



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE
MÉXICO**

**INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y
CIENCIAS DEL AGUA**

**“PROPUESTA DE DISEÑO TECNOLÓGICO DE UNA BANQUETA
RETENEDORA DE AGUA PLUVIAL EMPLEANDO UN PANEL CON
ARREGLO FRACTAL COMO SISTEMA URBANO DE DRENAJE
SOSTENIBLE (SUDS)”**

T E S I S

Que para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA

Presenta:

ING. VÍCTOR ALFONSO GALICIA AGUILAR

Tutor Académico

DR. CARLOS DÍAZ DELGADO

Tutores Adjuntos

DR. DAURY GARCÍA PULIDO

DR. KHALIDOU MAMADOU BÂ



TOLUCA, MÉXICO, DICIEMBRE 2020.

RESUMEN

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible son reconocidos por sus aportaciones benéficas en la gestión del agua pluvial en las zonas urbanas cuyo principal objetivo, a diferencia de enfoques tradicionales de gestión, busca reproducir o imitar lo más cercano posible el ciclo hidrológico de una cuenca urbana en su estado natural; garantizando el balance hídrico, manteniendo y, en la medida de lo posible, buscar la mejora en la calidad del agua a través del fomento de la conservación del agua que genere las oportunidades ambientales para la recreación relacionadas con el ambiente.

Un reto importante para lograr dichos objetivos es el aumento poblacional en las ciudades de manera descontrolada, haciendo cada vez más difícil la planeación urbana integral. Otro problema en crecimiento es el efecto del cambio climático, los eventos meteorológicos extremos que se han presentado en algunas ciudades del mundo en los últimos años, ponen de manifiesto la necesidad de actuar e implementar nuevos enfoques de gestión que busquen adaptar infraestructura que ayude a mitigar estos efectos y garantizar la seguridad ambiental en las ciudades.

El presente estudio propone un sistema de banquetas retenedoras de agua pluvial atendiendo a la filosofía de los SUDS a través del diseño tecnológico de un panel de geometría fractal como estructura del tanque de retención y cuya viabilidad estructural se validó con análisis de elementos finitos (FEA), demostrando la importancia de la implementación de métodos numéricos para conocer el comportamiento de un modelo geométrico sin la necesidad de construirlo físicamente.

También, se analizaron distintas configuraciones de estructuras de control para el tanque de retención con modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para comparar el efecto de mitigación en el gasto pico de un hidrograma de entrada al gasto pico en el hidrograma de salida y determinar que configuración de estructura de control aportó mayor tiempo de retención y menor gasto pico a la salida.

Los resultados obtenidos muestran que la configuración óptima de estructuras de control entre las analizadas, son los orificios circulares. Su efecto está asociado al área de cada orificio y posición para el vertido, así en la solución óptima se garantizó un aprovechamiento del tanque mayor al 90% ofreciendo un margen de seguridad en el sistema además de mitigar el gasto pico hasta un 34% con un desfase de tiempo promedio de 30 minutos entre el gasto pico de entrada y el de salida.

ABSTRACT

Sustainable Urban Drainage Systems are recognized for their beneficial contributions to rainwater management in urban areas whose main objective, unlike traditional management approaches, seeks to reproduce or imitate as closely as possible the hydrological cycle of an urban basin in its natural state; guaranteeing water balance, maintaining and, as far as possible, seeking improvement in water quality through the promotion of water conservation that generates environmental opportunities for recreation related to the environment.

An important challenge to achieve these objectives is the population increase in cities in an uncontrolled manner, making comprehensive urban planning increasingly difficult. Another growing problem is the effect of climate change, the extreme meteorological events that have occurred in some cities of the world in recent years, show the need to act and implement new management approaches that seek to adapt infrastructure that helps mitigate these effects and guarantee environmental safety in cities.

The present study proposes a system of rainwater retaining sidewalks according to the SUDS philosophy through the technological design of a fractal geometry panel as the retention tank structure and whose structural viability was validated with finite element analysis (FEA) , demonstrating the importance of the implementation of numerical methods to know the behavior of a geometric model without the need to build it physically.

Also, different configurations of control structures for the holding tank were analyzed with Computational Fluid Dynamics (CFD) models to compare the mitigation effect in the peak flow of an inlet hydrograph to the peak flow of the outlet hydrograph and determine Which control structure configuration provided longer retention time and lower peak output output.

The results showed that the optimal configuration of control structures among those analyzed are circular holes. Its effect is associated with the area of each hole and position for the discharge, thus in the optimal solution, a use of the tank greater than 90% was guaranteed, which offers a margin of safety in the system in addition to mitigating the peak flow up to 34% with an average time lag of 30 minutes between peak input and output spending.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xv
LISTA DE ACRÓNIMOS	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS Y UNIDADES	xviii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. GESTIÓN URBANA DEL AGUA PLUVIAL	2
1.1.1. Problemas de la gestión del agua pluvial en las ciudades	2
1.1.2. Fundamentos de los sistemas de drenaje sostenible	8
1.1.3. La ciudad esponja, el nuevo enfoque de gestión urbana del agua	12
1.2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	17
1.2.1. Hipótesis	17
1.2.2. Objetivo general	17
CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE	18
2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE DRENAJE SOSTENIBLE	19
2.1.1. Sistemas de retención	23
2.1.2. Sistemas de almacenamiento	26
2.1.3. Sistemas de filtración	29
2.1.4. Sistemas de tratamiento	32
2.2. PRINCIPIOS Y OBJETIVOS DEL DISEÑO DE SUDS	38
2.2.1. Metodología para el diseño de SUDS	38

2.2.2.	Condiciones para la implementación de SUDS	42
2.2.3.	Revisión de experiencias internacionales	43
2.3.	FUNDAMENTOS DEL SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL URBANO	45
2.3.1.	Principios de diseño del drenaje pluvial urbano.....	45
2.3.2.	Componentes del sistema de drenaje pluvial urbano	48
2.3.3.	Comparativa de la normatividad para el diseño de drenaje urbano	58
2.4.	FUNDAMENTOS DE ELEMENTOS FRACTALES	63
2.4.1.	Conceptos y características	63
2.4.2.	Fractales tipo panal de abeja (honeycomb)	65
2.5.	REVISIÓN DE CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE BANQUETAS.....	68
2.5.1.	Generalidades y conceptos	68
2.5.2.	Comparación de criterios nacionales e internacionales sobre el diseño de banquetas	75
2.6.	FUNDAMENTOS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)	79
2.6.1.	Generalidades.....	79
2.6.2.	Etapas de cálculo CFD	80
2.6.3.	Algoritmos numéricos CFD.....	85
2.6.4.	Modelos y ecuaciones de la dinámica de fluidos computacional	85
2.6.5.	Modelo numérico computacional ANSYS-FLUENT	92
2.7.	FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS CON ELEMENTOS FINITOS.....	96
2.7.1.	Generalidades.....	96
2.7.2.	Método y ecuaciones del análisis de elementos finitos	98
2.7.3.	Modelo FEA – ANSYS.....	100
CAPÍTULO 3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	105
3.1.	DISEÑO DE LA GEOMETRÍA FRACTAL	106
3.2.	APLICACIÓN DE FEA PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL	110
3.2.1.	Escenario propuesto de armado para el análisis estructural del panel	110
3.2.2.	Proceso general de análisis en herramienta FEA.....	110
3.3.	CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL SISTEMA	113
3.3.1.	Caso de estudio	113
3.3.2.	Aplicación de CFD ANSYS – Fluent	119

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	139
4.1. DIMENSIONAMIENTO DEL PANEL FRACTAL HEXAGONAL.....	140
4.1.1. Dimensiones	140
4.1.2. Conexiones	141
4.1.3. Secciones y estructura	142
4.1.4. Estimación del volumen efectivo	144
4.1.5. Estructura complementaria.....	144
4.2. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PANEL.....	145
4.2.1. Modelación de armados en ANSYS-Structural.....	145
4.2.2. Análisis de armado con ANSYS-Structural	145
4.2.3. Resultados del análisis estructural.....	146
4.2.4. Discusión y análisis de la evaluación estructural.....	149
4.3. ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL SISTEMA PARA EL CASO DE ESTUDIO	151
4.3.1. Estudio de la cuenca urbana.....	151
4.3.2. Resultados de la simulación CFD	169
CAPÍTULO 5. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE BANQUETAS RETENEDORAS	183
5.1. INTRODUCCIÓN	184
5.2. PLANEACIÓN DEL PROYECTO	186
5.2.1. Recopilación de información básica.....	186
5.2.2. Estimación del área a gestionar por el SUDS.....	191
5.2.3. Hidrología.....	191
5.3. TREN DE FUNCIONAMIENTO Y ESQUEMA DEL SISTEMA	194
5.4. ESTRUCTURAS DE CAPTACIÓN.....	195
5.4.1. Criterios de selección	195
5.4.2. Ecuaciones para el dimensionamiento de coladeras.....	196
5.5. ESTRUCTURAS DE TRATAMIENTO.....	203
5.6. ESTRUCTURA DE RETENCIÓN.....	204
5.6.1. Cálculo del volumen de almacenamiento	204
5.6.2. Cálculo del volumen neto disponible en el SUDS.....	205
5.6.3. Comprobación de la capacidad de almacenamiento.....	206

5.6.4. Cálculo del tiempo de vaciado al drenaje a través de una estructura de control ..	206
5.6.5. Cálculo del tiempo de vaciado por infiltración.....	211
5.7. CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS	212
5.7.1. Demolición y retiro	213
5.7.2. Trazo y nivelación	213
5.7.3. Excavación.....	213
5.7.4. Preparación de la base.....	213
5.7.5. Colocación de impermeables	214
5.7.6. Colocación de geotextiles.....	214
5.7.7. Instalación del panel fractal	214
5.7.8. Instalación sistemas de mantenimiento	215
5.7.9. Relleno perimetral.....	215
5.7.10. Precios unitarios	215
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	217
6.1. CONCLUSIONES	218
6.2. RECOMENDACIONES.....	220
BIBLIOGRAFÍA	221

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Clasificación de sistemas de drenaje sostenible de Fernández Barrera (2009)	20
Figura 2.2. Clasificación de sistemas de drenaje sostenible de Rodríguez Hernández (2008)	21
Figura 2.3. Clasificación propuesta por mecanismo de operación de sistemas de drenaje sostenible	22
Figura 2.4. Sección típica de un techo verde (Woods-Ballard et al., 2015)	24
Figura 2.5. Cuneta verde (Abellán, 2014)	25
Figura 2.6. Esquema de un sistema de biorretención (Chahal et al., 2016)	26
Figura 2.7. Componentes de jardín para la captación de agua de lluvia (García, 2018)...	28
Figura 2.8. Depósito de detención en zona residencial (www.basins.ghkates.com)	29
Figura 2.9. Ejemplos de superficies permeables: (a) pavimento permeable; (b) bloques con juntas permeables; (c) adoquines porosos; (d) césped reforzado (Andrés-Valeri, 2017) ..	30
Figura 2.10. Pozo y zanja de infiltración (Perales-Momparler y Andrés-Doménech, 2008)	31
Figura 2.11. Drenes filtrantes (Perales-Momparler y Andrés-Doménech, 2008)	32
Figura 2.12. Humedal artificial Parque de las Llamas en Santander, España. (imagen propia)	32
Figura 2.13. Sistemas de tratamiento: (a) Trampa de sedimentos (www.biodyne-bogota.com); (b) Separador hidrodinámico (www.drenatura.com)	33
Figura 2.14. Dimensionamiento del modelo de Peng et al. (2019)	34
Figura 2.15. Esquemas de los separadores estudiados	36
Figura 2.16. Los cuatro pilares de la CIRIA para el diseño de SUDS. Elaborado con información de Woods-Ballard et al. (2015).....	38
Figura 2.17. Etapas para el diseño de SUDS. Elaborado con información de Woods-Ballard et al. (2015).....	39
Figura 2.18. Proceso general del diseño de SUDS	39
Figura 2.19. Proceso para el diseño del esquema integral de SUDS	40
Figura 2.20. Proceso para el diseño final de la propuesta de SUDS	40
Figura 2.21. Comparativa de las funciones de distribución y valores de V_{80} obtenidas por Sordo-Ward et al. (2019)	42

Figura 2.22. Esquema general de las etapas de diseño de drenaje pluvial urbano (CONAGUA, 2016)	46
Figura 2.23. Componentes del drenaje pluvial. Adaptado de CONAGUA (2016).....	48
Figura 2.24. Tipos de boca de tormenta estudiados por Brown et al. (2013)	49
Figura 2.25. Comparación de rendimiento entre las distintas bocas de tormenta (Brown et al., 2013)	51
Figura 2.26. Comparación de la capacidad de captación con respecto del flujo realizada por Brown et al. (2013)	52
Figura 2.27. Clasificación de seguridad de rejillas para peatones y ciclistas adaptado de Brown et al. (2013)	53
Figura 2.28. Clasificación de las estructuras de conducción de acuerdo con CONAGUA (2016).....	54
Figura 2.29. Trazo de una red de drenaje (CONAGUA, 2016).....	54
Figura 2.30. Clasificación de las estructuras de conducción según el método de construcción (CONAGUA, 2016).....	55
Figura 2.31. Secciones transversales de conductos abiertos (CONAGUA, 2016)	55
Figura 2.32. Secciones transversales de conductos cerrados (CONAGUA, 2016)	56
Figura 2.33. Clasificación de las estructuras de vertido (CONAGUA, 2016)	58
Figura 2.34. Triángulo de Sierpinski. Fuente: (Gumiel y Arias, 2005).....	63
Figura 2.35. Un panel sándwich compuesto (A) con núcleo de panal de abeja (C) y láminas frontales (B). Fuente: (Nazeer y Allabakshu, 2015).....	66
Figura 2.36. Geometría de sistemas modulares comerciales	67
Figura 2.37. Ejemplo de banqueteta, acera, anden o vereda (www.valladolid.es)	68
Figura 2.38. Jerarquía de movilidad (SEDUVI, 2017).....	69
Figura 2.39. Beneficios de banquetetas. Elaborado con información de SEDUVI (2017)....	71
Figura 2.40. Franjas de banqueteta (SEDUVI, 2017)	71
Figura 2.41. Sección tipo de banqueteta. Elaboración propia con información de SEDUVI (2017).....	73
Figura 2.42. Esquema de banquetetas retenedoras (Ramírez Juárez, 2014)	74
Figura 2.43. Libros que componen al CAEM. Elaboración propia.....	76
Figura 2.44. Proceso general para el uso de CFD. Adaptado con información de López-Rebollar (2015) y Noblecilla-Palomino (2019)	81
Figura 2.45. Algoritmos numéricos CFD. Adaptado con información de Noblecilla-Palomino (2019).....	85

Figura 2.46. Algoritmo o módulo de simulación en ANSYS – Fluent	93
Figura 2.47. Esquema de gestión para la simulación en ANSYS – Fluent	93
Figura 2.48. Procedimiento para el monitoreo de la solución (López-Rebollar, 2015)	95
Figura 2.49. Proceso tradicional de Desarrollo de un producto. Adaptado de Murillo Martínez (2018).....	101
Figura 2.50. Proceso de desarrollo de un product usando FEA. Adaptado de Murillo Martínez (2018).....	102
Figura 2.51. Esquema de gestión para la aplicación de FEA	103
Figura 3.1. Dimensiones mínimas propuestas para la implementación del panel.	106
Figura 3.2. Generación de fractales hexagonales	107
Figura 3.3. Generación de fractales hexagonales hasta orden 3	108
Figura 3.4. Dimensiones de las figuras fractales de orden 1, 2 y 3.....	108
Figura 3.5. Configuración final del panel.....	109
Figura 3.6. Escenario de análisis estructural según acomodo	110
Figura 3.7. Esquema de trabajo Workbench para FEA	111
Figura 3.8. Propiedades del PP.....	111
Figura 3.9. Ubicación de la zona de estudio	113
Figura 3.10. Curvas IDTr Observatorio meteorológico UAEM – Mariano Bárcena.....	117
Figura 3.11. Interfaz Workbench ANSYS.....	120
Figura 3.12. Esquema de trabajo ANSYS – Fluent.....	120
Figura 3.13. Modelo geométrico para simulación en ANSYS.....	121
Figura 3.14. Dimensiones de las estructuras de control propuestas.....	121
Figura 3.15. Dominio del flujo mallado con ANSYS.....	122
Figura 3.16. Valores orthogonal quality obtenidos del mallado	123
Figura 3.17. Valores Element Quality obtenidos del mallado	123
Figura 3.18. Valores Aspect Ratio obtenidos del mallado	124
Figura 3.19. Valores Skewness obtenidos del mallado	125
Figura 3.20. Número de nodos y elementos del mallado	125
Figura 3.21. Definición de las fronteras.....	126
Figura 3.22. Interfaz del setup en ANSYS – Fluent	126
Figura 3.23. Módulos que integran el setup en ANSYS – Fluent	127
Figura 3.24. Configuración del módulo general en ANSYS – Fluent	127
Figura 3.25. Configuración de los modelos para la simulación	128
Figura 3.26. Definición de las fases que intervienen en la simulación	128

Figura 3.27. Configuración del modelo viscoso	129
Figura 3.28. Definición de los materiales para la simulación.....	129
Figura 3.29. Verificación del modelo multifase en el dominio del flujo	130
Figura 3.30. Configuración de las condiciones de operación para la simulación	130
Figura 3.31. Formato de table transitoria para ingresar el hidrograma de entrada a Fluent	131
Figura 3.32. Configuración de las condiciones de frontera para la entrada.....	132
Figura 3.33. Configuración de las condiciones de frontera para la salida.....	133
Figura 3.34. Módulos que integran el solucionador en Fluent.....	133
Figura 3.35. Configuración de los métodos de solución	134
Figura 3.36. Configuración de los controles de simulación	135
Figura 3.37. Configuración de reportes de solución	136
Figura 3.38. Configuración de los monitores de solución	136
Figura 3.39. Elección de la inicialización de solución en Fluent.....	137
Figura 3.40. Configuración del <i>run calculation</i> en Fluent.....	137
Figura 3.41. Monitoreo de la convergencia de las ecuaciones de solución	138
Figura 4.1. Dimensiones finales del panel. Vista en planta.	140
Figura 4.2. Dimensiones finales del panel. Vistas de secciones.	140
Figura 4.3. Dimensiones finales del panel. Vista tridimensional.....	141
Figura 4.4. Sistema de conexión del panel.	141
Figura 4.5. Conexión tipo macho-hembra	142
Figura 4.6. Secciones del panel fractal.	142
Figura 4.7. Claros de hexágonos fractal donde se incorporaron vertedores.	143
Figura 4.8. Dimensiones de vertedores en los claros de hexágonos fractales	143
Figura 4.9. Estructura final interna del panel.....	144
Figura 4.10. Placa fractal de soporte.....	144
Figura 4.11. Escenarios de armado para el análisis estructural.....	145
Figura 4.12. Geometría exportada a ANSYS.....	146
Figura 4.13. Malla del escenario a evaluar	146
Figura 4.14. Resultados del análisis estructural con FEA	147
Figura 4.15. Gráfica esfuerzo-tensión unitaria resultante	149
Figura 4.16. Gráfica carga-deformación resultante.....	149
Figura 4.17. Ubicación de la zona de estudio	151
Figura 4.18. Topografía de la zona de estudio	152

Figura 4.19. Líneas de corriente de la cuenca.....	152
Figura 4.20. Subcuencas y microcuencas de la zona de estudio.....	153
Figura 4.21. Microcuencas de la zona de estudio.....	153
Figura 4.22. Cálculo de la pendiente para la microcuenca 1.....	154
Figura 4.23. Curvas IDTr para la estación “UAEM-Mariano Bárcena” 15367	157
Figura 4.24. Hietograma de precipitación para un Tr = 2 años	161
Figura 4.25. Distribución de la intensidad por instante de tiempo para Tr = 2 años	161
Figura 4.26. Hietograma de precipitación para un Tr = 5 años	163
Figura 4.27. Distribución de la intensidad por instante de tiempo para Tr = 5 años	163
Figura 4.28. Hietograma de precipitación para un Tr = 10 años	165
Figura 4.29. Distribución de la intensidad por instante de tiempo para Tr = 10 años	165
Figura 4.30. Hietograma de precipitación para un Tr = 15 años	167
Figura 4.31. Distribución de la intensidad por instante de tiempo para Tr = 15 años	167
Figura 4.32. Comparación de hidrograma generado por SWMM y Chaak	168
Figura 4.33. Hidrograma seleccionado para la simulación CFD	169
Figura 4.34. Escenarios simulados con ANSYS – Fluent.....	169
Figura 4.35. Campo de velocidades para el escenario 1 en el instante de 9000 segundos	170
Figura 4.36. Campo de velocidades para el escenario 2 en el instante de 9000 segundos	171
Figura 4.37. Campo de velocidades para el escenario 3 en el instante de 9000 segundos	171
Figura 4.38. Comparación de hidrograma de entrada vs salida para el escenario 1.....	172
Figura 4.39. Nivel en el tanque para el escenario 1.....	173
Figura 4.40. Comparación de hidrograma de entrada vs salida para el escenario 2.....	174
Figura 4.41. Nivel en el tanque para el escenario 2.	175
Figura 4.42. Comparación de hidrograma de entrada vs salida para el escenario 3.....	176
Figura 4.43. Nivel en el tanque para el escenario 3.	177
Figura 4.44. Estructura de control correspondiente al escenario 4	178
Figura 4.45. Comparación de hidrogramas de entrada vs salida para el escenario 4.....	179
Figura 4.46. Nivel en el tanque para el escenario 4.....	180
Figura 4.47. Estructura de control correspondiente al escenario 5	180
Figura 4.48. Comparación de hidrogramas de entrada vs salida para el escenario 4.....	181
Figura 4.49. Nivel en el tanque para el escenario 5.....	182

Figura 5.1. Etapas de la metodología para la implementación del sistema banquetas retenedora de agua pluvial	185
Figura 5.2. Proceso para el análisis de idoneidad de implementación.	188
Figura 5.3. Valores de referencia del coeficiente de permeabilidad para distintos suelos (Checa y De Pazos, 2018)	190
Figura 5.4. Funcionamiento del sistema de banquetas retenedoras.....	194
Figura 5.5. Esquema de funcionamiento del sistema de banquetas retenedoras	194
Figura 5.6. Criterio de selección de coladera de acuerdo con la pendiente de la calle. Adaptada de CONAGUA (2016)	195
Figura 5.7. Tipos de coladeras. (CONAGUA, 2016).....	196
Figura 5.8. Esquema para calcular “d”.	200
Figura 5.9. Dimensiones mínimas de la boca de tormenta (CONAGUA, 2016)	201
Figura 5.10. Estructuras de tratamiento viables para el sistema de banquetas retenedoras	203
Figura 5.11. Esquema-proceso de dimensionamiento adaptado de Checa y De Pazos (2018) y Woods-Ballard et al. (2015)	204
Figura 5.12. Espacio disponible de almacenamiento	205
Figura 5.13. Diagrama para el principio de orificios.....	207
Figura 5.14. Variación de los coeficientes de velocidad, contracción y gasto con el número de Reynolds (Sotelo, 2001)	208
Figura 5.15. Cambio de la altura de la carga en el tiempo t	209
Figura 5.16. Diagrama del proceso constructivo para la implementación de banquetas retenedoras de agua de lluvia.	212

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Parámetros de calidad en aguas pluviales (Andrés-Valeri, 2017).....	6
Tabla 1.2. Una comparación de los diferentes sistemas de drenaje urbano desde 3000 a.C. hasta la actualidad. (Sedlak, 2014).....	9
Tabla 1.3. Comparación del contenido y las características principales entre construcción de ciudades esponja (SCC ¹) y otras estrategias de gestión urbana de aguas pluviales (USM ²) en el mundo (Ding et al., 2019).....	16
Tabla 2.1. Sistemas de separadores hidrodinámicos comerciales.....	35
Tabla 2.2. Características del lugar adecuadas para implementar los SUDS (Checa y De Pazos, 2018).....	42
Tabla 2.3. Parámetros clave en el diseño de sistemas de drenaje pluvial urbano y los resultados deseados. Adaptado de CONAGUA (2016) con información del Department of Energy and Water Supply (2013).....	47
Tabla 2.4. Características de las boca de tormenta estudiadas por Brown et al. (2013)...	50
Tabla 2.5. Descripción de rejillas analizadas (Brown et al., 2013).....	51
Tabla 2.6. Clasificación de pozos de visita adaptado de CONAGUA (2016).....	57
Tabla 2.7. Comparaciones de los parámetros usados en el método racional en varios países. Adaptada con información de López (2016).....	61
Tabla 2.8. Dimensiones de banquetas propuestas por SEDUVI (2017).....	72
Tabla 2.9. Comparación de normatividad internacional para banquetas (pasos peatonales). Elaboración propia.....	76
Tabla 2.10. Comparación entre experimentación y el análisis de CFD (Noblecilla-Palomino, 2019).....	80
Tabla 3.1. Valores del coeficiente de escurrimiento recomendados por CONAGUA (2016).....	116
Tabla 3.2. Intensidades anuales registradas del Observatorio Mariano Bárrera.....	118
Tabla 3.3. Rangos de asimetría y calidad de malla (Noblecilla-Palomino, 2019).....	124
Tabla 4.1. Resultados de simulaciones para el armado apilado.....	148
Tabla 4.2. Parámetros de las microcuencas de estudio.....	156
Tabla 4.3. Series de intensidades de precipitación máxima para diferentes duraciones.....	158
Tabla 4.5. Valores del hietograma de diseño para un Tr = 2 años.....	160
Tabla 4.6. Valores del hietograma de diseño para un Tr = 5 años.....	162

Tabla 4.7. Valores del hietograma de diseño para un Tr = 10 años.....	164
Tabla 4.8. Valores del hietograma de diseño para un Tr = 10 años.....	166
Tabla 5.1. Valores aceptables para considerar infiltración en el diseño de SUDS (Checa y De Pazos, 2018)	190
Tabla 5.2. Coeficiente de escurrimiento recomendados por Checa y De Pazos (2018)..	191
Tabla 5.3. Velocidad de salpicadura [m/s] (Brown et al., 2013).....	198

LISTA DE ACRÓNIMOS

ATs	Técnicas alternativas de drenaje, que se traducen de <i>Alternative techniques</i>
BPAs	Mejores Prácticas Ambientales traducción de <i>Stormwater Best Management Practices</i>
CFD	Computational Fluid Dynamics [Dinámica de fluidos computacional]
FEA	Finite Element Analysis [Análisis de Elemento Finito]
GI	Infraestructura verde, traducción de <i>Green Infrastructure</i>
IITCA	Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua
IUWM	Gestión Integrada del Agua Urbana, traducción de <i>Integrated Urban Water Management</i>
LED	Large Eddy Simulation
LID	Desarrollo de Bajo Impacto traducción de <i>Low Impact Development</i>
RANS	Reynolds-Averaged Navier Stokes
SCMs	Medidas de Control de Agua de Lluvia, traducción de <i>Stormwater Control Measures</i>
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations [Método semi-implícito para las ecuaciones de presión vinculadas]
SIMPLEC	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Coupled Método semi-implícito para las ecuaciones de presión vinculadas acopladas]
SUDS	Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible
WSUD	Diseño Urbano Sensible al Agua, traducción de <i>Water Sensitive Urban Design</i>

LISTA DE SÍMBOLOS Y UNIDADES

- E_0 = Relación de flujo para una anchura elegida (usualmente el ancho de la rejilla) con respecto del flujo total (adimensional)
- Q = Caudal total (m^3/s)
- Q_w = Caudal frontal (ancho W) (m^3/s)
- Te = Extensión total del agua (m)
- W = Ancho de captación o rejilla (m)
- Q_s = Capacidad de flujo de la sección encima de la concavidad de la cuneta (m^3/s)
- R_f = Relación de flujo frontal interceptado con respecto al flujo total (adimensional). No puede exceder 1.0
- K_u = 0.295
- V = Velocidad de flujo total (m/s)
- V_0 = Velocidad de inicio de salpicaduras (m/s)
- SL = Pendiente longitudinal (m/m)
- S_x = Pendiente transversal (m/m)
- T = Propagación del flujo (m)
- R_s = Velocidad de inicio de salpicadura (m/s)
- L = Longitud de la banqueteta (m)
- E_f = Eficiencia de una rejilla (m/m)
- Q_i = Capacidad de captación de la coladera (m^3/s)
- C_w = Coeficiente de descarga (1.66)
- P = Perímetro mojado de la rejilla hasta su altura máxima (m)
- V_E = Volumen de escorrentía a almacenar en origen (m^3)
- A_{imp} = Área impermeable (m^2)
- V_{80} = Volumen de lluvia de percentil 80% para garantizar cantidad (mm)
- V_{SUDS} = Volumen neto disponible de almacenamiento (m^3)
- A_b = Área de la base (m^2)
- h = Profundidad del espacio ocupado por los paneles (m)

- c_p = Coeficiente de volumen efectivo por panel fractal hexagonal (0.80)
- A_o = Área de la sección transversal interna del orificio (m^2)
- A_s = Área en planta de la toma de almacenamiento del SUDS (m^2)
- C_d = Coeficiente de descarga (m). recomendable $C_d = 0,60$ m
- g = Aceleración originada por la gravedad (m/s^2).
- $t_{vaciado}$ = Tiempo de vaciado (s)
- h = Distancia desde la superficie de la lámina de agua hasta el centro del orificio (m).

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se muestra un planteamiento a la problemática existente en las ciudades en cuanto a la gestión urbana del agua pluvial. Se hace un análisis de los enfoques de gestión que a lo largo de la historia se han implementado y de las alternativas actuales para la solución de dicha problemática. También se realiza una descripción del planteamiento, justificación y objetivos de la presente investigación.

1.1. GESTIÓN URBANA DEL AGUA PLUVIAL

1.1.1. Problemas de la gestión del agua pluvial en las ciudades

Desde los primeros asentamientos humanos, el desarrollo de una sociedad ha tenido como base la elección de una adecuada ubicación geográfica que favorezca las actividades sociales, políticas y económicas, valorando la disposición de recursos, como fuentes de agua, suelo fértil y clima, dando como resultado el crecimiento de las ciudades (Andrés-Valeri, 2017; Zevenbergen et al., 2018). Las antiguas civilizaciones comprendieron la importancia económica del agua y la necesidad de controlar sus eventos más extremos y devastadores, tales como inundaciones y sequías. Actualmente, el interés por el estudio de estos efectos negativos se ha incrementado, sobre todo cuando el crecimiento demográfico, la contaminación ambiental y la demanda de agua han convertido al vital líquido en un recurso escaso. Sin embargo, aunque estas ideas se han extendido, no lo hacen a la velocidad de los problemas que aquejan a la sociedad (Díaz-Delgado et al., 2005).

Una de las épocas detonantes para el crecimiento económico mundial fue el proceso industrializador del siglo XIX que trajo consigo un desarrollo importante de las ciudades, época en la que se urbanizaron amplias extensiones de terrenos que produjeron una masiva impermeabilización del suelo, dando lugar al deterioro del ambiente con la explotación de los recursos naturales sin consideración alguna (Shao et al., 2018; Schuetze y Chelleri, 2013). La urbanización ha sido un importante motor de problemas ambientales. Las inundaciones urbanas severas resultantes de un área impermeable mayor amenazan la seguridad de los residentes, los activos de los hogares y la integridad de la infraestructura. Sin embargo, los impactos de la urbanización generalmente están entrelazados con los del cambio climático y no se pueden separar fácilmente (Shao et al., 2018).

Informes del Banco Mundial (2018) estiman que un poco más del 50% de la población mundial vive en ciudades, mientras que en México el porcentaje de la población urbana aumenta drásticamente hasta niveles del 80%. A lo anterior, se le suma la situación de que las ciudades más grandes del mundo, el 80% de ellas, son vulnerables a terremotos y 60% a tsunamis, por ello resulta obvio y necesario contar con nuevas herramientas y enfoques que fortalezcan los gobiernos locales y ciudadanos para una mejor protección de los recursos humanos, económicos y naturales de los pueblos y ciudades (Banco Mundial, 2018; ONU, 2018a).

El agua juega un rol importante en el desarrollo de las ciudades para que sean habitables, sustentables y productivas, ante los problemas que se afrontarán en el futuro. Dhakal y Chevalier (2017) destacan que las prácticas convencionales de urbanización y de gestión de las aguas pluviales son insostenibles ya que, al eliminar la vegetación y la capa superficial del suelo, creando superficies impermeables, se destruye la biodiversidad natural y los procesos hidrológicos desconectando a las ciudades de la naturaleza y privadas de los servicios que ofrece a la humanidad, como el control de inundaciones, aire fresco, agua limpia y la belleza natural.

Efectos de impermeabilización del suelo

La impermeabilización del suelo en las ciudades es un condicionante en la gestión del agua de lluvia dentro de la ciudad, pudiendo también tener efectos significativos en los cauces aguas abajo de la misma, produciendo, en determinados casos, cambios morfológicos en el cauce y un incremento del riesgo de inundación (Andrés-Valeri, 2017).

La continua impermeabilización urbana producida durante el último siglo, ha ocasionado un aumento de los volúmenes de escorrentía y de la temperatura de las ciudades que está generando importantes impactos ambientales (Rodríguez-Rojas, 2019)

El rápido crecimiento de las ciudades originó sitios insalubres donde agrupaba una población que sufría problemas higiénicos derivados de la acumulación de aguas residuales en las calles. Esto, aunado a una incipiente circulación de vehículos, generó la necesidad urgente de implementar servicios que mejoraran la calidad de vida de los ciudadanos (pavimentación, saneamiento, abastecimiento, etc.). Así, los planes urbanísticos de la época (Plan Haussmann en París, 1853; Plan Cerdá en Barcelona, 1860, etc.) fueron el resultado de un proceso de modernización que tenía como principal objetivo sanear y hacer transitable la ciudad impermeabilizando las superficies urbanas, en un proceso de urbanización que segregaba la gestión del agua del diseño del espacio urbano. Esto ha generado que de los 1.000 km² de superficie que se urbanizan al año en Europa el 67 % sean impermeables, lo cual ha consolidado un proceso de sellado del suelo que está teniendo graves consecuencias en la ciudad, como la modificación del clima urbano o efecto 'Isla de Calor' (Rodríguez-Rojas, 2019)

Rodríguez-Rojas (2019) destaca que la impermeabilización de los suelos ha disminuido la infiltración de agua, aumentando considerablemente la cantidad y velocidad de la escorrentía superficial y originando una situación de insuficiencia de las redes de

saneamiento tradicionales, haciendo que las primeras redes unitarias proyectadas en su mayoría en los ensanches de finales del siglo XIX y ampliadas durante todo el siglo XX hasta el límite de sus posibilidades, resulten hoy en día insuficientes. Este fenómeno de impermeabilización urbana, ya de por sí grave hoy en día, empeorará previsiblemente en los próximos años por el incremento de intensidad de las lluvias que prevén los actuales modelos de cambio climático. Planificar las ciudades para aumentar su resiliencia ante este fenómeno se ha convertido en un desafío mayor y objetivo primordial para reducir en la medida de lo posible sus efectos.

Las graves consecuencias de la impermeabilización del suelo y la amenaza constatada del cambio climático ponen de manifiesto la necesidad urgente de generar un cambio de paradigma en la gestión del drenaje urbano, más allá de la concepción tradicional de 'sanear la ciudad'. Resulta imprescindible evolucionar de un modelo basado en la ampliación continua y siempre insuficiente de las redes de saneamiento, a otro en el que la planificación urbana se convierta en una herramienta para diseñar Ciudades Sensibles al Agua, que equilibren la relación agua-ciudad, mejoren la calidad de vida de los ciudadanos y generen entornos más resilientes ante la intensificación de los fenómenos meteorológicos extremos (Rodríguez-Rojas, 2019).

Cambio climático

El cambio climático es reconocido como uno de los grandes retos del siglo XXI por sus causas, consecuencias globales y por sus impactos regionales heterogéneos y asimétricos. Desde la óptica económica, el cambio climático es quizá la mayor externalidad negativa del sistema productivo, evidenciando la insostenibilidad de los patrones productivos y de consumo, y obligando a redefinir el estilo de progreso en un nuevo marco de desarrollo sostenible (CEPAL, 2015).

El cambio climático incrementa el riesgo de desastres naturales al aumentar la incidencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos, así como de otras alteraciones de lenta evolución como las sequías, de ahí que un importante aspecto de la adaptación al cambio climático sea la resiliencia ante los desastres (UNISDR, 2015).

El Marco de Sendai para Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 es el acuerdo internacional que establece los lineamientos para lograr una adecuada gestión del riesgo de desastres en relación con amenazas múltiples al desarrollo, en todos los niveles, así como en todos los sectores y entre un sector y otro. Lo que busca es reducir

sustancialmente el riesgo de desastres y las pérdidas ocasionadas por éstos, tanto en vidas y medios de subsistencia como en los bienes económicos, físicos, sociales, culturales y ambientales de las personas, las empresas, las comunidades y los países. Las medidas adoptadas deben prevenir la aparición de nuevos riesgos de desastre, reducir los existentes mediante la disminución de la vulnerabilidad y del grado de exposición a amenazas, fortalecer la preparación para la respuesta y la recuperación, así como consolidar de este modo la resiliencia (UNISDR, 2015).

En el contexto del riesgo de desastres, la resiliencia es entendida como “la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas” (UNISDR, 2015). La amenaza o peligro es el evento físico de origen natural (geológico, meteorológico y biológico) o antropogénico (degradación ambiental y amenazas tecnológicas), potencialmente perjudicial que puede derivar en la pérdida de vidas o lesiones, daños materiales, grave perturbación de la vida social y económica y/o degradación ambiental (UNISDR, 2015).

De acuerdo con Jiang et al. (2018), uno de los principales problemas en las ciudades, a causa del cambio climático, son las inundaciones provocadas por lluvias de alta intensidad, que en poco tiempo pueden generar situaciones de inundación peligrosas. Además, el cambio climático significa precipitaciones extremas frecuentes que aumentan los riesgos de inundación. Durante la urbanización, las tierras naturales se convierten en lugares residenciales o comerciales, lo que da como resultado superficies más impermeables en áreas urbanas que crean una escorrentía de agua incontrolada, exponiendo así a las personas a mayores inundaciones. Como ejemplo, si bien pareciera ser prioritario erigir rascacielos y edificios en nombre del desarrollo económico, esto en realidad está reemplazando y / o amenazando ecosistemas acuáticos como lagos y áreas de humedales. En efecto, el resultado final de este tipo de procesos es un compromiso serio de los recursos hídricos disponibles (Nguyen et al., 2019).

Contaminación difusa

El incremento de los eventos de lluvia en las ciudades provoca un aumento en la escorrentía y por lo tanto en el volumen de agua que ingresa a un sistema de alcantarillado. El aumento en los caudales de agua en periodos de lluvia da lugar a otro problema que afectan los

sistemas de gestión de aguas pluviales: la contaminación difusa, llamada así por su origen no localizado (Andrés-Valeri, 2017). La contaminación de las aguas de lluvia que se da por el lavado de las superficies por las que escurre y de acuerdo con las investigaciones realizadas por Fernández Barrera (2009), la contaminación de la escorrentía tiene una relación estrecha con la actividad humana teniendo una afectación negativa para el ambiente y la sociedad.

Los orígenes de la contaminación de la escorrentía superficial no tienen una única fuente de generación y la concentración depende de factores presentes en la cuenca entre los que se encuentran: el tamaño de la cuenca, el uso de suelo, la densidad del tráfico, orientación del viento y factores dependientes de la precipitación como la intensidad, duración, magnitud (volumen de agua precipitada), así como la duración del periodo seco entre dos eventos consecutivos (Fernández Barrera 2009).

Las actividades humanas arrojan grandes cantidades de nutrientes, metales pesados (MM), sedimentos, aceites, pesticidas y otros contaminantes en la escorrentía de aguas pluviales (Yuan et al., 2019). Ostrom y Davis (2019) enlistan diferentes contaminantes que pudieran estar presentes en la escorrentía superficial, estos elementos pueden agruparse en aceites y grasas (aceites de motor, gasolinas, diésel, entre otros), metales (zinc, cobre, hierro, entre otros), nutrientes y materia orgánica sólo por mencionar los más comunes.

Andrés-Valeri (2017) destaca que la contaminación arrastrada por el agua de escorrentía muestra sus máximos valores al comienzo de las precipitaciones, debido al mayor lavado y arrastre ejercido por las primeras aguas de lluvia, decreciendo su concentración a partir de los 20-30 minutos de precipitación. En la tabla 1.1 se muestran algunos parámetros calidad del agua investigados por Andrés-Valeri (2017).

Tabla 1.1. Parámetros de calidad en aguas pluviales (Andrés-Valeri, 2017)

Elemento	Rango	Típico	Unidades
DQO	20-275	75	[mg O ₂ /L]
SST	20-2980	150	[mg/L]
Pt	0.02-4.3	0.36	[mg/L]
Nt	0.4-20	2	[mg N/L]
Pb	0.01-1.2	0.18	[mg/L]
Cu	0.01-0.4	0.05	[mg/L]
Zn	0.01-2.9	0.2	[mg/L]
Coliformes fecales (c/100 ml de agua)		400-50·10 ³	

Existen elementos diseñados como complementos de los sistemas de drenaje convencionales para el tratamiento de las aguas pluviales (Fernández Barrera 2009). Sin embargo, las investigaciones sobre la eficacia del funcionamiento (CALTRANS, 2007) concluyen que la mayoría de los sistemas no tienen un rendimiento satisfactorio y que, además, tienen un bajo nivel de confianza en su nivel de tratamiento.

La necesidad de la gestión del agua pluvial

Es evidente que la seguridad sostenible del agua no se logrará a través de enfoques convencionales que han demostrado su ineficacia. Las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) trabajan con la naturaleza en lugar de hacerlo contra ella, y por tanto proporcionan un medio esencial para ir más allá de lo convencional e intensificar el aumento de eficiencia social, económica e hidrológica en la gestión de los recursos hídricos (ONU, 2018).

La Asociación Internacional del Agua (IWA, por sus siglas inglés) estableció las características y directrices de una ciudad sensible al agua (csa) en doce principios. Entre estos principios se resalta que una ciudad del futuro sensible al agua tendrá que garantizar los servicios de agua potable y sanidad para la población que aumentará en número y comunidades. Para garantizar estos servicios, la ciudad del futuro se asentará de manera compacta y contará con infraestructura sustentable que integre y guarde armonía con el medio ambiente natural (Howe y Mitchell, 2012).

Definiciones más recientes han incorporado los estándares de vida de la población y el desarrollo sostenible como referentes para entender la resiliencia de los sistemas sociales, como puede verse en la siguiente definición utilizada para los proyectos del Fondo Internacional Climático del Reino Unido: La resiliencia es la capacidad de los países, gobiernos, comunidades y hogares para manejar el cambio al mantener y transformar sus estándares de vida frente a los shocks y estresores, al mismo tiempo que continúan su desarrollo sin comprometer sus perspectivas de largo plazo. Por lo tanto, la resiliencia dependerá de la capacidad del sistema y de los individuos para anticiparse, planificar, enfrentar, recuperarse y adaptarse a las amenazas climáticas y a sus efectos primarios (Brooks et. al., 2014).

La Nueva Agenda Urbana y la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible proyectan alcanzar ciudades y asentamientos humanos inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles, haciendo referencia a la resiliencia ante el cambio climático y los desastres naturales (Castro Filho, 2018).

Andrés-Valeri (2017) identifica dos posibles soluciones ante los problemas de gestión de agua pluvial en las ciudades:

- Incrementar la capacidad de los colectores en los núcleos urbanos con problemas de drenaje y en las plantas tratadoras de aguas residuales que dan servicio, situación que desembocaría en un aumento en los costos de operación y mantenimiento.
- Poner en práctica técnicas alternativas de drenaje que, cambiando el paradigma tradicional de gestión de aguas pluviales, permitan recuperar en parte el ciclo natural del agua en los entornos urbanos.

Los estudios y experiencias (Andrés-Valeri, 2017; Fernandez Barrera, 2009; Nguyen et al., 2019; Randall et al., 2019) en la línea de investigación donde se enmarca esta tesis de maestría, abogan por la combinación de técnicas alternativas y el uso del drenaje actual, dando paso a los sistemas de drenaje sostenible que se describen a continuación.

1.1.2. Fundamentos de los sistemas de drenaje sostenible

El desarrollo del drenaje urbano ha evolucionado a través de los tiempos, Sedlak (2014) divide la historia de las tecnologías del agua en 4 períodos (designados Water 1.0 a 4.0) desde 3000 a. C. hasta la actualidad.

En *Water 1.0*, el crecimiento de la población de Roma durante el período del Imperio Romano condujo a una mayor demanda de agua; por lo tanto, los ingenieros romanos construyeron un sistema de agua inicial para importar y distribuirlo a los hogares y espacios públicos a través de redes de tuberías y luego el agua usada se devolvió al medio ambiente (Sedlak, 2014).

El *Water 2.0* comenzó cuando la economía de los Estados Unidos creció, pero los desarrollos de las industrias contaminaron los ríos a través de aguas residuales contaminadas. Para hacer frente a esta situación, los bacteriólogos estadounidenses crearon un innovador sistema de aguas residuales conocido como biopelícula para depurar el agua contaminada para que fuera apta para el consumo (Sedlak, 2014).

Durante *Water 3.0*, el desarrollo del tratamiento de aguas residuales fue el objetivo mediante la construcción de estanques de retención para almacenar el agua y regularizar la velocidad del flujo de aguas residuales a través de filtros, donde controlaban la

abundancia de microorganismos para tratar los desechos tóxicos antes de ser descargados en los ríos (Sedlak, 2014).

La etapa final, *Water 4.0*, es una en la que la próxima generación de sistemas de drenaje resuelve los problemas de los tres sistemas de agua anteriores al reemplazar la infraestructura de agua urbana obsoleta y hacer que la comunidad sea más consciente de cómo administrar los recursos hídricos (Sedlak, 2014). Las características de los periodos, se resumen en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Una comparación de los diferentes sistemas de drenaje urbano desde 3000 a.C. hasta la actualidad. (Sedlak, 2014)

No.	Periodo	Objetivo	Logros	Limitaciones
1	Civilización antigua	Recolección de agua de lluvia; mitigación de inundaciones; y transportando desechos	Numerosos sistemas de alcantarillado exitosos y poco económicos paralelos a la planificación social	Falta de optimización y estándares numéricos antes de la construcción.
2	Imperio romano	Recolección de agua de lluvia en la azotea; mitigación de inundaciones; y almacenamiento de agua en estructuras subterráneas	Prácticas uniformes de drenaje de carreteras y grandes alcantarillas subterráneas.	Falta de cálculo para equilibrar el volumen de almacenamiento de agua y el suministro de agua, lo que lleva a que el agua se desborde en las calles y áreas públicas
3	Época post romana hasta 1800	Mitigación de inundaciones y eliminación de aguas residuales.	Calzadas de piedra con sistemas de drenaje de superficie y subsuelo construidos con una corona en el centro y canales a los lados; y alcantarillas de madera	Exponiendo muchos problemas de drenaje urbano debido al mantenimiento insuficiente de las alcantarillas y la posterior propagación de enfermedades.
4	Desde el siglo XIX hasta nuestros días.	Problemas urbanos integrados relacionados con el agua	Mejora del método de construcción y las prácticas de mantenimiento; construcción de tratamiento de aguas residuales; aplicación de modelado matemático para diseño y construcción; y mejorar la conciencia ambiental	Los métodos para diseñar y planificar una gestión sostenible del agua urbana todavía están en las fases de investigación y prueba.

El problema de la gestión de las aguas pluviales es cada vez más complejo conforme avanza el tiempo. En efecto, el crecimiento urbanístico desaforado ha generado un aumento de las superficies impermeables en el entorno de las urbes, lo cual genera e incrementa los problemas relacionados con el drenaje y la gestión del agua pluvial (Bayon et al., 2009). Las terminologías y prácticas para la gestión de agua son muy diversas dependiendo del lugar, sin embargo, los criterios de diseño son similares (Fletcher et al. 2015). Dentro de la amplia variedad de procedimientos la gestión del agua surge el concepto de drenaje sostenible como un conjunto de medidas que contribuyan a mantener y replicar, de la forma más cercano posible, el régimen hidrológico natural de una cuenca urbana considerando el agua pluvial como un recurso natural. Es decir, que el correcto tratamiento de las aguas pluviales no debe basarse en su rápida evacuación y eliminación, sino que su correcta gestión debe condicionar el desarrollo de la propia ciudad (Andrés-Valeri 2017; Fletcher et al. 2015).

De acuerdo con Fletcher et al. (2015), el término *diseño urbano sensible al agua (WSUD)* es de las primeras filosofías de gestión urbana en el mundo y comenzó a utilizarse en la década de 1990 en Australia por Whelans et al. (1994) quien definió los objetivos de WSUD para:

- gestionar el balance hídrico (considerando las aguas subterráneas y los flujos de lluvia).
- mantener y, en la medida de lo posible, mejorar la calidad del agua (incluidos los sedimentos, la protección de la vegetación y minimizar la exportación de contaminantes a las aguas superficiales y subterráneas).
- fomentar la conservación del agua (minimizando la importación de agua potable, mediante la recolección de aguas pluviales y el reciclaje de aguas residuales, y reducciones en los requisitos de riego).
- mantener las oportunidades ambientales para la recreación relacionadas con el agua.

Fletcher et al. (2015) y Rodríguez-Hernandez (2008) enlistan los diferentes términos usados para definir las soluciones del movimiento global para mejorar el drenaje urbano. Los principales términos utilizados son:

- Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), traducción de *Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)*, desarrollados en Europa.

- Desarrollo de Bajo Impacto, traducción de *Low Impact Development (LID)*, término usado comúnmente en América del Norte y Nueva Zelanda.
- Diseño Urbano Sensible al Agua, traducción de *Water Sensitive Urban Design (WSUD)*, utilizado desde los años 90's en Australia.
- Gestión Integrada del Agua Urbana, traducción de *Integrated Urban Water Management (IUWM)*, término que se menciona solamente en Francia en el Glosario Plurilingüe de Drenaje Urbano.
- Mejores Prácticas Ambientales (BPAs) referidas al agua de lluvia, traducción del *Stormwater Best Management Practices (BMPs)*, usado en Estados Unidos y Canadá.
- Medidas de Control de Agua de Lluvia, traducción de *Stormwater Control Measures (SCMs)* que se identifica como una alternativa de las *BMPs* en los Estados Unidos.
- Técnicas alternativas de drenaje, que se traducen de *Alternative techniques (ATs)* o *compensatory techniques (CTs)*, termino atribuido a Francia para los años de 1980.
- Infraestructura verde, traducción de *Green Infrastructure*, concepto propuesto en Estados Unidos que promueve la relación sostenible entre la infraestructura y el ambiente.

Fernández Barrera (2009) agrupa estas técnicas y metodologías en dos categorías principales: medidas de gestión y medidas estructurales.

Mediante la implementación de los SUDS se pretende que la respuesta hidrológica de una zona urbanizada sea lo más parecida posible a la que tenía en su estado original, antes de la urbanización, de manera que sea posible minimizar los impactos del desarrollo urbano en cuanto a la cantidad y calidad de la esorrentía.

Para Bayon et al. (2009), los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) se encuentran dentro de las nuevas estrategias empleadas para mejorar el funcionamiento y desarrollo urbano sostenible de las ciudades. Además de los beneficios de la gestión de aguas pluviales, Urrestarazu et al. (2017) destacan que los SUDS pueden favorecer el logro de otros beneficios, como son los sistemas ecológicos, la mejora de la habitabilidad de los entornos urbanos, la reducción de la temperatura ambiente, la agricultura urbana, etc.

La manera que proponen Howe y Mitchell (2012) para alcanzar los objetivos de la ciudad del futuro, en un inicio, es proporcionar valor a los recursos hídricos. Los principios señalan que el buen manejo del ciclo del agua provocará que la comunidad sea sostenible y tienda

a conformar una ciudad verde. Con este enfoque se establece que todo tipo de agua, ya sea gris o sanitaria, tiene un valor y se puede emplear en algún uso particular, es decir, no es necesariamente desechable. Esto último significaría un ahorro del agua con mayor calidad hoy en día utilizado para propósitos que no requieren dicha característica.

En el enfoque de los principios de la ciudad sensible al agua, deben implementarse diversos tipos de sistemas sustentables para el manejo del agua, que será el resultado de una colaboración estructurada de la ciudadanía, de los organismos públicos y de los organismos privados en la planeación urbana (González et. al., 2017).

El enfoque tradicional que se utiliza para gestionar las aguas pluviales de la ciudad se basa en desalojar las aguas pluviales a través de canales superficiales y un drenaje a base de tuberías, y a su vez es mediante un sistema de drenaje combinado, donde las aguas pluviales se mezclan con las aguas de descarga doméstica e industriales. El enfoque sostenible, como el de las ciudades esponja, trata de integrar al sector social, económico y ambiental a partir de soluciones para reducir el impacto negativo que llegan a ocasionar en un dado momento las aguas pluviales en las áreas urbanas (Philip et al., 2011).

Los sistemas de drenaje sostenible se inscriben dentro del enfoque de los últimos años, que ha sido reducir las afectaciones por la urbanización, pero ahora se deben cumplir varios objetivos para mejorar la calidad del agua y reciclar el agua de lluvia, es decir, contar con estrategias que ofrezcan una solución más holística para la gestión del agua de lluvia (Nguyen et al., 2019). Las grandes ciudades han sugerido una serie de soluciones para abordar los problemas del agua en las zonas urbanas, a fin de tener ciudades de crecimiento inteligente y ciudades verdes (Liu y Jensen, 2018), dicho enfoque se denomina ciudad esponja y se describe a continuación.

1.1.3. La ciudad esponja, el nuevo enfoque de gestión urbana del agua

Las grandes ciudades del mundo tienen un papel importante en la transformación sostenible del mundo. Existen regiones, como la región Asia-Pacífico, que se encuentran a la vanguardia del cambio económico, social, político y tecnológico. Sin embargo, también se caracterizan por la pobreza urbana y la desigualdad generalizada con enormes deficiencias en el acceso a la vivienda y a los servicios básicos añadiendo un visible deterioro de la calidad del medio ambiente urbano (Dahiya y Das, 2020).

Para Arfanuzzaman y Dahiya (2019) y Dahiya y Das (2020), la Nueva Agenda Urbana (NUA, por sus siglas en inglés) prioriza los problemas que enfrentan los asentamientos humanos

contextualizándolos dentro del marco del desarrollo urbano sostenible e incluyente en el mundo. En segundo lugar, la NUA, revisa sistemáticamente la idea de gobernanza y proporciona información sobre las ideas de descentralización y la democratización, así como su relevancia para las ciudades.

La NUA revisa tres áreas de preocupación inmediata: (i) la gobernanza urbana como un parteaguas para responder a los desafíos urbanos, (ii) la planificación y política urbanas, y (iii) prestación de servicios y acceso para la inclusión social. Al hacerlo, destaca los últimos principios de la agenda urbana global que se articulan en la NUA, y el Objetivo de Desarrollo Sostenible 11: Hacer que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles (Dahiya y Das, 2020).

Diversos investigadores (Storms et al. 2019; Andimuthu et al., 2019) describen a la resiliencia como la habilidad de cualquier sistema urbano de mantener continuidad después de impactos o de catástrofes mientras contribuye positivamente a la adaptación y la transformación. Por tanto, una ciudad resiliente es aquella que evalúa, planea y actúa para preparar y responder a todo tipo de obstáculos, ya sean repentinos o lentos de origen, esperados o inesperados. De esta forma, las ciudades estarían mejor preparadas para proteger y mejorar la vida de sus habitantes, para asegurar avances en el desarrollo, para fomentar un entorno en el cual se pueda invertir, y promover el cambio positivo.

A medida que los riesgos y la población urbana van aumentando, el concepto de resiliencia ha ganado más prominencia en las agendas internacionales de desarrollo. Este hecho es extremadamente relevante debido a que, teniendo en cuenta que los grupos más vulnerables y más pobres están más expuestos a las conmociones y pueden no tener los recursos necesarios para recuperarse, las agendas de desarrollo que incorporen la resiliencia como concepto clave van a asegurar que no se deje a nadie atrás (ONU, 2018).

Algunos países han promovido nuevos enfoques para aumentar la resiliencia de las ciudades ante los efectos que tiene el cambio climático, uno de estos enfoques es el concepto de *ciudades esponja* (sponge city), que se propuso en 2012 en China durante el Foro de Desarrollo Urbano y Tecnología Bajo en Carbono para abordar el conflicto entre el desarrollo y la resistencia al cambio climático que enfrentan las ciudades (Zhang et al., 2017). El enfoque de *ciudades esponja* tiene como objetivo mejorar los procesos de la infiltración, la evapotranspiración y la recolección y reutilización de las aguas pluviales en el entorno urbano (Zevenbergen et al., 2018).

Zevenbergen et al. (2018) definen que los objetivos generales del concepto implican "restaurar" la capacidad de la ciudad para absorber, infiltrar, almacenar, acondicionar, drenar y gestionar el agua de lluvia y "regular" el ciclo del agua tanto como sea posible para imitar el ciclo hidrológico natural.

De 2000 a 2007, el gobierno chino implementó infraestructura verde para la utilización de aguas pluviales, pero la eficiencia de este sistema en la utilización de agua de lluvia fue inicialmente muy pobre. La razón fue la falta de factores ideales, incluidas tecnologías y materiales ecológicos (Liu et al., 2013), esto significó que el escenario ideal de la ciudad esponja, para mejorar las infraestructuras verdes, se viera difícil de alcanzar, dando paso a más investigaciones para obtener los objetivos planteados.

La ciudad esponja representa un buen ejemplo de la mejora de los suministros de agua urbanos a gran escala, basado en gran medida en la aplicación de enfoques de infraestructura verde en paisajes urbanos, principalmente para mejorar la disponibilidad de agua. En China se tiene actualmente el ambicioso objetivo de lograr que, en el año 2030, el 80% de sus áreas urbanas absorba y reutilice al menos el 70% del agua de lluvia (ONU, 2018).

Conceptos principales

De acuerdo con Nguyen et al. (2019), hay cuatro conceptos principales que intervienen en la ciudad de la esponja. El primero es hacer que la superficie de la ciudad sea mejor para absorber y almacenar agua de lluvia con el fin de suministrar agua y mitigar la escorrentía de aguas pluviales que pueda provocar inundaciones. El segundo principio versa sobre la gestión de la ecología del agua a través de sistemas de tratamiento. El tercero se refiere a la aplicación de infraestructura verde para depurar, restaurar, ajustar y reutilizar las aguas pluviales, lo que ayuda a las ciudades a evitar la contaminación del agua y el suelo. En cuarto lugar, el uso de pavimentos permeables en la construcción de carreteras urbanas beneficiará a una ciudad esponja.

La implementación de ciudad esponja se puede dividir en escenarios de macro-escala y micro-escala (Nguyen et al., 2019). En el contexto de microescala, el enfoque principal es implementar diseños para zonas puntuales de la ciudad, pudiendo ser jardines de lluvia, bioretención de aguas pluviales y humedales artificiales. Al maximizar la eficacia de las técnicas en micro-escala se traslada a la macro-escala, sistemas de infraestructura de aguas pluviales se integran con los sistemas de la hidrología natural incluyendo césped,

árboles, arbustos y las zonas de amortiguamiento viables de estas zonas. Cabe destacar que los beneficios a micro-escala impulsan los beneficios a macro-escala. Los beneficios ambientales y de calidad del agua son creados por los beneficios hidrológicos al mejorar la infiltración de agua y la recarga del flujo de agua (Zhang y Chui, 2019). La implementación exitosa de una ciudad de esponja a escala de captación se puede lograr maximizando las prácticas de infraestructura verde.

La implementación del enfoque de ciudad está involucrada en un amplio espectro de infraestructuras verdes con soluciones basadas en la naturaleza, como las que se describieron en el apartado 1.1.2., estas diferencias entre conceptos se definen en la tabla 1.3.



Tabla 1.3. Comparación del contenido y las características principales entre construcción de ciudades esponja (SCC¹) y otras estrategias de gestión urbana de aguas pluviales (USM²) en el mundo (Ding et al., 2019).

Estrategias USM ²	Connotación	Alcances	Contenido principal	Características principales	Instalaciones
Infraestructura verde (GI³)	Una red que proporciona los elementos para resolver los desafíos urbanos y climáticos mediante la construcción con la naturaleza	En el alrededor y dentro de las ciudades	Gestión de aguas pluviales, adaptación al clima, reducción del estrés térmico, mayor biodiversidad y producción de alimentos, mejor calidad del aire, producción de energía sostenible, agua limpia y suelos saludables, mejor calidad de vida a través de la recreación	Representar una red de espacios verdes y corredores con objetivos más allá de la gestión de las aguas pluviales, como maximizar los servicios ecosistémicos, la restauración de cuencas hidrográficas y la conservación de la biodiversidad; asemejando el sinónimo de LID ⁴ en la literatura de gestión de aguas pluviales	Bosques urbanos, construcción humedales, techos verdes y muros verdes, callejones verdes, patios escolares verdes e instalaciones de desarrollo de bajo impacto
Desarrollo de bajo impacto (LID⁴)	Un enfoque de planificación y diseño de ingeniería basado en el entorno ecológico para gestionar las tecnologías de escorrentía y de tratamiento de aguas pluviales	Normalmente relacionado con la planificación macroscópica y el desarrollo para toda una región urbana	Implementar controles hidrológicos a pequeña escala diseñados para replicar el régimen hidrológico natural de cuencas hidrográficas a través de infiltrar, almacenar, evaporar y detener la escorrentía cerca de la fuente de origen	LID representa prácticas que a menudo se implementan in situ para controlar las aguas pluviales en la fuente y recuperar los procesos hidrológicos y condiciones naturales	Celdas de bioretención, techos verdes, zonas de infiltración, pavimento permeable, jardines de lluvia, tanques de lluvia
Mejores prácticas de gestión (BMP⁵)	Un tipo de práctica de control de la contaminación del agua	En su mayoría indica prácticas de ingeniería individuales (tanto urbanas como rurales)	Controles auxiliares de contaminación de aguas residuales industriales y control de aguas residuales municipales, y pueden referirse a una técnica principal de control o tratamiento en la gestión de aguas pluviales y la gestión de humedales	Incluir tanto actividades no estructurales como prácticas estructurales que puedan reducir la contaminación por descargas de aguas pluviales, no necesariamente prácticas in situ	Estanques de aguas pluviales, humedales de aguas pluviales, prácticas de infiltración
Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SuDS⁶)	Describe a los sistemas de drenaje urbano que se ocupan del agua superficial como alternativas al drenaje urbano convencional	Área urbana	Gestión sostenible de las aguas superficiales, las aguas subterráneas y el riesgo de inundación, el mantenimiento del ciclo urbano del agua, la protección del ciclo natural, la consideración integral de la calidad del agua y el confort ambiental	SuDS se convertirá en una práctica recurrente y requerirá una colaboración y un compromiso innovador con las comunidades locales	Estanques filtrantes, zanjas subterráneas, estanques de retención de agua de lluvia y humedales construidos
Diseño urbano sensible al agua (WSUD⁷)	Enfoque filosófico de la planificación urbana y el diseño que tiene como objetivo minimizar los impactos hidrológicos del desarrollo urbano en el entorno	Zona rural y urbana	Protección de los sistemas naturales de agua, integración del tratamiento de aguas pluviales en el paisaje, reducción de los caudales de escorrentía y caudales pico, mejora de la calidad del agua drenando el área urbana	Se muestra cómo el agua superficial contribuye a la "habitabilidad", incorporando corredores de uso múltiple que maximizan la biodiversidad visual y recreativa	Tanques de captación de agua de lluvia, paisajes acuosos y techos verdes
Ciudades esponja (SCC¹)	Un marco sistemático con enfoques para mejorar la gestión del agua urbana	Antiguas y nuevas zonas urbanas	Protección y uso del ecosistema original, restauración ecológica, desarrollo de bajo impacto, mejora de la tecnología de tratamiento de aguas	Combinación de funciones del sistema de agua natural e infraestructuras artificiales	Instalaciones de desarrollo de bajo impacto, proyectos de ingeniería de tratamiento y elementos naturales, como cuerpos de agua originales o bosques urbanos

Traducciones de ¹sponge city construction; ²urban stormwater management; ³green infrastructure; ⁴low-impact development; ⁵best management practices; ⁶sustainable urban drainage system; ⁷Water-sensitive urban design

1.2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

1.2.1. Hipótesis

Las hipótesis de presente investigación son:

- Es posible diseñar un sistema de banquetetas retenedoras de agua de lluvia funcional para su implementación como SUDS, que ayude a mejorar el funcionamiento y eficiencia del drenaje pluvial convencional.
- El sistema puede diseñarse con base en un panel con arreglo estructural fractal estable y resistente.
- Es posible establecer una metodología para el diseño de banquetetas que permita la implementación generalizada de SUDS.

1.2.2. Objetivo general

Proponer un procedimiento para el diseño de una banqueteta retenedora de agua de lluvia como elemento de un SUDS, construida con base en un panel con arreglo fractal en forma hexagonal estable y resistente, que contribuya a minimizar los pulsos hidráulicos en el sistema de drenaje pluvial convencional ocasionados por las altas intensidades de las lluvias.

Para lograr el objetivo general, es necesario el cumplimiento secuencial de los siguientes objetivos específicos:

- a) Compilar los criterios vigentes en el diseño de sistemas de drenaje de agua pluvial convencionales en México para considerarles en la concepción de la banqueteta retenedora de agua de lluvia.
- b) Establecer el dimensionamiento de un panel que cumpla con las solicitudes estructurales para garantizar el correcto diseño de banquetetas retenedoras de agua de lluvia.
- c) Proponer un proceso de análisis hidrológico e hidráulico para efectuar el diseño de la banqueteta retenedora de agua de lluvia.
- d) Modelar y simular el comportamiento del nuevo panel con modelos computacionales de dinámica de fluidos (CFD) y estabilidad estructural, para evaluar el funcionamiento hidráulico y estructural del sistema de banquetetas.
- e) Analizar el costo-beneficio del sistema, comparando el costo total de la construcción y la capacidad de retención de flujos con otros sistemas equivalentes para aliviar el sistema de drenaje pluvial de forma económicamente viable.

CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE

La estructuración del Estado del Arte es una extensa y detallada revisión de la literatura, focalizada en estudios e investigaciones realizadas sobre sistemas de drenaje sostenible, característica del sistema que se propone en esta investigación, cuyo apartado culmina con un análisis sobre las deficiencias que se pueden cubrir y/o complementos que puede aportar esta investigación.

2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE DRENAJE SOSTENIBLE

Como menciona Rodríguez-Hernández (2008), son diversos los criterios que se pueden tomar en cuenta para la clasificación de los sistemas de drenaje sostenible, destacando que cada manual, grupo de investigación u organismo utiliza su propia clasificación.

Fernández Barrera (2009) propuso una clasificación de los sistemas de drenaje sostenible de acuerdo con su implementación dentro del paisaje o como parte de la infraestructura del drenaje convencional, la clasificación se encuentra en el esquema de la figura 2.1.

Por otro lado, Rodríguez-Hernández (2008) clasifica a doce técnicas de drenaje sostenible en cuatro categorías, agrupando en la primera categoría a las medidas preventivas y destacando su importancia en cualquier diseño o aplicación del drenaje urbano. Las tres categorías restantes son soluciones netamente constructivas, agrupándolas en los distintos sistemas de drenaje sostenible como se observa en el esquema de la figura 2.2.

Como compendio de los sistemas descritos por Fernández Barrera (2009), Rodríguez-Hernández (2008) y Woods-Ballard et al. (2015) se propone, en el esquema de la figura 2.3., una clasificación de SUDS de acuerdo con el mecanismo de operación ya que el proyecto de las banquetas retenedoras cumple con, o lleva a cabo, procesos de dicha clasificación. En los siguientes apartados, se detallan algunas técnicas de drenaje sostenible con los mecanismos de operación de la figura 2.3.

