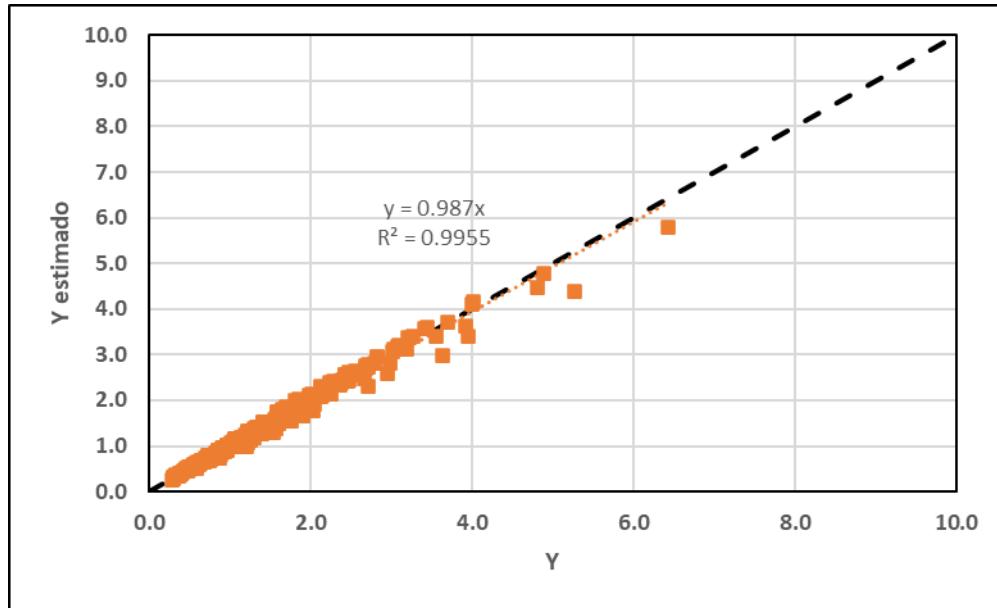


Figura 4.19 - Relación entre los valores observados y estimados del parámetro Urban Impact (UI) obtenida a partir del modelo de regresión múltiple logarítmica

En la Figura 4.19, se muestra la comparación entre los valores simulados (Y) y los estimados (\hat{Y}) mediante la expresión ajustada. La alta correlación observada ($R^2 = 0.9955$) y la alineación de los puntos en torno a la recta identidad ($Y = X$) confirman la confiabilidad del modelo y la precisión del ajuste. Esto demuestra que la expresión obtenida representa adecuadamente la variación del UI frente a los cambios en el FOS, el tamaño del lote, la pendiente y el período de retorno.

| | |
|--|-------------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | |



4.5. Aplicabilidad práctica del modelo

Ambas expresiones —para Q_0 y UI— fueron elaboradas con el propósito de simplificar la evaluación del impacto hidrológico urbano a escala de lote. Su gran valor radica en que emplean variables de fácil determinación (área, pendiente, intensidad de lluvia y FOS), permitiendo estimar resultados confiables sin necesidad de conocimientos técnicos avanzados ni software especializado.

Con estas herramientas, un usuario puede determinar:

- el caudal natural (Q_0) que genera su terreno en estado pre desarrollo urbano, y
- el incremento de caudal (UI) que producirá su proyecto al urbanizarlo.

Esto posibilita evaluar de forma inmediata el impacto que cada obra genera en su entorno y valorar la necesidad de incorporar medidas de mitigación como tanques de retardo o sistemas de infiltración. La accesibilidad de estas fórmulas convierte este desarrollo en un aporte original y socialmente útil, alineado con los principios de sostenibilidad y responsabilidad urbana. El modelo desarrollado no sólo simplifica la estimación hidrológica, sino que acerca la gestión del agua al ciudadano común, permitiendo decisiones más informadas y responsables en materia de drenaje urbano.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 149 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



4.6. Comentarios del capítulo

El desarrollo del presente capítulo permitió cuantificar de forma precisa el impacto hidrológico de la urbanización a escala de lote, analizando la relación entre el área, el Factor de Ocupación del Suelo (FOS), la pendiente del terreno y el período de retorno. A partir de las simulaciones realizadas con el programa EPA SWMM, se verificó que el incremento del FOS genera un aumento sostenido y proporcional del caudal de escorrentía. Esto evidencia que, a medida que se incrementa el grado de impermeabilización del terreno, el impacto hidrológico crece de forma prácticamente lineal, debido a la reducción progresiva de la capacidad de infiltración y almacenamiento del lote, lo que se traduce en mayores volúmenes y picos de escorrentía superficial.

Con base en los resultados obtenidos, se propusieron dos expresiones empíricas de ajuste que constituyen una de las principales contribuciones del trabajo. La primera permite estimar el caudal natural (Q_0) del lote en función del área, la intensidad de lluvia y la pendiente; mientras que la segunda define el parámetro Urban Impact (UI), desarrollado en este Trabajo Final como un indicador propio e innovador, que cuantifica el aumento relativo del caudal provocado por la urbanización. Ambas ecuaciones fueron validadas mediante análisis estadístico, obteniendo coeficientes de determinación superiores a $R^2 = 0.99$, lo que demuestra su alta confiabilidad y capacidad predictiva. La verificación a través de la función identidad (Y estimado vs. Y real) evidenció una excelente correlación entre los valores simulados y los calculados, con una mínima dispersión de datos.

Más allá de su exactitud técnica, el valor más relevante de estas expresiones radica en su simplicidad y aplicabilidad práctica. Los modelos propuestos pueden ser utilizados por usuarios no especializados, como vecinos, técnicos municipales o desarrolladores urbanos,

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 150 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



para estimar el impacto que una obra genera sobre el sistema de drenaje, y evaluar la necesidad de incorporar medidas de mitigación o retardo. Esta característica representa un avance significativo hacia la democratización del conocimiento hidrológico, ya que permite trasladar herramientas de análisis técnico al ámbito ciudadano, fomentando una gestión urbana más participativa y responsable.

En síntesis, el capítulo consolida un modelo de evaluación hidrológica simplificado, validado y accesible, que podría integrarse en futuras normativas municipales o guías de diseño sostenible. El parámetro UI (Urban Impact) y las expresiones derivadas constituyen un aporte concreto hacia el objetivo de alcanzar el impacto hidrológico nulo a nivel de lote, fortaleciendo la planificación urbana desde un enfoque técnico, ambiental y socialmente comprometido.

En función de los resultados alcanzados y del incremento comprobado del caudal de escorrentía con el aumento del FOS, surge la necesidad de evaluar medidas de mitigación que permitan compensar los efectos de la impermeabilización y restablecer las condiciones hidrológicas previas a la urbanización. Entre las alternativas posibles, los tanques retardadores o de retención a escala de lote se presentan como una herramienta eficiente y de fácil implementación para almacenar temporalmente el excedente de escurrimiento, liberándolo gradualmente hacia el sistema pluvial.

En el capítulo siguiente se desarrolla el análisis del comportamiento hidráulico de los tanques retardadores, explorando su capacidad de regulación frente a distintos volúmenes de lluvia y niveles de ocupación del suelo. Se aplican las expresiones obtenidas en este trabajo para estimar los caudales de diseño y dimensionar los volúmenes de almacenamiento requeridos, con el objetivo de avanzar hacia el principio de impacto hidrológico nulo a nivel de lote.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 151 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Capítulo 5. Evaluación de la implementación de tanques retardadores a nivel de lote

A continuación, en el presente capítulo se desarrollará la evaluación de la implementación de tanques retardadores a nivel de lote, con el propósito de analizar su efectividad hidráulica como medida de control frente al aumento de caudales producido por la urbanización. Este estudio forma parte del enfoque de drenaje urbano sostenible y busca cuantificar en qué medida estas estructuras pueden contribuir a alcanzar un impacto hidrológico nulo o, al menos, una reducción significativa del caudal post-obra.

5.1. Introducción

En este capítulo se evalúa la efectividad hidráulica de los tanques retardadores a nivel de lote, analizando su capacidad para reducir los caudales pico generados por la urbanización y mitigar el impacto hidrológico sobre la red pluvial urbana. El objetivo principal fue determinar el volumen mínimo (V_{min}) del tanque que permita minimizar el impacto hidrológico de la urbanización del lote.

El estudio se desarrolló mediante simulaciones en el programa EPA SWMM, modelando el comportamiento hidrológico de lotes individuales con distintas superficies y grados de impermeabilización. Se analizaron áreas de 250, 360, 500, 750, 1000 y 2000 m², combinadas con valores de FOS = 0.10, 0.25, 0.50, 0.75 y 1.00. Cada escenario fue evaluado considerando las condiciones locales representativas de la ciudad de Córdoba, con pendiente media del 1%, número de curva CN = 70, coeficientes de rugosidad de Manning $n_{imper} =$

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 152 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



0.010 y $n_{perm} = 0.025$, forma característica L/W = 2.5, duración de lluvia crítica de 30 minutos y período de retorno de 5 años.

La decisión de trabajar con un período de retorno de 5 años responde a criterios de diseño hidráulico aplicables a sistemas de drenaje a escala de lote. Este valor representa eventos de lluvia ordinarios y recurrentes, para los cuales resulta pertinente evaluar la eficacia de los tanques retardadores sin incurrir en sobredimensionamientos. En casos de precipitaciones más intensas —asociadas a períodos de retorno mayores—, creemos que los volúmenes requeridos serían significativamente más altos, lo que resultaría inviable en términos constructivos y económicos. Asimismo, este enfoque se alinea con la práctica habitual en drenaje urbano sostenible, donde las obras de retardo en origen se diseñan para controlar los caudales generados por lluvias frecuentes, contribuyendo a la reducción del impacto acumulado sobre la red pluvial y a la gestión integral del escurrimiento urbano.

5.2. Principio de funcionamiento del tanque

El tanque retardador se plantea como un sistema de almacenamiento temporal de escorrentía, diseñado para retrasar y atenuar el caudal pico generado durante eventos de lluvia. El principio de funcionamiento consiste en interceptar parte del escurrimiento superficial que normalmente descargaría directamente al conducto público, almacenarlo por un breve período y liberarlo gradualmente mediante un conducto de descarga controlado.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 153 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Lo que en este Trabajo Final se propone es lo siguiente. Durante una lluvia, el agua proveniente del lote ingresa primero a una cámara de inspección (nodo principal). Desde allí, el flujo se divide en dos ramales:

- Ramal directo (C1): conduce parte del caudal directamente hacia la calle.
- Ramal hacia el tanque (C2): deriva un porcentaje del flujo hacia el tanque enterrado.

El tanque, de 1 m de profundidad, se simula completamente enterrado y equipado con un descargador de fondo (C3) de Ø¾", que impulsa el agua nuevamente al sistema principal mediante una bomba controlada por flotante. El esquema hidráulico del modelo implementado se presenta en la Figura 5.1.

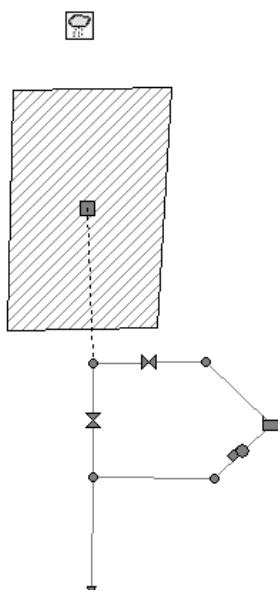


Figura 5.1 - Esquema hidráulico del modelo con tanque retardador implementado en EPA SWMM

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 154 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



El flotante actúa con histéresis de nivel:

- Cierra la entrada al tanque cuando la lámina alcanza 0.90 m,
- Reabre al descender a 0.75 m.

De esta manera, se evita el sobrelleñado y se mantiene un volumen útil de regulación. El flujo que se libera del tanque es más lento y controlado, logrando reducir el pico instantáneo que llega a la red pública. El principio general puede resumirse como: “Almacenar parte del caudal máximo y liberarlo de forma retardada, reduciendo el impacto del lote sobre la red urbana.

5.3. Variables analizadas

Las variables analizadas se agrupan en dos categorías:

- a) Variables del lote, que definen la condición de entrada al modelo;
- b) Variables del modelo hidráulico, que configuran el comportamiento interno del sistema.

5.3.1. Variables del lote

- **Área del lote (A):** 250, 360, 500, 750, 1000 y 2000 m².
- **Factor de Ocupación del Suelo (FOS):** 0.10, 0.25, 0.50, 0.75 y 1.00.
- **Pendiente media:** 1%.
- **Número de Curva (CN):** 70.
- **Forma característica:** relación L/W = 2.5.
- **Coeficientes de rugosidad de Manning:** $n_{perm} = 0.025$ y $n_{imper} = 0.010$
- **Duración de lluvia crítica:** 30 minutos.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 155 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



- **Período de retorno:** 5 años.

Estas condiciones definen la respuesta hidrológica base del lote y son coherentes con los parámetros utilizados en los capítulos anteriores del trabajo.

5.3.2. Variables del modelo hidráulico

En la Figura 5.4 se presenta el esquema hidráulico del modelo implementado en EPA SWMM para el lote con tanque retardador, donde se visualiza la conexión entre la subcuenca, el sistema de derivación y la unidad de almacenamiento. En este esquema se identifican los principales componentes del modelo —conductos, nodos, orificios y tanque— cuyas funciones e interacciones en el proceso de regulación del caudal serán explicadas con mayor detalle en el apartado siguiente.

A continuación, se describen las variables hidráulicas que conforman el esquema del modelo y su función dentro del sistema:

- **C1:** conducto de descarga directa hacia la calle ($\varnothing 110$ mm).
Motivo de elección: diámetros menores a 110 mm mostraron riesgo de obstrucción y pérdida de autolimpieza; mayores no aportaron mejoras hidráulicas.
- **C2:** conducto de derivación hacia el tanque ($\varnothing 110$ mm).
- **C3:** conducto de descarga del tanque ($\varnothing \frac{3}{4}$ "), conectado a bomba.
- **Inlet offset:** diferencia de altura entre C1 y C2. Se adoptó un valor igual a 0.
- **Volumen del tanque (V):** ajustado variando el ancho y largo, manteniendo la profundidad fija en 1 m.
- **Control por flotante:** corte del ingreso a 0.90 m y reapertura a 0.75 m.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 156 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



En cada simulación se determinaron:

- Q_0 : caudal de escorrentía del terreno pre urbanización,
- Q_f : caudal post urbanización sin tanque,
- Q_{LID} : caudal post urbanización con tanque,
- V_{min} : volumen mínimo que logra el máximo descenso del caudal pico,
- A_{tanque}/A_{total} y A_{tanque}/A_{imp} : indicadores de eficiencia espacial.

5.4. Resultados

5.4.1. Caso base: lote de 250 m² con FOS = 50%

Siguiendo la misma metodología desarrollada en el Capítulo 4, se analizó el comportamiento hidrológico de un lote representativo de 250 m² con un Factor de Ocupación del Suelo (FOS) de 50 %, incorporando en este caso un tanque retardador destinado a reducir el caudal pico de escorrentía.

Toda la configuración del modelo que se presenta a continuación fue utilizada de manera uniforme en todas las simulaciones realizadas, tanto para el caso base como para los demás escenarios de área y FOS, garantizando así la coherencia metodológica y la comparabilidad de los resultados obtenidos.

a) Configuración del modelo

El modelo fue implementado en EPA SWMM, manteniendo fijas las condiciones geométricas, hidráulicas y de infiltración previamente definidas, de modo que las diferencias en los resultados reflejen exclusivamente el efecto del tanque. En este caso, se incorporó una

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 157 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



tercera subcuenca (S3) y un sistema de almacenamiento que representa el tanque retardador, destinado a evaluar su efecto en la reducción del caudal de escorrentía y la atenuación del pico de descarga.

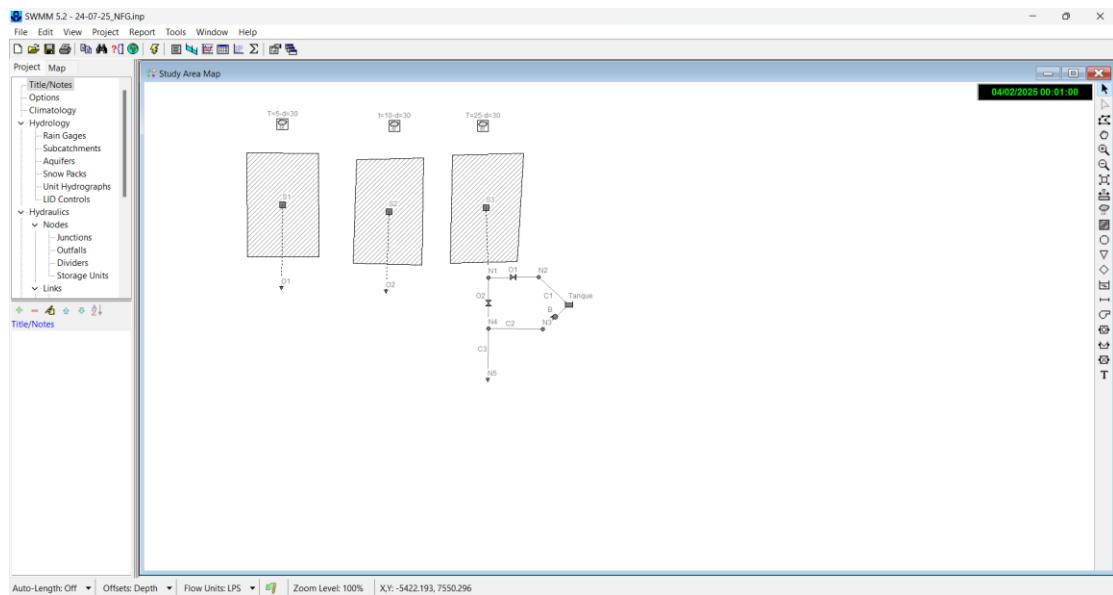


Figura 5.2 - Esquema general del modelo en EPA SWMM 5.2 para el análisis del lote de 250 m² con tanque retardador. Se observa la incorporación de S3 y el sistema de almacenamiento y conducción asociados al tanque

La Figura 5.2 muestra el esquema general del modelo configurado. Las primeras dos *subcuenas* (S1 y S2) cumplen funciones equivalentes a las utilizadas en el capítulo anterior:

- S1 representa el lote en condición natural o virgen, sin impermeabilización ($FOS = 0\%$), cuyo caudal de salida (Q_0) se utiliza como referencia.
- S2 corresponde al lote urbanizado con $FOS = 50\%$, donde se evalúa el incremento del caudal de escorrentía producto de la impermeabilización (Q).

| | |
|--|-------------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | |



A partir de estas dos subcuenas S1 y S2 se obtiene el punto de partida para definir el tercer escenario (S3), que incorpora el tanque retardador como medida de mitigación. Este último reproduce el comportamiento del lote urbanizado (FOS = 50%).

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 159 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| Subcatchment S3 | |
|--------------------------------|--------------|
| Property | Value |
| Name | S3 |
| X-Coordinate | -1059.170 |
| Y-Coordinate | 7657.068 |
| Description | |
| Tag | |
| Rain Gage | T=5-d=30 |
| Outlet | N1 |
| Area | 0.025 |
| Width | 10 |
| % Slope | 1 |
| % Imperv | 50 |
| N-Imperv | 0.01 |
| N-Perv | 0.025 |
| Dstore-Imperv | 0 |
| Dstore-Perv | 0 |
| %Zero-Imperv | 100 |
| Subarea Routing | OUTLET |
| Percent Routed | 100 |
| Infiltration Data | CURVE_NUMBER |
| Groundwater | NO |
| Snow Pack | |
| LID Controls | 1 |
| Land Uses | 0 |
| Initial Buildup | NONE |
| Curb Length | 0 |
| N-Perv Pattern | |
| Dstore Pattern | |
| Infil. Pattern | |
| Mannings N for impervious area | |

Figura 5.3 - Propiedades de S3 en EPA SWMM 5.2, correspondiente al lote urbanizado con FOS = 50 % y tanque retardador

La subcuenca S3, correspondiente al lote urbanizado con tanque retardador, se configuró con las propiedades que se muestran en la Figura 5.3. En este caso, se adoptó un

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 160 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



área de 0.025 ha (250 m²), una pendiente uniforme del 1 % y un ancho efectivo de escurrimiento de 10 m, manteniendo las mismas condiciones geométricas y de infiltración definidas en el capítulo anterior. El porcentaje de área impermeable (%Imperv) se fijó en 50 %, valor representativo del caso base, sobre el cual se evaluará el desempeño del tanque en la reducción del caudal. Este porcentaje permanecerá constante en todas las simulaciones de este apartado, ya que el objetivo no es analizar el efecto del FOS, sino cuantificar la eficiencia hidráulica del almacenamiento bajo un escenario urbano medio. Asimismo, los coeficientes de rugosidad de Manning se mantuvieron en n = 0.01 para las superficies impermeables y n = 0.025 para las permeables, mientras que la infiltración se modeló mediante el método Curve Number (CN = 70), en concordancia con los valores utilizados en el Capítulo 4. Los parámetros de almacenamiento superficial (Dstore) se consideraron nulos, y el enrutamiento interno se definió mediante la opción Outlet, que dirige el escurrimiento hacia el nodo de descarga (N1). A su vez, se observa que el lote está asociado a la lluvia de diseño de un período de retorno de 5 años y una duración de 30 minutos.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 161 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

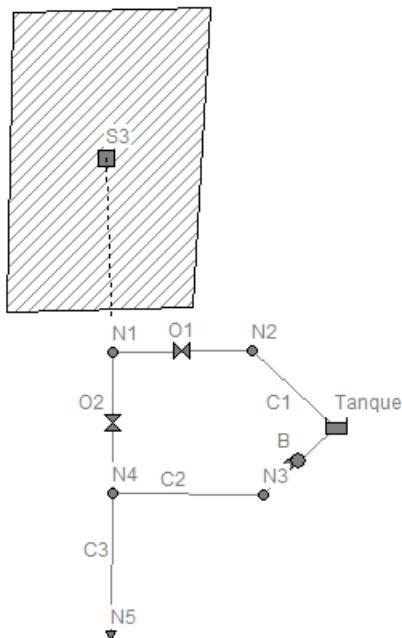


Figura 5.4 - Esquema hidráulico del modelo implementado en EPA SWMM para el lote con tanque retardador, mostrando la conexión de S3 con el sistema de derivación y almacenamiento

La Figura 5.4 muestra el esquema general del modelo configurado para todos los casos de simulación. El nodo N1 actúa como una cámara de inspección donde convergen los caudales provenientes del lote. Desde este punto se bifurcan dos ramales: el conducto O2, que representa la descarga directa hacia el sistema pluvial (sin regulación), y el conducto O1, que conduce parte del caudal hacia el tanque de retardo.

El Tanque fue modelado como una unidad de almacenamiento (*Storage Unit*) con una profundidad total de 1,0 m medida desde el nivel de terreno (0,00 m) hacia abajo, y con dimensiones superficiales variables. Estas dimensiones se modificaron en sucesivas

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 162 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



simulaciones con el propósito de determinar el volumen mínimo necesario para lograr la máxima reducción del caudal pico de descarga, manteniendo constante el FOS.

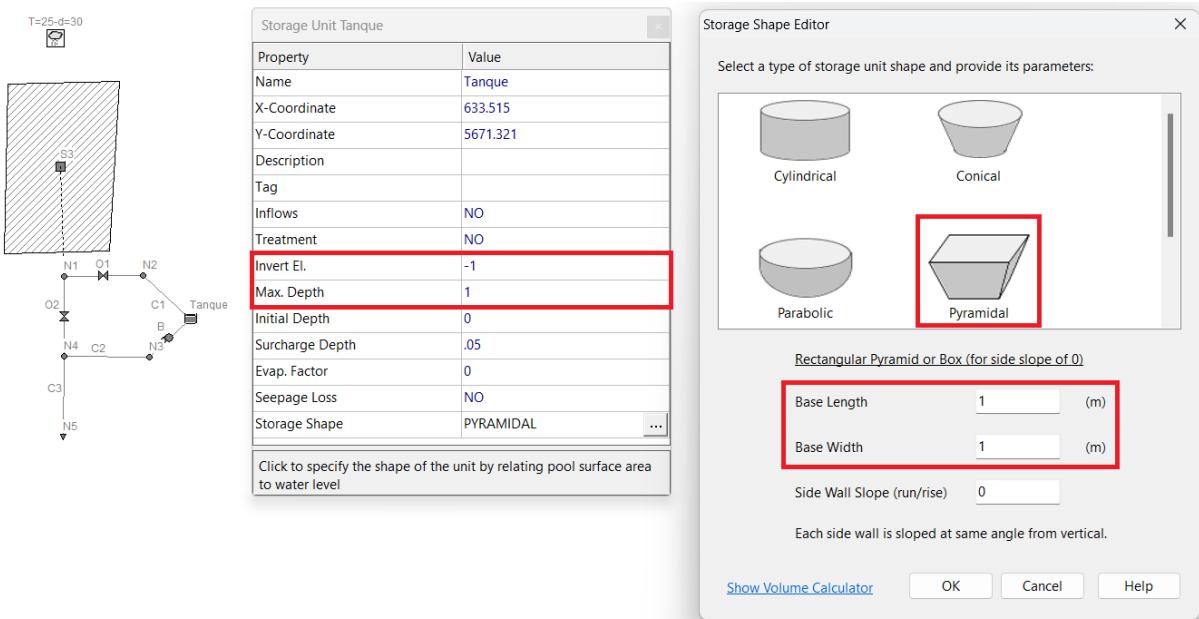


Figura 5.5 - Configuración de la unidad de almacenamiento (Storage Unit) en EPA SWMM 5.2, mostrando la selección de forma piramidal sin talud (tanque rectangular) y los parámetros geométricos empleados para la simulación

La Figura 5.5 muestra la configuración del tanque en el editor de unidades de almacenamiento de EPA SWMM. Se seleccionó una geometría de tipo piramidal sin talud lateral (*side wall slope = 0*), lo que equivale a un tanque de planta rectangular con paredes verticales. La profundidad máxima se fijó en 1,0 m, mientras que los parámetros Base Length y Base Width fueron los que se variaron en las simulaciones para ajustar el volumen de almacenamiento y analizar su efecto sobre la reducción del caudal pico.

| | |
|--|-------------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | |



El funcionamiento del tanque retardador se controló mediante un sistema de flotante virtual, implementado a través de reglas de control (Control Rules) dentro de EPA SWMM, tal como se muestra en la Figura 5.6. Estas reglas permiten abrir o cerrar el orificio de descarga (O1) automáticamente en función del nivel de agua almacenado en el tanque, reproduciendo el comportamiento de un flotante mecánico en un sistema físico real.

El control se programó con dos condiciones principales:

- Cuando la profundidad del agua alcanza o supera el 98 % de la altura total del tanque, el orificio se cierra para detener el ingreso adicional de caudal y evitar el desborde.
- Cuando el nivel desciende por debajo del 80 % de la altura total, el orificio se abre nuevamente, permitiendo la descarga controlada del volumen almacenado.

Este esquema de control asegura un funcionamiento intermitente y estable del sistema, manteniendo el tanque en condiciones de operación seguras y optimizando el efecto de retardo durante los eventos de lluvia.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 164 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

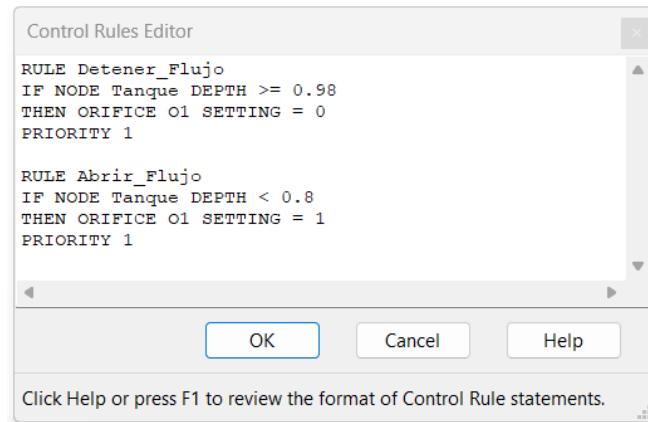


Figura 5.6 - Ventana de configuración de reglas de control (Control Rules) en EPA SWMM 5.2, utilizadas para simular el funcionamiento automático del flotante del tanque retardador en función del nivel de agua almacenado

El sistema de descarga del tanque incluye además una bomba auxiliar conectada al conducto C3, encargada de evacuar el agua almacenada una vez alcanzado un determinado nivel dentro del tanque. La incorporación de esta bomba en el modelo responde a la necesidad de representar un sistema de drenaje forzado, dado que en este caso el nivel del desagüe pluvial se encuentra por encima del nivel de descarga del tanque, impidiendo el vaciado por gravedad. Bajo esta condición, el uso de una bomba resulta indispensable para garantizar el drenaje completo del volumen retenido y restablecer la capacidad de almacenamiento antes de un nuevo evento de lluvia.

La bomba fue configurada en EPA SWMM mediante una curva característica de tipo HQ, que define la relación entre la altura manométrica (Head) y el caudal de bombeo (Flow), tal como se muestra en la Figura 5.7.

El modelo reproduce el comportamiento típico de una bomba centrífuga de baja capacidad, con una descarga máxima cercana a 0,5 L/s a carga nula y un corte total del flujo

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 165 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



a 10 m de altura. Esta configuración permite representar con fidelidad el funcionamiento de un sistema de retardo con descarga asistida, asegurando la evacuación del tanque sin interferir en la laminación del caudal pico durante el período de escorrentía más intenso.

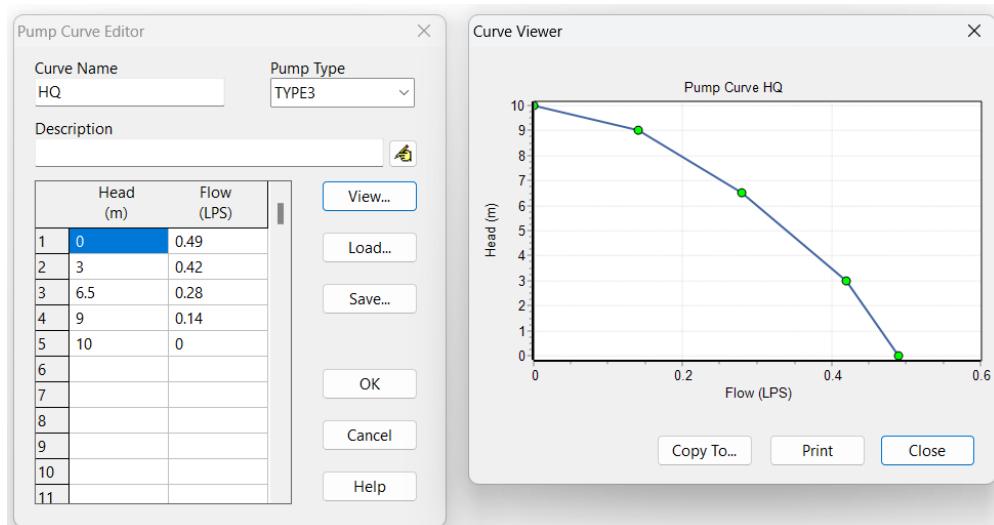


Figura 5.7 - Curva característica de la bomba de descarga (HQ) configurada en EPA SWMM 5.2, mostrando la relación entre altura manométrica y caudal de bombeo

Continuando, el conducto de entrada al tanque (C1) conecta la cámara de inspección (N1) con el tanque, mientras que el conducto de salida (C2) permite la descarga controlada del volumen retenido. Este último tiene un diámetro de $\frac{3}{4}$ ", sensiblemente menor al del conducto de ingreso, a fin de optimizar el efecto retardador y prolongar el tiempo de vaciado. La descarga controlada se une nuevamente al flujo principal mediante un ramal en forma de "Y", representado por el nodo N4, desde donde ambos caudales —el regulado y el directo— confluyen en el conducto troncal (C3) que desemboca en el nodo N5, correspondiente al punto de salida del sistema pluvial urbano.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 166 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



En síntesis, la configuración del modelo desarrollado en EPA SWMM fue concebida para representar con la mayor fidelidad posible las condiciones hidráulicas reales de un lote urbano con tanque retardador. Se adoptaron parámetros geométricos, hidráulicos y de infiltración coherentes con los del Capítulo 4, manteniendo así la comparabilidad entre escenarios y eliminando cualquier fuente de sesgo asociada a variaciones externas. Asimismo, se incorporaron mecanismos de control automático —como el flotante virtual del orificio y la bomba de drenaje forzado— que reproducen con precisión el funcionamiento operativo de los sistemas de retención y descarga utilizados en campo. El uso de un tanque con geometría variable, el ajuste iterativo de sus dimensiones y la aplicación de curvas HQ reales para la bomba permitieron simular el proceso de llenado y vaciado de manera dinámica y continua, respetando las condiciones de equilibrio entre el almacenamiento y la evacuación del flujo.