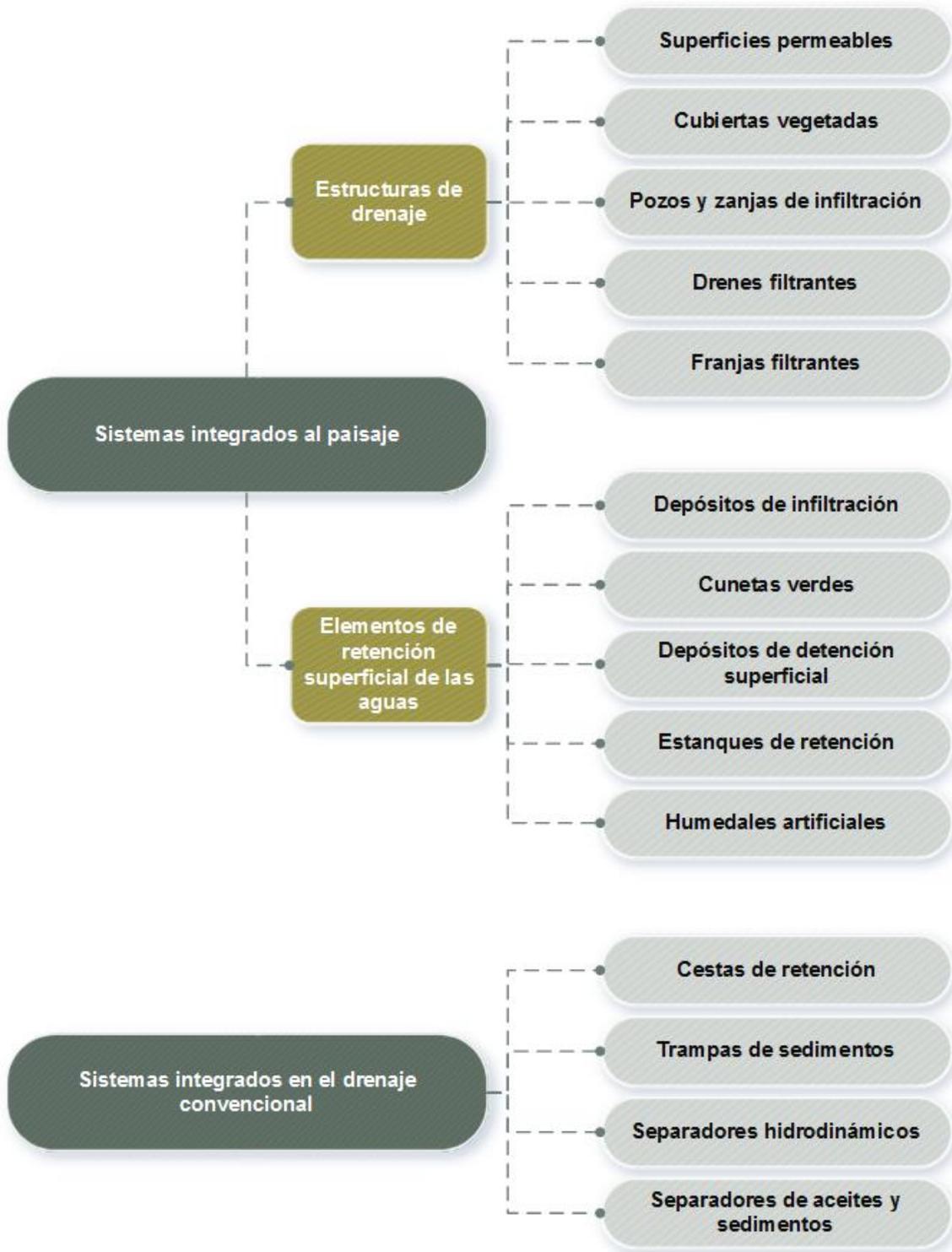


Figura 2.1. Clasificación de sistemas de drenaje sostenible de Fernández Barrera (2009)

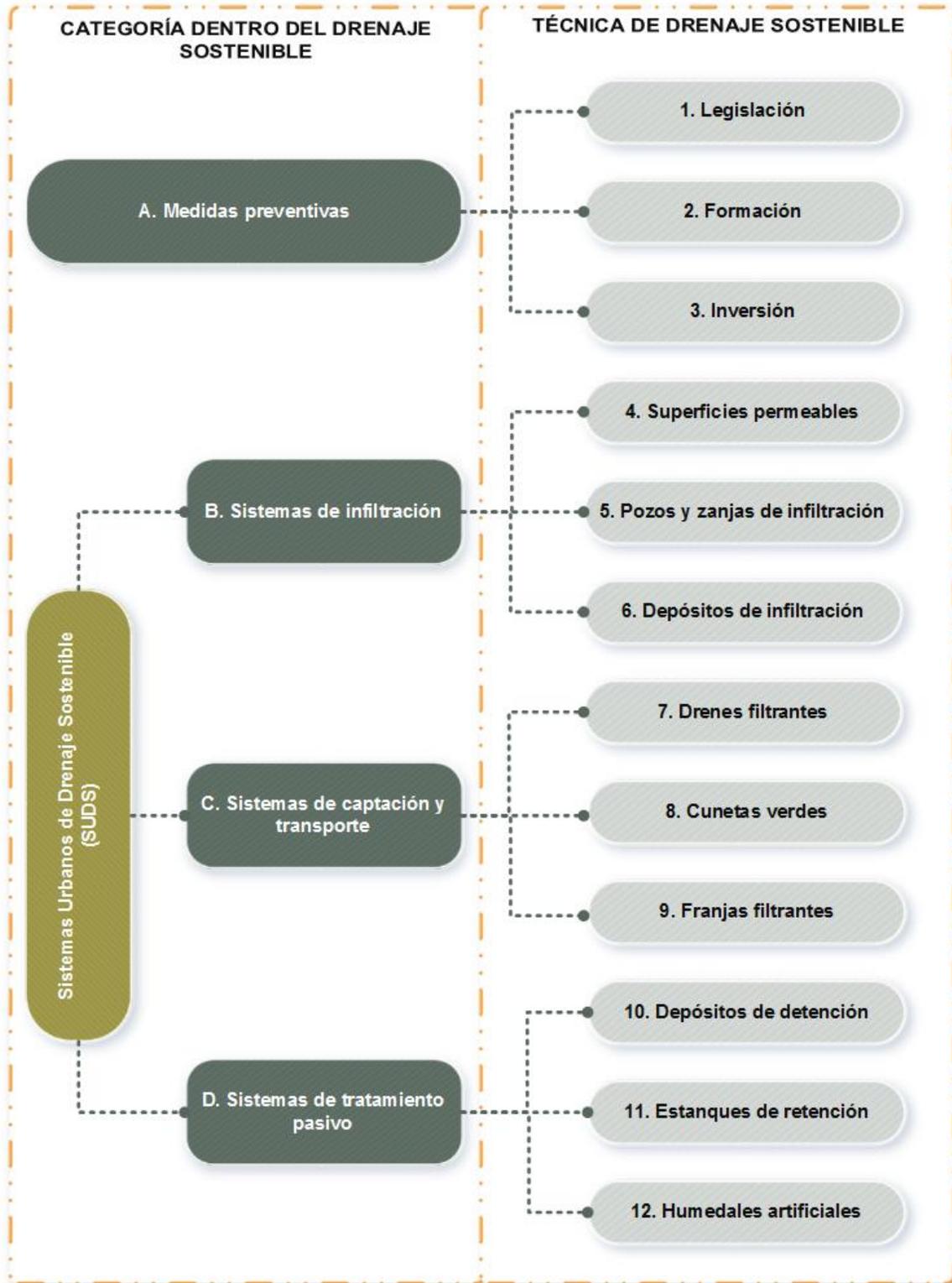


Figura 2.2. Clasificación de sistemas de drenaje sostenible de Rodríguez Hernández (2008)

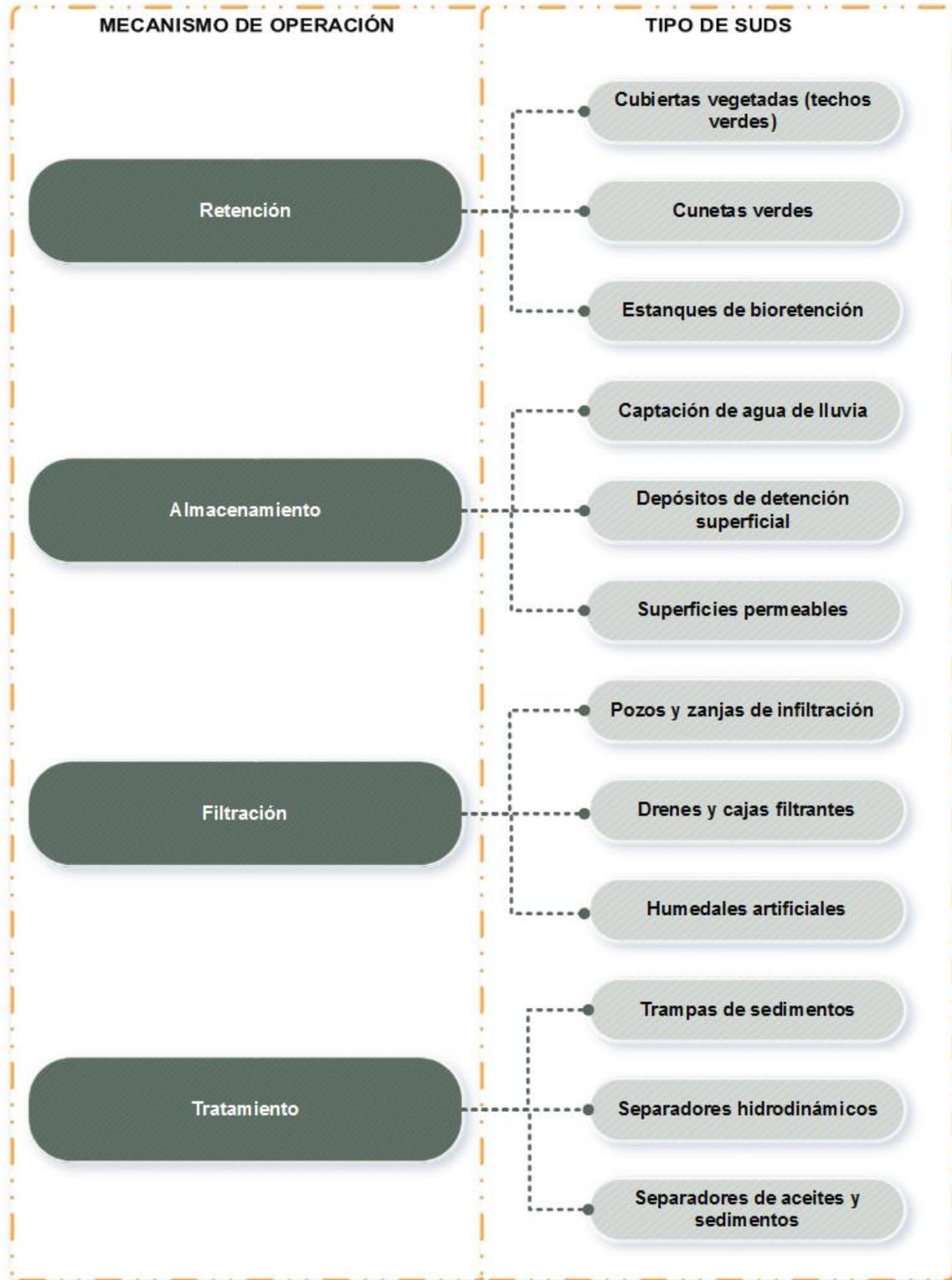


Figura 2.3. Clasificación propuesta por mecanismo de operación de sistemas de drenaje sostenible

2.1.1. Sistemas de retención

- *Techos verdes (Green roofs)*

También conocidos como jardines de lluvia en azotea, se utilizan cada vez más como práctica de manejo de esorrentía (Davis et al., 2009) dado que en las ciudades densamente urbanizadas es cada vez más raro tener superficies que cuenten con áreas vegetadas, siendo los techos, una alternativa viable para el desarrollo de la infraestructura verde (Susca, 2019). Los techos verdes mitigan la isla de calor urbano al enfriar y humedecer el aire que circula en un espacio, creando un microclima que tiene efectos benéficos dentro del área inmediata. Para beneficio técnico, los techos verdes también reducen el flujo de aguas pluviales, mejoran la resistencia térmica del techo durante todo el año y reducen los niveles de ruido, especialmente para edificios cerca de aeropuertos, fábricas o autopistas concurridas (Ismail et al., 2012).

Los techos verdes se agrupan principalmente en extensivos e intensivos (Tam et al., 2011). Por lo general, los techos verdes intensivos son más económicos que los extensivos y, debido a su peso ligero (por lo general, la capa media de crecimiento es de 5–15 cm), se pueden adaptar los techos existentes (Carter y Keeler, 2008; Castleton et al., 2010). Debido a su fácil instalación, los techos verdes montados en cajas modulares se están volviendo populares, aunque, debido a su resistencia estructural limitada, no pueden usarse para zonas peatonales o con fines recreativos. Por lo general, los techos verdes están constituidos, de arriba a abajo, por: capa de vegetación, medio de cultivo, membrana impermeabilizante y capas adicionales a su configuración como una barrera de raíz y una capa de drenaje (Susca, 2019; Woods-Ballard et al., 2015), como se observa en la figura 2.4.

Los techos verdes intensivos, también llamados jardines de techo, se caracterizan por un medio de crecimiento de 15–120 cm de grosor que permite el crecimiento de arbustos, pequeños árboles, plantas grandes o céspedes, proporcionando servicios urbanos y áreas recreativas (Susca, 2019). El éxito de la implementación dependerá de la oportuna colaboración entre ingenieros (con especialidad en estructuras), arquitectos, paisajistas, ecologistas, agrónomos e ingenieros hidráulicos que tomen en consideración la construcción, operación y mantenimiento del sistema (Woods-Ballard et al., 2015).

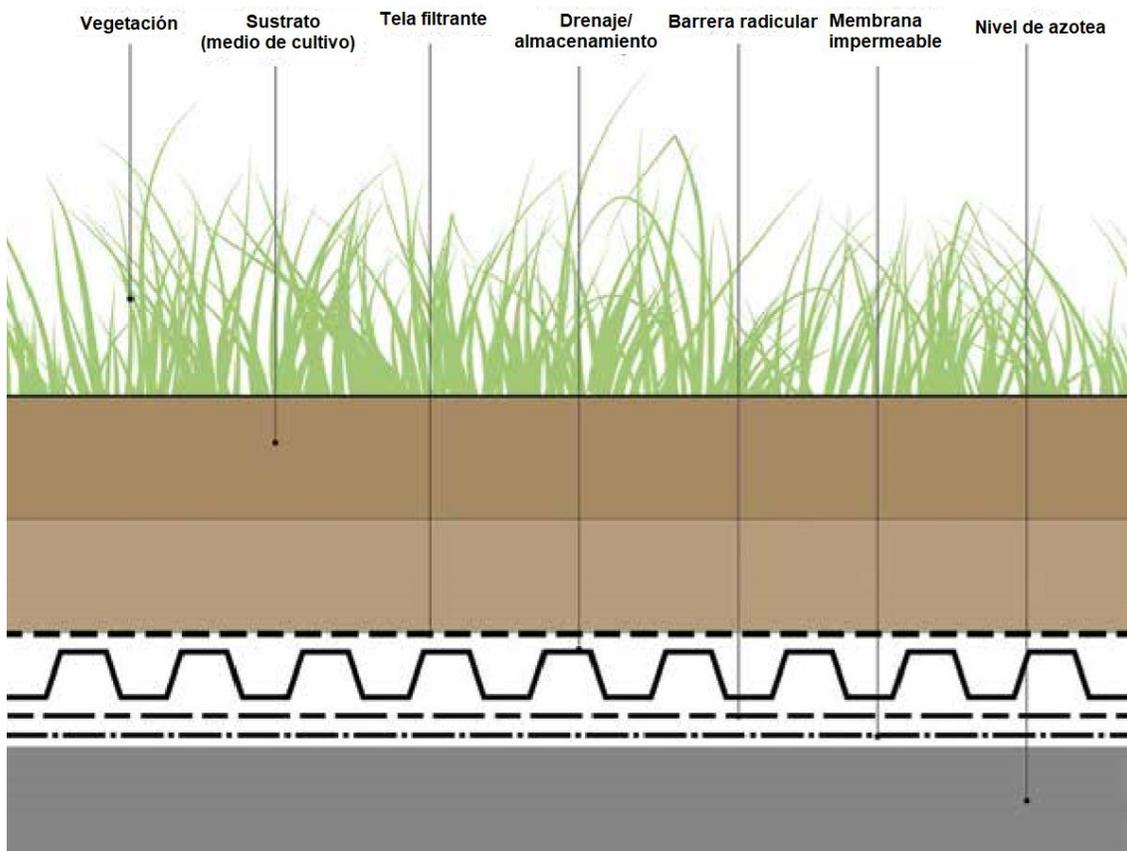


Figura 2.4. Sección típica de un techo verde (Woods-Ballard et al., 2015)

- *Cunetas verdes*

Las cunetas verdes se definen como cauces naturalizados que captan y conducen el agua de escorrentía superficial de forma lenta y controlada, favoreciendo la oxigenación y la retención del agua. A diferencia de las cunetas de hormigón, las cunetas verdes están cubiertas de vegetación y rocas, son más anchas y permiten la reducción de la velocidad del flujo de agua, constituyendo además un refugio natural para anfibios como sapos y otros organismos (Rodríguez-Hernández, 2008).

Perales-Momparler y Andrés-Doménech (2008) definen a las cunetas verdes como estructuras lineales vegetadas de base ancha ($> 0,5$ m) y talud tendido ($< 1V:3H$) diseñadas para almacenar y transportar superficialmente la escorrentía. Deben generar bajas velocidades ($< 1-2$ m/s) que permitan la sedimentación de las partículas para una

separación eficaz de contaminantes. Adicionalmente pueden permitir la infiltración a capas inferiores.



Figura 2.5. Cuneta verde (Abellán, 2014)

- *Estanques de bioretención*

Los estanques de retención son embalses superficiales poco profundos con una lámina de agua permanente (de profundidad entre 1,2 y 2 m). Esta lámina de agua oculta los bancos de sedimentos antiestéticos y permite un tiempo de retención del agua en el estanque que incrementa el rendimiento de depuración. Están diseñadas para garantizar largos periodos de retención de la escorrentía (2-3 semanas). Además, debe existir un mínimo de corriente controlando el caudal de entrada y de salida (Perales-Momparler y Andrés-Doménech, 2008; Rodríguez-Hernández, 2008).

Chahal et al. (2016) mencionan que los sistemas de bioretención deben ser cuidadosamente diseñados, ya que la concentración de nitrógeno y fósforo en cantidades

excesivas en las aguas pluviales causan eutrofización (presencia excesiva de materia orgánica en el agua) y contaminación del agua subterránea.

De ser bien diseñados, estos sistemas pueden proporcionar beneficios como:

- ✓ Paisajes atractivos
- ✓ Hábitat y biodiversidad en un ecosistema
- ✓ Control del clima local debido a la evapotranspiración

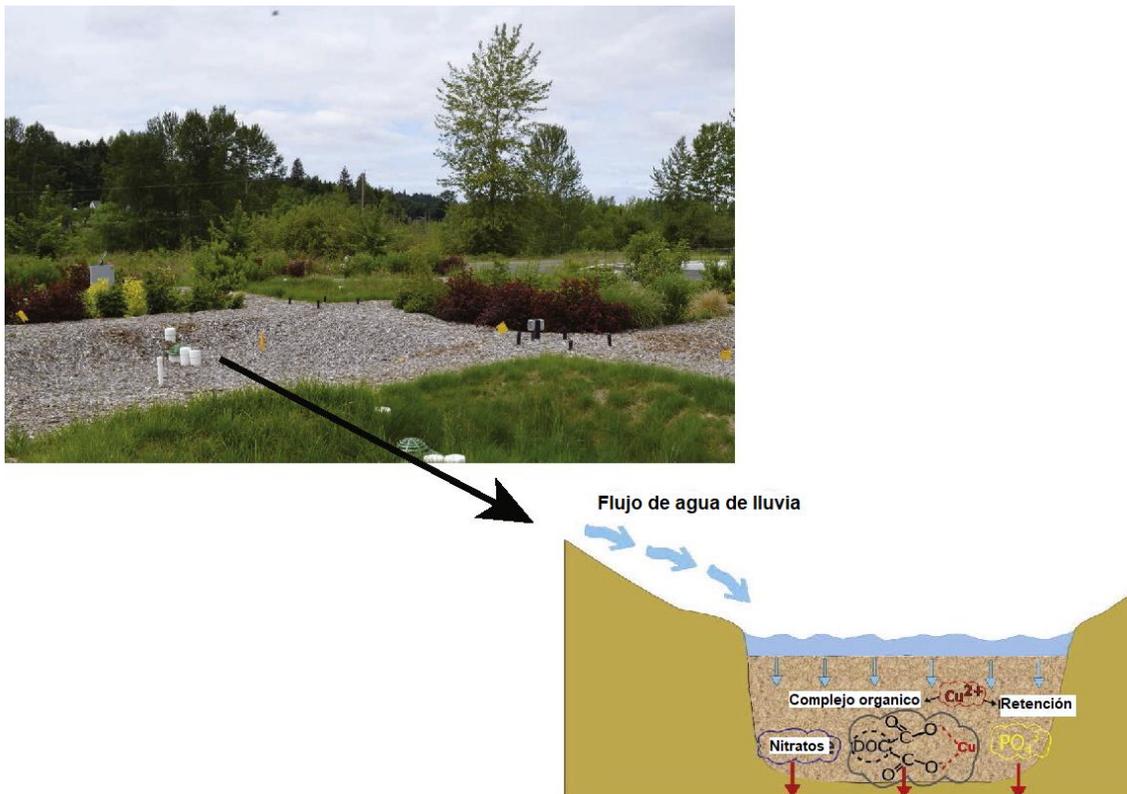


Figura 2.6. Esquema de un sistema de biorretención (Chahal et al., 2016)

2.1.2. Sistemas de almacenamiento

- *Captación de agua de lluvia*

El concepto de recolección de agua de lluvia consiste en el proceso de captación, almacenamiento y utilización del agua de lluvia como recurso hídrico principal o complementario (Liaw y Chiang, 2014).

Posadas-Bejarano (2015) define que un sistema de cosecha de agua pluvial (AP) se refiere a las estructuras empleadas para la captación, recolección, conducción y almacenamiento del agua pluvial para su uso posterior y de acuerdo con Hajani y Rahman (2014), un sistema de recolección de agua de lluvia debe ser capaz de satisfacer la demanda deseada la mayoría de los días del año en regiones suburbanas.

En áreas urbanas, donde el suministro de agua de red está presente, un sistema de recolección de agua de lluvia se usa para ahorrar agua de la red pública. Esto también proporciona una mayor flexibilidad en el uso del agua durante el tiempo de restricciones de agua, ya que el agua de lluvia puede usarse para fines no potables, como la jardinería y el lavado de automóviles y superficies impermeables como aceros y pisos (Hajani y Rahman, 2014). De acuerdo con Liaw y Chiang (2014), los sistemas de recolección de agua de lluvia se pueden usar para los siguientes propósitos:

- i. Como la principal fuente de agua potable
- ii. Una fuente suplementaria de agua potable
- iii. Una fuente suplementaria de agua no potable.

Schuetze y Chelleri (2013), señalan que, en función de las diferentes condiciones básicas de una ubicación específica, las soluciones apropiadas para los sistemas de gestión de agua de lluvia descentralizados, sostenibles y resilientes pueden diferir significativamente.

Para Campisano y Modica (2016), la implementación de sistemas de recolección de agua de lluvia en construcciones convencionales requiere la instalación de tanques del tamaño adecuado para almacenar el agua de lluvia recogida en los tejados y terrazas. Una vez sometidos a tratamiento para eliminar patógenos y metales pesados, el agua de lluvia almacenada se utiliza localmente para el consumo no potable interno y externo (lavado de inodoros, riego de jardines, limpieza de terrazas, etc.)

García (2018) diseñó y evaluó un jardín que funciona como sistema de captación de agua de lluvia (fig. 2.7.), destacando que estos sistemas pueden contribuir a controlar inundaciones y, además, el agua recolectada puede ser útil para usos no potables contribuyendo al uso sostenible del agua en una vivienda, representando una fuente complementaria de agua, y con ello reduciendo el consumo de agua potable que proporciona el abastecimiento público.

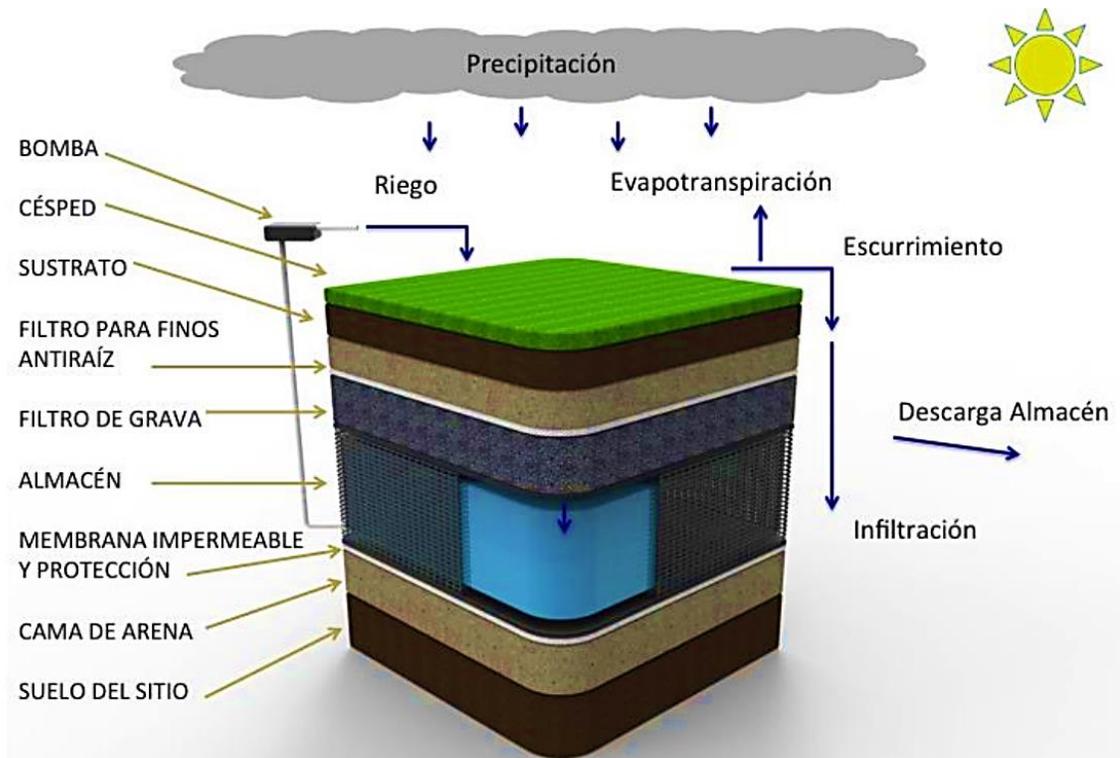


Figura 2.7. Componentes de jardín para la captación de agua de lluvia (García, 2018)

- *Depósitos/cuencas de detención superficial*

Estos elementos son estructuras superficiales para aguas pluviales que prevén el almacenamiento temporal de escorrentías de aguas pluviales y con ello evitar inundaciones. Los beneficios de la calidad del agua pueden lograrse con la detención prolongada del volumen de escorrentía de la tormenta de diseño. El objetivo principal de los depósitos de detención es la atenuación de los picos de escorrentía de aguas pluviales. Estas estructuras deben diseñarse para controlar los caudales máximos de escorrentía de los eventos con periodo de retorno de 1 año a 100 años, según la importancia del proyecto. Los hidrogramas de entrada y descarga deben calcularse para cada tormenta de diseño seleccionada (Maté Marín, 2012).



Figura 2.8. Depósito de detención en zona residencial (www.basins.ghkates.com)

2.1.3. Sistemas de filtración

- *Superficies permeables*

Estos sistemas cuentan con superficies artificiales que permiten el paso a través de ellas. Dependiendo de la finalidad y diseño de estas superficies, el agua puede ser infiltrada si todas las capas del firme son permeables, o bien evacuada si sólo la capa superficial o parte de las capas subsuperficiales son porosas. En este último caso, las aguas son vertidas en algún otro elemento ya sea conducción, drenaje o infiltración. Las tipologías más comunes de superficies permeables son los pavimentos continuos porosos, bloques porosos y bloques impermeables con juntas permeables, gravas y césped con o sin refuerzo (Fernández Barrera, 2009; Perales-Momparler y Andrés-Doménech, 2008; Rodríguez-Hernández, 2008). El agua almacenada puede, si su calidad lo permite, reutilizarse para otros usos, como riego o lavado de calles, o bien infiltrarse al terreno (Andrés-Valeri, 2017). En la figura 2.9. se ejemplifican algunas superficies permeables.

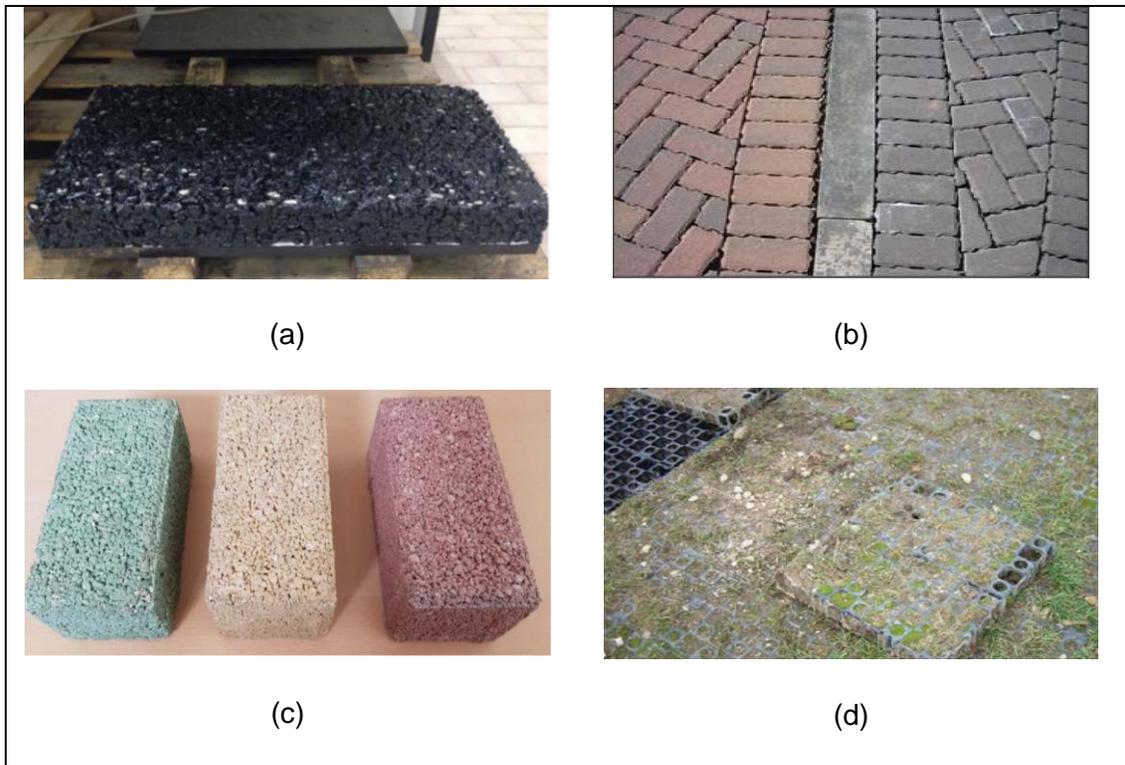


Figura 2.9. Ejemplos de superficies permeables: (a) pavimento permeable; (b) bloques con juntas permeables; (c) adoquines porosos; (d) césped reforzado (Andrés-Valeri, 2017)

- *Pozos y zanjas de infiltración*

Son perforaciones realizadas en el terreno y rellenas con materiales que proporcionan un alto índice de huecos (fig. 2.10.). Están concebidas para recibir, absorber, almacenar e infiltrar las aguas de escorrentía superficial de una zona impermeable generada por una tormenta de diseño, la principal diferencia entre un pozo y una zanja, es que esta última es más estrecha y menos profunda (Fernández Barrera, 2009; Perales-Momparler y Andrés-Doménech, 2008; Rodríguez-Hernández, 2008).

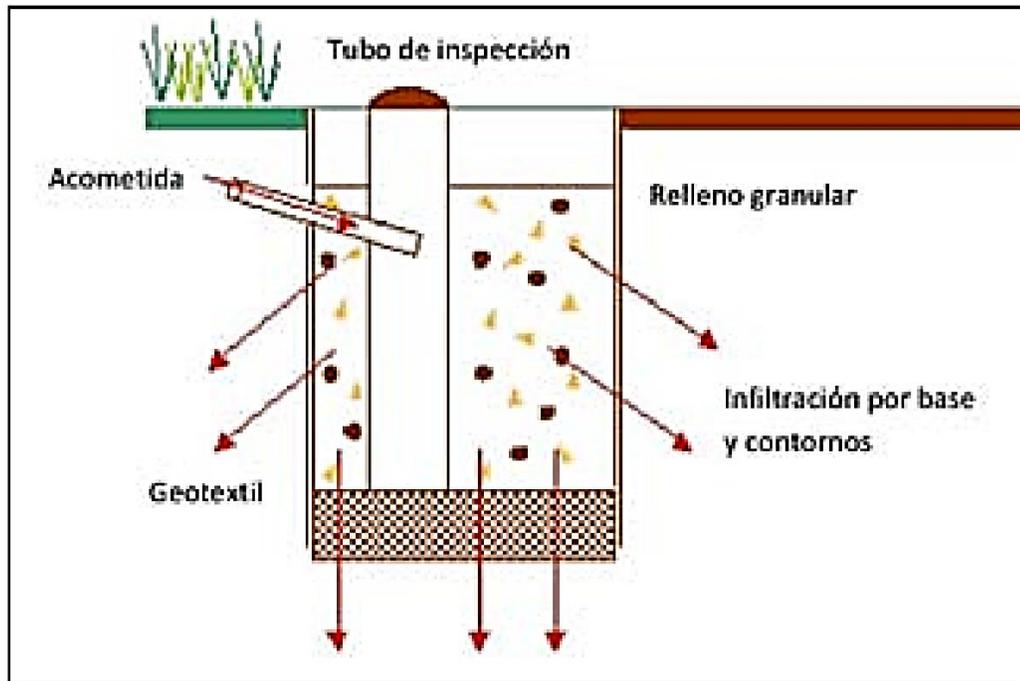


Figura 2.10. Pozo y zanja de infiltración (Perales-Momparler y Andrés-Doménech, 2008)

- *Drenes y franjas filtrantes*

Son zanjas poco profundas rellenas de material filtrante (granular o sintético), con el objetivo de captar y conducir las aguas de escorrentía superficial hacia otro sistema de drenaje (fig. 2.11.). Estos sistemas son usados comúnmente para la captación y drenaje de las aguas pluviales en carreteras. La diferencia entre dren y franja, es que esta última cuenta con superficie vegetada y cierta inclinación que permite el flujo lento de la lámina de escorrentía superficial asegurando un efecto filtro (Fernández Barrera, 2009; Perales-Momparler y Andrés-Doménech, 2008; Rodríguez-Hernández, 2008; Trapote Jaime y Fernández Rodríguez, 2016).

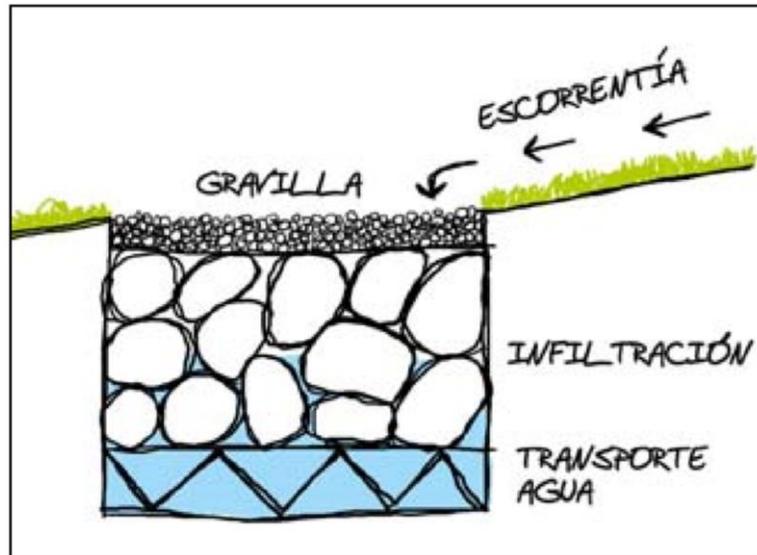


Figura 2.11. Drenes filtrantes (Perales-Momparler y Andrés-Doménech, 2008)

2.1.4. Sistemas de tratamiento

- *Humedales artificiales*

Son lagunas similares a los estanques de retención, pero de menor profundidad y mayor densidad de vegetación diseñados para largos periodos de retención de la escorrentía. La gran cantidad de vegetación proporciona un alto grado de eliminación de nutrientes y de depuración biológica. También aportan un alto potencial ecológico, estético, educacional y recreativo (Fernández Barrera, 2009; Perales-Momparler y Andrés-Doménech, 2008). Rodríguez-Hernández (2008) destaca que en ningún caso los humedales naturales deben recibir directamente el flujo de escorrentía superficial urbana, sólo los humedales artificiales están preparados para esta tarea.



Figura 2.12. Humedal artificial Parque de las Llamas en Santander, España. (imagen propia)

- *Trampas de sedimentos, separadores hidrodinámicos y separadores de aceites y sedimentos*

Estos sistemas pueden verse como complementos que se utilizan en las redes de drenaje convencional, no siendo tan visibles como los sistemas descritos anteriormente. En general, su función es separar y retener el sedimento arrastrado por la escorrentía superficial, ofreciendo un pretratamiento genérico del agua (fig. 2.13a.). El diseño de estos sistemas está en función de los elementos presentes en la escorrentía y la calidad del agua que se quiera obtener. Por ejemplo, las trampas de sedimentos consiguen retener sólidos por medio del principio de decantación, los separadores hidrodinámicos son un tipo especial de trampas, caracterizados por su funcionamiento hidráulico (fig. 2.13b.).

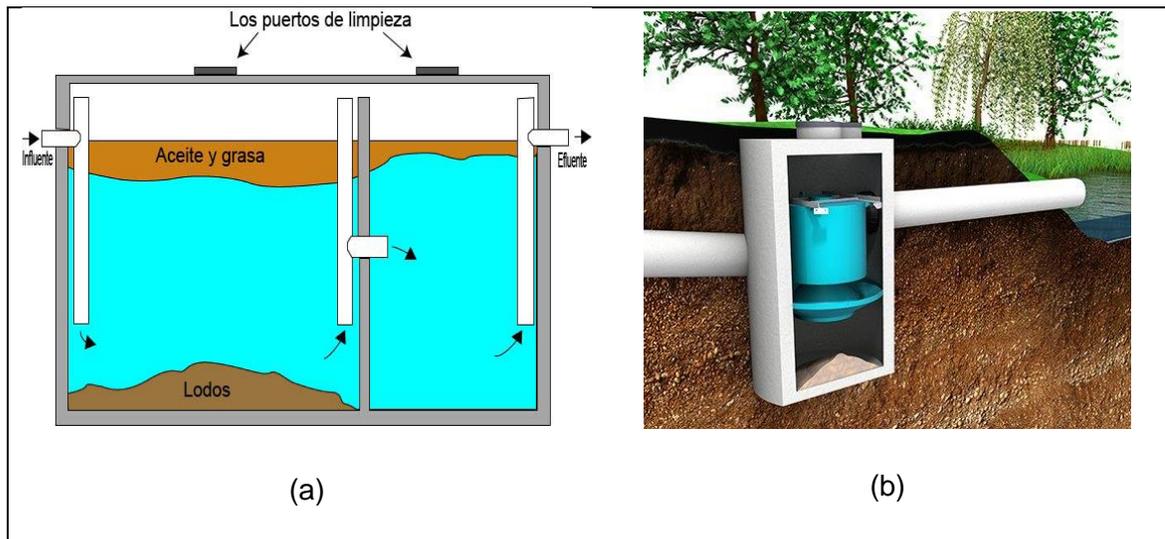


Figura 2.13. Sistemas de tratamiento: (a) Trampa de sedimentos (www.biodynebogota.com); (b) Separador hidrodinámico (www.drenatura.com)

Existen elementos diseñados como complementos de los sistemas de drenaje convencionales para el tratamiento de las aguas pluviales (Fernández Barrera 2009). Una de las tecnologías que ha resultado gran aporte para las técnicas de drenaje sostenible son los separadores hidrodinámicos. Peng et al. (2019) presentan el diseño de un separador hidrodinámico para un sistema de alcantarillado pluvial (entre la tubería principal de recolección de agua de lluvia y la interceptación del canal principal) con el objetivo de

eliminar los contaminantes de partículas, evitar el reflujos de agua de lluvia y realizar una regulación en el pico de la escorrentía. Esquema mostrado en la figura 2.14.

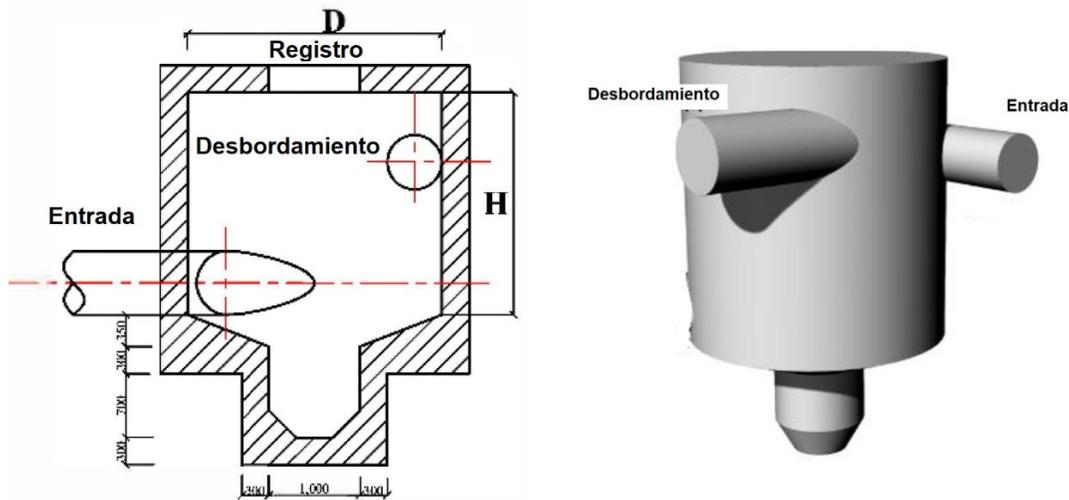


Figura 2.14. Dimensionamiento del modelo de Peng et al. (2019)

El estudio de Peng et al. (2019), consiste en el análisis de un modelo 3D del separador hidrodinámico utilizando el software SolidWorks, y aplica la dinámica de fluidos computacional FLUENT de última generación en la simulación a escala fina para llevar a cabo las pruebas numéricas que dan la validez a la capacidad del separador hidrodinámico en la eliminación de contaminantes de partículas en diferentes condiciones iniciales.

En el marco de la presente investigación, se ha llevado a cabo la búsqueda de empresas que tienen sistemas patentados de hidroseparadores y que ya han implementado en proyectos; a continuación, se resume en la tabla 2.1, la información de los sistemas encontrados y en las figuras 2.15. los esquemas de los separadores descritos.



Tabla 2.1. Sistemas de separadores hidrodinámicos comerciales.

Nombre del separador	Empresa	Tecnología de operación	Características principales	Aplicaciones
Separador hidrodinámico CDS	HIDROSTANK, S.L. (www.hidrostank.com)	Separación deflectiva continua/tamizado indirecto	Separa y atrapa residuos, sedimentos, aceites y grasas asociados a la escorrentía. Además, neutraliza el 100% de los flotantes de tamaño superior a 2,4mm.	Pretratamiento para la recogida y reutilización de aguas pluviales. Pretratamiento para infiltración y bio-retención. Reconversión / Reconstrucción urbana. Protección de estanques y lagos contra los sedimentos y basuras. Protección de bombas
Downstream Defender. Separación de Vórtice Avanzado	Hydro International (https://www.hydro-int.com/en-gb)	Separación de Vórtice Avanzado (proceso hidráulico complejo que aumenta la separación por gravedad con fuerzas rotacionales de baja energía)	Separación de sólidos/líquidos de alta capacidad con regimen de flujo rotatorio estable y trayectoria estructurada evitando el arrastre de los contaminantes capturados.	Diseñado específicamente para aplicaciones de tratamiento de aguas pluviales. Remoción de sedimentos, basuras flotantes, grasas y aceites Limpieza del escurrimiento pluvial antes de su almacenamiento para reutilización o infiltración
Separador First Defense de Alta Capacidad	Hydro International (https://www.hydro-int.com/en-gb)	Separador vórtice de Alta Capacidad combinado con cámara de tratamiento	Adaptable a las condiciones de obra: múltiples entradas, se puede conectar a tubos largos, a rejillas de entrada y cuenta con el Bypass para de Alta Capacidad que le permite manejar gastos pico. Diseñado para ser flexible con las condiciones del sitio	Para áreas de captación de pequeñas a medianas Desarrollos nuevos y mejoramiento a existentes Disminuye la carga contaminante desde su origen en calles, estacionamientos y patios de mantenimiento Pre-tratamiento para filtros, infiltración y almacenamiento

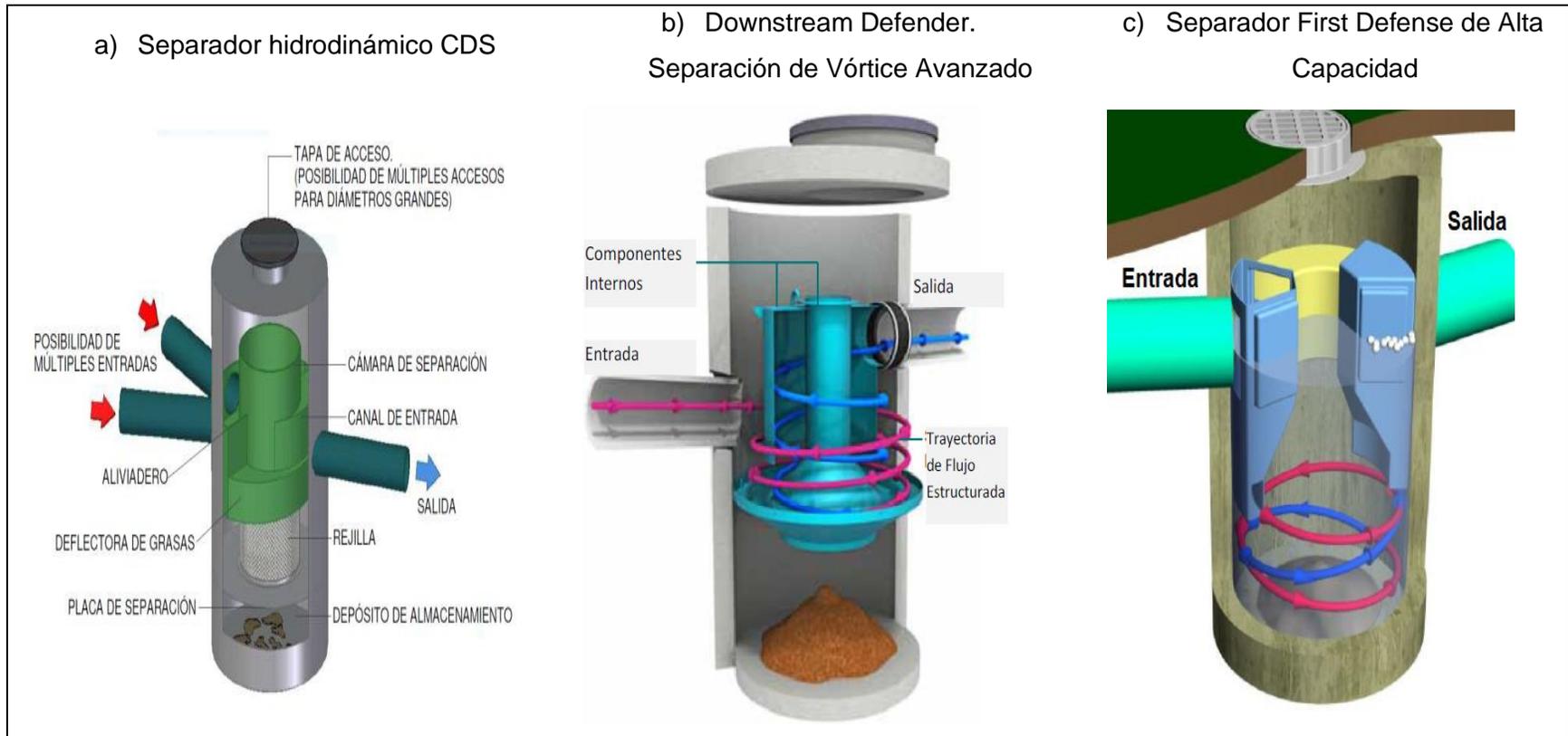


Figura 2.15. Esquemas de los separadores estudiados

Con los estudios expuestos en este apartado, los separadores hidrodinámicos ofrecen una excelente alternativa en el pretratamiento de las aguas pluviales urbanas al ser concebidos exclusivamente para dicho uso. Las experiencias de las empresas muestran los beneficios que aportan y su adaptabilidad a las técnicas de drenaje sostenible los hacen idóneos en la concepción del sistema de banquetetas retenedoras que se presenta en este documento. Sin embargo al ser una tecnología nueva en el mercado, su accesibilidad queda fuera de los alcances de esta investigación por lo que en el apartado correspondiente a la propuesta del sistema de banquetetas, se muestra una opción de sistema de tratamiento práctico de diseño propio que garantizó la validación del aporte principal de la investigación.

2.2. PRINCIPIOS Y OBJETIVOS DEL DISEÑO DE SUDS

Woods-Ballard et al. (2015) definen que el objetivo general y principio básico que rige el diseño de SUDS es la gestión de la escorrentía para obtener el mayor beneficio posible. Existen múltiples beneficios que pueden obtenerse con la implementación de SUDS, pero dependerá de cada lugar y diseño el objetivo principal de acuerdo con las características y necesidades del sitio. Sin embargo, el *Manual para SUDS* de la Asociación de Información e Investigación de la Industria de la Construcción (CIRIA, por sus siglas en inglés) engloba los beneficios en cuatro pilares fundamentales de diseño representados en la figura 2.16:



Figura 2.16. Los cuatro pilares de la CIRIA para el diseño de SUDS. Elaborado con información de Woods-Ballard et al. (2015)

2.2.1. Metodología para el diseño de SUDS

Durante la investigación se ha llevado cabo el análisis de metodologías para el diseño de SUDS (Atlanta Regional Commission, 2016; Checa y De Pazos, 2018; City of Portland, 2016) encontrando semejanza de metodología con la propuesta por el *Manual para SUDS* de la CIRIA (Woods-Ballard et al., 2015) por lo que en este trabajo se retoman dichas metodologías. La CIRIA define el proceso general de diseño en cuatro etapas, como se muestra en la figura 2.17:

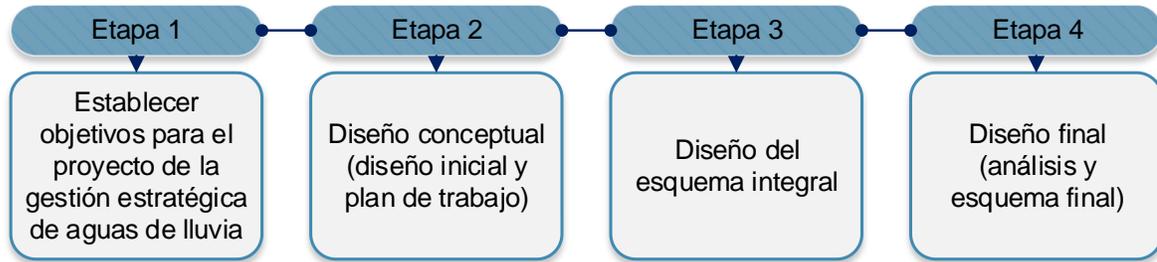


Figura 2.17. Etapas para el diseño de SUDS. Elaborado con información de Woods-Ballard et al. (2015)

- **Etapa 1. Objetivos de la gestión estratégica de agua de lluvia**

La primera etapa de proceso de diseño de SUDS es la identificación de los objetivos estratégicos que se pretenden obtener con la implementación del sistema y se deberá tener en cuenta la consulta con las partes interesadas que incluyen diseñadores, autoridades gubernamentales, departamentos de desarrollo de planificación urbana, organismos ambientales y representantes de la sociedad. Se deberán tener referencias de los planes de desarrollo urbano del sitio, las políticas públicas y manifestaciones de impacto ambiental, requisitos de resiliencia climático, entre otros conceptos.

- **Etapa 2. Diseño conceptual inicial de la propuesta de sistema de drenaje sostenible**

El resultado clave de esta etapa es identificar los componentes potenciales del sistema de drenaje sostenible, la relación con otros sistemas anexos y el tren de gestión para el sitio de estudio. El proceso de la etapa 2 se representa de manera gráfica por el CIRIA en la figura 2.18.

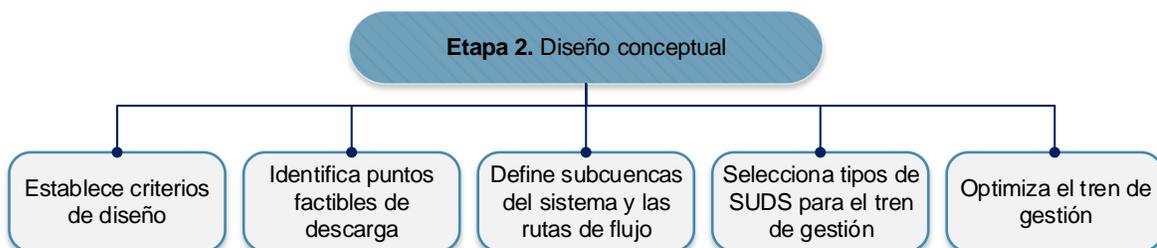


Figura 2.18. Proceso general del diseño de SUDS

- **Etapa 3. Coordinación multidisciplinaria**

En esta etapa, se deben identificar las características del sitio y tomar en cuenta la infraestructura ya existente o futura con la que el SUDS puede tener relación o su posible ampliación y así asegurar una eficacia aumentando su ciclo de vida.

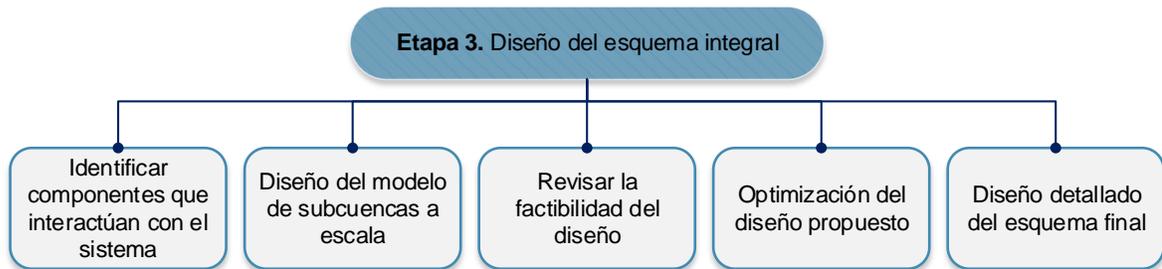


Figura 2.19. Proceso para el diseño del esquema integral de SUDS

- **Etapa 4. Diseño final de la propuesta**

A esta etapa le corresponde el diseño detallado del SUDS, tomando en cuenta todas las características ya identificadas del sitio. Se realizan los planos finales y se documenta el proceso de diseño atendiendo al marco legal del sitio.

La etapa 3 puede omitirse e integrarse a la etapa 4 teniendo presentes todas las características ya descritas. El proceso de diseño se muestra en la figura 2.20.

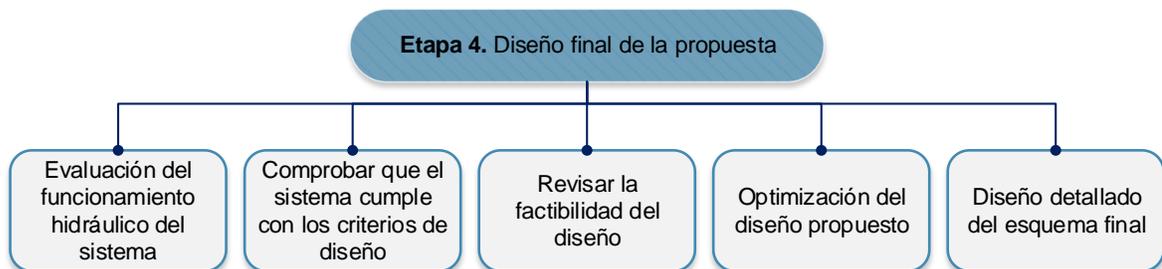


Figura 2.20. Proceso para el diseño final de la propuesta de SUDS

- **Influencia de la precipitación en el diseño de SUDS**

Sordo-Ward et al. (2019) destacan que, el dimensionamiento de SUDS tiene una relación importante con la correcta caracterización de las solicitaciones de lluvia de diseño por lo

que se debe tomar en cuenta diferentes aspectos de los eventos como su magnitud, duración y distribución temporal, tal que se puedan generar los mayores caudales pico y volúmenes de escorrentía asociados a los distintos periodos de retorno.

El diseño funcional de los SUDS puede realizarse con base en los denominados percentiles volumétricos de la serie de precipitaciones disponible. De este modo, en función del criterio de diseño se emplean unos volúmenes de precipitación de un percentil u otro, siendo los más comunes 80, 85, 90 y 95 (quedando identificados con las siglas V_{80} , V_{85} , V_{90} y V_{95}) (Atlanta Regional Commission, 2016; City of Portland, 2016; Sordo-Ward et al., 2019).

Los criterios en los que se basan Sordo-Ward et al. (2019) para determinar el valor de los percentiles volumétricos son a) atendiendo al número de episodios a gestionar, referenciados en Hirschman y Kosco (2008) y Woods-Ballard et al. (2015) y b) atendiendo al volumen total a gestionar con referencia en City of Portland (2016).

Los valores de V_{80} obtenidos por Sordo-Ward et al. (2019) aplicando las metodologías con datos de la estación de Madrid-Retiro se muestran en la figura 2.21. Concluyen que existe una variabilidad importante en la estimación del valor de diseño V_{80} en función de los criterios utilizados.

Particularmente se destaca que el criterio por eventos depende fuertemente del umbral mínimo de volumen de precipitación considerado como evento. A medida que se aumenta el umbral mínimo de volumen de tormenta considerado en el análisis, aumenta el valor de V_{80} por el criterio de eventos.

Mientras que, aplicando el criterio que atiende al volumen acumulado total a gestionar, se observó un volumen de hietograma de diseño mayor que el criterio de número de eventos a gestionar para los umbrales mínimos de lluvia considerados. En este caso, la influencia del umbral mínimo de volumen de tormenta a considerar apenas afecta a los resultados.

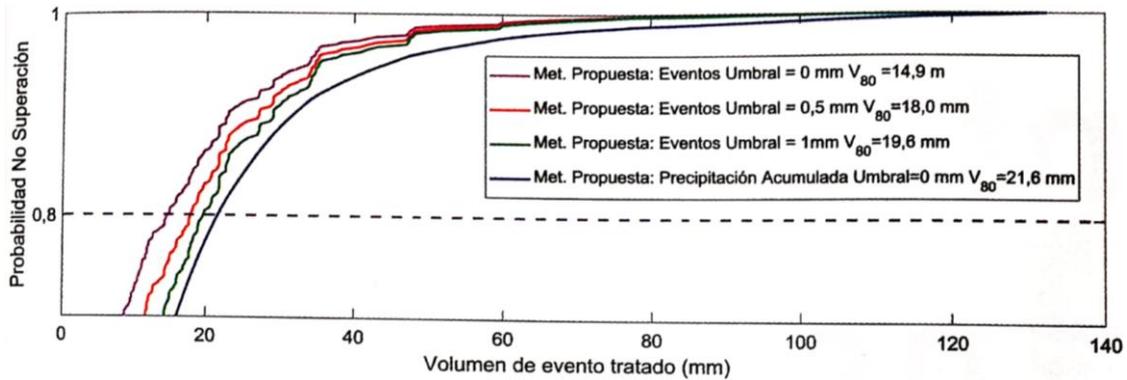


Figura 2.21. Comparativa de las funciones de distribución y valores de V_{80} obtenidas por Sordo-Ward et al. (2019)

2.2.2. Condiciones para la implementación de SUDS

Cada técnica SUDS necesita unas condiciones determinadas del lugar para que su funcionamiento y efectividad sean adecuados.

En la tabla 2.2. se muestran las recomendaciones que se hacen en la *Guía básica de diseño de sistemas de gestión sostenible de aguas pluviales en zonas verdes y otros espacios libres* (Checa y De Pazos, 2018) atendiendo a la pendiente de un sitio determinado para seleccionar qué tipo de SUDS se adapta mejor a las condiciones del proyecto.

Tabla 2.2. Características del lugar adecuadas para implementar los SUDS (Checa y De Pazos, 2018)

SUDS	Pendientes del suelo	Observaciones
Cubiertas vegetadas	< 25%	Pendiente de la cubierta. Para < 5 % necesita dren para evitar encharcamientos
Pavimentos permeables	< 3%	Para > 3%, la base necesita escalonamientos permitiendo máx. 10 %.
Jardines de lluvia	< 10%	
Pozos de infiltración	< 6%	
Zanjas de infiltración	2% - 5%	> 5% necesita escalonamientos
Celdas y cajas reticulares	< 15%	
Drenes filtrantes	< 2%	
Cunetas vegetadas	0,5% - 6%	> 6% necesita elemento de contención transversal, permitiendo máx. 15 %.

2.2.3. Revisión de experiencias internacionales

En los albores del siglo XXI, en Europa, la gestión de la escorrentía urbana se había centrado sólo en el control de las inundaciones. Sin embargo, en los últimos años se comenzó con la adopción de criterios combinados para la gestión urbana del agua pluvial de calidad y cantidad, intentando maximizar la integración paisajística, valor social y ambiental (Soriano Martínez, 2015).

Soriano Martínez (2015) destaca que la aplicación de sistemas de drenaje sostenible en países europeos es muy extensa en el norte y centro del continente. También apunta que los humedales artificiales y estanques de retención son las infraestructuras más utilizadas ofreciendo de 18% a 50% en costos de tratamiento con relación a los sistemas tradicionales.

En el Reino Unido, los sistemas más comunes son los drenes filtrantes en conjunto con los estanques de retención además de que se hacen compatibles con el ordenamiento territorial atendiendo a las normas que establecen la densidad de viviendas por hectárea para garantizar la gestión sostenible de las aguas (Soriano Martínez, 2015).

En Francia, la incorporación de sistemas de drenaje sostenible es muy practicada debido a las últimas ocurrencias de inundaciones, implementando el uso de pavimentos permeables, sistemas de captación y aprovechamiento del agua de lluvia se han vuelto prácticas obligatorias en el marco normativo regional y local con beneficios económicos y ambientales probados. Mientras que en los países con climas fríos como Suecia y Dinamarca, los estanques de retención se utilizan para reducir los picos de escorrentía y controlar las aguas de deshielo (Soriano Martínez, 2015).

En España, los sistemas que se han aplicado son los pavimentos permeables, jardines de lluvia y depósitos de infiltración generando un amplio beneficio en cuestión de calidad y cantidad del agua tratada, aunque cabe destacar que los sistemas implementados han sido acompañados de medidas no estructurales, como por ejemplo, el mejoramiento y adaptación de las políticas públicas en materia de ordenamiento urbano, campañas de información a la ciudadanía sobre los sistemas y como es que contribuyen al bienestar social (De Pazos Liaño, 2019).

Un proyecto reciente de implementación de sistemas de drenaje sostenible, fue la implementación de pavimentos permeables, drenes filtrantes y espacios verdes en el estadio de fútbol Wanda Metropolitano en Madrid con una superficie de 63,100 m² se logró

gestionar 32,100 m³ de escorrentía en un año, teniendo beneficios considerables para las zonas aledañas y al mismo estadio (De Pazos Liaño, 2019).

En América Latina, la implementación de sistemas de drenaje sostenible aún no es una práctica recurrente, ya que existe un atraso en la adaptación de las políticas públicas que incentiven a la construcción de infraestructura que mejore la gestión de la escorrentía urbana. Sin embargo, existen algunas ciudades que han comenzado con la generación de planes urbanos que contengan filosofías de medidas sostenibles. Tal es el caso de Bogotá, la capital de Colombia, que a través de acciones coordinadas y conjuntas entre la secretaria del medio ambiente de la ciudad y la Universidad de los Andes han llevado a cabo investigaciones para lograr la adaptación de la ciudad antes los efectos del cambio climático y destaca la *“Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D. C.”* Desarrollada por el Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de los Andes (Martinez Acosta, 2017).

Existe la necesidad de que en el continente americano se lleven a cabo acciones que permitan la implementación de sistemas sostenibles para garantizar la seguridad y el desarrollo integral de las ciudades. El reto es inmenso y conviene comenzar desde ahora tomando como referencia las experiencias internacionales de implementación.

2.3. FUNDAMENTOS DEL SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL URBANO

Una vez estudiada la clasificación de los SUDS y sus principios de diseño, el autor ha considerado necesario presentar los fundamentos sobre los que se enmarca el diseño e implementación de los sistemas convencionales de drenaje pluvial, recordando que el objetivo de la presente investigación es presentar una alternativa de SUDS que se relacione con la infraestructura pluvial existente en las ciudades, es decir, con los sistemas de drenaje pluvial que actualmente se encuentran en servicio. En los puntos subsecuentes, se detalla información disponible sobre los sistemas de drenaje pluvial.

2.3.1. Principios de diseño del drenaje pluvial urbano

El drenaje pluvial urbano, tiene como función la captación y desalojo de las aguas de lluvia hasta sitios donde se descarguen en los cuerpos de agua, de tal forma que se minimicen los daños e inconvenientes a los habitantes donde llegan o cruzan los escurrimientos o que puedan afectar a otras cercanas. Un sistema de drenaje está constituido por una red de conductos e instalaciones complementarias, que permiten el desalojo de las aguas de lluvia y que requieren de su mantenimiento para su correcta operación (Brown et al., 2013; CONAGUA, 2016).

Uno de los aspectos más relevantes en el diseño de los sistemas de drenaje pluvial urbano es reducir al mínimo los cambios del régimen de flujo natural del agua en la cuenca y los cuerpos receptores. Por lo que el diseño no debe limitarse al control de la velocidad de flujo y la descarga máxima. Si se reducen al mínimo los cambios en el volumen de escurrimiento, y por lo tanto los cambios en el ciclo natural del agua, se pueden alcanzar beneficios tales como:

- Menor arrastre de contaminantes
- Menor riesgo de inundaciones aguas abajo
- Menor riesgo de erosión de los cuerpos receptores
- Menor costo en la operación y mantenimiento de la infraestructura pluvial

En el diseño de sistemas de drenaje pluvial se deben considerar los costos asociados con las inundaciones. Ya que éstos pueden incluir: la reconstrucción de la infraestructura dañada, la rehabilitación de los equipos dañados, los impactos sobre la economía local, ante el cierre de los centros de trabajo, así como los gastos del Estado y fondos Federales para la atención de desastres (Woods-Ballard et al., 2015)

- **Etapas del proceso de diseño del drenaje urbano**

El diseño de un sistema de drenaje pluvial urbano se realiza en varias etapas e involucra distintas áreas de la ingeniería, en el esquema de la figura 2.22. se presenta una breve descripción de estas etapas de acuerdo con el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2016)

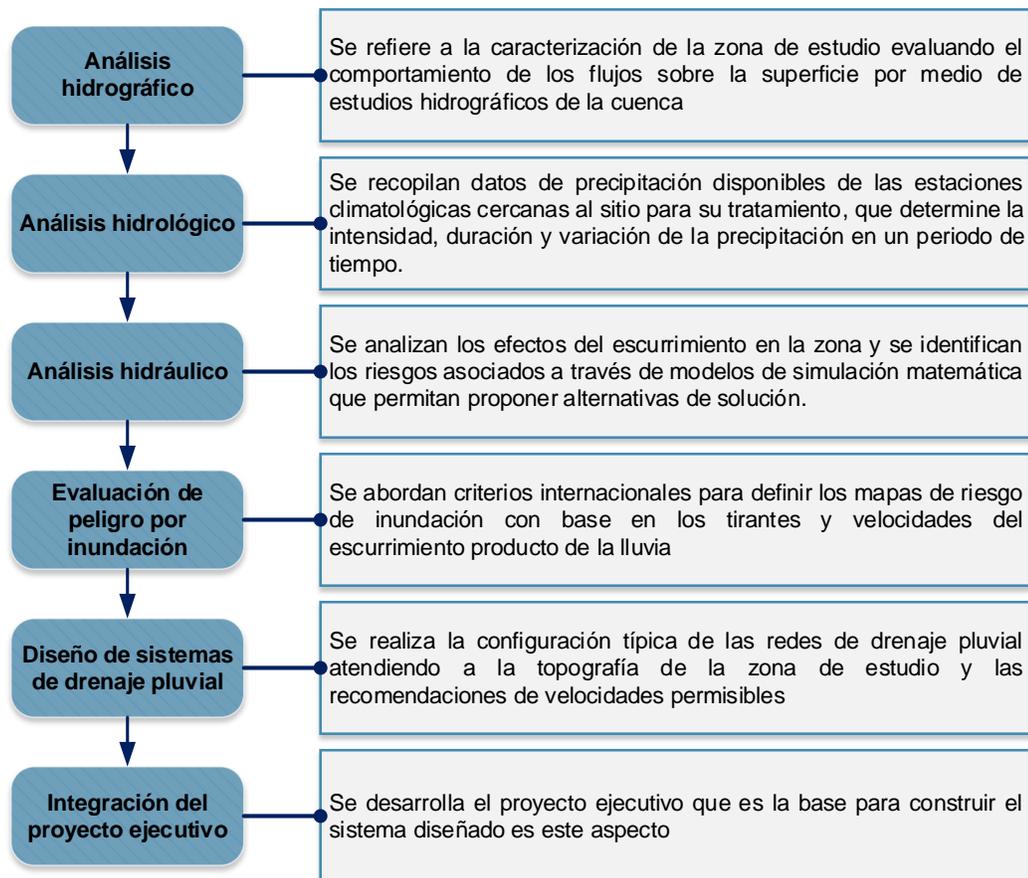


Figura 2.22. Esquema general de las etapas de diseño de drenaje pluvial urbano (CONAGUA, 2016)

- **Objetivos del drenaje urbano**

De acuerdo con el Departamento de Energía y Suministro de Agua (Department of Energy and Water Supply, 2013), para el diseño de drenajes urbanos se debe:

- a) Garantizar que el desalojo de las aguas pluviales no afecte las zonas aguas abajo; esto es: viviendas, carreteras, vías de ferrocarril o cualquier otra infraestructura.
- b) Definir los criterios de riesgo admisible ante inundaciones.

- c) Evaluar y disminuir el impacto sobre el tráfico peatonal y vehicular durante el desalojo de aguas pluviales en zonas urbanas.

Tales consideraciones se llevan a cabo tomando en cuenta los parámetros clave para el diseño del drenaje pluvial y los resultados esperados ilustrados en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Parámetros clave en el diseño de sistemas de drenaje pluvial urbano y los resultados deseados. Adaptado de CONAGUA (2016) con información del Department of Energy and Water Supply (2013)

Parámetro	Resultado deseado
Eficacia del drenaje	Salud pública: El sistema de drenaje debe ser capaz de evitar inundaciones o encharcamientos que puede ser foco de infecciones y atraer insectos o fauna nociva
	El funcionamiento del sistema de drenaje debe garantizar la seguridad de tránsito para peatones y vehículos
	Debe minimizar las afectaciones a la infraestructura urbana y a los habitantes ante la ocurrencia de tormentas
Control de inundaciones	El sistema de drenaje debe proteger las vías de comunicación de la población ante inundaciones
	El funcionamiento del sistema de drenaje debe garantizar la seguridad de tránsito para peatones y vehículos
	El sistema de drenaje debe ser adecuado para desalojar el agua ocasionada por la precipitación de diseño determinada
Volumen de escurrimiento	Control de inundaciones
	Debe ser capaz de captar el volumen de agua generado por la precipitación de diseño
	El sistema debe ser resistente a la erosión provocada por el flujo
Descarga máxima	La descarga del agua pluvial no debe causar afectaciones a los ecosistemas o a los cuerpos receptores
	Control de inundaciones
	El funcionamiento debe evitar disputas legales entre el organismo operador y comunidades aguas abajo
Velocidad de flujo	La descarga debe ser tal, que prevenga la erosión en los cuerpos receptores
	Debe garantizar el control de inundaciones en los cuerpos receptores y/o zonas aguas abajo de la descarga
	El funcionamiento del sistema de drenaje debe garantizar la seguridad de tránsito para peatones y vehículos
Profundidad de flujo	El sistema de drenaje debe ser resistente a la erosión
	Se debe priorizar el control de inundaciones
	El funcionamiento del sistema de drenaje debe garantizar la seguridad de tránsito para peatones y vehículos
Estética	Debe minimizar las afectaciones a la infraestructura urbana y a los habitantes ante la ocurrencia de tormentas
	El sistema de drenaje debe ser acorde al paisaje urbano
Infraestructura y costo de mantenimiento	Se debe procurar la protección de los sistemas naturales de drenaje
	La puesta en marcha de un sistema de drenaje debe generar un costo asequible al organismo operador y la comunidad
	Debe ser tal que los requisitos de operación y mantenimiento permitan la sostenibilidad
	El sistema de drenaje pluvial debe ser estructuralmente resistente ante las inundaciones que superen su capacidad

2.3.2. Componentes del sistema de drenaje pluvial urbano

Un sistema de drenaje está constituido por una red de conductos e instalaciones complementarias, que permiten el desalojo de las aguas de lluvia y que requieren de su mantenimiento para su correcta operación (Brown et al., 2013). Los componentes principales de un sistema de drenaje de acuerdo con la CONAGUA (2016) se agrupan según la función para la cual son empleados, así un sistema de drenaje pluvial urbano se integra como se muestra en la figura 2.23.

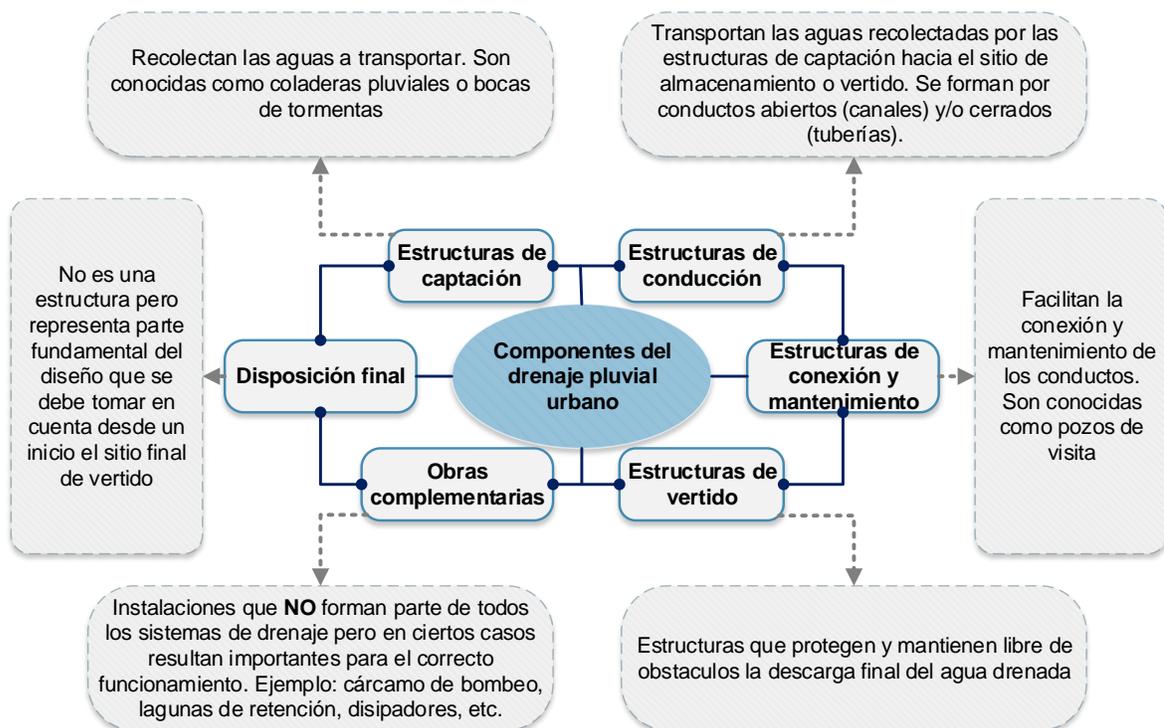


Figura 2.23. Componentes del drenaje pluvial. Adaptado de CONAGUA (2016)

- **Estructuras de captación**

Son estructuras que recolectan el agua que escurre sobre la superficie del terreno y la introducen por las rejillas al sistema de conducción. Se ubican generalmente aguas arriba del cruce de calles y en avenidas de importancia, además de colocarse en puntos bajos del terreno evitando la acumulación de agua. Están integradas con una rejilla que permite el acceso del agua y bloquea el paso de residuos de tamaños mayores que pueden obstruir las obras de conducción (CONAGUA, 2016).

Criterios de diseño

Las bocas de tormenta dependen de su capacidad de intercepción, es decir, el flujo que es capaz de ingresar al sistema de drenaje. Para esto, intervienen diversos factores como: la eficiencia de ingreso, pendiente del terreno, rugosidad del pavimento, entre otras; para saber más sobre el diseño de boca de tormenta se recomienda revisar el MAPAS (CONAGUA, 2016) en su sección 6.6.

De acuerdo con Brown et al. (2013) hay cuatro tipos de boca de tormentas más usadas en el drenaje urbano las cuales se muestran en la figura 2.24.

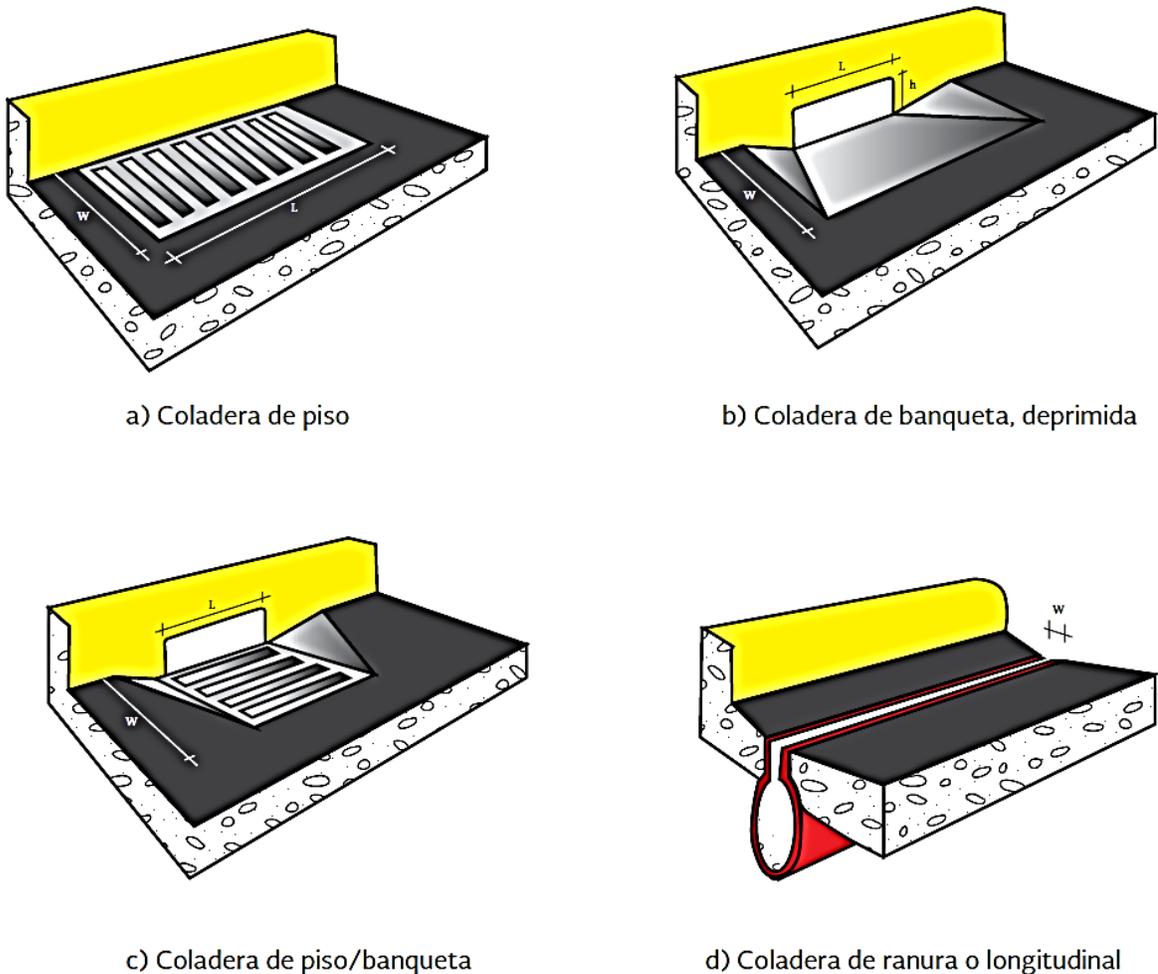


Figura 2.24. Tipos de boca de tormenta estudiados por Brown et al. (2013)

Algunas características importantes que destacan Brown et al. (2013) se resumen en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Características de las boca de tormenta estudiadas por Brown et al. (2013)

Tipo	Características
Coladeras de piso	Una coladera de piso generalmente pierde capacidad con el aumento de rejillas. La principal ventaja de una coladera de piso es que están instaladas a lo largo de la calzada, donde el agua está fluyendo. Su principal desventaja es que se obstruyen fácilmente con basura flotante o escombros. Por razones de seguridad, se debe dar preferencia a las coladeras de piso en lugares con tránsito constante de vehículos. Además, se debe garantizar que la rejilla sea segura para bicicletas.
Coladeras de banqueta	Son más eficaces en pendientes suaves, bajadas y con flujos que normalmente transportan cantidades importantes de desechos flotantes. La capacidad de captación de las coladeras de banqueta disminuye a medida que aumenta la pendiente de la cuneta. Por consiguiente, el uso de estas se recomienda en depresiones y con grados menores del 3 por ciento. Son seguras para peatones y bicicletas.
Coladeras de piso/banqueta	Proporcionan las ventajas de las coladeras de piso y de banqueta. Esta combinación resulta en una captación de alta capacidad. Cuando la apertura de banqueta precede a la rejilla de piso, la primera actúa como un interceptor de basura durante las fases iniciales de una tormenta. En una configuración con desnivel, se puede tener una coladera de banqueta a ambos lados de la de piso.
Coladera de ranura longitudinal	Su principal ventaja es la capacidad para interceptar el flujo a través de una sección transversal. Sin embargo, son muy susceptibles a la obstrucción por sedimentos o escombros y no se recomienda para su uso en entornos donde el flujo arrastre gran cantidad de sólidos.

Brown et al. (2013) evaluaron las eficiencias de captación para coladeras mostradas en la figura 2.24. con distintas configuraciones de rejillas que se muestran en la tabla 2.5. con el fin de comparar la capacidad de captación y la eficacia de las bocas de tormenta en pendientes continuas, estos resultados se muestran en la figura 2.25

Tabla 2.5. Descripción de rejillas analizadas (Brown et al., 2013)

ID	Descripción
P-50	Rejilla con barras en paralelo con espacio entre ellas de 48 mm centro a centro.
P-50x100	Rejilla con barras en paralelo con espacio entre barras de 48 mm en el centro y varillas laterales de 10 mm de diámetro, espaciadas a 102 mm de centro a centro
P-30	Rejilla de barras en paralelo con 29 mm espaciadas a 102 mm de centro a centro
Veleta curva	Rejilla de Barras con perfil de veleta curvada con 83 mm de separación y barras longitudinales con separación de 108 mm centro a centro
45°- 60 barras inclinadas 45°	Rejilla con barras inclinadas separadas a 57 mm y barras longitudinales espaciadas 102 mm centro a centro
45°-85 barras inclinadas 45°	Rejilla con barras inclinadas separadas 83 mm y barras longitudinales espaciadas 102 mm centro a centro
30°-85 barras inclinadas 30°	Rejilla con barras inclinadas separadas a 57 mm y barras longitudinales espaciadas 102 mm centro a centro
Retícula “panal”	Patrón de barras laterales y barras longitudinales de soporte

El estudio de Brown et al. (2013) consistió en comparar las coladeras de banqueta, de piso y de ranura con flujo de $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$ en una pendiente transversal de 3 por ciento y con una pendiente longitudinal que varía hasta un 10 por ciento. Este análisis se observa en la figura 2.25.

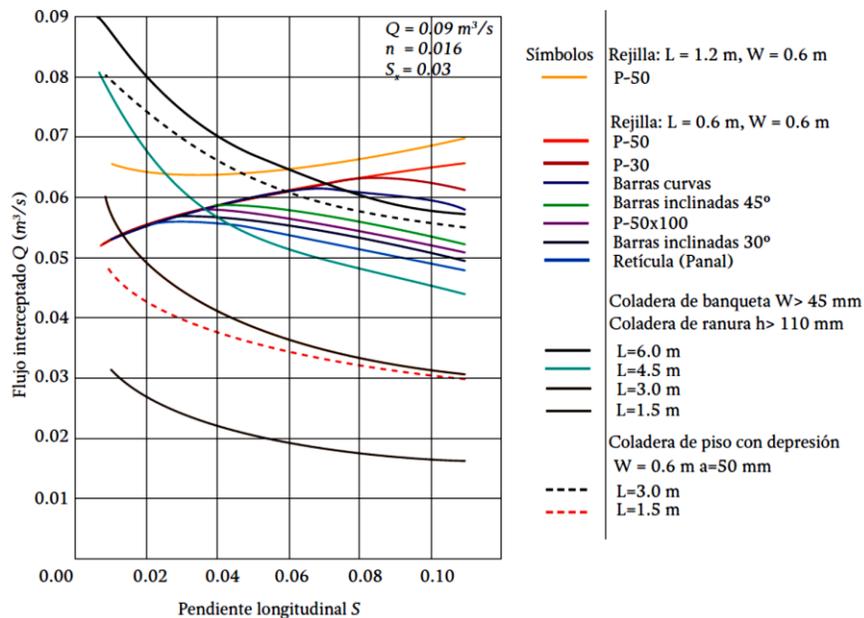


Figura 2.25. Comparación de rendimiento entre las distintas bocas de tormenta (Brown et al., 2013)

De los resultados que se muestran en la figura 2.25. se observa que todas las coladeras de banqueta y de ranura pierden capacidad de captación y eficiencia cuando la pendiente longitudinal se incrementa; también se puede ver que todas las rejillas de 0.6x 0.6 m para una pendiente transversal de 3 por ciento y pendiente longitudinal del 2 por ciento, tienen la misma capacidad de captación y eficiencia. A partir de estas curvas de características de rendimiento, se puede concluir que la rejilla de barras paralelas (P-50, P-50x100 y P-30 de la tabla 2.5) y la de barras curvadas (veleta curva de la tabla 2.5) son relativamente eficientes para velocidades altas y la rejilla tipo panel (retícula) es la menos eficiente.

Adicionalmente Brown et al. (2013) realizaron otro análisis para conocer el porcentaje de flujo interceptado por las coladeras respecto al flujo total en las calles. Los resultados se muestran en la figura 2.26 donde se puede observar que, para condiciones de una calle con una pendiente longitudinal del 6 por ciento, mientras el flujo total sobre la cuneta aumenta, el porcentaje del flujo interceptado disminuye.

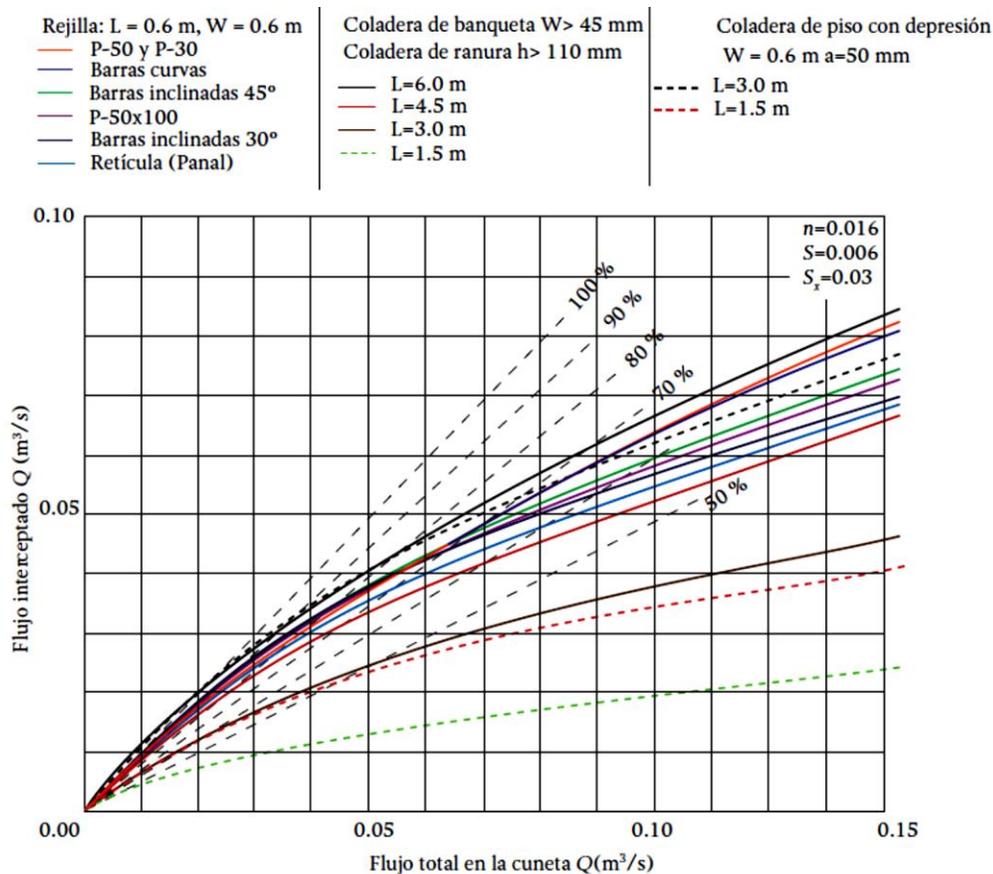


Figura 2.26. Comparación de la capacidad de captación con respecto del flujo realizada por Brown et al. (2013)

La literatura revisada (Brown et al., 2013; CONAGUA, 2016) muestra claramente que las estructuras de captación como las bocas de tormenta, para su correcto funcionamiento, dependen de la composición de rejillas. Como ya se mencionó, se puede encontrar más detalles sobre el diseño de las bocas de tormenta en el MAPAS (CONAGUA, 2016).

Brown et al. (2013) proponen la siguiente clasificación con respecto a la seguridad de peatones y ciclistas que ofrecen cada una de las rejillas según su investigación. Los planos de configuración se muestran en los anexos del presente documento.



Figura 2.27. Clasificación de seguridad de rejillas para peatones y ciclistas adaptado de Brown et al. (2013)

Algunas consideraciones sobre aspectos de contaminación

Un factor fundamental a tener en cuenta en el diseño de drenaje es la contaminación de las aguas de lluvia que se da principalmente por el lavado de las superficies por las que escurre. Así, de acuerdo con las investigaciones realizadas por Fernández Barrera (2009), la contaminación de la escorrentía tiene una relación estrecha con la actividad humana teniendo una afectación negativa para el ambiente y la sociedad.

Las rejillas de una coladera impiden el paso de sólidos mayores a la abertura entre ellas, para ofrecer un tratamiento adicional se recomienda el colocar dentro del registro de la coladera sumideros con aberturas más finas que impidan el paso de sólidos de dimensión menor a la abertura de las rejillas. Actualmente existen estructuras comerciales que se pueden implementar en el sistema de drenaje, como los estudiados en el apartado 2.1.4.

- **Estructuras de conducción**

De acuerdo con la definición presentada por CONAGUA (2016), las estructuras de conducción son todas aquellas que transportan las aguas recolectadas por las obras de

captación hasta el sitio de vertido. Se clasifican de acuerdo con su importancia como se observa en la figura 2.28. y su ubicación dentro de la red de drenaje se muestra en la figura 2.29.

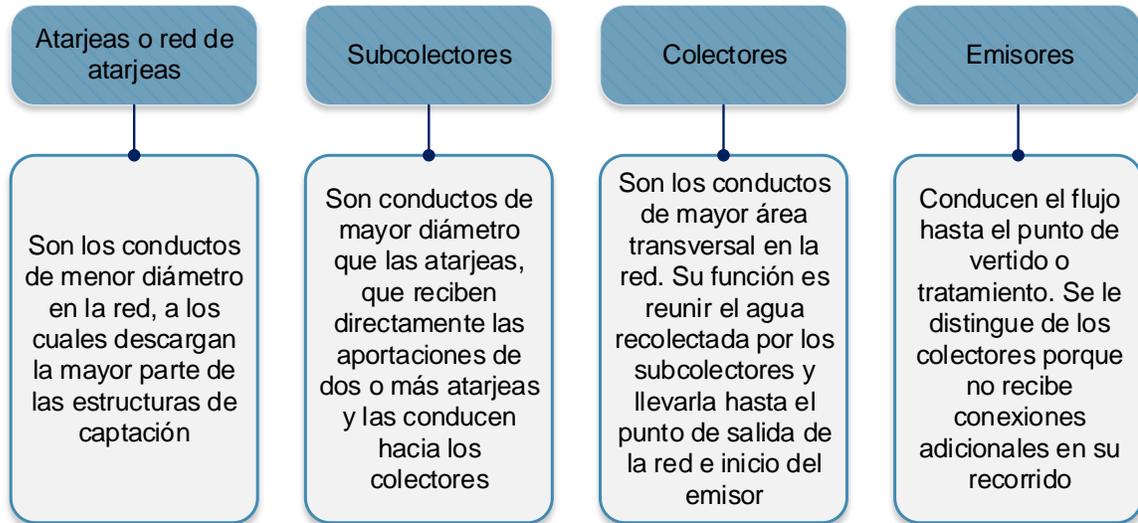


Figura 2.28. Clasificación de las estructuras de conducción de acuerdo con CONAGUA (2016)

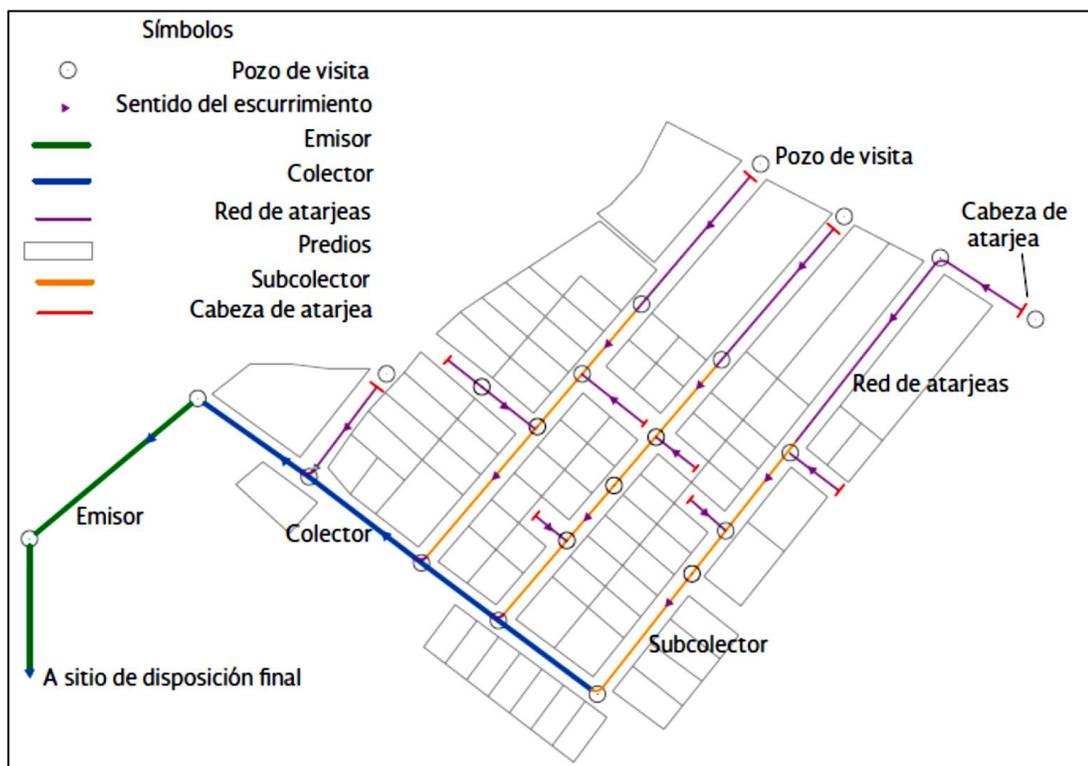


Figura 2.29. Trazo de una red de drenaje (CONAGUA, 2016)

Por otra parte, el MAPAS destaca que las estructuras de conducción de una red de drenaje pueden clasificarse en función del tipo de material y método de construcción empleado para su fabricación. En el esquema de la figura 2.30. se muestra la clasificación de las estructuras de conducción desde el punto de vista de su construcción, que pueden ser: conductos prefabricados o contruidos in situ.

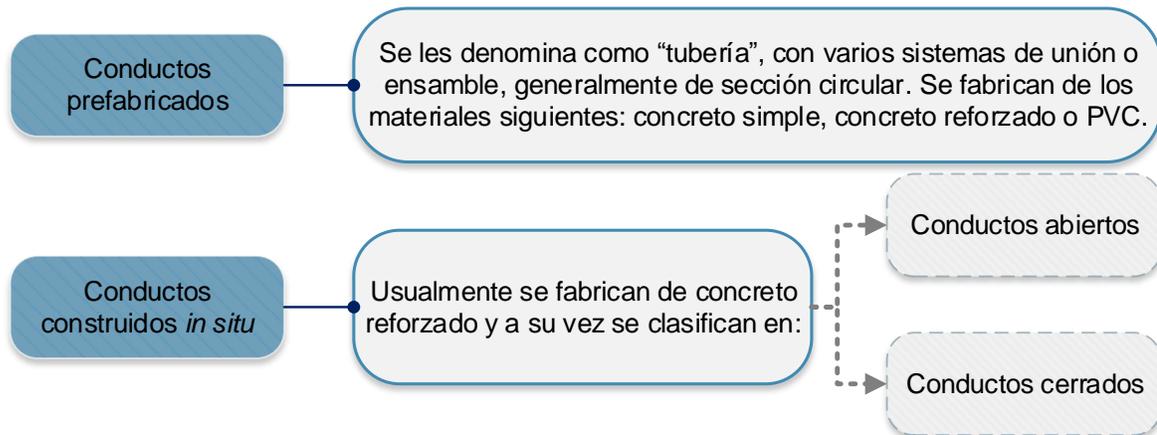


Figura 2.30. Clasificación de las estructuras de conducción según el método de construcción (CONAGUA, 2016)

Las figuras 2.31 y 2.32 muestran algunas secciones transversales de conductos abiertos y cerrados respectivamente.

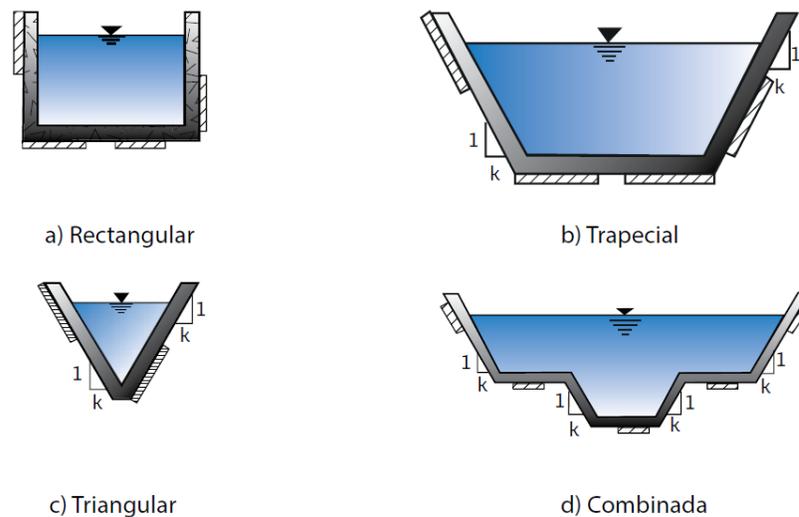


Figura 2.31. Secciones transversales de conductos abiertos (CONAGUA, 2016)

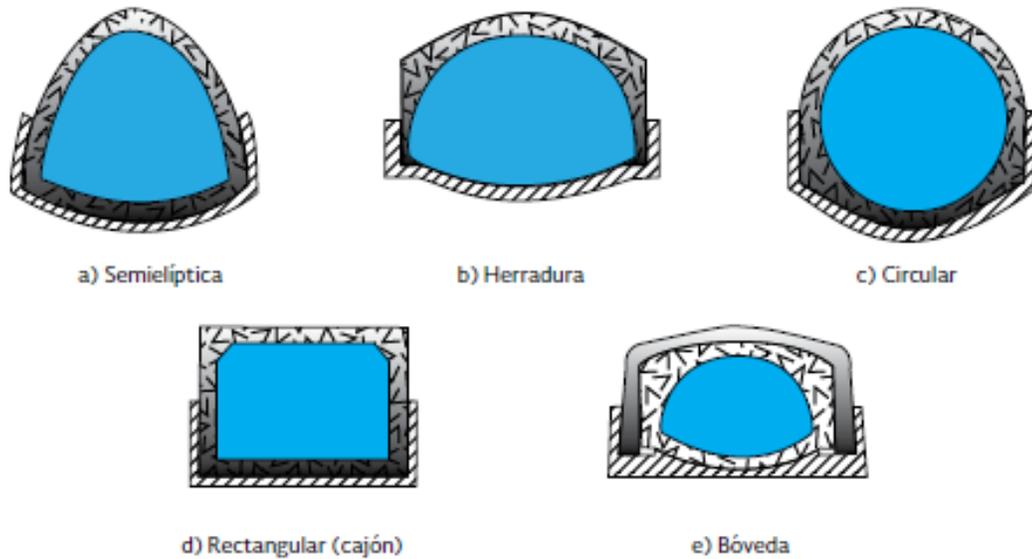


Figura 2.32. Secciones transversales de conductos cerrados (CONAGUA, 2016)

- **Estructuras de conexión y mantenimiento**

Son elementos subterráneos que facilitan la conexión y el mantenimiento de las obras de conducción del sistema, permitiendo conectar tuberías de diferentes diámetros y/o material. Se les conoce como pozos de visita o cajas de visita según sus dimensiones y son de vital importancia en la red de alcantarillado, ya que gracias a estas estructuras se evitan reparaciones complicadas y costosas. su existencia en las redes de alcantarillado es fundamental; éstos se ubican al inicio de las atarjeas, en puntos donde la tubería cambia de diámetro, dirección o pendiente y también donde se requiere la conexión con otras atarjeas, subcolectores o colectores (CONAGUA, 2016).

La clasificación y características de los pozos de visita se muestran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Clasificación de pozos de visita adaptado de CONAGUA (2016)

Tipos de pozos		Características
Pozos de visita tipo común		Los pozos de visita comunes están formados por una chimenea de tabique de forma cilíndrica en la parte inferior y troncocónica en la parte superior. La cimentación de estos pozos puede ser de mampostería o de concreto. Son suficientemente amplios para darle paso a una persona y permitirle maniobrar en su interior. Tienen un diámetro interior de 1.2 m y se utilizan con tubería de diámetro máximo de 0.61 m, con entronques de hasta 0.45 m de diámetro y permiten una deflexión máxima en la tubería de 90 grados.
Pozos de visita tipo especial	Caja	Están formados por el conjunto de una caja de concreto reforzado y una chimenea de tabique similar a la de los pozos comunes. Su sección transversal horizontal tiene forma rectangular o de un polígono irregular. No permiten deflexiones en las tuberías.
	Caja de deflexión	Se les nombra de esta forma a los pozos caja a los que concurre una tubería de entrada y tienen sólo una de salida con un ángulo de 45 grados como máximo. Se utilizan en tuberías de 1.52 a 3.05 m de diámetro.
Pozos con caída: suelen construirse por la necesidad de efectuar en su interior los cambios bruscos de nivel.	Caída libre	Se permiten caídas hasta de 0.50 m dentro del pozo sin la necesidad de utilizar alguna estructura especial.
	Caída adosada	Son pozos de visita comunes, a los cuales lateralmente se les construye una estructura que permite la caída en tuberías de 0.20 y 0.25 m de diámetro con un desnivel hasta de 2.00 m.
	Caída escalonada	Son estructuras con caída escalonada cuya variación es de 0.50 en 0.50 m hasta llegar a 2.50 m (cinco tramos) como máximo.

- **Estructuras de vertido**

Se le denomina estructura de vertido a aquella obra final del sistema de alcantarillado que asegura una descarga continua a una corriente receptora. Éstas se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de estructura a la que descargan, siendo esta clasificación como se muestra en la figura 2.33.

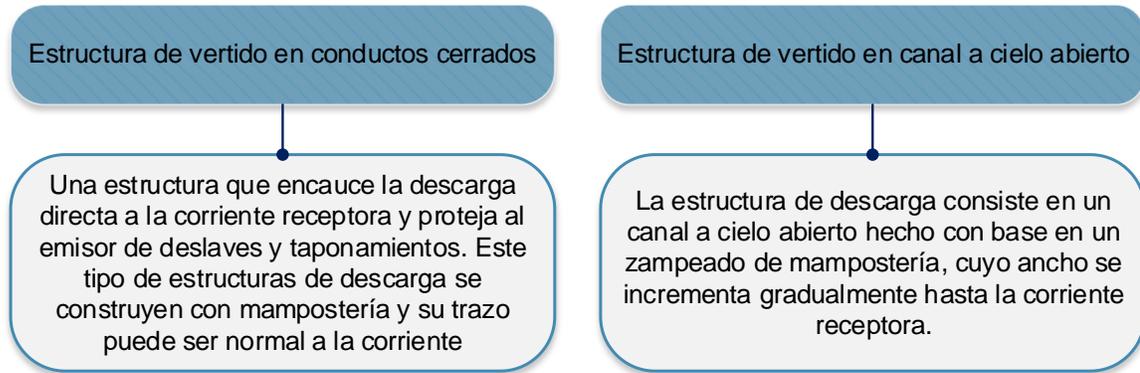


Figura 2.33. Clasificación de las estructuras de vertido (CONAGUA, 2016)

- **Obras complementarias**

Las obras o estructuras complementarias en un sistema de drenaje son estructuras que no siempre forman parte de una red, pero que permiten el funcionamiento adecuado. Entre ellas se pueden mencionar las estaciones de bombeo, los sifones invertidos, los cruces elevados, las alcantarillas pluviales, las obras de retención y detención, los puentes, etc. (Brown et al., 2013; CONAGUA, 2016)

- **Disposición final**

Se le llama disposición final al destino que se le dará al agua captada por un sistema de drenaje. En la mayoría de los casos, las aguas se vierten a una corriente natural que pueda conducir el volumen desalojado por el colector pluvial (CONAGUA, 2016).

2.3.3. Comparativa de la normatividad para el diseño de drenaje urbano

- **Marco legal nacional**

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos determina en su artículo 27, la propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio corresponden a la nación y a su vez, existe la Ley de Aguas Nacionales que reglamenta al artículo 27 y tiene como objetivo regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr un desarrollo integral y sustentable (Martínez, 2015).

El concepto de desarrollo sostenible en la política ambiental mexicana se incorporó en 1996 durante la reforma a la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, comenzando a adquirir un nuevo enfoque integral, dando paso a la creación de nuevas instituciones y organismos gubernamentales con bases jurídicas y administrativas para la implementación de políticas públicas para la protección ambiental (Martínez, 2015). La legislación actual mexicana en materia de drenaje urbano recae en la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), quien emite la reglamentación para el diseño, construcción e implementación de infraestructura para el drenaje a través del Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS).

Tal y como lo menciona en su objetivo, el MAPAS está dirigido a quienes diseñan, construyen, operan y administran los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento del país; busca ser una referencia sobre los criterios, procedimientos, normas, índices, parámetros y casos de éxito que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en su carácter de entidad normativa federal en materia de agua, considera recomendable utilizar, a efecto de homologarlos, para que el desarrollo, operación y administración de los sistemas se encaminen a elevar y mantener la eficiencia y la calidad de los servicios a la población; también favorece y orienta la toma de decisiones por parte de autoridades, profesionales, administradores y técnicos de los organismos operadores de agua de la República Mexicana (CONAGUA, 2016).

El MAPAS tiene el propósito de apoyar a los ingenieros en el diseño de sistemas de drenaje pluvial urbano. Los procedimientos descritos tienen por objeto fomentar la uniformidad en las prácticas de diseño de drenaje pluvial urbano en todo el país. Se proporcionan a detalle aspectos técnicos de diseño hidrológico e hidráulico que deben ser considerados durante la planificación de los sistemas de drenaje de aguas pluviales urbanas (CONAGUA, 2016).

El primer capítulo contiene los conceptos teóricos relacionados con el drenaje pluvial urbano, la importancia de su ejecución, las partes que lo conforman. El segundo capítulo abarca los aspectos hidrológicos necesarios para el diseño de redes de drenaje pluvial. Se presenta el análisis temporal y espacial de la lluvia mediante los registros de las estaciones pluviométricas, pluviográficas y el tiempo de concentración, entre otros puntos importantes del proceso hidrológico urbano. En el tercer capítulo se presenta la forma de analizar el comportamiento del agua, una vez que se precipita y entra en contacto con el terreno (CONAGUA, 2016).

Los aspectos hidráulicos de la infraestructura requerida en el drenaje pluvial urbano son objeto de estudio en el capítulo cuarto. El capítulo quinto, establece los criterios de evaluación por peligro de inundación en zonas urbanas, considerándose la velocidad y tirante de inundación como parámetros esenciales. El capítulo seis, comprende el diseño hidráulico de los elementos que conforman la red de drenaje pluvial. Abarca desde la planeación del sistema con un equilibrio en la relación costo-beneficio hasta la optimización de la red. En el capítulo siete, se describen los requerimientos mínimos para la elaboración de un proyecto de drenaje pluvial (CONAGUA, 2016).

- **Comparativa con normatividad internacional**

La normatividad para el diseño de drenaje de otros países es diversa y compleja ya que cada nación tiene principios y leyes muy diferentes entre sí, por lo que resulta difícil realizar una comparativa desde la perspectiva legal. Sin embargo, el autor ha retomado la aportación de López (2016) quien realizó una comparación de normatividad en materia de drenaje desde el punto de vista técnico, analizando las variaciones de implementación del método racional que algunos países toman en cuenta en el diseño de drenaje y que, en el caso de México, es el método de cálculo más implementado en los proyectos de infraestructura de drenaje.

Son diversos los parámetros que López (2016) comparó en su estudio, en la tabla 2.7 se resume el análisis de López (2016) anexando los indicadores que en México se toman en cuenta. Información de la cual, se puede concluir que la normatividad mexicana tiene similitudes y contrastes con los parámetros de cada país comparados, diferencias que bien pueden ser tema de otros proyectos de investigación.



Tabla 2.7. Comparaciones de los parámetros usados en el método racional en varios países. Adaptada con información de López (2016)

	ESPAÑA	VIRGINIA	TEXAS	COLOMBIA	MÉXICO
Rango de aplicación (km²)	50	2.5	1.3	0.8	0.89 - 12.59
Periodo de retorno en alcantarillado (años)	100	50	50 - 100	20	50*
Periodo de retorno en canales (años)	25	10	-	5-10	5**
Ecuación para la intensidad de lluvia	$I = I_d \cdot F_{int}$	$I = \frac{B}{(t_c + D)^E}$	$I = \frac{b}{(t_c + d)^e}$	$I = \frac{a \cdot T^b \cdot M^d}{\left(\frac{t}{60}\right)^c}$	-
Ecuación para el tiempo de concentración	$t_c = 0,3 \cdot L_c^{0,76} \cdot J_c^{-0,1}$	$t_c = 0,00948 \cdot H^{-0,38} \cdot L^{1,13}$	$t_n = \frac{L_n}{60 \cdot v_n}$	$t_c = 0,06628 \cdot \left(\frac{L}{S^{0,5}}\right)^{0,77}$	$t_c = 0,0003245 \cdot \left(\frac{L}{S^{0,5}}\right)^{0,77}$

*Alcantarillas para paso de cauces pequeños en caminos primarios

**cunetas en caminos y carreteras

Variables y unidades de las ecuaciones de la tabla 2.7.

España

- I: Intensidad media de lluvia para una duración igual al tiempo de concentración t_c para un período de retorno seleccionado T [mm / hr]
- I_d : Intensidad de lluvia diaria promedio para el período de retorno seleccionado [mm / hr]
- F_{int} : Factor de intensidad [adimensional]
- t_c : Tiempo de concentración [hr]
- L_c : Longitud de la corriente principal [km]
- J_c : Pendiente promedio de la corriente principal [m/m]

Virginia

- I: Intensidad de lluvia [pulgadas/hr]
- t_c : Tiempo de concentración en el canal [min]
- B,D,E: Coeficientes para frecuencias específicas enumeradas por condados y ciudades. Datos proporcionados por el Servicio Meteorológico de lo EE.UU.
- L: Longitud del canal [pies]
- H: Altura del canal [pies]

Texas

- I: Intensidad de lluvia [mm/hr]
- t_c : Tiempo de concentración [min]
- e, b, d: Coeficientes para frecuencias específicas enumeradas por condados y ciudades. Datos proporcionados por el Servicio Meteorológico de lo EE.UU.
- t_n : tiempo de viaje por enésimo alcance [min]
- L_n : longitud del enésimo alcance a lo largo de la ruta de flujo [pies o metros]
- v_n : velocidad de flujo estimada para el enésimo alcance [pies/s o m/s]

Colombia

- I: Intensidad de lluvia [mm/hr]
- T: Periodo de retorno [años]
- M: Promedio máximo anual de lluvia en periodo de 24 hrs [mm]
- t: Duración de la tormenta [min]
- a,b,c,d: Parámetros de ajuste por regionalización [adimensional]
- t_c : Tiempo de concentración [hr]
- L: Longitud de la corriente principal [km]
- S: Pendiente de la corriente principal [m/m]

México

- t_c : Tiempo de concentración [hr]
- L: Longitud de la corriente principal [m]
- S: Pendiente de la corriente principal [m/m]

2.4. FUNDAMENTOS DE ELEMENTOS FRACTALES

En los apartados anteriores se han estudiado los fundamentos básicos de los sistemas de drenaje sostenible, el enfoque que tienen éstos y los principales criterios de diseño de drenaje pluvial que serán utilizados para la concepción del sistema propuesto en este trabajo.

De cara a poder diseñar un elemento estructuralmente resistente de tipo fractal hexagonal, es necesario revisar conceptos fundamentales sobre este tema. Este apartado es resultado de la recopilación de información y síntesis de los estudios que enmarcan al concepto de la geometría fractal, partiendo desde su definición y características. Dicha información ha sido utilizada para el diseño del panel fractal que este trabajo propone para el sistema de las banquetas retenedoras.

2.4.1. Conceptos y características

De acuerdo con Valdés et al. (2016), el término fractal fue propuesto por el francés Benoît Mandelbrot en 1977 y proviene del vocablo latino *fractus* que se traduce como “quebrado, fragmentado, etc.”. Un fractal es un objeto semigeométrico cuya estructura básica, fragmentada o irregular, se repite a diferentes escalas (Mandelbrot, 1977).

Entre las características que definen a los fractales se encuentran la autosimilitud, la dimensión y las iteraciones. Para la primera, Mandelbrot (1977) define que un objeto es autosimilar si sus partes tienen la misma forma o estructura en todo el objeto, presentándose a diferentes escalas. Esta propiedad se ilustra en la figura 2.34.

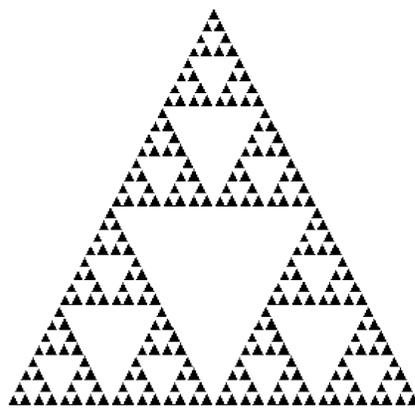


Figura 2.34. Triángulo de Sierpinski. Fuente: (Gumiel y Arias, 2005)

En su reporte, Valdés et al. (2016) mencionan que en un fractal intervienen varios conceptos fundamentales de dimensión: dimensión euclídea, topológica y de Hausdorff-Besicovitch.

Dimensión euclídea

Es el número de coordenadas requeridas para especificar un objeto. Ejemplos: Un punto dimensión uno, un plano dimensión dos y el espacio dimensión tres.

Dimensión topológica

La dimensión topológica mide la habilidad para cubrir un objeto con conjuntos abiertos de radio pequeño. Una dimensión topológica cero describe un conjunto que puede ser cubierto por pequeños conjuntos abiertos que son disyuntos. La dimensión topológica uno describe un conjunto que puede ser cubierto por pequeños conjuntos abiertos con sólo una intersección entre adyacentes pares de ellos. Un conjunto es considerado de dimensión topológica dos si puede ser cubierto por pequeños conjuntos abiertos que se intersecan sólo tres veces. La dimensión topológica usualmente tiene el mismo valor que la dimensión euclídea.

Entonces:

$D_T = -1$, el vacío; $D_T = 0$, un punto; $D_T = 1$, un segmento; $D_T = 2$, un cuadrado; $D_T = 3$, un cubo

Dimensión de Hausdorff-Besicovitch

Esta dimensión se define como un contenido lineal, se calcula sumando pasos r elevados al exponente uno, que es la dimensión de la línea recta. Un contenido de superficie se calcula sumando pasos r (donde r es el lado de cada uno de los cuadrados que compone la superficie) elevados al exponente dos, que es la dimensión del plano. Un contenido de volumen se calcula sumando pasos r (donde r es el lado de cada uno de los cubos que compone el volumen) elevados al exponente tres, que es la dimensión del espacio.

La Dimensión de Hausdorff - Besicovitch, está dada por la ecuación:

$$D = \frac{\log (N)}{\log (1/r)}$$

donde, N es el número de copias de sí mismo, D es la Dimensión de Hausdorff y r es la razón de similitud.

Por otro lado, las iteraciones consisten en repetir n veces la misma figura o patrón. En los fractales lo que se itera son las ecuaciones, o el patrón generador dependiendo del fractal.

2.4.2. Fractales tipo panal de abeja (honeycomb)

Las estructuras nido de abeja (honeycomb), están inspiradas en las figuras fractales de forma hexagonal similares a los panales de abeja, para las cuales se le han encontrado aplicaciones generalizadas en diversos campos, como en arquitectura, transporte, ingeniería mecánica, ingeniería química, nanofabricación, biomedicina, entre otras ciencias (Zhang et al., 2015).

Propiedades de la estructura honeycomb

Mukhopadhyay y Adhikari (2016) destacan que los panales han ganado considerable atención en los últimos años como una estructura inteligente debido a su capacidad de cumplir con los requisitos de alto rendimiento en varios parámetros críticos de aplicaciones específicas. Éstos incluyen resistencia y rigidez específicas, propiedades electromecánicas, propiedades acústicas, absorción de impactos, resistencia a la fatiga, resistencia a la corrosión y al fuego.

Nazeer et al. (2015) experimentaron la estructura que ofrece un panel como el mostrado en la figura 2.35, observando que el comportamiento de las estructuras de panal es ortotrópico, lo que significa que los paneles reaccionan de manera diferente dependiendo de la orientación de la estructura. Otra propiedad importante del núcleo sándwich de panal de abeja es su resistencia a la compresión. Debido a la configuración hexagonal eficiente, donde las paredes se apoyan entre sí, la resistencia a la compresión de los núcleos de panal es típicamente mayor (con el mismo peso) en comparación con otras estructuras de núcleo tipo sándwich como, por ejemplo, núcleos de espuma o núcleos corrugados. Nazeer et al. (2015) destacan dos principales ventajas de las estructuras honeycomb: alta resistencia y ligereza.

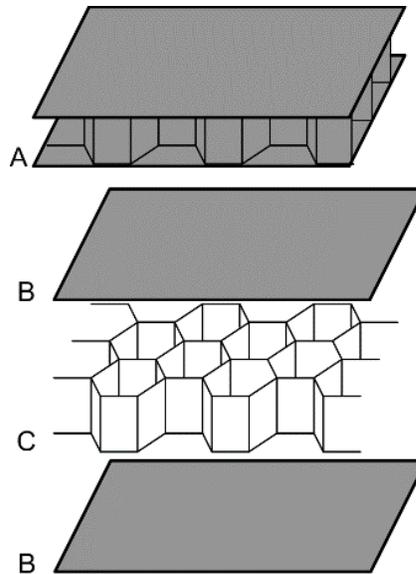


Figura 2.35. Un panel sándwich compuesto (A) con núcleo de panal de abeja (C) y láminas frontales (B). Fuente: (Nazeer y Allabakshu, 2015)

Wilbert et al. (2011) estudiaron la respuesta estructural bajo efectos de compresión de paneles tipo nido de abeja incluyendo el pandeo, colapso y aplastamiento a través de simulaciones numéricas utilizando modelos de elementos finitos, confirmando que el pandeo ocurrió en el régimen elástico del material (aluminio, en el caso de estudio) a niveles de esfuerzos que fueron mucho más bajos que los valores reportados en la literatura y que se basaron en modelos simples. La respuesta estructural resultó ser estable y rígida de las tiras tipo placa que forman las paredes de las celdas hexagonales. Los esfuerzos combinados de flexión produjeron que la respuesta se desarrollará hasta una carga límite, que representa la resistencia a la compresión del panal. Para el panal particular estudiado por Wilbert et al. (2011), la tensión de colapso fue 67% más alta que la tensión de pandeo.

Las estructuras de panal de abeja tienen la ventaja de que las celdas grandes y abiertas se llenan con otros materiales para ciertas funciones, como el aislamiento térmico y acústico, la amortiguación de vibraciones, la gestión térmica y la integración estructural. Materiales funcionales adicionales se introducen en los núcleos para mejorar (como las espumas poliméricas) las propiedades específicas como la absorción del sonido y otras. El almacenamiento de la energía en formas apropiadas y prácticas es crítico e investigado de manera efectiva en todo el mundo (Zeyrek et al., 2017). Este tipo de geometría será la base del desarrollo tecnológico del panel estable y resistente que se pretende llevar a cabo para la propuesta de investigación de SUDS.

Cabe destacar que hasta el momento no se ha encontrado estudio alguno sobre el uso o implementación de elementos fractales en proyectos como el que se pretende llevar a cabo. Sin embargo, existen sistemas comerciales como las cajas o depósitos modulares semejante al propuesto en este trabajo y que bien podría ser considerado competencia directa del panel fractal. En la figura 2.36 se muestran algunos tipos de módulos que se distribuyen en la actualidad por diferentes empresas comparando el tipo de geometría que utilizan.

PRODUCTO: HIDROSTANK SISTEMA HIDROBOX

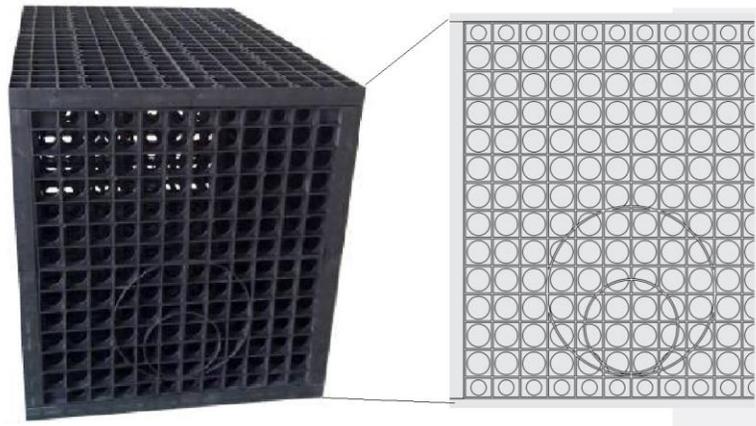


Figura principal identificada: estructura de cuadros con círculos concéntricos

PRODUCTO: ATLANTIS MATRIX TANK MODULES

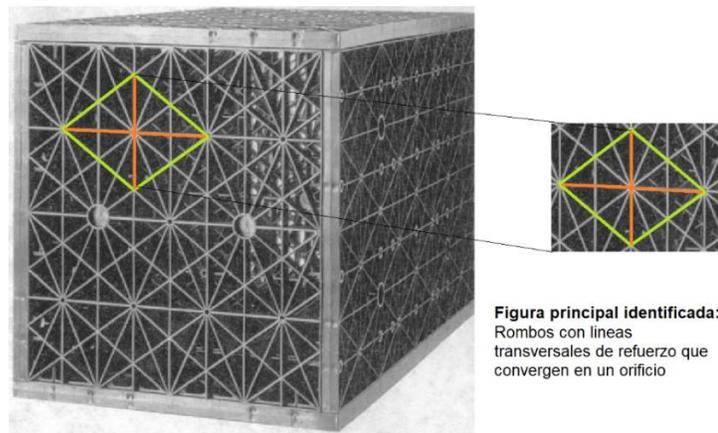


Figura principal identificada: Rombos con líneas transversales de refuerzo que convergen en un orificio

Figura 2.36. Geometría de sistemas modulares comerciales

Como se puede observar, la geometría fractal hexagonal resulta ser novedosa en este tipo de sistemas de paneles o módulos.

2.5. REVISIÓN DE CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE BANQUETAS

En los últimos años ha crecido una tendencia uniforme en materia de accesibilidad a vincular este concepto con los de diseño universal o diseño para todos, y a no restringirlos sólo a una atención a las necesidades de las personas con discapacidad. Este proceso ha producido, durante la primera década del siglo XXI, una transformación en el marco legislativo a nivel mundial, claramente dirigida a garantizar la proyección, construcción y uso de espacios accesibles con el fin de lograr una integración en el sector económico y social del mayor número posible de personas con distintas capacidades. De las múltiples consecuencias derivadas de este proceso la movilidad ha sido un tema estratégico para garantizar el desarrollo sostenible de las ciudades a través de una infraestructura vial con criterios de diseño integrales (Reyes Torres y Viéitez Vivas, 2010).

Este apartado se compone del análisis realizado a diversas normativas internacionales y nacionales, para el diseño de banquetas, a fin de comparar prácticas y metodologías que se llevan a cabo.

2.5.1. Generalidades y conceptos

Para comenzar, es conveniente homologar terminologías y definiciones ya que a nivel internacional existen variaciones de conceptos para las banquetas. En este aspecto, la Real Academia de la Lengua define que “una *banqueta*¹, *ander*², *acera*³ o *vereda*⁴ es una superficie pavimentada, paralela y elevada a la orilla de una calle u otras vías públicas para uso de personas que se desplazan andando, llamados peatones” (RAE, 2018).



Figura 2.37. Ejemplo de banqueta, acera, anden o vereda (www.valladolid.es)

¹ término utilizado en Guatemala y México.

² término utilizado en países de Asia y Europa.

³ término utilizado en países de América y Europa.

⁴ término utilizado en países de América.

Jerez Castillo y Torres Cely (2012) definen a las banquetas como zonas longitudinales elevadas respecto de la calle, carretera o camino, que hacen parte del espacio público, destinadas al flujo y permanencia temporal de todo tipo de peatón, proporcionándole continuidad y garantizando la seguridad en el desplazamiento del peatón con o sin limitaciones.

- **Conceptos**

En la literatura revisada (Jerez Castillo y Torres Cely, 2012; Reyes Torres y Viéitez Vivas, 2010; SEDUVI, 2017) se considera a las banquetas parte de la infraestructura vial que conforma la traza urbana, cuyo diseño está relacionado con el tipo de calle dando prioridad a la jerarquía de movilidad. Lo anterior, se ejemplifica en la figura 2.38.

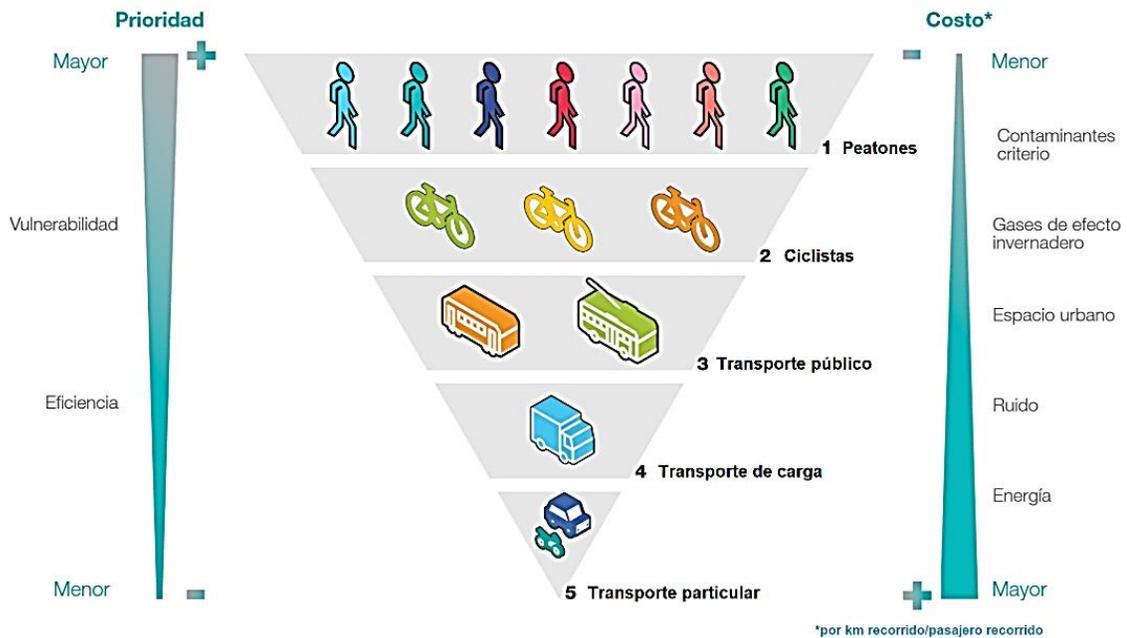


Figura 2.38. Jerarquía de movilidad (SEDUVI, 2017)

- **Principios**

Las normativas para las vías de tránsito de personas se enmarcan dentro de los principios de accesible a nivel mundial, considerados mejores prácticas, entendidas éstas como las

que en el proyecto, construcción y procedimientos responden a las necesidades del más amplio número posible de personas en el uso de los entornos, productos y servicios (Reyes Torres y Viéitez Vivas, 2010).

Las banquetas son espacios públicos urbanos que mejoran la movilidad de las personas sin tener que utilizar el arroyo vehicular convirtiéndose en un activo económico y social para una ciudad (SEDUVI, 2017). A nivel mundial, la movilidad urbana tomó importancia al materializar el *Programa 21* surgido de la Conferencia Sobre Medio Ambiente y Desarrollo en 1992, donde se comenzó a identificar la necesidad de acción en material de planificación sostenible de las ciudades a través de la gestión de los espacios públicos (Jerez Castillo y Torres Cely, 2012; Vega Pindado, 2016).

Los principios sobre los que se enmarca el diseño de espacios públicos, como las banquetas, son (SEDUVI, 2017):

- Seguridad: garantizar que las banquetas minimicen el riesgo de ocurrencia de hechos de tránsito, y satisfaga las necesidades de circulación peatonal, ya sea de día o de noche.
- Accesibilidad: asegurar que las banquetas no presenten barreras para el peatón y sean accesibles desde cualquier punto. Deben ser apropiadas para dar servicio a flujos de personas actuales y futuros, que faciliten el desplazamiento a todas las personas incluyendo a las personas de cualquier edad y/o con movilidad limitada.
- Confort: además de proporcionar espacios para caminar de manera segura y accesible, las banquetas deben aportar comodidad al usarlas dentro de un entorno que ofrezca posibilidades de descanso, sombra y servicios.
- Continuidad: las banquetas son un elemento de la red de movilidad que debe permitir a las personas desplazarse de un lugar a otro sin dificultades incentivando el caminar como un medio eficiente de transporte.
- Calidad: contribuir mediante una adecuada elección de materiales, vegetación y mobiliario a la imagen urbana, reflejando una identidad propia de la ciudad.
- Durabilidad: asegurar una mayor vida útil, usando materiales y sistemas constructivos de calidad que disminuyan costos de mantenimiento y reposición.
- Innovación tecnológica: incorporación de mejores prácticas en el diseño y construcción de banquetas que contribuyan a generar una ciudad más sustentable y resiliente.

- Homogeneidad: generar una red de banquetas aplicando criterios de diseño homologados para encaminar hacia una integración y renovación de su imagen urbana.

- **Beneficios**

La posibilidad de contar con banquetas más amplias que incorporen vegetación, bancas, luminarias y demás complementos, contribuye a mejorar la experiencia peatonal en la ciudad. Algunos de los beneficios directos que ofrece un buen diseño de banquetas que cumpla con los principios expuestos se mencionan en la figura 2.39.



Figura 2.39. Beneficios de banquetas. Elaborado con información de SEDUVI (2017)

- **Composición de la banqueta**

Las banquetas se conforman de franjas en sentido longitudinal, como se muestra en la figura 2.40.



Figura 2.40. Franjas de banqueta (SEDUVI, 2017)

- Franja de fachada. Espacio de transición entre el parámetro de las edificaciones o límite de propiedad privada.
- Franja de circulación peatonal. Espacio primordial de la banqueta que permite el tránsito accesible y seguro de los peatones. Debe ser continuo y tener un ancho mínimo y más adelante se analiza su dimensión.
- Franja de mobiliario y vegetación. Sección de la banqueta que permite alojar mobiliario, señalización, amenidades y vegetación.
- Franja de guarnición. Elemento longitudinal que delimita las franjas funcionales de la banqueta del área de circulación vehicular.

En la tabla 2.8. se muestran las dimensiones de las franjas funcionales de banquetas de acuerdo con el ancho de banqueta propuesto por la SEDUVI (2017).

Tabla 2.8. Dimensiones de banqueta propuestas por SEDUVI (2017)

DIMENSIONES DE FRANJAS FUNCIONALES EN BANQUETAS				
ANCHO DE BANQUETA (m)	PEATONAL (m)	GUARNICIÓN (m)	MOBILIARIO Y/O VEGETACIÓN (m)	FACHADA (m)
≤1,20	1.00	0,15 a 0,40	No aplica	No aplica
1,20 a 2,39	1.20	0,15 a 0,40	0.80	No aplica
2,40 a 4,79	1.20	0,30 a 0,40	1.20	Variable
4,80 a 5,99	1.80	0,30 a 0,40	1.20	Variable
6,00 a 9,99	2.40	0,40 a 0,80	1.20	Variable
10,00 o más	3.60	0,40 a 0,80	1.20	Variable

- **Composición estructural tipo**

Es difícil determinar secciones estándar para las banquetas en general, sin embargo, el autor ha propuesto una sección (mostrada en la fig. 2.41) de banqueta, resultado de la observación en distintos proyectos y de lo planteado por SEDUVI (2017).

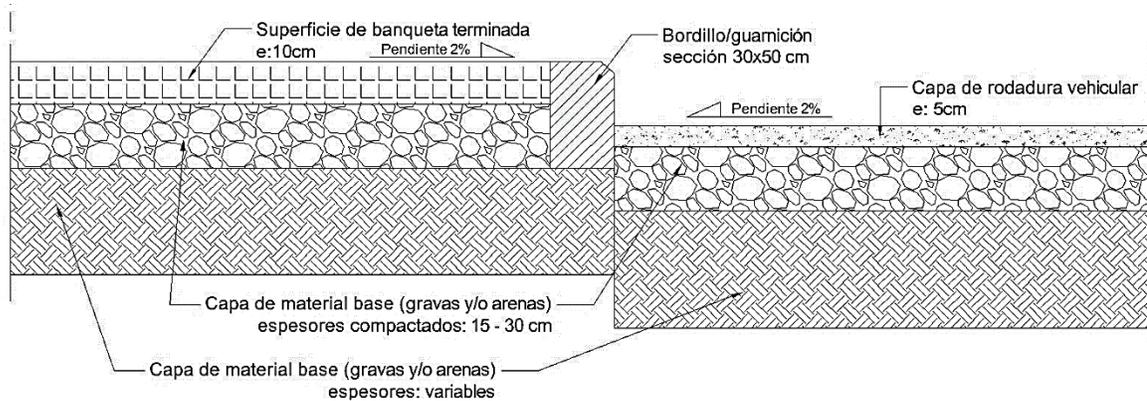


Figura 2.41. Sección tipo de banqueta. Elaboración propia con información de SEDUVI (2017)

El material final de la superficie de banqueta depende del tipo de proyecto e incluso ubicación de la zona ya que cada entidad gubernamental define las especificaciones técnicas de construcción, algunos materiales comunes son: terminados de concreto, adoquines y/o canteras.

- **Banquetas dentro de los sistemas de drenaje sostenible**

Ramírez Juárez (2014) destaca que uno de los espacios disponibles y con gran potencial para retener la escorrentía, son las banquetas, ya que se tienen en gran cantidad debido a la urbanización y seguirán construyéndose más en medida del crecimiento de la población. La suma de los volúmenes de los espacios que pueden generar las banquetas de cada casa en una zona urbanizada constituye volumen potencial de retención considerable. Con esto, en lugar de crear una obra de gran dimensión que retenga el agua que escurre en una determinada lluvia para una zona, se puede hacer mediante la retención del agua que escurre en áreas pequeñas. En este caso, el agua que precipita en el área de una casa, y el área de calle y banqueta que le corresponde, puede ser retenida o almacenada por el espacio que se puede generar en el área de la banqueta. Muchas de las banquetas existentes tienen funciones de conducción de cableado eléctrico o de telecomunicaciones, sin embargo, hay una gran cantidad de banquetas que pueden ser utilizadas como espacios de retención, que además de sus funciones comunes, se conviertan en depósitos temporales de agua pluvial (amortiguadores de picos de hidrogramas).

El modo de conducir el agua que precipita hacia las banquetas retenedoras que Ramírez (2014) propuso, aunque sin un análisis hidrológico-hidráulico, es utilizando los medios ya disponibles para la captación del agua pluvial. Un medio para llevar el agua que precipita en los techos de las casas, es mediante su canalización hacia estos espacios de retención.

El otro medio de captación que Ramírez (2014) detalla conceptualmente, es mediante las estructuras dedicadas a la captación de agua pluvial en las calles, como son las coladeras de banqueta, coladeras de piso y bocas de tormenta. Estos espacios tienen dos mecanismos de operar; en las zonas altas de la cuenca urbana se busca tener una retención del agua pluvial y una descarga regulada. Para las zonas bajas, la descarga rápida es lo ideal para evitar acumulación en estas zonas, de modo que para estas zonas el volumen destinado de las banquetas-retenedoras se convierta en un espacio para almacenar agua cuando el sistema de drenaje se sature, convirtiéndose en una medida de seguridad para aminorar la inundación en caso de que ésta se presente. Por lo cual el diseño del medio de comunicación entre las banquetas retenedoras y las coladeras de banqueta será diferente para las zonas altas y bajas. Ramírez (2014) destaca que el espacio dado por las banquetas hace que los depósitos puedan adquirir una forma rectangular y tengan una descarga controlada por un mecanismo regulador, como puede ser un orificio o una válvula de regulación.

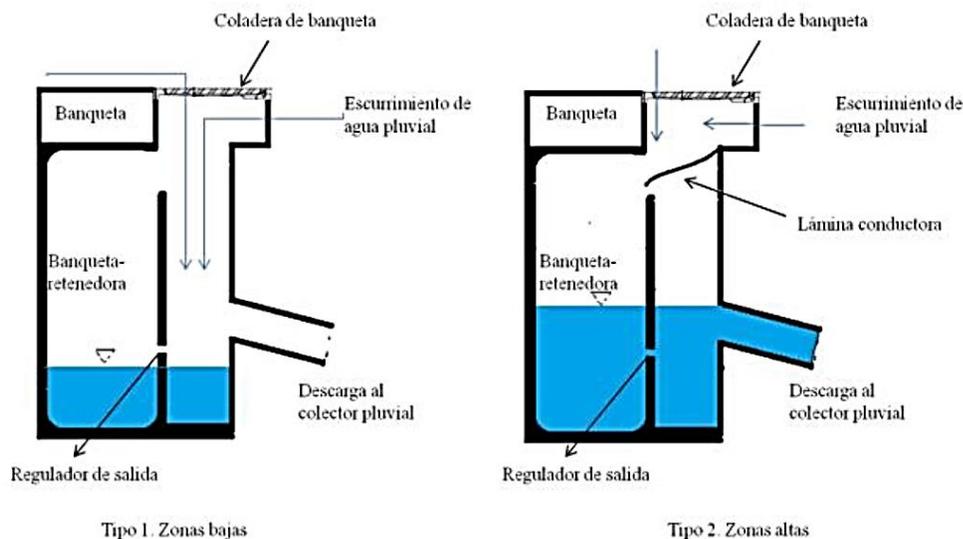


Figura 2.42. Esquema de banquetas retenedoras (Ramírez Juárez, 2014)

En este trabajo se utilizará como base, el modelo conceptual planteado por Ramírez Juárez (2014) con ciertas consideraciones ya que el estudio realizado carece de evaluación alguna y sólo tiene un planteamiento conceptual. El presente trabajo plantea un análisis de los componentes que integran el sistema que incluye la innovación tecnológica del panel fractal en la implementación de banquetas.