Estas consideraciones garantizan que el modelo no solo cumpla una función analítica, sino también predictiva y aplicable en la práctica, ofreciendo resultados confiables que reflejan con alta precisión el comportamiento hidrológico real ante diferentes escenarios de urbanización y manejo de escorrentía.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 167 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



b) Hidrogramas de escorrentía y comportamiento del tanque

En la Figura 5.8 se presentan los hidrogramas de escorrentía obtenidos para las tres subcuenca modeladas (S1, S2 y S3) bajo una lluvia de diseño con $T = 5$ años y una duración de 30 minutos. En este caso particular, se ejecutó el evento de lluvia en S3 con un tanque de almacenamiento de 2000 litros. Las curvas reflejan el comportamiento progresivo del sistema ante la urbanización y la posterior incorporación del tanque retardador.

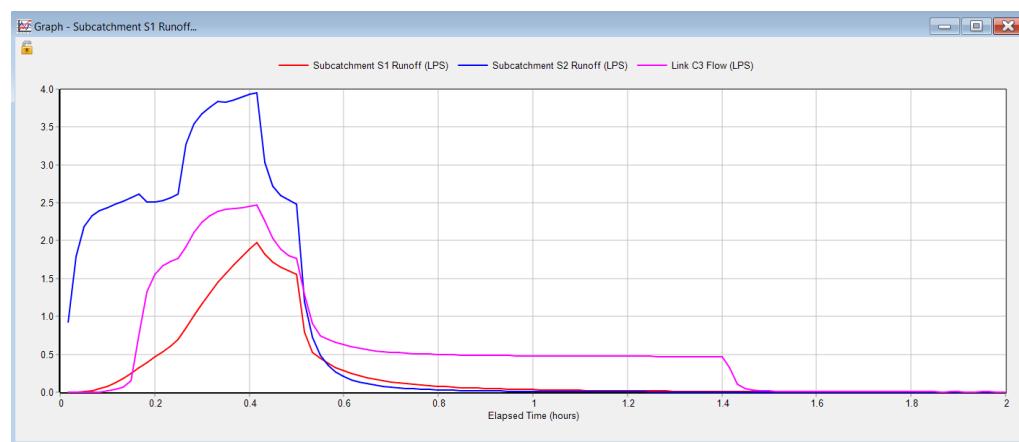


Figura 5.8 - Hidrogramas de escorrentía para los tres escenarios: lote natural (S1), lote urbanizado (S2) y lote urbanizado con tanque retardador (C3)

En primer lugar, la subcuenca S1 (curva roja) representa el lote natural, con superficie completamente permeable. El hidrograma exhibe una respuesta lenta, con un pico de caudal máximo de 1,98 L/s y un descenso rápido una vez finalizado el evento, producto de la capacidad de infiltración del suelo.

La subcuenca S2 (curva azul) simula el mismo lote urbanizado con un 50 % de superficie impermeable, sin medidas de control. En este caso, el caudal máximo asciende a 3,98 L/s, casi duplicando el valor del terreno natural. El aumento de la pendiente del

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 168 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



hidrograma evidencia un tiempo de concentración mucho menor, característico de las superficies pavimentadas y sin capacidad de almacenamiento superficial.

Finalmente, la subcuenca S3 incorpora el tanque retardador. La curva magenta, correspondiente al conducto C3 que descarga hacia el sistema pluvial, muestra una reducción significativa del caudal pico, que desciende hasta 2,47 L/s, tal como se observa en la Figura 5.9. Este comportamiento confirma la función de laminación del tanque, que modera la descarga y extiende la duración del flujo, generando un hidrograma más ancho y menos abrupto.

| Summary Results | | | | | | | | |
|--------------------|----------|---|--------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------|
| Topic: Node Inflow | | Click a column header to sort the column. | | | | | | |
| Node | Type | Maximum Lateral Inflow LPS | Maximum Total Inflow LPS | Day of Maximum Inflow | Hour of Maximum Inflow | Lateral Inflow Volume 10^6 ltr | Total Inflow Volume 10^6 ltr | Flow Balance Error % |
| N4 | JUNCTION | 0.00 | 2.47 | 0 | 00:25 | 0 | 0.00428 | 0.025 |
| N1 | JUNCTION | 4.00 | 4.00 | 0 | 00:24 | 0.00428 | 0.00428 | 0.006 |
| N2 | JUNCTION | 0.00 | 2.00 | 0 | 00:25 | 0 | 0.00214 | 0.053 |
| N3 | JUNCTION | 0.00 | 0.48 | 0 | 00:31 | 0 | 0.00214 | 0.087 |
| O1 | OUTFALL | 1.98 | 1.98 | 0 | 00:24 | 0.00195 | 0.00195 | 0.000 |
| O2 | OUTFALL | 3.98 | 3.98 | 0 | 00:24 | 0.00542 | 0.00542 | 0.000 |
| N5 | OUTFALL | 0.00 | 2.47 | 0 | 00:25 | 0 | 0.00428 | 0.000 |
| Tanque | STORAGE | 0.00 | 2.00 | 0 | 00:25 | 0 | 0.00214 | -0.006 |

Figura 5.9 - Caudales máximos registrados en los nodos del sistema hidráulico

En la Figura 5.10 se presenta el análisis interno de la subcuenca S3, donde se descompone el comportamiento hidráulico de cada conducto y nodo del sistema. La curva roja representa el caudal generado por la escorrentía superficial (S3 Runoff), mientras que las curvas correspondientes a los conductos O1, O2, C2 y C3, — los cuales fueron previamente esquematizados en la Figura 5.4 y descritos en el subapartado anterior — describen el movimiento del flujo dentro del sistema de retardo.

| | |
|--|-------------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | |

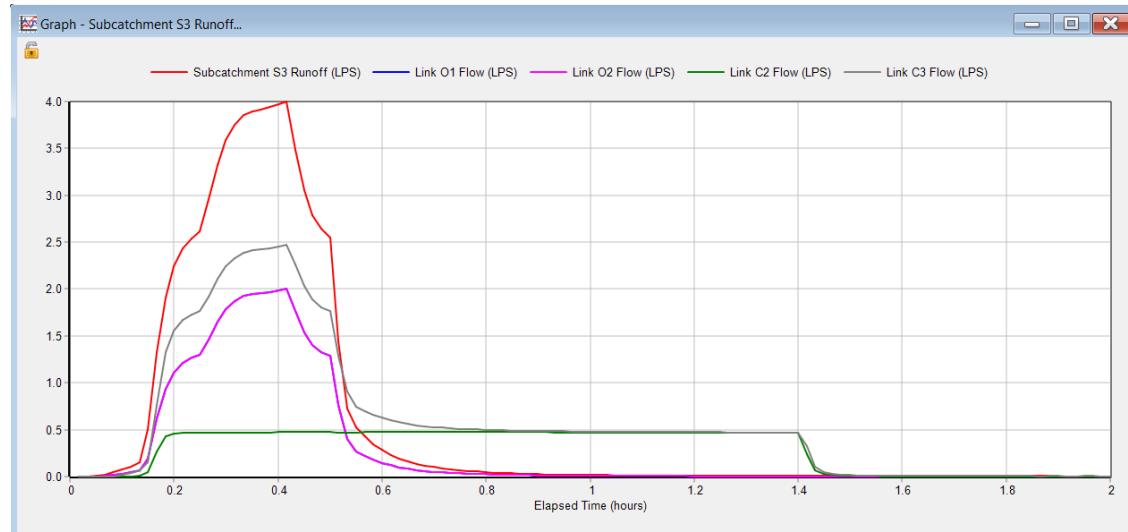


Figura 5.10 - Hidrogramas internos del sistema correspondiente a la subcuenca S3 (tanque retardador)

Puede observarse que, durante el ascenso del evento, la curva roja representa la escorrentía total generada por la subcuenca S3, la cual alcanza su caudal máximo cerca del minuto 25 del evento.

Al ingresar al sistema, este flujo llega a la cámara de inspección (nodo N1), donde se produce su distribución hacia los dos ramales principales del sistema. Dado que los conductos O1 y O2 se encuentran conectados al nodo a la misma cota de entrada (Inlet Offset = 0), el flujo se reparte de manera equitativa entre ambos. En consecuencia, aproximadamente la mitad del caudal total se dirige hacia el tanque retardador a través de los conductos O1 y C1, mientras que la otra mitad continúa directamente hacia el colector pluvial mediante el conducto O2. Esta condición explica que las curvas de O1 y O2 aparezcan superpuestas en el hidrograma, ya que ambas transportan caudales prácticamente iguales durante todo el evento.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 170 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Además, se advierte que la magnitud de estas curvas corresponde a aproximadamente la mitad del caudal total de escorrentía (curva roja), lo que confirma la correcta representación hidráulica de la bifurcación en la cámara.

Posteriormente, el flujo que ingresa al tanque es almacenado temporalmente y comienza a liberarse de manera controlada a través del conducto C2, el cual opera prácticamente a sección llena durante la mayor parte del evento. Debido a su reducido diámetro ($3/4"$), este conducto limita el caudal de salida y mantiene una descarga casi constante en el tiempo, representada en la curva verde del hidrograma. El comportamiento estable de C2 permite sostener una evacuación continua del tanque sin generar oscilaciones significativas en la descarga.

A medida que el evento avanza, el flujo proveniente del orificio (C2) se combina con el caudal directo del ramal O2 en el nodo N4, conformando un ramal en "Y" que representa la unión hidráulica de ambos aportes. La suma de la descarga constante del tanque y el flujo instantáneo del ramal O2 da origen al hidrograma final observado en C3, correspondiente al caudal total que llega a la calle. Este hidrograma, representado por la curva gris, presenta el pico máximo de escorrentía del sistema, resultado de la superposición temporal de ambos aportes. El comportamiento del conjunto evidencia la eficiencia del tanque retardador: mientras el orificio descarga de forma sostenida, el flujo directo disminuye luego del pico de lluvia, logrando un balance hidráulico que reduce y desplaza el caudal máximo, atenuando el impacto sobre la red pluvial.

La Figura 5.11 muestra la variación temporal de la profundidad del tanque durante el evento de lluvia. Se observa que el nivel del agua aumenta de manera progresiva durante el ascenso del hidrograma y alcanza un máximo cercano a 0,48 m, sin llegar a la profundidad de activación del flotante (0,98 m) previamente definida en las reglas de control. Por este

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 171 de 273 |
| <p>DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



motivo, el sistema no llega a cerrar el orificio de entrada O1, y no se evidencia en el hidrograma de O1 una caída instantánea del caudal, que en caso de producirse desviaría momentáneamente toda la escorrentía hacia el ramal O2 de descarga directa.

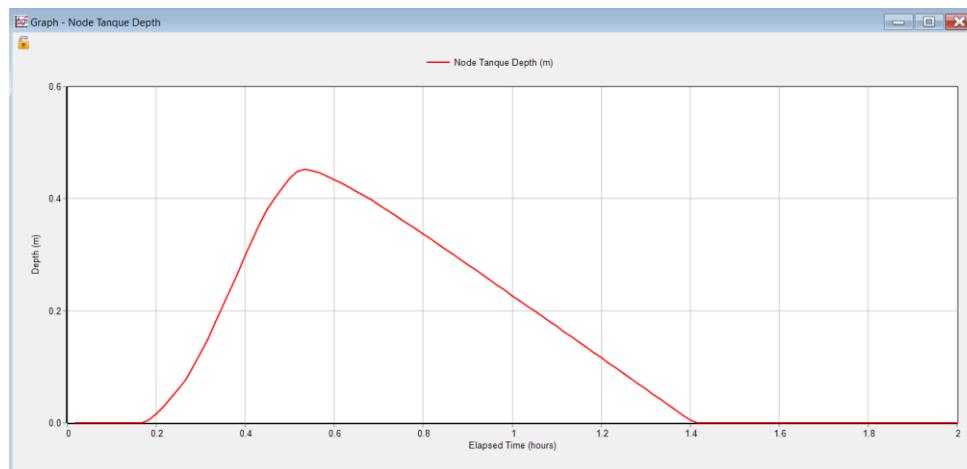


Figura 5.11 - Variación temporal de la profundidad del tanque retardador durante el evento de lluvia ($T = 5$ años, FOS = 50 %)

En definitiva, el comportamiento observado confirma que el tanque opera dentro de su rango funcional, aunque su almacenamiento debe dimensionarse cuidadosamente. Dado que el caudal de entrada al tanque (O1) es mayor que la capacidad de descarga del orificio (C2), el volumen almacenado tiende a incrementarse hasta alcanzar el límite superior de su capacidad útil, momento en el cual el tanque deja de admitir más agua y pierde temporalmente su efecto de retardo. En el caso analizado, el volumen de 2000 litros resultó suficiente para reducir al máximo el caudal pico, manteniendo al tanque en condiciones de funcionamiento adecuadas durante todo el evento, sin que actúe el flotante.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 172 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



A continuación, se analizó el efecto de variar el volumen de almacenamiento del tanque respecto al caso base de 2000 litros, con el objetivo de determinar la relación entre la capacidad del tanque y la reducción del caudal pico. Para ello, se realizaron simulaciones sucesivas en EPA SWMM, modificando las dimensiones superficiales del tanque (manteniendo la misma profundidad de 1 m) y registrando el caudal máximo descargado hacia el sistema pluvial en cada caso.

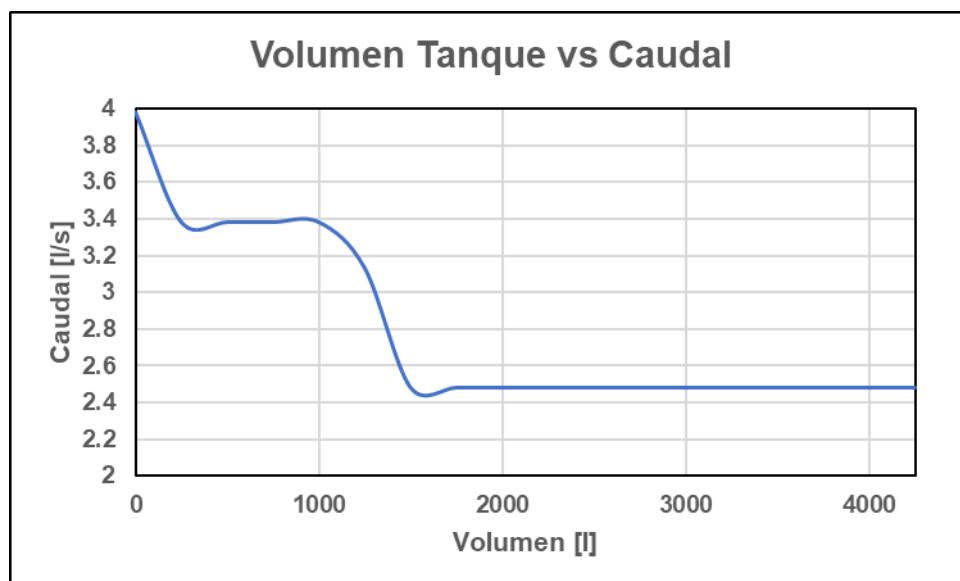


Figura 5.12 - Relación entre el volumen del tanque retardador y el caudal pico para el caso base ($A = 250 \text{ m}^2$, FOS = 50 %)

El gráfico de la Figura 5.12 muestra cómo el caudal pico disminuye de manera progresiva a medida que aumenta el volumen de almacenamiento del tanque, hasta alcanzar un punto de inflexión —en torno a los 2000 litros— a partir del cual la reducción deja de ser significativa. Si el volumen fuese menor, el tanque se llenaría antes de que ocurra el pico de escorrentía, modificando la forma del hidrograma y disminuyendo su eficacia hidráulica. Por

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 173 de 273 |
| <p>DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



el contrario, aumentar la capacidad más allá de los 2000 litros no produce mejoras adicionales, ya que el caudal pico final está determinado por la suma del flujo descargado por el orificio C2 y el flujo directo del ramal O2, los cuales definen conjuntamente el hidrograma máximo observado en el conducto C3.

A partir de este caso base, se ejecutaron simulaciones complementarias con tanques de mayor volumen (3000 y 4000 litros), ajustando las dimensiones superficiales del almacenamiento, pero manteniendo constante su profundidad. Los resultados confirmaron que no se registran reducciones adicionales del caudal pico respecto al tanque de 2000 litros, lo que permitió definir la existencia de un volumen mínimo eficaz (V_{min}): aquel que logra la máxima reducción del caudal con el menor tamaño posible de tanque. Este concepto constituye un criterio fundamental de diseño, ya que posibilita optimizar el dimensionamiento hidráulico del sistema sin incurrir en sobredimensionamientos innecesarios.

El mismo procedimiento fue replicado para el lote de 250 m² con FOS = 25 %, 75 % y 100 %, y posteriormente extendido a las demás áreas de estudio. En todos los casos se determinó el volumen mínimo correspondiente, permitiendo construir una tabla resumen comparativa —presentada en el siguiente apartado— que sintetiza los resultados y representa uno de los principales aportes técnicos de este Trabajo Final.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 174 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



5.4.2. Resultados generales y análisis comparativo

Análogamente al caso anterior, se repitieron las simulaciones siguiendo las mismas metodologías para los demás escenarios modelados. Como se mencionó al final del apartado anterior, de las simulaciones se obtuvo, para cada combinación de área y FOS, el volumen de tanque mínimo necesario para lograr la mayor atenuación del caudal pico. Tal como se observó en la Figura 5.12, el incremento de volumen muestra rendimientos decrecientes: más allá de cierto punto, el caudal no se reduce significativamente. Este comportamiento define el volumen mínimo V_{min} .

Tendencias observadas:

- V_{min} crece con el aumento del FOS y del área.
- Lotes de 250–500 m²: V_{min} entre 1 y 7 m³.
- Lotes de 750–1000 m²: V_{min} entre 5 y 15 m³.
- Lotes de 2000 m²: V_{min} entre 10 y 30 m³.

Estos valores se consideran óptimos de diseño, ya que mayores volúmenes no generan mejoras hidráulicas proporcionales.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 175 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

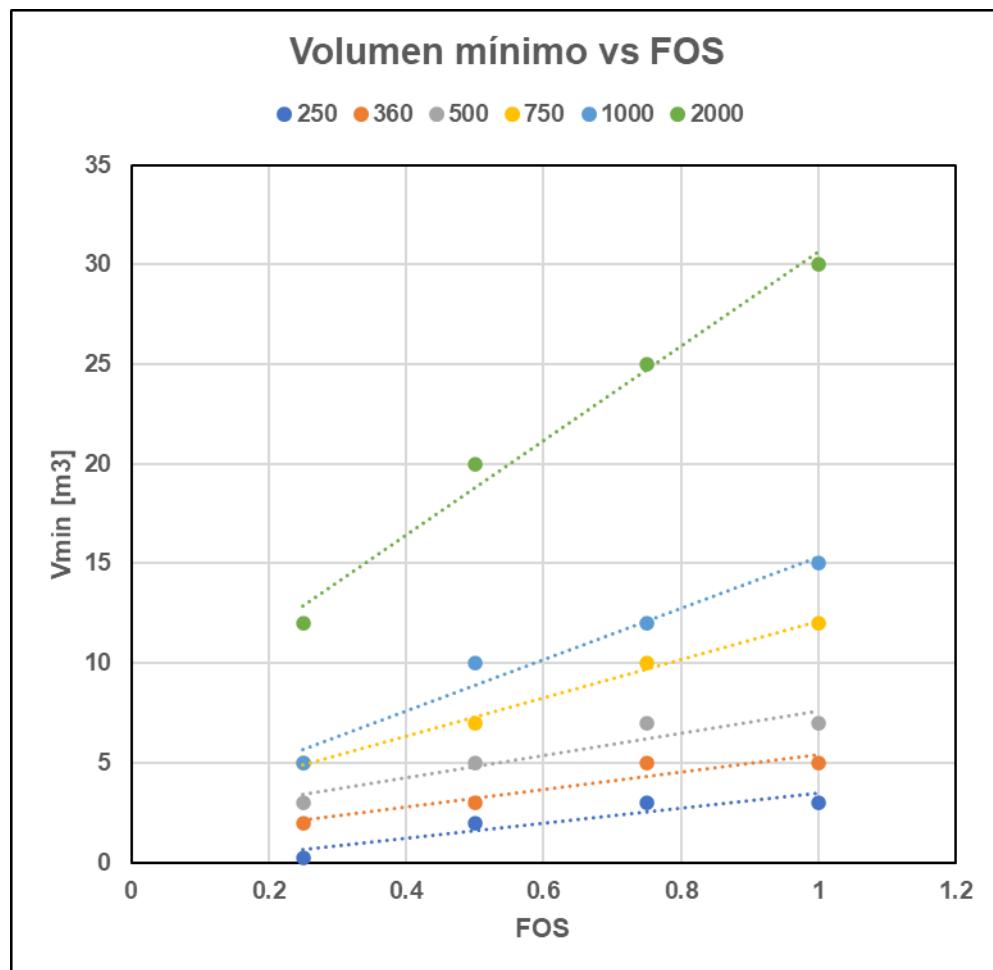


Figura 5.13 - Relación entre el volumen mínimo del tanque (V_{min}) y el Factor de Ocupación del Suelo (FOS) para las distintas áreas analizadas

En síntesis, de acuerdo a la Figura 5.13, los resultados obtenidos permiten identificar con claridad las tendencias del volumen mínimo de retardo en función del área y del FOS, estableciendo un criterio de diseño aplicable a diferentes escalas de lote. No obstante, para evaluar de forma integral el impacto hidrológico de la urbanización y la eficacia de las medidas

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 176 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



de mitigación implementadas mediante los tanques de retardo, resulta necesario avanzar hacia una evaluación cuantitativa y comparativa. En el siguiente apartado se introducen los indicadores de impacto hidrológico, desarrollados con el propósito de medir objetivamente la modificación del régimen de escorrentía y el grado de restitución alcanzado mediante las estrategias de control adoptadas.

5.4.3. Indicadores de impacto hidrológico

Como parte central de esta investigación, se desarrollaron nuevos parámetros adimensionales que permiten evaluar de manera cuantitativa y comparativa el efecto de la urbanización y la implementación de medidas de drenaje sostenible a escala de lote. Estos indicadores constituyen una de las principales contribuciones del presente trabajo, ya que posibilitan interpretar de forma simple y objetiva el impacto hidrológico de una obra y la eficiencia de las soluciones LID, sin recurrir a modelaciones complejas.

Los parámetros definidos son los siguientes:

$$UI = \frac{Q_f - Q_0}{Q_0} \times 100$$

$$LID_0 = \frac{Q_{LID} - Q_0}{Q_0} \times 100$$

$$LID_f = \frac{Q_{LID} - Q_f}{Q_f} \times 100$$

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 177 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Donde:

UI mide el impacto de la urbanización respecto al terreno pre desarrollo urbano,
 LID_0 compara el efecto del tanque respecto a la condición pre desarrollo urbano,
 LID_f expresa la reducción del caudal pico respecto a la condición post desarrollo urbano.

El primer parámetro, UI (Urban Impact), expresa el incremento relativo del caudal pico producto de la urbanización. Es un indicador directo del deterioro hidrológico generado por la sustitución del suelo natural por superficies impermeables. Valores de UI cercanos a cero indican un comportamiento prácticamente natural, mientras que valores elevados reflejan un fuerte impacto antrópico.

El segundo indicador, LID_0 , mide el efecto combinado de la urbanización y la implementación del sistema de drenaje sostenible, comparado con la situación virgen. Este parámetro permite determinar si la medida logra restablecer —total o parcialmente— las condiciones originales del lote.

Finalmente, LID_f evalúa la efectividad del sistema de mitigación respecto al escenario post-obra, es decir, cuánto logra reducir el tanque el caudal que la urbanización genera. Un valor negativo de LID_f indica una disminución real del impacto, y su magnitud refleja el grado de mejora alcanzado.

Estos tres indicadores, aplicados en conjunto, permiten trazar una lectura integral del comportamiento hidrológico del lote, abarcando tanto el deterioro inicial causado por la urbanización como la recuperación lograda mediante la intervención.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 178 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



Su formulación sencilla, basada únicamente en los caudales obtenidos de las simulaciones, los convierte en herramientas de diagnóstico accesibles para ingenieros, proyectistas o incluso usuarios no especializados, facilitando la toma de decisiones en materia de gestión pluvial.

En este sentido, los indicadores UI, LID₀ y LID_f representan un aporte original de este Trabajo Final, ya que sistematizan de forma clara el concepto de impacto hidrológico relativo y lo vinculan directamente con el desempeño de soluciones de drenaje urbano sostenible, pudiendo ser incorporados a futuras normativas o guías de diseño a nivel municipal o regional.

5.4.4. Análisis de resultados – Tabla resumen

Finalmente, con base en todos los resultados obtenidos, se elaboró una tabla resumen integral (ver Tabla 5.1) que constituye uno de los aportes fundamentales de este Trabajo Final. En ella se sintetizan, para cada combinación de área de lote y Factor de Ocupación del Suelo (FOS), los valores del volumen mínimo de tanque (V_{min}) y los caudales característicos: el caudal natural (Q_0), el caudal urbanizado sin control (Q_f) y el caudal con drenaje controlado (Q_{LID}). A partir de estos parámetros se determinaron los indicadores porcentuales de impacto hidrológico —UI, LID₀ y LID_f—, que permiten cuantificar de forma comparativa el efecto de la urbanización y la eficiencia de las medidas de mitigación aplicadas.

Esta tabla constituye una herramienta de diseño y evaluación hidrológica a escala de lote, de aplicación práctica tanto para técnicos y planificadores como para la gestión municipal del drenaje urbano sostenible.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 179 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



Tabla 5.1-Relación entre el volumen mínimo del tanque (V_{min}) y el Factor de Ocupación del Suelo (FOS) para las distintas áreas analizadas.

| Área | FOS | V_{min} [l] | Q_0 [l/s] | Q_f [l/s] | Q_{LID} [l/s] | UI [%] | LID _{i_0} [%] | LID _{i_f} [%] |
|------|------|---------------|-------------|-------------|-----------------|--------|------------------------|------------------------|
| 250 | 0.1 | 100 | 1.98 | 2.43 | 1.39 | 23% | -30% | -43% |
| 250 | 0.25 | 250 | 1.98 | 3 | 1.98 | 52% | 0% | -34% |
| 250 | 0.5 | 2000 | 1.98 | 3.98 | 2.48 | 101% | 25% | -38% |
| 250 | 0.75 | 3000 | 1.98 | 4.94 | 2.94 | 149% | 48% | -40% |
| 250 | 1 | 3000 | 1.98 | 5.97 | 3.45 | 202% | 74% | -42% |
| 360 | 0.1 | 100 | 2.78 | 3.38 | 1.88 | 22% | -32% | -44% |
| 360 | 0.25 | 2000 | 2.78 | 4.27 | 2.64 | 54% | -5% | -38% |
| 360 | 0.5 | 3000 | 2.78 | 5.71 | 3.36 | 105% | 21% | -41% |
| 360 | 0.75 | 5000 | 2.78 | 7.09 | 4.02 | 155% | 45% | -43% |
| 360 | 1 | 5000 | 2.78 | 8.57 | 4.75 | 208% | 71% | -45% |
| 500 | 0.1 | 500 | 3.74 | 4.49 | 2.33 | 20% | -38% | -48% |
| 500 | 0.25 | 3000 | 3.74 | 5.87 | 3.47 | 57% | -7% | -41% |
| 500 | 0.5 | 5000 | 3.74 | 7.9 | 4.48 | 111% | 20% | -43% |
| 500 | 0.75 | 7000 | 3.74 | 9.83 | 5.41 | 163% | 45% | -45% |
| 500 | 1 | 7000 | 3.74 | 11.87 | 6.4 | 217% | 71% | -46% |
| 750 | 0.1 | 2000 | 5.35 | 6.21 | 3.62 | 16% | -32% | -42% |
| 750 | 0.25 | 5000 | 5.35 | 8.65 | 4.92 | 62% | -8% | -43% |
| 750 | 0.5 | 7000 | 5.35 | 11.78 | 6.46 | 120% | 21% | -45% |
| 750 | 0.75 | 10000 | 5.35 | 14.73 | 7.87 | 175% | 47% | -47% |
| 750 | 1 | 12000 | 5.35 | 17.71 | 9.35 | 231% | 75% | -47% |
| 1000 | 0.1 | 3000 | 6.85 | 8.68 | 4.86 | 27% | -29% | -44% |
| 1000 | 0.25 | 5000 | 6.85 | 11.37 | 6.33 | 66% | -8% | -44% |
| 1000 | 0.5 | 10000 | 6.85 | 15.64 | 8.44 | 128% | 23% | -46% |
| 1000 | 0.75 | 12000 | 6.85 | 19.63 | 10.45 | 187% | 53% | -47% |
| 1000 | 1 | 15000 | 6.85 | 23.51 | 12.4 | 243% | 81% | -47% |
| 2000 | 0.1 | 10000 | 12.16 | 16.05 | 8.62 | 32% | -29% | -46% |
| 2000 | 0.25 | 12000 | 12.16 | 21.76 | 11.97 | 79% | -2% | -45% |
| 2000 | 0.5 | 20000 | 12.16 | 30.82 | 16.58 | 153% | 36% | -46% |
| 2000 | 0.75 | 25000 | 12.16 | 39.14 | 20.51 | 222% | 69% | -48% |
| 2000 | 1 | 30000 | 12.16 | 46.63 | 24.18 | 283% | 99% | -48% |

| | |
|--|-------------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | |



Del procesamiento de los datos obtenidos en las simulaciones se derivan diversas tendencias que permiten comprender el comportamiento hidráulico y la factibilidad práctica de los tanques retardadores a nivel de lote.

En primer lugar, se verificó que para niveles bajos de impermeabilización ($FOS \leq 0.25$), los tanques logran restituir completamente las condiciones del terreno natural, reduciendo el caudal final incluso por debajo del caudal virgen. En estos casos, el sistema alcanza una condición de impacto hidrológico nulo para lluvias con un período de retorno de 5 años, lo que demuestra la gran eficacia de la medida en escenarios de baja densidad urbana o con predominio de superficies permeables.