2.5.2. Comparación de criterios nacionales e internacionales sobre el diseño de banquetas

La propuesta planteada para la concepción de banquetas retenedoras versa sobre el aprovechamiento de la franja peatonal para implementar el sistema, por lo que, el autor se dio a la tarea de realizar una revisión sobre normativas internacionales sobre banquetas con el propósito de obtener un panorama general de los parámetros, criterios de diseño o regulaciones adoptadas por distintos países del mundo que pudiera ser utilizado como recurso de reflexión. El desarrollo del análisis de normativas internacionales que se presentan en este apartado, se basa, en buena medida, en información recopilada del Ministerio de Vivienda de España (Reyes Torres y Viéitez Vivas, 2010) donde se comparan normativas internacionales de Australia, Canadá, EE.UU., Francia, Suecia y España en los rubros de:

- Accesibilidad en los pasos peatonales
- Elementos de urbanización
- Puntos de cruce y entradas/salidas de vehículos
- Mobiliario urbano
- Estacionamiento y elementos de control
- Señalización e información accesible

Al grupo de países que mencionan Reyes Torres y Viéitez Vivas (2010) se le ha sumado la normativa de la Ciudad de México, que de acuerdo con la literatura revisada (SEDUVI, 2017) es la ciudad mexicana que presenta más avances en la legislación de lineamientos en cuanto a banquetas se refiere.

La revisión se resumió en la identificación de las dimensiones y consideraciones con las que cuentan las distintas normativas en cuanto a las banquetas, en especial a la franja peatonal, que es donde se propone implementar el nuevo sistema. Los elementos que se exponen en la tabla 2.9., destacan el ancho mínimo de paso peatonal, entendido como

aquel que posibilita el libre tránsito de las personas independientemente de sus características o modo de desplazamiento.

Tabla 2.9. Comparación de normatividad internacional para banquetas (pasos peatonales). Elaboración propia

	Australia	Canadá	EE.UU.	Francia	Suecia	España	México
Ancho mínimo de paso (m)	1.00	1.50	1.50	1.20	2.00	1.80	1.00
Altura libre de paso (m)	2.00	2.30	2.30	2.20	2.20	2.20	N/E
Ancho mínimo para el paso de dos sillas de ruedas (m)	1.80	1.50	1.50	N/E	1.80	1.80	N/E
Pendiente transversal máxima	2.5%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%
Pendiente longitudinal máxima	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	8.0%

N/E: No Especificado

La información de la tabla 2.9. ofrece un panorama de los criterios utilizados en algunas partes del mundo, con relevancia de que el sistema puede no sólo implementarse en México, sino que también se puede exportar a otras ciudades del mundo. Ahora bien, enfocándose al ambiente local, en el Estado de México y la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), a nivel estatal existe el Código Administrativo del Estado de México compuesto por 16 libros donde se codifican los principios generales y los ordenamientos que regulan la actividad administrativa en cada materia, estableciendo normas claras y sencillas que rigen la actuación de la administración pública y los deberes de los particulares, de manera que la ley constituya un instrumento eficaz para fortalecer el estado de derecho.

- **Composición del Código Administrativo del Estado de México (CAEM)**

Primero	Segundo	Tercero	Cuarto	Quinto	Sexto
Parte general	Salud	Educación	Turismo	Ordenamiento territorial y DU	Protección civil
Séptimo	Octavo	Noveno	Décimo Segundo	Décimo Cuarto	Décimo Quinto
Transporte	Transito	Desarrollo agropecuario	Obra pública	Información geográfica	Gaceta de gobierno
Décimo Sexto	Décimo Séptimo	Décimo Octavo	Décimo Noveno		
Part. publica y privada	Comunicación	Construcción	Operación de servicios		

Figura 2.43. Libros que componen al CAEM. Elaboración propia.

Correspondiente al diseño y/o construcción de infraestructura en las vías públicas, en el Libro Quinto del CAEM, en su artículo 144 estipula:

“Para la apertura, prolongación, ampliación o cualquier otra modificación de vías públicas, que constituyan la infraestructura vial a que se refiere el Código, será necesaria la autorización previa de la Secretaría, a petición del municipio correspondiente...”

Mientras que el artículo 145, fracción III menciona las dimensiones mínimas para las banquetas.

“Los anchos mínimos de las banquetas serán: de tres metros en las vías primarias, de un metro cincuenta centímetros en las locales, de un metro en las de vías con retorno, de dos metros cincuenta centímetros en vialidades de conjuntos urbanos o condominios industriales y de dos metros en vialidades de conjuntos urbanos para unidades económicas de alto impacto.”

De acuerdo con la información precedente, las vías públicas que se mencionan en el texto del CAEM, se clasifican con lo estipulado por el Reglamento de Tránsito del Estado de México.



Primarias

- Vías de acceso controlado
- Arterias principales



Secundarias

- Calle local
- Privada



Ciclopistas



Áreas de transferencia

Así mismo, el Artículo 56 fracción V del CAEM menciona que *“Las obras de urbanización de los conjuntos urbanos comprenderán por lo menos, lo siguiente: Guarniciones y banquetas, con materiales que permitan la filtración pluvial, conforme a los dictámenes en materia de impacto ambiental y/o de servicios de agua y drenaje, emitidos por la Secretaría de Medio Ambiente y la Secretaría de Infraestructura, respectivamente.”* En este apartado

es donde pudiera tener cierta cabida el proyecto realizado sin embargo es necesario el analizar bien la descripción de lo dicho en el CAEM.

México tiene la tarea pendiente en la parte legislativa en la creación y/o modificación de normatividad que permita el desarrollo de herramientas para el desarrollo en la infraestructura del drenaje en general. No existe un marco normativo para el diseño e implementación de los SUDS. Para la realización del presente proyecto, se tomó como base la normatividad aplicable para el diseño de drenaje existente y se realizó la propuesta metodológica de diseño que se presenta en el capítulo 3 de este documento.

2.6. FUNDAMENTOS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

En este apartado se presentan los fundamentos teóricos de la dinámica de fluidos computacional (CFD) sobre los cuales se sustenta su implementación en esta investigación. Se describen algunas aplicaciones de modelación y simulación de flujos donde utilizan CFD. También, se muestran las ecuaciones matemáticas sobre las que se basan los modelos de CFD y los esquemas numéricos que se utilizan para el análisis.

2.6.1. Generalidades

El comportamiento de un flujo dentro de un medio se puede predecir mediante la solución de las ecuaciones diferenciales parciales que representan las leyes de conservación de masa, momentum y energía (Navier Stokes), las cuales son difíciles de resolver debido a la interacción entre partículas y su geometría, lo que da lugar al surgimiento de la CFD como herramienta de solución a dichos problemas (Noblecilla-Palomino, 2019).

De acuerdo con Noblecilla-Palomino (2019) la dinámica de fluidos computacional o CFD (abreviatura del concepto en inglés *Computational Fluid Dynamics*) es el área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de flujos de fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados como reacciones químicas, combustión, aeroacústica, etc. La CFD es el resultado de la combinación de dos disciplinas: la mecánica de fluidos y el cálculo numérico.

Las principales áreas de aplicación la conforman la industria automotriz, la aeronáutica y mecánica en general, sin embargo, con el desarrollo de los procesadores potentes, han logrado que más disciplinas adopten e implementen los análisis de CFD.

La aplicación de la CFD se encuentra en la mecánica de fluidos, principalmente en el estudio del comportamiento de un fluido dentro de un medio: simular difusión y convección de sustancias fluidas en los diferentes ambientes, simular hidrodinámica y hemodinámica, probar y desarrollar proyectos de sistemas propulsivos y de generación de energía, etc (Noblecilla-Palomino, 2019).

Para Noblecilla-Palomino (2019) su uso en el estudio de los fluidos garantiza resultados confiables. Por ello se puede llevar a cabo la implementación y diseño de componentes de un sistema para mejorar su funcionamiento. Además, se logra visualizar el comportamiento de un fluido y predecir los patrones de flujo presentes en un sistema.

La tabla 2.10. muestra una comparativa entre el uso de CFD y proceso de experimentación para el análisis de fluidos.

Tabla 2.10. Comparación entre experimentación y el análisis de CFD (Noblecilla-Palomino, 2019)

Experimentos	Simulación con CFD
<ul style="list-style-type: none"> > Se realiza un solo experimento a la vez. > Se analiza en un número de puntos limitados y a instantes de tiempo específicos. > Dirigido a un modelo escalado de laboratorio. > Dirigido a un número delimitado de problemas y condiciones de operación. > Costoso. > Lento. > Secuencial. > Para un solo propósito. > Errores comunes de medición, distorsiones de flujo por las probetas, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> > Se pueden realizar diversas simulaciones con diversidad de ambientes. > Alta resolución en espacio y tiempo. > Dirigido a un dominio actual de flujo. > Se virtualiza cualquier problema y condiciones de operación reales. > Económico. > Rápido. > Paralelo. > Multipropósito. > Errores comunes de modelamiento, discretización e implementación.

El uso de CFD en el estudio de los fluidos, de acuerdo con Noblecilla-Palomino (2019), garantiza resultados confiables. Por ello se puede llevar a cabo la implementación y diseño de componentes de un sistema para mejorar su funcionamiento. Además, se logra visualizar el comportamiento de un fluido y predecir los patrones de flujo presentes en un sistema. Sin embargo, algunas desventajas de la simulación mediante CFD es que nunca son 100% precisas debido a que en los datos de entrada puede haber muchas simplificaciones o imprecisiones, el modelo matemático del problema puede ser inadecuado y la precisión de los resultados pueden ser limitados por la capacidad computacional disponible.

2.6.2. Etapas de cálculo CFD

De acuerdo con Noblecilla-Palomino (2019) la preparación de los modelos virtuales en CFD implica 3 etapas generales: Pre-procesamiento, procesamiento y postprocesamiento.

Durante el pre-proceso se establece las condiciones de análisis y la malla tridimensional a trabajar, en el proceso se realiza la resolución del problema mediante diferentes métodos y algoritmos de cómputo, y en el post-proceso se revisa e interpreta los reportes de los resultados.

Lopez-Rebollar (2015) define el proceso general para el uso y aplicación de un análisis mediante CFD, recomendado por la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA) en el archivo *NPARC Alliance Verification and Validation*, en las etapas mostradas en el diagrama de la figura 2.44.



Figura 2.44. Proceso general para el uso de CFD. Adaptado con información de López-Rebollar (2015) y Noblecilla-Palomino (2019)

A continuación, se describen las etapas de acuerdo con la información de López-Rebollar (2015) y Noblecilla-Palomino (2019):

A. Formulación del Problema

Etapa donde se describe el objetivo del análisis, así como las rutas más sencillas para alcanzar dicho objetivo. También, se describe la geometría que será analizada, si ésta pertenece a un todo o se puede analizar de forma aislada. Además, se analiza la necesidad del dimensionamiento espacial, si es requerido un modelo de análisis unidimensional (1D), bidimensional (2D) o tridimensional (3D). Aunado a esto, se debe especificar la

temporalidad del fenómeno a estudiar, es decir, un análisis de un flujo en estado estacionario o transitorio, incluyendo la naturaleza viscosa del flujo (no viscoso, laminar, turbulento).

B. Modelo geométrico y el Dominio Fluido

Se refiere al cuerpo sobre el cual el flujo será analizado y modelado. Comúnmente se requiere una herramienta de dibujo de CAD para poder definir la geometría. Al establecer la geometría del modelo, se deben considerar simplificaciones al mismo, para permitir un esfuerzo de análisis óptimo y razonable. Se delimita la extensión del dominio finito de la geometría sobre la cual el flujo es simulado. Comúnmente, algunas zonas de la frontera del dominio coinciden con las superficies del cuerpo geométrico. Otras superficies son fronteras libres por donde el flujo entra o sale. La geometría y el dominio del flujo son modelados de manera que estos provean condiciones óptimas que beneficien la generación de la malla. Así, la modelación toma mucho en consideración la estructura y topología de la generación de la malla, es decir, del modelo geométrico.

C. Establecimiento de las condiciones iniciales y de frontera

Etapa en la cual se requiere especificar las condiciones físicas en las fronteras de dicho dominio establecido. La simulación generalmente empieza por una solución inicial y ésta usa un método iterativo para alcanzar la solución final del campo de flujo.

D. Generación de malla

El dominio del fluido es discretizado en una malla o cuadrícula a través de elementos o volúmenes finitos. La generación de la malla implica la definición de la estructura y topología y posteriormente la generación la cuadrícula de dicha topología. Actualmente todas las mallas son estructuradas con multi-bloques, sin embargo, pueden existir mallas contiguas, no contiguas y con superposición. La malla debe poseer una mínima calidad en su cuadrícula, la cual se define con parámetros de ortogonalidad. Es importante tomar en cuenta la calidad de la malla en zonas donde se requiera ver los fenómenos de capa límite,

donde se deben considerar espesores muy finos en las capas que conforman dicha capa límite.

E. Establecimiento de estrategias de simulación

Las estrategias para realizar la simulación implican la determinación de aspectos como los pasos de espacio o pasos de tiempo. Dichos pasos se refieren a la evolución de la propiedad principal dependiente (temperatura, velocidad, densidad, presión, concentración, etc.) a través de las dimensiones independientes (tres coordenadas espaciales y el tiempo). Otras estrategias de simulación se refieren a la elección del modelo, es decir, si es un modelo turbulento (flujos con esfuerzos de Reynolds significativos) o químico (procesos que incluyan reacciones químicas), así como la elección de los algoritmos de solución.

F. Establecimiento de parámetros de entrada

Un código de CFD generalmente requiere de un archivo de entrada creado a partir de una lista de valores de parámetros de entrada que sean consistentes con la estrategia planteada o deseada. Además, generalmente se requiere de un archivo de malla que contenga la estructura de la malla en sí, además de la información de las condiciones de frontera para generar una solución inicial del flujo y posteriormente solucionar el dominio completo.

G. Realización de la simulación

La simulación se realiza con diversas posibilidades de opciones para el procesamiento interactivo o por lotes (secciones) y/o con procesamiento distribuido. Esto para lograr un tiempo óptimo en la generación de la solución. De este proceso depende la capacidad computacional disponible en la simulación.

H. Monitoreo de la simulación

Mientras la simulación está en proceso, la solución es monitoreada para determinar si se ha obtenido una convergencia, denominada convergencia iterativa. Diversas referencias describen los métodos para examinar la convergencia iterativa. Sin embargo, la base

principal de la convergencia está en lograr minimizar el error de solución mediante un número determinado de iteraciones, y por otro lado, satisfacer con la igualdad en los modelos matemáticos planteados, con una diferencia mínima de error. Los detalles de este tema se encuentran en *NPARC Alliance CFD verification and Validation Web Site*, en la página titulada *Examining Iterative Convergence*.

I. Post-procesamiento para obtención de resultados

El post-procesamiento incluye la extracción de las propiedades del flujo (empuje, sustentación, resistencia, velocidad, turbulencia, etc.) deseadas del campo de flujo analizado y calculado computacionalmente.

J. Comparación de resultados

Las propiedades del flujo calculadas son posteriormente comparadas con resultados analíticos, computacionales, o estudios experimentales para establecer la validez de los resultados obtenidos.

K. Análisis de sensibilidad

La sensibilidad de los resultados obtenidos es examinada para comprender las posibles diferencias en la exactitud de los resultados y/o la realización de la simulación con respecto a parámetros como: dimensiones, condiciones del flujo, condiciones iniciales, estrategia de los pasos, algoritmos, topología y densidad de la malla, modelo de turbulencia, modelo químico, modelo de flujo, viscosidad, condiciones de frontera y sistema computacional. Se debe considerar realizar repeticiones en el proceso de simulación, hasta llegar a una sensibilidad satisfactoria de los parámetros antes mencionados.

L. Reporte de resultados

Etapa en la cual se reportan los resultados obtenidos en el análisis, incluyendo la descripción de los pasos antes mencionados. Con lo anterior se garantiza que un análisis mediante CFD, tenga un sustento teórico que garantice la fiabilidad y validez de los

resultados obtenidos en cualquier etapa de la simulación. Si bien, los pasos listados anteriormente son una guía para el desarrollo de un análisis mediante CFD, éstos son un fundamento válido y sugerido para lograr resultados que sean fieles representantes del fenómeno físico a simular.

2.6.3. Algoritmos numéricos CFD

Noblecilla-Palomino (2019) menciona que los modelos que utiliza CFD son estructurados alrededor de algoritmos numéricos que pueden abordar los problemas de flujo de fluido. Estos algoritmos son descritos en el diagrama de la figura 2.45.

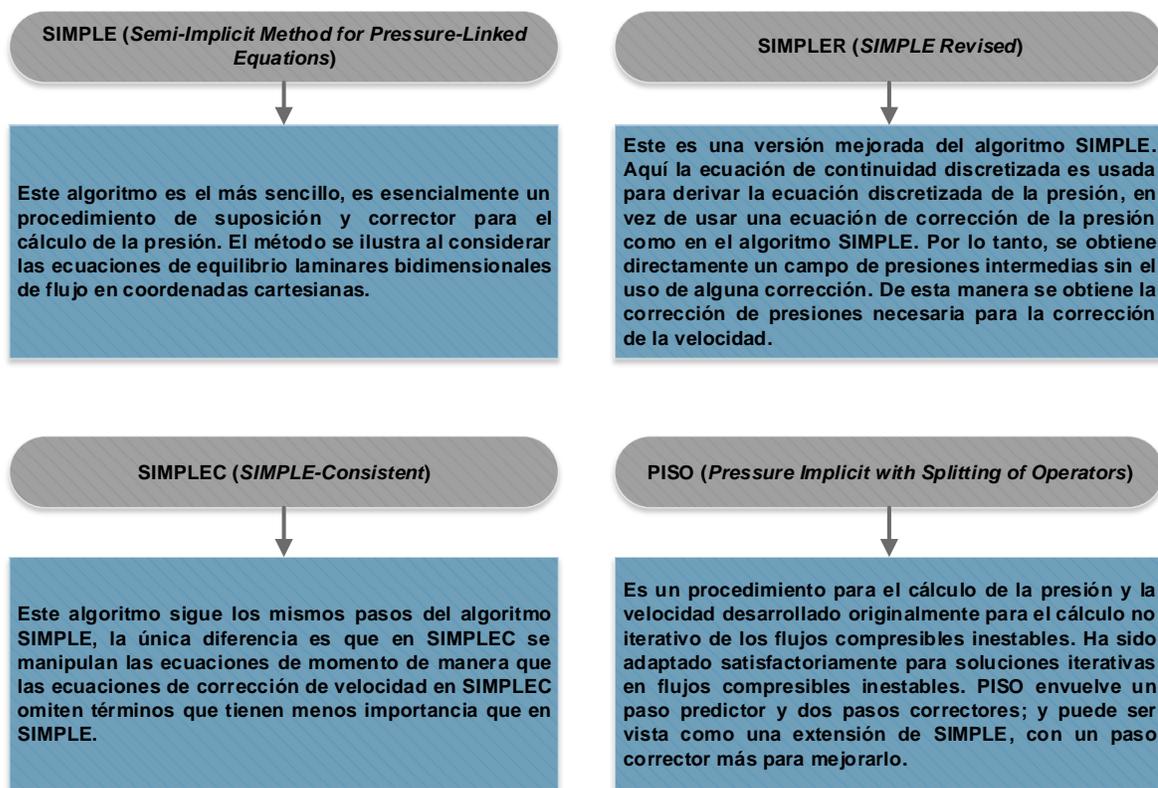


Figura 2.45. Algoritmos numéricos CFD. Adaptado con información de Noblecilla-Palomino (2019)

2.6.4. Modelos y ecuaciones de la dinámica de fluidos computacional

Los modelos de CFD están basados en las ecuaciones de conservación de masa, energía y momentum, las cuales se derivan de las ecuaciones de movimiento de Navier-Stokes. Siempre que el flujo presente un régimen turbulento, dichas ecuaciones deben ser

promediadas sobre un pequeño incremento de tiempo aplicando una descomposición de Reynolds, del cual se obtiene buenos resultados en ciertas ecuaciones y modelos que describen la energía de turbulencia presente en el flujo. La CFD se basa en dichas ecuaciones para predecir el comportamiento del flujo, considerando cualquier régimen en que se encuentre el mismo (López-Rebollar, 2015).

2.6.4.1. Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de la dinámica de fluidos de Navier-Stokes forman la teoría básica de la modelación mediante la CFD, las cuales son utilizadas para modelar los parámetros del flujo de un fluido, entre las cuales se encuentran la velocidad, temperatura y presión (López-Rebollar, 2015).

Las ecuaciones fundamentales del flujo de fluido son la ecuación de continuidad, las ecuaciones de momentum (ecuación de Navier Stokes) y la ecuación de energía (Kumar y Nagarajan, 2018). De acuerdo con López-Rebollar (2015) Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el movimiento de pequeñas regiones y/o volúmenes de fluido. Estas ecuaciones surgen de la aplicación de la segunda ley de Newton para el movimiento de fluidos, juntas con el supuesto de que los esfuerzos del fluido son la suma de un término difuso viscoso (proporcional al gradiente de velocidad), más un término de presión. La forma general de las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas cartesianas, para un flujo compresible es:

- *Ecuación de conservación de masa*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

- *Ecuación momentum (cantidad de movimiento) – Mx*

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2(u)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(u)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(u)}{\partial z^2}$$

- *Ecuación momentum (cantidad de movimiento) – My*

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial z^2}$$

- *Ecuación momentum (cantidad de movimiento) – Mz*

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2(w)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(w)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(w)}{\partial z^2}$$

Las componentes de estas ecuaciones representan:

Aceleración local + 3 términos de advección = gradiente de presión + 3 términos de difusión

- *Ecuación de la energía*

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

Las componentes de esta ecuación representan:

Aceleración local + 3 términos de advección = términos de difusión

Donde: x, y, z son los ejes del sistema coordenado. u, v y w son las componentes radial, tangencial y vertical de la velocidad. ρ es la densidad del fluido. p es la presión absoluta. T es la cantidad de calor del fluido. C_p es el calor específico del fluido. λ es la conductividad térmica y ν es la viscosidad cinemática del fluido.

López-Rebollar (2015) destaca que las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones diferenciales parciales acopladas y no lineales y están dentro de las ecuaciones mejor conocidas y más difíciles de las ciencias de la ingeniería. A partir de estas ecuaciones, se pueden obtener ecuaciones para casos especiales (flujo estacionario, bidimensional) omitiendo los términos adecuados.

2.6.4.2. Modelos de turbulencia

Para lograr la simulación en dinámica de fluidos computacional (CFD), se requieren en el lenguaje de programación del software ecuaciones que rigen el comportamiento de cada uno de los parámetros de un fluido (Noblecilla-Palomino, 2019).

Uno de los parámetros más característicos de los fluidos es la turbulencia, Bayona et al. (2015) expresan que las teorías matemáticas alrededor del modelado de fluidos fueron desarrolladas profundamente, pero aún no se había adquirido un modelado preciso para los fenómenos turbulentos debido a la complejidad del fenómeno.

López-Rebollar (2015) y Noblecilla-Palomino (2019) definen a la turbulencia como un comportamiento desordenado y caótico que depende del tiempo, presente en casi todos los flujos. Se cree que se origina debido a la inercia del fluido como un todo: la culminación de la dependencia del tiempo y aceleración convectiva. Por lo tanto, aquellos flujos que presentan efectos de inercia relativamente pequeños tienden a ser laminares; de ahí se

deriva el número de Reynolds, el cual cuantifica el efecto de las fuerzas inerciales sobre el flujo.

El software de dinámica de fluidos computacional ANSYS® ofrece las siguientes alternativas de análisis respecto a modelos de turbulencia (Bayona et al., 2015):

- Spallart – Allmaras
- K - ϵ (En sus variables RNG, Realizable y Standard)
- K - ω (En sus variables Standard, y SST)
- Transition SST
- K - $k\ell - \omega$
- Reynolds Stress
- SAS
- DES
- LES

Sin embargo, Noblecilla-Palomino (2019) agrupa estos modelos en tres distintas categorías: DNS, SRS y RANS.

i. DNS (Direct Numerical Simulation)

Modelo numérico de resolución completa de las ecuaciones de Navier – Stokes de todas las características de la turbulencia, en cualquier espacio y tiempo. El modelo DNS debe ser aplicado en geometrías muy simples y a bajos números de Reynolds, ya que para aplicaciones de ingeniería no podrán ser obtenidas soluciones numéricas de turbulencia en escalas con números relativos de Reynolds entre 10^4 y 10^9 .

ii. SRS (Scale Resolving Simulation)

Es un modelo mediante el cual una parte de todo el conjunto de la turbulencia es resuelto mediante métodos numéricos, y la otra parte es modelada por medio de RANS (Reynolds – Averaged Navier Stokes).. Se ha demostrado que los modelos RANS presentan grandes ventajas en simular flujos que se encuentran unidos a las paredes, mientras que los fluidos libres o combinados sin esfuerzos cortantes son una de sus desventajas principales.

Dentro de los modelos SRS encontramos los modelos LES, DES y SAS.

El modelo *LES (Large Eddy Simulation)* por sus siglas en inglés, es un modelo el cual no ha sido muy aceptado por la comunidad que se inclina por los problemas de ingeniería y se

ha mantenido como herramienta de investigación. El modelo LES igualmente requiere mallas muy finas, mayor número de iteraciones por tiempo y su procesamiento comparado con algún modelo RANS es muy superior.

El modelo DES es una alternativa para las simulaciones SRS. Este modelo está bajo la influencia de la resolución de la malla y contiene una formulación híbrida la cual permite que el software escoja entre un modelo SRS y un modelo RANS. Este modelo ha ganado peso en la comunidad debido a su capacidad para implementarse en aplicaciones de ingeniería con relativa facilidad.

El modelo SAS (*Scale - Adaptive Simulation*) es un modelo en el cual la densidad de la malla no afecta la formulación RANS. La simulación SAS le permite al modelo adaptarse de acuerdo con las condiciones de viscosidad Eddy. El modelo es capaz de reajustarse y proveer una formulación LES en secciones permitidas, pero así mismo en secciones donde las condiciones son propias de RANS, el modelo se mantiene bajo esas características.

iii. RANS (*Reynolds – Averaged Navier Stokes*)

Las ecuaciones RANS son la aproximación más antigua para la modelación de la turbulencia. Un conjunto promediado de las ecuaciones de continuidad y momentum de Navier-Stokes es resuelto, evitando calcular cada uno de los pequeños vórtices de turbulencia en todo el flujo. Esto es, al considerar términos promediados en función del tiempo de las ecuaciones de continuidad y momentum (en su forma conservativa), para el cálculo de las fluctuaciones turbulentas de un flujo incompresible en función de las velocidades medias, presiones medias, esfuerzos medios, etc., (descartando fluctuaciones instantáneas del flujo) se pueden calcular los procesos de turbulencia, mediante las ecuaciones llamadas RANS (López-Rebollar, 2015):

- *Ecuación de continuidad*

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

- *Ecuaciones de momentum*

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{u})}{\partial} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{u})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w}\bar{u})}{\partial z} \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\bar{u})}{\partial} + \frac{\partial}{\partial} \left(v \frac{\partial(\bar{u})}{\partial} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial(\bar{u})}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial(\bar{u})}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial} \left(v \frac{\partial(\bar{u})}{\partial} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial(\bar{v})}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial(\bar{w})}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial(\bar{u}'u')}{\partial} + \frac{\partial(\bar{v}'u')}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w}'u')}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{v})}{\partial} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w}\bar{v})}{\partial z} \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\bar{v})}{\partial} + \frac{\partial}{\partial} \left(v \frac{\partial(\bar{v})}{\partial} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial(\bar{v})}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial(\bar{v})}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial} \left(v \frac{\partial(\bar{u})}{\partial} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial(\bar{v})}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial(\bar{w})}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial(\bar{u}'v')}{\partial} + \frac{\partial(\bar{v}'v')}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w}'v')}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{w})}{\partial} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{w})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w}\bar{w})}{\partial z} \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\bar{w})}{\partial} + \frac{\partial}{\partial} \left(v \frac{\partial(\bar{w})}{\partial} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial(\bar{w})}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial(\bar{w})}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial} \left(v \frac{\partial(\bar{u})}{\partial} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial(\bar{v})}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial(\bar{w})}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial(\bar{u}'w')}{\partial} + \frac{\partial(\bar{v}'w')}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w}'w')}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

Donde \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} y \bar{p} son valores medios y \bar{u}' , \bar{v}' , \bar{w}' y \bar{p}' son fluctuaciones de turbulencia.

Puede notarse que las ecuaciones anteriores son similares a las de un flujo laminar, excepto

por la presencia de los términos de la forma $\overline{a'b'}$, que son los términos conocidos como

esfuerzos de Reynolds. Asociado a lo anterior Boussinesq (1868) (citado por López-Rebollar, 2015 y Tu et al., 2018) propuso que los esfuerzos de Reynolds pueden estar ligados a la tasa media de deformación, obteniendo así:

$$-\rho \overline{u'u'} = 2\mu_T \frac{\partial \bar{u}}{\partial} - \frac{2}{3} \rho k$$

$$-\rho \overline{v'v'} = 2\mu_T \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \frac{2}{3} \rho k$$

$$-\rho \overline{w'w'} = 2\mu_T \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} - \frac{2}{3} \rho k$$

$$-\rho \overline{u'v'} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)$$

$$-\rho \overline{u'w'} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)$$

$$-\rho \overline{v'w'} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right)$$

Donde:

μ_T : Viscosidad turbulenta [kg/m-s]

k : Energía cinética de turbulencia [J/kg]

De los términos expuestos, el lado derecho de cada ecuación es análogo a la Ley de Viscosidad de Newton, excepto por la aparición de los términos de turbulencia o viscosidad turbulenta μ_T y la energía cinética de turbulencia k . Al igual que las ecuaciones RANS, es posible desarrollar unas ecuaciones de transporte para adaptar la cantidad de turbulencia k y otros términos de turbulencia como la tasa de disipación de la energía de turbulencia ϵ . Con ello, Launder y Spalding (1974) (citado por López-Rebollar, 2015) propusieron el modelo estándar de turbulencia k - ϵ , utilizado comúnmente para el análisis de flujos turbulentos.

iv. Modelo de turbulencia k - ϵ

Existen diversos modelos de turbulencia basados en dos ecuaciones. Los más populares son el modelo k - ϵ y k - ω (K-Épsilon y K-Omega). Para el modelo k - ϵ , ϵ representa la tasa de disipación de la energía cinética de turbulencia dentro del sistema. Para el modelo k - ω , ω representa la relación entre la tasa de disipación de la energía cinética de turbulencia y la energía cinética de turbulencia, k .

Varios estudios han comprobado la eficacia del modelo k - ϵ aplicado a flujos circulares, flujos confinados con esfuerzos cortantes de Reynolds significativos, además de la poca demanda computacional y óptima convergencia para su solución. Por ello, dicho modelo fue el seleccionado y aplicado en la presente investigación, el cual consiste en las siguientes ecuaciones.

Modelo de turbulencia k - ϵ

$$(k) \quad \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v k)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w k)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right] + (P - D)$$

$$(\epsilon) \quad \frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu_T}{\sigma} \frac{\partial}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu_T}{\sigma} \frac{\partial}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_T}{\sigma} \frac{\partial}{\partial z} \right] + \bar{k}(C_1 P - C_2 D)$$

$$P = 2\mu_T \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu_T \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{2}{3}\mu_T \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 - \frac{2}{3}\rho\mu_T k \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

Donde:

$$D = \rho$$

$$k = \frac{1}{2} u'_i u'_i \quad \text{con } i = 1, 2, 3$$

$$\epsilon = u_T \overline{\left(\frac{\partial u'_i}{\partial j} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial j} \right)} \quad \text{con } i, j = 1, 2, 3$$

$$u_T = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon}$$

De las ecuaciones anteriores, k es la energía cinética; ϵ es la tasa de disipación de la energía cinética; μ coeficiente de viscosidad dinámica; μ_T viscosidad local de turbulencia; P y D son términos de producción y destrucción, respectivamente; σ y C son constantes ajustables, según datos experimentales propuestos por Launder y Spalding (1974) (citado por López-Rebollar, 2015). Este modelo se aplicó para predecir la energía cinética presente dentro del panel y de los componentes del sistema y así garantizar su aportación a los campos de velocidad para que estos fuesen representativos del comportamiento del flujo en el sistema propuesto de banquetas.

2.6.5. Modelo numérico computacional ANSYS-FLUENT

Como ya se mencionó en los apartados anteriores, los modelos numéricos de CFD proporcionan una eficiente herramienta para predecir el comportamiento de los fluidos. Para la presente investigación, se implementó el producto de simulación ANSYS-FLUENT.

ANSYS, Inc. (Swanson Analysis System, Inc.) crea en 1970 su primer software comercial, pero no fue hasta el 2006 que se convirtiera en unos de los líderes a nivel mundial en el desarrollo de software para simulaciones de fluidos con la compra de CFX-4 y FLUENT. Se ha encargado de desarrollar y adquirir diversos códigos numéricos, de tal forma que hoy en día cuenta con la capacidad de realizar simulaciones numéricas de fluidos, estructurales, electromagnéticas, térmicas, químicas, etc (ANSYS Inc, 2020).

ANSYS – Fluent es el software de simulación de fluidos líder en la industria que se utiliza para predecir el flujo de fluidos, la transferencia de calor y masa, reacciones químicas y otros fenómenos relacionados. Conocido por ofrecer las soluciones más precisas de la industria sin compromiso, las capacidades avanzadas de modelado de física de Fluent incluyen modelos de turbulencia de vanguardia, flujos multifásicos, transferencia de calor, combustión, optimización de formas, multifísica, entre otros (ANSYS Inc, 2020).

2.6.5.1. Módulo de ejecución

ANSYS – Fluent, así como otros modelos numéricos de CFD, basa su funcionamiento en un algoritmo que debe seguirse para su correcta ejecución. Dicho algoritmo se presenta en la figura 2.46.



Figura 2.46. Algoritmo o módulo de simulación en ANSYS – Fluent

el proceso de ANSYS – Fluent administra cada proyecto a través de su plataforma *Workbench* que optimiza los procesos de simulación. En la figura 2.47. se muestra la interfaz principal de la simulación para CFD.

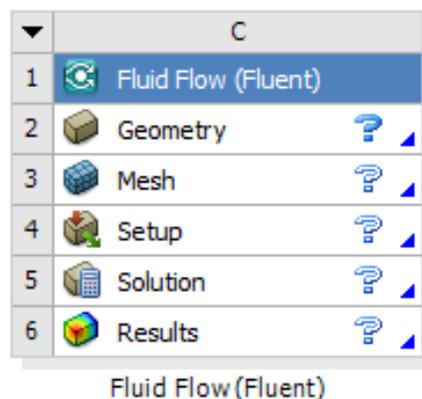


Figura 2.47. Esquema de gestión para la simulación en ANSYS – Fluent

2.6.5.2. Pre – proceso

Corresponde a la creación de la geometría concreta del sistema a simular; la discretización del dominio de cálculo (generación de malla); la definición de los aspectos físicos del problema (turbulencia, radiación, transferencia de materia y cantidad de movimiento, interacción entre fases, etc.); la definición de las condiciones iniciales y de contorno; y la definición de los parámetros del cálculo numérico (criterio de convergencia, intervalos de tiempo, etc.) (Noblecilla-Palomino, 2019).

a) Geometría

Dentro de sus productos, ANSYS ofrece una herramienta de dibujo de CAD en 2D y 3D llamado ANSYS – Design Modeler. Con dicho módulo se puede realizar la representación geométrica del sólido que se desea modelar y a partir de este se puede extraer el dominio del fluido sobre el cual se crea la discretización de la malla. Por otro lado, posee la opción de importar cualquier sólido o geometría en 2D o 3D de la mayoría de las paqueterías de dibujo, principalmente de SolidWorks y/o AutoCAD. Aunado a ello, una vez que se elige la opción de importar la geometría desde otro software de dibujo se puede detallar o mejorar cualquier aspecto del dibujo importado, a fin de tener un dominio cuya topología sea lo más amigable posible para realizar sobre ella el proceso de mallado (López-Rebollar, 2015).

b) Malla

Un módulo muy completo que posee la paquetería de ANSYS es la herramienta de mallado ANSYS – Meshing. Con este módulo se puede llevar a cabo la discretización del dominio a modelar. Esto por medio de la fragmentación del sólido en pequeños elementos llamados volúmenes finitos, los cuales pueden ser de tipo hexaédrico, prismático, tetraédrico y piramidal. Con la combinación de estas formas, se puede llevar a cabo la fragmentación de cualquier geometría, ajustando dichos elementos a la topología del dominio a modelar. La convergencia de los resultados depende de la calidad de la malla, es por ello que el módulo de ANSYS – Meshing propone diversas escalas y métodos para evaluar la calidad de los elementos que conforman la malla (López-Rebollar, 2015).

c) Setup

En general, los módulos CFD que ANSYS posee (FLUENT y CFX), se le conoce como *setup* al apartado donde se seleccionan los parámetros, ecuaciones, modelos y esquemas numéricos que se utilizan para llevar a cabo la simulación. En dicho apartado, FLUENT cuenta con diversas opciones de simulación, tales como esquema de solución (basado en

presión o basado en densidad), estado del flujo (estacionario o transitorio), modelos de turbulencia (κ - ϵ , κ - ω , Reynolds Stress, etc.), esquemas de solución (PRESTO, SIMPLE, SIMPLEC, etc.), grado de solución (1er Orden, 2do Orden, Implícito, Explícito, etc.), entre otros. Además, dentro de este módulo, se seleccionan los pasos de tiempo (time-steps) en los que se requiere llevar a cabo la solución, el número de iteraciones, etc. Esto según el fenómeno que se tenga, el poder computacional disponible y el grado de exactitud deseado (López-Rebollar, 2015).

2.6.5.3. Solución (proceso)

El apartado *solución* del módulo FLUENT es donde se monitorea el proceso de simulación, el cual reporta gráficamente los resultados por iteración y muestra la tendencia convergencia o divergencia de solución. Con ello se verifica la precisión de los parámetros que intervienen en el procedimiento. En el diagrama de la figura 2.48 se muestra el procedimiento para monitoreo de la solución propuesto por López-Rebollar (2015).

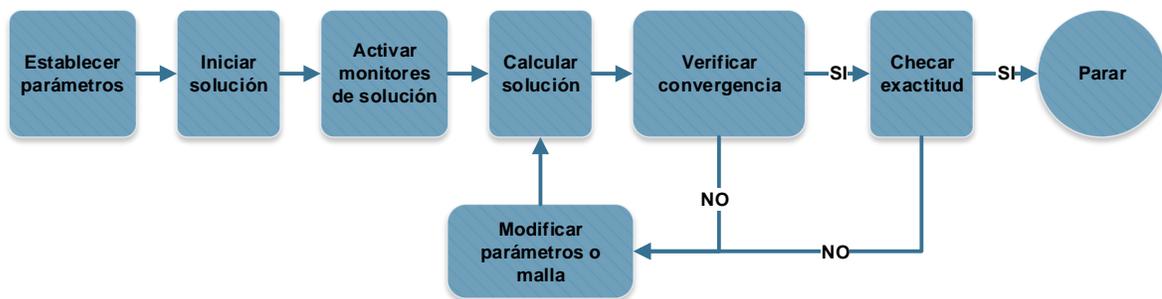


Figura 2.48. Procedimiento para el monitoreo de la solución (López-Rebollar, 2015)

2.6.5.4. Post – proceso

Finalmente, la paquetería de ANSYS cuenta con un módulo de post-procesamiento llamado ANSYS-Results, donde una vez obtenidos los resultados en FLUENT, estos pueden ser exportados a un visualizador de datos dentro de ANSYS-Results para poder ser interpretados mediante distintos gráficos. Esto facilita la comprensión del comportamiento de los campos de velocidad, turbulencia, presión, etc. Así mismo, los archivos de resultados arrojados por FLUENT pueden ser exportados bajo distintos formatos para el tratamiento de los datos mediante software como Excel, TecPlot, etc. (López-Rebollar, 2015).

2.7. FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS CON ELEMENTOS FINITOS

En este apartado se presentan los fundamentos teóricos para el análisis con elementos finitos (FEA) sobre los cuales se sustenta su implementación en el análisis estructural del panel fractal. Se describe el software utilizado y el entorno de aplicación, así mismo, se muestran las ecuaciones matemáticas sobre las que se basan los FEA y los esquemas numéricos que se utilizan para el análisis.

2.7.1. Generalidades

El método para el análisis con elementos finitos (FEA) es un método numérico ampliamente utilizado para el análisis de problemas lineales y no lineales, transitorios y permanentes de muchos ámbitos, principalmente, análisis de tensiones en el ámbito del cálculo de estructuras, transferencia térmica, electromagnetismo, entre otros. Todos ellos implican una dificultad de resolución por métodos analíticos debido a la complejidad de las ecuaciones diferenciales que intervienen, también por una geometría complicada que no permita establecer de manera correcta condiciones iniciales o de contorno. Si bien, este tipo de análisis no ofrece una solución exacta, si es posible obtener una solución aproximada con un nivel de precisión alto lo que hace al FEA uno de los métodos más eficientes para simular problemas del ámbito físico y tecnológico (Murillo Martínez, 2018).

El FEA consiste en crear una discretización de un dominio continuo en una serie de subdominios para reducir el número de puntos en los que se realiza un cálculo. A cada superficie finita en la que se divide el dominio se llama *elemento finito* y los puntos de confluencia de más de un elemento son los nodos a partir de los cuales se hallará la solución de las ecuaciones para cualquier punto del dominio continuo que conformará el cuerpo o pieza objeto de estudio (Murillo Martínez, 2018)

Con lo anterior, los conceptos básicos a entender y que intervienen en el análisis, de acuerdo con Murillo Martínez (2018), son dominio, elemento, condición de contorno, grado de libertad, nodo e incógnita. Cada uno se describe a continuación.

El *Dominio* es la región geométrica que conforma el sistema a estudiar y puede tratarse de una línea, un área o un volumen.

El *elemento* corresponde a cada uno de los subdominios que surgen de la partición de un dominio, a este proceso también se le conoce como discretización. Los elementos son fundamentales porque actúan como volúmenes de control donde se aplican las ecuaciones de comportamiento, equilibrio y compatibilidad. Existen tres tipos de elementos en función

de la dimensión del dominio: unidimensionales para dominios lineales, bidimensionales para áreas y tridimensionales si se trata de volúmenes.

Las *condiciones de contorno* son los valores de las variables que se establecen como constantes a lo largo de la evolución del sistema y por tanto limitan su comportamiento.

El *nodo* es el punto representativo de un elemento en el que confluyen dos lados de un elemento y que puede así mismo pertenecer simultáneamente a varios nodos. Son los puntos donde se establecen las ecuaciones a resolver y que permiten describir la evolución del elemento al aplicar las ecuaciones y condiciones de contorno que se establezcan. E conjunto de nodos conforman la malla cuyo tamaño refleja la distancia entre ellos.

El *grado de libertad* en el ámbito estructural, se define como el mínimo número de parámetros independientes necesarios para determinar la velocidad de un nodo.

Ventajas del uso de FEA

Las ventajas principales del uso de FEA se generalizan, de acuerdo con Murillo Martínez (2018), en:

- Reducción de costos en el diseño y la manufactura de productos ya que el número de ensayos de todo tipo al que se deben someter los productos se reduce drásticamente.
- Reducción de gastos en material.
- Posibilidad de analizar una gran variedad de modelos y soluciones, logrando una optimización del diseño en comparación con los métodos tradicionales.
- Adquisición de un conocimiento más preciso del comportamiento de cada punto de las piezas a nivel estructural.
- Determinación del coeficiente de seguridad para las piezas que se diseñan y la posibilidad de jugar con ese valor para la optimización de la geometría.
- Versatilidad al momento de analizar las piezas con una variedad de condiciones de contorno.
- Reducción en los tiempos de diseño.

Como ya se mencionó, el FEA no ofrece una solución real sino una aproximación lo suficientemente precisa como para dar por válidos los resultados que serán ratificados, una vez que se construya de manera definitiva el modelo físico.

2.7.2. Método y ecuaciones del análisis de elementos finitos

La aplicación del FEA se presenta cuando un sólido es sometido a unas cargas y condicionado a unas ligaduras, en este caso la variable dependiente es el campo de desplazamientos dentro del sólido. Dicho campo puede expresarse en función de los desplazamientos de los nodos que aparecen al obtener la malla del sólido continuo (ANSYS Inc, 2020; Murillo Martínez, 2018). La expresión que representa el modelo es la siguiente.

$$\bar{u}^e = \sum_{i=1}^{i=m} N_i^e(x, y) \cdot x_i^e = N^{eT} \bar{x}^e$$

Donde x_i^e es el desplazamiento del nodo i del elemento e y \bar{x}^e es el vector de desplazamientos nodales, formado por todos los desplazamientos de los nodos de un elemento. Así mismo \bar{u}^e es el vector desplazamiento del elemento e y como lo indica la expresión, se construye como combinación lineal de los desplazamientos de los nodos. N^{eT} es la matriz de forma del elemento.

Para comprender el método se replica un ejemplo planteado Murillo Martínez (2018) para el caso de una placa sometida a tensión donde se muestran de manera breve y concisa las ecuaciones que intervienen en el análisis FEA.

Para comenzar, se identifica que, el vector que proporciona el campo de desplazamientos dentro del elemento está compuesto por dos componentes y , como se ha visto, estos desplazamientos de los nodos presentes en dicho elemento a través de las funciones de forma.

$$\bar{u} = \begin{pmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{pmatrix} = N\bar{x}$$

A través de una relación de compatibilidad se construye el vector de deformaciones unitarias y se asocia a los desplazamientos nodales.

$$\bar{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \partial u / \partial x \\ \partial v / \partial y \\ \partial u / \partial y + \partial v / \partial x \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \partial / \partial x & 0 \\ 0 & \partial / \partial y \\ \partial / \partial y & \partial / \partial x \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = S\bar{u} = SN\bar{x} = B\bar{x}$$

La matriz S es una matriz operador y a su producto con la matriz de forma se le designa como B .

En general, para cualquier geometría, se obtienen las tensiones a partir de estas deformaciones unitarias a partir de la ecuación de Láme que se expresa como:

$$\vec{\sigma} = D(\vec{\varepsilon} - \vec{\varepsilon}_0) + \vec{\sigma}_0$$

$$\vec{\sigma} = (\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau_{xy})$$

Siendo D la matriz de elasticidad que alberga el módulo de Young y el coeficiente de Poisson del material.

Un sólido deformable sometido a un sistema de cargas estará en equilibrio cuando se encuentren en la posición que le otorgue un estado de energía mínimo. La energía potencial total (Π), es la diferencia entre la energía de deformación, U y el trabajo que realizan las fuerzas exteriores, W . Estas fuerzas exteriores pueden ser de un volumen, \vec{b} y de superficie, \vec{t} . Al aplicar la condición de mínimos, se tiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\partial W}{\partial x} = 0$$

Que es la condición de equilibrio que rige el comportamiento elástico.

$$U = \frac{1}{2} \iiint_V \vec{u}^T \vec{\sigma} dV = \frac{1}{2} \left(\iiint_V \vec{\varepsilon}^T D \vec{\varepsilon} dV - \iiint_V \vec{\varepsilon}^T D \vec{\varepsilon}_0 dV + \iiint_V \vec{\varepsilon}^T \vec{\sigma} dV \right)$$

$$W = \iiint_V \vec{u}^T \vec{b} dV + \iint_A \vec{u}^T \vec{t} dA$$

Con las aproximaciones que otorga el FEA se tiene que:

$$U = \frac{1}{2} \left(\iiint_V \vec{x}^T B^T DB \vec{x} dV - \iiint_V \vec{x}^T B^T D \vec{\varepsilon}_0 dV + \iiint_V \vec{x}^T B^T \vec{\sigma}_0 dV \right)$$

$$W = \iiint_V \vec{x}^T \vec{N}^T \vec{b} dV + \iint_A \vec{x}^T \vec{N}^T \vec{t} dA$$

De la condición de mínimo de energía potencial se llega por tanto a establecer las ecuaciones de equilibrio.

$$\iiint_V \vec{B}^T DB \vec{x} dV - \iiint_V \vec{B}^T D \vec{\varepsilon}_0 dV + \iiint_V B^T \vec{\sigma}_0 dV - \iiint_V \vec{N}^T \vec{b} dV - \iint_A \vec{N}^T \vec{t} dA = 0$$

$$\iiint_V \vec{B}^T DB \vec{x} dV = \underbrace{\iiint_V \vec{B}^T D \vec{\epsilon}_0 dV}_{\text{Fuerzas por deformaciones iniciales}} - \underbrace{\iiint_V B^T \vec{\sigma}_0 dV}_{\text{Fuerzas debido a tensiones}} + \underbrace{\iiint_V \vec{N}^T \vec{b} dV}_{\text{Fuerzas distribuidas en volumen}} + \underbrace{\iint_A \vec{N}^T \vec{t} dA}_{\text{Fuerzas distribuidas en superficie}}$$

$$\underbrace{\hspace{15em}}_{\vec{F}}$$

$$\iiint_V B^T DB dV = K$$

También puede llegarse al resultado a través de la aplicación directa del Principio de los Trabajos Virtuales (PTV) y la expresión que queda, relaciona las fuerzas aplicadas tanto exteriores como por ligaduras.

$$\vec{F} = K\vec{x}$$

Donde K es la matriz de rigidez y \vec{F} es el vector de fuerzas que agrupa las fuerzas externas tanto las aplicadas directamente como las reacciones provocadas por las ligaduras. El cálculo de la matriz de rigidez constituye el punto clave de FEA.

Quedan por tanto expuestas las tres ecuaciones que gobiernan el comportamiento elástico, válidas para cada elemento y para toda la estructura y su resolución es el objetivo del FEA.

- Ecuaciones de comportamiento → Ecuaciones de Lamé
- Ecuaciones de equilibrio → condición de mínimo de energía o PTV
- Ecuaciones de compatibilidad → Relación entre deformaciones y desplazamientos

2.7.3. Modelo FEA – ANSYS

La herramienta ANSYS ofrece una gran ventaja al momento de realizar un FEA frente a otras herramientas del mercado. Una de ellas, es un cálculo más preciso en el mallado para controlar el tipo y tamaño de elemento. El refinamiento de la malla es igualmente muy superior en ANSYS con respecto a otros softwares (Murillo Martínez, 2018).

Con la implementación de ANSYS u otras herramientas con FEA, se modifica el proceso tradicional de producción. En la figura 2.49 se muestra el proceso tradicional que se implementa cuando se desarrolla un producto.

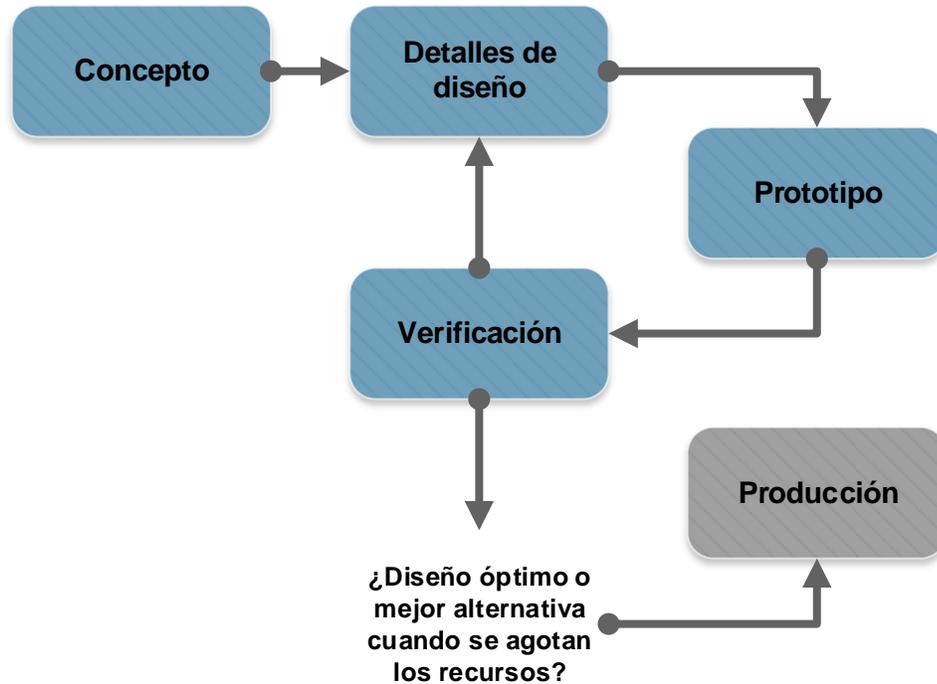


Figura 2.49. Proceso tradicional de Desarrollo de un producto. Adaptado de Murillo Martínez (2018)

Cuando se implementa el uso de FEA, se pasa de la fase conceptual directamente al análisis mediante el software de elementos finitos que corresponda en cada caso, como ANSYS. Una vez analizado y optimizado el diseño, se construye un prototipo que pasara a la fase de evaluación para verificar y puesto en la línea de producción. En la figura 2.50 se muestra el proceso de desarrollo de un producto implementando el FEA.

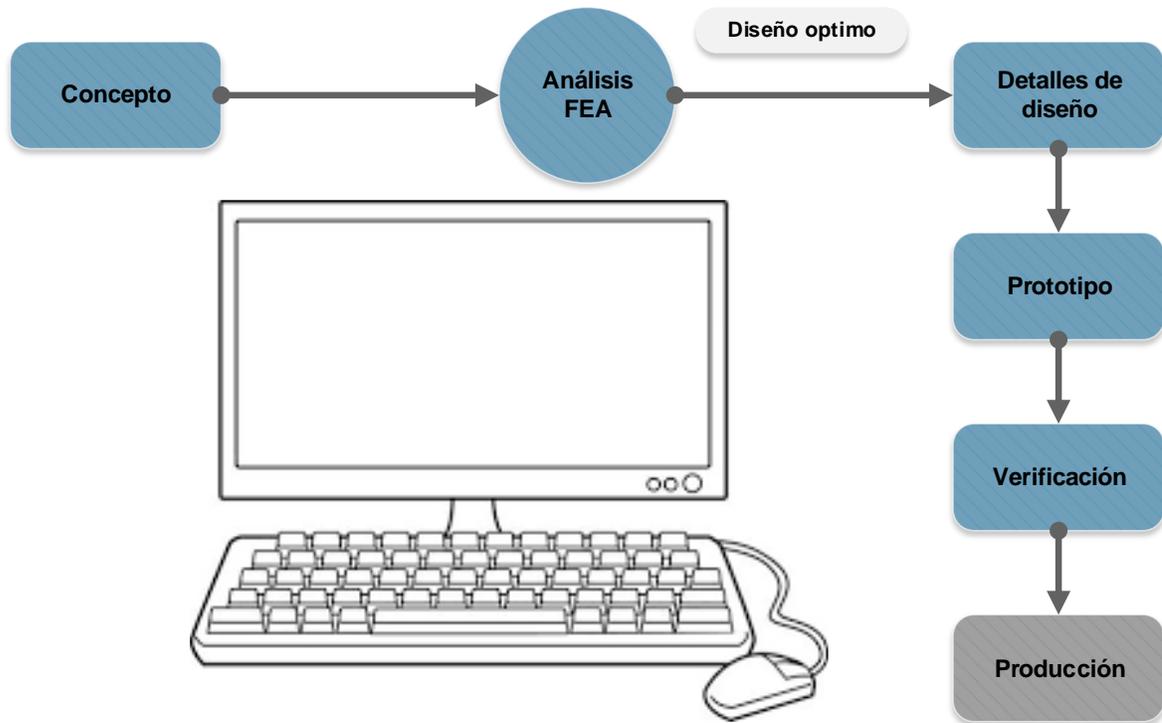


Figura 2.50. Proceso de desarrollo de un product usando FEA. Adaptado de Murillo Martínez (2018)

Comparando los dos procesos mostrados en las figuras 2.49 y 2.50, se identifica que el proceso tradicional representa costos muy altos al necesitar construir varios prototipos debido al proceso iterativo de verificación. En cambio, el uso de FEA baja significativamente los costos además de que permite conocer el comportamiento del producto mucho antes de que llegue al mercado.

2.7.3.1. Módulo de ejecución

El software ANSYS, para todos sus módulos, administra el proceso de implementación a través de su esquema principal *Workbench*. El módulo que se implementa para el análisis estructural es *Static Structural*, en la figura 2.51 se muestra el esquema de trabajo del módulo.

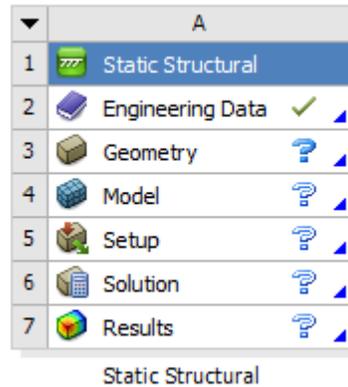


Figura 2.51. Esquema de gestión para la aplicación de FEA

2.7.3.2. Pre – proceso

En el pre – proceso se llevan a cabo tres acciones fundamentales;

- **Creación de la geometría que conformará los límites del dominio para el análisis de elementos finitos.**

La creación de la geometría se puede realizar dentro del módulo de *Modeling* o bien, en geometrías complejas, se puede importar modelos generados en softwares de diseño a través de formatos compatibles con ANSYS como *.sat.

- **Asignación de tipo de modelo que se usará en el análisis de elementos finitos.**

La asignación de los elementos del modelo puede ser variado dependiendo el problema a evaluar. Algunas tipologías para elementos que tiene ANSYS en el ámbito estructural tridimensional, en función del análisis, son:

- **Link:** sólo soportan cargas aplicadas en forma longitudinal (esfuerzos axiales), se utilizan en estructuras sometidas únicamente a tracción y compresión.
- **Beam:** elementos longitudinales que pueden soportar esfuerzos axiales, pero también esfuerzos cortantes, momentos flectores y torsionantes.
- **Shell:** son elementos en los que dos dimensiones prevalecen frente a la tercera. Se utilizan para simbolizar membranas y laminas que pueden trabajar en dos o tres dimensiones.
- **Plane:** son elementos planos que sólo trabajan en dos dimensiones.

- **Contact:** elementos que simulan soldaduras y fuerzas de rozamiento con diversas características.
- **Mass:** simulan masas puntuales.
- **Solid:** elementos usados en estructuras sólidas de tres dimensiones. Presentan efectos de plasticidad, rigidez, hipótesis de grandes deformaciones.

- **Creación y asignación del material al modelo**

En esta etapa se introducen valores de las características estructurales del material. El software contiene una base de datos con especificaciones de diversos materiales. En este apartado se asignan características mecánicas como el módulo de Young, coeficiente de Poisson, densidad y características propias de comportamientos no lineales, además, para algunos casos se definen características como la expansión térmica entre otras.

2.7.3.3. Solución (proceso)

En esta fase se define el tipo de análisis que se lleva a cabo, éste puede ser un análisis estático, modal, transitorio, etc. También se aplican las cargas que actuarán, se imponen los desplazamientos y se establecen pasos de carga.

Por último, se lleva a cabo la configuración del solucionador que se puede dividir en tres fases de cálculo diferenciadas (Murillo Martínez, 2018):

- Creación de las matrices de elementos y las matrices de ensamblado a partir de los grados de libertad y condiciones de contorno impuestas.
- Resolución de los sistemas de ecuaciones surgidos a partir de las matrices halladas, de la cual se obtendrán los desplazamientos de cada nodo.
- Cálculo de cantidades derivadas tales como esfuerzos y tensiones.

2.7.3.4. Post – proceso

El programa ANSYS cuenta con un módulo de post-procesamiento llamado ANSYS-Results, donde una vez obtenidos los resultados, éstos pueden ser exportados a un visualizador de datos dentro de ANSYS-Results para poder ser interpretados mediante distintos gráficos. Esto facilita la comprensión del comportamiento de los campos de velocidad, turbulencia, presión, etc. Así mismo, los archivos de resultados arrojados por ANSYS pueden ser exportados bajo distintos formatos para el tratamiento de los datos mediante software como Excel, TecPlot, etc. (López-Rebollar, 2015).

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se describen los principios, métodos y materiales que fundamentan el diseño de la geometría fractal hexagonal y que permitieron establecer el dimensionamiento y análisis estructural e hidráulico del panel. Así mismo, se describen los procedimientos que se implementaron para simular la propuesta en el software de dinámica de fluidos computacionales (CFD) con el que se validó el diseño correcto del panel.

3.1. DISEÑO DE LA GEOMETRÍA FRACTAL

De acuerdo con la normatividad, las banquetetas deben contar con un ancho mínimo requerido de 1.0 m, por lo que las dimensiones del panel se ajustan a dicho valor mínimo. Se ha considerado 0.30 m de espacio que puede ser utilizado por mobiliario y/o vegetación (aunque en estricto modo no es conveniente la colocación de mobiliario de dimensiones grandes o vegetación), contando con un ancho en la franja peatonal de 0.70 m y teniendo en cuenta los componentes propios del sistema, se ha tomado una dimensión mínima efectiva de 0.60 m para la implementación del panel.

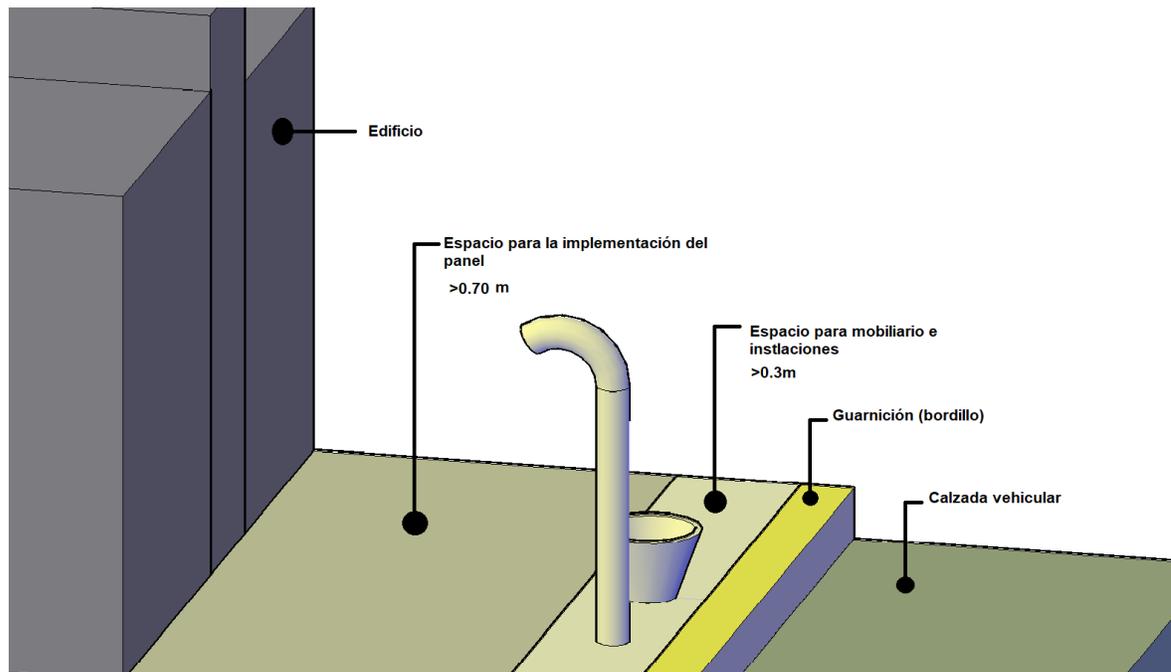
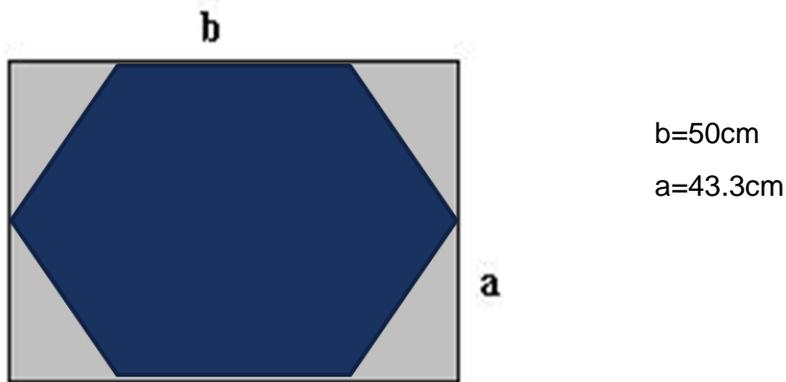


Figura 3.1. Dimensiones mínimas propuestas para la implementación del panel.

En una primera aproximación, se propuso que el panel tuviera una dimensión mínima de 30x60cm (relación 1 a 2), sin embargo, la configuración de un hexágono regular no era posible, por lo que se calculó la razón geométrica para un rectángulo que contenía un hexágono de 25 cm de lado.



Calculando la relación entre a y b, se obtuvo:

$$\frac{b}{a} = 1.154707$$

Ajustando la longitud de $b=30\text{cm}$, se obtuvo:

$$\frac{b}{1.154707} = a = 25.98\text{cm}$$

Se propuso que el panel se conforme de por lo menos dos hexágonos principales, las dimensiones finales son: 30x52cm

En el estudio realizado por Mousanezhad et al. (2015) recomiendan que el orden de similitud para las estructuras fractales hexagonales puede estar entre el orden 3 o 4, por lo que el panel desarrollado en este proyecto se comenzará con un orden 3.

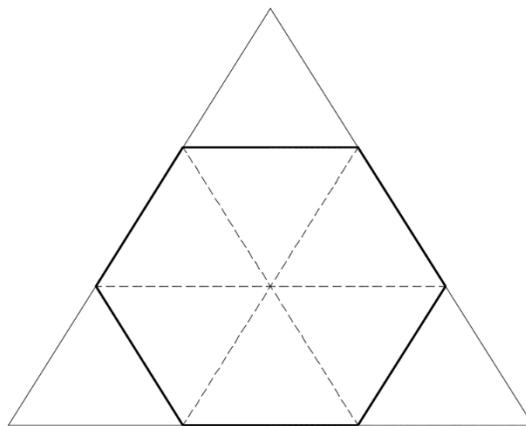


Figura 3.2. Generación de fractales hexagonales

Los fractales hexagonales resultaron de la siguiente forma:

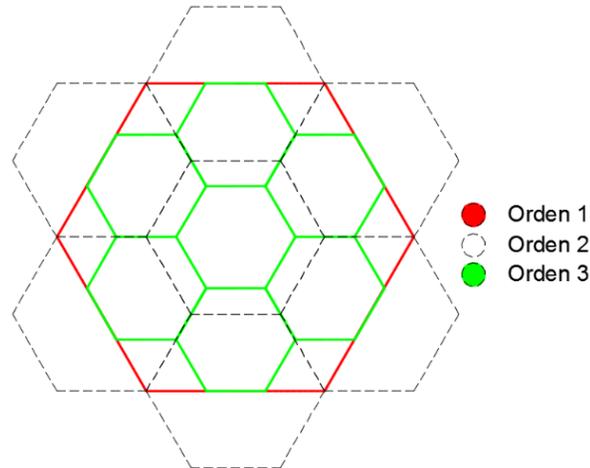


Figura 3.3. Generación de fractales hexagonales hasta orden 3

Las dimensiones de cada orden han sido propuestos de acuerdo con lo planteado por Galicia (2018).

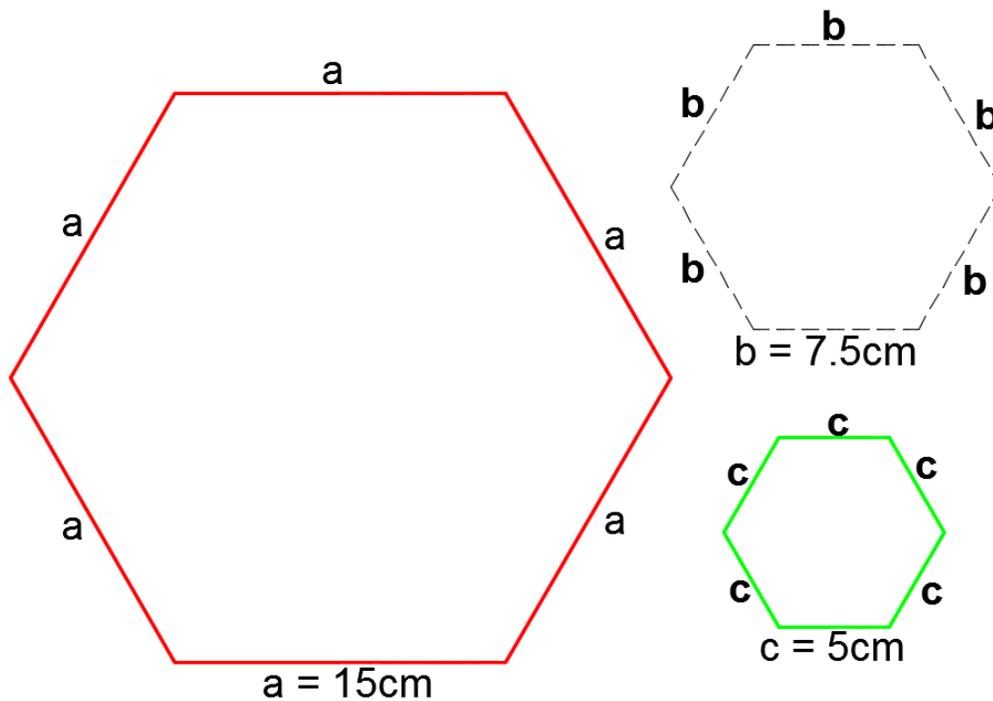


Figura 3.4. Dimensiones de las figuras fractales de orden 1, 2 y 3.

El panel conformado quedo integrado como se muestra en la figura 3.5.

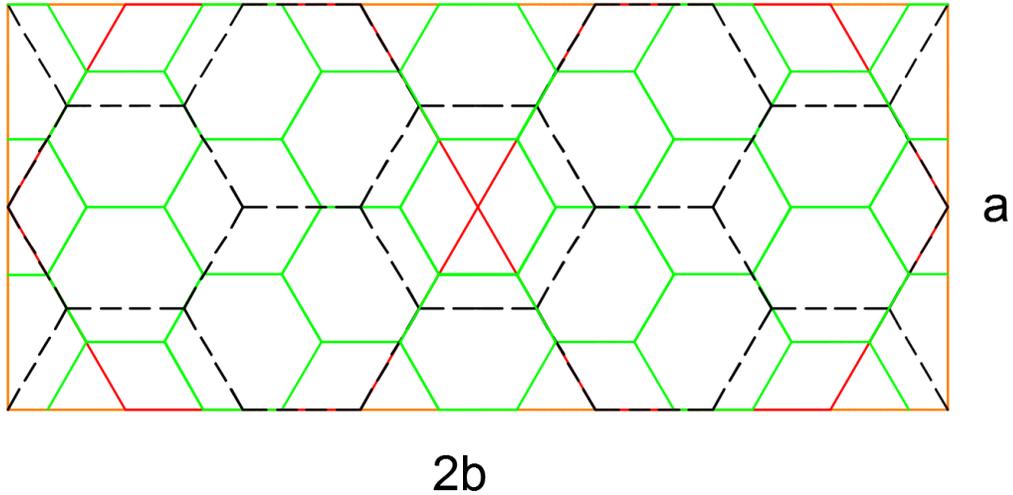


Figura 3.5. Configuración final del panel

De esta manera se obtuvo un panel de 60x30x30 cm para las banquetas retenedoras de agua. El dimensionamiento final del panel se muestra en el siguiente capítulo.

3.2. APLICACIÓN DE FEA PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Para determinar la eficiencia estructural del panel se utilizó la herramienta de análisis estructural del software ANSYS-Static Structural[®] que implementa el análisis a través de elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés).

3.2.1. Escenario propuesto de armado para el análisis estructural del panel

Una vez determinado el dimensionamiento del panel se realizó el análisis estructural a través de simulaciones con FEA. El escenario propuesto para analizar fue establecido aplicando rangos de cargas en todas las caras del panel desde los 100 kg/cm² hasta los 1000 kg/cm² que sirvieron para determinar la deformación total, tensiones y esfuerzos cortantes en las conexiones y el esfuerzo normal a los que se somete cada panel. Se generaron un total de 20 simulaciones que permitieron obtener la gráfica esfuerzo-deformación del panel, determinando así la capacidad estructural del mismo.

El escenario simulado de armado se muestra en la figura 3.6.

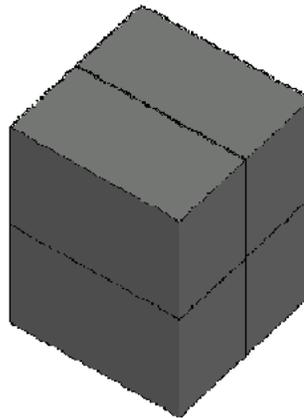


Figura 3.6. Escenario de análisis estructural según acomodo

3.2.2. Proceso general de análisis en herramienta FEA

Como ya se mencionó, la etapa de simulación estructural se llevó a cabo en herramientas con FEA que implementa el software ANSYS-Static Structural[®] y a continuación se describe el proceso realizado para efectuar la simulación.

El proceso de ANSYS administra cada proyecto a través de su plataforma *Workbench* que optimiza los procesos de simulación. En la figura 3.7. se muestra la interfaz principal de la simulación.

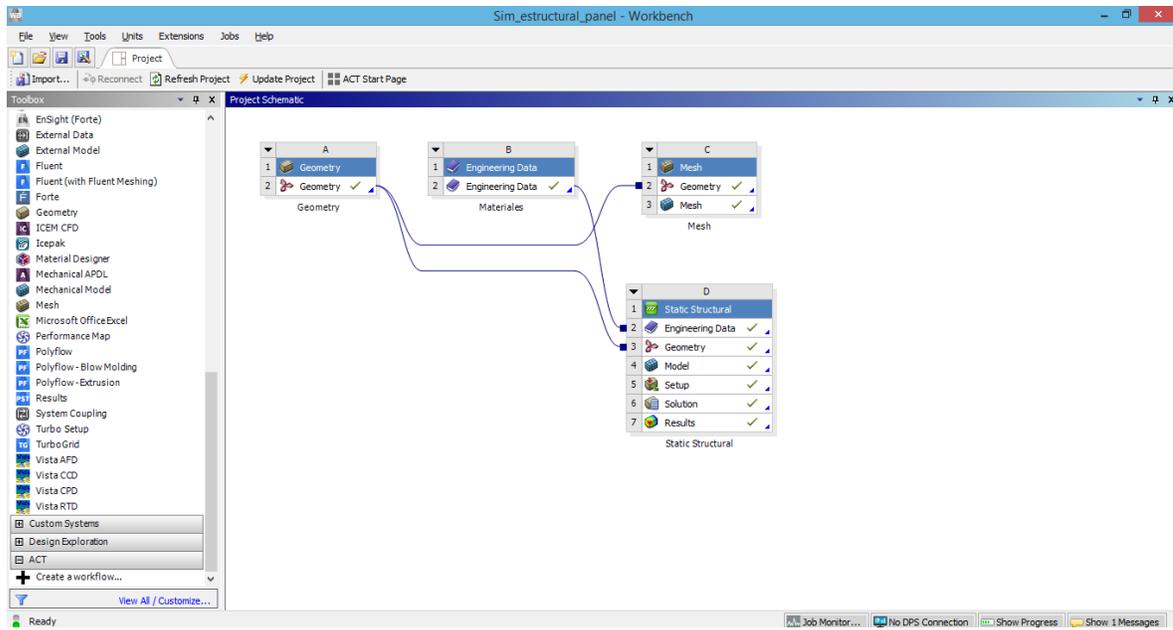


Figura 3.7. Esquema de trabajo Workbench para FEA

A continuación, se describe el proceso de simulación de acuerdo con el esquema de trabajo de ANSYS-Workbench.

a) Datos de ingeniería

Corresponde a los datos y características del material que compone a la estructura a simular. El software incluye una librería con datos y especificaciones de materiales y para el caso del panel se seleccionó el material Polipropileno (PP) con las especificaciones de la figura 3.8.

Properties of Outline Row 3: Polypropylene (PP)			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	902	kg m ⁻³
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
4	Coefficient of Thermal Expansion	0.000103	C ⁻¹
5	Isotropic Elasticity		
6	Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
7	Young's Modulus	9.15E+08	Pa
8	Poisson's Ratio	0.443	
9	Bulk Modulus	2.6754E+09	Pa
10	Shear Modulus	3.1705E+08	Pa
11	Tensile Yield Strength	2.62E+07	Pa
12	Tensile Ultimate Strength	2.99E+07	Pa
13	Isotropic Thermal Conductivity	0.195	J m ⁻¹ s ⁻¹ C ⁻¹
14	Specific Heat, C _p	1680	J kg ⁻¹ C ⁻¹
15	Isotropic Resistivity	1.47E+15	ohm m

Figura 3.8. Propiedades del PP.

b) Geometría

Los modelos tridimensionales de los escenarios simulados fueron creados con la herramienta de dibujo AutoCAD-3D Modeling® y posteriormente exportados en el formato *.sat aceptado por ANSYS.

c) Malla

Para el proceso mallado se utilizó la herramienta de mallado ANSYS-Meshing con elementos de orden lineal con tamaños de 0.05 mm. Se realizó un refinamiento en las uniones principales automático por parte del software con transición lenta y una suavidad baja.

d) Set-up y solución

Las condiciones de simulación constaron de considerar a una de las caras de los modelos a simular como soporte fijo y las caras restantes como las que reciben las presiones de carga y cuya asignación se realizó considerando cargas uniformemente distribuidas. Las asignaciones de carga representan la condición más crítica para el panel, ya que fue sometido a cargas en todas sus caras. Las soluciones obtenidas fueron la deformación total, tensión total, esfuerzo cortante y esfuerzo normal.

Los resultados obtenidos de cada simulación se procesaron y analizaron con ayuda de hojas de cálculo en Microsoft Excel® que permitió la construcción de las curvas esfuerzo-deformación.

3.3. CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL SISTEMA

3.3.1. Caso de estudio

Para obtener los parámetros adecuados que permitieran la validación del sistema propuesto, se eligió como área de estudio una cuenca urbana de la cual se determinaron sus características hidrológicas para identificar los escurrimientos en eventos pluviales.

3.3.1.1. Ubicación de la zona

Se eligió el área que se encuentra entre Paseo Tollocan y las intersecciones con el Paseo Vicente Guerrero y el Paseo Universidad cercano a la Ciudad Universitaria en el municipio de Toluca Estado de México. En la figura 3.9 se muestra la ubicación geográfica de la zona de estudio seleccionada, la cual cuenta con una superficie aproximada de 36.65 hectáreas.



Figura 3.9. Ubicación de la zona de estudio

3.3.1.2. Definición de la cuenca urbana

Para realizar la caracterización de la zona de estudio y definir adecuadamente el comportamiento de los escurrimientos en cuencas urbanas, se siguió la metodología marcada por el Manual de Alcantarillado de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento

(MAPAS) de la Comisión Nacional del Agua, la cual describe el proceso para definir las cuencas urbanas atendiendo los siguientes puntos.

- *Sobreponer el plano catastral al plano topográfico, ambos deben estar en la misma escala y orientados adecuadamente.*

Este paso se realizó con el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) correspondiente a la ciudad de Toluca disponible en la base de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y que fue procesados con ayuda de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

- *Identificar en las curvas de nivel los puntos con elevación más alta y unirlos a través de la línea del parteaguas.*

Con el SIG se obtuvieron las curvas de nivel a cada 10 metros.

- *Cuando las líneas trazadas crucen las manzanas, se deberá tomar en consideración hacia qué punto de la calle las construcciones evacuarán el agua pluvial, de esta manera, se considera la influencia de la planimetría en la definición de las subcuencas*

Una vez definida la topografía y considerando la traza urbana se realizó el trazo de subcuencas de manera manual que dio lugar a la definición de las líneas de corriente.

3.3.1.3. Parámetros de la cuenca

a) Área y longitud de la red

Por las características de estudio fue necesario definir parámetros básicos. El área y longitud de la red fueron calculadas a través del SIG, el ancho de la cuenca se obtuvo como la relación entre el área y la longitud al ser consideradas microcuencas con forma aproximada a un rectángulo.

b) Pendiente

La pendiente de una cuenca, subcuenca o microcuenca puede calcularse como el desnivel entre los extremos de la corriente dividida entre su longitud medida en planta a través de la expresión recomendada por el MAPAS (CONAGUA,2016).

$$S_{1c} = \frac{\Delta H_{cauce}}{l_{T1c}}$$

Donde:

S_{1c} = Pendiente de la línea del cauce [adimensional]

ΔH_{cauce} = Desnivel entre los extremos del cauce [m]

l_{T1c} = Longitud total de la línea del cauce proyectada en el plano horizontal [m]

c) Tiempo de concentración

El tiempo de concentración para un punto dado, que se define como el tiempo que tarda una gota de agua en viajar desde el punto más alejado de la cuenca hasta la salida de esta, fue estimado con la expresión propuesta por Kirpich (Aparicio, 2012).

$$t_{cs} = 0.0003245 \left(\frac{l_t}{\sqrt{S_{1c}}} \right)^{0.77}$$

Donde:

t_c = Tiempo de concentración sobre la superficie [horas]

l_t = Longitud del cauce principal [m]

S_{1c} = Pendiente de la cuenca [m]

Cabe destacar que el tiempo de concentración mínimo en cuencas urbanas no debe ser menor a 5 min, por lo que se debe ajustar en cuencas con un menor tiempo de concentración (CONAGUA, 2016).

d) Coeficiente de escurrimiento

La tabla 3.1, presenta valores del coeficiente de escurrimiento de acuerdo con las características de la superficie. Los valores son recomendados por el MAPAS para tormentas con 5 y 10 años de periodo de retorno.

Tabla 3.1. Valores del coeficiente de escurrimiento recomendados por CONAGUA (2016)

Tipo de área drenada	Coeficiente de escurrimiento	
	Mínimo	Máximo
Zonas comerciales		
Zona Comercial	0.75	0.95
Zonas mercantiles	0.7	0.9
Vecindarios	0.5	0.7
Zonas residenciales		
Unifamiliares	0.3	0.5
Multifamiliares espaciados	0.4	0.6
Multifamiliares compactos	0.6	0.75
Semiurbanas	0.25	0.4
Casas habitación	0.5	0.7
Zonas industriales		
Espaciados	0.5	0.8
Compacto	0.6	0.9
Cementerios y parques	0.1	0.25
Campos de juego	0.2	0.35
Patios de ferrocarril y terrenos de construir	0.2	0.4
Zonas suburbanas	0.1	0.3
Calles		
Asfaltadas	0.7	0.95
De concreto hidráulico	0.8	0.95
Adoquinadas o empredadas juntas con cemento	0.7	0.85
Adoquin sin juntar	0.5	0.7
Terracerías	0.25	0.6
Estacionamientos	0.75	0.85
Techados	0.75	0.95

De acuerdo con el uso de suelo de la zona, corresponden a cuencas casi totalmente urbanizadas por lo que se eligió aplicar un porcentaje de impermeabilización del 95%.

3.3.1.4. Análisis hidrológico de la cuenca

Una vez definida el área a gestionar, el siguiente paso fue identificar los datos disponibles de las estaciones cercanas a la zona de estudio para realizar un análisis de las precipitaciones en la zona de estudio que permite conocer la respuesta hidrológica actual.

En este trabajo se aplicó el programa de cómputo libre EPA SWMM® (EPA, 2020) para la definición del hidrograma de diseño, con el cual es posible caracterizar la variación de la precipitación a lo largo de su tiempo de duración.

El programa tiene un módulo de simulación que permite estimar un hidrograma a la salida de una cuenca, tomando como punto de partida un hietograma y las características hidrográficas de la cuenca como son:

- Área
- Ancho medio de la cuenca
- Pendiente media
- Porcentaje de área impermeable
- Coeficiente de escurrimiento

La información pluviométrica para la zona de estudio se utilizaron las curvas intensidad – duración – periodo de retorno (I-D-Tr) para periodos de retorno de 2, 5, 10 y 15 años que se obtuvieron en conjunto con el Ing. Juan Manuel Becerril Lara en el proyecto que desarrolló paralelamente al presente trabajo. La información corresponde a la estación del Observatorio Meteorológico “UAEM-Mariano Bárcena 15367”.

La información procesada del análisis de los registros pluviométricos se muestra en la tabla 3.2, en ella se observan las intensidades de precipitación máximas anuales para diferentes duraciones estándar en el periodo comprendido de 1990-2018 y las curvas obtenidas se muestran en la figura 3.10.

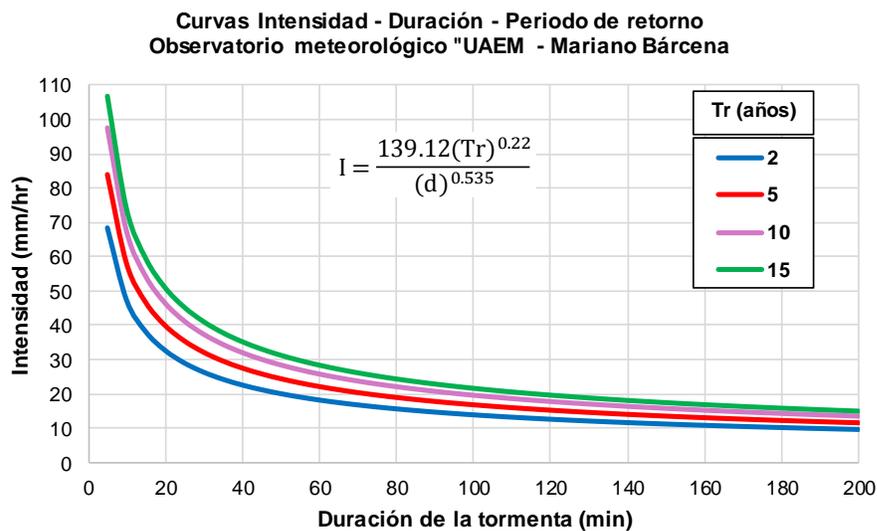


Figura 3.10. Curvas IDTr Observatorio meteorológico UAEM – Mariano Bárcena

Tabla 3.2. Intensidades anuales registradas del Observatorio Mariano Bárcena

AÑO	Duraciones en minutos									
	5	10	15	20	30	45	60	80	100	120
1990	92.83	89.99	77.06	63.19	47.47	39.91	31.33	25.15	21.54	19.18
1991	69.12	56.64	48.00	39.54	28.72	21.68	17.32	13.59	11.46	10.65
1992	86.40	73.20	56.80	50.40	42.40	35.52	30.74	23.54	19.07	16.00
1993	76.80	81.60	78.80	66.12	53.80	43.07	33.13	25.17	20.22	17.77
1994	38.40	43.20	44.80	45.60	46.40	46.93	47.20	37.82	30.61	25.81
1995	38.40	27.60	28.40	28.80	29.20	29.47	22.60	16.95	14.28	12.81
1996	38.40	43.20	44.80	45.60	45.60	31.33	23.50	17.63	14.10	11.75
1997	48.96	50.76	50.64	40.98	28.12	23.47	23.60	22.68	18.86	15.75
1998	28.80	32.40	33.60	34.20	33.68	23.47	21.24	18.90	15.12	14.48
1999	100.80	63.00	51.60	43.50	36.40	29.89	23.60	18.19	15.40	13.00
2000	67.20	54.00	39.60	33.54	27.20	22.67	20.70	15.93	13.13	12.10
2001	91.20	57.00	56.40	50.55	38.20	30.17	24.72	18.85	15.20	13.90
2002	96.00	66.60	56.00	49.80	41.60	35.47	30.18	22.92	18.82	16.08
2003	48.00	54.00	40.54	34.20	34.80	24.53	23.60	23.70	19.20	16.00
2004	62.40	70.20	71.20	57.00	38.00	31.68	29.94	23.36	19.40	16.77
2005	96.00	61.92	42.88	33.36	31.40	22.88	18.50	15.21	12.72	11.10
2006	48.00	39.60	33.60	29.40	31.20	23.52	17.80	13.43	10.74	9.50
2007	28.80	32.40	32.00	26.22	18.84	13.23	11.48	9.38	8.88	8.95
2008	43.20	46.20	43.60	42.60	42.80	38.13	34.60	28.59	22.92	19.10
2009	28.80	32.40	33.60	31.80	27.60	22.93	18.90	15.42	13.52	11.64
2010	34.56	25.56	25.20	21.54	20.30	20.53	20.37	20.06	16.92	14.60
2011	96.00	79.20	62.40	48.00	39.20	37.07	36.60	31.43	26.34	22.45
2012	124.80	78.00	52.00	39.60	29.60	26.13	24.80	23.04	20.59	18.96
2013	76.80	56.40	43.20	37.20	34.80	29.07	23.80	20.55	16.64	14.51
2014	105.60	85.20	63.20	50.40	39.20	29.20	23.40	19.05	15.64	13.12
2015	96.00	75.60	62.40	50.40	46.80	39.47	32.80	26.41	21.42	18.09
2016	96.48	60.54	40.56	30.57	24.00	21.33	16.70	14.17	12.24	11.55
2017	91.20	58.20	43.60	45.60	32.00	34.19	26.20	19.73	15.78	13.15
2018	48.48	42.00	37.20	30.30	21.96	16.75	15.05	14.94	14.36	12.92

Con la información proporcionada por las curvas I – D – Tr se construyeron hietogramas de diseño por medio del método de bloques alternos de acuerdo con Chow, et al. (1988) y cuyo principio es especificar la profundidad de precipitación que ocurre en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt sobre una duración total de $T_d = n \times \Delta t$. Una vez definidos los

hietogramas, se simularon en el software EPA SWMM® para obtener los hidrogramas de diseño de cada una de las subcuencas del área de estudio.

3.3.2. Aplicación de CFD ANSYS – Fluent

Como fue mencionado en los objetivos del trabajo, la validación del funcionamiento del panel se realizó a través del análisis de *Dinámica de Fluidos Computacional* (CFD por sus siglas en inglés) que se usa como una herramienta para obtener detalles sobre problemas de ingeniería relacionados con el flujo de fluidos reduciendo la cantidad de análisis experimental. Para dicho análisis, se utilizó el módulo Fluent de ANSYS. Las actividades de simulación fueron llevadas a cabo teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- El objetivo de la simulación con CFD fue conocer el impacto que tendría la zona de retención para mitigar el gasto pico de un hidrograma.
- La zona de retención se conceptualizó como un tanque sin estructura interior considerando que la geometría del panel permite una circulación del fluido en cualquier dirección.
- El modelo se dimensionó como una banqueta con espacio el mínimo espacio disponible de un metro de ancho e igual profundidad con una longitud de cinco metros.
- Los escenarios simulados correspondieron a propuestas de diferentes estructuras de control que se mencionan en los apartados correspondientes.

Al igual que la simulación estructural, el proceso de ANSYS-Fluent administra cada proyecto a través de su plataforma *Workbench* que optimiza los procesos de simulación. En la figura 3.11 se muestra la interfaz principal de la simulación para CFD.

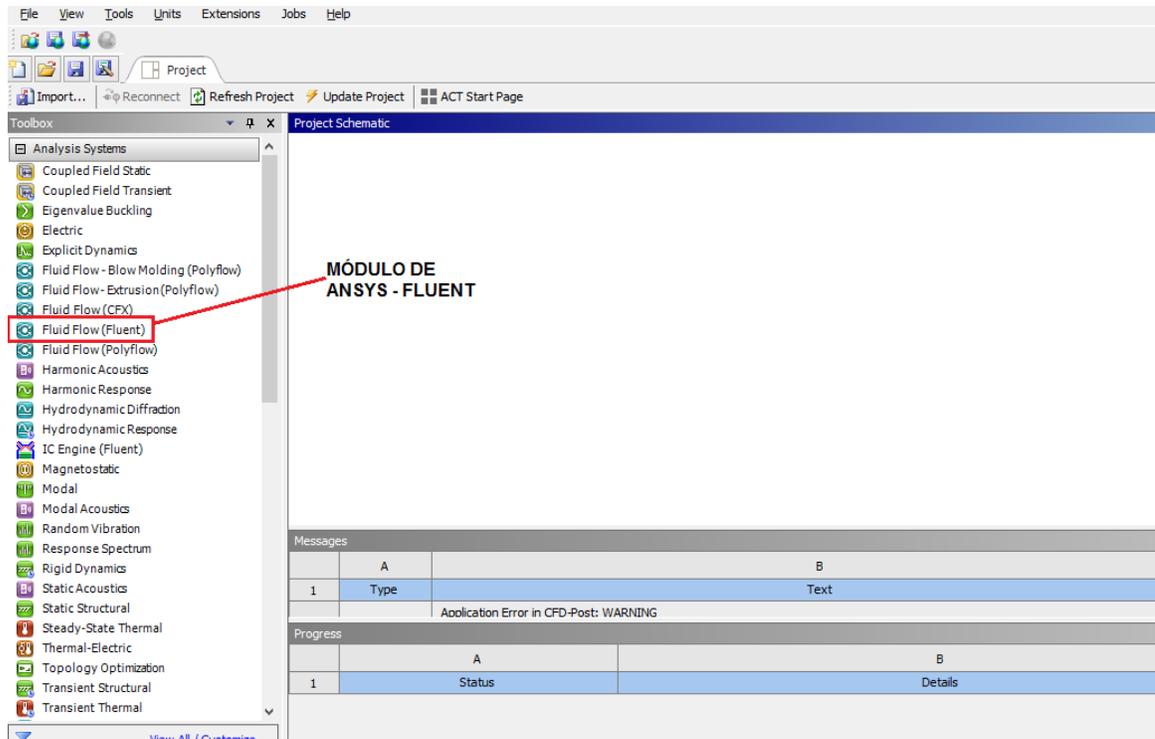


Figura 3.11. Interfaz Workbench ANSYS

El esquema de proyecto para los escenarios a simular se insertó en el escritorio de trabajo el módulo *Fluid Flow (Fluent)* para comenzar el análisis CFD siguiendo el proceso como se muestra en la figura 3.12.

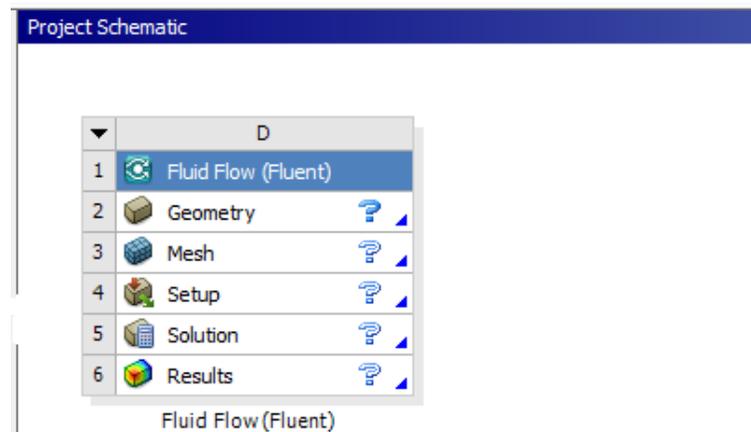


Figura 3.12. Esquema de trabajo ANSYS – Fluent

3.3.2.1. Geometría

El modelo tridimensional del panel fue creado con la herramienta de dibujo *AutoCAD-3D Modeling* y posteriormente exportado en el formato *.sat aceptado por ANSYS. Cabe aclarar que desde la herramienta de dibujo se exportó el sólido correspondiente al dominio del flujo, geometría requerida para la simulación hidráulica como se observa en la figura 3.13.

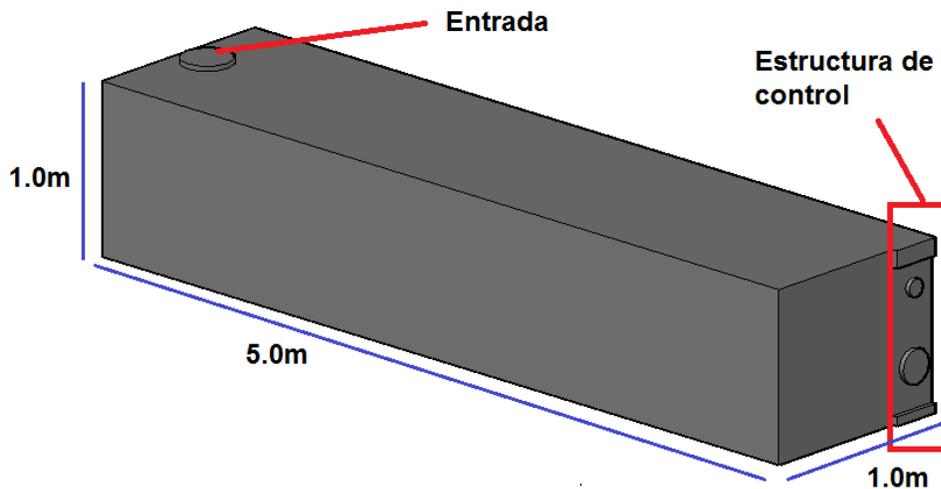


Figura 3.13. Modelo geométrico para simulación en ANSYS

Como se mencionó en las consideraciones, se evaluaron distintas estructuras de control con las siguientes dimensiones.

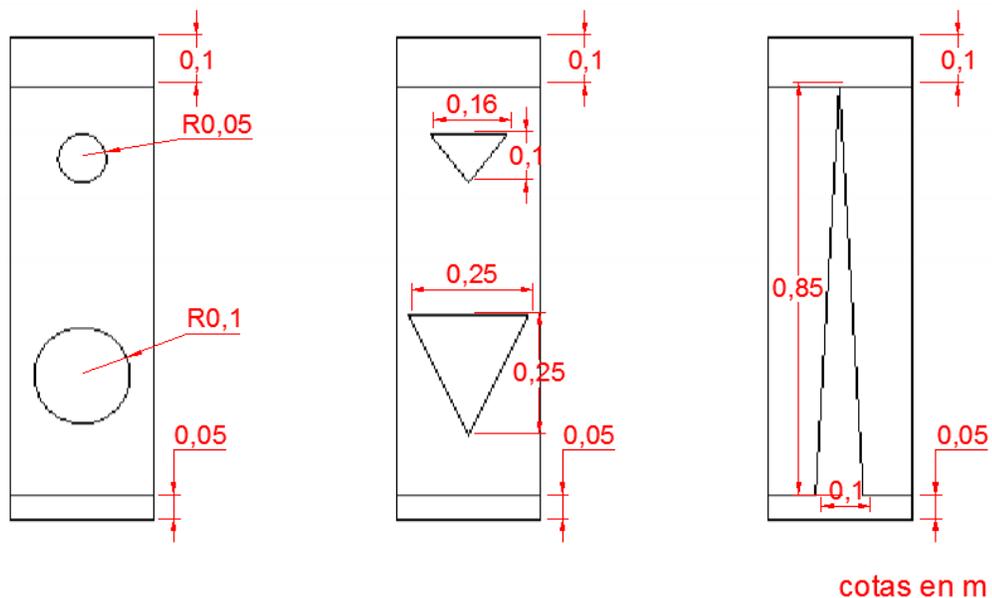


Figura 3.14. Dimensiones de las estructuras de control propuestas

3.3.2.2. Malla

Como lo indica Noblecilla-Palomino (2019), para poder continuar con el correcto mallado, se debe garantizar la elección del método, la calidad, el dimensionamiento y posterior afinamiento de la malla que mejor se ajuste al caso en estudio y que permita obtener mayor precisión de los resultados que reflejan la realidad.

En ANSYS – Fluent presenta varios métodos de mallado: tetraédrico, hexaédrico e híbrido (combinación de los dos primeros). Para geometrías complejas o cuando el rango de longitudes de escala del flujo es grande se recomienda un mallado tetraédrico, debido al requerimiento de un menor número de celdas que un mallado hexaédrico; además permiten que las celdas sean agrupadas en regiones seleccionadas del dominio fluido. El método tetraédrico se presenta mayormente en geometrías de tramos curvos.

Para el caso del dominio de flujo del caso de estudio, se eligió el método tetraédrico después de comparar los dos métodos y su calidad. El resultado del proceso de mallado se muestra en la figura 3.15.

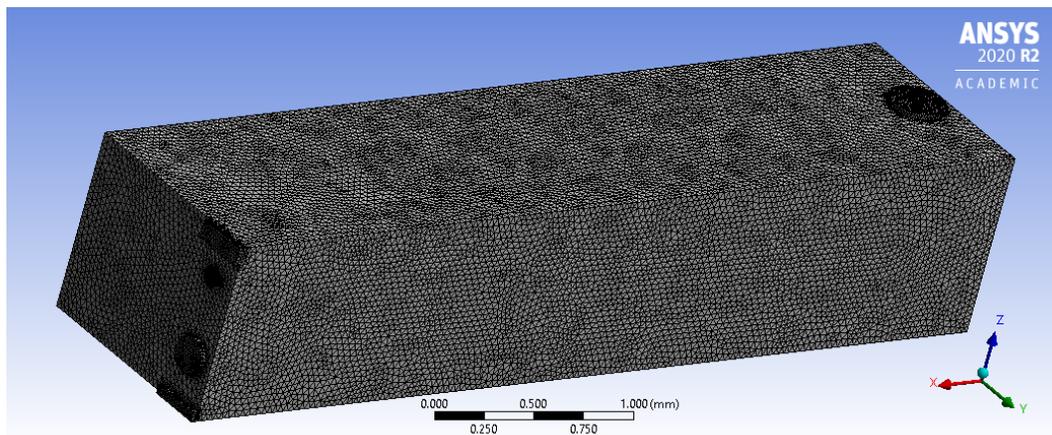
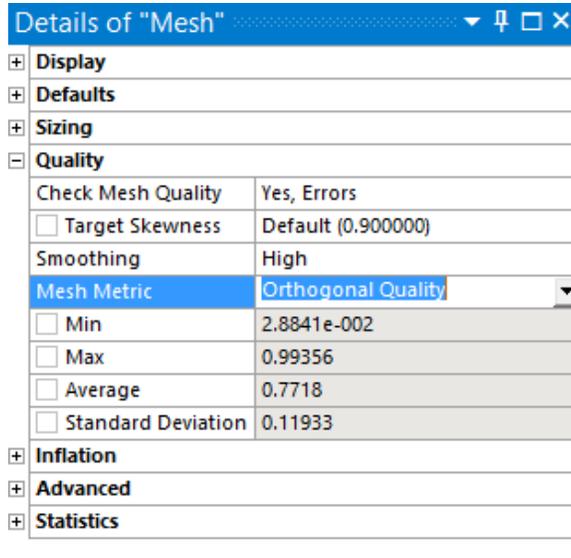


Figura 3.15. Dominio del flujo mallado con ANSYS

El dimensionamiento quedó en función de la calidad de la malla, probando con varias dimensiones de elementos. En los detalles de malla (*Details of Mesh*) se mantuvieron los valores de relevancia 100, con el objetivo de obtener elementos de mallado mucho más refinados y de mayor cantidad que una relevancia de 0, volviendo más preciso la obtención de resultados.

La calidad de malla se valoró con cuatro parámetros de estudio (*Orthogonal Quality*, *Element Quality*, *Aspect Ratio* y *Skewness*) con la alternativa de *Mesh Metric* se registraron los siguientes resultados.

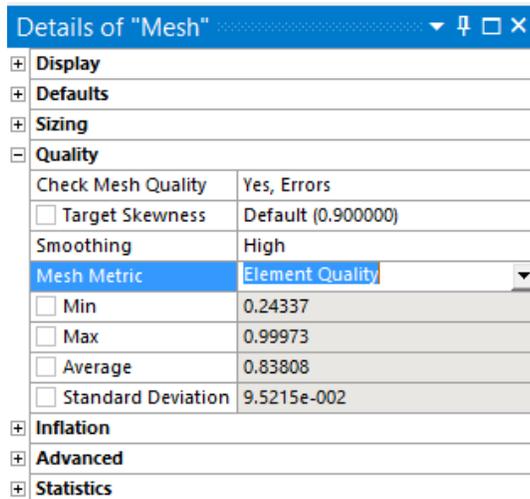
- a) *Orthogonal Quality*. Se recomienda que este valor este cercano a la unidad, esto indica que los ángulos en las celdas tienden a 90 grados, facilitando los cálculos del programa



Details of "Mesh"	
+ Display	
+ Defaults	
+ Sizing	
- Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	High
Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	2.8841e-002
<input type="checkbox"/> Max	0.99356
<input type="checkbox"/> Average	0.7718
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.11933
+ Inflation	
+ Advanced	
+ Statistics	

Figura 3.16. Valores orthogonal quality obtenidos del mallado

- b) *Element Quality*. Se recomienda que este valor esté cercano a 1, ya que la unidad representa un cubo o cuadrado perfecto.



Details of "Mesh"	
+ Display	
+ Defaults	
+ Sizing	
- Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	High
Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0.24337
<input type="checkbox"/> Max	0.99973
<input type="checkbox"/> Average	0.83808
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	9.5215e-002
+ Inflation	
+ Advanced	
+ Statistics	

Figura 3.17. Valores Element Quality obtenidos del mallado

- c) *Aspect ratio*. La mejor relación de aspecto es la que tiende a la unidad. Se recomienda no supere el valor de 5

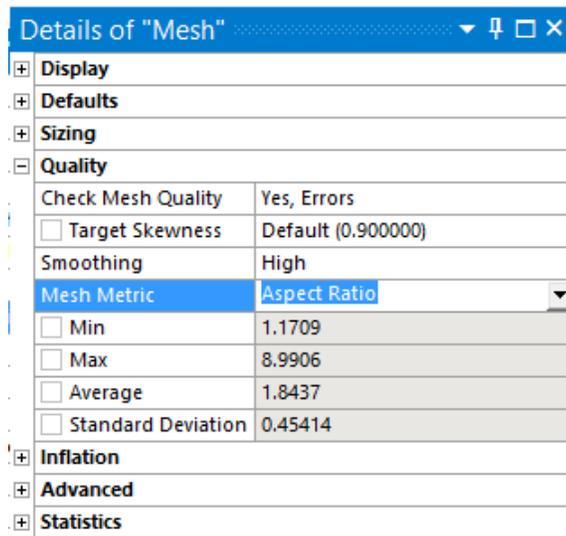
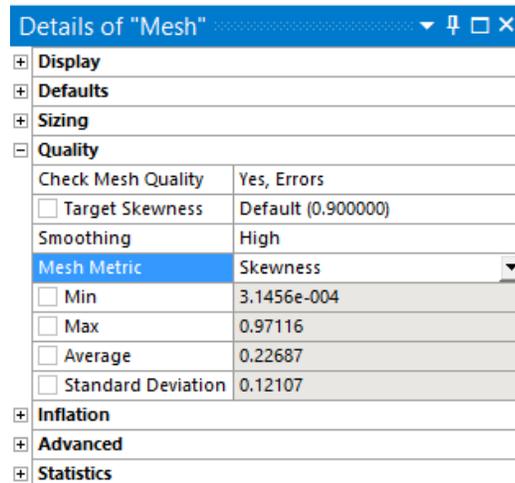


Figura 3.18. Valores Aspect Ratio obtenidos del mallado

- d) *Skewness*. Esta es una de las principales medidas de calidad que debe cumplirse al generar una malla. Los rangos de asimetría se les puede observar en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Rangos de asimetría y calidad de malla (Noblecilla-Palomino, 2019)

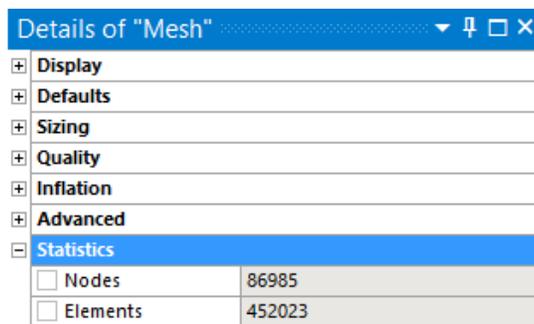
Valor de Skewness	Calidad de celda
1	Degenerada
0.90 - < 1.00	Mala
0.75 - 0.90	Pobre
0.50 - 0.75	Tolerable
0.25 - 0.50	Buena
>0 - 0.25	Excelente
0	Equilatera



Details of "Mesh"	
<input checked="" type="checkbox"/> Display	
<input checked="" type="checkbox"/> Defaults	
<input checked="" type="checkbox"/> Sizing	
<input checked="" type="checkbox"/> Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	High
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	3.1456e-004
<input type="checkbox"/> Max	0.97116
<input type="checkbox"/> Average	0.22687
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.12107
<input checked="" type="checkbox"/> Inflation	
<input checked="" type="checkbox"/> Advanced	
<input checked="" type="checkbox"/> Statistics	

Figura 3.19. Valores Skewness obtenidos del mallado

De manera adicional, se registraron el número de elementos que se forman en el dominio que se muestran en la figura 3.20.



Details of "Mesh"	
<input checked="" type="checkbox"/> Display	
<input checked="" type="checkbox"/> Defaults	
<input checked="" type="checkbox"/> Sizing	
<input checked="" type="checkbox"/> Quality	
<input checked="" type="checkbox"/> Inflation	
<input checked="" type="checkbox"/> Advanced	
<input checked="" type="checkbox"/> Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	86985
<input type="checkbox"/> Elements	452023

Figura 3.20. Número de nodos y elementos del mallado

El proceso se repitió para cada una de las alternativas propuestas de solución. Concluido el proceso de mallado, se determinaron las propiedades del fluido y las condiciones de frontera que intervienen en el proceso de simulación.

Una vez configurada la malla, se nombraron las zonas de interés que en la configuración se utilizaron como fronteras. Se definieron la entrada y salidas de la geometría como se muestra en la figura 3.21.

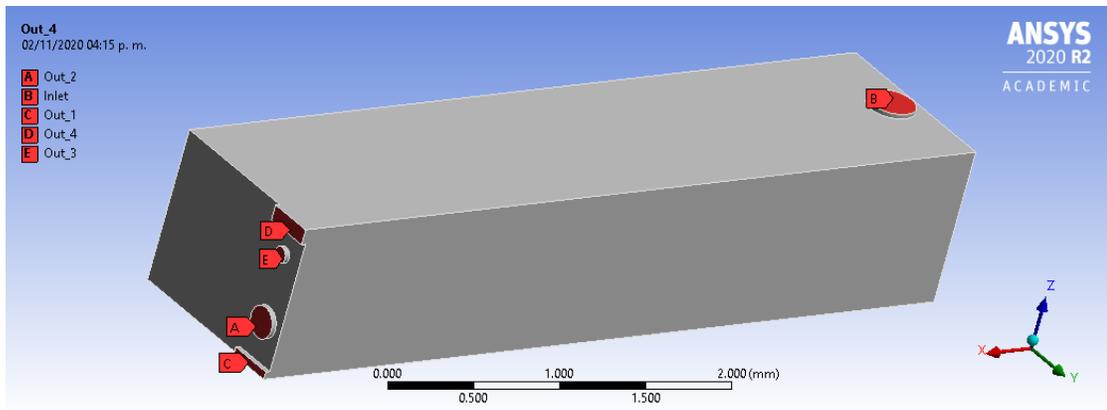


Figura 3.21. Definición de las fronteras

3.3.2.3. Set-up

En el módulo de Set-up se establecieron las características físicas de la estructura, propiedades del fluido y las condiciones frontera. La interfaz de configuración se muestra en la figura 3.22.

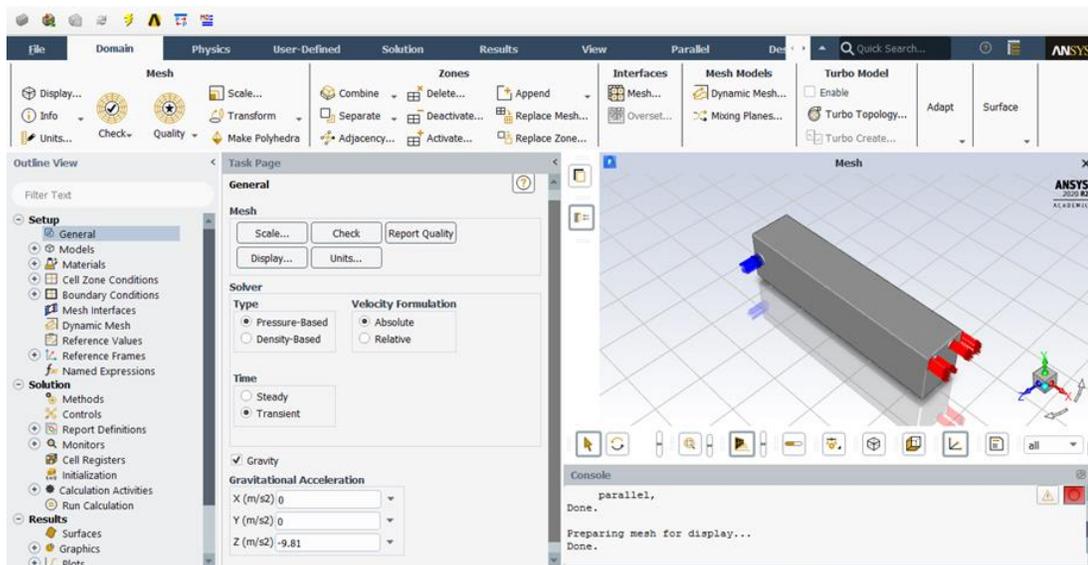


Figura 3.22. Interfaz del setup en ANSYS – Fluent

Para garantizar la correcta corrida de la simulación, es importante seguir el proceso de configuración que el programa establece y que consta de pasos definidos en su misma interfaz como se muestra en la figura 3.23 y que a continuación se describen los parámetros configurados.

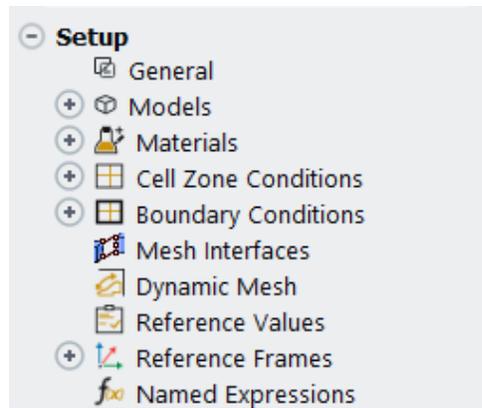


Figura 3.23. Módulos que integran el setup en ANSYS – Fluent

Las características del análisis sólo se configuraron los módulos: *general*, *modelos*, *materiales*, *condiciones de la zona de celdas* y *condiciones de frontera*.

a) General

En ese apartado se configura el *tipo de solución* que por los objetivos del trabajo es transitorio y se determina el plano en donde afecta la aceleración de la gravedad, en este caso fue el plano z.

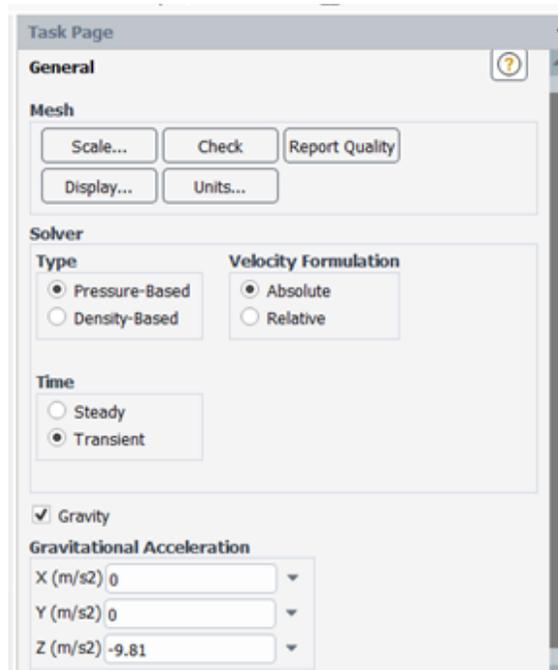


Figura 3.24. Configuración del módulo general en ANSYS – Fluent

b) Modelos

La elección de los modelos fue un fluido multifásico que asume al fluido como un medio continuo en la estructura del material, en este caso, los dos fluidos considerados fueron agua y aire.

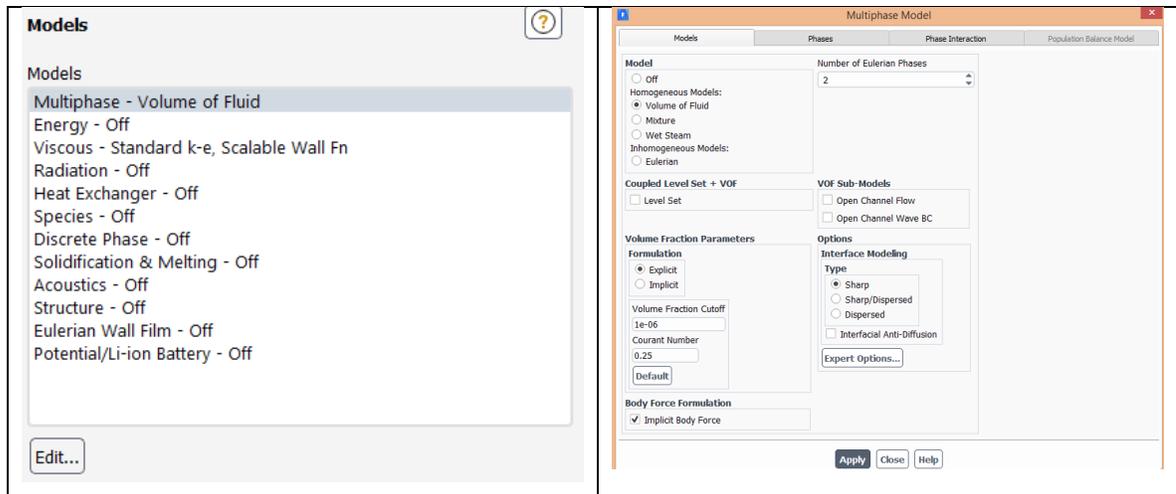


Figura 3.25. Configuración de los modelos para la simulación

Se definen los dos fluidos en la pestaña de fases como *air* y *water* que se toman de la base de datos del software.

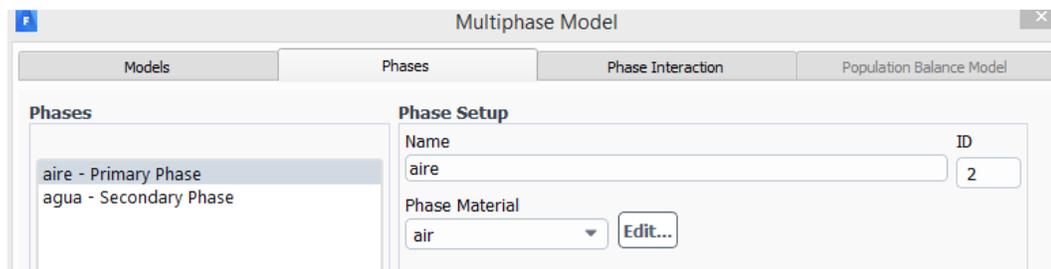


Figura 3.26. Definición de las fases que intervienen en la simulación

También se consideró cambiar el modelo para la solución a un modelo viscoso donde se eligió el modelo $k - \epsilon$ (dos ecuaciones) realizable con tratamiento escalable sin considerar turbulencia, la configuración se realizó como se muestra en la siguiente figura.

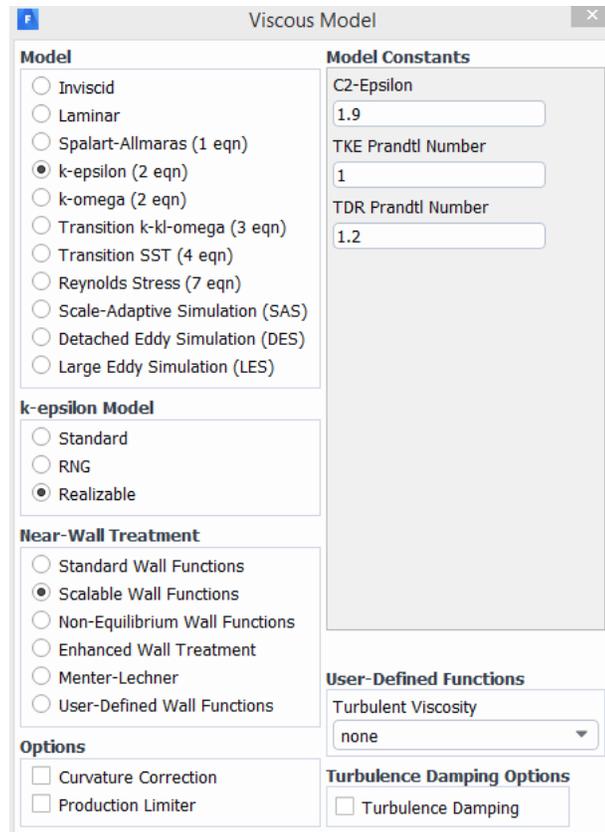


Figura 3.27. Configuración del modelo viscoso

Es importante destacar que no se tomaron en cuenta otros modelos ya que no son de interés para el proyecto.

c) Materiales

En el caso de materiales, sólo se modifican los correspondientes al fluido que dependen de las fases elegidas. Para el estudio en cuestión, se definen agua (*water-liquid*) y aire (*air*).

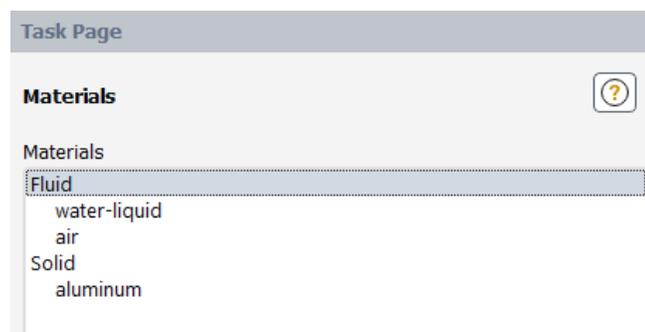


Figura 3.28. Definición de los materiales para la simulación

d) Condiciones de la zona de celdas

En esta configuración se verifica que el programa haya incluido las dos fases para el dominio del fluido.

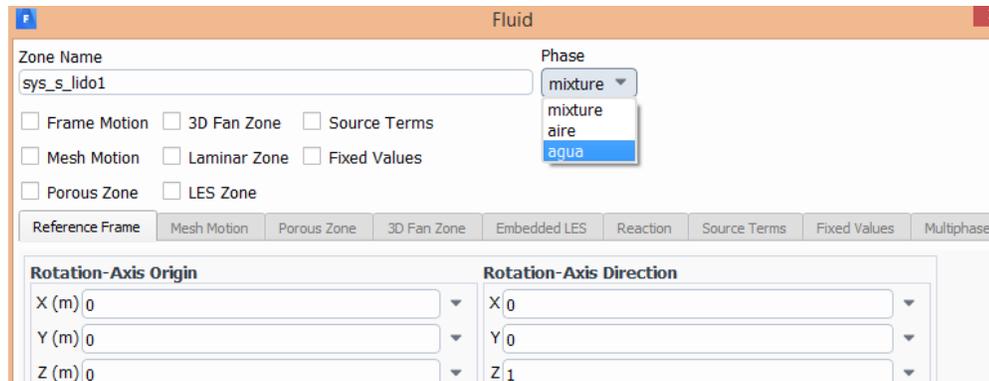


Figura 3.29. Verificación del modelo multifase en el dominio del flujo

e) Condiciones de frontera

Las condiciones de borde se aplican al dominio físico y son necesarias para describir correctamente el fenómeno. Tiene un alto nivel de importancia dentro de las etapas de la modelación numérica, ya que, al ser ingresadas de manera errónea, se obtendrían resultados equivocados, muy alejados de la realidad, o es probable que el programa no realice ninguna iteración durante la etapa del procesamiento. ANSYS Fluent posee la gran ventaja de enviar mensajes de error cuando el ingreso de datos al programa es incoherente (Noblecilla-Palomino, 2019).

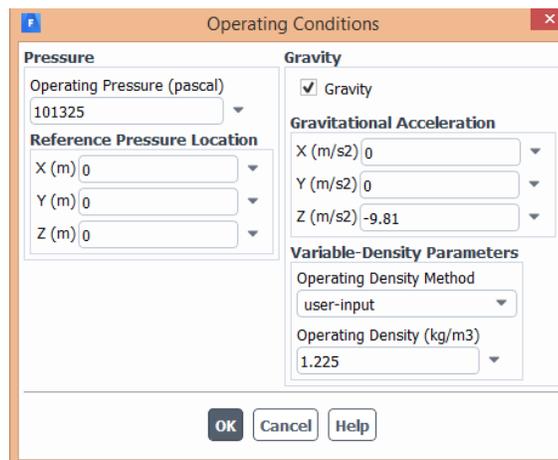


Figura 3.30. Configuración de las condiciones de operación para la simulación

El primer paso para continuar con la configuración global se definieron las condiciones de operación en la pestaña correspondiente de las condiciones de frontera. Se establece la condición de presión a una atmósfera que equivale a 101325 pascales y la densidad de operación con valor por default de 1.225 kg/m³.

Después de culminar con la configuración global se definen las condiciones locales de acuerdo con los escenarios propuestos para la simulación, se establecieron las siguientes condiciones de frontera para el panel: entrada y salidas en las zonas nombradas cuando se definió la malla. Los parámetros de cada condición se describen a continuación.

➤ **Entrada**

Del análisis hidrológico para la zona de estudio se eligió un hidrograma que ofreciera una representatividad de las características del área. La elección consistió en visualizar los parámetros, en especial el área, de cada subcuenca donde se determinó el rango de área que existe en la superficie analizada. Después, se eligió el hidrograma con mayor pico calculando el *flujo masa* (en unidades de kg/s) que éste genera y el cual es ingresado como la condición de frontera en la entrada.

Para ingresar el hidrograma, se creó un documento de texto tipo “.txt” con la siguiente estructura aceptada por el software de simulación.

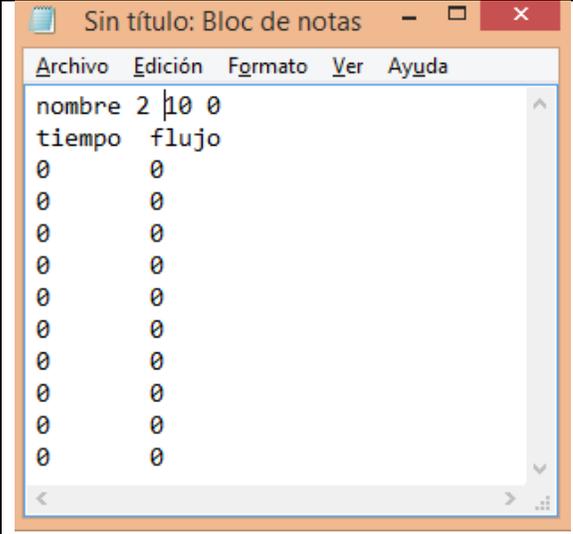
 <pre> Sin título: Bloc de notas Archivo Edición Formato Ver Ayuda nombre 2 10 0 tiempo flujo 0 </pre>	<p>nombre: corresponde al nombre del hidrograma con el que se le denomina.</p> <p>2: representa el número de columnas de la tabla.</p> <p>10: representa el número de datos en reglones que componen la tabla.</p> <p>0: representa si el hidrograma tiene un periodo o termina cuando se analiza en último dato, en caso de existir periodicidad se determina como 1</p>
---	--

Figura 3.31. Formato de table transitoria para ingresar el hidrograma de entrada a Fluent

El documento creado se guardó en la carpeta de archivos FLU creada en el directorio de trabajo. En el panel de consola se carga el archivo de texto guardado con el comando *file* y enseguida *read-transient-table*. El software mismo envía mensaje del correcto proceso realizado.

Con la tabla del hidrograma aceptado por el software, en la configuración de las condiciones de frontera se asignó seleccionando la frontera que se denominó “inlet” y definiendo el tipo de entrada como *mass-flow-inlet*, como se muestra en la figura, enseguida se le asigna como valor la tabla cargada en el paso anterior.

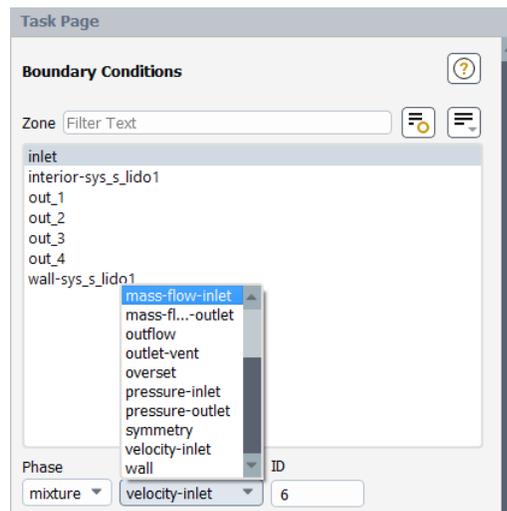


Figura 3.32. Configuración de las condiciones de frontera para la entrada

➤ **Salida**

Para las salidas denominadas “out” se les asignó la condición *outflow* al representar el flujo de salida que se pretende estudiar en un instante de tiempo.

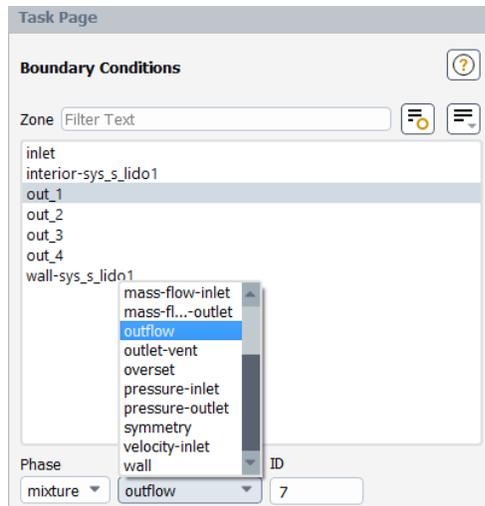


Figura 3.33. Configuración de las condiciones de frontera para la salida

Con la configuración definida, el software determinó automáticamente el dominio interior y la pared del flujo. Las configuraciones faltantes del *setup* se dejaron con los valores por default ya que no fue necesario hacer más modificaciones por los objetivos de análisis, dando paso al apartado de solución.

3.3.2.4. Solución

En el apartado de *solution* se configuran los métodos de solución, controles, se definen los reportes a evaluar y las actividades de cálculo antes de comenzar la corrida de simulación. Al igual que el *setup*, el software determina algunos valores por default y el proceso de configuración se muestra en la figura 3.34.

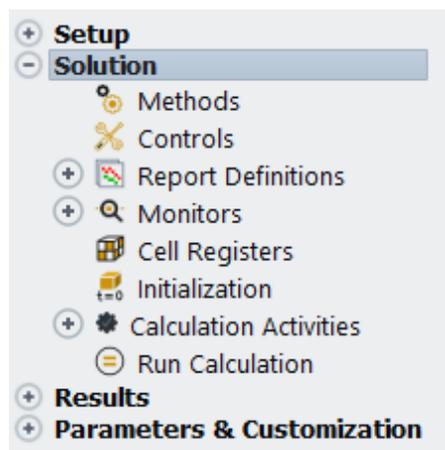


Figura 3.34. Módulos que integran el solucionador en Fluent

a) Métodos

Corresponde a los métodos que se eligieron para la solución que definen las ecuaciones a solucionar, los cuales se seleccionaron como:

- *Esquema de solución*: SIMPLE
- *Presión*: PRESTO!
- *Momentum*: Segundo orden
- *Fracción de volumen*: Geo-Reconstruct
- *Energía cinética turbulenta*: Primer orden
- *Tasa de disipación turbulenta*: Primer orden
- *Formulación transitoria*: Primer orden

Dicha configuración se muestra en la figura 3.35.

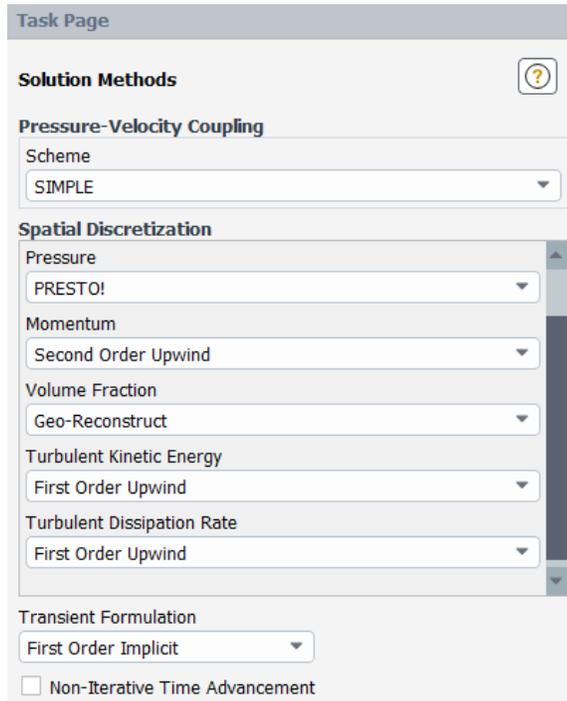
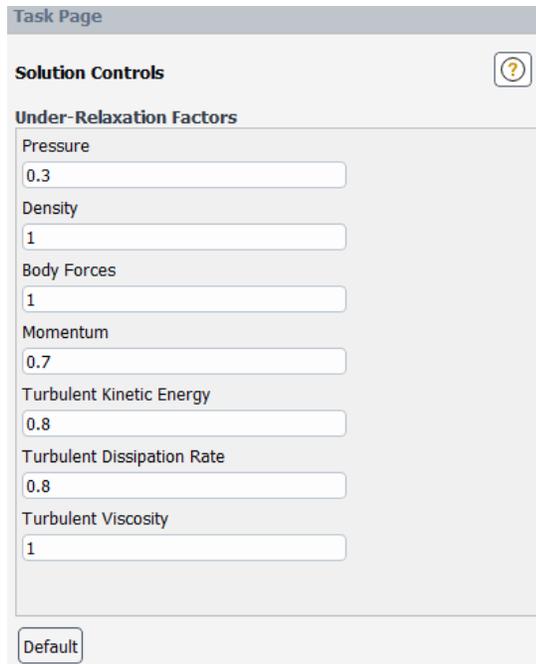


Figura 3.35. Configuración de los métodos de solución

b) Controles

Los controles de solución se dejaron con los valores por default que el programa determinó y se muestran en la figura 3.36.



Task Page

Solution Controls 

Under-Relaxation Factors

Pressure
0.3

Density
1

Body Forces
1

Momentum
0.7

Turbulent Kinetic Energy
0.8

Turbulent Dissipation Rate
0.8

Turbulent Viscosity
1

Default

Figura 3.36. Configuración de los controles de simulación

c) Definición de reportes

En este apartado se definen los reportes que se buscan guardar de la simulación. Para el caso del proyecto de estudio, se definió el reporte de entrada y de las salidas por tiempo de flujo como se muestra en la figura 3.37. Estos reportes se guardaron automáticamente en la carpeta de trabajo y posteriormente se analizaron en hojas de cálculo ya como parte de los resultados. Es importante destacar que los reportes generan un consumo importante en tiempo de simulación por las actividades de escritura que el software tiene que realizar, por lo que se recomienda que los reportes sean los necesariamente importantes para no saturar el equipo de cómputo.

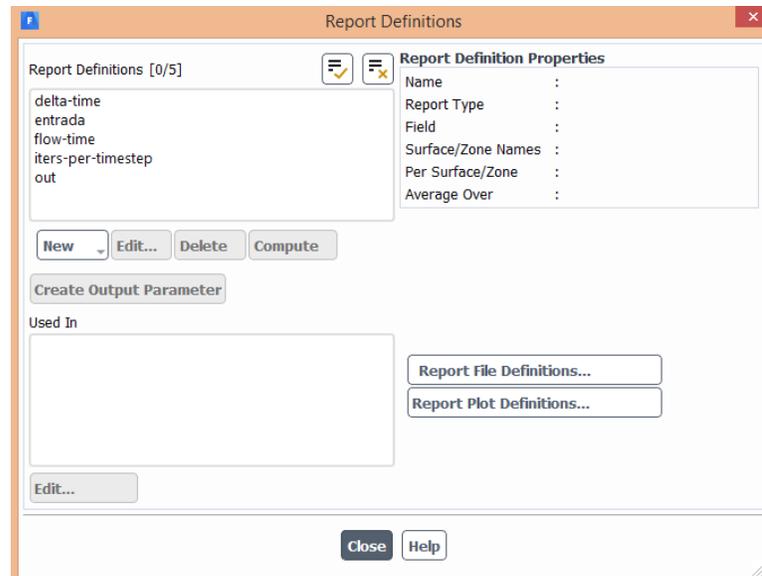


Figura 3.37. Configuración de reportes de solución

Incluso, también se pueden generar gráficas de los resultados en la opción de *report plot definitions* sin embargo por el tiempo disponible de simulación, se optó por procesar los resultados en hojas de cálculo que permiten una mayor flexibilidad para el tratamiento de éstos.

d) Monitores

Parte importante de la simulación fueron los monitores que permiten visualizar la convergencia de cada una de las iteraciones en las distintas ecuaciones. Se optó por definir un criterio de convergencia de 0.001 como se muestra en la figura 3.38.

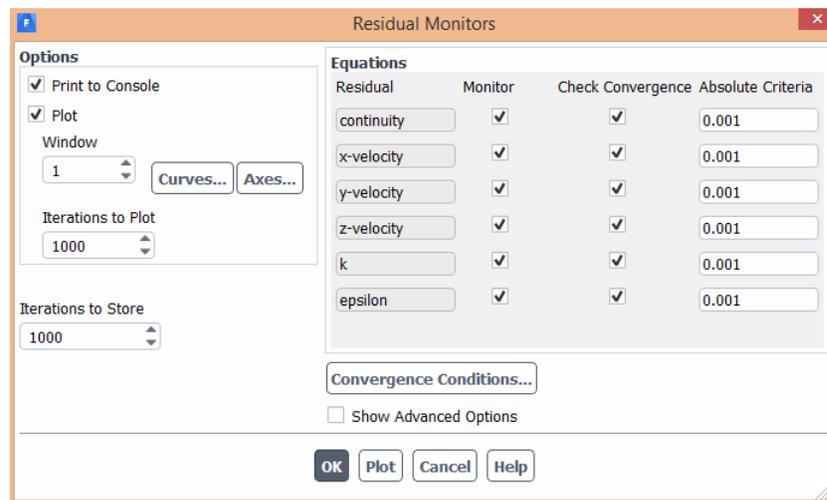


Figura 3.38. Configuración de los monitores de solución

e) Inicialización de solución

Es el paso previo al comienzo de la solución y realiza una comprobación de los parámetros iniciales que nos permite identificar posibles errores de configuración, el tipo de análisis se estableció como híbrido y se muestra en la figura.

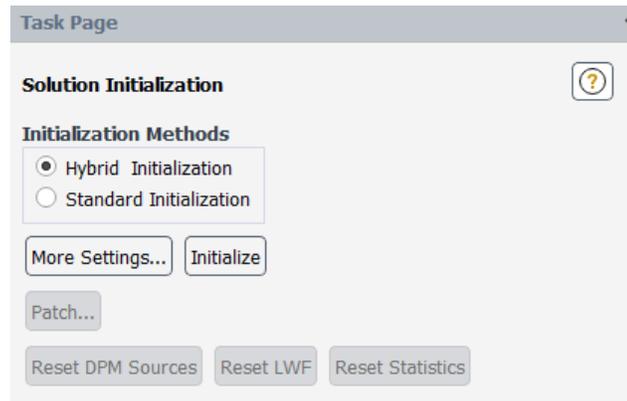


Figura 3.39. Elección de la inicialización de solución en Fluent

f) Corrida de cálculo

El *Run Calculation* es el último apartado a configurar para comenzar la corrida de la simulación donde se definieron la cantidad y tamaño de pasos de tiempo que se analizaron. Por ello se buscó que fuera un tiempo igual al del hidrograma considerado como condición de frontera e identificar que pasaba en esos instantes de tiempo, en la figura 3.40 se muestran los parámetros configurados.