A medida que el FOS aumenta, el caudal de escorrentía crece considerablemente, y aunque el tanque mantiene su capacidad de atenuar el pico, ya no logra equiparar las condiciones del lote virgen. No obstante, las reducciones siguen siendo significativas: los valores promedio de LIDf indican disminuciones del orden del 40 al 50 % respecto a la situación post-obra, confirmando el potencial del sistema como medida de mitigación.

La ocupación en planta del tanque se mantuvo en valores bajos, representando menos del 2 % del área total del lote y entre 1 y 5 % de la superficie impermeable, lo que evidencia una alta eficiencia espacial. Esto lo convierte en una alternativa viable para viviendas unifamiliares o pequeños desarrollos urbanos, donde el espacio disponible suele ser un factor limitante.

Sin embargo, los resultados también ponen de manifiesto una limitación práctica importante: para lotes de gran superficie ($A \geq 1000 \text{ m}^2$) y altos grados de impermeabilización ($FOS \geq 0.75$), los volúmenes mínimos eficaces alcanzan valores que superan los 10 a 30 m^3 . Este crecimiento exponencial del volumen necesario genera problemas constructivos y

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 181 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



económicos, ya que el tanque deja de ser una solución sencilla y de bajo costo, transformándose en una estructura de almacenamiento considerable, de difícil instalación en un entorno urbano. En consecuencia, puede afirmarse que la eficacia hidráulica de la medida se mantiene alta en la escala residencial, pero su factibilidad económica y operativa disminuye significativamente en lotes grandes o altamente impermeables. Esto sugiere que, en dichos casos, el enfoque más adecuado sería complementar los tanques con otras estrategias de drenaje sostenible.

5.4.5. Ajuste de ecuaciones a partir de los resultados alcanzados

De manera similar a lo presentado al final del capítulo anterior, en este caso también se buscó el ajuste de ecuaciones simplificadas, de tal manera de poder estimar algunas variables mediante simples ecuaciones matemáticas; y de esta manera lograr extrapolar los resultados de este Trabajo Final en el futuro a casos reales.

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones y del procesamiento posterior de los datos, se desarrollaron relaciones empíricas entre las principales variables analizadas, con el objetivo de construir herramientas prácticas que permitan estimar de forma rápida y sencilla el comportamiento hidrológico del lote y el dimensionamiento de los tanques de retardo.

Durante este proceso se ensayaron distintos tipos de relaciones matemáticas —lineales, polinómicas, logarítmicas, exponenciales y potenciales— con el propósito de identificar la que mejor representara el comportamiento observado en las simulaciones. Para cada caso se comparó el valor real obtenido en el programa con el valor estimado por la expresión ajustada, cuantificando los márgenes de error y seleccionando la formulación con mejor correlación y menor dispersión de resultados.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 182 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



El propósito de este apartado fue vincular las variables físicas del lote (área y FOS) con las respuestas hidráulicas simuladas (caudales y volúmenes), de modo que el usuario o proyectista pueda evaluar el impacto hidrológico y dimensionar un tanque adecuado sin recurrir a modelos de simulación complejos.

Las relaciones derivadas fueron las siguientes:

$$V_{min} = f(FOS, A)$$

$$A_t/A_{total} = f(FOS, A)$$

$$LID_0 = f(FOS, A)$$

$$LID_f = f(FOS, A)$$

Estas expresiones permiten conocer el volumen mínimo del tanque, la proporción del área total que representa, y el impacto hidrológico relativo antes y después de la incorporación del sistema de retardo. Cada una fue calibrada a partir de los resultados obtenidos en el programa EPA SWMM y validadas mediante gráficos de dispersión respecto a la función identidad, y diferencias entre el valor real dado por el programa y el obtenido mediante la expresión.

A) Volumen mínimo del tanque

El volumen mínimo del tanque (V_{min}) representa el volumen necesario para lograr un impacto hidrológico nulo o una reducción máxima del caudal pico respecto a la situación sin control. Inicialmente se intentó ajustar una relación lineal entre el volumen, el área del lote y el FOS, con el fin de obtener una expresión simple que permitiera su aplicación directa. Si bien la tendencia general fue capturada, los resultados mostraron dispersión importante en

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 183 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



áreas grandes y altos valores de FOS, con márgenes de error de hasta $\pm 3 \text{ m}^3$, lo que reduce la confiabilidad del ajuste para ciertos casos.

La relación lineal es la siguiente:

$$V_{min} = -6.149793 + 0.00999749A + 10.609287FOS$$

Donde:

V_{min} es el volumen mínimo del tanque retardador, expresado en litros [L].

A es el área del lote, expresada en metros cuadrados [m^2].

FOS es el Factor de Ocupación del Suelo, adimensional.

Debajo en la Figura 5.14 se muestra el gráfico comparativo entre los valores simulados en el programa SWMM y los estimados por la expresión desarrollada, representado mediante la función identidad, lo que permite visualizar la precisión del ajuste obtenido:

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 184 de 273 |
| <p>DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

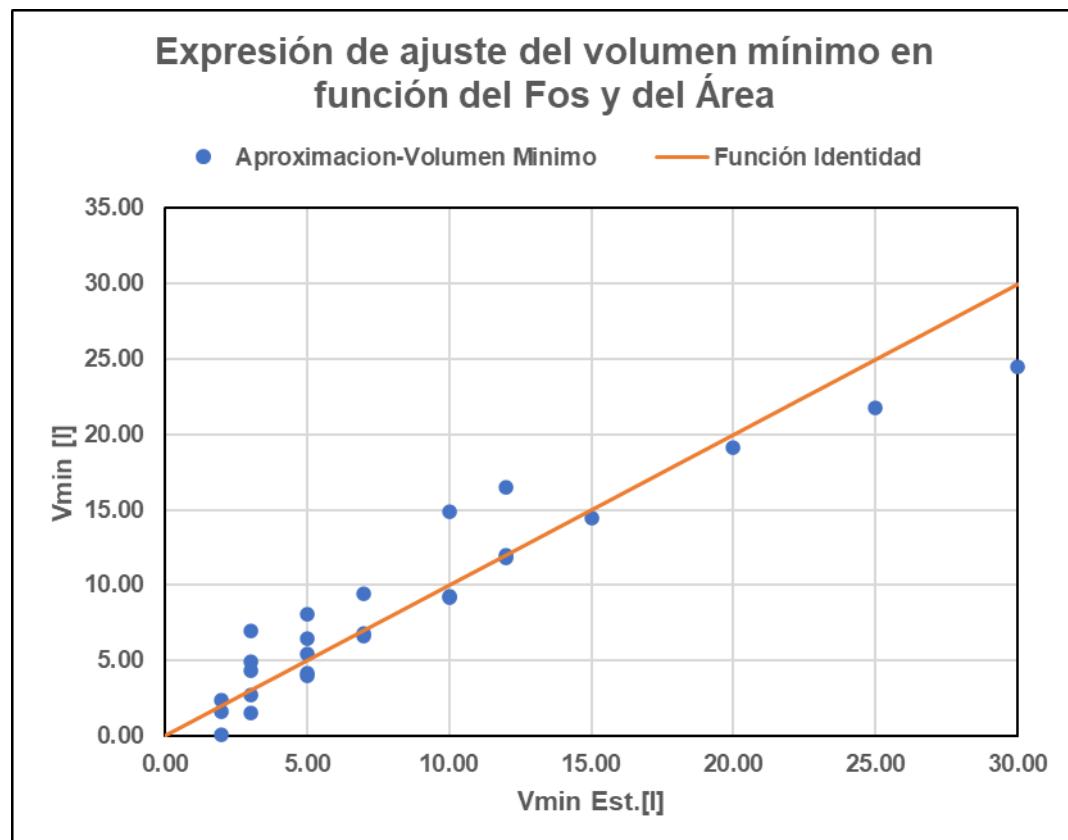


Figura 5.14 - Expresión de ajuste del volumen mínimo (V_{min}) en función del FOS y del área del lote

Debido a las ligeras diferencias entre los resultados de la simulación y la expresión, se desarrolló también una alternativa gráfica tipo ábaco, en la cual se representó la variación de V_{min} con el FOS para cada tamaño de lote (250, 360, 500, 750, 1000 y 2000 m²). En este caso, el comportamiento fue claramente no lineal y creciente y se representa en la Figura 5.15.

| | |
|--|-------------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | |

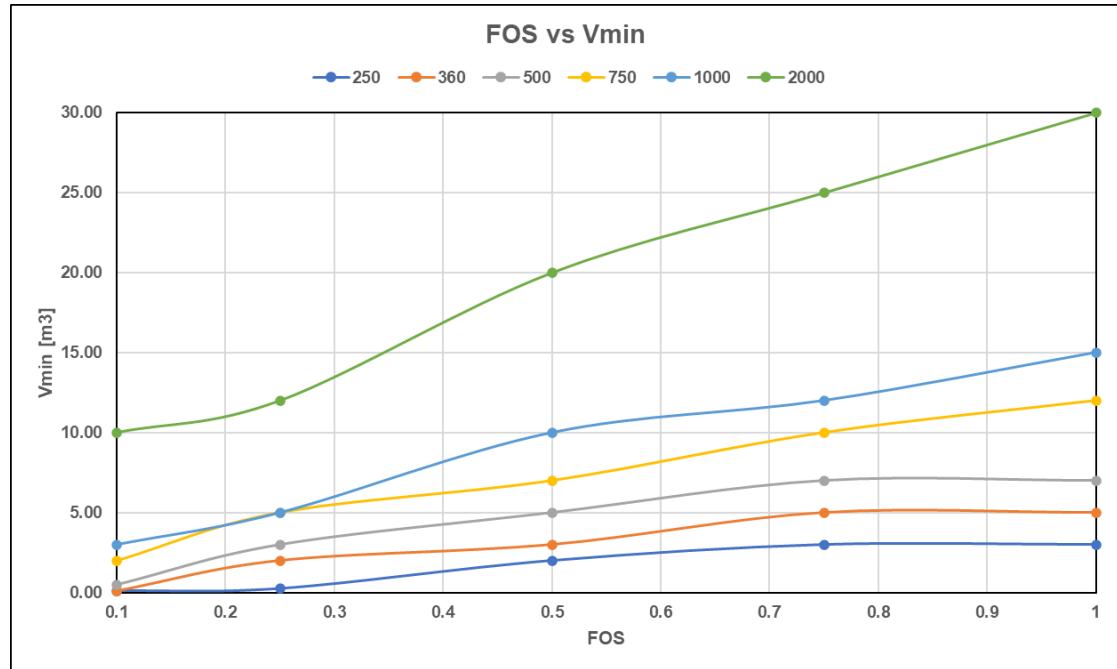


Figura 5.15 - Ábaco de relación entre área, FOS y volumen mínimo (Vmin)

El uso del ábaco se justifica por su mayor precisión y facilidad interpretativa, ya que permite visualizar la tendencia general y obtener el volumen necesario de manera inmediata sin depender de una fórmula específica. Además, al tratarse de un método gráfico, el usuario puede interpolar visualmente valores intermedios de área y FOS.

De la comparación entre los distintos escenarios se observa que a medida que aumenta la impermeabilización y el tamaño del lote, el volumen del tanque crece en forma exponencial, alcanzando valores que en la práctica se vuelven económicamente inviables o constructivamente difíciles de ejecutar. Esto demuestra que la estrategia de tanques individuales es altamente efectiva en lotes pequeños y medianos, pero pierde eficiencia cuando el área o el FOS son elevados.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 186 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



B) Impacto hidrológico inicial

El parámetro LID_0 representa el impacto del tanque respecto a la situación preobra, es decir, cómo cambia el comportamiento hidrológico del lote virgen al incorporar un sistema de retardo.

La expresión ajustada fue:

$$LID_0 = -0.451524 + 0.0000812544 \times A + 1.19258 \times FOS$$

Donde:

LID_0 es el indicador de impacto hidrológico del lote sin tanque retardador (adimensional).

A es el área del lote, expresada en metros cuadrados [m^2].

FOS es el Factor de Ocupación del Suelo, adimensional.

A continuación, en la Figura 5.16 se presenta la comparación gráfica entre valores simulados (SWMM) y valores estimados por la expresión ajustada mediante la función identidad:

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 187 de 273 |
| <p>DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

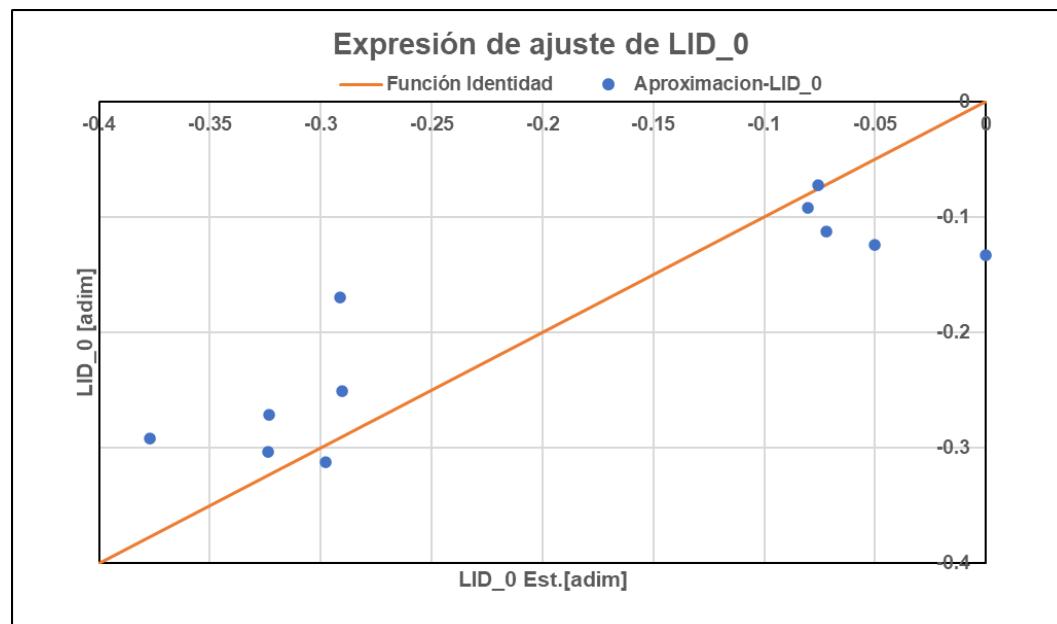


Figura 5.16 - Expresión de ajuste de LID_0 en función del FOS y del área del lote

El modelo presenta una tendencia lineal creciente con el FOS y una leve dependencia con el área del lote. Los márgenes de error observados en la comparación con los valores simulados se mantienen entre ± 0.01 y ± 0.09 , indicando una buena aproximación general.

Este indicador resulta útil para cuantificar cuánto se acerca el comportamiento del lote con tanque al estado natural, mostrando que para FOS menores a 0.25 se alcanzan caudales iguales o incluso inferiores al del lote virgen (impacto hidrológico nulo). A partir de valores de FOS mayores, el tanque sigue produciendo mejoras significativas, aunque sin llegar completamente a Q_0 .

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 188 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



C) Impacto hidrológico final

El parámetro LID_f mide el impacto del tanque respecto a la condición post-obra, o sea, la reducción del incremento de caudal producido por la urbanización.

La expresión ajustada fue:

$$LID_f = 0.396513 + 0.0000315613 \times A + 0.0328571 \times FOS$$

Donde:

LID_f es el indicador de impacto hidrológico del lote con tanque retardador (adimensional).

A es el área del lote, expresada en metros cuadrados [m^2].

FOS es el Factor de Ocupación del Suelo, adimensional.

A continuación, en la Figura 5.17 se presenta la comparación gráfica entre valores simulados (SWMM) y valores estimados por la expresión ajustada mediante la función identidad:

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 189 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

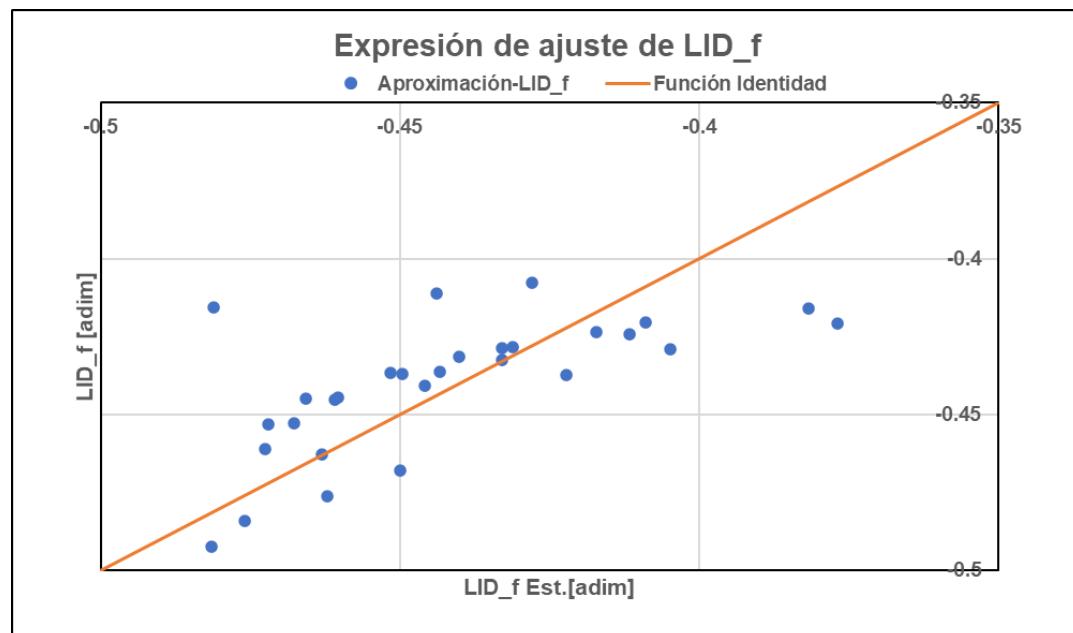


Figura 5.17 - Expresión de ajuste de LID_f en función del FOS y del área del lote

Los márgenes de error observados en las simulaciones se ubican entre ± 0.01 y ± 0.07 , lo que refleja una buena capacidad predictiva del modelo. Si bien no es perfecto en los casos más extremos (mayor FOS y áreas grandes), su simplicidad lo vuelve una herramienta útil para el cálculo rápido del impacto residual. En general, el parámetro LID_f muestra que el tanque logra reducir el caudal pico final entre un 40% y un 50% respecto a la situación post-obra, cumpliendo su objetivo de atenuar los efectos de la impermeabilización.

| | |
|--|-------------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | |



D) Proporción de área del tanque

La última relación corresponde al porcentaje del área total del lote que ocupa el tanque de retardo. Se ajustó una expresión con componentes lineales y logarítmicos:

$$\frac{A_{tanque}}{A_{total}} = 0.0129467 + 0.00000114662 \times A + 0.0055114 \times \ln(FOS)$$

Donde:

$\frac{A_{tanque}}{A_{total}}$ es la relación entre el área ocupada por el tanque retardador y el área total del lote (adimensional).

A es el área total del lote, expresada en metros cuadrados [m²].

FOS es el Factor de Ocupación del Suelo, adimensional.

A continuación, en la Figura 5.18 se presenta la comparación gráfica entre valores simulados (SWMM) y valores estimados por la expresión ajustada mediante la función identidad:

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 191 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

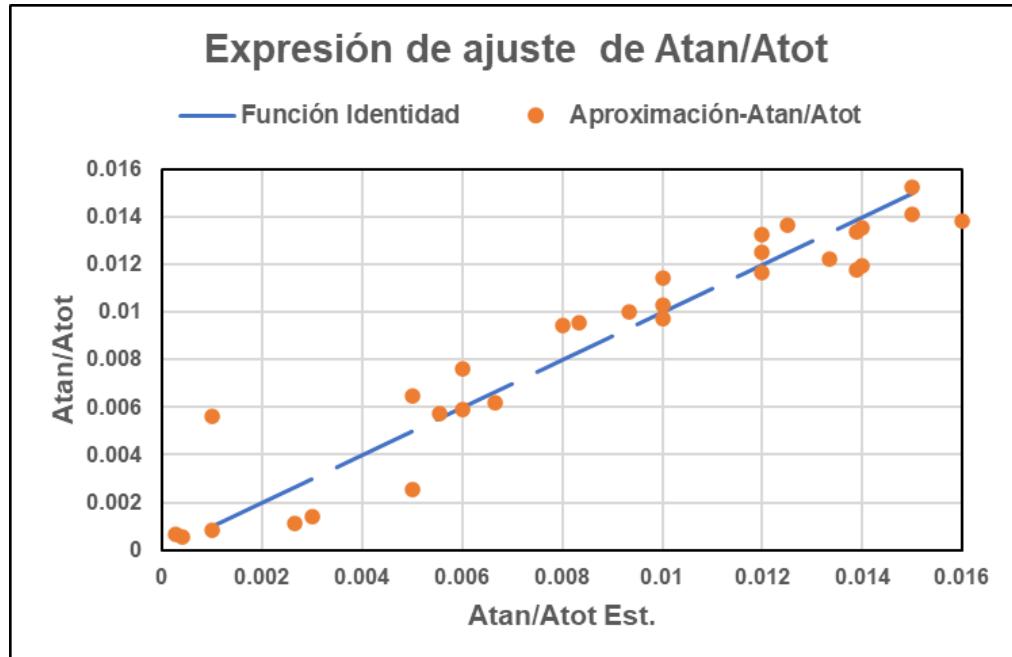


Figura 5.18 - Expresión de ajuste de Atan/Atot en función del FOS y del área del lote

Los resultados presentan márgenes de error reducidos, dentro de $\pm 0.2\%$, y una excelente correlación con los valores obtenidos en las simulaciones. La tendencia muestra un incremento leve con el FOS y el tamaño del lote, manteniéndose siempre por debajo del 2% del área total.

Este comportamiento confirma que la ocupación superficial de los tanques es mínima, por lo que su implementación no representa un problema de espacio en los lotes residenciales típicos. En cambio, el volumen requerido —y no el área ocupada— es la variable que limita su factibilidad económica y constructiva.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 192 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



5.4.6. Conclusiones del capítulo

El desarrollo de este capítulo permitió evaluar de manera integral el funcionamiento hidráulico de los tanques retardadores de caudal a nivel de lote y su incidencia sobre el impacto hidrológico generado por la urbanización. A través de la modelación realizada con el programa EPA SWMM, se comprobó que estas estructuras constituyen una herramienta eficaz para reducir el caudal pico y amortiguar los efectos del incremento de la impermeabilización del suelo.

Los resultados obtenidos demostraron que, para lotes con bajo o medio grado de ocupación ($FOS \leq 0.25$), los tanques son capaces de restituir completamente las condiciones del terreno natural, alcanzando un impacto hidrológico nulo o incluso valores de caudal inferiores a los del lote virgen. A medida que el FOS aumenta, la capacidad de mitigación se mantiene significativa, aunque sin lograr igualar completamente la situación natural. En estos casos, la reducción del caudal alcanza valores cercanos al 40–50% respecto al escenario post-obra, confirmando la efectividad del sistema dentro de su escala de aplicación.

Se observó, sin embargo, que la eficacia hidráulica del tanque no siempre se traduce en factibilidad práctica. Para lotes grandes o con altos niveles de impermeabilización, los volúmenes necesarios superan ampliamente los 10 a 30 m^3 , lo cual vuelve la solución poco viable desde el punto de vista económico y constructivo. Este comportamiento pone de manifiesto la necesidad de integrar distintas estrategias de drenaje urbano sostenible, combinando tanques con otras medidas como zanjas de infiltración, pavimentos permeables o jardines de lluvia, de manera de distribuir el almacenamiento y reducir los volúmenes concentrados.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 193 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



El trabajo permitió además desarrollar indicadores propios de impacto hidrológico (UI, LID₀ y LIDf), que constituyen un aporte original y de alto valor práctico. Estos parámetros sintetizan en forma sencilla los efectos de la urbanización y la eficacia de las medidas de mitigación, posibilitando evaluar cuantitativamente el impacto de una obra sin recurrir a herramientas complejas. Junto con ellos, se derivaron expresiones empíricas y relaciones funcionales que vinculan las principales variables del lote (área y FOS) con los resultados obtenidos, generando una metodología de diseño accesible para usuarios no especializados.

Las relaciones obtenidas mostraron un comportamiento coherente con los fenómenos físicos simulados y un grado de ajuste satisfactorio respecto a los valores de referencia del modelo. En particular, las expresiones para los parámetros LID₀ y LIDf presentaron errores medios reducidos, mientras que el volumen mínimo del tanque debió representarse mediante un ábaco polinómico para mejorar la precisión del cálculo. Esta herramienta gráfica, junto con las ecuaciones simplificadas, constituye un producto final de aplicación directa que permite estimar de forma rápida y confiable el volumen necesario para alcanzar un determinado nivel de mitigación.

En síntesis, el estudio confirma que los tanques retardadores a nivel de lote son una alternativa técnica eficiente y replicable para el control del escurrimiento urbano en zonas residenciales, especialmente en aquellas con baja o media densidad de ocupación. Asimismo, la metodología desarrollada aporta un marco de cálculo práctico y adaptable, capaz de integrarse a futuras normativas locales o guías de diseño orientadas a la gestión sostenible del agua de lluvia.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 194 de 273 |
| <p>DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



Capítulo 6. Evaluación de la implementación de lagunas de retardo a nivel de loteo

En este capítulo se desarrolla la evaluación comparativa del comportamiento hidráulico de las lagunas de retardo tradicionales a escala de loteo urbano, con el objetivo de contrastar su desempeño frente a la solución innovadora de tanques de retardo individuales propuesta en el capítulo anterior. Más que validar el cumplimiento de la normativa provincial que exige garantizar un impacto hidrológico nulo respecto de la condición previa a la urbanización, el propósito de este análisis es cuantificar la eficiencia real y la conveniencia práctica de ambas estrategias. A través de la simulación y la comparación de resultados se busca determinar si la implementación descentralizada de tanques en cada lote aporta beneficios significativos frente a la solución tradicional de una laguna centralizada, tanto en términos de reducción de caudales y volúmenes de almacenamiento como de factibilidad técnica.

De este modo, el capítulo plantea una mirada crítica sobre el modelo clásico de retardo, evaluando hasta qué punto los sistemas LID propuestos justifican su adopción como complemento o alternativa dentro de la gestión del drenaje urbano sostenible.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 195 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



6.1. Introducción

El presente capítulo tiene por objeto evaluar y comparar el comportamiento hidráulico de las lagunas de retardo tradicionales aplicadas a escala de loteo urbano, en relación con la solución alternativa de tanques de retardo individuales desarrollada en el Capítulo 5. Más que un análisis aislado, este estudio busca contrastar dos enfoques distintos de gestión pluvial uno centralizado y convencional, otro descentralizado y basado en criterios LID con el fin de valorar su eficiencia relativa y su viabilidad práctica en el marco del drenaje urbano sostenible.

Si bien la normativa provincial vigente en Córdoba exige demostrar impacto hidrológico nulo para nuevas urbanizaciones —lo cual implica garantizar que el caudal de salida del sistema no supere al caudal preexistente correspondiente al estado natural—, esta verificación debe realizarse para un evento de diseño de $TR = 25$ años, ya que dicho período de retorno es el adoptado oficialmente para evaluar y controlar los excedentes pluviales generados por la urbanización. En este marco, la solución tradicional consiste en incorporar obras de retardo o microembalses que permitan laminar el hidrograma post-urbanización y reducir el caudal pico hasta los valores naturales previos a la intervención.

No obstante, al abordar la incorporación de medidas LID a escala de lote, surge una diferencia conceptual importante. Mientras las obras centrales del loteo (lagunas o microembalses) deben dimensionarse para eventos de 25 años, los tanques de retardo individuales se diseñaron típicamente para eventos mucho menos severos, del orden de $TR = 5$ años, ya que diseñarlos para $TR = 25$ años implicaría volúmenes excesivamente grandes, costosos e inviables en el contexto residencial. Por esta razón, el análisis realizado en capítulos previos se enfocó en el desempeño de los tanques bajo eventos frecuentes de $TR = 5$ años, mientras que el presente capítulo aborda el comportamiento hidráulico del conjunto

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 196 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



urbano frente al evento normativo de $TR = 25$ años, evaluando el impacto de estos LID sobre el diseño de la laguna central.

Para clarificar estos alcances, en la Figura 6.1 se ilustran las tres situaciones relevantes para la verificación normativa:

- el hidrograma natural (pre-urbanización),
- el hidrograma generado por el loteo urbanizado sin medidas de retardo,
- y el hidrograma de salida luego del microembalse diseñado para cumplir la condición de impacto hidrológico nulo.

El gráfico permite visualizar cómo el caudal pico post-urbanización presenta un incremento significativo respecto del estado previo, y cómo la laguna de retardo atenúa dicho pico hasta valores que cumplen la condición normativa. La inclusión de medidas LID a nivel de lote —aun cuando se encuentren dimensionadas para eventos de menor severidad, como $TR = 5$ años— plantea la posibilidad de que su funcionamiento modifique la forma del hidrograma aportado al sistema central, pudiendo reducir los caudales y volúmenes que deben ser gestionados por la laguna principal. Precisamente, este capítulo se orienta a evaluar en qué medida dicha influencia se manifiesta bajo el evento crítico de verificación ($TR = 25$ años), determinando si la presencia de tanques retardadores en cada lote es capaz, o no, de disminuir los requerimientos hidráulicos de las obras de mitigación a escala de urbanización.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 197 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

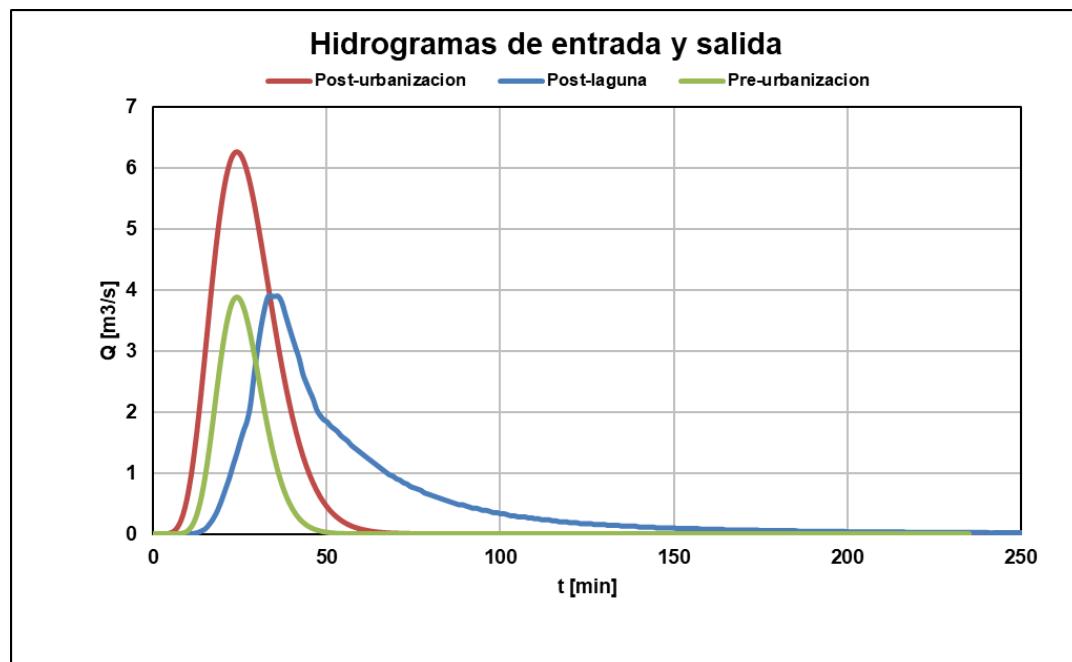


Figura 6.1 - Hidrogramas comparativos de aporte pre-urbanización, post-urbanización y post-laguna para TR = 25 años

6.2. Variables analizadas

El modelo se desarrolló a partir de la simulación de distintos tipos de loteos, considerando las variables principales del sistema:

- Área del lote individual (A): 250 m², 360 m² y 500 m².
- Factor de ocupación del suelo (FOS): 25% y 50%.
- Número de lotes: 1000 unidades (caso general) y 100 unidades (para el loteo de 500 m²).

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 198 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



- Período de retorno (TR): en este caso, se analizó la recurrencia de 25 años (tal cual establece la normativa para el diseño de la laguna); y además se evaluó el comportamiento de la recurrencia de 5 años a modo de poder conocer el comportamiento del sistema a este tiempo de retorno menor.
- Altura máxima admisible de la laguna: 1.30 m (criterio de seguridad).
- Método de cálculo del hidrograma: HU-SCS.
- Método de propagación de caudales en embalse: Puls.

Para la construcción del hidrograma representativo del loteo, se tomaron los parámetros hidrológicos derivados de la simulación individual de un lote con el programa EPA SWMM (caudal pico, tiempo al pico y volumen de escorrentía). A partir de ellos se generó el hidrograma del conjunto mediante la multiplicación del volumen unitario por el número de lotes ($\text{Vol_lote} \times \text{Nº_lotes}$).

El PRF (Parámetro de Forma del Hidrograma) fue ajustado iterativamente hasta obtener coincidencia entre el volumen calculado y el volumen teórico del loteo, logrando así una representación hidrológica coherente con los resultados del modelo base.

Posteriormente, se dimensionó la laguna de retardo utilizando el método de Puls, buscando que el caudal de salida máximo ($Q_{\text{out max}}$) fuera menor que el caudal preurbanización del loteo ($Q_{\text{fos}_0 \text{TR25}}$).

Se establecieron además las siguientes premisas de diseño:

- La altura de agua en el microembalse no debía superar los 1.30 m.
- El vertedero no debía activarse para una lluvia de 5 años, garantizando así que la laguna opere únicamente como almacenamiento temporal.
- Caudal de salida ($Q_{\text{out max}}$) inferior al caudal preurbano ($Q_{\text{fos}_0 \text{TR25}}$).

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 199 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



6.3. Modelación

La modelación hidráulica se realizó mediante una planilla de cálculo, empleando formulaciones hidrológicas convencionales basadas en el Hidrograma Unitario del SCS (HUSCS) y el método de Puls para la propagación del almacenamiento. Este esquema permitió estimar el comportamiento de la laguna de retardo bajo distintas configuraciones de superficie y grado de impermeabilización, tanto con como sin la incorporación de sistemas LID.

Para tal fin, se seleccionó un caso representativo denominado caso base sobre el cual se detalla el procedimiento completo de simulación, a fin de describir con precisión la metodología aplicada. Los restantes escenarios se evaluaron siguiendo el mismo esquema de cálculo, variando únicamente las condiciones geométricas y de ocupación del suelo.

6.3.1. Caso base: loteo de 1000 lotes de 250 m² y FOS = 50%

Con el propósito de ilustrar de manera clara el procedimiento de modelado y la metodología aplicada, en esta sección se desarrolla un caso representativo correspondiente a un loteo compuesto por 1000 lotes de 250 m² y un Factor de Ocupación del Suelo (FOS) del 50 %. Este escenario fue seleccionado por reflejar condiciones urbanas típicas y permitir visualizar con precisión el efecto de la incorporación de sistemas LID sobre el dimensionamiento hidráulico de la laguna de retardo.

El análisis se presenta de forma detallada para este caso base, dado que el procedimiento seguido es idéntico para las demás configuraciones de superficie y FOS analizadas. De este modo, se busca que el lector comprenda con claridad la secuencia metodológica y los criterios de cálculo empleados, evitando repeticiones innecesarias en los apartados siguientes.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 200 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



El desarrollo del modelo se estructura en las siguientes etapas:

1. Determinación del área del microembalse sin LID y con LID.

Se estimó el área requerida para el microembalse correspondiente al loteo urbanizado sin medidas sostenibles y, en paralelo, el área equivalente al incorporar tanques de retardo de volumen mínimo (2000 L por lote) en cada parcela.

El volumen mínimo de 2000 L adoptado para cada tanque corresponde al valor V_{min} determinado en el Capítulo 5, donde se analizaron distintas capacidades de almacenamiento para un lote representativo ($A = 250 \text{ m}^2$, FOS = 50 %) mediante simulaciones en EPA SWMM. En dicho capítulo se observó que, a partir de aproximadamente 2000 L, el tanque logra la máxima atenuación posible del caudal pico, y que un incremento adicional del volumen no produce reducciones hidráulicas significativas (comportamiento de rendimientos decrecientes). Por este motivo, el volumen de 2000 L fue adoptado como volumen mínimo eficaz, y constituye la base para evaluar su efecto en el comportamiento hidráulico del conjunto urbano y en el dimensionamiento de la laguna de retardo a nivel de loteo.

2. Evaluación de la diferencia de áreas entre ambas configuraciones.

Se analizó la reducción de superficie que se produce al aplicar la estrategia LID, considerando que la incorporación de tanques distribuidos disminuye la demanda de almacenamiento global y optimiza el espacio destinado al microembalse principal.

3. Cálculo de la altura del agua para un evento de diseño de TR = 5 años.

Utilizando el área del microembalse urbanizado, se determinó la altura máxima alcanzada por la lámina de agua en la laguna durante una tormenta de cinco años de recurrencia, representando la condición de diseño del sistema sin LID.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 201 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



4. Verificación de la altura de vertedero.

Finalmente, se contrastaron las alturas obtenidas con la cota máxima admisible del vertedero (1,30 m), establecida conforme a los criterios de seguridad hidráulica y a las normativas provinciales vigentes.

La descripción de estas etapas permite comprender el proceso de simulación adoptado para evaluar la influencia de los tanques de retardo sobre el comportamiento hidráulico del microembalse, constituyendo la base metodológica del análisis desarrollado en los apartados posteriores.

6.4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del modelado hidráulico realizado para los distintos escenarios de análisis. El objetivo es exponer de manera ordenada los efectos que produce la incorporación de tanques de retardo a nivel de lote (sistema LID) sobre el comportamiento general de la laguna de retardo a escala de loteo urbano, evaluando su influencia en el volumen de almacenamiento requerido, la superficie del microembalse y la altura máxima alcanzada por la lámina de agua durante los eventos de diseño.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 202 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



6.4.1.Caso base: loteo de 1000 lotes de 250 m² y FOS = 50%

1. Determinación del área del microembalse sin LID y con LID.

Como punto de partida para el dimensionamiento del microembalse, se modeló en EPA SWMM un lote tipo representativo del desarrollo. Este lote mantiene las mismas características geométricas e hidrológicas adoptadas en los capítulos 4 y 5: superficie de 250 m², ancho equivalente de 10 m, pendiente del 1 % y parámetros de infiltración definidos mediante el método del Número de Curva (CN). Asimismo, se consideró un Factor de Ocupación del Suelo (FOS) del 50 %, es decir, la mitad del lote como superficie impermeable y el resto como área permeable, respetando las proporciones analizadas previamente.

En la Figura 6.2 se muestran las propiedades la subcuenca para generar el lote tipo.

La particularidad de este caso radica en que la subcuenca correspondiente al lote se asocia a un hietograma de diseño con período de retorno (TR) de 25 años y duración de 30 minutos – a diferencia de los capítulos anteriores donde trabajamos con lluvias de diseño con un TR de 5 años, seleccionado como lluvia de proyecto para el dimensionamiento del sistema de almacenamiento a nivel de lote y del microembalse a nivel de loteo. Esta elección responde a los criterios normativos vigentes en la provincia de Córdoba para desarrollos urbanísticos que deben alcanzar la condición de “impacto hidrológico nulo”. En estudios previos sobre urbanización en la región se adoptan lluvias de TR 25 años para la evaluación de medidas de drenaje pluvial y control de escorrentía, tal como se menciona en la introducción del presente capítulo.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 203 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

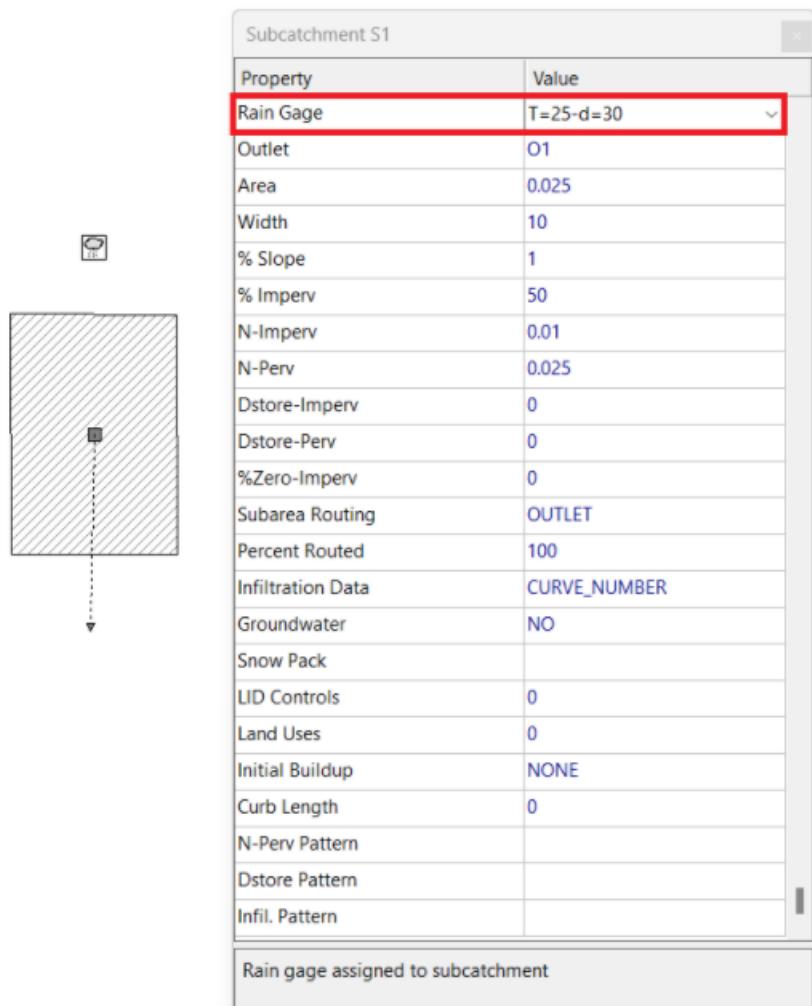


Figura 6.2 - Propiedades de la subcuenca S1 en EPA SWMM para el lote tipo ($A = 250 \text{ m}^2$, FOS = 50 %, TR = 25 años, t = 30 min)

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 204 de 273 |
| <p>DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



Tras simular el evento de lluvia de TR = 25 años y duración 30 minutos sobre el lote tipo, se obtuvieron los resultados hidrológicos sintetizados en la Figura 6.3. Allí se identifican los valores principales de la respuesta del lote que nos servirán para construir el hidrograma del loteo: el caudal pico, el tiempo de ocurrencia del pico y el volumen total de escorrentía generado. Para este caso, el lote produce un caudal máximo de 6,26 L/s, alcanzado aproximadamente a los 24 minutos del inicio del evento, mientras que el volumen total generado asciende a $0,00829 \text{ m}^3 \times 10^6$, equivalente a 8,29 m³. Estos parámetros constituyen la base para la estimación del volumen mínimo de almacenamiento requerido en cada parcela.

| Summary Results | | | | | | | | |
|--------------------|---------|---|--------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------|
| Topic: Node Inflow | | Click a column header to sort the column. | | | | | | |
| Node | Type | Maximum Lateral Inflow LPS | Maximum Total Inflow LPS | Day of Maximum Inflow | Hour of Maximum Inflow | Lateral Inflow Volume 10^6 ltr | Total Inflow Volume 10^6 ltr | Flow Balance Error % |
| O1 | OUTFALL | 6.26 | 6.26 | 0 | 00:24 | 0.00829 | 0.00829 | 0.000 |

Figura 6.3 - Resultados hidrológicos del lote tipo ante la lluvia de TR = 25 años

Complementariamente, en la Figura 6.4 se presenta el hidrograma de escorrentía del lote, donde puede observarse la forma temporal de la respuesta. El hidrograma exhibe un ascenso rápido durante los primeros 20–25 minutos, seguido por un pico bien definido en torno a los 6,3 L/s y un descenso pronunciado producto de la finalización del evento y el agotamiento del escurrimiento superficial. Esta representación gráfica permite visualizar con claridad la dinámica del caudal, imprescindible para evaluar el impacto de incorporar un volumen de retardo en la parcela.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 205 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

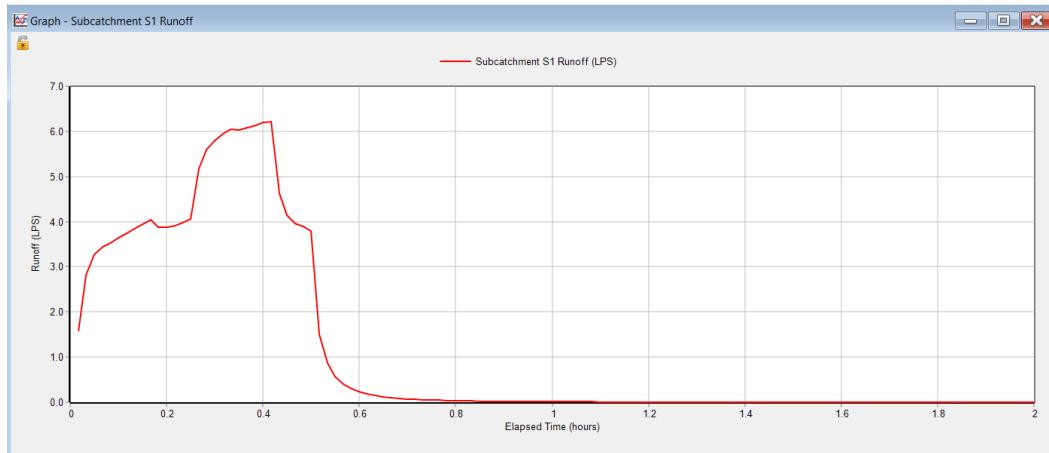


Figura 6.4 - Hidrograma de escorrentía de la subcuenca S1 bajo lluvia de TR = 25 años

A partir de los resultados obtenidos para el lote individual (tiempo al pico, caudal pico y volumen total generado), se procedió a construir el hidrograma de aporte del loteo completo. Para ello se consideró un conjunto de 1000 parcelas idénticas, cada una con las mismas características geométricas e hidrológicas que el lote tipo modelado en EPA SWMM.

Siguiendo el criterio de superposición simultánea de aportes, se asumió que todos los lotes descargan en un mismo punto de control sin retardos adicionales en la red. Bajo esta hipótesis, el caudal pico del loteo se estimó como 1000 veces el caudal pico del lote individual, mientras que el tiempo al pico se mantuvo igual al determinado para el lote tipo, dado que la dinámica de concentración y generación de escorrentía es equivalente en todas las parcelas. Asimismo, el volumen total generado se obtuvo multiplicando por 1000 el volumen correspondiente a un solo lote.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 206 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Con estos tres parámetros globales (caudal pico, tiempo al pico y volumen total) se construyó el hidrograma del loteo mediante el método del Hidrograma Unitario del SCS (HU-SCS). Este método proporciona una forma adimensional del hidrograma que puede ajustarse posteriormente para reproducir el caudal pico y el volumen objetivo. Para ello se utilizó el parámetro Peak Rate Factor (PRF), el cual controla la concentración del hidrograma: valores altos de PRF generan hidrogramas más agudos y picos mayores, mientras que valores bajos producen hidrogramas más anchos y atenuados.

En el presente trabajo, el PRF se ajustó iterativamente hasta lograr que el volumen del hidrograma resultante coincidiera con el volumen total requerido para el loteo (volumen del lote individual multiplicado por 1000). La forma final obtenida del hidrograma sintético se muestra en la Figura 6.5, la cual representa el aporte hidrológico total del loteo bajo el evento de diseño seleccionado.

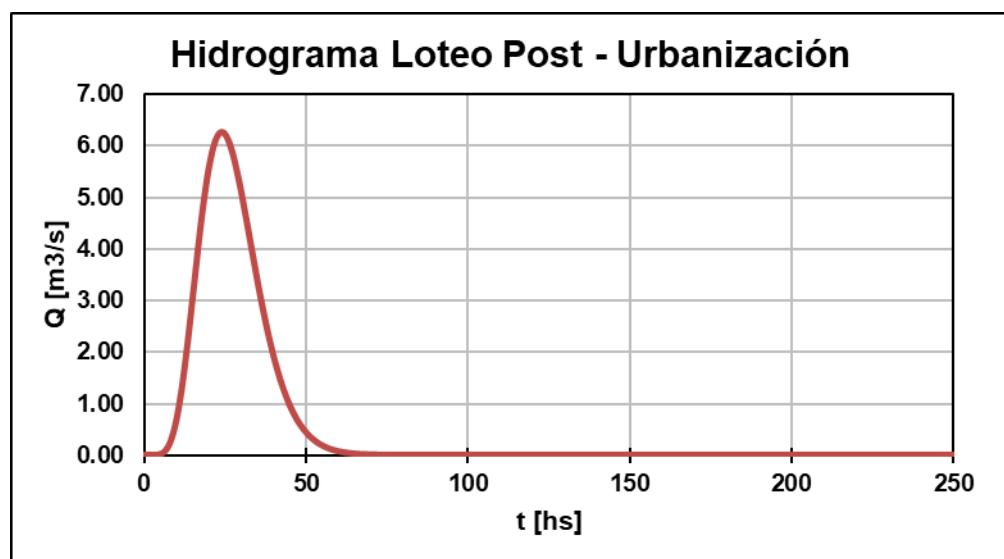


Figura 6.5 - Hidrograma sintético del loteo obtenido mediante el método HU-SCS

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 207 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Como se observa en la Figura 6.5, el hidrograma sintético del loteo presenta un caudal pico de 6,26 m³/s, valor que resulta de multiplicar el caudal máximo aportado por un lote individual (6,26 L/s) por el total de 1000 lotes considerados. El tiempo al pico del hidrograma del loteo coincide con el del lote individual, alcanzándose aproximadamente a los 24 minutos del inicio del evento de lluvia. Este hidrograma representa el aporte total del loteo urbanizado bajo el evento de diseño adoptado (TR = 25 años, t = 30 min) y constituye la condición post-obra previa a la aplicación de las medidas de retención.

De manera análoga al procedimiento realizado para el loteo urbanizado, se construyó también el hidrograma del loteo en condición preobra, con el objetivo de determinar el caudal máximo natural al cual debe reducirse el aporte post-obra para cumplir con la condición de impacto hidrológico nulo. Para ello se consideró un lote completamente permeable (%Imperv = 0), manteniendo las mismas características geométricas del lote tipo (A = 250 m², pendiente 1 %, CN representativo del suelo natural) y sometido al mismo evento de diseño de TR = 25 años y duración de 30 min.

A partir de la simulación realizada en EPA SWMM, se obtuvo un caudal pico de 3,88 L/s para el lote individual preobra. Aplicando nuevamente el criterio de superposición simultánea de aportes, el caudal pico del loteo natural se estimó como:

$$Q_{p,preobra} = 1000 \times 3,88 \left[\frac{l}{s} \right] = 3,88 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

El volumen total del hidrograma se escaló del mismo modo, mientras que el tiempo al pico se mantuvo igual al del lote individual, asumiendo una respuesta hidrológica homogénea entre parcelas. Con estos valores globales se generó el hidrograma sintético del loteo preobra mediante el método del Hidrograma Unitario del SCS (HU-SCS), ajustando nuevamente el

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 208 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



Peak Rate Factor (PRF) hasta reproducir el volumen objetivo correspondiente al conjunto de los 1000 lotes.

La forma final del hidrograma preobra se presenta en la Figura 6.6.

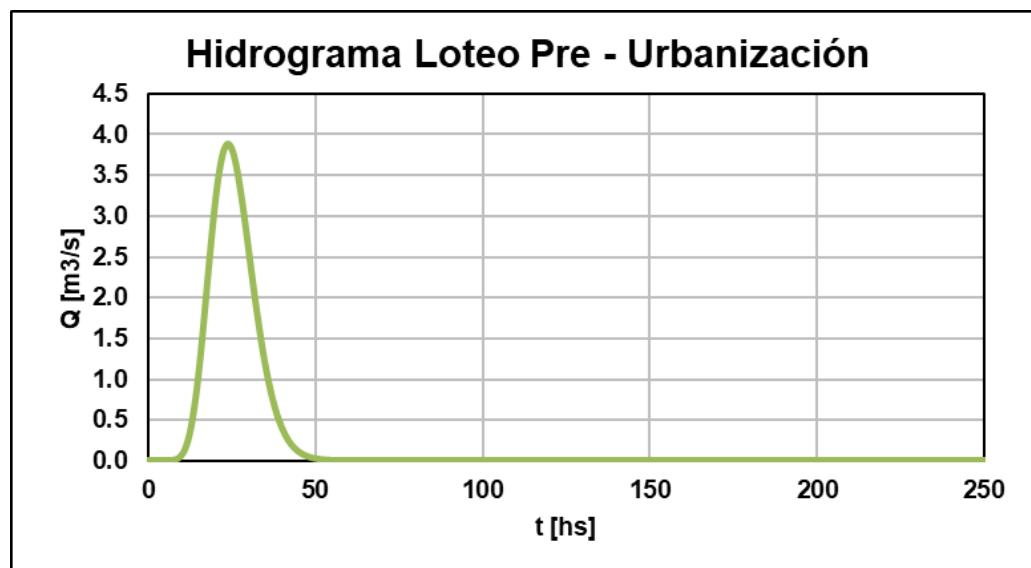


Figura 6.6 - Hidrograma del loteo preobra obtenido mediante el método HU-SCS ($Q_p = 3,88 m^3/s$)

Como puede observarse, el hidrograma preobra presenta un caudal pico significativamente menor ($3,88 m^3/s$) en comparación con el hidrograma del loteo urbanizado ($6,26 m^3/s$), lo que refleja el aumento de escorrentía producido por la impermeabilización del suelo. Esta diferencia establece el objetivo hidráulico que debe alcanzarse mediante el diseño de la laguna de retardo para cumplir con el criterio de impacto hidrológico nulo.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 209 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



La laguna de retardo se diseñó con el objetivo de cumplir simultáneamente las siguientes condiciones:

1. Reducir el caudal pico post-obra (loteo urbanizado, TR = 25 años) hasta un valor igual o inferior al caudal pico preobra ($3,88 \text{ m}^3/\text{s}$).
2. Evitar la activación del vertedero para la lluvia de TR = 5 años, de modo que, para eventos frecuentes, el control se realice únicamente mediante el orificio de descarga de fondo.
3. Limitar la altura máxima de agua a 1,30 m, atendiendo a criterios de seguridad dada la posible presencia de niños y usuarios en el entorno inmediato del espacio verde donde se emplaza la laguna.

Con estos requerimientos se definió la geometría de la laguna. En la Figura 6.7 se presenta el croquis en planta y cortes con las dimensiones principales: largo L, ancho B y altura total H, así como las dimensiones del descargador de fondo (ancho Bd y altura Hd) y del vertedero superficial (luz Lv y cota Hv).

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 210 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

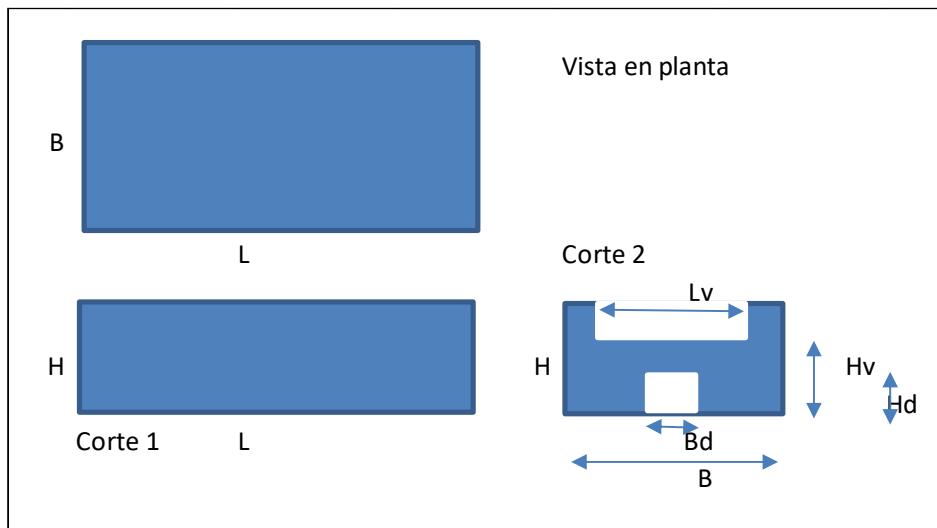


Figura 6.7 - Esquema geométrico de la laguna de retardo y dispositivos de descarga

Las dimensiones adoptadas se resumen en la Tabla 6.1, donde se observa que la laguna presenta $B = 60 \text{ m}$, $L = 60 \text{ m}$ y una altura útil $H = 1,30 \text{ m}$. El descargador de fondo posee una luz $Bd = 1 \text{ m}$ y altura $Hd = 1 \text{ m}$, mientras que el vertedero superficial tiene una luz $Lv = 8 \text{ m}$ y se ubica a una altura $Hv = 1,00 \text{ m}$.

Tabla 6.1-Dimensiones geométricas adoptadas para la laguna de retardo.

| | | |
|--------------------|---------------|-----|
| Laguna | B [m] | 60 |
| | L [m] | 60 |
| | H [m] | 1.3 |
| Desc. Fondo | Bd [m] | 1 |
| | Hd [m] | 1 |
| Vertedero | Lv [m] | 8 |
| | Hv [m] | 1 |

| | |
|--|-------------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 |
| Página 211 de 273 | |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | |



La relación entre volumen acumulado y altura del agua se muestra en la Figura 6.8, donde se aprecia la forma prácticamente lineal de la curva, coherente con un reservorio de planta rectangular y taludes verticales.

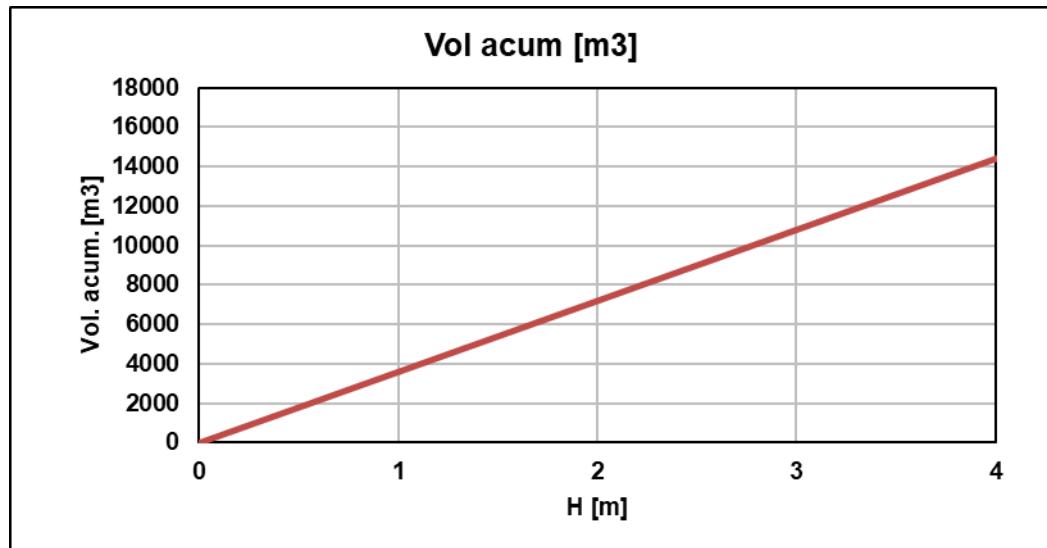


Figura 6.8 - Relación volumen-altura de la laguna

El hidrograma de ingreso a la laguna corresponde al hidrograma del loteo post-obra para TR = 25 años. Mediante un modelo de reservorio con descarga por orificio y vertedero se obtuvieron los hidrogramas de entrada y salida, presentados en la Figura 6.9. En esta figura se observa la fuerte atenuación del caudal pico producto del almacenamiento y de la regulación ejercida por el sistema de descarga.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 212 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

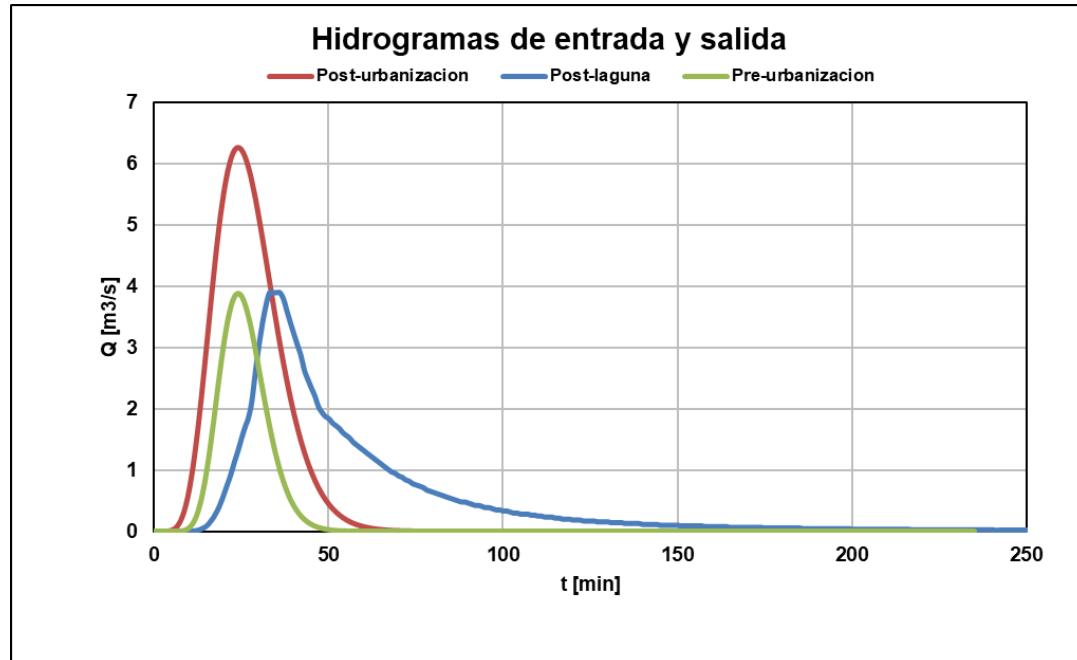


Figura 6.9 - Hidrogramas de entrada y salida de la laguna para TR = 25 años

Los caudales característicos se resumen en la Tabla 6.2-Caudales máximos de entrada y salida y porcentaje de atenuación (TR = 25 años).. El caudal máximo de entrada es $Q_{in,max} = 6,26 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el caudal máximo de salida es $Q_{out,max} = 3,90 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que implica una atenuación del orden del 38 %. Este valor de salida es prácticamente igual al caudal pico preobra, $Q_{fos0} = 3,88 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo que la laguna cumple la condición (1) de diseño.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 213 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Tabla 6.2-Caudales máximos de entrada y salida y porcentaje de atenuación (TR = 25 años).

| | |
|-------------------------------|------|
| Q in max [m ³ /s] | 6.26 |
| Q out max [m ³ /s] | 3.90 |
| Qfos0 TR 25 | 3.88 |
| % atenuación | 38% |

En la Figura 6.10 se muestra la evolución del nivel de agua en la laguna junto con la cota del vertedero. Se observa que la altura máxima alcanzada es del orden de 1,27 m, valor inferior a la altura máxima admisible de 1,30 m, por lo que se cumple la condición (3). Durante este evento de TR = 25 años, el vertedero entra en funcionamiento cuando el nivel supera la cota Hv = 1,10 m.