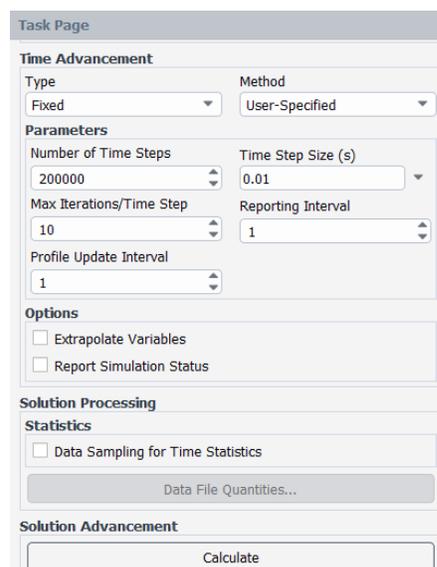


Figura 3.40. Configuración del *run calculation* en Fluent

Una vez comenzado el cálculo, el software muestra el proceso de la solución numérica a través de gráficos donde se visualizan los valores residuales por iteración debidos a los errores de cierre de turbulencia, ya que las ecuaciones no tienen una solución analítica única.

Se consideraron las recomendaciones realizadas por López-Rebollar (2015) de alcanzar un valor de 1×10^{-3} en los residuales para lograr una convergencia satisfactoria. En las figuras se muestra el comportamiento de las ecuaciones consideradas, las cuales todas alcanzan el valor recomendado y estable a las 4500 iteraciones realizadas.

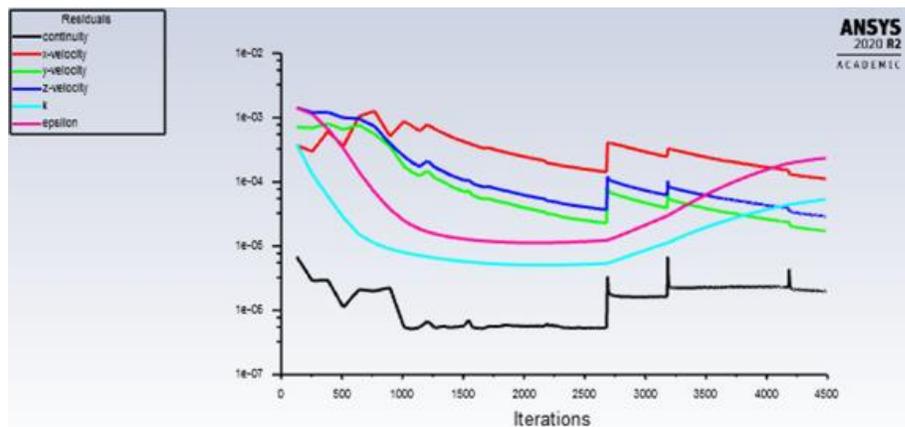


Figura 3.41. Monitoreo de la convergencia de las ecuaciones de solución

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se muestran los resultados del dimensionamiento del panel fractal hexagonal, de la evaluación estructural realizado con la herramienta de análisis de elementos finitos (FEA) y de la simulación hidráulica aplicando modelos de dinámica de fluidos computacionales (CFD) a la propuesta del sistema de retención con distintos escenarios de estructuras de control a la salida.

4.1. DIMENSIONAMIENTO DEL PANEL FRACTAL HEXAGONAL

4.1.1. Dimensiones

Como resultado del proceso de diseño descrito en el apartado 3.1, las dimensiones finales del panel quedaron de 30 cm de ancho, 60 cm de largo y 30 cm de espesor, como se muestra en las figuras 4.1, 4.2 y 4.3.

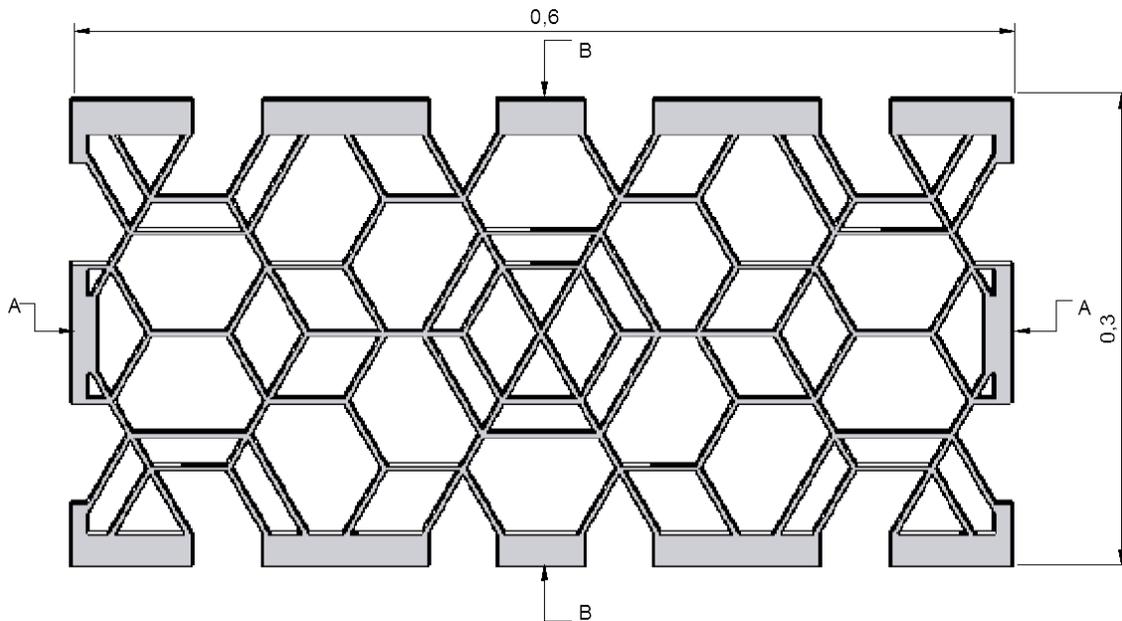


Figura 4.1. Dimensiones finales del panel. Vista en planta.

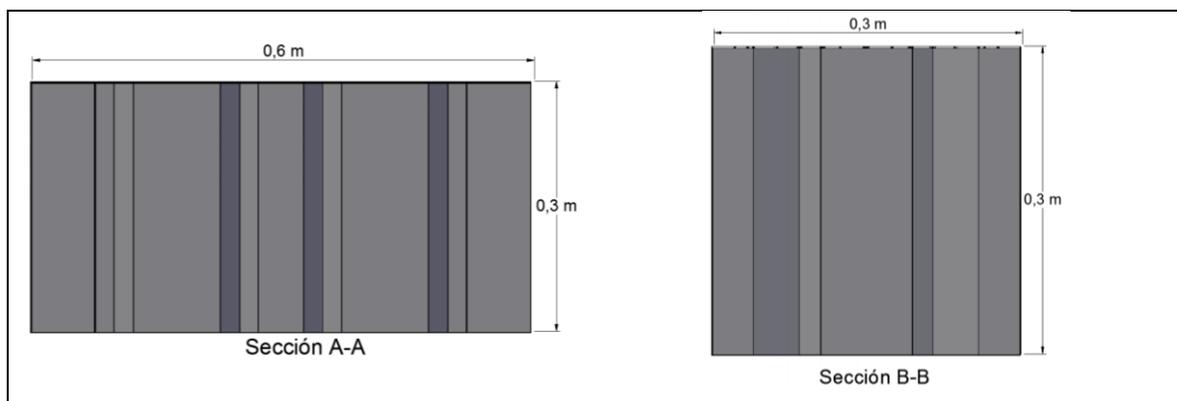


Figura 4.2. Dimensiones finales del panel. Vistas de secciones.

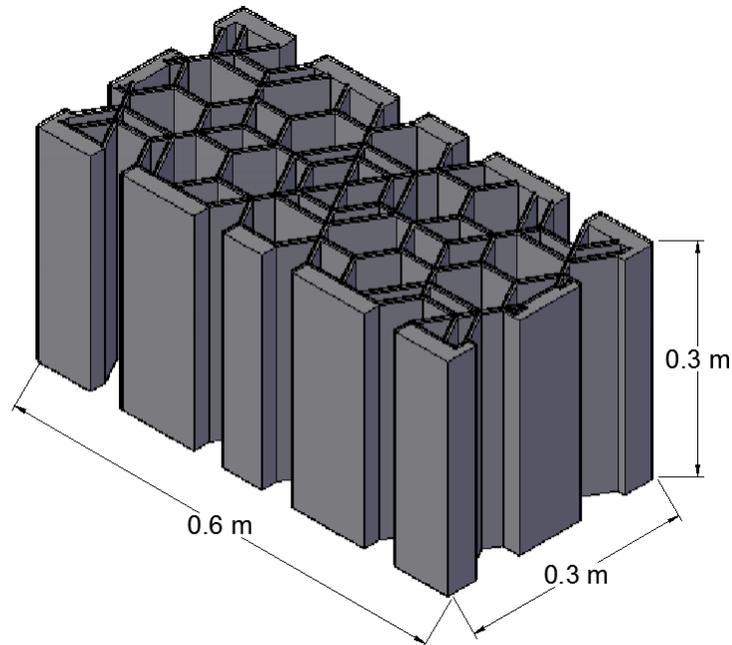


Figura 4.3. Dimensiones finales del panel. Vista tridimensional.

4.1.2. Conexiones

Una vez establecidas las dimensiones del panel se tomó cuenta un sistema de conexión tipo macho-hembra, como se observa en la figura 4.4., que permite una fijación segura para conectar varias piezas. El sitio elegido para el sistema de conexión fue seleccionado tomando en cuenta la libre conexión de acuerdo con el acomodo de dos o más paneles, ya sea de manera apilada o cruzada, dando una ventaja constructiva significativa.

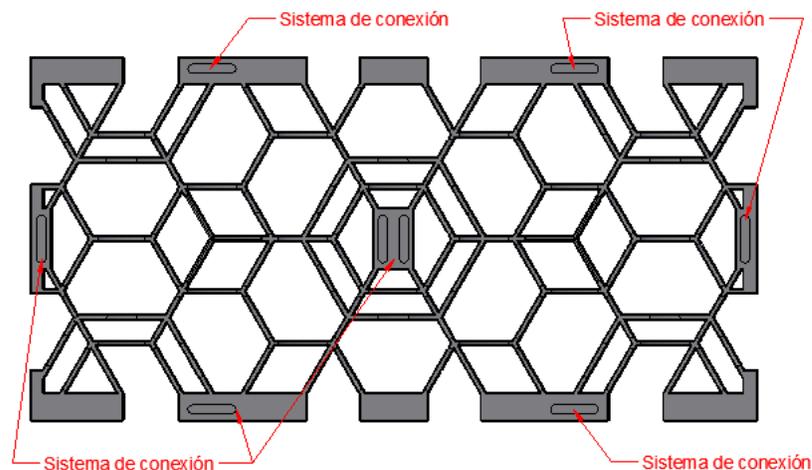


Figura 4.4. Sistema de conexión del panel.

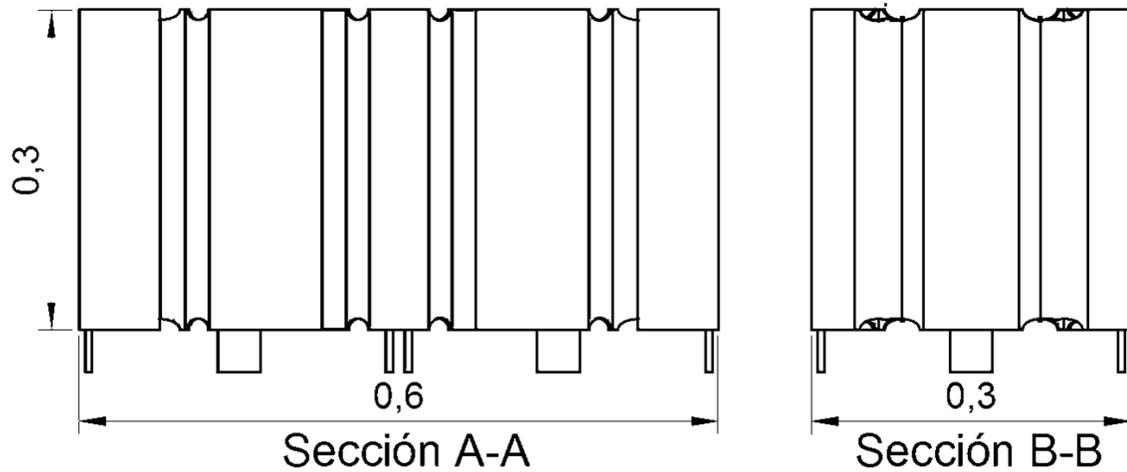


Figura 4.5. Conexión tipo macho-hembra

4.1.3. Secciones y estructura

El diseño final del panel comprende dos tipos de secciones. Las secciones gruesas dan soporte al panel y tienen un grosor de 2 cm y las secciones delgadas son de 3 mm.

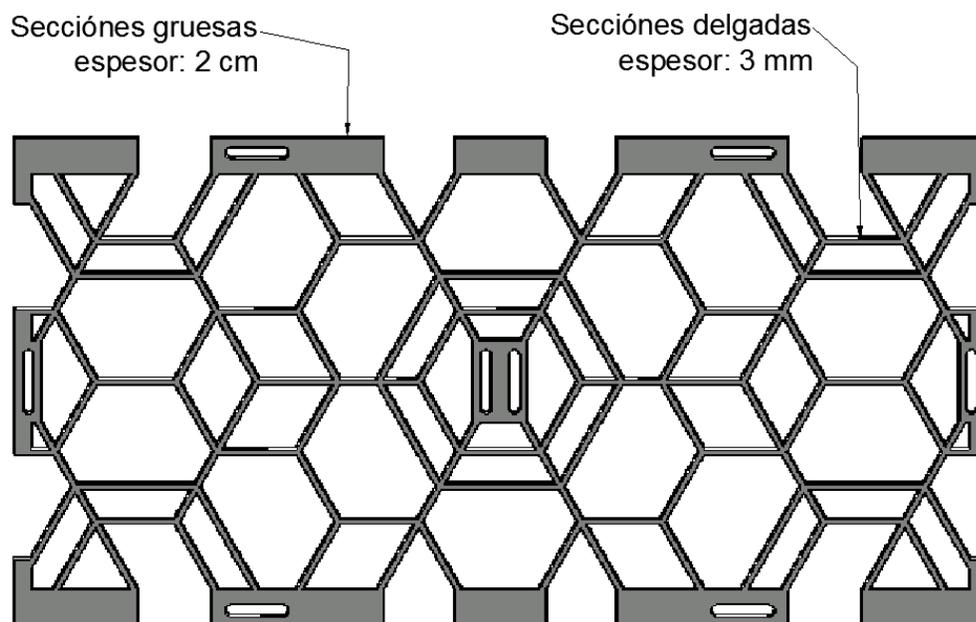


Figura 4.6. Secciones del panel fractal.

La estructura interna del panel se modificó una vez que se observó la imposibilidad de que el flujo tuviera una circulación libre, ya que estaba condicionado a circular en una sola dirección con el diseño original. Esta condición se solucionó con la disminución de material en los claros de los hexágonos fractales, como se muestra en la figura 4.7, adhiriendo huecos que representan a vertedores circulares que se muestran en la figura 4.8.

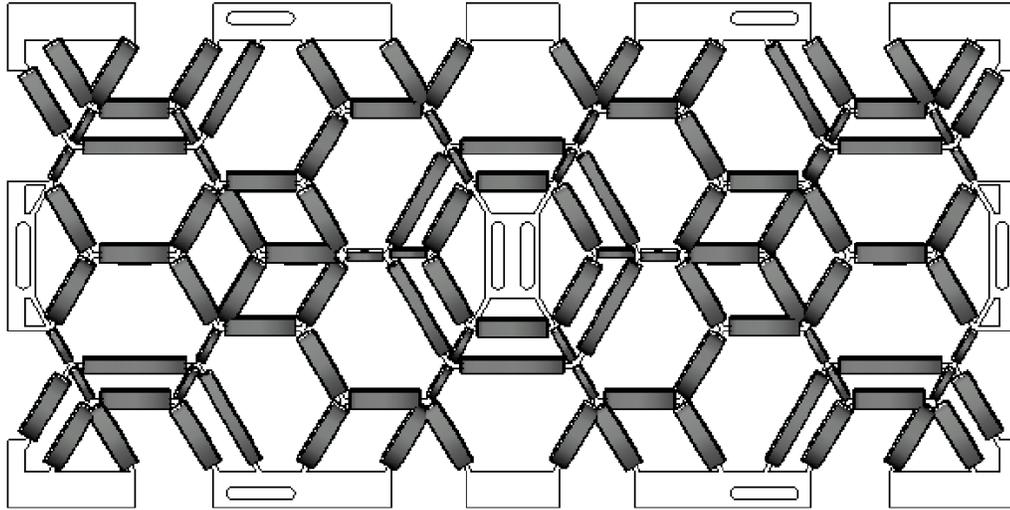


Figura 4.7. Claros de hexágonos fractal donde se incorporaron vertedores.

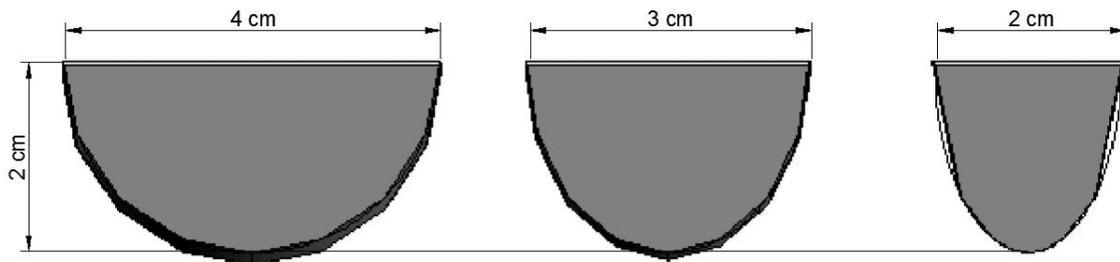


Figura 4.8. Dimensiones de vertedores en los claros de hexágonos fractales

La modificación al panel representó una optimización en el diseño original en dos propósitos. El primero fue permitir la circulación en cualquier dirección del flujo y el segundo, disminuir material aumentando así, la capacidad de almacenamiento del panel. En la figura 4.9. se muestra el resultado final de la estructura interna del panel.

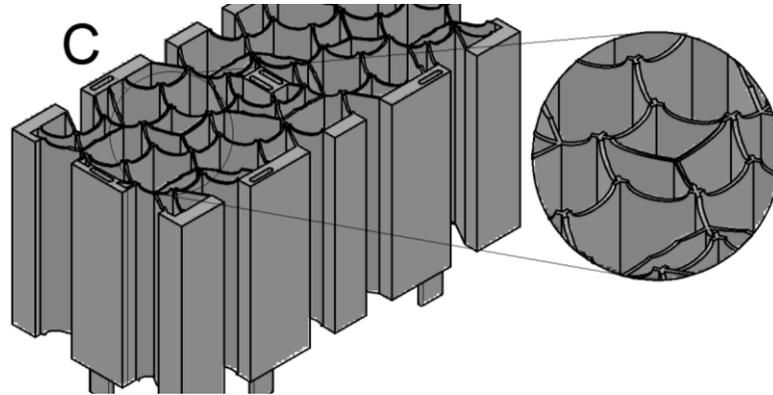


Figura 4.9. Estructura final interna del panel

4.1.4. Estimación del volumen efectivo

El análisis para conocer el volumen efectivo de almacenamiento o el índice de huecos por panel resultó estar por encima del 80% de capacidad total teniendo un porcentaje competitivo con estructuras comerciales como son las cajas drenantes.

4.1.5. Estructura complementaria

Obtenidas las características finales del panel, se planteó el diseño de una placa con la misma geometría fractal previendo que en la implementación del panel, las cargas no fueran uniformemente distribuidas al suelo por las modificaciones realizadas y evitar el hinchamiento del panel (sección 4.1.3). Las dimensiones finales de la placa son las mismas a la base del panel y cuenta con un espesor de 4 cm para permitir la conexión con el panel.

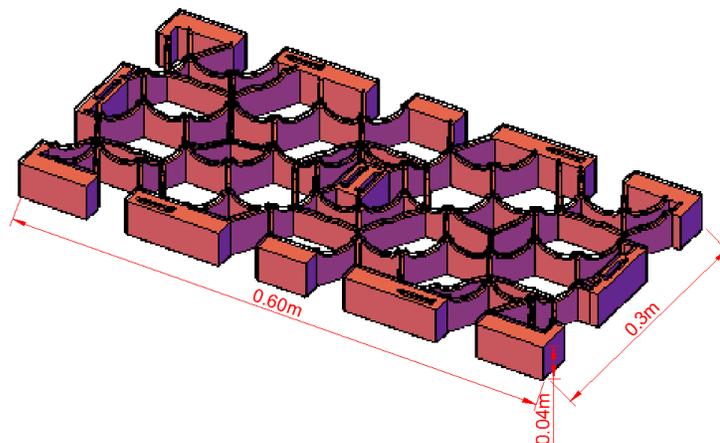


Figura 4.10. Placa fractal de soporte

4.2. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PANEL

En este apartado se muestran los resultados de las actividades planteadas en el capítulo 3 que corresponde al análisis estructural del panel con herramientas de FEA de acuerdo con el escenario de armado.

4.2.1. Modelación de armados en ANSYS-Structural

Como se planteó en el capítulo anterior, se evaluó estructuralmente el armado de paneles apilados considerándolo como el escenario crítico. La evaluación se realizó considerando hasta 3 capas de paneles conectados como se muestra en la figura 4.11.

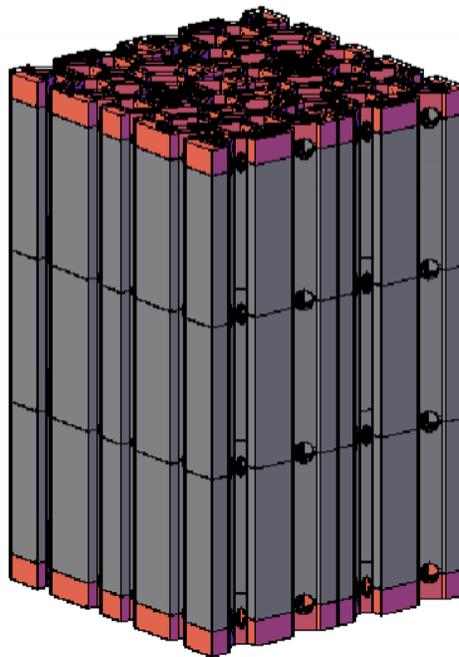


Figura 4.11. Escenarios de armado para el análisis estructural

Como se mencionó en el capítulo anterior, ANSYS Structural ofrece una interfaz de trabajo llamada Workbench que permitieron administrar y controlar el escenario de simulación que se analizó. En la figura 4.12 se muestra la interfaz para la simulación estructural.

Para el escenario, se realizó el proceso general de análisis de exportación de geometría y mallado.

4.2.2. Análisis de armado con ANSYS-Structural

La importación de la geometría se realizó de AutoCAD a Ansys en formato *.sat.

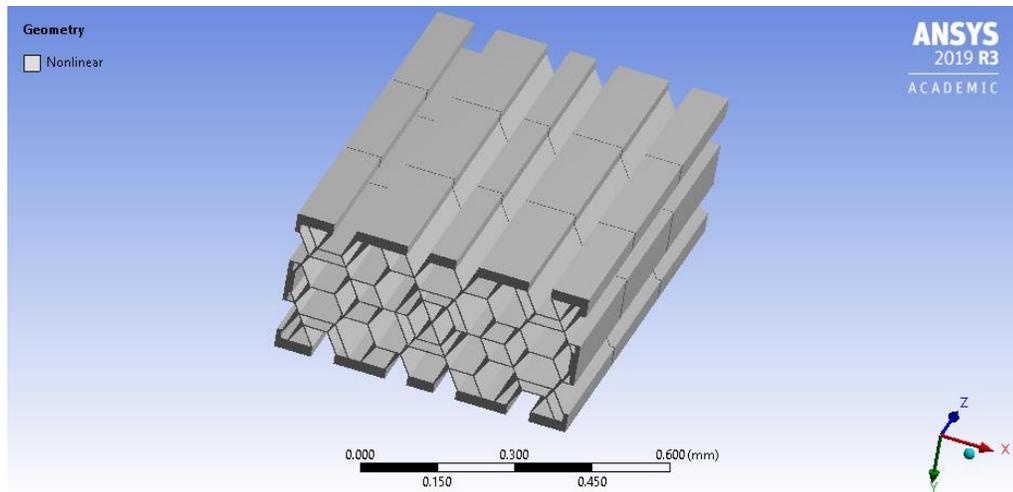


Figura 4.12. Geometría exportada a ANSYS

Se realizó el proceso de mallado con preferencias físicas lineales y orden de elemento de 0.05 mm.

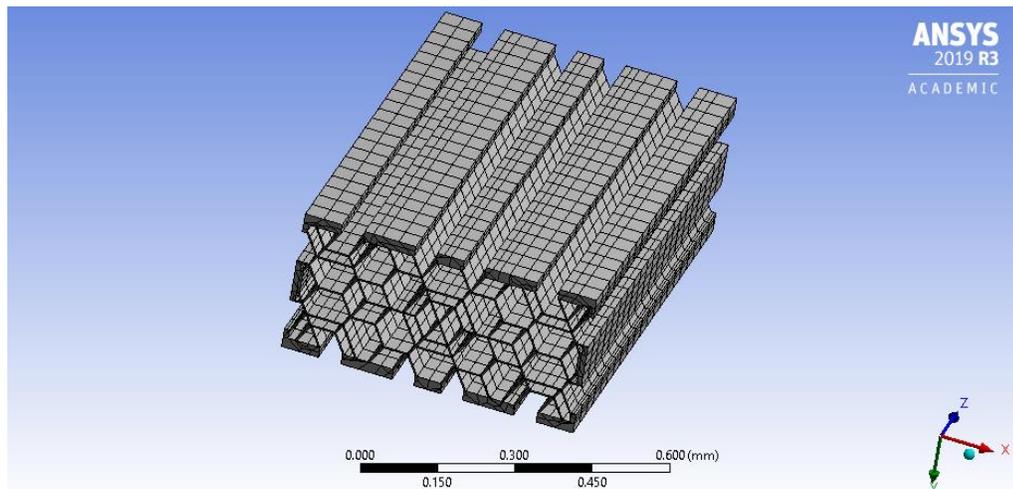


Figura 4.13. Malla del escenario a evaluar

4.2.3. Resultados del análisis estructural

Resultado del análisis estructural con la herramienta FEA que ofrece el módulo ANSYS-Structural se muestran la deformación total del escenario, tensiones, esfuerzos cortantes y normales. Con los resultados obtenidos se analizó la curva esfuerzo deformación para el escenario evaluado y determinar su capacidad estructural.

En la figura 4.14. se visualizan los resultados de la primera simulación planteada, los resultados de las simulaciones restantes se resumen en la tabla 4.1.

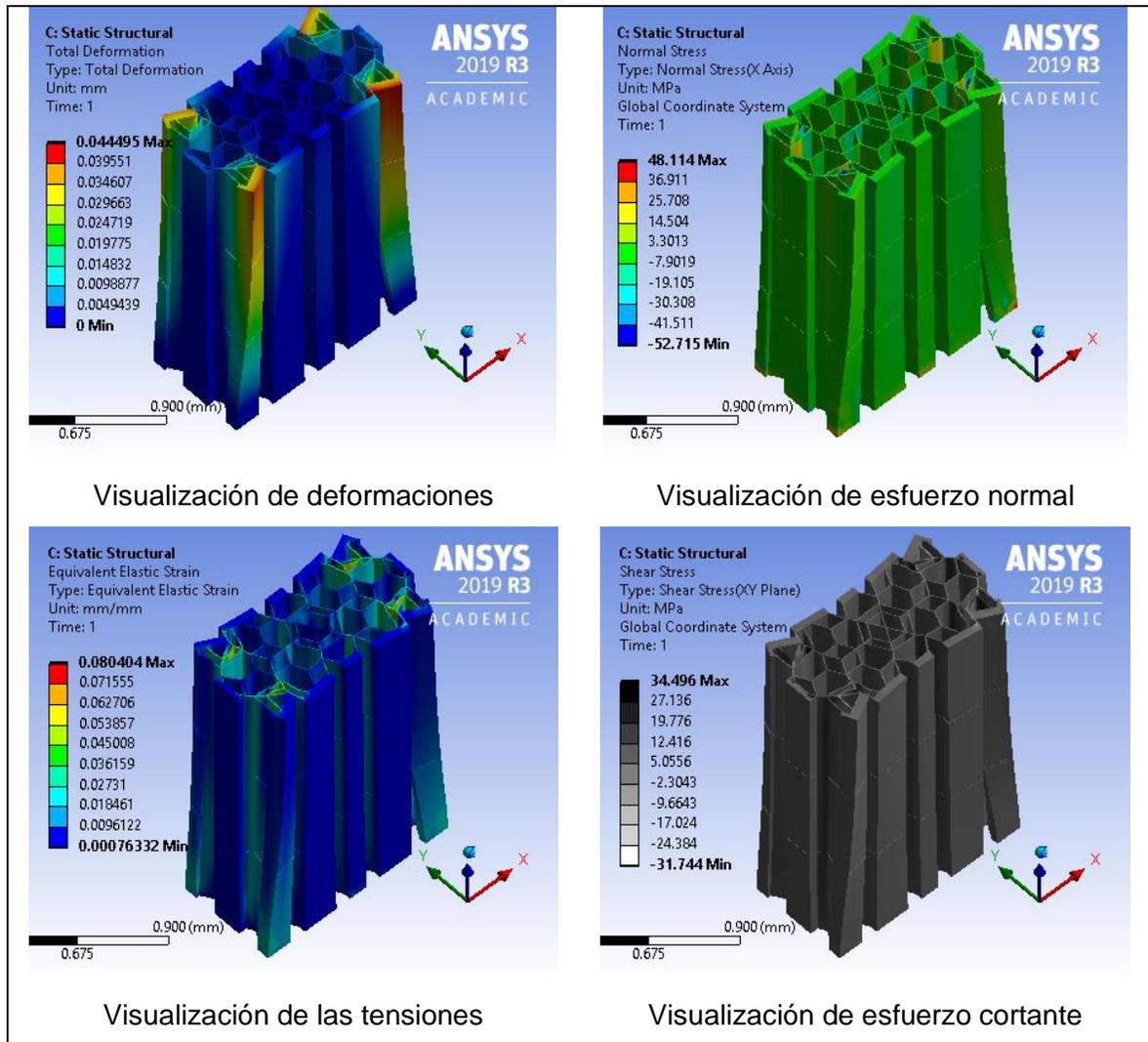


Figura 4.14. Resultados del análisis estructural con FEA

Tabla 4.1. Resultados de simulaciones para el armado apilado

Escenario simulado	Carga del escenario (kg/cm ²)	Deformación total (mm)	Esfuerzo normal (kg/cm ²)	tensión total (mm/mm)	Esfuerzo cortante (kg/cm ²)
1	100	0.04450	490.62620	0.08040	351.76130
2	150	0.12543	530.07255	0.10254	391.20765
3	200	0.17324	584.42619	0.15028	445.56129
4	250	0.31245	672.25375	0.17405	533.38885
5	300	0.45621	789.25952	0.18198	650.39462
6	350	0.52413	932.89239	0.19022	794.02749
7	400	0.72123	1110.35176	0.19874	971.48686
8	450	1.01304	1331.01903	0.20749	1192.15413
9	500	1.27954	1607.18647	0.21644	1468.32157
10	550	1.30144	1955.04982	0.22558	1816.18492
11	600	1.32155	1312.15546	0.23487	1173.29056
12	650	1.45031	1394.81347	0.24381	1255.94857
13	700	1.51348	1405.85265	0.25281	1266.98775
14	750	1.67863	1475.15636	0.26183	1336.29146
15	800	1.85424	1499.45120	0.27089	1360.58630
16	850	1.94130	1534.26486	0.27996	1395.39996
17	900	2.01623	1585.48955	0.28905	1446.62465
18	950	2.10146	1601.15500	0.29818	1462.29010
19	1000	2.31563	1624.37990	0.30731	1485.51500

Con los valores de la tabla 4.1. se obtuvieron las gráficas esfuerzo normal-tensión unitaria y carga-deformación que se muestran en las figuras 4.15. y 4.16. respectivamente.

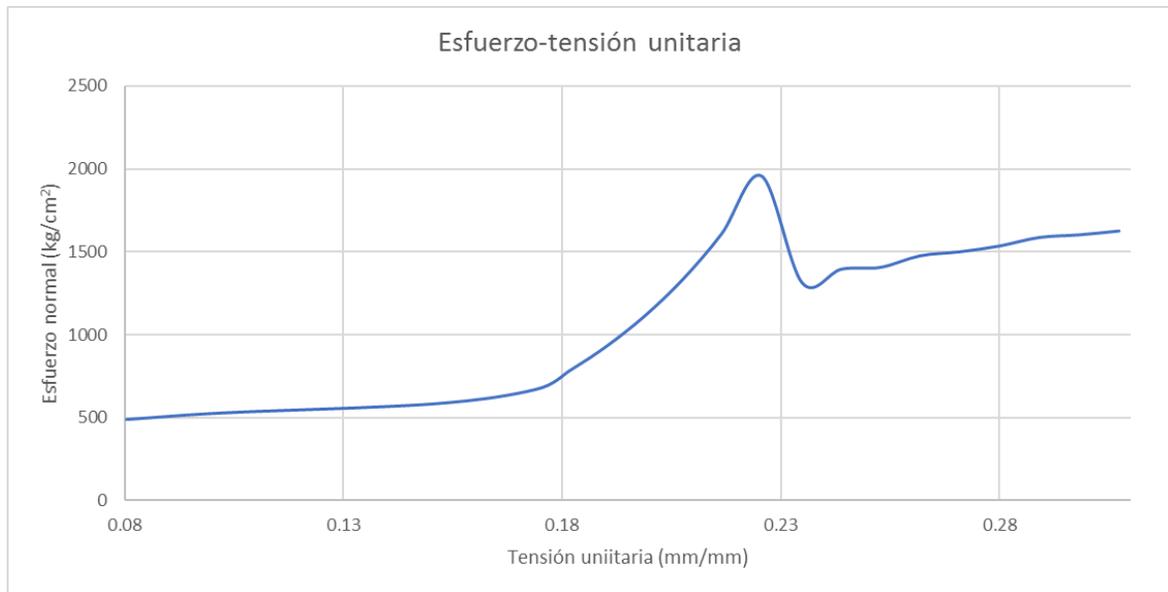


Figura 4.15. Gráfica esfuerzo-tensión unitaria resultante



Figura 4.16. Gráfica carga-deformación resultante

4.2.4. Discusión y análisis de la evaluación estructural

Como análisis de los resultados obtenidos, se visualiza en las gráficas y en la tabla resultante que el escenario de armado apilado con carga aplicada de 550 kg/cm² es la carga crítica donde existe un momento último que representa a una posible falla estructural para el escenario propuesto. Atendiendo a los principios de mecánica de materiales se puede

determinar que el armado propuesto puede soportar cargas de servicio inferiores a los 440 kg/cm² que representa un servicio de 80% del esfuerzo último de carga.

Con ayuda de la herramienta FEA se puede visualizar las zonas críticas donde ocurren los momentos últimos, éstos se presentan en la zona de las esquinas del panel por lo que pudiera ser reforzado en esa parte de la geometría. Sin embargo, los resultados del análisis estructural muestran un soporte considerablemente mayor al de los modelos comerciales que actualmente existen en el mercado de SUDS, como lo son las cajas reticulares que rondan entre los 200 kg/cm² de capacidad de carga.

4.3. ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL SISTEMA PARA EL CASO DE ESTUDIO

Para la validación de la metodología propuesta en capítulo 3, se eligió una zona de estudio que pudiera considerarse viable para la implementación del sistema de banquetas retenedoras. Para ello, se eligió el área que se encuentra entre Paseo Tollocan y las intersecciones con el Paseo Vicente Guerrero y el Paseo Universidad cercano a la Ciudad Universitaria en el municipio de Toluca, Estado de México.

4.3.1. Estudio de la cuenca urbana

4.3.1.1. Delimitación

En la figura 4.17. se retoma la ubicación de la zona de estudio seleccionada.



Figura 4.17. Ubicación de la zona de estudio

Atendiendo la metodología descrita en el capítulo 3, se sobrepuso la imagen georeferenciada de la zona de estudio. Se obtuvo el Modelo Digital de Elevaciones de la página de INEGI correspondiente a Toluca y con Sistemas de Información Geográfica (SIG) se obtuvieron las curvas de nivel que se muestran en la figura 4.18.



Figura 4.18. Topografía de la zona de estudio

Teniendo en cuenta la topografía y la traza urbana se realizó el trazo de subcuencas de manera manual. Las líneas de corriente se muestran en la figura 4.19.



Figura 4.19. Líneas de corriente de la cuenca

Una vez definidas las líneas de corriente, se identificaron las subcuencas y microcuencas que conforman el área de estudio obteniendo 42 microcuencas. Los resultados se muestran en la figura 4.20 y 4.21



Figura 4.20. Subcuencas y microcuencas de la zona de estudio

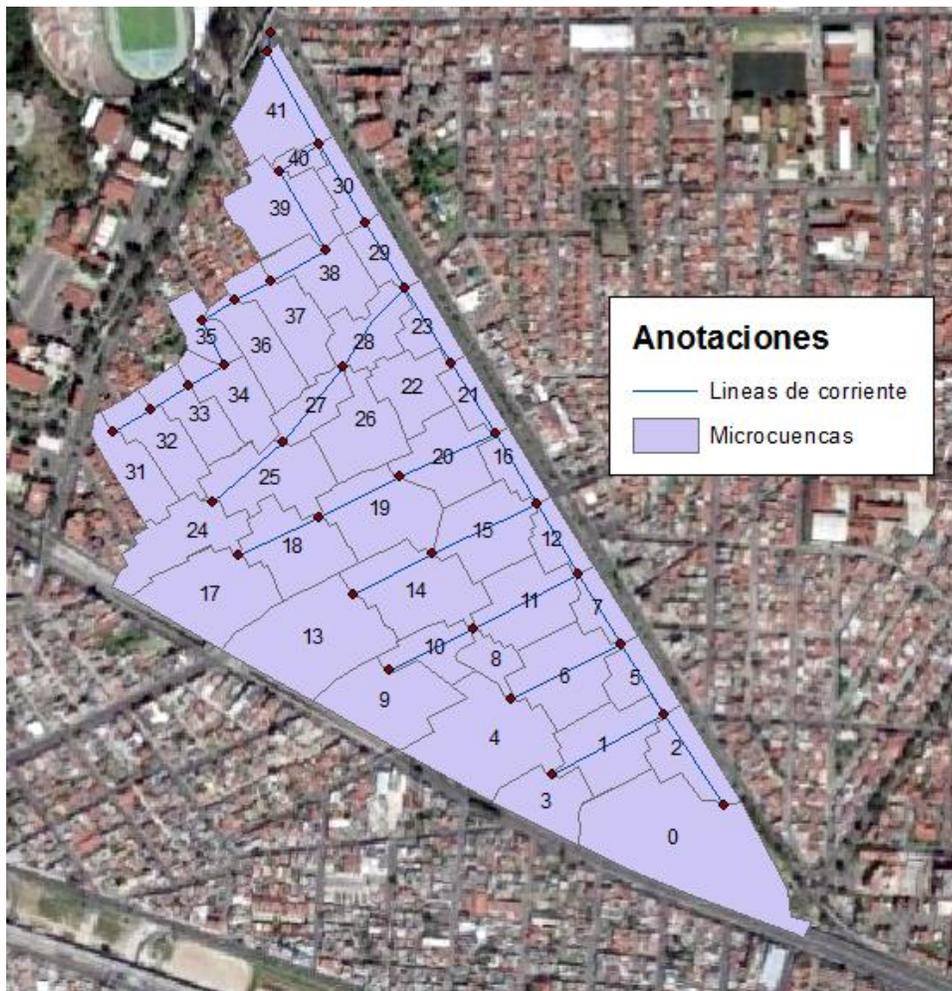


Figura 4.21. Microcuencas de la zona de estudio

4.3.1.2. Parámetros principales de la cuenca

a) Área, longitud y pendiente

El área y longitud de la red fueron calculadas a través del SIG, el ancho de la cuenca se obtuvo como la relación entre el área y la longitud al ser consideradas microcuencas con forma aproximada a un rectángulo.

Las pendientes de cada subcuenca con la expresión recomendada por el MAPAS. Como ejemplo, se muestra el cálculo para la microcuenca 1.

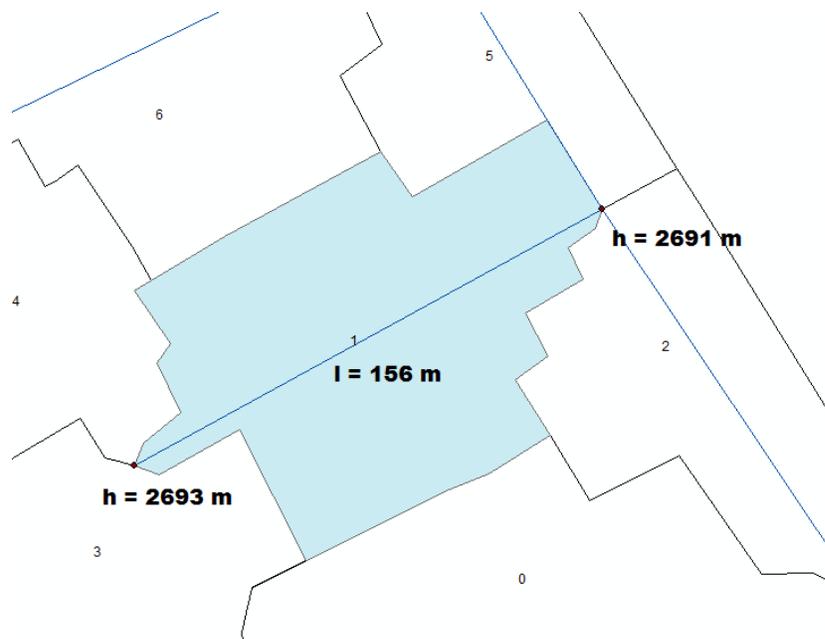


Figura 4.22. Cálculo de la pendiente para la microcuenca 1

$$S_{lc} = \frac{2693 \text{ m} - 2691 \text{ m}}{156 \text{ m}} = 0.0128 = 1.28\%$$

El procedimiento se realizó de la misma manera para todas las microcuencas de estudio. Los resultados de las pendientes obtenidas se muestran en la tabla 4.2.

b) Tiempo de concentración

El siguiente paso de acuerdo con el MAPAS (CONAGUA, 2016) es calcular el tiempo de concentración para las microcuencas a través de la expresión planteada por Kirpich (Aparicio, 2012).

Siguiendo con el ejemplo para la microcuenca 1, su tiempo de concentración es

$$t_{CS} = 0.0003245 \left(\frac{156}{\sqrt{0.0128}} \right)^{0.77} = 0.08 \text{ horas} \approx 5.09 \text{ minutos}$$

Al igual que el cálculo de la pendiente, de manera análoga se obtuvieron los tiempos de concentración para cada una de las microcuencas de estudio. Cabe destacar que se siguió la recomendación de la normatividad la cual define que no pueden considerarse tiempos de concentración menores a 5 minutos, por lo que, para las microcuencas con tiempos menores a este valor, se le ajusta al mínimo recomendado por el MAPAS. Los resultados de cada una de las microcuencas se presentan en la tabla 4.2.

c) Porcentaje de impermeabilización

Por último, como se mencionó en el capítulo correspondiente a los métodos, el porcentaje de impermeabilización considerado para este estudio se estableció en el valor de 95%, considerando que la zona de las cuencas se encuentra en casi en su totalidad urbanizada y además, también se buscó obtener los mayores escurrimientos posibles para tener escenarios de respuesta hidrológica críticos para la zona de estudio.

Tabla 4.2. Parámetros de las microcuencas de estudio

Cuenca	Area (ha)	Longitud de la red (m)	Ancho de cuenca (m)	Pendiente (%)	Tc (hrs)	Tc (min)	Tc_ajustado (min)	% Imp
0	2.92	190	153.52	1.05	0.11	6.39	6.39	95
1	1.03	156	66.10	1.28	0.08	5.09	5.09	95
2	0.70	136	51.71	0.94	0.09	5.15	5.15	95
3	0.69	66	104.12	1.73	0.04	2.34	5.00	95
4	1.73	132	130.83	2.46	0.06	3.48	5.00	95
5	0.51	101	50.82	1.16	0.06	3.79	5.00	95
6	1.15	152	75.40	2.52	0.06	3.84	5.00	95
7	0.42	102	41.35	1.13	0.06	3.84	5.00	95
8	0.33	99	33.83	1.75	0.05	3.18	5.00	95
9	1.20	99	120.81	2.64	0.05	2.71	5.00	95
10	0.52	115	45.29	2.19	0.05	3.27	5.00	95
11	1.04	148	70.31	1.95	0.07	4.16	5.00	95
12	0.43	102	42.30	1.25	0.06	3.71	5.00	95
13	1.81	141	128.30	2.21	0.06	3.81	5.00	95
14	1.34	110	121.65	2.15	0.05	3.19	5.00	95
15	1.06	143	74.24	2.85	0.06	3.50	5.00	95
16	0.41	101	40.99	1.15	0.06	3.80	5.00	95
17	1.34	103	130.06	2.75	0.05	2.75	5.00	95
18	1.07	111	96.20	2.61	0.05	2.98	5.00	95
19	1.20	112	107.34	2.46	0.05	3.07	5.00	95
20	0.94	131	71.78	2.79	0.05	3.30	5.00	95
21	0.41	104	39.01	1.47	0.06	3.54	5.00	95
22	0.70	90	78.26	2.46	0.04	2.59	5.00	95
23	0.45	109	40.96	1.25	0.07	3.90	5.00	95
24	0.99	147	67.68	1.73	0.07	4.33	5.00	95
25	1.15	115	99.80	2.46	0.05	3.13	5.00	95
26	0.93	107	86.76	1.16	0.07	3.96	5.00	95
27	0.49	119	41.35	2.52	0.05	3.18	5.00	95
28	0.70	125	56.11	1.25	0.07	4.34	5.00	95
29	0.44	96	46.16	1.23	0.06	3.56	5.00	95
30	0.45	113	39.61	1.32	0.07	3.92	5.00	95
31	0.62	108	57.22	1.25	0.06	3.88	5.00	95
32	0.79	54	146.88	2.19	0.03	1.83	5.00	95
33	0.66	55	120.36	1.95	0.03	1.94	5.00	95
34	0.76	52	146.30	1.25	0.04	2.21	5.00	95
35	0.43	64	66.75	2.21	0.03	2.08	5.00	95
36	0.76	48	158.06	2.15	0.03	1.68	5.00	95
37	0.88	50	176.37	2.61	0.03	1.61	5.00	95
38	0.88	79	111.77	2.46	0.04	2.34	5.00	95
39	1.14	113	100.47	2.79	0.05	2.94	5.00	95
40	0.17	61	27.12	1.47	0.04	2.35	5.00	95
41	1.01	132	76.89	1.15	0.08	4.67	5.00	95

4.3.1.3. Modelación hidrológica

La información pluviométrica para la zona de estudio se utilizaron las curvas intensidad-duración- periodo de retorno (IDTr) para periodos de retorno de 2, 5, 10 y 15 años que se obtuvieron en conjunto con el Ing. Juan Manuel Becerril Lara en el proyecto paralelo al presente trabajo. La información corresponde a la estación del Observatorio meteorológico “UAEM-Mariano Bárcena 15367”.

Las curvas construidas por el Ing. Juan Manuel Becerril Lara se muestran en la figura 4.23. La información procesada del análisis de los registros pluviométricos se muestra en la tabla 4.3, en ella se observan las intensidades de precipitación máximas anuales para diferentes duraciones estándar en el periodo comprendido de 1990-2018.

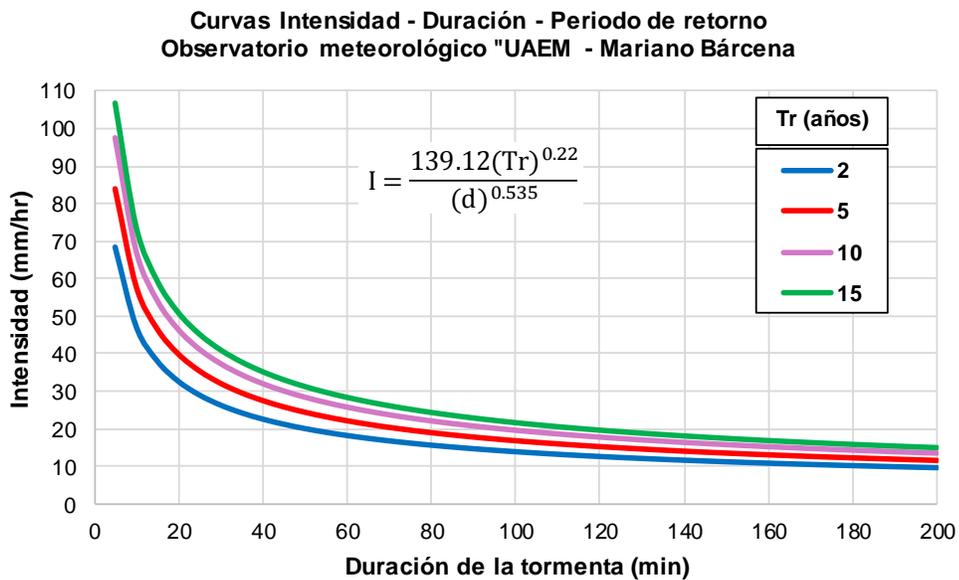


Figura 4.23. Curvas IDTr para la estación “UAEM-Mariano Bárcena” 15367

Tabla 4.3. Series de intensidades de precipitación máxima para diferentes duraciones (mm/h)

AÑO	Duraciones en minutos									
	5	10	15	20	30	45	60	80	100	120
1990	92.83	89.99	77.06	63.19	47.47	39.91	31.33	25.15	21.54	19.18
1991	69.12	56.64	48.00	39.54	28.72	21.68	17.32	13.59	11.46	10.65
1992	86.40	73.20	56.80	50.40	42.40	35.52	30.74	23.54	19.07	16.00
1993	76.80	81.60	78.80	66.12	53.80	43.07	33.13	25.17	20.22	17.77
1994	38.40	43.20	44.80	45.60	46.40	46.93	47.20	37.82	30.61	25.81
1995	38.40	27.60	28.40	28.80	29.20	29.47	22.60	16.95	14.28	12.81
1996	38.40	43.20	44.80	45.60	45.60	31.33	23.50	17.63	14.10	11.75
1997	48.96	50.76	50.64	40.98	28.12	23.47	23.60	22.68	18.86	15.75
1998	28.80	32.40	33.60	34.20	33.68	23.47	21.24	18.90	15.12	14.48
1999	100.80	63.00	51.60	43.50	36.40	29.89	23.60	18.19	15.40	13.00
2000	67.20	54.00	39.60	33.54	27.20	22.67	20.70	15.93	13.13	12.10
2001	91.20	57.00	56.40	50.55	38.20	30.17	24.72	18.85	15.20	13.90
2002	96.00	66.60	56.00	49.80	41.60	35.47	30.18	22.92	18.82	16.08
2003	48.00	54.00	40.54	34.20	34.80	24.53	23.60	23.70	19.20	16.00
2004	62.40	70.20	71.20	57.00	38.00	31.68	29.94	23.36	19.40	16.77
2005	96.00	61.92	42.88	33.36	31.40	22.88	18.50	15.21	12.72	11.10
2006	48.00	39.60	33.60	29.40	31.20	23.52	17.80	13.43	10.74	9.50
2007	28.80	32.40	32.00	26.22	18.84	13.23	11.48	9.38	8.88	8.95
2008	43.20	46.20	43.60	42.60	42.80	38.13	34.60	28.59	22.92	19.10
2009	28.80	32.40	33.60	31.80	27.60	22.93	18.90	15.42	13.52	11.64
2010	34.56	25.56	25.20	21.54	20.30	20.53	20.37	20.06	16.92	14.60
2011	96.00	79.20	62.40	48.00	39.20	37.07	36.60	31.43	26.34	22.45
2012	124.80	78.00	52.00	39.60	29.60	26.13	24.80	23.04	20.59	18.96
2013	76.80	56.40	43.20	37.20	34.80	29.07	23.80	20.55	16.64	14.51
2014	105.60	85.20	63.20	50.40	39.20	29.20	23.40	19.05	15.64	13.12
2015	96.00	75.60	62.40	50.40	46.80	39.47	32.80	26.41	21.42	18.09
2016	96.48	60.54	40.56	30.57	24.00	21.33	16.70	14.17	12.24	11.55
2017	91.20	58.20	43.60	45.60	32.00	34.19	26.20	19.73	15.78	13.15
2018	48.48	42.00	37.20	30.30	21.96	16.75	15.05	14.94	14.36	12.92

Siguiendo la metodología, se construyeron los hietogramas de diseño para los distintos periodos de retorno. En las tablas 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 se muestran los valores para la construcción del hietograma de diseño compuesta de 7 columnas.

Los datos de la primera columna corresponden al instante de tiempo, en este caso cada 5 minutos. La segunda corresponde a los datos de intensidad dadas por la curva IDTr asociada. La tercera columna corresponde a la precipitación acumulada dada por la multiplicación del instante de tiempo (columna 1) equivalente en horas por la intensidad de la precipitación (columna 2). La cuarta columna determina la precipitación neta en el instante de tiempo restando precipitación acumulada del instante anterior. La quinta columna corresponde a la intensidad parcial que se determina por el producto de la precipitación neta (columna 4) y el intervalo de tiempo seleccionado (5 minutos). La sexta columna es la aplicación del método, alternando los valores de la precipitación (columna 5) bajo el principio de que la precipitación más alta se da a la mitad de la duración de la tormenta (90 min) y de ahí se alternan los valores inferiores a lado derecho e izquierdo del valor principal. La columna 7 representa la distribución de las precipitaciones alternadas entre el intervalo de tiempo seleccionado (5 minutos).

Los valores para la construcción de hietogramas se muestran a continuación.

Tabla 4.4. Valores del hietograma de diseño para un $T_r = 2$ años.

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)	Int. Parcial Alternada (mm)
5	68.17	5.68	5.68	68.17	0.39	4.69
10	46.95	7.82	2.14	25.73	0.40	4.84
15	37.75	9.44	1.61	19.34	0.42	5.01
20	32.33	10.78	1.34	16.10	0.43	5.19
25	28.68	11.95	1.17	14.05	0.45	5.40
30	26.00	13.00	1.05	12.60	0.47	5.63
35	23.93	13.96	0.96	11.51	0.49	5.90
40	22.27	14.85	0.89	10.66	0.52	6.20
45	20.90	15.68	0.83	9.96	0.55	6.55
50	19.75	16.46	0.78	9.38	0.58	6.97
55	18.76	17.20	0.74	8.89	0.62	7.47
60	17.90	17.90	0.71	8.47	0.67	8.09
65	17.15	18.58	0.67	8.09	0.74	8.89
70	16.48	19.23	0.65	7.77	0.83	9.96
75	15.88	19.85	0.62	7.47	0.96	11.51
80	15.34	20.45	0.60	7.21	1.17	14.05
85	14.85	21.03	0.58	6.97	1.61	19.34
90	14.40	21.59	0.56	6.75	5.68	68.17
95	13.98	22.14	0.55	6.55	2.14	25.73
100	13.60	22.67	0.53	6.37	1.34	16.10
105	13.25	23.19	0.52	6.20	1.05	12.60
110	12.92	23.69	0.50	6.04	0.89	10.66
115	12.62	24.18	0.49	5.90	0.78	9.38
120	12.33	24.66	0.48	5.76	0.71	8.47
125	12.06	25.13	0.47	5.63	0.65	7.77
130	11.81	25.59	0.46	5.51	0.60	7.21
135	11.57	26.04	0.45	5.40	0.56	6.75
140	11.35	26.48	0.44	5.30	0.53	6.37
145	11.14	26.92	0.43	5.19	0.50	6.04
150	10.94	27.34	0.42	5.10	0.48	5.76
155	10.75	27.76	0.42	5.01	0.46	5.51
160	10.56	28.17	0.41	4.92	0.44	5.30
165	10.39	28.57	0.40	4.84	0.42	5.10
170	10.22	28.97	0.40	4.76	0.41	4.92
175	10.07	29.36	0.39	4.69	0.40	4.76
180	9.91	29.74	0.38	4.62	0.38	4.62

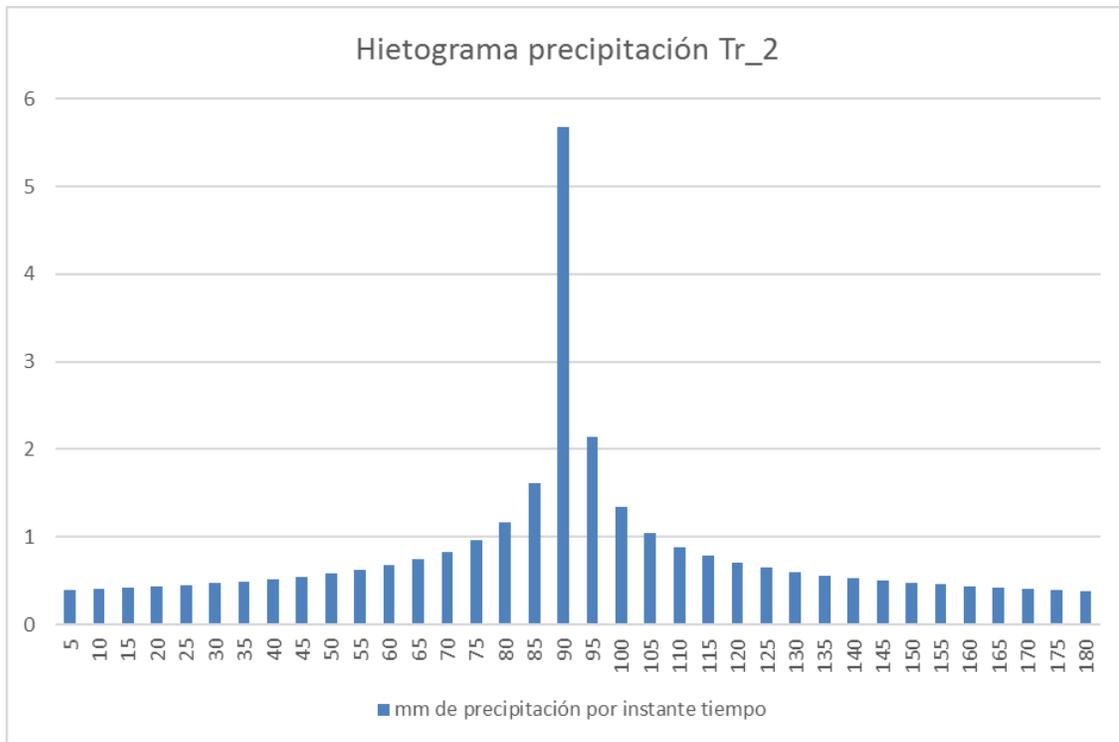


Figura 4.24. Hietograma de precipitación para un Tr = 2 años

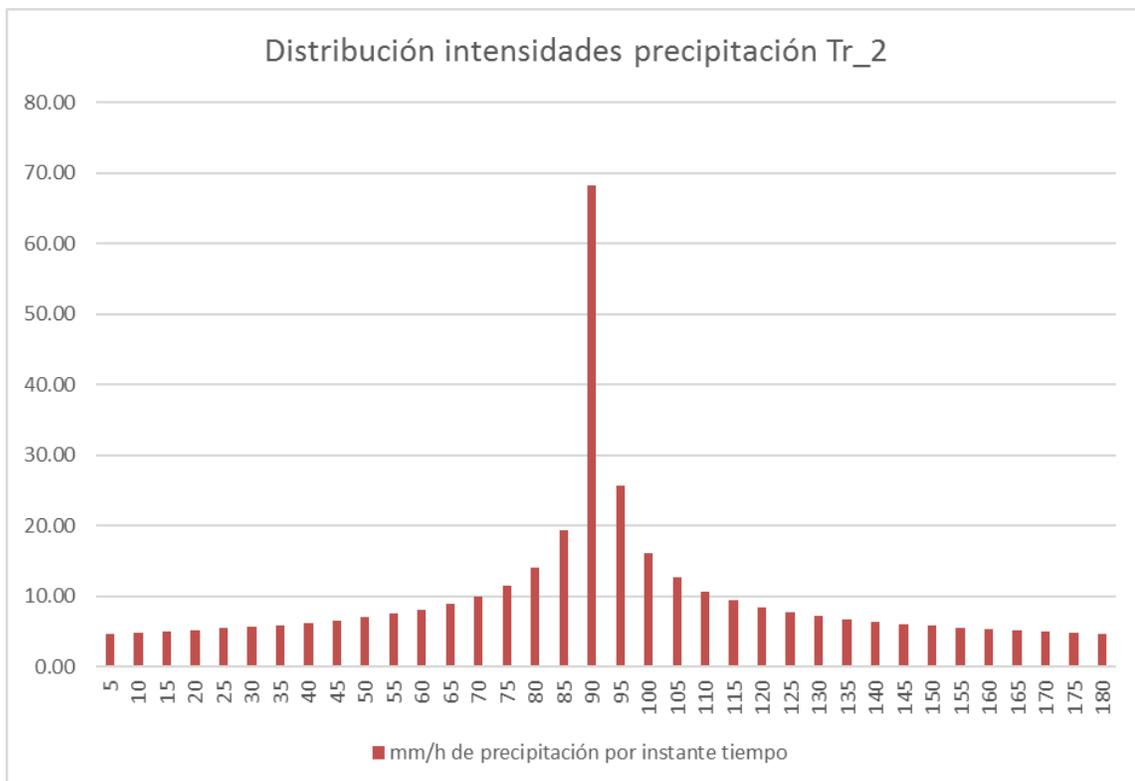


Figura 4.25. Distribución de la intensidad por instante de tiempo para Tr = 2 años

Tabla 4.5. Valores del hietograma de diseño para un $T_r = 5$ años.

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)	Int. Parcial Alternada (mm)
5	83.39	6.95	6.95	83.39	0.48	5.73
10	57.43	9.57	2.62	31.48	0.49	5.92
15	46.18	11.54	1.97	23.66	0.51	6.13
20	39.56	13.19	1.64	19.69	0.53	6.35
25	35.08	14.62	1.43	17.18	0.55	6.61
30	31.80	15.90	1.28	15.41	0.57	6.89
35	29.27	17.08	1.17	14.09	0.60	7.22
40	27.24	18.16	1.09	13.04	0.63	7.59
45	25.57	19.18	1.02	12.19	0.67	8.02
50	24.16	20.13	0.96	11.48	0.71	8.53
55	22.95	21.04	0.91	10.88	0.76	9.14
60	21.90	21.90	0.86	10.36	0.83	9.90
65	20.98	22.73	0.83	9.90	0.91	10.88
70	20.16	23.52	0.79	9.50	1.02	12.19
75	19.43	24.28	0.76	9.14	1.17	14.09
80	18.76	25.02	0.73	8.82	1.43	17.18
85	18.16	25.73	0.71	8.53	1.97	23.66
90	17.61	26.42	0.69	8.26	6.95	83.39
95	17.11	27.08	0.67	8.02	2.62	31.48
100	16.64	27.73	0.65	7.79	1.64	19.69
105	16.21	28.37	0.63	7.59	1.28	15.41
110	15.81	28.98	0.62	7.40	1.09	13.04
115	15.44	29.58	0.60	7.22	0.96	11.48
120	15.09	30.17	0.59	7.05	0.86	10.36
125	14.76	30.75	0.57	6.89	0.79	9.50
130	14.45	31.31	0.56	6.75	0.73	8.82
135	14.16	31.86	0.55	6.61	0.69	8.26
140	13.89	32.40	0.54	6.48	0.65	7.79
145	13.63	32.93	0.53	6.35	0.62	7.40
150	13.38	33.45	0.52	6.24	0.59	7.05
155	13.15	33.96	0.51	6.13	0.56	6.75
160	12.92	34.46	0.50	6.02	0.54	6.48
165	12.71	34.95	0.49	5.92	0.52	6.24
170	12.51	35.44	0.49	5.83	0.50	6.02
175	12.31	35.92	0.48	5.73	0.49	5.83
180	12.13	36.39	0.47	5.65	0.47	5.65

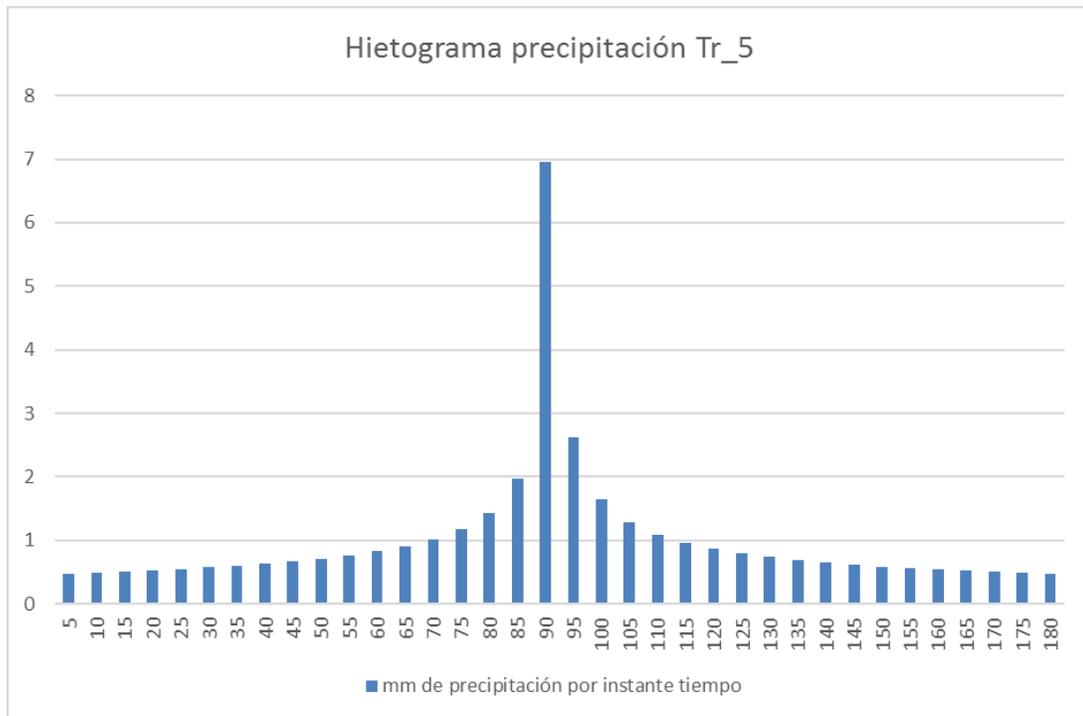


Figura 4.26. Hietograma de precipitación para un Tr = 5 años

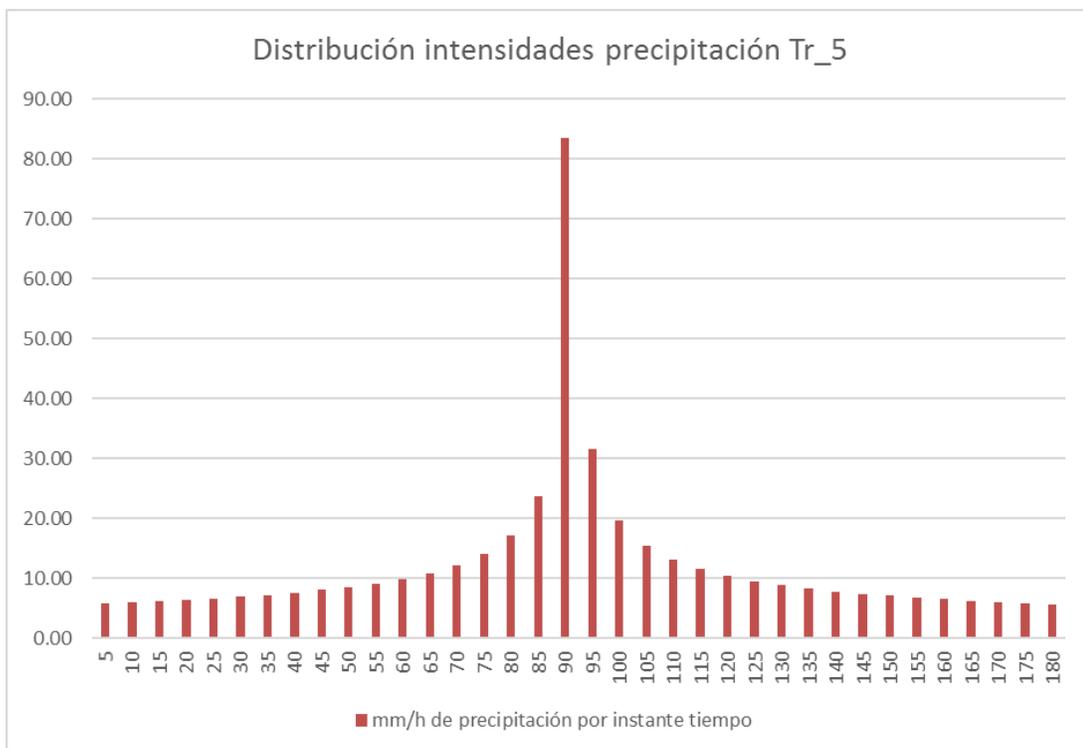


Figura 4.27. Distribución de la intensidad por instante de tiempo para Tr = 5 años

Tabla 4.6. Valores del hietograma de diseño para un $T_r = 10$ años.