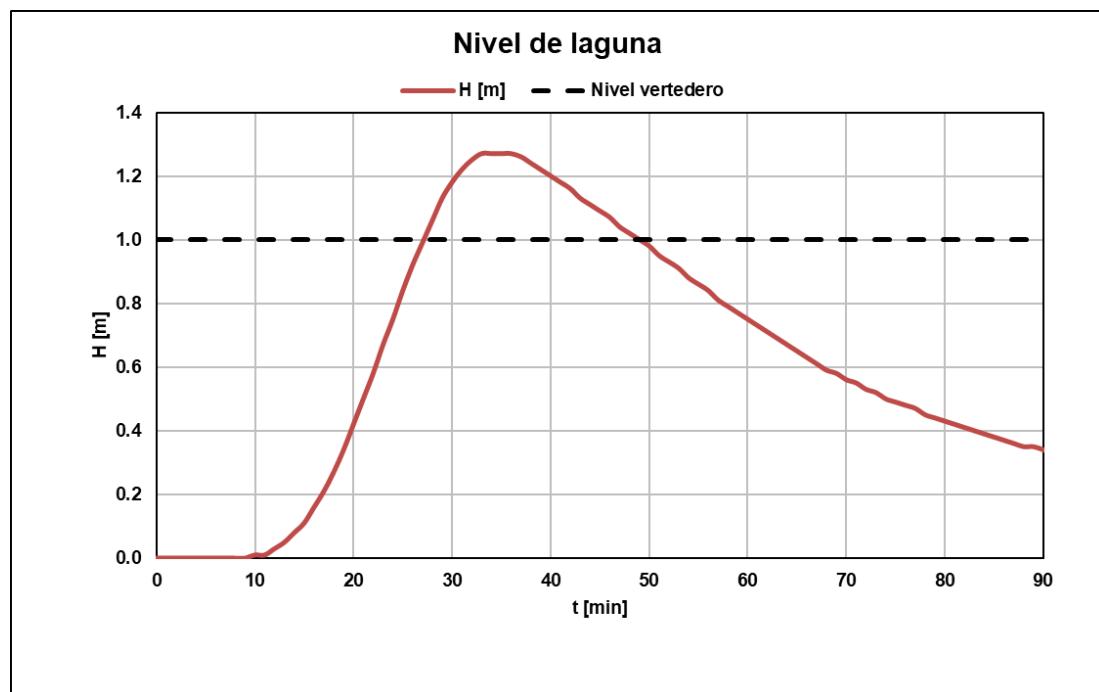


Figura 6.10 - Evolución del nivel de agua en la laguna y cota del vertedero para TR = 25 años

| | |
|--|-------------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | |



Si bien para el evento de 25 años el vertedero actúa, la condición (2) requiere que para la lluvia de TR = 5 años la regulación se produzca únicamente mediante el descargador de fondo, sin alcanzar la cota Hv. En el apartado siguiente se verifica esta condición, presentando los hidrogramas de entrada y salida y la evolución del nivel de la laguna para TR = 5 años.

Finalmente, se analizó el comportamiento de la laguna de retardo frente al evento de lluvia de TR = 5 años, con el fin de verificar la condición (2) del diseño: para este período de retorno, la descarga debe realizarse únicamente mediante el descargador de fondo, sin activar el vertedero superficial.

En la Figura 6.11 se presentan los hidrogramas de entrada y salida correspondientes al loteo bajo la lluvia de TR = 5 años. Como se observa, el hidrograma de ingreso presenta un caudal máximo considerablemente menor en comparación con el evento de 25 años, lo que permite que la laguna opere en régimen exclusivamente controlado por el orificio de fondo. El hidrograma de salida mantiene valores bajos y estables, sin presentar ascensos abruptos que indiquen la participación del vertedero.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 215 de 273 |
| <p>DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

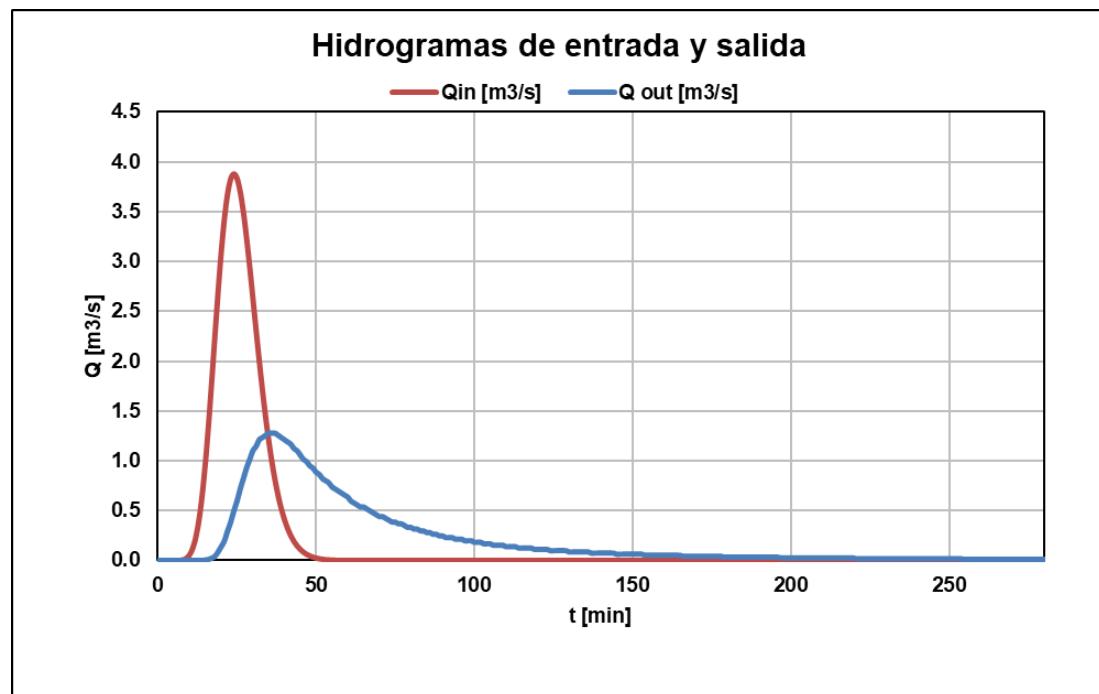


Figura 6.11 - Hidrogramas de entrada y salida de la laguna para TR = 5 años

El comportamiento del nivel de agua en la laguna se muestra en la Figura 6.12. La altura máxima alcanzada durante el evento es del orden de 0,73 m, valor inferior a la cota del vertedero ($H_v = 1,00$ m). Esto confirma que el vertedero no entra en funcionamiento para este período de retorno, cumpliendo plenamente la condición de diseño establecida.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 216 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

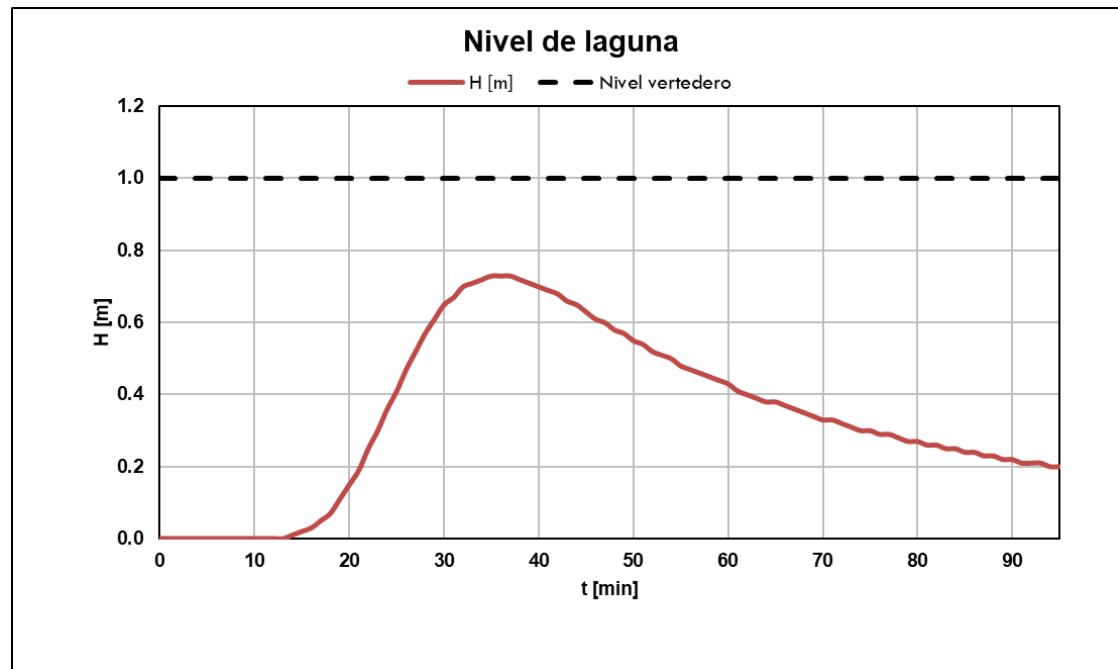


Figura 6.12 - Evolución del nivel de agua en la laguna para TR = 5 años

En síntesis, para el evento de TR = 5 años la laguna:

- opera únicamente mediante el descargador de fondo,
- no activa el vertedero en ningún momento,
- mantiene niveles bajos y controlados (máximo ~0,90 m),
- y garantiza una regulación adecuada del caudal, acorde a los requisitos normativos de impacto hidrológico nulo.

Con ello se verifican las condiciones de diseño (1), (2) y (3), quedando demostrada la eficiencia hidráulica y operativa de la laguna de retardo para los eventos de lluvia analizados.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 217 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Una vez analizado el funcionamiento de la laguna de retardo para el caso del loteo sin medidas sostenibles, se procede al dimensionamiento del reservorio para el escenario en el cual cada uno de los 1000 lotes incorpora un sistema LID de control de escorrentía. En este trabajo, el LID adoptado corresponde a un tanque de retardo individual, cuyo volumen mínimo eficaz fue determinado previamente en el Capítulo 5 y cuyo objetivo es reducir el caudal generado a nivel de parcela antes de su ingreso al sistema pluvial del loteo.

A modo de referencia, y con el objetivo de contextualizar el análisis posterior correspondiente a la lluvia de 25 años, la Figura 6.13 presenta nuevamente los hidrogramas generados por un lote estándar con tanque de retardo y sin tanque ante la lluvia de 5 años. En este escenario, la eficiencia del dispositivo se aprecia claramente: el caudal máximo se reduce de manera significativa y el hidrograma resultante se muestra más aplanado y extendido temporalmente, evidenciando la capacidad del tanque para controlar adecuadamente los eventos de menor severidad.

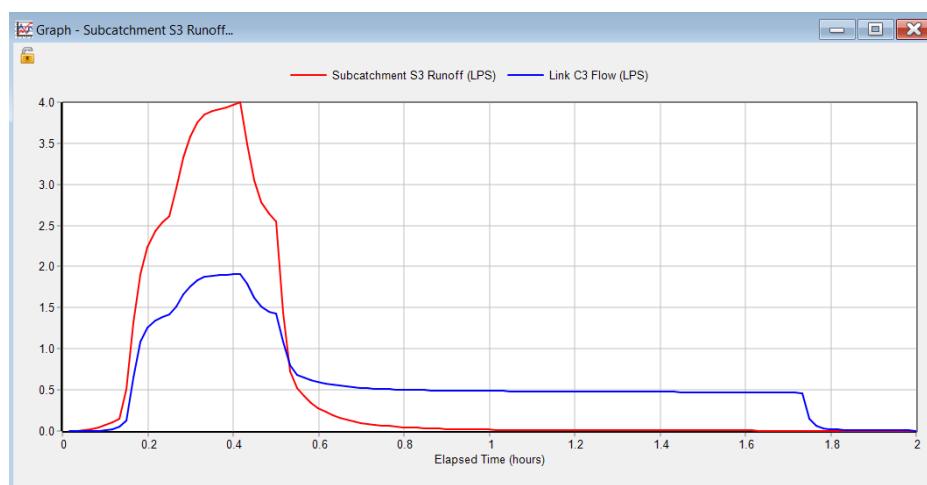


Figura 6.13 - Hidrogramas de escorrentía para lluvia de 5 años: comparación entre lote con tanque de retardo y lote sin tanque (caudal en L/s)

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 218 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Para el diseño del sistema de retardo considerando la incorporación de LID en cada parcela, se modeló nuevamente un lote individual, manteniendo la misma configuración geométrica utilizada en los casos anteriores: un área de 250 m², un ancho equivalente de 10 m, una pendiente del 1 % y un porcentaje de superficie impermeable del 50 %, correspondiente al FOS adoptado. La diferencia principal respecto del caso sin LID es la inclusión del tanque de retardo individual. Cabe recordar que su funcionamiento hidráulico, su volumen de diseño y su eficiencia para el evento de 5 años fueron analizados detalladamente en el Capítulo 5, donde se demostró su capacidad para reducir la escorrentía generada a nivel de lote dentro del evento para el cual fue dimensionado. A partir de ello, en este capítulo se evalúa su desempeño frente a una lluvia más severa, correspondiente a un período de retorno de 25 años, con el fin de determinar en qué medida el sistema LID sigue contribuyendo al control del caudal generado y cómo se integra su efecto en el dimensionamiento de la laguna de retardo proyectada para el loteo.

La Figura 6.14 muestra las propiedades de la subcuenca S3 utilizadas para este análisis, incluyendo la asignación del hietograma de diseño (TR = 25 años, duración 30 minutos), los parámetros de infiltración según el método del Número de Curva (CN) y la activación del control LID en el modelo. El esquema de modelado que se observa, con la secuencia de nodos, conducciones y el tanque retardador, ya fue presentado y explicado previamente al evaluar cuantitativamente la eficacia de los sistemas LID, por lo que aquí solo se muestran sus parámetros más relevantes.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 219 de 273 |
| <p>DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

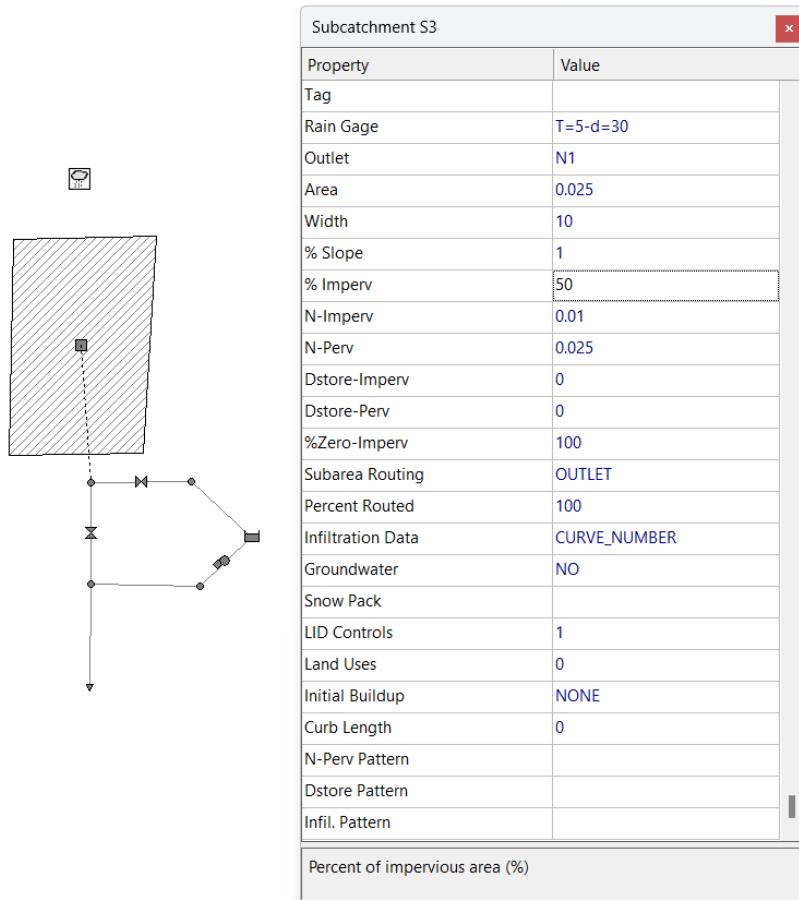


Figura 6.14 - Propiedades de la subcuenca S3 para el lote individual con LID modelado en EPA SWMM

A partir de la simulación del lote individual con tanque de retardo se obtuvieron los resultados que se resumen en la Figura 6.15. Allí se indican el caudal pico, el tiempo al pico y el volumen total de escorrentía erogada por el sistema lote–tanque. Para la lluvia de TR = 25 años el modelo arroja un caudal pico de 6,77 L/s, alcanzado aproximadamente a los 25 minutos, con un volumen total de $0,00713 \times 10^6$ L, es decir, 7,13 m³.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 220 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



| Summary Results | | | | | | | | |
|--------------------|---------|---|--------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------|
| Topic: Node Inflow | | Click a column header to sort the column. | | | | | | |
| Node | Type | Maximum Lateral Inflow LPS | Maximum Total Inflow LPS | Day of Maximum Inflow | Hour of Maximum Inflow | Lateral Inflow Volume 10^6 ltr | Total Inflow Volume 10^6 ltr | Flow Balance Error % |
| N5 | OUTFALL | 0.00 | 6.77 | 0 | 00:25 | 0 | 0.00713 | 0.000 |

Figura 6.15 - Resultados hidrológicos del lote con LID para TR = 25 años (caudal pico, tiempo al pico y volumen total)

En la Figura 6.16 se presentan los hidrogramas obtenidos en EPA SWMM: en rojo se muestra la escorrentía generada en el lote y en azul el caudal erogado por el tanque de retardo. El gráfico permite visualizar el efecto del LID sobre la forma del hidrograma: el caudal de salida se mantiene bajo durante la fase inicial, pero una vez que el tanque se llena, el gasto a través del sistema de descarga produce un pico más concentrado y ligeramente mayor que el de la escorrentía directa del lote.

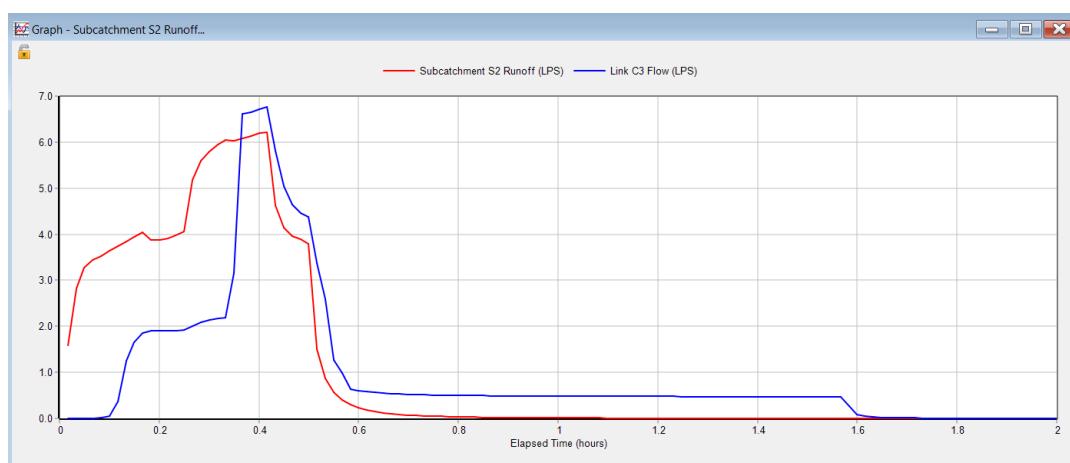


Figura 6.16 - Comparación entre el hidrograma de escorrentía del lote y el caudal erogado por el tanque de retardo (TR = 25 años)

| | |
|--|-------------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | |



Conviene remarcar que estos resultados difieren de los obtenidos en el Capítulo 5, donde se había analizado la eficacia del mismo tanque frente a una lluvia de TR = 5 años. En aquel caso, el volumen del tanque resultaba suficiente para laminar el caudal generado, obteniéndose una reducción clara del caudal pico respecto del lote sin LID. En cambio, bajo la lluvia de TR = 25 años considerada en este capítulo, el evento es más severo y el mismo volumen de almacenamiento resulta relativamente menor. Como consecuencia, el caudal pico erogado por el lote con tanque (6,77 L/s) se torna ligeramente superior al del lote urbanizado sin LID (6,26 L/s).

No obstante, el tanque sigue produciendo un efecto relevante sobre el volumen de escorrentía. El volumen total erogado por el lote con LID ($7,13 \text{ m}^3$) es inferior al del lote urbanizado sin tanque ($8,25 \text{ m}^3$), lo que indica una disminución del aporte volumétrico al sistema de drenaje. Además, el tiempo al pico también se modifica, pasando de aproximadamente 24 minutos en el caso sin LID a unos 25 minutos en el caso con tanque, lo que tendrá incidencia directa en la forma del hidrograma sintético del loteo al momento de definir el valor del PRF en el método HU-SCS.

Estos tres parámetros —caudal pico, tiempo al pico y volumen reducido— son los que se utilizaron para construir el hidrograma del loteo urbanizado con LID.

A partir del hidrograma del lote individual con tanque de retardo y mediante el mismo procedimiento explicado previamente, se construyó el hidrograma sintético correspondiente al loteo urbanizado con LID, considerando la descarga simultánea de los 1000 lotes del desarrollo. El hidrograma resultante se muestra en la Figura 6.17, donde se observa un caudal pico aproximado de $6,77 \text{ m}^3/\text{s}$, coherente con el escalamiento del caudal pico obtenido a nivel de parcela y conservando el tiempo al pico cercano a los 25 minutos. Este hidrograma

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 222 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



constituye el caudal de ingreso a la laguna de retardo para el caso del loteo urbanizado con tanques retardadores individuales.

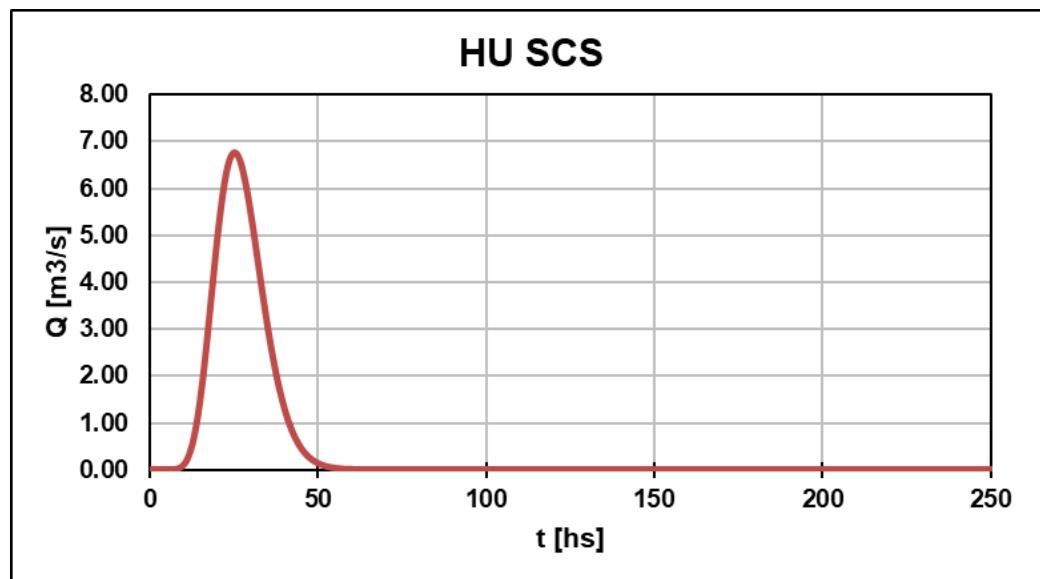


Figura 6.17 - Hidrograma sintético del loteo urbanizado con LID (método HU-SCS)

Con este hidrograma como ingreso, se procedió a dimensionar la laguna de retardo para el escenario con LID, manteniendo exactamente los mismos criterios de diseño que en el caso sin LID: reducir el caudal pico post-obra hasta igualar o ser inferior al caudal preobra de 3,88 m³/s, evitar la activación del vertedero para la lluvia de TR = 5 años, y limitar la altura máxima del agua a 1,30 m por razones de seguridad. A partir de distintas simulaciones se definieron las dimensiones de la laguna, las cuales se resumen en la Tabla 6.3, donde se observa un ancho de 62 m, un largo de 61 m y una altura máxima operativa de 1,30 m.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 223 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Tabla 6.3-Dimensiones adoptadas para la laguna de retardo en el escenario con LID.

| | | |
|--------------------|---------------|-----|
| Laguna | B [m] | 59 |
| | L [m] | 58 |
| | H [m] | 1.3 |
| Desc. Fondo | Bd [m] | 1 |
| | Hd [m] | 1 |
| Vertedero | Lv [m] | 8 |
| | Hv [m] | 1 |

Los hidrogramas de entrada y salida obtenidos para el evento de TR = 25 años se presentan en la Figura 6.18. Puede apreciarse la reducción significativa del caudal pico: el ingreso alcanza valores cercanos a 6,77 m³/s mientras que la salida se mantiene en torno a 3,9 m³/s.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 224 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Figura 6.18 - Hidrogramas de entrada y salida de la laguna de retardo con LID (TR = 25 años)

La evolución del nivel de agua en la laguna durante el evento se muestra en la Figura 6.19. La altura máxima alcanzada se mantiene por debajo del límite de 1,30 m, garantizando el cumplimiento del criterio de seguridad. Como es esperable para un evento severo, el vertedero entra en funcionamiento cuando el nivel supera la cota de 1,00 m.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 225 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

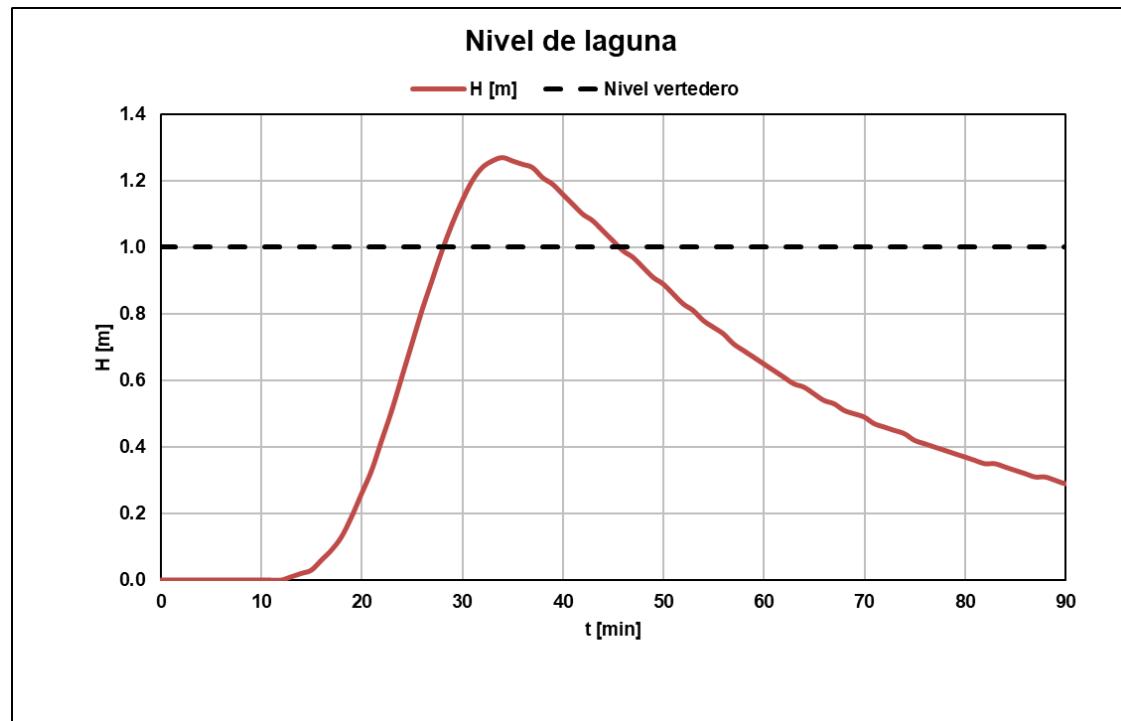


Figura 6.19 - Evolución del nivel de agua en la laguna con LID para TR = 25 años

Finalmente, se verificó el comportamiento de la laguna para el evento de TR = 5 años. Los hidrogramas de entrada y salida correspondientes se presentan en la Figura 6.20, donde se observa que los caudales son lo suficientemente bajos como para que la regulación se produzca únicamente mediante el descargador de fondo. Esto se confirma en la Figura 6.21, donde la lámina de agua permanece muy por debajo de la cota del vertedero, verificando que este no entra en operación. De esta manera, la laguna con LID cumple satisfactoriamente las condiciones de diseño establecidas.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 226 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

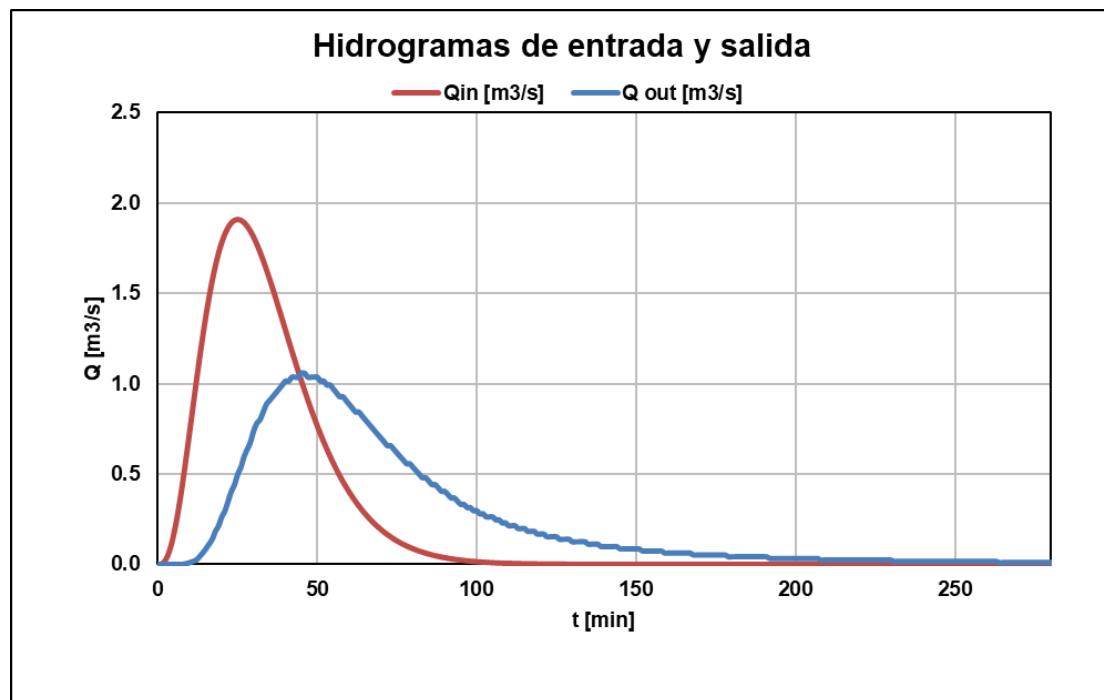


Figura 6.20 - Hidrogramas de entrada y salida de la laguna con LID para TR = 5 años

| | |
|--|-------------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | |

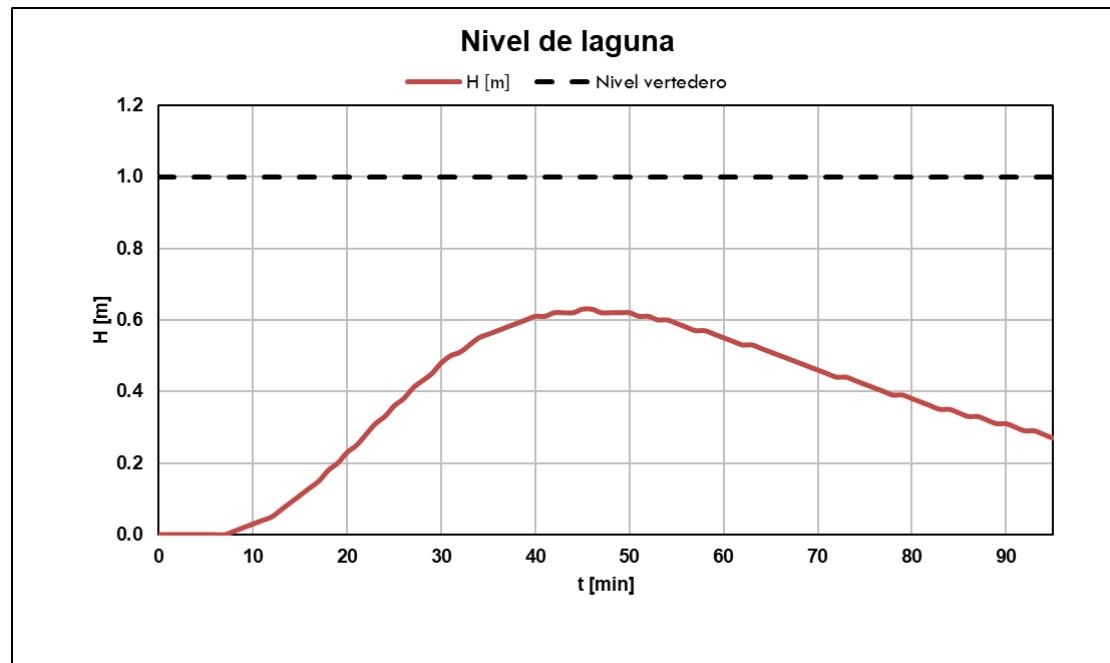


Figura 6.21 - Hidrogramas de entrada y salida de la laguna con LID para TR = 5 años

En definitiva, los resultados obtenidos para el caso analizado correspondiente a un loteo de 1000 parcelas de 250 m² y un FOS del 50 % evidencian que la incorporación de tanques de retardo a nivel de lote (sistema LID) genera una reducción en la demanda de almacenamiento de la laguna de retardo principal. Esta disminución se manifiesta tanto en la superficie de embalse requerida como en la altura máxima de la lámina de agua alcanzada durante los eventos de diseño.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 228 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



2. Evaluación de la diferencia de áreas entre ambas configuraciones.

En términos de superficie, el microembalse urbanizado sin medidas sostenibles requiere un área de aproximadamente 3600 m², mientras que al incorporar tanques de retardo individuales el área se reduce a 3422 m², lo que representa una diferencia de 178 m², equivalente a una disminución del 5 % respecto del diseño convencional. En otras palabras, el uso de sistemas LID permitiría recuperar una superficie útil del orden de 180 m², equivalente casi un lote adicional dentro del loteo analizado.