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)	Int. Parcial Alternada (mm)
5	97.13	8.09	8.09	97.13	0.56	6.68
10	66.89	11.15	3.06	36.66	0.57	6.90
15	53.78	13.45	2.30	27.56	0.59	7.14
20	46.07	15.36	1.91	22.94	0.62	7.40
25	40.86	17.02	1.67	20.01	0.64	7.70
30	37.04	18.52	1.50	17.95	0.67	8.03
35	34.09	19.89	1.37	16.41	0.70	8.41
40	31.73	21.15	1.27	15.19	0.74	8.84
45	29.78	22.34	1.18	14.20	0.78	9.34
50	28.14	23.45	1.11	13.37	0.83	9.93
55	26.73	24.51	1.06	12.67	0.89	10.65
60	25.51	25.51	1.01	12.06	0.96	11.53
65	24.44	26.47	0.96	11.53	1.06	12.67
70	23.48	27.40	0.92	11.06	1.18	14.20
75	22.63	28.28	0.89	10.65	1.37	16.41
80	21.85	29.14	0.86	10.27	1.67	20.01
85	21.15	29.97	0.83	9.93	2.30	27.56
90	20.51	30.77	0.80	9.62	8.09	97.13
95	19.92	31.55	0.78	9.34	3.06	36.66
100	19.38	32.30	0.76	9.08	1.91	22.94
105	18.88	33.04	0.74	8.84	1.50	17.95
110	18.41	33.76	0.72	8.61	1.27	15.19
115	17.98	34.46	0.70	8.41	1.11	13.37
120	17.57	35.14	0.68	8.21	1.01	12.06
125	17.19	35.81	0.67	8.03	0.92	11.06
130	16.83	36.47	0.65	7.86	0.86	10.27
135	16.49	37.11	0.64	7.70	0.80	9.62
140	16.17	37.74	0.63	7.54	0.76	9.08
145	15.87	38.35	0.62	7.40	0.72	8.61
150	15.58	38.96	0.61	7.27	0.68	8.21
155	15.31	39.55	0.59	7.14	0.65	7.86
160	15.05	40.14	0.58	7.01	0.63	7.54
165	14.80	40.71	0.57	6.90	0.61	7.27
170	14.57	41.28	0.57	6.78	0.58	7.01
175	14.34	41.83	0.56	6.68	0.57	6.78
180	14.13	42.38	0.55	6.58	0.55	6.58

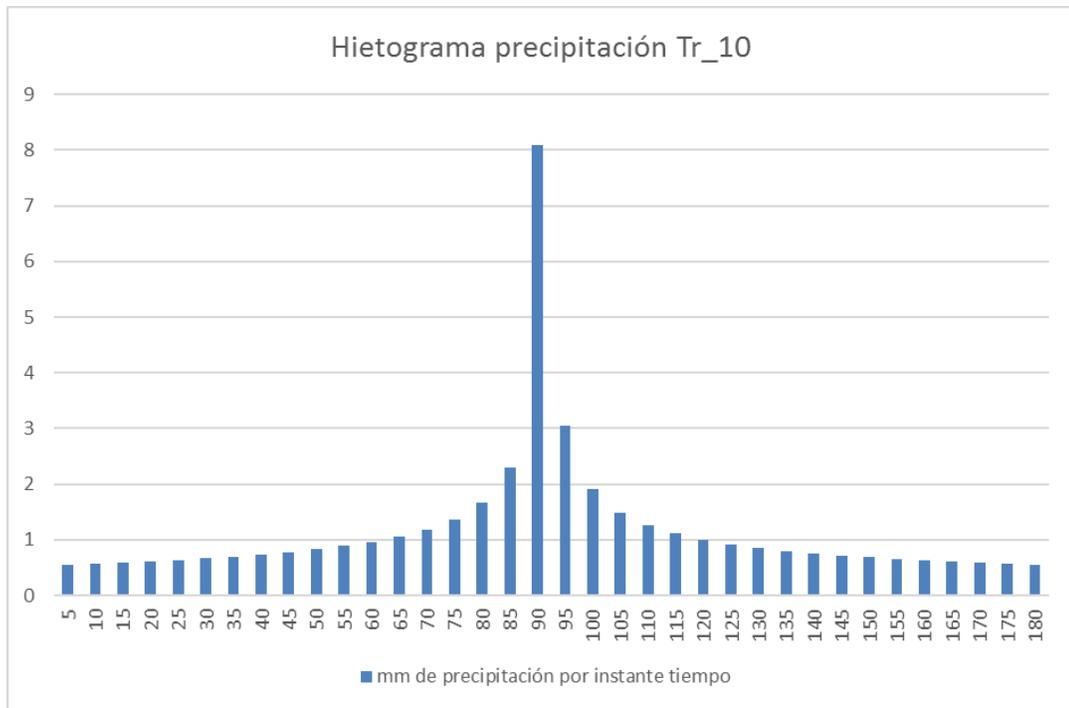


Figura 4.28. Hietograma de precipitación para un Tr = 10 años

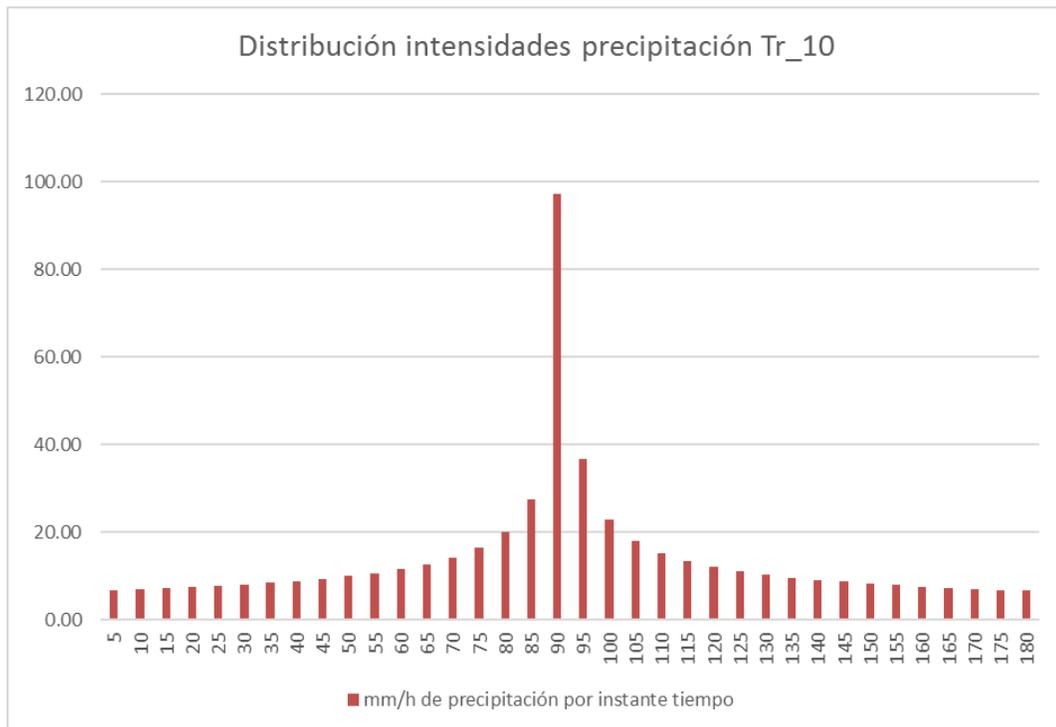


Figura 4.29. Distribución de la intensidad por instante de tiempo para Tr = 10 años

Tabla 4.7. Valores del hietograma de diseño para un $T_r = 10$ años.

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)	Int. Parcial Alternada (mm)
5	106.19	8.85	8.85	106.19	0.61	7.30
10	73.14	12.19	3.34	40.08	0.63	7.54
15	58.80	14.70	2.51	30.13	0.65	7.80
20	50.37	16.79	2.09	25.08	0.67	8.09
25	44.67	18.61	1.82	21.88	0.70	8.41
30	40.50	20.25	1.64	19.63	0.73	8.78
35	37.28	21.74	1.49	17.94	0.77	9.19
40	34.69	23.13	1.38	16.60	0.81	9.66
45	32.56	24.42	1.29	15.52	0.85	10.21
50	30.77	25.64	1.22	14.62	0.90	10.86
55	29.23	26.79	1.15	13.85	0.97	11.64
60	27.89	27.89	1.10	13.19	1.05	12.61
65	26.72	28.94	1.05	12.61	1.15	13.85
70	25.67	29.95	1.01	12.10	1.29	15.52
75	24.74	30.92	0.97	11.64	1.49	17.94
80	23.89	31.86	0.94	11.23	1.82	21.88
85	23.13	32.76	0.90	10.86	2.51	30.13
90	22.43	33.64	0.88	10.52	8.85	106.19
95	21.78	34.49	0.85	10.21	3.34	40.08
100	21.19	35.32	0.83	9.92	2.09	25.08
105	20.64	36.12	0.81	9.66	1.64	19.63
110	20.13	36.91	0.78	9.42	1.38	16.60
115	19.66	37.67	0.77	9.19	1.22	14.62
120	19.21	38.42	0.75	8.98	1.10	13.19
125	18.79	39.15	0.73	8.78	1.01	12.10
130	18.40	39.87	0.72	8.59	0.94	11.23
135	18.03	40.57	0.70	8.41	0.88	10.52
140	17.68	41.26	0.69	8.25	0.83	9.92
145	17.35	41.93	0.67	8.09	0.78	9.42
150	17.04	42.59	0.66	7.94	0.75	8.98
155	16.74	43.24	0.65	7.80	0.72	8.59
160	16.46	43.88	0.64	7.67	0.69	8.25
165	16.19	44.51	0.63	7.54	0.66	7.94
170	15.93	45.13	0.62	7.42	0.64	7.67
175	15.68	45.74	0.61	7.30	0.62	7.42
180	15.45	46.34	0.60	7.19	0.60	7.19

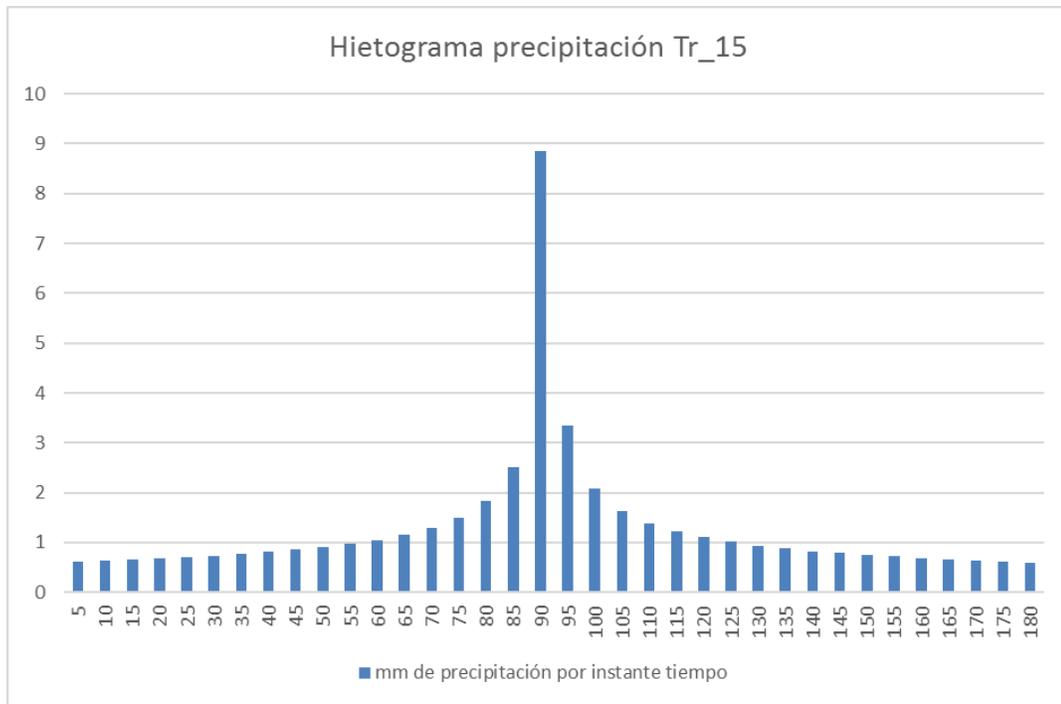


Figura 4.30. Hietograma de precipitación para un Tr = 15 años

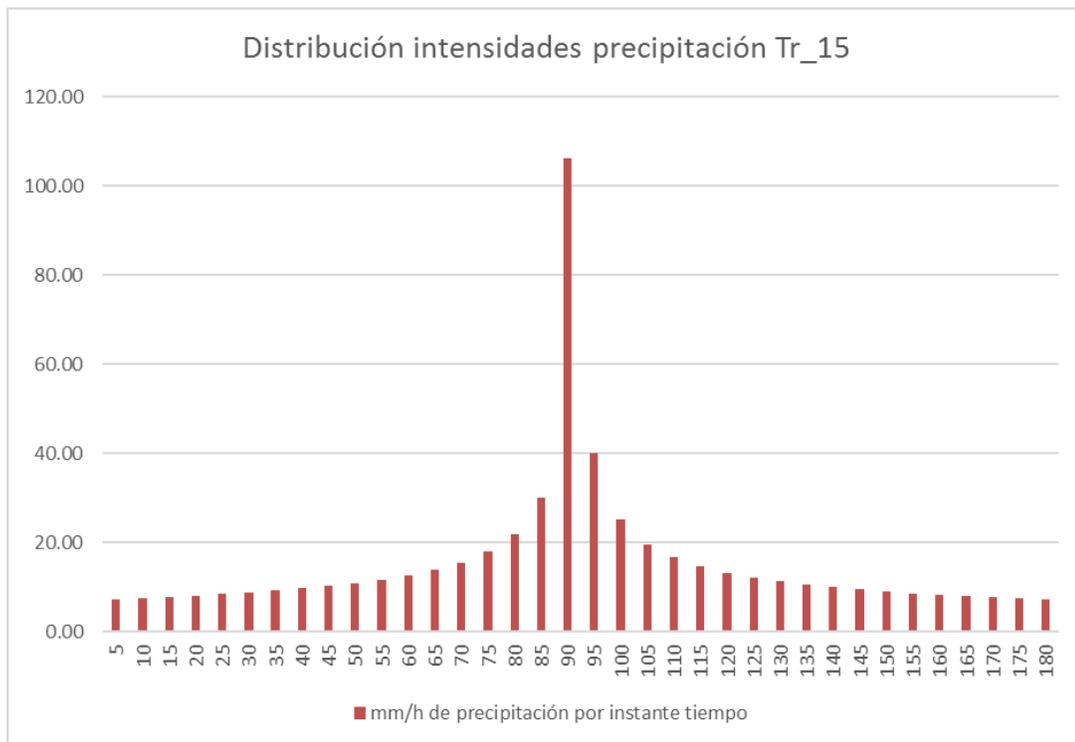


Figura 4.31. Distribución de la intensidad por instante de tiempo para Tr = 15 años

Siguiendo la metodología se implementó el software SWMM para obtener los hidrogramas de cada una de las 42 microcuencas. Como validación de los hidrogramas resultantes, se comparó el hidrograma de la cuenca con mayor superficie, que corresponde a la *cuenca 0* (ver tabla 4.2), con el programa desarrollado por el Ing. Juan Manuel Becerril denominado “*Chaak*”, teniendo prácticamente el mismo resultado, validando el proceso realizado con el software SWMM. La comparación se muestra en la figura 4.32.

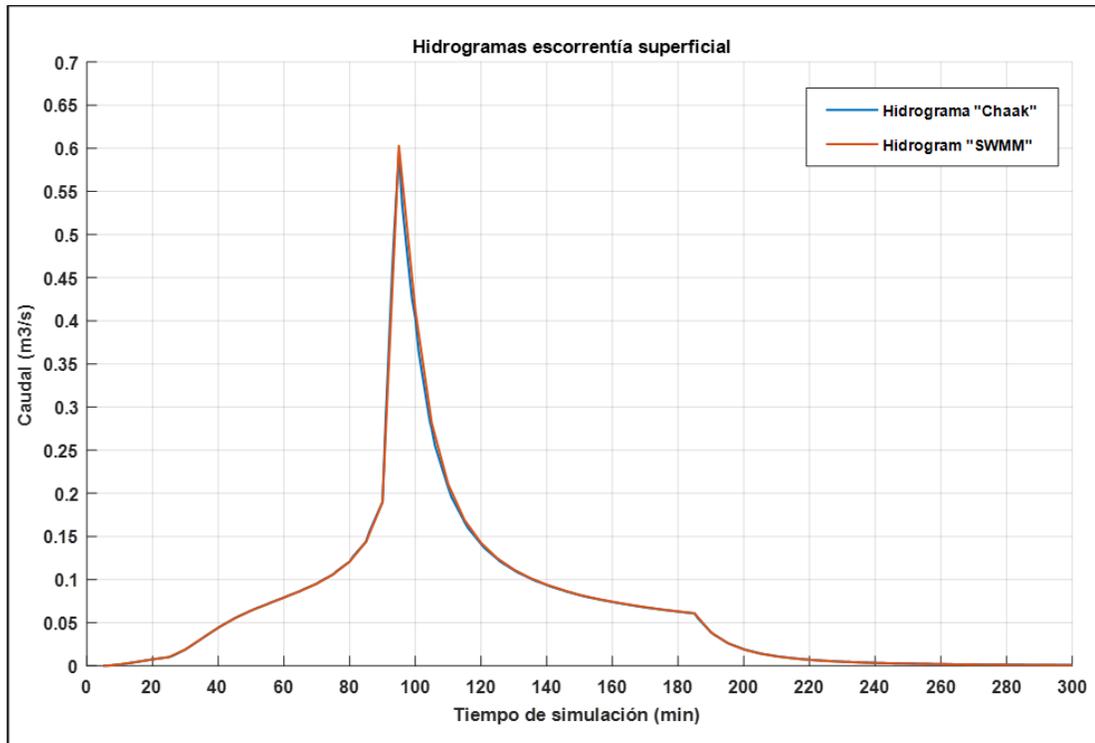


Figura 4.32. Comparación de hidrograma generado por SWMM y Chaak

La cuenca seleccionada para el análisis de CFD siguiendo la metodología del capítulo 3 corresponde con la número 13 con un área aproximada de 1.81 hectáreas cuyo hidrograma se presenta en la figura 4.33. El conjunto de hidrogramas de las microcuencas estudiadas se encuentra en los anexos del presente trabajo.

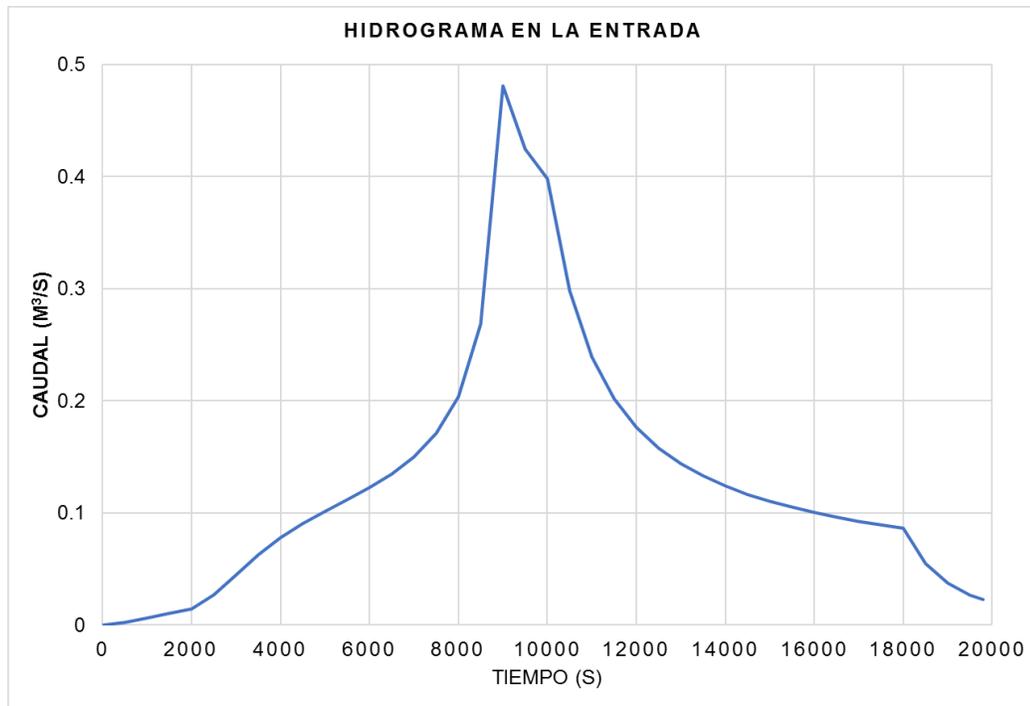


Figura 4.33. Hidrograma seleccionado para la simulación CFD

4.3.2. Resultados de la simulación CFD

En este apartado se muestran los resultados de la simulación realizada con el software ANSYS – Fluent. Se iniciará mostrando los resultados por escenario simulado. Como escenarios simulados se entiende cada uno de los modelos de estructura de control que se propusieron, los cuales se muestran en la figura 4.34.

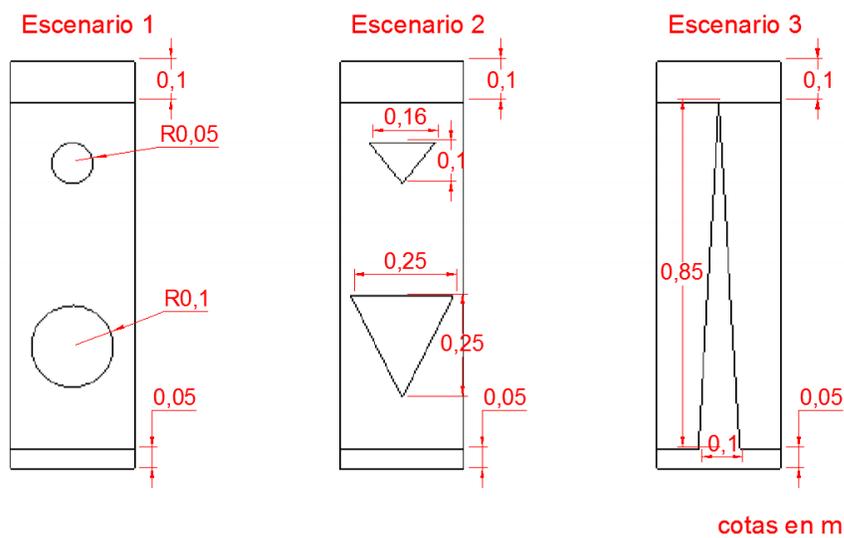


Figura 4.34. Escenarios simulados con ANSYS – Fluent

Como se mencionó en el capítulo anterior, se priorizó el análisis de resultados con hojas de cálculo para obtener y evaluar los hidrogramas, sin embargo, una primera visualización del comportamiento de cada escenario se hizo al observar gráficamente los vectores de velocidad para el tiempo de 9000 segundos, instante más cercano al que se presenta el caudal pico del hidrograma. En las figuras 4.35, 4.36 y 4.37 se muestran dichos vectores.

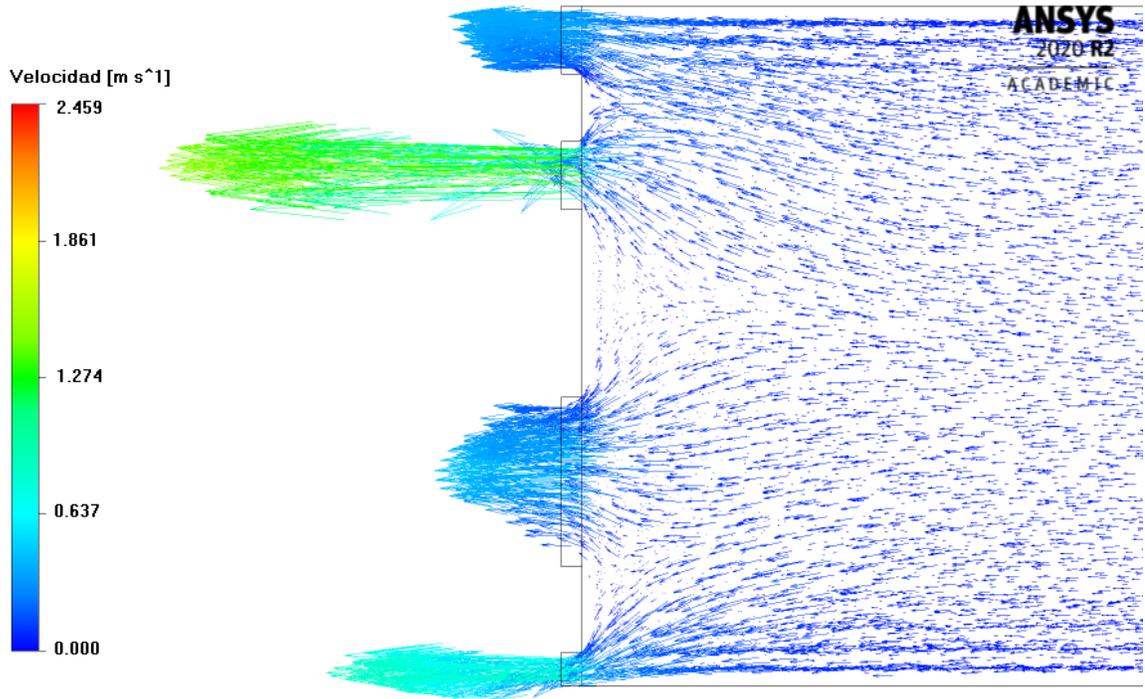


Figura 4.35. Campo de velocidades para el escenario 1 en el instante de 9000 segundos

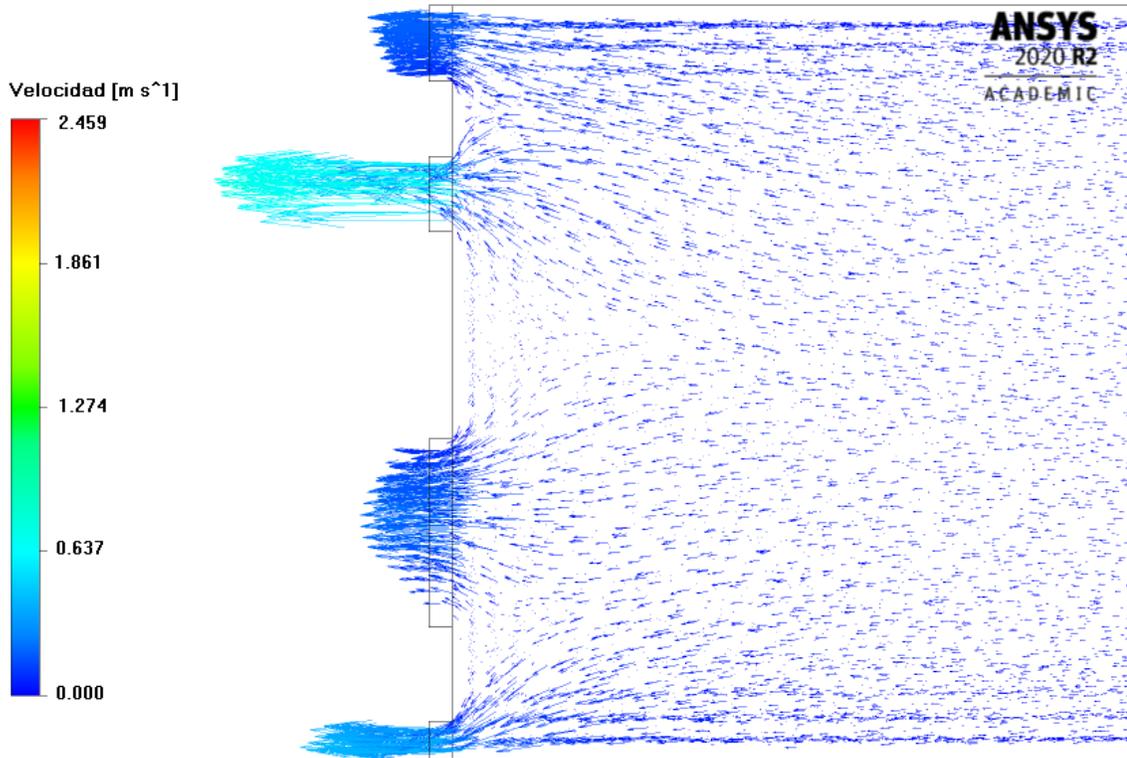


Figura 4.36. Campo de velocidades para el escenario 2 en el instante de 9000 segundos

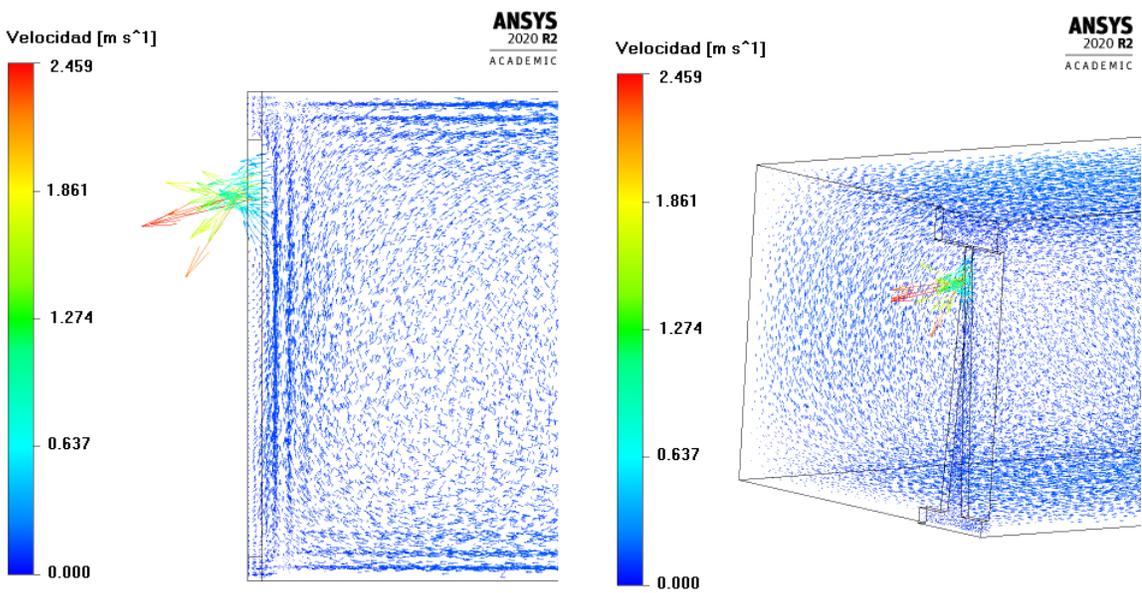


Figura 4.37. Campo de velocidades para el escenario 3 en el instante de 9000 segundos

En un primer análisis de los campos de velocidades mostrados en las figuras anteriores, se puede observar que el comportamiento del escenario 1 y 2 es relativamente parecido además de que presentan valores de velocidad más bajos en comparación con los del escenario 3 indicando que en ese instante se está logrando el propósito que es retener el mayor caudal posible. El siguiente análisis correspondió a revisar los hidrogramas generados en la salida de cada escenario.

4.3.2.1. Escenario 1. Estructura de control con orificios circulares

Cabe recordar que la condición de entrada se realizó a través de la transformación de los valores del hidrograma de entrada en m^3/s a unidades de flujo másico en kg/s considerando como valor de la densidad del agua a $1000 kg/m^3$. Como resultados, se obtuvieron valores de flujo másico donde se realizó el procedimiento inverso para obtener valores de caudal en unidades de m^3/s . En la figura 4.38 se muestra el hidrograma de entrada comparado con el hidrograma de salida resultante de la simulación.

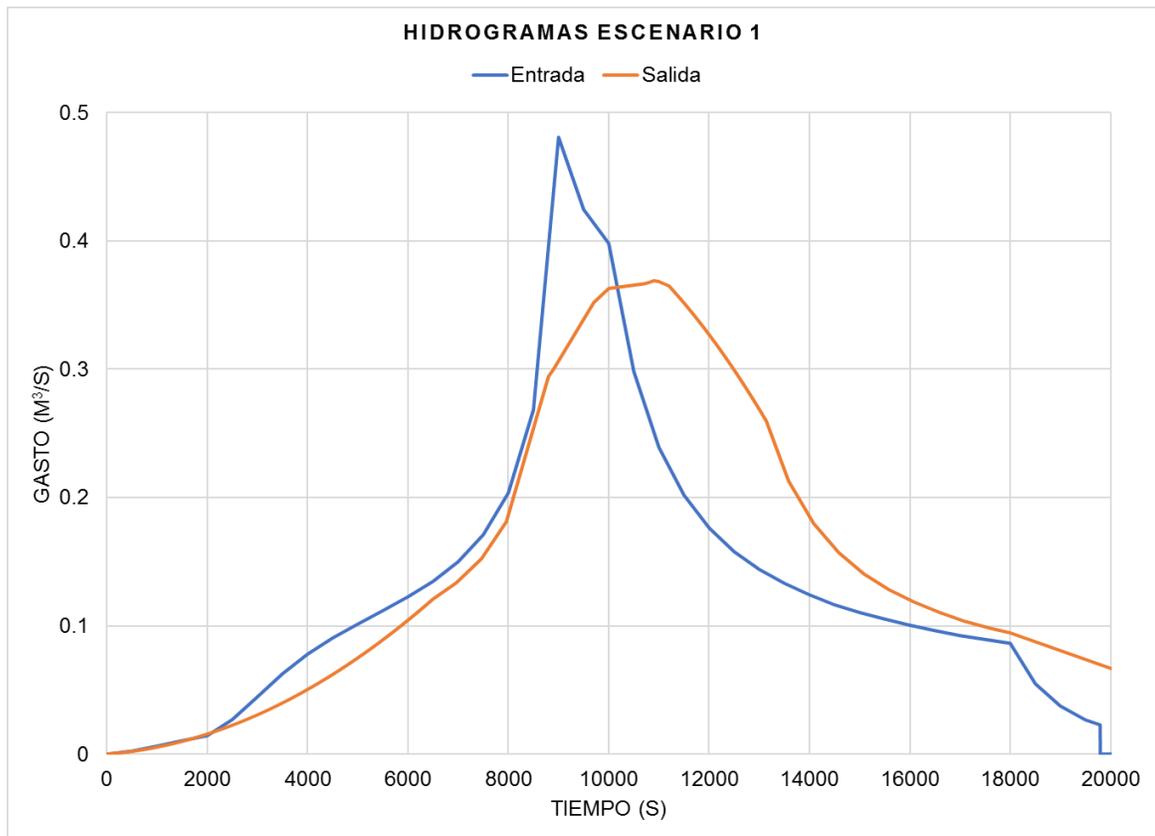


Figura 4.38. Comparación de hidrograma de entrada vs salida para el escenario 1.

La comparación de los hidrogramas correspondientes a la propuesta de estructura de control con orificios circulares, muestran que se logra mitigar el pico del hidrograma de entrada llevándolo de un gasto aproximado de $0.481 \text{ m}^3/\text{s}$ a uno cercano a $0.369 \text{ m}^2/\text{s}$, además de también retardar el tiempo en que se presenta el gasto pico, por un lado, el gasto de entrada se tiene en el minuto 150 aproximadamente, mientras que el gasto pico en la salida se presenta casi en el minuto 180.

En cuanto al nivel presentado en el tanque se verificó que no se rebasara el límite de un metro disponible, en la figura 4.39 se muestra el nivel que existe en el tanque respecto al tiempo de simulación.

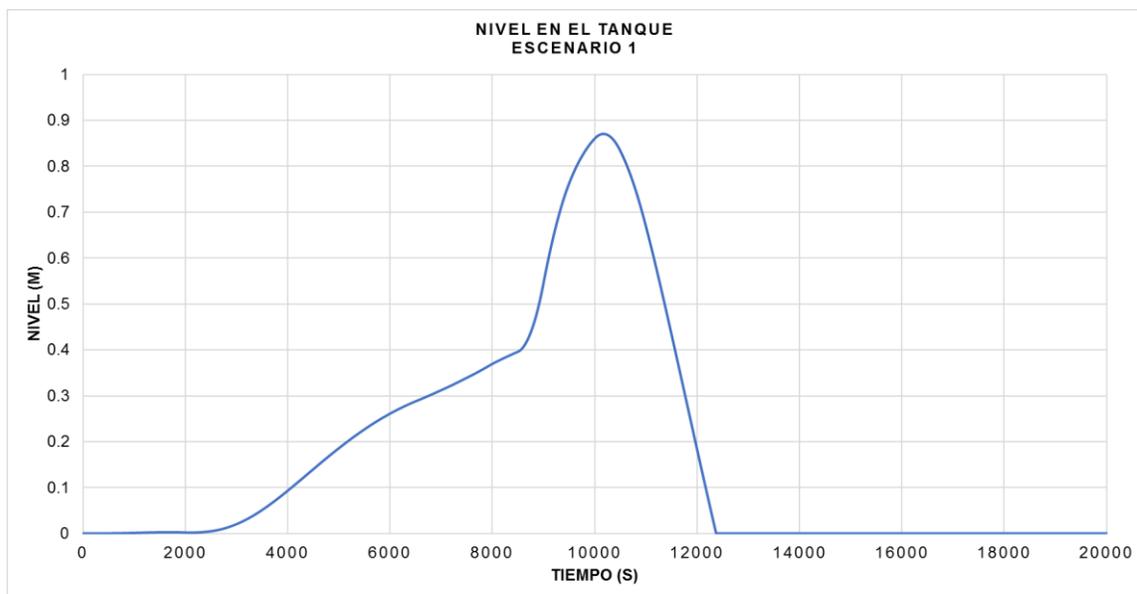


Figura 4.39. Nivel en el tanque para el escenario 1

La gráfica anterior indica que el nivel máximo que se alcanza en el escenario 1 es de 0.87 metros que corresponde a un volumen máximo de aproximadamente 4.35 m^3 . Además, el proceso del vaciado del tanque puede durar un poco más de 200 minutos una vez iniciado el evento hidrológico por lo que el sistema puede soportar un nuevo evento en un periodo relativamente corto.

4.3.2.2. Escenario 2. Estructura de control con orificios triangulares

En la figura 4.40 se muestra el hidrograma de entrada comparado con el hidrograma de salida resultante de la simulación.

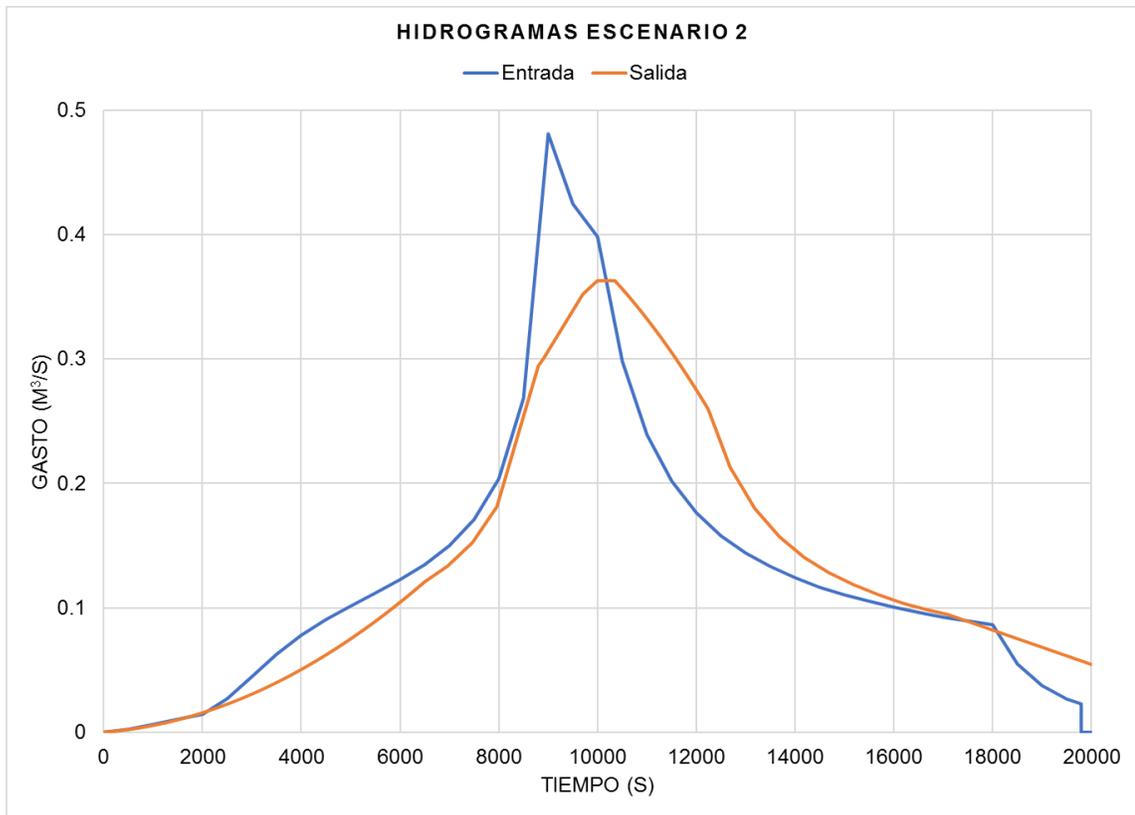


Figura 4.40. Comparación de hidrograma de entrada vs salida para el escenario 2.

La comparación de los hidrogramas correspondientes a la propuesta de estructura de control con orificios triangulares, muestran que se logra mitigar el pico del hidrograma de entrada llevándolo de un gasto aproximado de 0.481 m³/s a uno cercano a 0.363 m³/s, comportamiento parecido a la estructura 1, sin embargo, el tiempo de retardo es menor en la estructura 2 ya que el gasto pico de salida se presenta en el minuto 166, es decir, sólo se retarda en 16 minutos el pico.

En cuanto al nivel presentado en el tanque se verificó que no se rebasara el límite de un metro disponible, en la figura 4.41 se muestra el nivel que existe en el tanque respecto al tiempo de simulación.

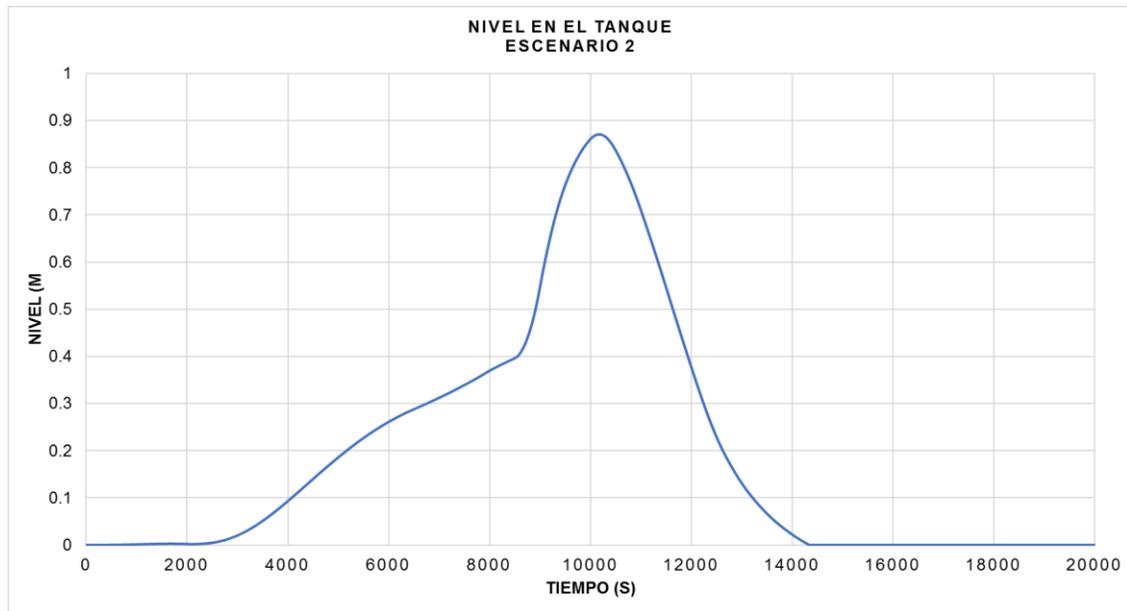


Figura 4.41. Nivel en el tanque para el escenario 2.

La gráfica anterior indica que el nivel máximo que se alcanza en el escenario 1 es de 0.88 metros que corresponde a un volumen máximo de aproximadamente 4.4 m³. Además, el proceso del vaciado del tanque puede durar un poco más de 230 minutos una vez iniciado el evento hidrológico por lo que el sistema puede soportar un nuevo evento en un periodo relativamente corto.

4.3.2.3. Escenario 3. Estructura de control con orificio triangular

En la figura 4.42 se muestra el hidrograma de entrada comparado con el hidrograma de salida resultante de la simulación.

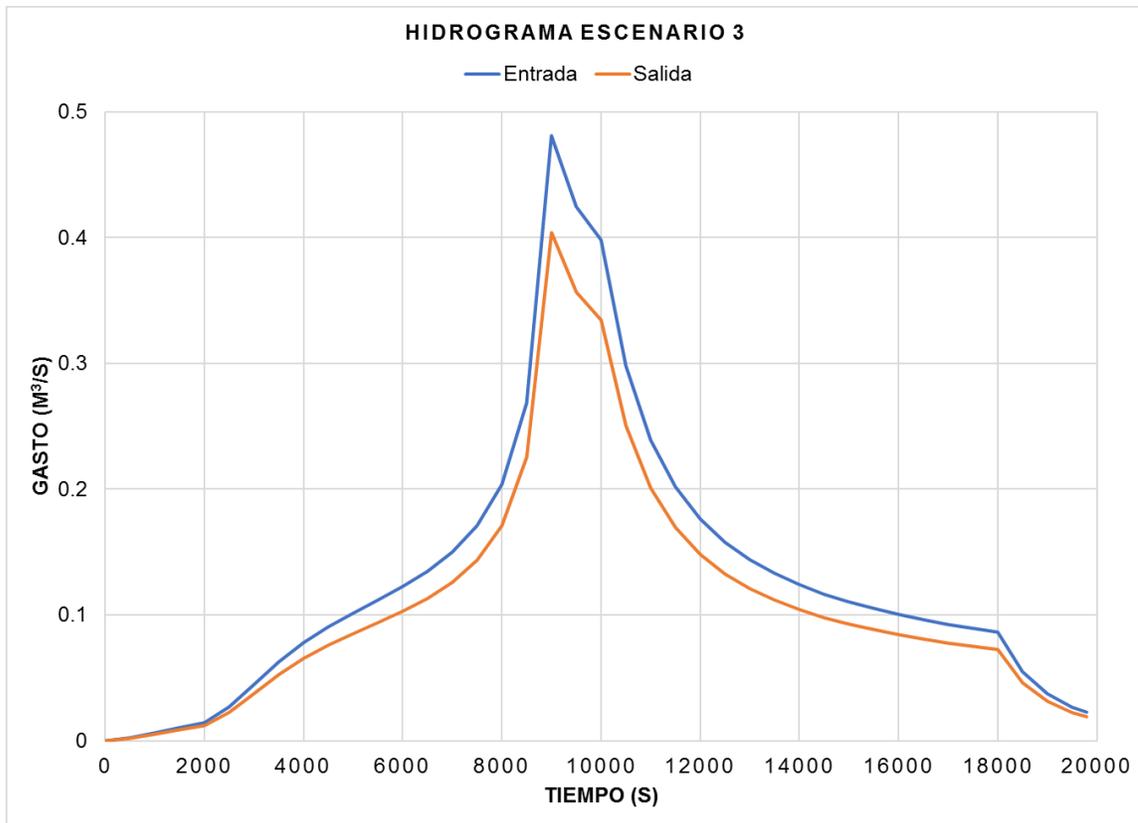


Figura 4.42. Comparación de hidrograma de entrada vs salida para el escenario 3.

El escenario 3 tuvo un comportamiento diferente a los dos escenarios anteriores, no se identificó aportación alguna porque no hay mitigación del gasto pico, en la figura 4.42 se observa que el hidrograma de salida es una simplificación del hidrograma de entrada por lo que el tanque sólo retiene la diferencia del gasto de entrada y el gasto de salida, comprobando que la estructura de control no aporta beneficio de retardo en tiempo.

En cuanto al nivel presentado en el tanque se verificó que no se rebasara el límite de un metro disponible, en la figura 4.43 se muestra el nivel que existe en el tanque respecto al tiempo de simulación.

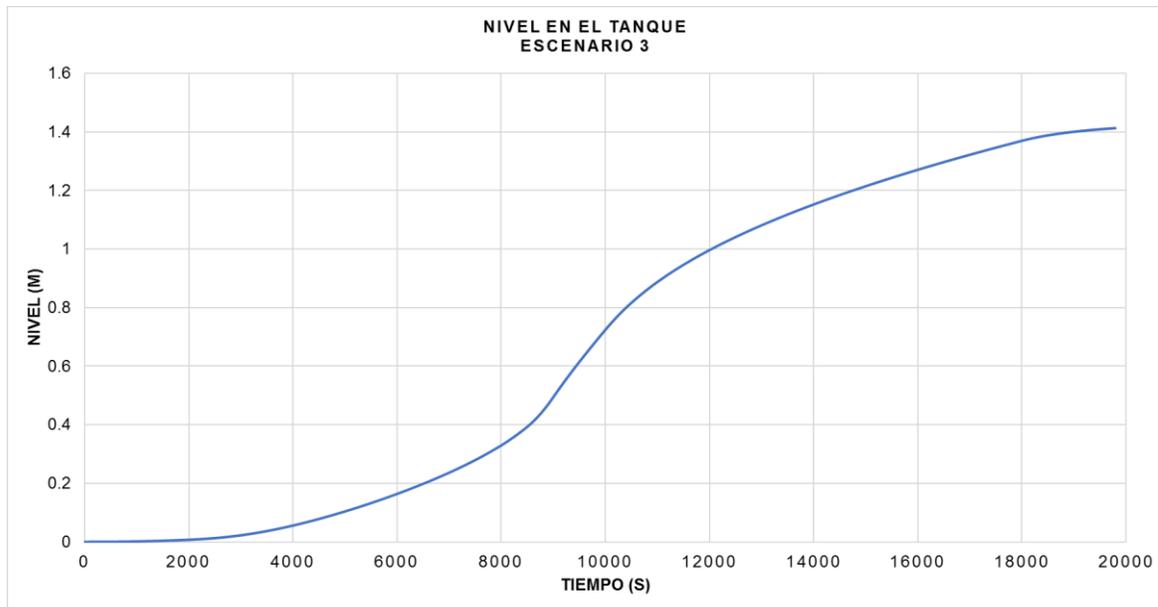


Figura 4.43. Nivel en el tanque para el escenario 3.

La gráfica de la figura 4.43 correspondiente al nivel en el tanque para el escenario 3 coincide con lo que indica la comparación de hidrogramas, el nivel en el tanque incluso supera el nivel máximo comprobando su nulo beneficio.

4.3.2.4. Discusión de resultados para los escenarios simulados

Los resultados de la simulación con CFD para cada uno de los escenarios presentaron distintos comportamientos, siendo los escenarios 1 y 2 los que ofrecen un cierto grado de mitigación al hidrograma de entrada, por su parte, el escenario 3 no presenta beneficio alguno, pudiendo descartar este tipo de estructura de control.

De los escenarios que funcionan, el escenario 1 muestra un mayor tiempo de retención al lograr que el hidrograma pico se presente con un 24% menos de gasto en comparación con el gasto pico de entrada y además se logra un desfase de 30 minutos entre salida y entrada. El vaciado del tanque se realiza por el minuto 200, lo que proporciona un cierto margen de seguridad, ya que después de este tiempo, el sistema puede volver a funcionar para otro evento hidrológico que pudiera llegar a presentarse.

Por su parte, el escenario 2 proporciona casi el mismo beneficio en cuanto a la mitigación del gasto en su hidrograma de salida, sin embargo, el tiempo de retardo es de 16 min, un poco más de la mitad en comparación del escenario 1. En cuanto al vaciado del tanque, este tiene una velocidad menor en comparación del escenario 1, llevando su vaciado hasta los 230 minutos después del comienzo del evento hidrológico.

Con base en los resultados obtenidos, puede considerarse adaptarse este tipo de escenarios a cuencas donde se requiera tener una mitigación del gasto pico, pero con diferentes tiempos de vaciado en los depósitos, para zonas bajas, pudiera considerarse implementar estructuras de control como el escenario 1 con descarga controlada pero rápida y para zonas media – altas, estructuras de control con orificios triangulares como el escenario 2 con descarga controlada pero lenta.

Como se puede observar en las gráficas correspondientes a los niveles en los tanques, existe un margen significativo que aún se puede optimizar para lograr un uso eficiente del sistema de retención. Por ello, se decidió utilizar la estructura de control correspondiente al escenario 1, con orificios circulares, para llevar a cabo algunas modificaciones que permitieran realizar esa optimización en el nivel del tanque. Se hicieron dos simulaciones, escenario 4 y escenario 5, modificando las dimensiones de las estructuras de descarga, las cuales se detallan en el siguiente apartado.

4.3.2.5. Optimización de la estructura de control con orificios circulares

Las modificaciones realizadas se basaron en los resultados del escenario 1 con el objetivo de lograr un comportamiento similar, por ello para un escenario 4, se propusieron las dimensiones de la estructura de control mostrada en la figura 4.44.

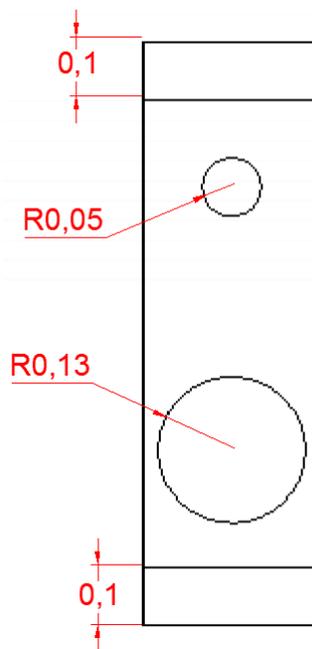


Figura 4.44. Estructura de control correspondiente al escenario 4

El hidrograma resultado de la simulación correspondiente al escenario 4 se muestra en la figura 4.45.

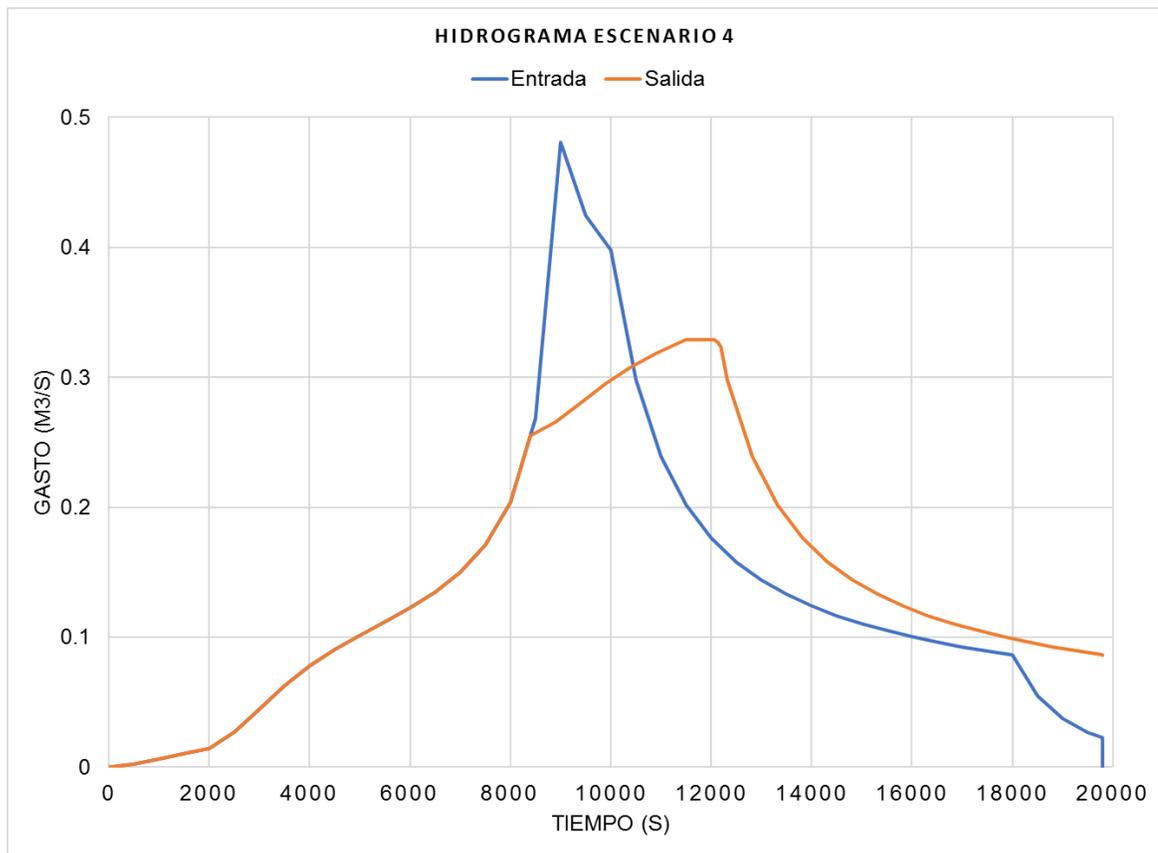


Figura 4.45. Comparación de hidrogramas de entrada vs salida para el escenario 4

La gráfica 4.45 muestra una tendencia similar al escenario 1, se identifica que con el aumento en las dimensiones del orificio con mayor diámetro se logra evacuar el mismo gasto de entrada desde el comienzo del evento hidrológico hasta el minuto 140 aproximadamente, teniendo un 100% de espacio disponible para el aumento en el hidrograma hasta el pico, a partir de éste tiempo se comienza con la retención, logrando mitigar el pico en un 33% aproximadamente, bajando de $0.481 \text{ m}^3/\text{s}$ a $0.329 \text{ m}^3/\text{s}$. En la figura 4.46 se presenta el nivel del tanque respecto al tiempo.

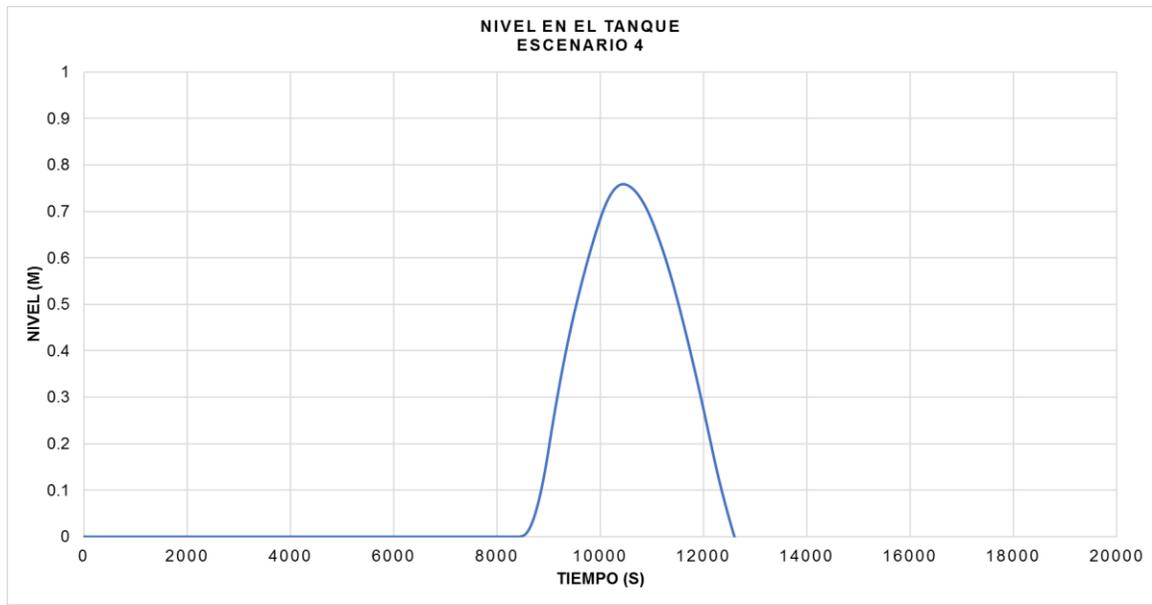


Figura 4.46. Nivel en el tanque para el escenario 4

El nivel en el tanque puede llegar hasta casi 0,8 metros, un nivel inferior al del escenario 1, concluyendo que el presente escenario, si bien logra una mitigación mejor, se tiene un desperdicio en cuanto al volumen disponible del tanque.

Por lo anterior, observando el comportamiento presentado por el escenario 4, se modificaron las dimensiones de los dos últimos orificios, ahora disminuyendo su área para compensar lo aumentado en el escenario 4, teniendo así la propuesta de un escenario 5 simulado. Las dimensiones finales de la estructura se muestran en la figura 4.47.

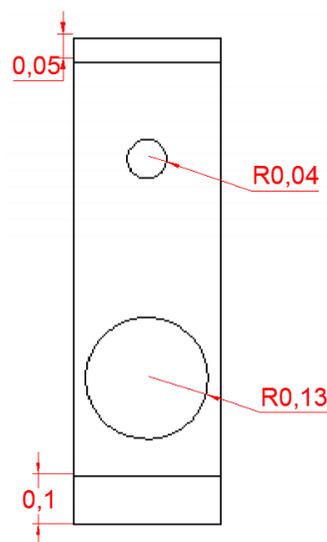


Figura 4.47. Estructura de control correspondiente al escenario 5

El hidrograma resultado de la simulación correspondiente al escenario 5 se muestra en la figura 4.49.

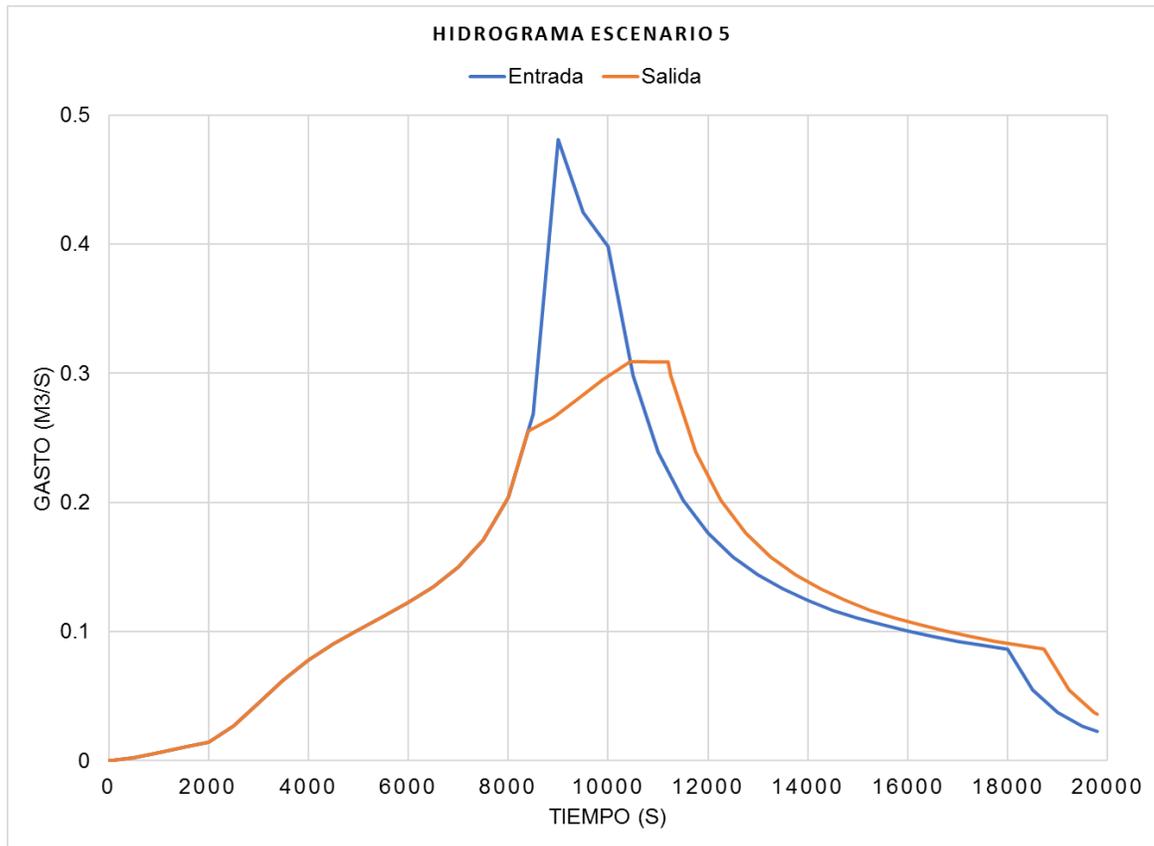


Figura 4.48. Comparación de hidrogramas de entrada vs salida para el escenario 4

La gráfica 4.48 muestra una tendencia similar al escenario 4, se identifica que con la disminución en las dimensiones de los dos últimos orificios se logra evacuar el mismo gasto de entrada desde el comienzo del evento hidrológico hasta el minuto 140 aproximadamente, teniendo un 100% de espacio disponible para el aumento en el hidrograma hasta el pico, a partir de éste tiempo se comienza con la retención, logrando mitigar el pico en un 36% aproximadamente, bajando de $0.481 \text{ m}^3/\text{s}$ a $0.309 \text{ m}^3/\text{s}$, aunque el pico se presenta en un tiempo menor al del escenario 4. En la figura 4.49 se presenta el nivel del tanque respecto al tiempo.

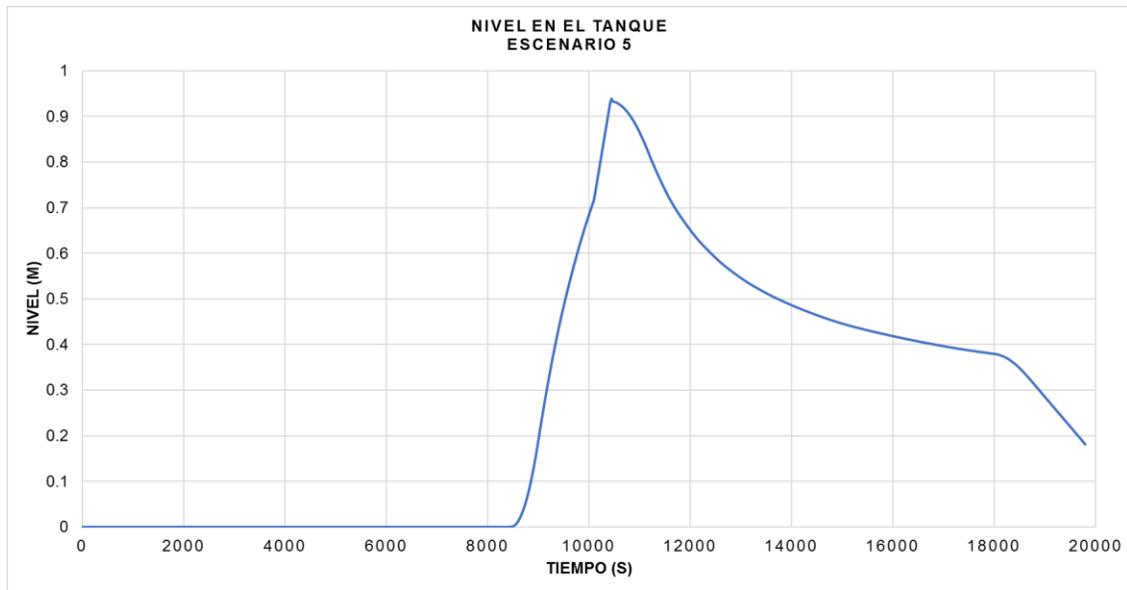


Figura 4.49. Nivel en el tanque para el escenario 5

El nivel en el tanque puede llegar hasta casi 0.93 metros, un nivel superior al del escenario 1, 2 y 4, con lo que se logra aprovechar más del 90% el volumen del tanque, asegurando un margen de seguridad considerando que son escenarios simulados. Con lo anterior, se logró llegar a un escenario óptimo donde se mitiga el gasto y se aprovecha el volumen disponible de retención, aunque como se observa en la gráfica anterior, el vaciado del tanque es más lento, aspecto que debe tomarse en cuenta para su implementación factible en zonas altas, donde se requiere detener el mayor gasto posible, permitiendo que las zonas bajas desalojen con mayor eficiencia evitando posibles causas de inundaciones.

CAPÍTULO 5. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE BANQUETAS RETENEDORAS

La propuesta metodológica del diseño de banquetas retenedoras de agua pluvial que se presenta en este apartado es resultado de la recopilación y selección de la información encontrada en esta investigación. Lo anterior incluye las experiencias que se obtuvieron del caso de estudio que se analizó. Los criterios especificados en el presente capítulo son de carácter general y se muestran como una guía entendiendo que el diseño de SUDS se debe realizar de manera muy particular y específica en cada proyecto.

5.1. INTRODUCCIÓN

Como se describió en el apartado del estado del arte, el diseño y construcción de sistemas de drenaje sostenible, como las banquetas retenedoras de agua pluvial, buscan incrementar la eficiencia de los sistemas convencionales de drenaje a fin de evitar su colapso funcional y dar respuesta a los eventos climáticos que se presentan en las zonas urbanas, mitigando los daños causados principalmente por inundaciones y todo lo que ello conlleva.

El diseño y construcción del sistema de banquetas retenedoras de agua pluvial es un trabajo de ingeniería hidrológica de vanguardia. Los métodos expuestos en este apartado validan la implementación del sistema en conjunto con recomendaciones que permitirían la conservación y mantenimiento del sistema. Dichos métodos pueden tener variables a juicio del proyectista y dependiendo del proyecto, siempre atendiendo a la normatividad existente local.

La compilación de normativas que intervienen en la concepción del sistema más importantes son el *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS)* en su versión para el diseño de drenaje pluvial emitido por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2016), máxima entidad normativa federal en materia de agua en México. También se incluyen consideraciones de los *Lineamientos para el diseño y construcción de banquetas* emitidos por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda (SEDUVI, 2017) del Gobierno de la Ciudad de México, así como las disposiciones y criterios del Código Administrativo del Estado de México y de carácter internacional, se han tomado referencias de publicaciones como el *SUDS Manual* de la CIRIA, experiencias de países como España y Estados Unidos, por citar algunos.