3. Cálculo de la altura del agua para un evento de diseño de TR = 5 años.

Para analizar el efecto que produce la incorporación de medidas LID en el comportamiento hidráulico del sistema bajo eventos de menor recurrencia, se evaluó la respuesta de la laguna originalmente dimensionada para el caso sin LID (TR = 25 años) frente a una lluvia de TR = 5 años para ambos escenarios: loteo sin LID y loteo con LID. Cabe recordar que, en el caso sin LID, la laguna diseñada presentó las dimensiones ya indicadas anteriormente en la Tabla 6.1, las cuales se mantienen sin modificación para este análisis comparativo.

En primer lugar, se aplicó el hidrograma correspondiente al loteo sin LID bajo el evento de TR = 5 años. El nivel máximo alcanzado por la laguna en este escenario fue de 0,65 m, valor que ya había sido presentado previamente en la Figura 6.12 y que se mantiene claramente por debajo de la altura máxima admisible de 1,30 m y sin activar el vertedero. Este resultado constituye la referencia sin medidas sostenibles para el evento de menor recurrencia.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 229 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Posteriormente, se aplicó sobre la misma laguna el hidrograma correspondiente al loteo con LID para $TR = 5$ años, manteniendo idénticas condiciones estructurales y parámetros de descarga. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 6.22, donde se observa que la altura máxima de la lámina de agua se reduce de forma notable, alcanzando valores del orden de 0,61 m. Esta disminución de aproximadamente 12 cm respecto del escenario sin LID evidencia el efecto amortiguador que producen los tanques de retardo en eventos moderados, aun cuando la laguna no haya sido diseñada específicamente para operar con ellos.

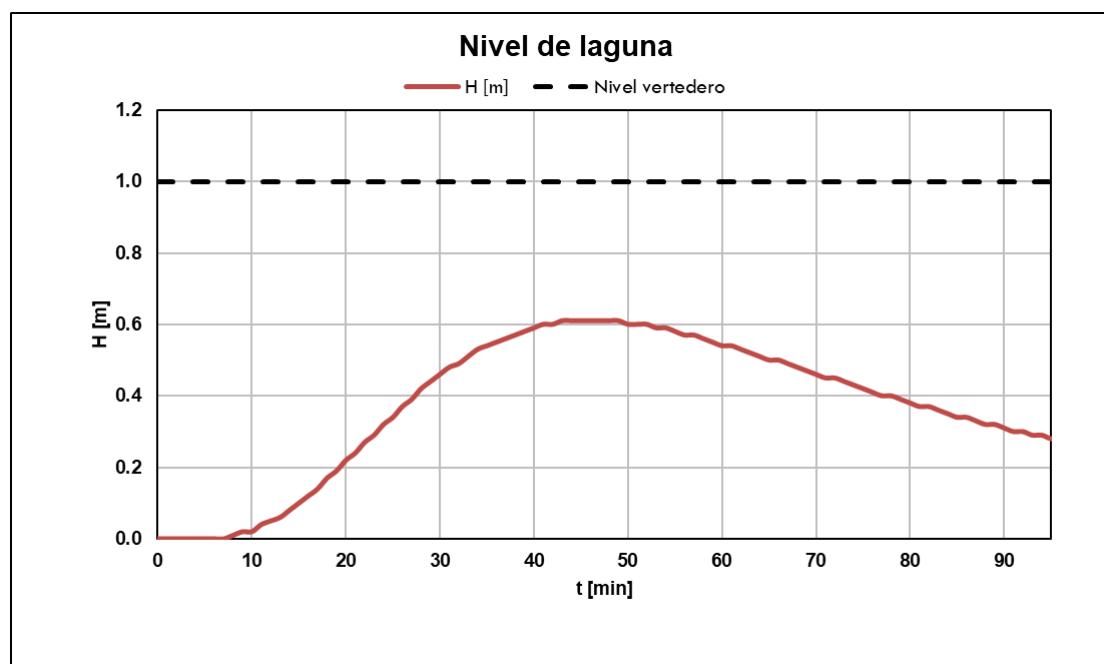


Figura 6.22 - Nivel en laguna diseñada sin LID, con lluvia TR = 5 años para loteo con LID (~0,60 m)

| | |
|--|-------------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | |



La diferencia entre ambos niveles máximos resulta relevante desde el punto de vista hidráulico, ya que confirma que la incorporación de medidas LID no solo reduce el caudal pico en eventos críticos, sino que también mejora las condiciones operativas de la infraestructura existente para lluvias frecuentes. Además, esta reducción de altura implica una mayor reserva de volumen y un funcionamiento más seguro y estable del sistema ante variaciones en la intensidad de precipitaciones.

4. Verificación de la altura de vertedero.

Con el fin de verificar la seguridad hidráulica de los microembalses diseñados, se evaluó la altura máxima alcanzada por la lámina de agua durante el evento crítico de TR = 25 años en cada una de las configuraciones. En el caso del microembalse dimensionado sin LID, la altura máxima registrada fue de 1,27 m, mientras que en el microembalse diseñado para el escenario con LID la altura máxima alcanzó un valor de 1,24 m. En ambos casos, los niveles obtenidos se mantuvieron por debajo de la altura límite establecida de 1,30 m, lo cual confirma que las estructuras operan dentro del rango seguro previsto durante el dimensionamiento.

Asimismo, se verificó que el funcionamiento del vertedero se mantuviera dentro de los parámetros esperados bajo el evento de diseño, sin generarse sobrepasos de la pared del reservorio ni derrames por fuera de la sección destinada a la evacuación controlada. De este modo, los resultados obtenidos permiten confirmar que los microembalses analizados —tanto el diseñado para el escenario sin LID como el correspondiente al escenario con LID— cumplen adecuadamente con los criterios de estabilidad y seguridad hidráulica establecidos, sin presentar riesgo de superar la capacidad operativa durante la lluvia de diseño.

Ambas alturas pueden observarse en las Figuras 6.10 y 6.19 respectivamente, donde se grafica el nivel de la laguna en función del tiempo para ambos casos.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 231 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



Finalmente, a modo de síntesis del comportamiento hidráulico y geométrico analizado a lo largo del presente apartado, en la Tabla 6.4 se presentan los parámetros más relevantes obtenidos para el caso base. En dicha tabla se incluyen las superficies requeridas para los microembalses con y sin la incorporación de medidas LID, la diferencia de áreas asociada, las alturas máximas alcanzadas para el evento de TR = 5 años con y sin LID para el microembalse diseñado sin LID, y las alturas correspondientes a la condición crítica vinculada al funcionamiento del vertedero para cada una de las configuraciones estudiadas. Estos valores permiten visualizar de manera integrada los resultados obtenidos y constituyen un resumen comparativo del desempeño de los sistemas evaluados.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 232 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Tabla 6.4-Resumen de resultados del caso base para los escenarios con y sin LID

| | |
|---|------|
| TR | 25 |
| Area | 250 |
| Fos | 50 |
| Cant. Lotes | 1000 |
| Microembalse Urbanizado [m²] | 3600 |
| Microembalse con LID [m²] | 3422 |
| Diferencia de áreas [m²] | 178 |
| Altura TR=5 c/LID para microembalse urbanizado sin LID | 0.61 |
| Altura TR=5 s/LID para microembalse urbanizado sin LID | 0.73 |
| h vertedero s/LID para microembalse urbanizado sin LID | 1.27 |
| h vertedero c/LID para microembalse urbanizado con LID | 1.24 |

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 233 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



6.5. Resultados generales

Luego de haber presentado el caso base, a continuación, se muestran los resultados obtenidos para las demás configuraciones. En las Figura 6.23 y Figura 6.24 se presentan los gráficos comparativos de los resultados obtenidos para los distintos escenarios de simulación, diferenciando entre los casos correspondientes a loteos de 1000 parcelas y aquellos de 100 parcelas. Cada gráfico representa de forma conjunta las variaciones de superficie del microembalse y altura máxima de lámina de agua ($TR = 5$ años), tanto con como sin la incorporación de sistemas LID.

Las barras indican el área requerida del microembalse en cada configuración (eje izquierdo), mientras que las líneas superpuestas reflejan la altura máxima alcanzada en el mismo evento de diseño (eje derecho). Se observa que, en todos los casos, la aplicación de tanques de retardo a nivel de lote (LID) produce una disminución en la superficie necesaria y una ligera reducción de la altura máxima del agua, evidenciando una mejora hidráulica moderada pero consistente.

Este comportamiento confirma la tendencia identificada en el caso base: las medidas LID descentralizadas contribuyen a reducir la demanda de almacenamiento global, aunque sin modificar de manera sustancial el funcionamiento hidráulico general de la laguna de retardo diseñada para eventos de mayor severidad ($TR = 25$ años).

La información completa utilizada para la elaboración de ambos gráficos incluyendo las superficies, alturas y diferencias de áreas obtenidas en cada simulación se encuentra detallada en la planilla incluida en el Anexo.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 234 de 273 |
| <p>DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |

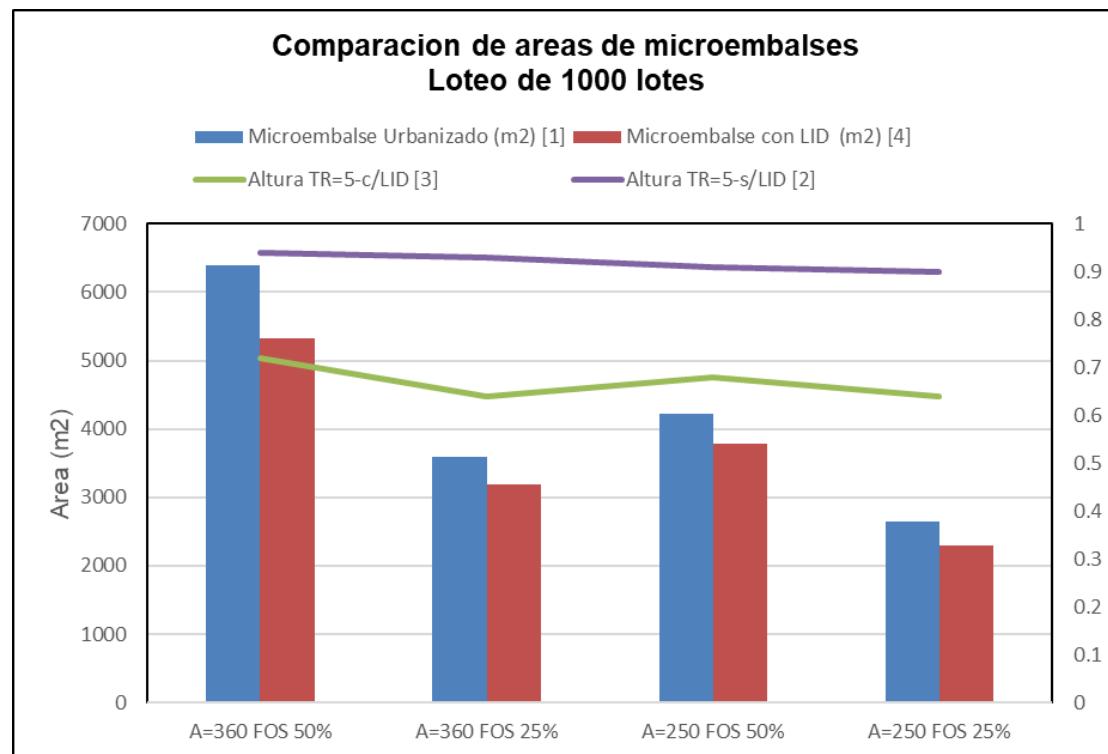


Figura 6.23 - Loteo de 1000 lotes con uso de LID y sin uso

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 235 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

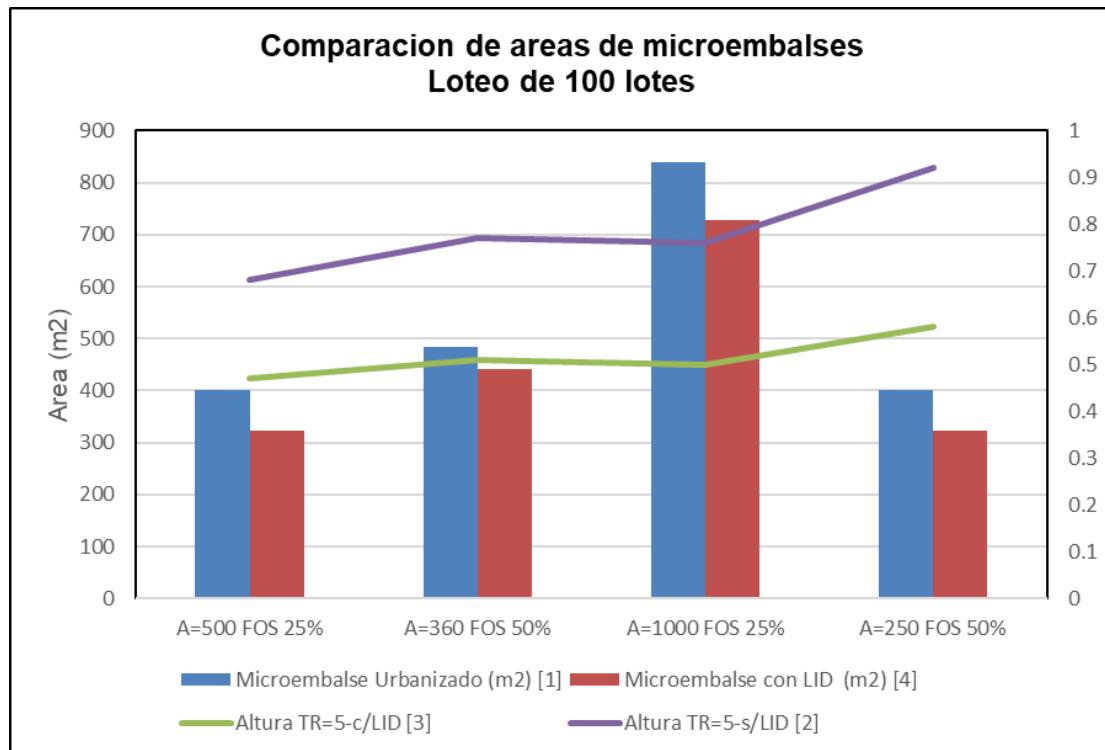


Figura 6.24 - Loteo de 100 lotes con uso de LID y sin uso

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 236 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



6.6. Conclusiones

El análisis realizado permitió evaluar de forma comparativa la eficacia de los tanques de retardo a nivel de lote sobre el dimensionamiento de una laguna de retardo general en un loteo urbano. Los resultados confirman que la implementación de sistemas LID descentralizados contribuye efectivamente a disminuir la demanda de almacenamiento global, aunque en una magnitud limitada frente a la escala del problema.

Si bien se observa una mejora hidráulica consistente en todos los escenarios —manifestada en menores alturas de lámina y menores volúmenes requeridos—, la reducción del tamaño del embalse no alcanza valores que justifiquen por sí solos la adopción de tanques individuales como estrategia económica para el desarrollador. No obstante, desde una perspectiva ambiental y de gestión sostenible, la combinación de ambos sistemas (tanques + laguna) representa una solución integral, capaz de mejorar la eficiencia hidráulica y la resiliencia del conjunto urbano frente a eventos extremos.

El estudio pone en evidencia la necesidad de integrar las estrategias de control a distintas escalas, promoviendo un enfoque sistémico en el diseño de drenaje urbano sostenible. En este sentido, las medidas LID a nivel de lote pueden considerarse un complemento eficaz para optimizar el funcionamiento de las lagunas de retardo y reducir la presión sobre los sistemas de evacuación públicos, contribuyendo a un modelo de urbanización más equilibrado y ambientalmente responsable.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 237 de 273 |
| <p>DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



Capítulo 7. Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones generales de este Trabajo Final, organizadas en tres partes con el fin de ofrecer una visión completa y estructurada del trabajo desarrollado. En primer lugar, se exponen las conclusiones del trabajo realizado, donde se sintetizan los principales aportes técnicos, metodológicos y conceptuales alcanzados. Luego, se incluyen las conclusiones personales, que reflejan nuestra experiencia formativa, los conocimientos adquiridos y la mirada crítica que construimos a lo largo del proceso. Finalmente, se detallan los trabajos futuros, orientados a las líneas de investigación y desarrollo que consideramos relevantes para avanzar en el estudio del impacto hidrológico urbano y en la implementación de soluciones sostenibles.

7.1. Conclusiones del trabajo realizado

A continuación, se resumen las principales conclusiones alcanzadas en este Trabajo Final, las cuales reflejan el recorrido realizado desde la comprensión básica del comportamiento hidrológico del lote hasta la evaluación integral de las estrategias de mitigación más eficientes.

El trabajo permitió entender en profundidad cómo la urbanización modifica el comportamiento hidrológico del terreno y cuáles son las variables que realmente gobiernan el aumento del caudal a nivel de lote. El análisis de sensibilidad mostró que el Número de Curva (CN) y el Factor de Ocupación del Suelo (FOS) son los parámetros con mayor incidencia sobre el caudal pico, debido a su relación directa con la infiltración y la impermeabilización efectiva del lote. Otras variables como pendiente, forma o área influyen en el tiempo al pico, pero su

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 238 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



impacto es claramente secundario frente a la dominancia del CN y el FOS, lo que permitió establecer una base sólida para el modelado hidrológico posterior.

A partir de estos resultados, el Trabajo Final avanzó hacia la definición cuantitativa del caudal preurbanización (Q_0) y del incremento generado por la urbanización, definido como Urban Impact. Esto dio lugar a uno de los aportes centrales del trabajo: el desarrollo de ecuaciones e indicadores propios (UI, LID_0 , LID_f), junto con ajustes polinómicos y relaciones funcionales que permiten estimar el caudal de diseño sin necesidad de modelaciones complejas. Estas herramientas representan un avance metodológico significativo, ya que facilitan la evaluación del impacto hidrológico y ofrecen un procedimiento práctico para profesionales y organismos de control.

Sobre las bases formuladas, se evaluó el funcionamiento de los tanques de retardo a nivel de lote, demostrando su alta eficacia frente a tormentas frecuentes. Para un período de retorno de 5 años, los tanques lograron reducciones muy marcadas del caudal pico: en lotes con baja impermeabilización fueron capaces de reproducir las condiciones del terreno natural, y en escenarios más comprometidos redujeron el caudal hasta en 40–50%, mostrando un desempeño sobresaliente. Además, se desarrollaron ecuaciones y un ábaco que permiten dimensionar el volumen mínimo del tanque con alta precisión, aportando una herramienta de aplicación directa en el diseño cotidiano.

No obstante, el análisis también permitió identificar los límites estructurales de esta estrategia. La normativa provincial exige cumplir impacto hidrológico nulo para un evento de T.R. = 25 años, equivalente a una lluvia extraordinariamente intensa de aproximadamente 45 mm en solo 15 minutos, un volumen difícil de manejar incluso para obras hidráulicas de mayor escala. Bajo esta condición extrema, los tanques de retardo requerirían volúmenes superiores a los 10, 20 o incluso 30 m³ por lote, tornándose inviables desde el punto de vista técnico,

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 239 de 273 |
| <p>DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



económico y constructivo. Además, la rapidez con la que se genera escorrentía en un evento tan severo supera la capacidad de regulación gradual del tanque, confirmando que esta solución no puede por sí sola asegurar el cumplimiento normativo.

El análisis de lagunas de retardo a nivel de loteo permitió contrastar ambas estrategias y comprender el rol complementario que cada una ocupa dentro del drenaje urbano. La laguna, diseñada mediante el método de Puls, mostró un comportamiento estable y suficiente para afrontar eventos de 25 años, garantizando el impacto hidrológico nulo exigido. Si bien la incorporación de tanques a nivel de lote generó mejoras reducciones del 10–12% en superficie de embalse y disminución de la altura máxima de lámina, dichas mejoras no alteran sustancialmente la capacidad global de la laguna frente a eventos extremos. En cambio, sí aportan eficiencia para tormentas habituales, mejorando el desempeño cotidiano del sistema.

En conclusión, este trabajo demuestra que la urbanización genera un impacto hidrológico significativo, pero que puede ser evaluado y mitigado mediante herramientas simples y modelos reproducibles. Los tanques de retardo constituyen una solución de alto rendimiento para lluvias frecuentes, mientras que las lagunas aseguran el control ante eventos extraordinarios. La evidencia obtenida es clara: la solución óptima no reside en escoger entre medidas descentralizadas o centralizadas, sino en integrarlas, permitiendo conformar un sistema de drenaje moderno, eficiente y ambientalmente sostenible.

7.2. Conclusiones personales

A nuestro parecer, el desarrollo de este Trabajo Final representó una experiencia formativa profundamente enriquecedora, tanto desde lo técnico como desde lo profesional. El trabajo nos permitió comprender con mayor claridad el impacto real que produce la urbanización sobre el ciclo hidrológico, especialmente en términos de pérdida de infiltración,

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 240 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



aceleración de la escorrentía y amplificación de los caudales pico. Aunque estos conceptos suelen estudiarse de manera teórica, su modelación concreta en distintos escenarios nos permitió dimensionar la magnitud del problema y valorar la importancia de incorporar criterios hidrológicos desde las primeras etapas del diseño urbano.

Asimismo, el análisis exhaustivo de alternativas de mitigación nos brindó una visión más amplia sobre las medidas que pueden aplicarse para reducir el riesgo de inundaciones ordinarias, desde soluciones tradicionales como las lagunas de retardo, hasta estrategias más modernas y descentralizadas como los tanques de retardo y el conjunto de prácticas LID. Esto nos permitió reflexionar sobre la necesidad de combinar herramientas y escalas de intervención para lograr un drenaje verdaderamente sostenible.

Otro aprendizaje significativo fue descubrir que muchas de estas medidas pueden implementarse hoy mismo en zonas ya urbanizadas, sin necesidad de grandes obras. Los sistemas LID, en particular, abren un camino realista para mejorar el comportamiento hidrológico de las ciudades existentes, ofreciendo soluciones modulares, escalables y compatibles con entornos consolidados.

Por otra parte, el proceso de modelación con EPA SWMM constituyó un crecimiento técnico muy valioso. El manejo del software, la calibración de parámetros hidrológicos y la interpretación de resultados nos permitió desarrollar competencias que trascienden esta investigación y que sin duda serán aplicables en nuestra actividad profesional futura. Aprendimos a pensar los problemas hidrológicos no solo desde la teoría, sino desde su traducción a modelos, hipótesis y simulaciones cuantitativas.

En síntesis, el trabajo nos permitió profundizar en el entendimiento del fenómeno hidrológico urbano, valorar el potencial de las soluciones sostenibles y fortalecer habilidades

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 241 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



técnicas que consideramos fundamentales para desempeñarnos como profesionales comprometidos con el diseño de ciudades más seguras, resilientes y responsables con el ambiente.

7.3. Trabajos futuros

A partir de los resultados obtenidos y de las oportunidades detectadas durante el desarrollo de esta investigación, se identifican diversas líneas de trabajo que podrían profundizar y complementar los aportes del Trabajo Final.

En primer lugar, resulta relevante avanzar en una evaluación del impacto hidrológico de un lote y de un loteo en distintas zonas y tipologías urbanas, considerando variaciones regionales en clima, suelo, pendiente y densidad constructiva. La metodología desarrollada en este Trabajo Final podría adaptarse para analizar comportamientos hidrológicos propios de otras provincias o localidades, permitiendo generar curvas de referencia y modelos simplificados específicos para cada región.

Asimismo, sería valioso profundizar en políticas ambientales amigables aplicables a nuevos loteos, incorporando medidas LID desde la etapa de diseño urbano. Esto incluye no solo tanques de retardo, sino también pavimentos permeables, zanjas de infiltración, jardines de lluvia y demás soluciones que permitan reducir el impacto hidrológico antes de que la urbanización quede consolidada. El objetivo es avanzar hacia un enfoque preventivo y no reactivo, donde la mitigación forme parte integral del proyecto y no un agregado posterior.

Otra línea de trabajo prioritaria es el desarrollo de políticas de remediación para zonas totalmente urbanizadas, especialmente en áreas que presentan inundaciones frecuentes. En estos casos, donde las posibilidades de intervención son más limitadas, se vuelve

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 242 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



fundamental explorar soluciones descentralizadas como sistemas de almacenamiento modular, microembalses urbanos, o LID adaptados a espacios reducidos— y estrategias combinadas que permitan mejorar el drenaje sin requerir grandes obras de infraestructura.

Finalmente, se propone profundizar en medidas que permitan reducir las áreas destinadas a lagunas de retención en los loteos, sin afectar su desempeño hidráulico. Esto podría incluir el uso combinado de tanques de retardo, mejoras geométricas en el diseño de microembalses, vertederos más eficientes o estrategias híbridas que permitan disminuir el volumen total necesario sin comprometer el cumplimiento de la normativa para eventos extremos. Este tipo de análisis permitiría optimizar el uso del suelo, reducir costos y mejorar la integración urbanística de las obras de retención.

En conjunto, estas líneas de investigación representan una continuidad natural del trabajo realizado y contribuyen a consolidar un modelo de drenaje urbano más eficiente, adaptable y ambientalmente responsable.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 243 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Capítulo 8. Bibliografía

- Bedient, P. B., & Huber, W. C. (2013). *Hydrology and Floodplain Analysis* (5th ed.). Pearson.
- Bertoni, J. C. (2004). *Manual de hidrología aplicada*.
- Canholi, A. P. (2015). *Drenaje Urbano*. Oficina de Textos.
- Chow, V. T. (1964). *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Green, W. H., & Ampt, G. A. (1911). Studies on soil physics. *Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1–24.
- Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union*, 14, 446–460.
- Instituto Nacional del Agua – CIRSA. (s.f.). *Curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF)*.
<https://www.ina.gov.ar/cirsa/index.php?seccion=5>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). (2016). *Clasificación de suelos y parámetros hidrológicos asociados*. INTA.
- Municipio de Guayaquil. (2016). *Manual de Drenaje Urbano de Guayaquil*. Dirección de Obras Públicas.
- Organización Meteorológica Mundial (WMO). (2011). *Manual de prácticas hidrológicas* (Vols. I-II). WMO.
- Prontubeam. (s.f.). *Cuenca hidrográfica: definición, partes y características*.
https://prontubeam.com/articulos/articulos.php?Id_articulo=26
- Rossman, L. (2010). *Storm Water Management Model – Applications Manual*. U.S. EPA.

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 244 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Rossmann, L., & Huber, W. (2016). *Storm Water Management Model Reference Manual – Volume I: Hydrology*. U.S. EPA.

Tucci, C. E. M. (1998). *Inundaciones Urbanas en América Latina*. UNESCO.

United States Department of Agriculture (USDA) – Soil Conservation Service (SCS). (1972). *National Engineering Handbook. Section 4: Hydrology*. USDA.

United States Department of Agriculture (USDA) – Soil Conservation Service (SCS). (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds (TR-55)*. USDA.

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2015). *Storm Water Management Model (SWMM) – User's Manual Version 5.1*. EPA Office of Research and Development.

Viessman, W., Lewis, G. L., & Knapp, J. W. (1989). *Introduction to Hydrology*. Harper & Row.

Wikipedia. (2023). *Cuenca hidrográfica*. https://es.wikipedia.org/wiki/Cuenca_hidrogr%C3%A1fica

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 245 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Capítulo 9. Anexo I: Figuras

ÁREA

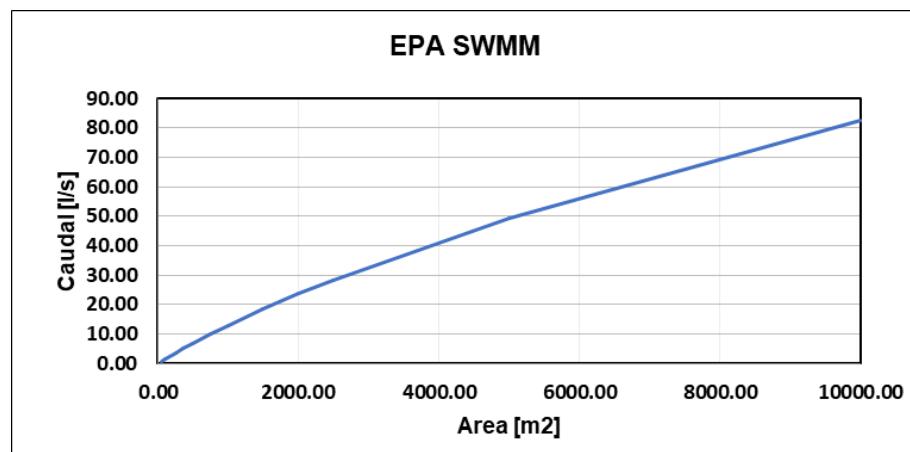


Figura 9.1 - Relación Caudal–Área para T.R. = 10 años

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 246 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



FORMA

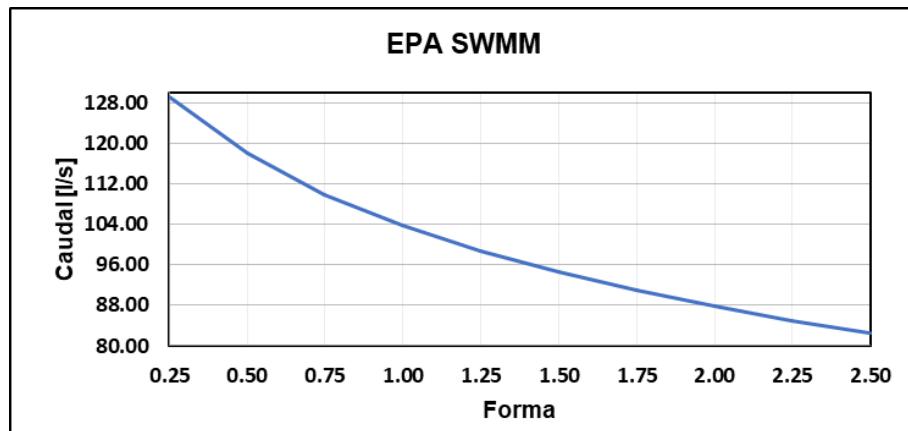


Figura 9.2 - Gráfico de variación del caudal en función de la forma de la cuenca para un T.R. = 10 años
y $A = 1000 \text{ m}^2$

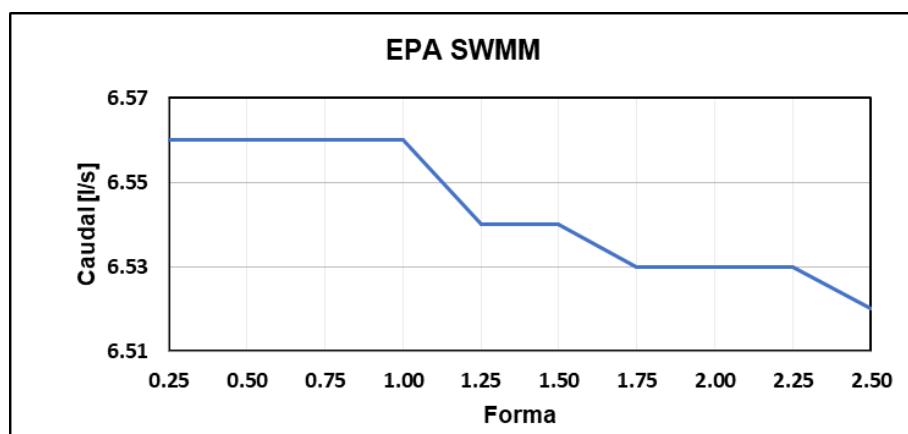


Figura 9.3 - Gráfico de variación del caudal en función de la forma de la cuenca para un T.R. = 100 años
y $A = 360 \text{ m}^2$

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 247 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

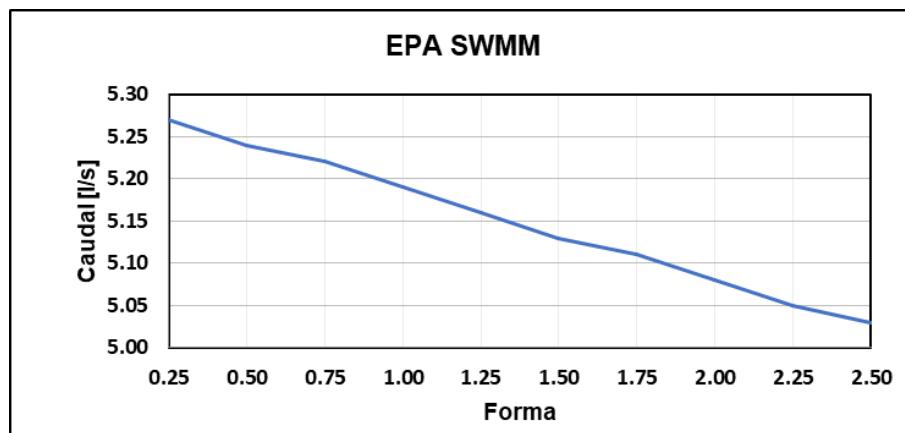


Figura 9.4 - Gráfico de variación del caudal en función de la forma de la cuenca para un T.R. = 10 años y $A = 360 \text{ m}^2$

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 248 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



CURVA NÚMERO

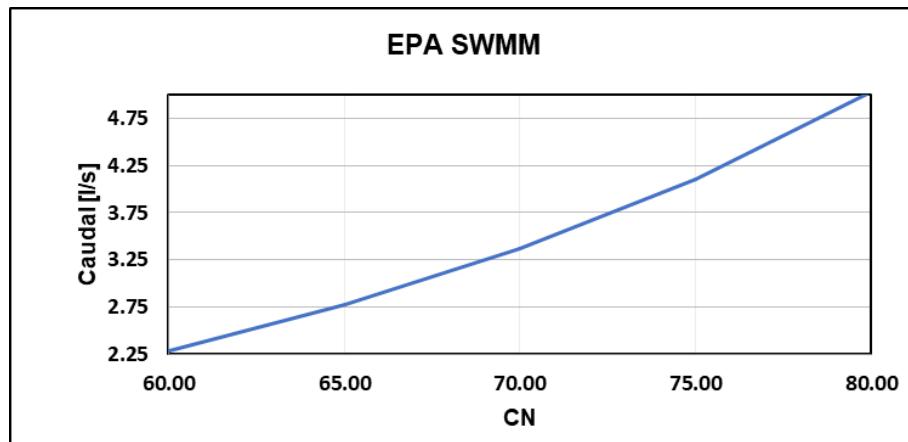


Figura 9.5 - Gráfico comparativo de caudal pico en función del número de curva (CN) TR=10 años

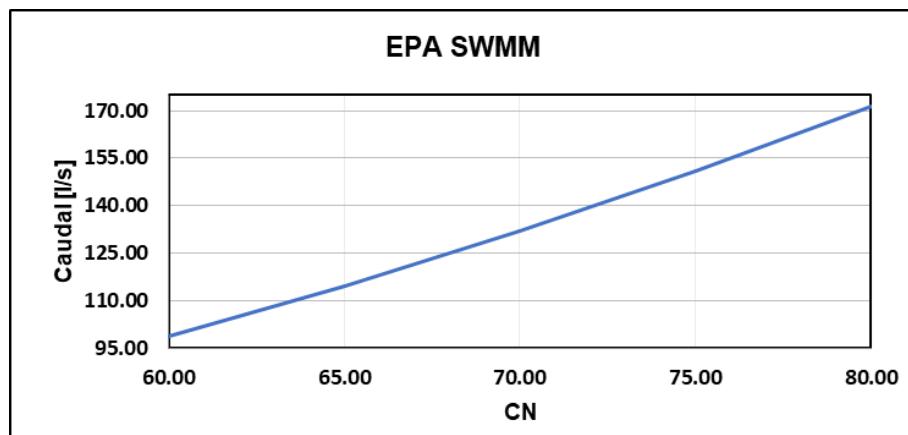


Figura 9.6 - Gráfico comparativo de caudal pico en función del número de curva (CN) TR=100 años

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 249 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

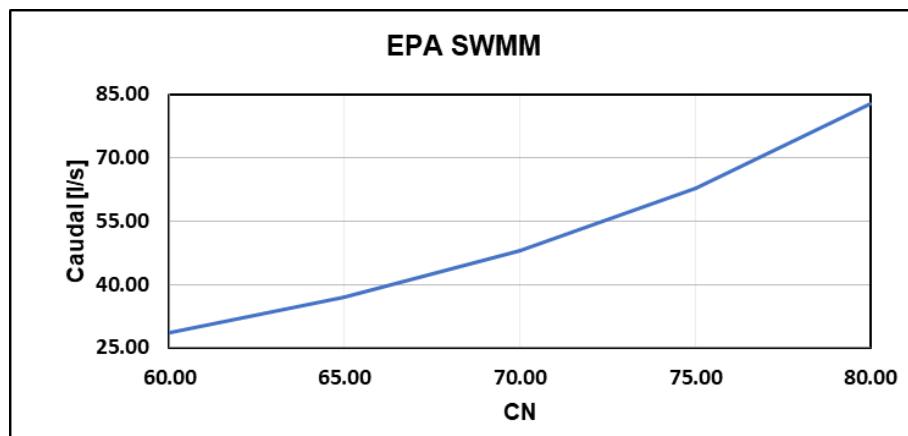


Figura 9.7 - Gráfico comparativo de caudal pico en función del número de curva (CN) TR=10 años

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 250 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



PENDIENTE

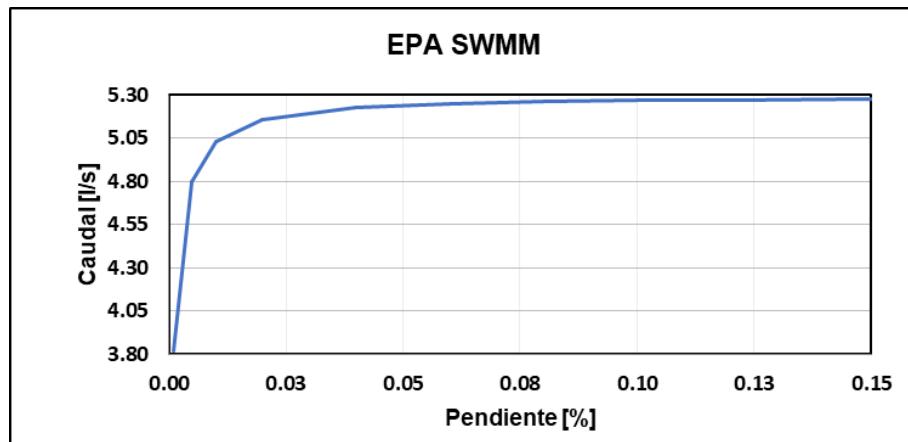


Figura 9.8 - Gráfico de variación del caudal pico en función de la pendiente de la cuenca $A=360$ TR=10 años

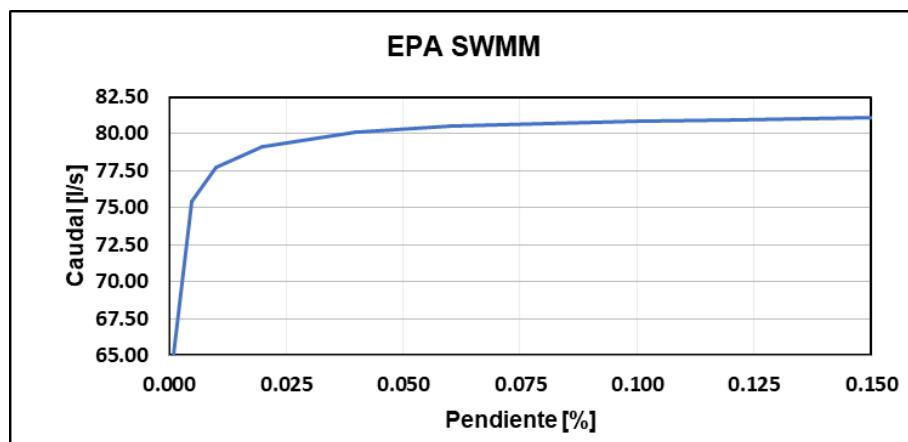


Figura 9.9 - Gráfico de variación del caudal pico en función de la pendiente de la cuenca $A=5000$ m² TR=100 años

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 251 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

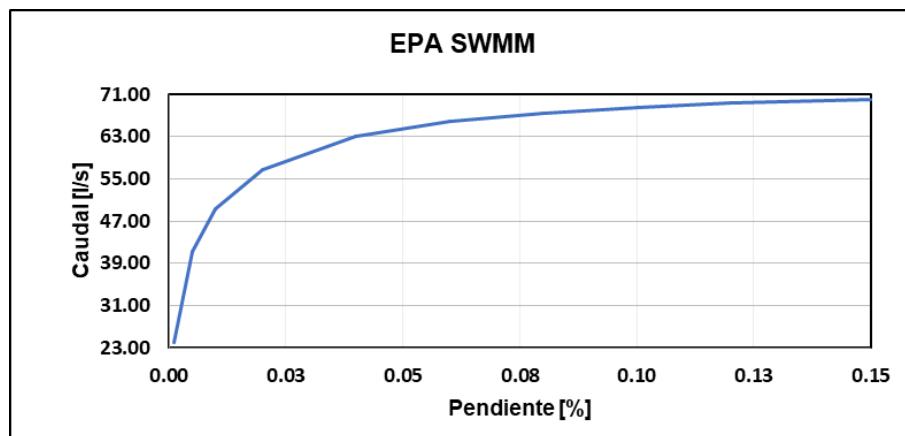


Figura 9.10 - Gráfico de variación del caudal pico en función de la pendiente de la cuenca A=5000 m²
TR=10 años

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 252 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



FOS

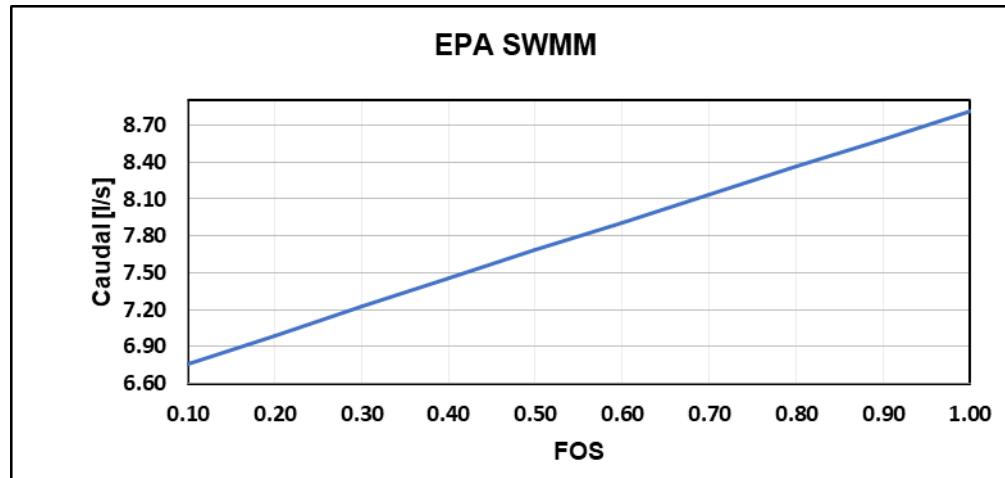


Figura 9.11 - Gráfico de variación del caudal pico en función del FOS (%) A=360 m² TR=10 años

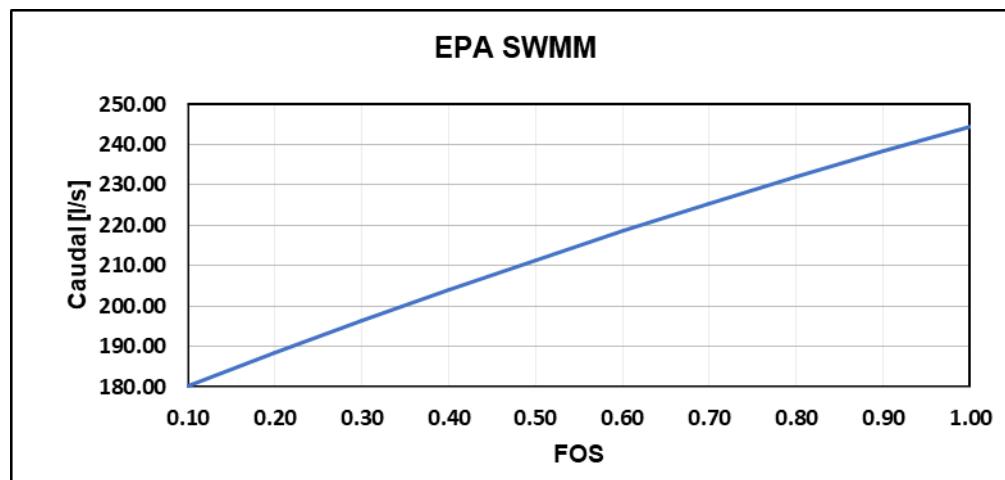


Figura 9.12 - Gráfico de variación del caudal pico en función del FOS (%) A=10000 m² TR=100 años

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 253 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



DURACION CRITICA DE LLUVIA

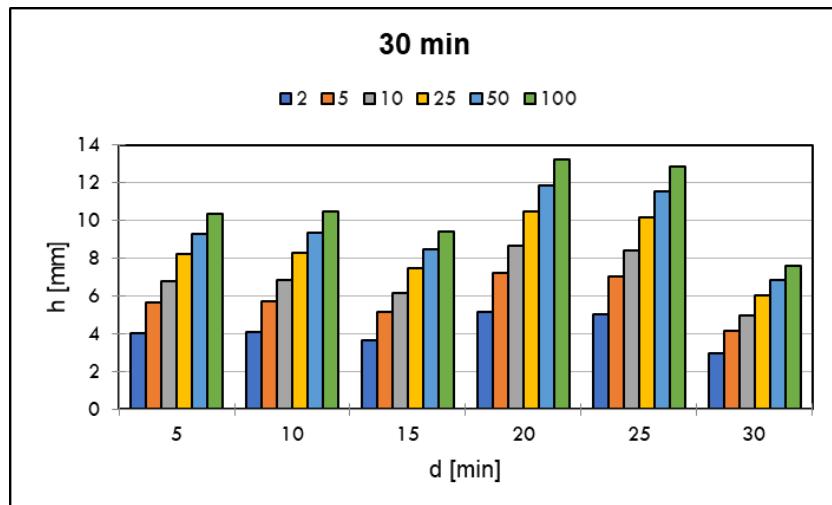


Figura 9.13 - IDT de Córdoba d=30 (min)

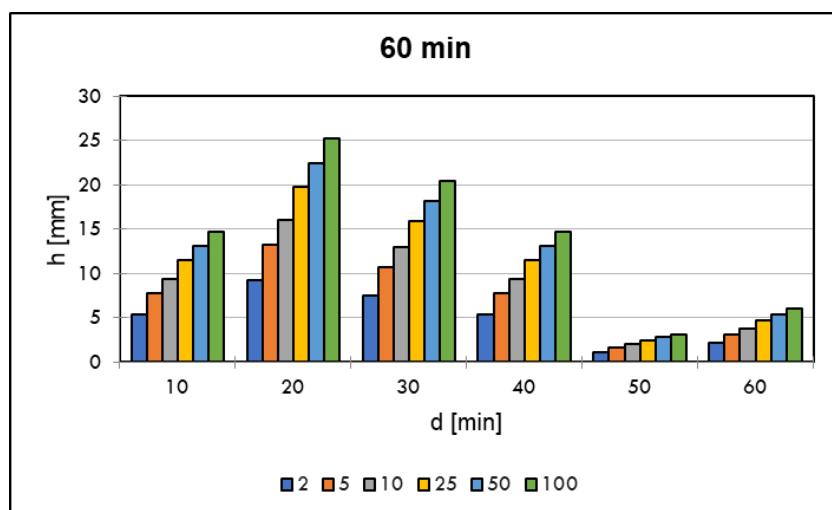


Figura 9.14 - IDT de Córdoba d=60 (min)

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 254 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

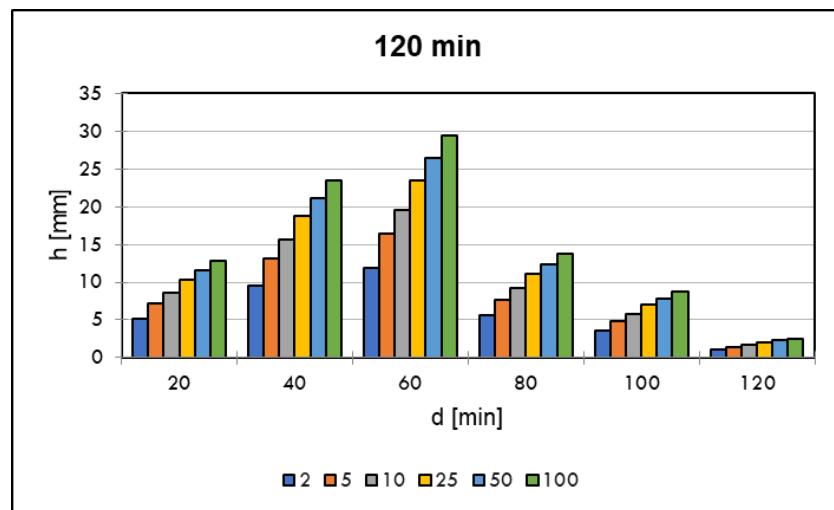


Figura 9.15 - IDT de Córdoba $d=120$ (min)

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 255 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



GRAFICOS DE SIMULACIONES DE DURACION CRITICA

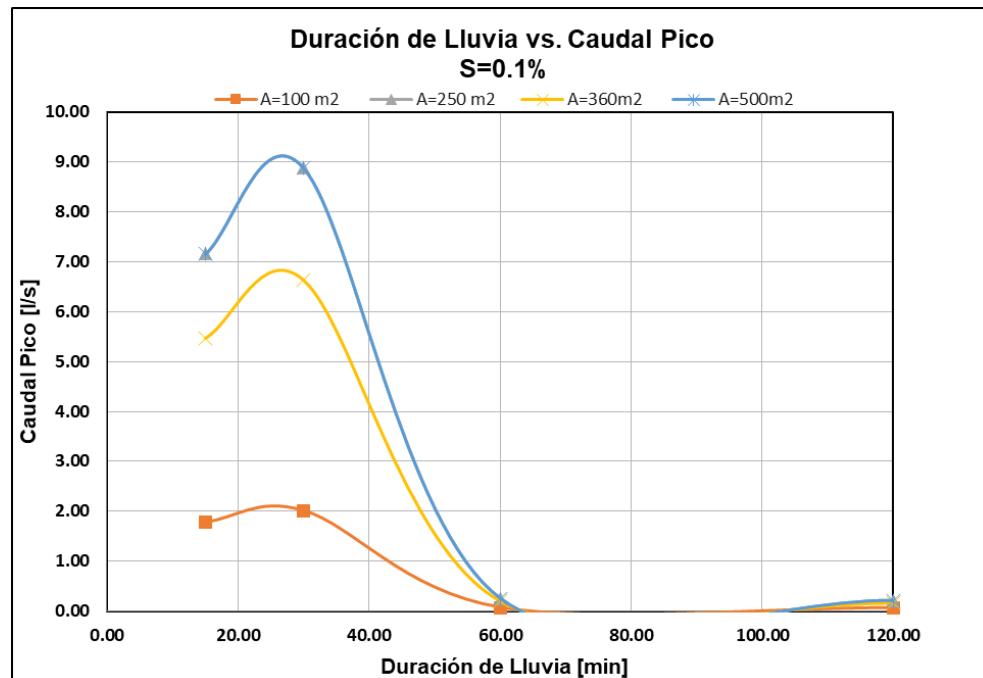


Figura 9.16 - Duración critica de lluvia-S=0.1%

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 256 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

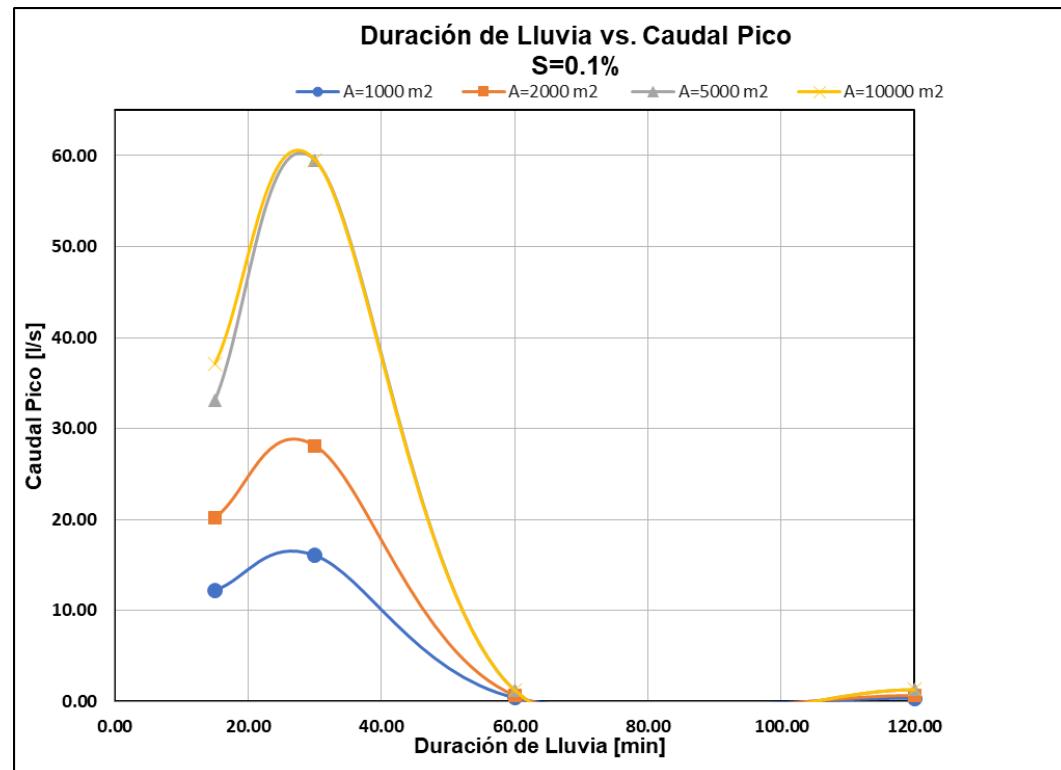


Figura 9.17 - Duración critica de lluvia-S=0.1%

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 257 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

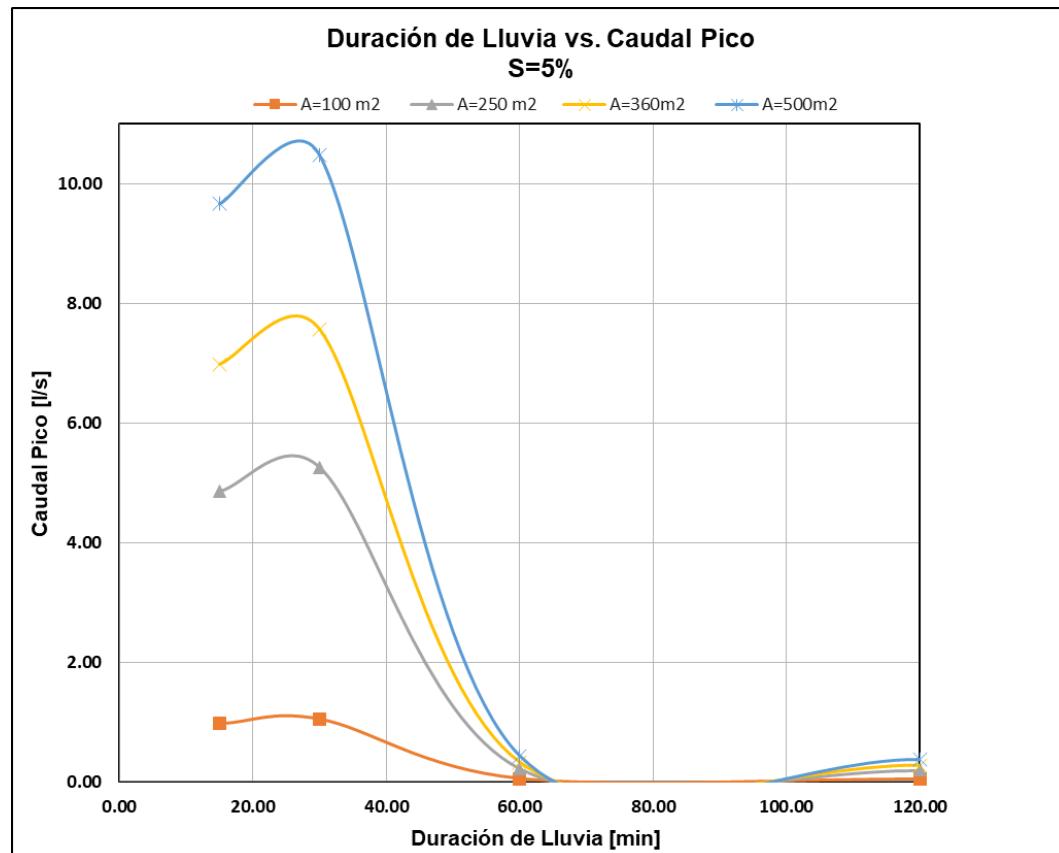


Figura 9.18 - Duración critica de lluvia-S=5%

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 258 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |

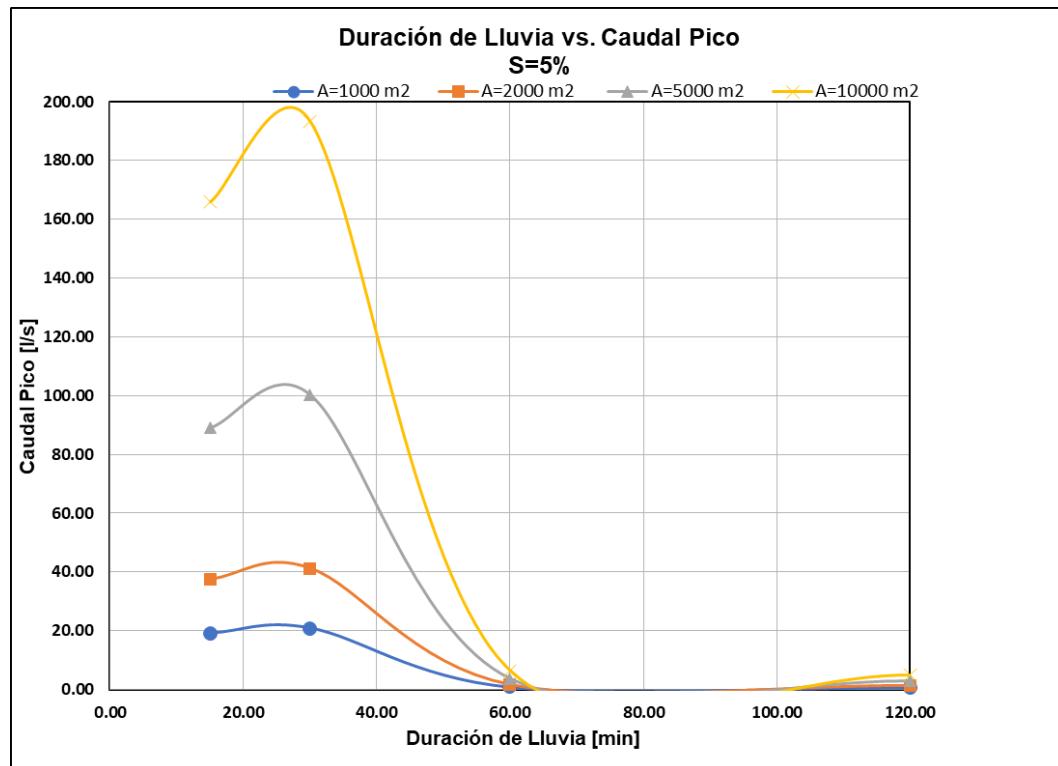


Figura 9.19 - Duración critica de lluvia-S=5%

| | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 259 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Capítulo 10. Anexo II: Tablas

Tabla 10.1-Variación del caudal en función del área de la cuenca para un T.R. = 100 años

| Nº | PARÁMETROS | | | | | | | | | | Racional | | | | EPA SWMM | | DIFERENCIAS | |
|------|---------------------|------|------|-------|---------|----------|--------------|-------------|----------|------|----------|------|---------|-------|----------|---------------------|-------------|--|
| | A [m ²] | S | L/W | CN | n perm. | n imper. | Lluvia [min] | T.R. [años] | i [mm/h] | FOS | Q [l/s] | C | Q [l/s] | C | Δ | Dif. Porcentual [%] | | |
| ÁREA | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 50.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 0.21 | 0.33 | 0.91 | 0.590 | -0.70 | -77% | | |
| 2 | 100.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 0.42 | 0.33 | 1.82 | 0.590 | -1.40 | -77% | | |
| 3 | 250.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.04 | 0.33 | 4.54 | 0.590 | -3.50 | -77% | | |
| 4 | 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.50 | 0.33 | 6.52 | 0.590 | -5.02 | -77% | | |
| 5 | 500.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 2.09 | 0.33 | 9.05 | 0.590 | -6.96 | -77% | | |
| 6 | 750.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 3.13 | 0.33 | 13.53 | 0.590 | -10.40 | -77% | | |
| 7 | 1000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 4.18 | 0.33 | 18.00 | 0.588 | -13.82 | -77% | | |
| 8 | 1500.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 6.26 | 0.33 | 26.89 | 0.588 | -20.63 | -77% | | |
| 9 | 2000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 8.35 | 0.33 | 35.73 | 0.587 | -27.38 | -77% | | |
| 10 | 2500.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 10.44 | 0.33 | 44.42 | 0.587 | -33.98 | -77% | | |
| 11 | 5000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 20.88 | 0.33 | 88.75 | 0.585 | -67.87 | -76% | | |
| 12 | 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 41.75 | 0.33 | 171.44 | 0.582 | -129.69 | -76% | | |



Tabla 10.2-Variación del caudal en función del área de la cuenca para un T.R. = 10 años

| Nº | PARÁMETROS | | | | | | | | | | Racional | | | | EPA SWMM | | DIFERENCIAS | |
|------|---------------------|------|------|-------|---------|----------|--------------|-------------|----------|------|----------|------|---------|------|----------|---------------------|-------------|--|
| | A [m ²] | S | L/W | CN | n perm. | n imper. | Lluvia [min] | T.R. [años] | i [mm/h] | FOS | Q [l/s] | C | Q [l/s] | C | Δ | Dif. Porcentual [%] | | |
| ÁREA | 50.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 0.55 | 0.33 | 0.73 | 0.25 | -0.18 | -24% | | |
| | 100.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 1.11 | 0.33 | 1.45 | 0.25 | -0.34 | -24% | | |
| | 250.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 2.76 | 0.33 | 3.55 | 0.25 | -0.79 | -22% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 3.98 | 0.33 | 5.03 | 0.25 | -1.05 | -21% | | |
| | 500.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 5.53 | 0.33 | 6.85 | 0.25 | -1.32 | -19% | | |
| | 750.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 8.29 | 0.33 | 9.96 | 0.24 | -1.67 | -17% | | |
| | 1000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 11.06 | 0.33 | 12.92 | 0.23 | -1.86 | -14% | | |
| | 1500.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 16.59 | 0.33 | 18.45 | 0.21 | -1.86 | -10% | | |
| | 2000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 22.12 | 0.33 | 23.58 | 0.20 | -1.46 | -6% | | |
| | 2500.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 27.65 | 0.33 | 28.41 | 0.19 | -0.76 | -3% | | |
| | 5000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 55.30 | 0.33 | 49.37 | 0.18 | 5.93 | 12% | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 110.59 | 0.33 | 82.59 | 0.13 | 28.00 | 34% | | |

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 1 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



FORMA

Tabla 10.3-Variación del caudal en función de la forma de la cuenca para un T.R. = 100 años

| Nº | PARÁMETROS | | | | | | | | | | Racional | | | | EPA SWMM | | DIFERENCIAS | |
|--------------|---------------------|------|-------------|-------|---------|----------|--------------|-------------|----------|------|--------------|------|---------------|-------|----------|---------------------|-------------|--|
| | A [m ²] | S | L/W | CN | n perm. | n imper. | Lluvia [min] | T.R. [años] | i [mm/h] | FOS | Q [l/s] | C | Q [l/s] | C | Δ | Dif. Porcentual [%] | | |
| FORMA | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 0.25 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 41.75 | 0.33 | 180.03 | 0.588 | -138.28 | -77% | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 0.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 41.75 | 0.33 | 178.64 | 0.587 | -136.89 | -77% | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 0.75 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 41.75 | 0.33 | 177.46 | 0.587 | -135.71 | -76% | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 1.00 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 41.75 | 0.33 | 176.45 | 0.585 | -134.70 | -76% | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 1.25 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 41.75 | 0.33 | 175.50 | 0.585 | -133.75 | -76% | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 1.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 41.75 | 0.33 | 174.60 | 0.584 | -132.85 | -76% | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 1.75 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 41.75 | 0.33 | 173.77 | 0.584 | -132.02 | -76% | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 2.00 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 41.75 | 0.33 | 172.90 | 0.580 | -131.15 | -76% | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 2.25 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 41.75 | 0.33 | 172.10 | 0.580 | -130.35 | -76% | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 41.75 | 0.33 | 171.40 | 0.580 | -129.65 | -76% | | |

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 2 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Tabla 10.4-Variación del caudal en función de la forma de la cuenca para un T.R. = 10 años y A = 1000 m²

| Nº | A [m ²] | S | L/W | CN | n perm. | n imper. | Lluvia [min] | T.R. [años] | i [mm/h] | FOS | Racional | | EPA SWMM | | DIFERENCIAS | |
|--------------|---------------------|------|------|-------|---------|----------|--------------|-------------|----------|------|----------|------|----------|------|-------------|---------------------|
| | | | | | | | | | | | Q [l/s] | C | Q [l/s] | C | Δ | Dif. Porcentual [%] |
| FORMA | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 0.25 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 110.59 | 0.33 | 129.16 | 0.23 | -18.57 | -14% |
| | 10000.00 | 0.01 | 0.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 110.59 | 0.33 | 117.92 | 0.20 | -7.33 | -6% |
| | 10000.00 | 0.01 | 0.75 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 110.59 | 0.33 | 109.91 | 0.18 | 0.68 | 1% |
| | 10000.00 | 0.01 | 1.00 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 110.59 | 0.33 | 103.74 | 0.18 | 6.85 | 7% |
| | 10000.00 | 0.01 | 1.25 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 110.59 | 0.33 | 98.74 | 0.18 | 11.85 | 12% |
| | 10000.00 | 0.01 | 1.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 110.59 | 0.33 | 94.55 | 0.18 | 16.04 | 17% |
| | 10000.00 | 0.01 | 1.75 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 110.59 | 0.33 | 90.96 | 0.18 | 19.63 | 22% |
| | 10000.00 | 0.01 | 2.00 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 110.59 | 0.33 | 87.83 | 0.18 | 22.76 | 26% |
| | 10000.00 | 0.01 | 2.25 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 110.59 | 0.33 | 85.06 | 0.14 | 25.53 | 30% |
| | 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 110.59 | 0.33 | 82.59 | 0.13 | 28.00 | 34% |

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 3 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Tabla 10.5-Variación del caudal en función de la forma de la cuenca para un T.R. = 100 años y A = 360 m²

| Nº | PARÁMETROS | | | | | | | | | | Racional | | | | EPA SWMM | | DIFERENCIAS | |
|--------------|---------------------|------|------|-------|---------|----------|--------------|-------------|----------|------|----------|------|---------|-------|----------|---------------------|-------------|--|
| | A [m ²] | S | L/W | CN | n perm. | n imper. | Lluvia [min] | T.R. [años] | i [mm/h] | FOS | Q [l/s] | C | Q [l/s] | C | Δ | Dif. Porcentual [%] | | |
| FORMA | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 360.00 | 0.01 | 0.25 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.50 | 0.33 | 6.56 | 0.590 | -5.06 | -77% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 0.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.50 | 0.33 | 6.56 | 0.590 | -5.06 | -77% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 0.75 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.50 | 0.33 | 6.56 | 0.590 | -5.06 | -77% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 1.00 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.50 | 0.33 | 6.56 | 0.590 | -5.06 | -77% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 1.25 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.50 | 0.33 | 6.54 | 0.590 | -5.04 | -77% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 1.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.50 | 0.33 | 6.54 | 0.590 | -5.04 | -77% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 1.75 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.50 | 0.33 | 6.53 | 0.590 | -5.03 | -77% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 2.00 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.50 | 0.33 | 6.53 | 0.590 | -5.03 | -77% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 2.25 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.50 | 0.33 | 6.53 | 0.590 | -5.03 | -77% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.50 | 0.33 | 6.52 | 0.590 | -5.02 | -77% | | |

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 4 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Tabla 10.6-Variación del caudal en función de la forma de la cuenca para un T.R. = 10 años y A = 360 m²

| Nº | A [m ²] | PARÁMETROS | | | | | | | | | Racional | | | | EPA SWMM | | DIFERENCIAS | |
|--------------|---------------------|------------|------|-------|---------|----------|--------------|-------------|----------|------|----------|------|---------|------|----------|---------------------|-------------|--|
| | | S | L/W | CN | n perm. | n imper. | Lluvia [min] | T.R. [años] | i [mm/h] | FOS | Q [l/s] | C | Q [l/s] | C | Δ | Dif. Porcentual [%] | | |
| FORMA | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 360.00 | 0.01 | 0.25 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 3.98 | 0.33 | 5.27 | 0.31 | -1.29 | -24% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 0.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 3.98 | 0.33 | 5.24 | 0.30 | -1.26 | -24% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 0.75 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 3.98 | 0.33 | 5.22 | 0.29 | -1.24 | -24% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 1.00 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 3.98 | 0.33 | 5.19 | 0.29 | -1.21 | -23% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 1.25 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 3.98 | 0.33 | 5.16 | 0.28 | -1.18 | -23% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 1.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 3.98 | 0.33 | 5.13 | 0.28 | -1.15 | -22% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 1.75 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 3.98 | 0.33 | 5.11 | 0.27 | -1.13 | -22% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 2.00 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 3.98 | 0.33 | 5.08 | 0.27 | -1.10 | -22% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 2.25 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 3.98 | 0.33 | 5.05 | 0.27 | -1.07 | -21% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 3.98 | 0.33 | 5.03 | 0.26 | -1.05 | -21% | | |

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 5 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



CURVA NÚMERO

Tabla 10.7-Variación del caudal pico en función del número de curva (CN) TR=100 años

| Nº | PARÁMETROS | | | | | | | | | Racional | | | | EPA SWMM | | DIFERENCIAS | |
|----|---------------------|------|------|-------|---------|----------|--------------|-------------|----------|----------|---------|------|---------|----------|-------|---------------------|--|
| | A [m ²] | S | L/W | CN | n perm. | n imper. | Lluvia [min] | T.R. [años] | i [mm/h] | FOS | Q [l/s] | C | Q [l/s] | C | Δ | Dif. Porcentual [%] | |
| CN | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 360.00 | 0.01 | 2.50 | 60.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 0.76 | 0.17 | 4.03 | 0.350 | -3.27 | -81% | |
| | 360.00 | 0.01 | 2.50 | 65.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 0.92 | 0.20 | 4.58 | 0.400 | -3.66 | -80% | |
| | 360.00 | 0.01 | 2.50 | 70.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.10 | 0.24 | 5.19 | 0.456 | -4.09 | -79% | |
| | 360.00 | 0.01 | 2.50 | 75.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.29 | 0.28 | 5.84 | 0.519 | -4.55 | -78% | |
| | 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.50 | 0.33 | 6.52 | 0.590 | -5.02 | -77% | |

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 6 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Tabla 10.8-Variación del caudal pico en función del número de curva (CN) TR=10 años

| Nº | PARÁMETROS | | | | | | | | | | Racional | | | | EPA SWMM | | DIFERENCIAS | |
|-----------|---------------------|------|------|-------|---------|----------|--------------|-------------|----------|------|----------|------|---------|-------|----------|---------------------|-------------|--|
| | A [m ²] | S | L/W | CN | n perm. | n imper. | Lluvia [min] | T.R. [años] | i [mm/h] | FOS | Q [l/s] | C | Q [l/s] | C | Δ | Dif. Porcentual [%] | | |
| CN | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 360.00 | 0.01 | 2.50 | 60.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 2.29 | 0.19 | 2.28 | 0.106 | 0.01 | 0% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 2.50 | 65.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 2.67 | 0.22 | 2.77 | 0.132 | -0.10 | -4% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 2.50 | 70.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 3.08 | 0.26 | 3.37 | 0.164 | -0.29 | -9% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 2.50 | 75.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 3.52 | 0.29 | 4.11 | 0.206 | -0.59 | -14% | | |
| | 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 3.98 | 0.33 | 5.03 | 0.262 | -1.05 | -21% | | |

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 7 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Tabla 10.9-Variación del caudal pico en función del número de curva (CN) TR=100 años

| Nº | PARÁMETROS | | | | | | | | | | Racional | | | | EPA SWMM | | DIFERENCIAS | |
|----|---------------------|------|------|-------|---------|----------|--------------|-------------|----------|------|----------|------|---------|-------|----------|---------------------|-------------|--|
| | A [m ²] | S | L/W | CN | n perm. | n imper. | Lluvia [min] | T.R. [años] | i [mm/h] | FOS | Q [l/s] | C | Q [l/s] | C | Δ | Dif. Porcentual [%] | | |
| CN | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 60.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 21.19 | 0.17 | 98.72 | 0.339 | -77.53 | -79% | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 65.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 25.59 | 0.20 | 114.54 | 0.388 | -88.95 | -78% | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 70.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 30.48 | 0.24 | 131.93 | 0.446 | -101.45 | -77% | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 75.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 35.86 | 0.28 | 150.93 | 0.509 | -115.07 | -76% | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 41.75 | 0.33 | 171.44 | 0.582 | -129.69 | -76% | | |

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 8 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Tabla 10.10-Variación del caudal pico en función del número de curva (CN) TR=10 años

| Nº | PARÁMETROS | | | | | | | | | | Racional | | | | EPA SWMM | | DIFERENCIAS | |
|-----------|---------------------|------|------|-------|---------|----------|--------------|-------------|----------|------|----------|------|---------|-------|----------|---------------------|-------------|--|
| | A [m ²] | S | L/W | CN | n perm. | n imper. | Lluvia [min] | T.R. [años] | i [mm/h] | FOS | Q [l/s] | C | Q [l/s] | C | Δ | Dif. Porcentual [%] | | |
| CN | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 60.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 63.55 | 0.19 | 28.49 | 0.041 | 35.06 | 123% | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 65.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 74.14 | 0.22 | 36.91 | 0.054 | 37.23 | 101% | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 70.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 85.51 | 0.26 | 47.94 | 0.071 | 37.57 | 78% | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 75.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 97.66 | 0.29 | 62.62 | 0.094 | 35.04 | 56% | | |
| | 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 110.59 | 0.33 | 82.59 | 0.133 | 28.00 | 34% | | |

| | | |
|--|-------------------------|-----------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 9 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



PENDIENTE

Tabla 10.11-Variación del caudal pico en función de la pendiente de la cuenca $TR=100 A=360$

| S% | PARÁMETROS | | | | | | | | Racional | | EPA SWMM | | DIFERENCIAS | | | |
|----|------------|-------|------|-------|------|------|--------|--------|----------|------|----------|------|-------------|-------|-------|------|
| | 360.00 | 0.001 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.43 | 0.31 | 5.65 | 0.515 | -4.22 | -75% |
| | 360.00 | 0.005 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.48 | 0.33 | 5.80 | 0.519 | -4.32 | -75% |
| | 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.50 | 0.33 | 5.84 | 0.519 | -4.34 | -74% |
| | 360.00 | 0.02 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.53 | 0.34 | 5.86 | 0.519 | -4.33 | -74% |
| | 360.00 | 0.04 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.57 | 0.35 | 5.87 | 0.519 | -4.30 | -73% |
| | 360.00 | 0.06 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.59 | 0.35 | 5.87 | 0.519 | -4.28 | -73% |
| | 360.00 | 0.08 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.61 | 0.35 | 5.88 | 0.519 | -4.27 | -73% |
| | 360.00 | 0.10 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.63 | 0.36 | 5.88 | 0.519 | -4.25 | -72% |
| | 360.00 | 0.12 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.64 | 0.36 | 5.88 | 0.519 | -4.24 | -72% |
| | 360.00 | 0.15 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.65 | 0.36 | 5.88 | 0.519 | -4.23 | -72% |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 10 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Tabla 10.12-Variación del caudal pico en función de la pendiente de la cuenca TR=10 A=360 m²

| S% | PARÁMETROS | | | | | | | | | | Racional | | | | EPA SWMM | | DIFERENCIAS | |
|--------|------------|------|-------|-------|------|-------|-------|--------|--------|------|----------|------|-------|-------|----------|-----|-------------|--|
| | 360.00 | 0.00 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 3.79 | 0.32 | 3.82 | 0.180 | -0.03 | -1% | | |
| 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 3.91 | 0.33 | 4.80 | 0.240 | -0.89 | -18% | | | |
| 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 3.98 | 0.33 | 5.03 | 0.260 | -1.05 | -21% | | | |
| 360.00 | 0.02 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 4.06 | 0.34 | 5.16 | 0.280 | -1.10 | -21% | | | |
| 360.00 | 0.04 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 4.16 | 0.35 | 5.23 | 0.300 | -1.07 | -21% | | | |
| 360.00 | 0.06 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 4.22 | 0.35 | 5.25 | 0.300 | -1.03 | -20% | | | |
| 360.00 | 0.08 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 4.27 | 0.36 | 5.26 | 0.310 | -0.99 | -19% | | | |
| 360.00 | 0.10 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 4.31 | 0.36 | 5.27 | 0.310 | -0.96 | -18% | | | |
| 360.00 | 0.12 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 4.34 | 0.36 | 5.27 | 0.310 | -0.93 | -18% | | | |
| 360.00 | 0.15 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 4.38 | 0.37 | 5.28 | 0.310 | -0.90 | -17% | | | |

| | | | |
|--|-------------------------|------------------|--|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 11 de 273 | |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | | |



Tabla 10.13-Variación del caudal pico en función de la pendiente de la cuenca TR=10 A=5000 m²

| S% | PARÁMETROS | | | | | | | | | | Racional | | | | EPA SWMM | | DIFERENCIAS | |
|---------|------------|------|-------|------|------|--------|--------|-------|------|-------|----------|-------|-------|--------|----------|------|-------------|--|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5000.00 | 0.001 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 19.87 | 0.31 | 65.12 | 0.495 | -45.25 | | -69% | | |
| 5000.00 | 0.005 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 20.52 | 0.33 | 75.46 | 0.509 | -54.94 | | -73% | | |
| 5000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 20.88 | 0.33 | 77.72 | 0.513 | -56.84 | | -73% | | |
| 5000.00 | 0.02 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 21.30 | 0.34 | 79.17 | 0.515 | -57.87 | | -73% | | |
| 5000.00 | 0.04 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 21.79 | 0.35 | 80.10 | 0.517 | -58.31 | | -73% | | |
| 5000.00 | 0.06 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 22.12 | 0.35 | 80.49 | 0.519 | -58.37 | | -73% | | |
| 5000.00 | 0.08 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 22.37 | 0.35 | 80.71 | 0.519 | -58.34 | | -72% | | |
| 5000.00 | 0.10 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 22.58 | 0.36 | 80.86 | 0.519 | -58.28 | | -72% | | |
| 5000.00 | 0.12 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 22.76 | 0.36 | 80.97 | 0.519 | -58.21 | | -72% | | |
| 5000.00 | 0.15 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 22.99 | 0.36 | 81.08 | 0.519 | -58.09 | | -72% | | |

| | | | |
|--|-------------------------|------------------|--|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 12 de 273 | |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | | |



Tabla 10.14-Variación del caudal pico en función de la pendiente de la cuenca TR=10 A=5000 m²

| S% | PARÁMETROS | | | | | | | | | | Racional | | | | EPA SWMM | | DIFERENCIAS | |
|---------|------------|------|-------|-------|------|-------|-------|--------|--------|-------|----------|-------|-------|-------|----------|------|-------------|--|
| | 5000.00 | 0.00 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 52.63 | 0.32 | 23.99 | 0.080 | 28.64 | 119% | | |
| 5000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 54.35 | 0.33 | 41.29 | 0.130 | 13.06 | 32% | | | |
| 5000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 55.30 | 0.33 | 49.37 | 0.180 | 5.93 | 12% | | | |
| 5000.00 | 0.02 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 56.41 | 0.34 | 56.81 | 0.190 | -0.40 | -1% | | | |
| 5000.00 | 0.04 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 57.71 | 0.35 | 62.95 | 0.220 | -5.24 | -8% | | | |
| 5000.00 | 0.06 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 58.58 | 0.35 | 65.78 | 0.230 | -7.20 | -11% | | | |
| 5000.00 | 0.08 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 59.25 | 0.36 | 67.42 | 0.240 | -8.17 | -12% | | | |
| 5000.00 | 0.10 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 59.80 | 0.36 | 68.51 | 0.250 | -8.71 | -13% | | | |
| 5000.00 | 0.12 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 60.28 | 0.36 | 69.28 | 0.260 | -9.00 | -13% | | | |
| 5000.00 | 0.15 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.00 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.00 | 60.88 | 0.37 | 70.09 | 0.270 | -9.21 | -13% | | | |

| | | | |
|--|-------------------------|------------------|--|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 13 de 273 | |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | | |



FOS

Tabla 10.15-Variación del caudal pico en función del FOS (%) A=360 m² TR=100 años

| FOS | PARÁMETROS | | | | | | | | | | Racional | | EPA SWMM | | DIFERENCIAS | |
|--------|------------|------|-------|-------|------|-------|-------|--------|--------|------|----------|-------|----------|-------|-------------|------|
| | 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.10 | 4.26 | 0.36 | 5.65 | 0.34 | -1.39 | -25% |
| 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.20 | 4.52 | 0.38 | 6.26 | 0.42 | -1.74 | -28% | |
| 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.30 | 4.78 | 0.40 | 6.85 | 0.50 | -2.07 | -30% | |
| 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.40 | 5.04 | 0.42 | 7.48 | 0.58 | -2.44 | -33% | |
| 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.50 | 5.29 | 0.44 | 8.39 | 0.66 | -3.10 | -37% | |
| 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.60 | 5.53 | 0.46 | 9.28 | 0.74 | -3.75 | -40% | |
| 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.70 | 5.77 | 0.48 | 10.13 | 0.82 | -4.36 | -43% | |
| 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.80 | 6.01 | 0.50 | 10.96 | 0.89 | -4.95 | -45% | |
| 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.90 | 6.24 | 0.52 | 11.77 | 0.97 | -5.53 | -47% | |
| 360.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 1.00 | 6.47 | 0.54 | 12.57 | 1.04 | -6.10 | -49% | |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 14 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Tabla 10.16-Variación del caudal pico en función del FOS (%) A=360 m² TR=10 años

| A [m ²] | S | L/W | CN | n perm. | n imper. | Lluvia [min] | T.R. [años] | i [mm/h] | i [m/s] | i [in/h] | FOS | Racional | | | | EPA SWMM | | | |
|---------------------|-------|------|-------|---------|----------|--------------|-------------|----------|---------|----------|------|-----------------------|---------|------|------|-----------------------|---------|-------|------------|
| | | | | | | | | | | | | Q [m ³ /s] | Q [l/s] | C | K | Q [m ³ /s] | Q [l/s] | C | t pico [h] |
| 360.00 | 0.010 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.79 | 0.10 | 0.00 | 1.61 | 0.35 | 2.36 | 0.01 | 6.76 | 0.631 | 1:00:00 |
| 360.00 | 0.010 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.79 | 0.20 | 0.00 | 1.71 | 0.38 | 2.36 | 0.01 | 6.99 | 0.672 | 1:00:00 |
| 360.00 | 0.010 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.79 | 0.30 | 0.00 | 1.81 | 0.40 | 2.36 | 0.01 | 7.23 | 0.714 | 1:00:00 |
| 360.00 | 0.010 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.79 | 0.40 | 0.00 | 1.90 | 0.42 | 2.36 | 0.01 | 7.46 | 0.755 | 1:00:00 |
| 360.00 | 0.010 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.79 | 0.50 | 0.00 | 2.00 | 0.44 | 2.36 | 0.01 | 7.69 | 0.797 | 1:00:00 |
| 360.00 | 0.010 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.79 | 0.60 | 0.00 | 2.09 | 0.46 | 2.36 | 0.01 | 7.91 | 0.838 | 1:00:00 |
| 360.00 | 0.010 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.79 | 0.70 | 0.00 | 2.18 | 0.48 | 2.36 | 0.01 | 8.14 | 0.880 | 1:00:00 |
| 360.00 | 0.010 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.79 | 0.80 | 0.00 | 2.27 | 0.50 | 2.36 | 0.01 | 8.37 | 0.921 | 1:00:00 |
| 360.00 | 0.010 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.79 | 0.90 | 0.00 | 2.36 | 0.52 | 2.36 | 0.01 | 8.59 | 0.963 | 1:00:00 |
| 360.00 | 0.010 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.00 | 1.79 | 1.00 | 0.00 | 2.44 | 0.54 | 2.36 | 0.01 | 8.82 | 1.000 | 1:00:00 |

| | | | |
|--|-------------------------|------------------|--|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 15 de 273 | |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | | |



Tabla 10.17-Variación del caudal pico en función del FOS (%) A=10000 m² TR=100 años

| FOS | PARÁMETROS | | | | | | | | | | | | Racional | | | EPA SWMM | | DIFERENCIAS | |
|----------|------------|------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|----------|---------|---------|----------|--|-------------|--|
| | 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.10 | 44.63 | 0.35 | 180.09 | 0.625 | -135.46 | -75% | | | |
| 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.20 | 47.43 | 0.38 | 188.41 | 0.668 | -140.98 | -75% | | | | |
| 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.30 | 50.17 | 0.40 | 196.42 | 0.711 | -146.25 | -74% | | | | |
| 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.40 | 52.84 | 0.42 | 204.00 | 0.753 | -151.16 | -74% | | | | |
| 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.50 | 55.45 | 0.44 | 211.49 | 0.795 | -156.04 | -74% | | | | |
| 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.60 | 58.02 | 0.46 | 218.58 | 0.837 | -160.56 | -73% | | | | |
| 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.70 | 60.53 | 0.48 | 225.41 | 0.878 | -164.88 | -73% | | | | |
| 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.80 | 63.00 | 0.50 | 231.97 | 0.920 | -168.97 | -73% | | | | |
| 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 0.90 | 65.43 | 0.52 | 238.27 | 0.961 | -172.84 | -73% | | | | |
| 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.014 | 120.00 | 100.00 | 45.45 | 1.00 | 67.83 | 0.54 | 244.36 | 1.000 | -176.53 | -72% | | | | |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 16 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Tabla 10.18-Variación del caudal pico en función del FOS (%) A=10000 m² TR=10 años

| FOS | PARÁMETROS | | | | | | | | | | | | Racional | | | EPA SWMM | | DIFERENCIAS | |
|----------|------------|------|-------|-------|------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|---------|------|----------|--|-------------|--|
| | 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.10 | 118.22 | 0.36 | 108.82 | 0.26 | 9.40 | 9% | | | |
| 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.20 | 125.65 | 0.38 | 134.82 | 0.35 | -9.17 | -7% | | | | |
| 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.30 | 132.89 | 0.40 | 160.51 | 0.44 | -27.62 | -17% | | | | |
| 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.40 | 139.96 | 0.42 | 185.48 | 0.53 | -45.52 | -25% | | | | |
| 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.50 | 146.89 | 0.44 | 209.27 | 0.61 | -62.38 | -30% | | | | |
| 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.60 | 153.68 | 0.46 | 231.38 | 0.70 | -77.70 | -34% | | | | |
| 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.70 | 160.34 | 0.48 | 251.32 | 0.79 | -90.98 | -36% | | | | |
| 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.80 | 166.88 | 0.50 | 268.66 | 0.88 | -101.78 | -38% | | | | |
| 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 0.90 | 173.32 | 0.52 | 283.24 | 0.96 | -109.92 | -39% | | | | |
| 10000.00 | 0.01 | 2.50 | 80.00 | 0.02 | 0.01 | 15.00 | 10.00 | 119.44 | 1.00 | 179.66 | 0.54 | 295.66 | 1.03 | -116.00 | -39% | | | | |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 17 de 273 |
| DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA | | |



Capítulo 6: Tablas de micoembalses

Tabla 10.19-Relaciones de micoembalses con uso y sin uso de LID para lotes

| Area | FOS | Cant. Lotes | Microembalse Urbanizado (m ²) [1] | Microembalse con LID (m ²) [4] | Diferencia de areas | Altura TR=5-c/LID [3] | Altura TR=5-s/LID [2] | h vertedero s/LID TR25 | h vertedero c/LID TR25 | % de area | Cantidad de lotes s/LID | Cantidad de lotes C/LID |
|------|-----|-------------|---|--|---------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------|-------------------------|-------------------------|
| 360 | 50 | 1000 | 6400 | 5329 | 1071 | 0.72 | 0.94 | 1.27 | 1.30 | 17% | 17.78 | 14.80 |
| 360 | 25 | 1000 | 3600 | 3190 | 410 | 0.64 | 0.93 | 1.28 | 1.28 | 11% | 10.00 | 8.86 |
| 500 | 25 | 100 | 400 | 324 | 76 | 0.47 | 0.68 | 1.19 | 1.20 | 19% | 0.80 | 0.65 |
| 360 | 50 | 100 | 484 | 441 | 43 | 0.51 | 0.77 | 1.23 | 1.26 | 9% | 1.34 | 1.23 |
| 250 | 50 | 1000 | 4225 | 3780 | 445 | 0.68 | 0.91 | 1.25 | 1.23 | 11% | 16.90 | 15.12 |
| 250 | 25 | 1000 | 2650 | 2300 | 350 | 0.64 | 0.90 | 1.23 | 1.23 | 13% | 10.60 | 9.20 |
| 1000 | 25 | 100 | 840 | 728 | 112 | 0.50 | 0.76 | 1.30 | 1.30 | 13% | 0.84 | 0.73 |
| 250 | 50 | 100 | 400 | 870 | 380 | 0.58 | 0.92 | 1.27 | 1.22 | 95% | 1.60 | 3.48 |

| | | |
|--|-------------------------|------------------|
| Elaboró: Fratianni Rocco-Díaz Francisco | Código: TFD-2025 | |
| Revisó: Ing. Fontana y Ganancias | Emisión: Diciembre 2025 | |
| Autorizó: Dr. Ing. Guillén Nicolás Federico | Revisión: 02 | Página 18 de 273 |
| <p style="text-align: center;">DOCUMENTO C CONTROLADO CÁTEDRA TRABAJO FINAL – INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA</p> | | |



UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE CÓRDOBA
Universidad Jesuita