La metodología para la validación del sistema utilizada en este proyecto fue diversa, el apartado de diseño abarca en forma general el tren de funcionamiento, esquema y componentes del sistema, así como algunas consideraciones generales. Lo anterior se resume en la figura 5.1.

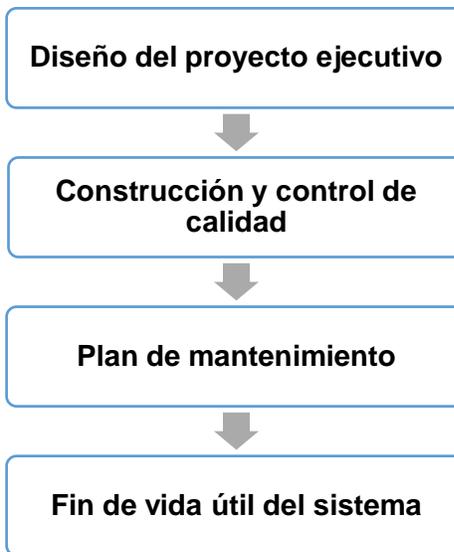


Figura 5.1. Etapas de la metodología para la implementación del sistema banqueta retenedora de agua pluvial

Es importante aclarar que, aunque el proceso de diseño se ha representado en un gráfico lineal, en la práctica, suele haber interacciones entre diferentes pasos hasta que se alcanzan los objetivos del proyecto. También se pretende que la metodología aplicada en este trabajo de investigación sirva como referencia en el diseño de SUDS que el lector pretenda llevar a cabo teniendo en cuenta, como ya se mencionó, que cualquier proyecto de implementación de SUDS tiene siempre sus particularidades y cada caso es especial por lo que así debe ser diseñado.

5.2. PLANEACIÓN DEL PROYECTO

El éxito de cualquier proyecto está en su planeación ya que permite bosquejar las estrategias y detalles para materializarlo, brindando la previsión y los recursos para llevar los objetivos trazados a buen término. En diversas ocasiones se ignora tan importante etapa dando paso inmediato a la ejecución de actividades cayendo en la improvisación que a largo plazo genera más costos, retrasos y otros inconvenientes.

La planeación de un sistema de banquetas retenedoras de agua pluvial es un proyecto que requiere de una planeación estratégica ya que influyen diversos factores y efectos en cascada que deben tomarse en cuenta para la correcta implementación del sistema y asegurar el mayor beneficio posible.

Por ello, durante la etapa de planeación se debe revisar la información sobre la zona del proyecto.

5.2.1. Recopilación de información básica

La infraestructura del sistema de banquetas propuesto en este documento no es adecuada para todos los lugares, por ello es importante conocer los sitios potenciales en los que se puede implementar.

El primer análisis es identificar la idoneidad de implementación del sistema, conocer la información de la zona de estudio ayuda a identificar inconvenientes y recursos disponibles. La información básica mínima recomendada es la siguiente.

5.2.1.1. Topografía

La topografía es un factor clave para comprender los patrones naturales de drenaje de la zona de estudio. En ocasiones, un adecuado análisis de la topografía permite diseños por gravedad, evitando bombeos o infraestructuras adicionales.

Para ello, se requiere de una cartografía adecuada y, preferiblemente, de un Modelo Digital del Elevaciones (MDE). Éste puede ser elaborado a partir de un levantamiento topográfico del área de proyecto, donde es aconsejable que se acoten los elementos característicos de la red de drenaje y las infraestructuras viales.

En caso de no disponer de un MDE, la normatividad señala (CONAGUA, 2016) que puede utilizarse, en primer lugar, la cartografía municipal, (si existe) o para el caso de México, esta información se puede encontrar en los planos de la configuración del terreno disponibles o los elaborados por dependencias como: el Instituto Nacional de Estadística y Geografía

(INEGI) que cuenta con archivos en formato vectorial como: pdf, tif, gif, shp y geopdf en escalas 1:20000, 1:50 000, 1:250 000 y 1:1000000, además proporciona archivos en formato ráster con extensión .bil y .tiff que permiten procesar la información para identificar y delimitar las cuencas de la zona, determinar la superficie, así como establecer áreas de aportación a una zona determinada. También existen herramientas prácticas como la plataforma Google Earth que permite estimar elevaciones y pendientes de una zona específica.

El proceso para definir las cuencas lo define el MAPAS (CONAGUA, 2016) a través de los siguientes puntos:

- ϕ Sobreponer el plano catastral al plano topográfico, ambos deben estar en la misma escala y orientados adecuadamente.
- ϕ Identificar en las curvas de nivel los puntos con elevación más alta y unirlos a través de la línea del parteaguas.
- ϕ Cuando las líneas trazadas crucen las manzanas, se deberá tomar en consideración hacia qué punto de la calle las construcciones evacuarán el agua pluvial, de esta manera, se considera la influencia de la planimetría en la definición de las subcuencas

- **Análisis de idoneidad**

Una vez obtenida la información topográfica del sitio, se deberá realizar un análisis para saber si se puede o no implementar el SUDS elegido. Lo primero es conocer la pendiente del suelo, que para el correcto dimensionamiento de las banquetas retenedoras se recomienda ser **menor al 15%** en caso contrario, se debe considerar implementar otro SUDS de acuerdo con las características descritas en el apartado 2.2.2. Este análisis se describe en el diagrama de la figura 5.2.



Figura 5.2. Proceso para el análisis de idoneidad de implementación.

La pendiente de una cuenca, subcuenca o microcuenca puede calcularse como el desnivel entre los extremos de la corriente dividida entre su longitud medida en planta a través de la expresión recomendada por el MAPAS (CONAGUA,2016).

$$S_{1c} = \frac{\Delta H_{cauce}}{l_{T1c}}$$

Donde:

S_{1c} = Pendiente de la línea del cauce [adimensional]

ΔH_{cauce} = Desnivel entre los extremos del cauce [m]

l_{T1c} = Longitud total de la línea del cauce proyectada en el plano horizontal [m]

Una vez identificado si el sitio cuenta con potencial para implementar el SUDS elegido, se recopila información complementaria disponible en caso de existir:

- Planos de la infraestructura urbana, instalaciones (gas, tuberías, eléctricas, etc.) y de drenaje pluvial existente. Es importante destacar que, para el caso de zonas de nueva urbanización, se deben considerar todos los planos de desarrollo que existan, así como la red de drenaje pluvial que se pretende implementar.

- **Tiempo de concentración**

El tiempo de concentración para un punto dado, se define como el tiempo que tarda una gota de agua en viajar desde el punto más alejado de la cuenca hasta la salida de ésta.

Para estimar el tiempo de concentración a través de la superficie, se utiliza la expresión propuesta por Kirpich (Aparicio, 2012)

$$t_{cs} = 0.0003245 \left(\frac{l_t}{\sqrt{S_{1c}}} \right)^{0.77}$$

Donde:

t_c = Tiempo de concentración sobre la superficie [horas]

l_t = Longitud del cauce principal [m]

S_{1c} = Pendiente de la cuenca [m/m]

Cabe destacar que el tiempo de concentración mínimo a considerar en cuencas urbanas no debe ser menor a 5 min, por lo que se debe ajustar en cuencas con un menor tiempo de concentración (CONAGUA, 2016).

5.2.1.2. Geología y geotecnia

La geología y geotecnia del lugar determinan la capacidad de infiltración y de protección de los acuíferos. Es recomendable conocer la distancia al nivel freático y, si es el caso, su variabilidad estacional. También se requiere estudiar la estabilidad del terreno y la posibilidad de afectar estructuras adyacentes.

Si el proyecto busca la recarga de acuíferos con el sistema de banquetas, se debe determinar el valor de la permeabilidad del suelo como lo recomienda Checa y De Pazos (2018). Para proyectos que consideren la infiltración se debe tener una idea previa si un determinado tipo de terreno es susceptible a la infiltración, para ello se recomienda realizar ensayos de permeabilidad al terreno en cuestión y tomar como referencia los parámetros de la figura 5.3.

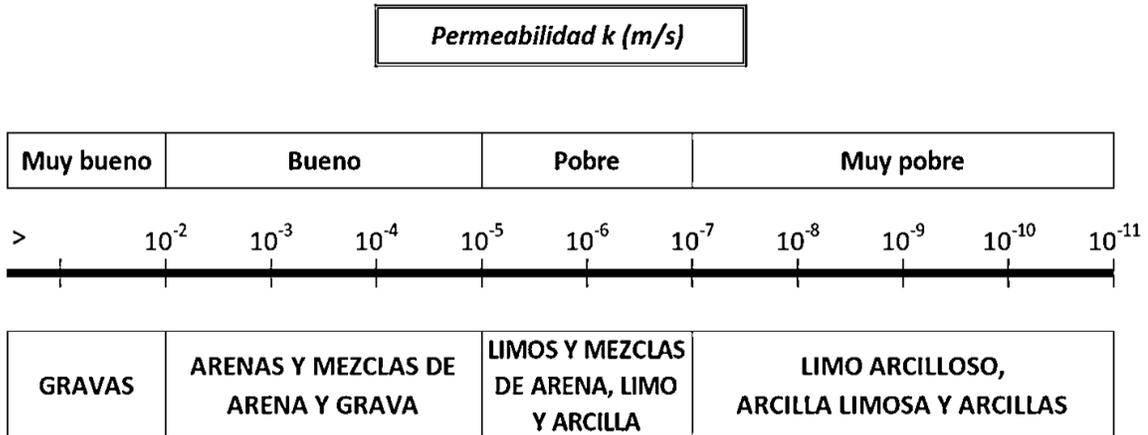


Figura 5.3. Valores de referencia del coeficiente de permeabilidad para distintos suelos (Checa y De Pazos, 2018)

- *Viabilidad de la infiltración*

Como se describe en el capítulo 2, uno de los objetivos de diseño de los SUDS, es buscar almacenar, y en su caso infiltrar, en origen tanta escorrentía como las condiciones del lugar lo permitan. De modo que, para satisfacer este objetivo, se debe evaluar si los factores obtenidos en el estudio del sitio entran en el rango de valores aceptables de la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Valores aceptables para considerar infiltración en el diseño de SUDS (Checa y De Pazos, 2018)

Factores a considerar	Valor aceptable
Valor del coeficiente de permeabilidad de cálculo	$> 10^{-6}$ m/s
Distancia al nivel freático	> 1 m
Distancia a cimientos	> 3 m

Además, se debe evaluar el riesgo de inestabilidad del terreno, hundimiento o erosión; el riesgo de pendientes inestables; el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas por la movilización de contaminantes en el terreno existente; el riesgo de infiltrar contaminantes procedentes de la escorrentía al terreno y/o aguas subterráneas; y el riesgo que la infiltración puede suponer en cimientos, túneles y otras infraestructuras (Checa y De Pazos, 2018).

En caso de no tener valores aceptables para considerar la infiltración, se debe continuar con el diseño considerando el punto de vertido como el drenaje convencional.

5.2.2. Estimación del área a gestionar por el SUDS

El parámetro “área a gestionar por el SUDS” se refiere a la superficie impermeable cuyo escurrimiento pluvial estará determinado por el tipo de zona. Con este supuesto, se calcula esa área de forma separada a través de la expresión propuesta por Checa y De Pazos (2018).

$$A_{imp} = \sum_{i=1}^{i=n} C_i \cdot A_i$$

Donde:

- A_{imp} = área impermeable a gestionar por el SUDS [km²]
- n = número de sub-áreas
- C_i = Coeficiente de escurrimiento de la sub-área i [adimensional]
- A_i = Superficie de la sub-área i [km²]

Para seleccionar el coeficiente de escurrimiento (C) se recomienda utilizar los valores propuestos en el MAPAS (CONAGUA, 2016) o los propuestos en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Coeficiente de escurrimiento recomendados por Checa y De Pazos (2018)

Zona	C
Jardines o zonas de vegetación	0.3
Zona pavimentada impermeable	0.7
Zona pavimentada permeable	0.9
Cubiertas	1.0

5.2.3. Hidrología

Cabe recordar que el principio de diseño de drenajes sostenibles busca reproducir, en la medida de lo posible, los patrones naturales de drenaje. Por ello, es necesario elaborar un análisis morfológico de la cuenca para conocer sus principales características. En caso de que la zona de estudio se enmarque en un proyecto de urbanización, las condiciones hidrológicas del nuevo desarrollo también tienen que estudiarse.

Para ello, se deben delimitar las cuencas que drenan a la zona de estudio y calcular sus parámetros característicos (área, cauce principal, longitud, pendiente, etc.). Para realizar este procedimiento se recomienda emplear el MDE disponible y herramientas

computacionales de Sistemas de Información Geográfica. El proceso se encuentra definido en el MAPAS en su apartado “2.3. Cuencas urbanas” donde a partir del MDE se delimita la cuenca, las subcuencas y las microcuencas, así como las líneas de corriente que representan el sistema de drenaje natural de la comunidad.

Resulta conveniente ampliar los límites del análisis, de modo que sean superiores a la zona de estudio y obtener así las cuencas completas. Los puntos de descarga de las cuencas y las áreas aguas abajo de las mismas tienen que enlistarse, así como los requisitos de calidad y cantidad de la cuenca, en el caso de existir. Además, se deben señalar los posibles puntos de descarga como cauces o arroyos, la distancia hasta los mismos y las posibles restricciones y condiciones de vertido. Así como también, identificar áreas inundables dentro del área de estudio que puedan considerarse en el plan de mantenimiento para un plan de gestión o inconvenientes que surjan en el sistema de banquetas, esto se describe mejor en el apartado de mantenimiento.

Análisis de la precipitación

Una vez definida el área a gestionar, el siguiente paso es identificar los datos disponibles de las estaciones climatológicas cercanas a la zona de estudio. La información deberá ser analizada con métodos que estimen la avenida que produce un evento de lluvia en una cuenca. Los métodos básicos que relacionan el gasto de aportación se encuentran definidos en el MAPAS en su apartado “2.5. Estimación de gastos pluviales”, los cuales son:

- Métodos empíricos
 - a. Racional
 - b. Gráfico alemán
 - c. Método TR-55
 - d. Método del Road Research Laboratory (RRL)
 - e. Método de la curva S
 - f. Método de Chow
 - g. Método del Hidrograma unitario adimensional
- Gasto de diseño de estaciones hidrométricas
- Modelos relación lluvia-escorrentía
 - a. Método del hidrograma unitario
 - b. Método del hidrograma unitario instantáneo
 - c. Hidrograma unitario triangular

- Modelos empleando simulación matemática

El método racional, así como muchos otros, permiten estimar un gasto "pico", en función de la curva i-d-Tr, sin embargo, el hidrograma de diseño que resulta de aplicar este método no caracteriza la variación de la precipitación a lo largo del tiempo.

En el mercado se encuentran disponibles programas de cómputo que permiten caracterizar el flujo que escurre por la superficie. Cuentan con una serie de módulos que permiten representar cada una de las etapas; desde la precipitación hasta la descarga del flujo a través del sistema de drenaje.

En este trabajo se presentó la aplicación del programa de cómputo libre EPA SWMM® para la definición del hidrograma de diseño, con el cual es posible caracterizar la variación de la precipitación a lo largo de su tiempo de duración.

El programa HEC-HMS® 5.1 tiene un módulo de simulación que permite estimar un hidrograma a la salida de una cuenca, tomando como punto de partida un hidrograma y las características hidrográficas de la cuenca como son:

- Área
- Ancho medio de la cuenca
- Pendiente media
- Porcentaje de área impermeable
- Coeficiente de escurrimiento

Cualquiera de los métodos antes mencionados, deberán aportar una estimación aceptable y su uso quedará sujeto a criterio del proyectista y de la información disponible.

5.3. TREN DE FUNCIONAMIENTO Y ESQUEMA DEL SISTEMA

El tren de funcionamiento para el sistema de banquetas se describe en el diagrama de la figura 5.4 y en el esquema de la figura 5.5.

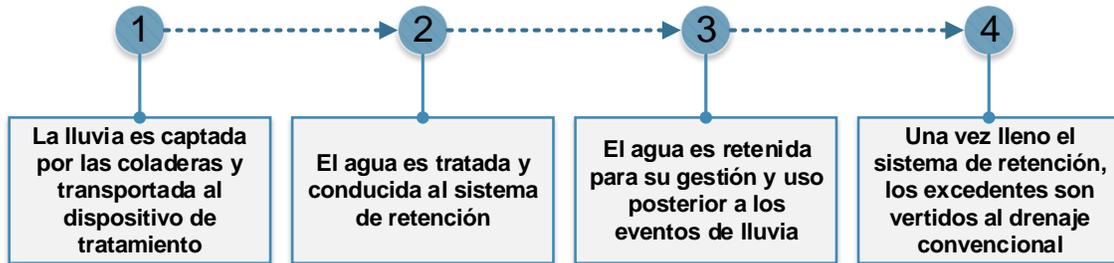


Figura 5.4. Funcionamiento del sistema de banquetas retenedoras

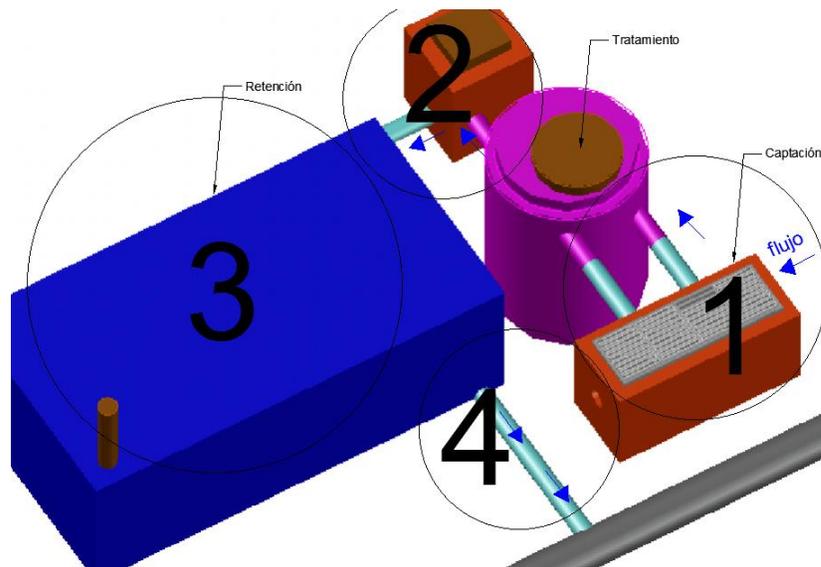


Figura 5.5. Esquema de funcionamiento del sistema de banquetas retenedoras

5.4. ESTRUCTURAS DE CAPTACIÓN

La selección de las estructuras de captación se sujetó a lo previsto por el MAPAS dentro del apartado 6.6., atendiendo a las recomendaciones del esquema mostrado en la figura 5.1. Así mismo, para proyectos de nueva urbanización, se reproducen los criterios y las ecuaciones con las que se deben diseñar las bocas de tormenta.

5.4.1. Criterios de selección

La instalación de un tipo de coladera o de una combinación de ellas, depende de la pendiente longitudinal de las calles y del caudal por colectar. Se recomienda tomar en consideración lo expuesto en la figura 5.6. y gráficamente se muestran en la figura 5.7.

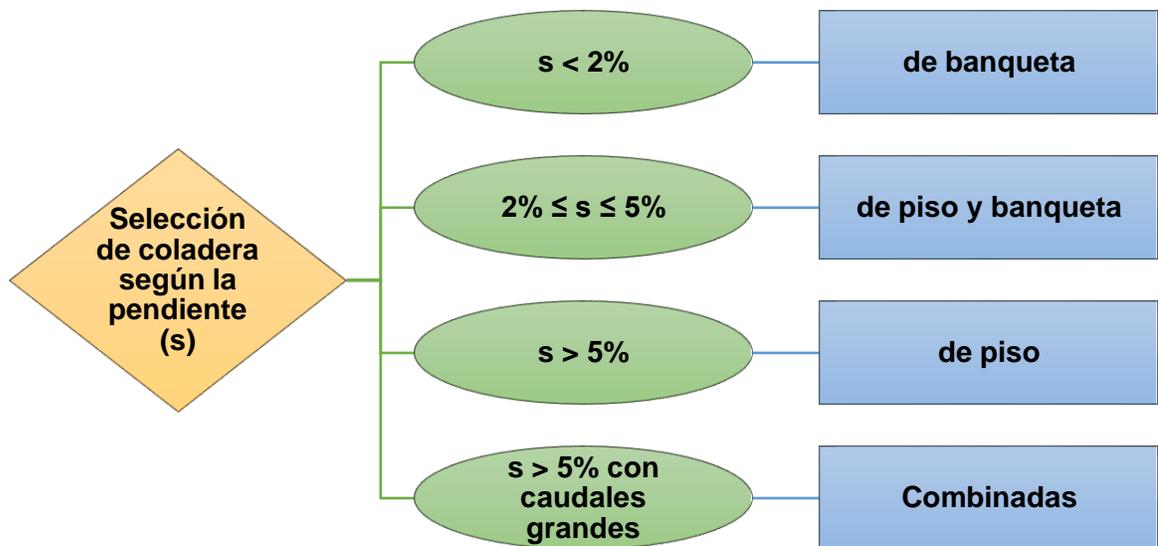


Figura 5.6. Criterio de selección de coladera de acuerdo con la pendiente de la calle.
Adaptada de CONAGUA (2016)

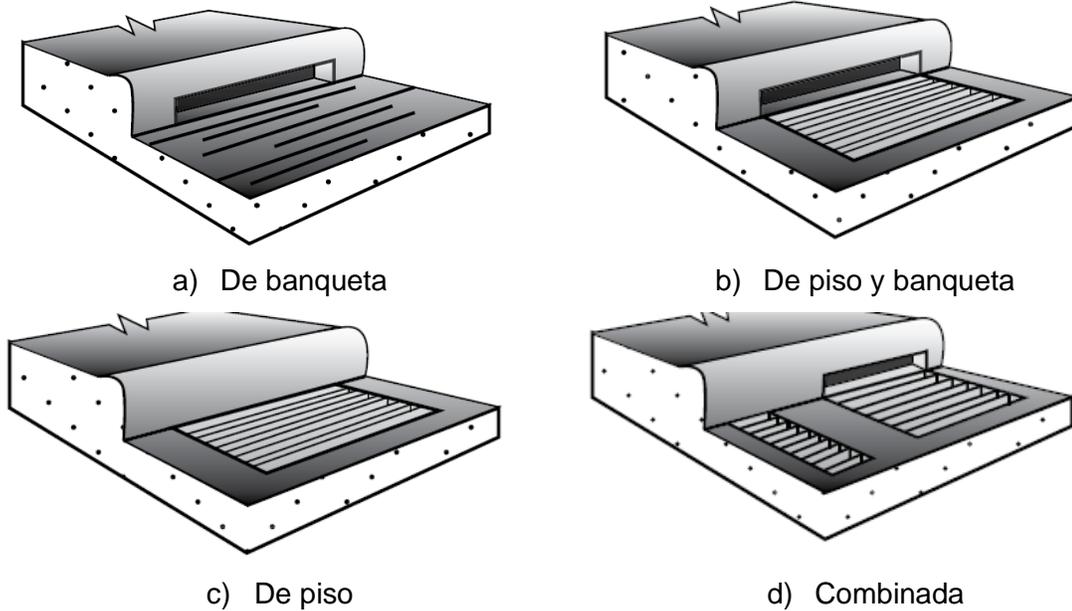


Figura 5.7. Tipos de coladeras. (CONAGUA, 2016)

5.4.2. Ecuaciones para el dimensionamiento de coladeras

La metodología de cálculo para la configuración de las rejillas ha sido definida por el *Manual de diseño de drenaje urbano* del Departamento de Transporte de los Estados Unidos. En este apartado se presentan las ecuaciones fundamentales para la configuración de las coladeras planteadas por Brown et al. (2013).

- **Relación de flujo frontal con respecto del flujo total para una pendiente transversal uniforme**

$$E_0 = \frac{Q_w}{Q} = 1 - \left(1 - \frac{W}{T_e}\right)^{2.67}$$

Donde:

E_0 = Relación de flujo para una anchura elegida (usualmente el ancho de la rejilla) con respecto del flujo total

Q = Caudal total (m^3/s)

Q_w = Caudal frontal (ancho W) (m^3/s)

T_e = Extensión total del agua (m)

W = Ancho de captación o rejilla (m)

○ **La relación de flujo lateral con respecto del flujo total**

$$\frac{Q_s}{Q} = 1 - \frac{Q_w}{Q} = 1 - E_0$$

Donde:

Q_s = Capacidad de flujo de la sección encima de la concavidad de la cuneta (m^3/s)

Q = Caudal total (m^3/s)

Q_w = Caudal frontal (ancho W) (m^3/s)

E_0 = Relación de flujo para una anchura elegida (usualmente el ancho de la rejilla) con respecto del flujo total

○ **La relación de flujo frontal interceptado con respecto del flujo total**

$$R_f = 1 - K_u(V - V_0)$$

Donde

R_f = Relación de flujo frontal interceptado con respecto al flujo total (adimensional). No puede exceder 1.0

K_u = 0.295

V = Velocidad de flujo total (m/s)

V_0 = Velocidad de inicio de salpicaduras (m/s)

Esta relación es equivalente a la eficiencia frontal de captación de flujo

La velocidad de flujo se obtiene con la siguiente expresión:

$$V = \frac{K_u}{n} S_L^{0.5} S_x^{0.67} T^{0.67}$$

Donde

$K_u = 0.752$ (notar que en este caso difiere K_u de otro)

$V =$ Velocidad de flujo total (m/s)

$S_L =$ Pendiente longitudinal (m/m)

$S_x =$ Pendiente transversal (m/m)

$T =$ Propagación del flujo (m)

El valor de V_0 puede obtenerse de la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Velocidad de salpicadura [m/s] (Brown et al., 2013)

Tipo de rejilla	Longitud de la rejilla (m)						
	0.20	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.3
Barras Curvas	0.85	1.45	1.85	2.2	2.4	2.7	2.8
Rejilla 30 85	0.6	1	1.4	1.75	2	2.3	2.5
Rejilla 45 85	0.8	1.2	1.6	1.9	2.1	2.3	2.35
P-50	1.4	2.1	2.5	2.8	3.2	3.5	2.7
P-50X100	0.75	1.1	1.5	1.8	2	2.2	2.35
Rejilla 45 60	0.9	1.3	1.7	2	2.2	2.4	2.45
Retícula	0.5	0.9	1.3	1.7	1.9	2.2	Sin dato
P-30	1.1	1.6	2	2.3	2.55	2.75	2.9

○ **Eficiencia de flujo lateral captado**

$$R_s = \frac{1}{1 + \frac{K_u V^{1.6}}{S_x L^{2.3}}}$$

Donde:

$R_s =$ Velocidad de inicio de salpicadura (m/s)

$K_u =$ Longitud de rejilla (m)

$V =$ Velocidad de flujo total (m/s)

$S_x =$ Pendiente transversal (m/m)

L = Longitud de la banquetta (m)

○ **Eficiencia total de una rejilla**

$$E_f = R_f E_0 + R_s (1 - E_0)$$

Donde:

E_f = Eficiencia de una rejilla (m/m)

E_0 = Relación de flujo

R_s = Relación de flujo lateral interceptado con respecto al flujo total

R_f = Relación del flujo frontal interceptado con respecto del flujo total

○ **Capacidad de captación de una coladera**

$$Q_i = Q_{cu} \cdot E_f$$

Donde

Q_i = Capacidad de captación de la coladera (m^3/s)

Q_{cu} = Caudal sobre la cuneta o calle (m^3/s)

E_f = Eficiencia de una rejilla (m/m)

La captación de flujo se comporta de manera similar al vertedor de una presa, cuando la altura del nivel es menor a la altura del bordo, una vez que ésta es superada el funcionamiento de la captación es similar a la de un orificio de pared delgada. También se debe considerar los efectos por la obstrucción de desechos sólidos.

○ **Capacidad de captación funcionando como vertedor**

$$Q_i = C_w \cdot P d_s^{1.5}$$

Donde

- Q_i = Capacidad de captación de la coladera (m^3/s)
- C_w = Coeficiente de descarga (1.66)
- P = Perímetro mojado de la rejilla hasta su altura máxima (m)
- d_s = Altura de la sección (m); calculada como $d = (d_1 + d_2)^{0.5}$ (ver figura 5.8)

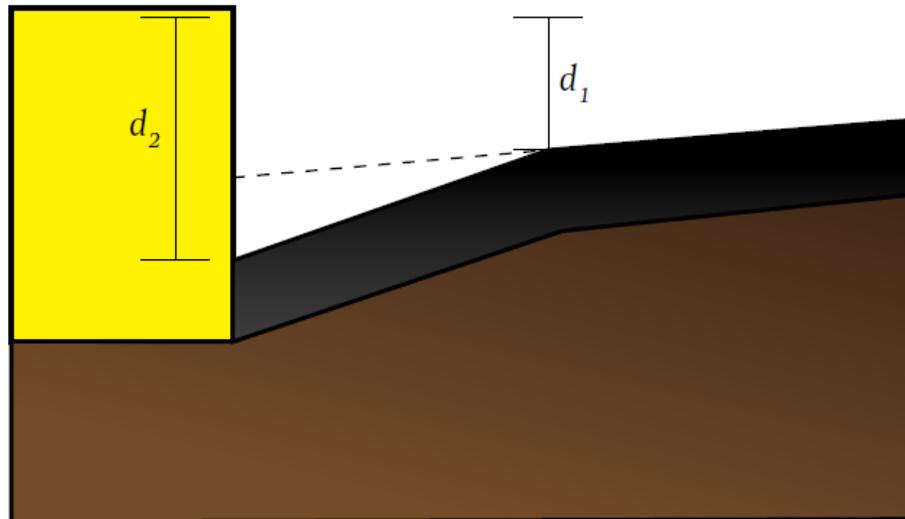


Figura 5.8. Esquema para calcular “d”.

- **Capacidad de captación funcionando como orificio**

$$Q_i = C_0 \cdot A_g \cdot (2gd)^{0.5}$$

Donde

- Q_i = Capacidad de captación de la coladera (m^3/s)
- C_0 = Coeficiente de orificio (0.67)
- A_g = Área de abertura libre de la rejilla (m^2)
- d = Altura de la sección (m); calculada como $d = (d_1 + d_2)^{0.5}$
- g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

Algunas consideraciones de uso: Para las rejillas de barras planas la abertura libre es igual a la superficie total de la rejilla menos el área ocupada por las barras.

En estos apartados se han considerado las ecuaciones fundamentales para el dimensionamiento de rejillas y coladeras, para diseños más complejos se sugiere revisar el Manual de Diseño de Drenaje Urbano del Departamento de Transporte cuya referencia se encuentra en la bibliografía por el autor Brown et al. (2013).

- **Dimensiones**

Las dimensiones de las bocas de tormenta son recomendadas por el MAPAS de acuerdo con el diámetro de la tubería que se conecta al colector del drenaje pluvial debiendo tomar en consideraciones los siguientes aspectos:

- tener una dimensión mínima de 30 cm, que se ubica a $4D_2$ del fondo de la boca de tormenta, se debe considerar una altura total de la boca de tormenta de $6.5D_2$, y una sección transversal circular con diámetro de $4D_2$ u otra sección de área equivalente, como guía para cumplir estas especificaciones se tiene la figura 5.9.
- además, se deberá colocar la señalización al pie de las estructuras que indiquen la prohibición de verter o derramar solventes, químicos, escombros, aceites orgánicos o minerales y demás elementos nocivos al agua, las tuberías y demás estructuras que componen el drenaje pluvial urbano.

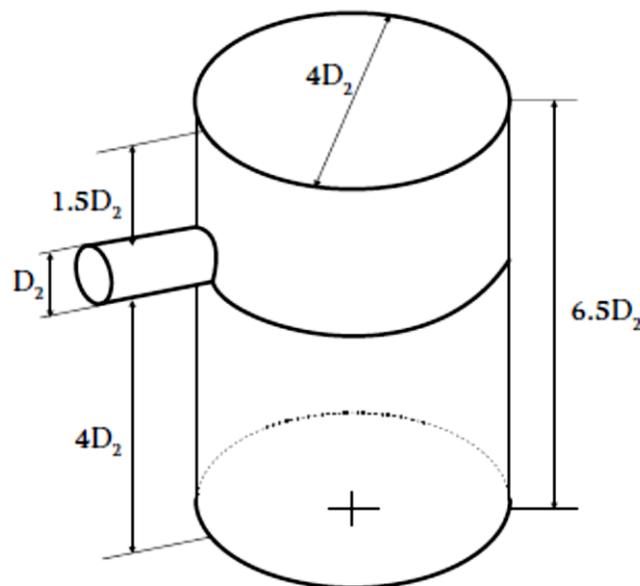


Figura 5.9. Dimensiones mínimas de la boca de tormenta (CONAGUA, 2016)

- En ocasiones se requieren rejillas transversales a la calle, esto solamente es adecuado para grandes caudales y pendientes superiores al 5 por ciento y calles menores de 6 m. Se debe prever que las rejillas tengan un asiento de neopreno o de un material que absorba los impactos, para la reducción de ruidos, golpes y daños a los vehículos al ser pisadas por llantas.
- En casos especiales donde la configuración de la calle no cumpla con las dimensiones mínimas recomendadas para el diseño e instalación de bocas de tormenta, el proyectista deberá proponer un diseño particular y la dependencia o él deberá avalar la modificación.

- **Ubicación**

En nuevas zonas urbanas se recomienda que separación de coladeras no exceda de 100 m, dependiendo de la zona de la población de que se trate. En cualquier circunstancia se debe tratar de ponerlas cercanas a las esquinas o en los cruces de las calles (CONAGUA, 2016).

En zonas comerciales y para pavimentos de concreto, se especifica que no deben quedar a una distancia mayor de 25 m, con objeto de no hacer muy pronunciadas las ondulaciones en el pavimento para dar las pendientes hacia la coladera.

Cuando se tienen pavimentos de adoquín o empedrados, donde se tengan velocidades bajas de tránsito, y que, además, permitan dar las pendientes de las cunetas con mayor facilidad, se recomienda una separación máxima de 50 m.

5.5. ESTRUCTURAS DE TRATAMIENTO

En el apartado 2.1 de este trabajo se describieron tres tipos de infraestructuras viables en el tratamiento de aguas pluviales y que sirven como estructuras complementarias en el uso de SUDS, en este caso, dentro del sistema de banquetas retenedoras. Dentro de esta propuesta metodológica, se deja a criterio del proyectista la selección de la estructura de tratamiento. En la figura 5.10. se mencionan las tres propuestas descritas en el capítulo 2 y que se consideran viables para el sistema de banquetas retenedoras.

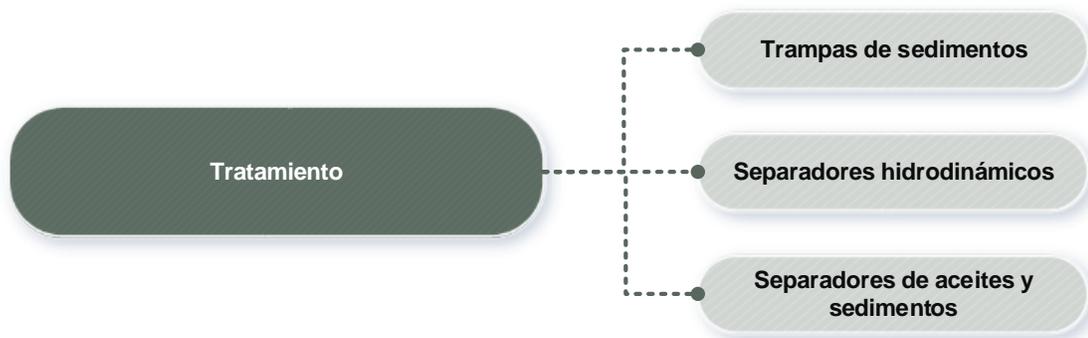


Figura 5.10. Estructuras de tratamiento viables para el sistema de banquetas retenedoras

Las propuestas presentadas son sólo recomendaciones ya que para el presente trabajo ha quedado fuera de los alcances el diseño de una estructura de tratamiento considerando que sólo se evaluó el funcionamiento hidráulico para validar el sistema.

5.6. ESTRUCTURA DE RETENCIÓN

En este apartado se presenta el proceso de dimensionamiento del sistema de retención. La metodología implementada tiene como referencia lo recomendado por Checa y De Pazos (2018) y Woods-Ballard et al. (2015) cuyo proceso de dimensionamiento se muestra en la figura 5.11. y a continuación se detallan las fórmulas recomendadas.

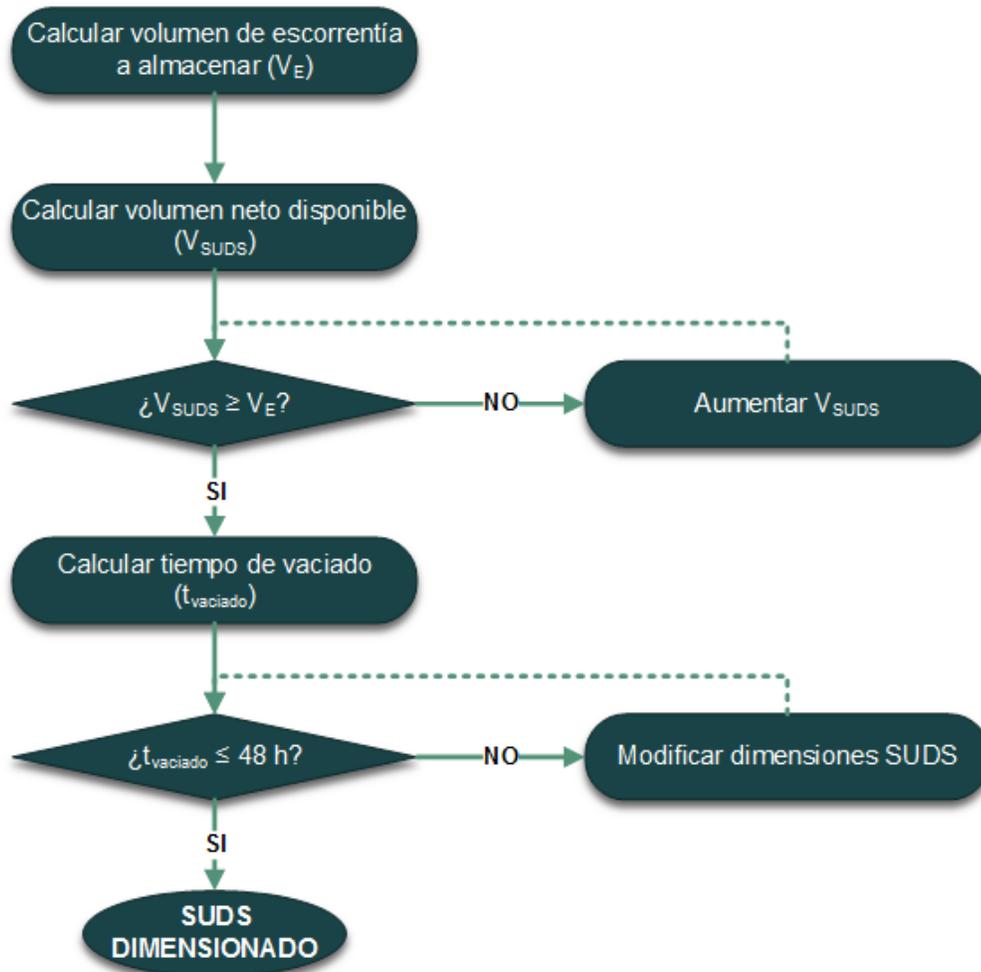


Figura 5.11. Esquema-proceso de dimensionamiento adaptado de Checa y De Pazos (2018) y Woods-Ballard et al. (2015)

5.6.1. Cálculo del volumen de almacenamiento

El volumen de almacenamiento se puede estimar con el estudio hidrológico con el cálculo de caudales a través de los modelos de lluvia escurrimiento descritos en el apartado 5.2.3 y validados en el capítulo de resultados del presente trabajo. También puede estimarse con la expresión recomendada por Checa y De Pazos (2018) quienes apuntan que, con

independencia del nivel de prioridad (infiltración, vertido a cauce o vertido a sistema de alcantarillado municipal) del SUDS proyectado, será necesario almacenar temporalmente, al menos, la escorrentía generada por el volumen de lluvia que no es superado por el 80 % de los eventos de precipitación. Dicho se calcula con el uso de reglas de diseño basadas en percentiles de una serie de precipitaciones medias anuales (estudio pluviométrico). Esta metodología se explica en el apartado 2.2.1. de este documento con referencia en Sordo-Ward et al. (2019) para determinar el valor de los percentiles volumétricos.

$$V_E = A_{\text{imp}} \cdot \frac{V_{80}}{10^3}$$

Donde

V_E = Volumen de escorrentía a almacenar en origen (m^3)

A_{imp} = Área impermeable (m^2)

V_{80} = Volumen de lluvia de percentil 80% para garantizar cantidad (mm)

5.6.2. Cálculo del volumen neto disponible en el SUDS

Tras una primera estimación de la superficie y la profundidad disponible para la construcción del elemento de retención, considerando las restricciones de espacio del lugar, se estima el volumen de almacenamiento en el SUDS (V_{SUDS}), con apoyo del esquema mostrado en la figura 5.12.

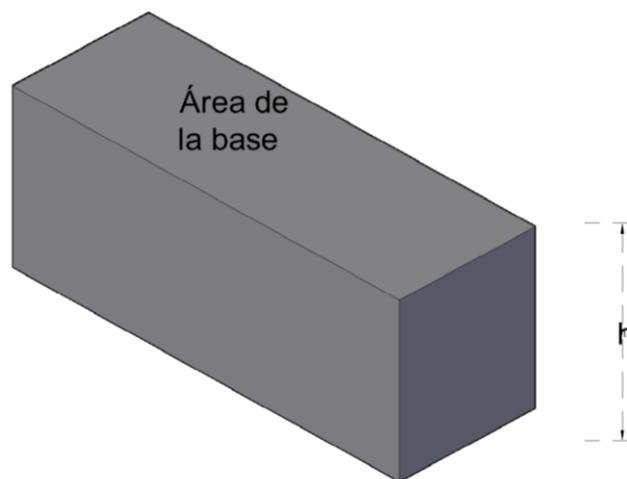


Figura 5.12. Espacio disponible de almacenamiento

$$V_{\text{SUDS}} = A_b \cdot h \cdot c_p$$

Donde

V_{SUDS} = Volumen neto disponible de almacenamiento (m^3)

A_b = Área de la base (m^2)

h = Profundidad del espacio ocupado por los paneles (m)

c_p = Coeficiente de volumen efectivo por panel fractal hexagonal (0.80)

5.6.3. Comprobación de la capacidad de almacenamiento

Como lo recomienda Checa y De Pazos (2018), tras un primer tanteo, se llega a un proceso iterativo conducente a la comprobación de que el sistema de retención contará con un volumen neto disponible tal que es suficiente para almacenar temporalmente, al menos, el volumen de escorrentía generado por el hidrograma de diseño, o bien un porcentaje de éste a criterio del proyectista.

De este modo, se verifica que $V_{\text{SUDS}} \geq V_E$ avanzando así, al siguiente paso; en caso de que la condición no se llegara a cumplir, se deberá aumentar el V_{SUDS} hasta que se cumpla la condición. En caso de no poder aumentar el V_{SUDS} , se deberán proponer alternativas para la gestión del volumen restante, puede ser con la implementación de un SUDS alternativo o cualquiera que el proyectista considere pertinente y las condiciones lo permitan.

5.6.4. Cálculo del tiempo de vaciado al drenaje a través de una estructura de control

Dentro del diseño integral del sistema de banquetas y en particular de la zona de retención, se consideró el diseño de una estructura de control con orificios que regulen el vertido del caudal retenido en los paneles fractales al sistema de drenaje convencional.

- **Principios de diseño para orificios de descarga**

Los fundamentos para el diseño de orificios utilizados en la propuesta de la estructura de control se basan en los principios de mecánica de fluidos. La descarga por orificios se da cuando se practica una abertura en un depósito que contiene un fluido la velocidad de salida del mismo se incrementa con la profundidad a la cual se realiza el orificio, y con base

también al nivel en el que se encuentra el líquido, puesto que la fuerza no equilibrada que afecta al movimiento es debida a la gravedad (Sotelo, 2001). En consecuencia se destruye la presión ejercida sobre la pared existente en el punto donde se encuentra la abertura y la presión del líquido interior la empuja directamente hacia el orificio, entonces el nivel del líquido desciende una altura h en un tiempo t , luego que ha escapado cierto un volumen del líquido recipiente (Falla, 2013). En términos energéticos la variación de energía es el equivalente, como si la capa superior del líquido hubiera descendido una altura h , por lo que al final el trayecto adquiere una cierta energía cinética dada por (Sotelo, 2001):

$$m g h = \frac{1}{2} m v^2$$

Despejando a la velocidad en la última ecuación, la expresión se convierte

$$v = (2gh)^{1/2}$$

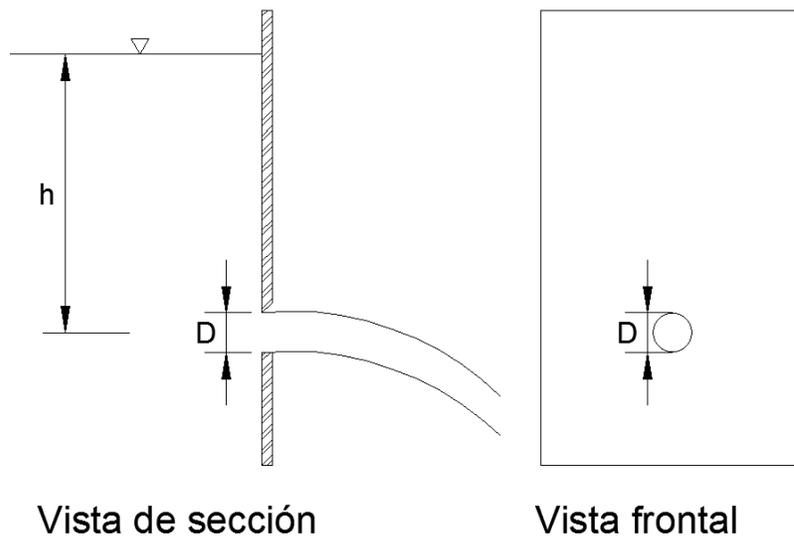


Figura 5.13. Diagrama para el principio de orificios.

Sotelo (2001) denomina a la expresión anterior como de Torricelli e indica que la velocidad del flujo que sale por el orificio sigue una ley parabólica con la carga h .

Para calcular el caudal (Q) que pasa por el orificio de área (A) a una velocidad (V) se utiliza la ecuación de continuidad $Q = VA$, multiplicada por un coeficiente de descarga (C_d) resultando la siguiente expresión.

$$Q = VA = C_d A (2gh)^{1/2}$$

Donde

Q : Caudal

C_d : Coeficiente de descarga

A : Área del orificio

g : Aceleración de la gravedad

h : Altura entre la superficie y el centro de gravedad del orificio

De acuerdo con Sotelo (2001), el coeficiente de descarga puede ser determinado a través del número de Reynolds con ayuda de la figura 5.14.

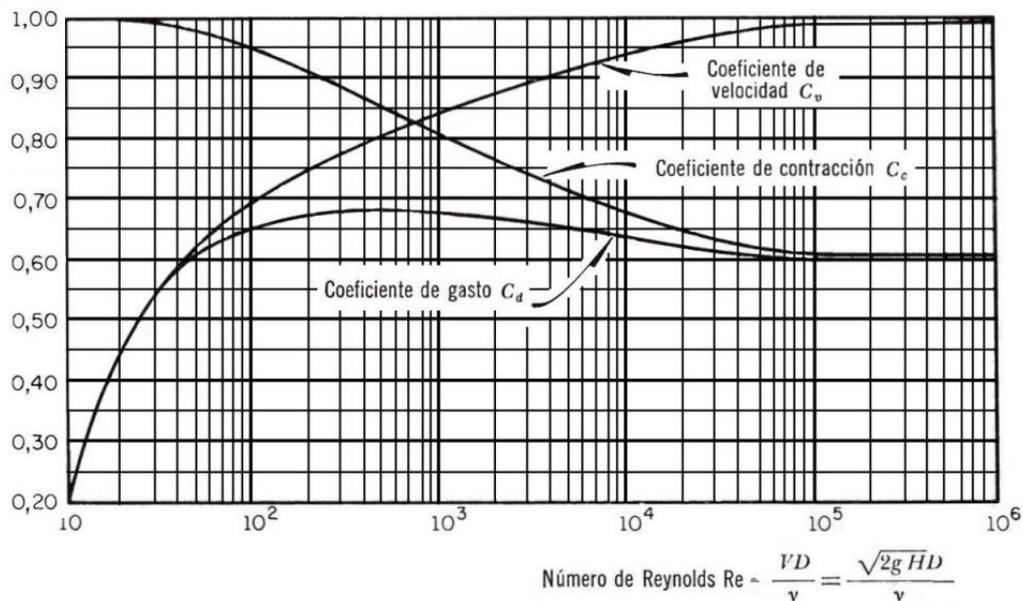


Figura 5.14. Variación de los coeficientes de velocidad, contracción y gasto con el número de Reynolds (Sotelo, 2001)

Para relacionar el caudal que sale en un orificio a través del tiempo se considera la figura 5.15.

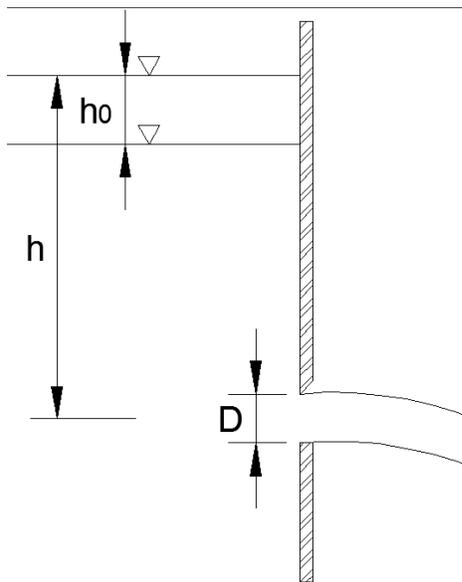


Figura 5.15. Cambio de la altura de la carga en el tiempo t

De acuerdo con la figura 5.15, la altura de carga varía en un intervalo de tiempo, debido a que la sección del recipiente es pequeña en un intervalo del tiempo dt , el pequeño volumen evacuado será $Q dt$

$$Qdt = -dV = -Adh$$

$$Q = -\frac{dV}{dt}$$

Despejando dt , sustituyendo e integrando, se llega a

$$t = \frac{2A_1(h^{1/2} - h_0^{1/2})}{C_d A_0 \sqrt{2g}}$$

$$t = \int_0^t dt = \frac{-A_1}{C_d A_0 \sqrt{2g}} \int_{h_0}^h \frac{1}{\sqrt{h}} dh$$

De esta forma se llega a la ecuación planteada por Checa y De Pazos (2018).

$$t_{\text{vaciado}} = \sqrt{\frac{2h}{g} \left(\frac{A_s^2}{(A_o \cdot C_d)^2} - 1 \right)}$$

Donde:

A_o = Área de la sección transversal interna del orificio (m^2)

A_s = Área en planta de la toma de almacenamiento del SUDS (m^2)

C_d = Coeficiente de descarga (m). recomendable $C_d = 0,60$ m

g = Aceleración originada por la gravedad (m/s^2).

t_{vaciado} = Tiempo de vaciado (s)

h = Distancia desde la superficie de la lámina de agua hasta el centro del orificio (m).

La ecuación establece la relación entre el tiempo de vaciado que tiene un depósito con un orificio y es la ecuación que se utilizó para el diseño de las estructuras de control.

- **Criterios para el diseño de la placa reguladora del caudal retenido**

El resultado importante de presente trabajo fue la propuesta de una estructura de control para el caudal retenido que ofrece un control en el vertido. La propuesta se basó en la simulación de distintos escenarios y para un hidrograma de diseño particular. Para dimensionar una placa se puede hacer uso de la ecuación del tiempo de vaciado partiendo de la hipótesis de que el primer orificio que debe estar en el fondo del sistema de retención para garantizar el vaciado completo y con ello evitar la degradación de la materia orgánica en la estructura retenedora. Se recomienda proponer los orificios planteando que el tiempo de descarga para cada orificio sea mayor al tiempo que se presenta el gasto pico del hidrograma de entrada. Para conceptualizar una estructura de control, se recomienda visualizar los resultados de la simulación con CFD y la discusión del capítulo 4 para seleccionar una configuración que se adapte a la zona de la cuenca (baja o alta).

5.6.5. Cálculo del tiempo de vaciado por infiltración

Importante para proyectos futuros, si tras evaluar los condicionantes presentados en el apartado de planeación, se concluye que es seguro infiltrar en la zona de estudio, y el coeficiente de permeabilidad de cálculo del terreno es superior a 10^{-6} m/s, entonces el vaciado del volumen del SUDS se puede realizar, o auxiliar, por infiltración.

Si el coeficiente de permeabilidad $k > 10^{-4}$ m/s, o la altura de la lámina de agua es inferior a 0,5 m, no es necesario comprobar el tiempo de vaciado del SUDS y sería posible avanzar en el dimensionamiento planteado en este apartado. Sin embargo, si $k < 10^{-4}$ m/s y $h > 0,5$ m, entonces se debe comprobar si el SUDS se vacía en menos de 48 h. Para ello, se considera el vaciado tanto por la base como por los laterales de la capa con mayor volumen de almacenamiento de agua, mediante la siguiente fórmula (Checa y De Pazos, 2018):

$$t_{\text{vaciado}} = \frac{c_p A_b}{k \cdot P} \left[\frac{h_{\text{max}} + \frac{A_b}{P}}{\frac{h_{\text{max}}}{2} + \frac{A_b}{P}} \right]$$

t_{vaciado} = Tiempo de vaciado (h)

c_p = Coeficiente de volumen efectivo por panel (0.80)

A_b = Área de la base (m^2)

k = Coeficiente de permeabilidad (m/h)

P = Perímetro de la base (m^2)

h_{max} = Columna de agua máxima desde la base de la estructura de infiltración (m)

Nota: Si el $t_{\text{vaciado}} > 48$ h es necesario modificar las dimensiones del SUDS hasta que se cumpla esta condición (por ejemplo, aumentando su superficie en planta y reduciendo su profundidad) antes de continuar con la metodología.

5.7. CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Una vez finalizado la planeación y diseño correcto del sistema, el éxito del proyecto se materializa en un adecuado proceso de construcción que garantice los estándares de calidad mínimos para el sistema. En el siguiente diagrama se muestra la secuencia recomendada a seguir para el proceso constructivo.

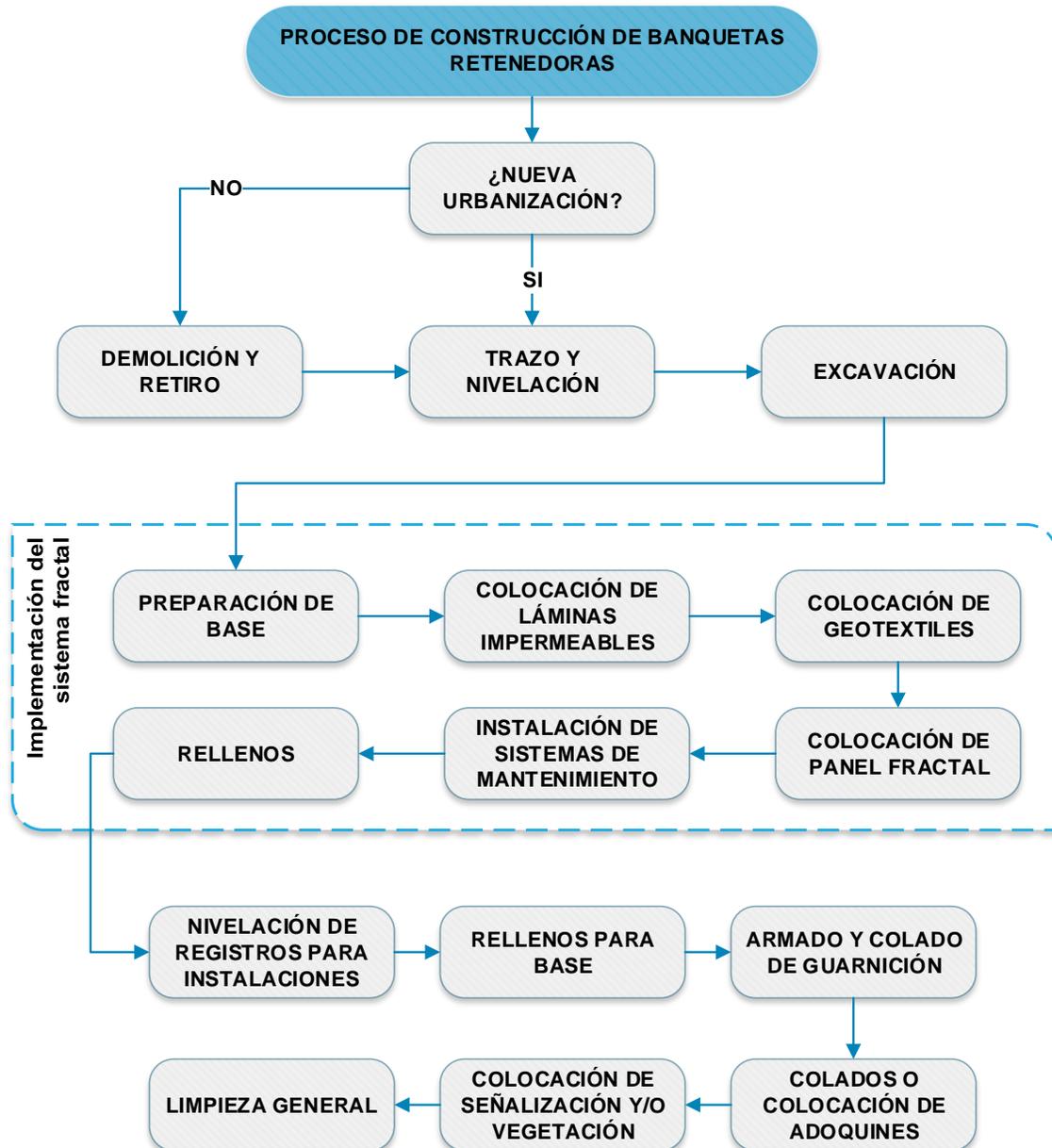


Figura 5.16. Diagrama del proceso constructivo para la implementación de banquetas retenedoras de agua de lluvia.

En los siguientes apartados se muestra una explicación general del proceso constructivo. Además, se proponen los conceptos de obra para el ofreciendo una visión general del proceso constructivo y se describe el concepto de obra para su posterior análisis de precios unitarios a fin de cumplir con los objetivos de estimación de costos para el proyecto de banquetas retenedoras de agua pluvial.

5.7.1. Demolición y retiro

Para el caso de intervenciones en zonas urbanas, se deberá realizar la demolición de la banquetta existente de acuerdo con el diseño del proyecto. Los materiales producto de la demolición se deberán trasladar a sitios de disposición permitidos por la dependencia correspondiente.

- **Descripción del concepto de obra**

Demolición de piso de banquetta de hasta 10 cm de espesor a máquina. Incluye: retiro de material y disposición final a 1 km del sitio de trabajo, mano de obra y equipo.

5.7.2. Trazo y nivelación

Para cualquier caso de intervención en la construcción de banquetas, el trazo y nivelación servirá para determinar pendientes y referencias de trabajo.

- **Descripción del concepto**

Trazo y nivelación con equipo topográfico, estableciendo ejes de referencia y bancos de nivel, incluye: materiales, cuadrilla de topografía, equipo y herramienta.

5.7.3. Excavación

De acuerdo con la guía de instalación del producto Atlantis (ATLANTIS, 2007), las dimensiones de excavación deben permitir espacio suficiente para el relleno, y compactación con medios mecánicos. Las dimensiones de excavación deben estar especificadas en el proyecto.

- **Descripción del concepto**

Excavación a cielo abierto a máquina de 0.00 a -2.00 m, incluye: carga a camión, mano de obra, equipo y herramienta.

5.7.4. Preparación de la base

El material de la base debe ser granular compactable al 95%. Si se prevé la infiltración del agua en el terreno, la base debe ser de arena o grava. En caso de no infiltrar el agua, se

puede colocar una base de mayor resistencia y durabilidad. Colocar el material de la base con un grosor mínimo de 100 mm y compactar.

- **Descripción del concepto**

Relleno con capa de arena para base. Incluye material puesto en obra, equipo y herramienta.

5.7.5. Colocación de impermeables

Si se desea evitar la infiltración al terreno a lo largo de la base y por los laterales de la zanja. Tener cuidado de no agujerear o rasgar la lámina. Los solapes y las juntas deben ser soldados por un soldador experimentado. El depósito debe tener la menor cantidad de juntas posible. Dejar suficiente cantidad de lámina en los extremos para poder envolver el depósito posteriormente.

- **Descripción del concepto**

Suministro y colocación de tela (lámina) impermeable de ancho de 150 cm

5.7.6. Colocación de geotextiles

Para la mayoría de las aplicaciones la lámina geotextil debe tener una densidad mínima de 150 gr/m² y tejido con material punzonado. Colocar la lámina dentro de la excavación dejando un solape de 300 mm en los extremos, o el especificado por el fabricante o ingeniero. Dejar suficiente cantidad de geotextil en los extremos para poder envolver el depósito.

- **Descripción del concepto**

Suministro y colocación de malla geotextil impermeable marca Fibertex, Incluye: Mano de obra y herramienta.

5.7.7. Instalación del panel fractal

Trazar dos líneas con cuerdas, que definan una de las esquinas del depósito. Utilizando estas líneas como guías, colocar los paneles dentro de la excavación, y rellenar la parte interior del depósito a medida que se avanza. La distancia entre paneles no será superior a 5 mm, idealmente todas deben estar en contacto.

- **Descripción del concepto**

Suministro y colocación de panel fractal, Incluye: Mano de obra y herramienta.

5.7.8. Instalación sistemas de mantenimiento

Tubos de PVC o material plástico que proporcionan acceso vertical dentro del sistema (para ventilación y extracción de agua con bomba externa). Deben ser suficientemente largos para llegar al fondo de las cajas, elevándose hasta la superficie.

- Tubos de Mantenimiento: Tubos de diámetro superior a (>150 mm) instalados hasta el fondo del depósito para retrolavado.

Después de instalar los sistemas de mantenimiento, se deben de cubrir con una tapa que evite la entrada de residuos al depósito.

- **Descripción del concepto**

Tubo de PVC hidráulico de hasta 19 mm RD-13.5 extremos lisos, incluye: suministro de materiales, acarreo, instalación, pruebas, mano de obra, equipo y herramienta.

Una vez instalado el sistema de mantenimiento e inspección, se envuelve el depósito asegurando la correcta envoltura para evitar entrada de material.

5.7.9. Relleno perimetral

Rellenar el perímetro del depósito con material granular compactable como arena o grava. Compactar de manera uniforme todo el perímetro para evitar empujes laterales. Rellenar con capas inferiores a 300 mm, utilizando un compactador manual hasta conseguir un 95% de compactación. La vibración del compactador eliminará huecos entre los paneles fractales.

- **Descripción del concepto**

Relleno con material granular compactado en capas de 30 cm máximo al 95% por medio mecánicos. Incluye material, mano de obra y equipo.

5.7.10. Precios unitarios

El análisis de precios unitarios se basó en los conceptos descritos en los puntos anteriores, los cuales abarcan la implementación del sistema de retención sin considerar la última etapa que es la construcción de la banqueta retenedora de agua pluvial, ya que se deja a consideración del proyecto la selección de materiales. Los precios son de carácter informativo y aproximado, aportan una visión del costo probable del sistema por metro cuadrado de construcción. Depende absolutamente del proyectista considerar los demás parámetros que cada sitio requiera. Los costos de materiales se obtuvieron a través de

bases de datos como *NEODATA Construbase* (<https://neodata.mx/precios-unitarios>). Así mismo, el costo del panel fractal fue considerado con base en cotizaciones realizadas por Galicia (2018) y ajustadas a costos actuales.

COD	CONCEPTO	UNIDAD	CANT.	PU	IMPORTE
1	Demolición de piso de banquetta de hasta 10 cm de espesor a máquina. Incluye: retiro de material y disposición final a 1 km del sitio de trabajo, mano de obra y equipo.	M2	1.00	\$ 37.60	\$ 37.60
2	Trazo y nivelación con equipo topográfico, estableciendo ejes de referencia y bancos de nivel, incluye: materiales, cuadrilla de topografía, equipo y herramienta.	M2	1.00	\$ 2.85	\$ 2.85
3	Excavación a cielo abierto, por medios manuales de 0 a -2.00 m, en material tipo A, incluye: mano de obra, equipo, afine, nivelación y herramienta.	M3	1.00	\$ 46.16	\$ 46.16
4	Relleno con capa de arena de 0.10 m para base. Incluye material puesto en obra, equipo y herramienta.	M3	0.10	\$ 11.30	\$ 1.13
5	Suministro y colocación de tela (lamina) impermeable de ancho de 150 cm	M2	1.50	\$ 33.61	\$ 50.42
6	Suministro y colocación de malla geotextil impermeable marca Fibertex, Incluye: Mano de obra y herramienta	M2	1.50	\$ 33.61	\$ 50.42
7	Suministro y colocación de paneles fractales	PZA	27.00	\$ 33.60	\$ 907.27
8	Tubo de PVC hidráulico de hasta 19 mm RD-13.5 extremos lisos, incluye: suministro de materiales, acarreo, instalación, pruebas, mano de obra, equipo y herramienta	M2	1.00	\$ 33.61	\$ 33.61
9	Relleno con material granular de 10 cm de espesor. Incluye: material, mano de obra y herramienta	M3	0.10	\$ 11.30	\$ 1.13

PRESUPUESTO FINAL POR M2 DE RETENCIÓN

\$ 1,090.14

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se muestran las conclusiones a las que se ha llegado con el trabajo de investigación.

6.1. CONCLUSIONES

Las conclusiones y hallazgos con mayor relevancia de esta investigación son las siguientes:

- La extensa revisión al estado del arte relacionado con la distinta normatividad nacional e internacional sobre diseño de sistemas de drenaje pluvial permitió recopilar los fundamentos teóricos básicos para considerarlos en el dimensionamiento del sistema de banquetas retenedoras de agua pluvial. Sin embargo, aunque a nivel internacional pudo hallarse metodología específica para SUDS, a nivel nacional se encontró un vacío normativo en este aspecto que se define como uno de los retos hacia el planteamiento de ciudades mexicanas sensibles al agua.
- La implementación de análisis de elementos finitos (FEA) validó el diseño y dimensionamiento realizado del panel con geometría fractal. Además, queda evidencia de que el uso de los modelos FEA ofrece la versatilidad de diseño que la literatura manifiesta comprobando que gracias a los nuevos modelos computacionales es posible dimensionar mejores productos en cualquier disciplina, haciendo imprescindible el conocimiento básico para su manipulación.
- El análisis realizado con CFD a las diferentes propuestas de estructuras de control permitió llegar a una configuración óptima donde se aprovecha el volumen disponible del sistema de retención; que en caso de no contar con estos modelos hubiera dificultado la obtención de resultados, limitando a soluciones analíticas que no necesariamente representen una aproximación cercana al comportamiento real.
- Los distintos escenarios simulados con CFD permitieron estimar el comportamiento y aportación hacia la minimización de caudales picos para mitigar los potenciales efectos que tienen las lluvias hacia la actual red de drenaje de la ciudad de Toluca. Se identificó que las configuraciones de orificios circulares presentan un mejor funcionamiento para el sistema de retención. Para el caso de estudio (subcuenca urbana frente a ciudad universitaria), el tiempo estimado de desfase del pico en el hidrograma de salida puede ser mayor a los 30 minutos, además de mitigar el gasto pico de entrada mayor al 30%. Los tanques de retención correspondiente a los escenarios 1, 2, 4 y 5 presentan un vaciado relativamente rápido que los vuelve

viables para soportar, en caso de que se presenten, más eventos hidrológicos de la misma magnitud o menor en un tiempo mínimo de 200 minutos.

- El escenario óptimo (escenario 5), garantiza un aprovechamiento de más del 90% en el volumen del tanque además de que logra evacuar el mismo gasto de entrada desde el comienzo del evento hidrológico hasta el minuto 140 aproximadamente, teniendo un 100% de espacio disponible para el aumento en el hidrograma hasta el pico, a partir de este tiempo se comienza con la retención, logrando mitigar el pico en un 36%. Así se logra una reducción del gasto pico de 0.481 m³/s a 0.309 m³/s, aunque el pico se presenta en un tiempo menor al del escenario 4.
- Parte de la modelación hidrológica de la zona de estudio fue posible gracias a la información de registros pluviométricos de un periodo extenso de años, lo que identifica la importancia de contar con registros y mediciones de eventos hidrometeorológicos para el diseño y adaptación de infraestructura.
- La revisión al estado del arte permitió identificar que un sistema de drenaje sostenible representa un conjunto de técnicas (infraestructura nueva y adaptada) y medidas (legislación, políticas públicas, etc.) para la gestión integral de las ciudades, por lo que se ha llegado a la conclusión que el proyecto (banquetas retenedoras) que se desarrolló, puede bien caracterizarse como una técnica de drenaje sostenible y que en conjunto con las recomendaciones y normas con las que se adapte forme un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible. También se realizó una propuesta de clasificación de SUDS que busca homologar los términos en México para contar con conceptos similares a los demás países que tienen en cuenta estos tipo de infraestructura.

6.2. RECOMENDACIONES

Como recomendaciones para futuras investigaciones se propone:

- Definir una conceptualización del sistema de retención incluyendo la geometría del panel fractal para conocer el comportamiento del flujo dentro del tanque a través de un análisis CFD. Se debe tomar en cuenta la compleja geometría interna del tanque, así como, el equipo computacional para realizar la simulación
- Proponer un dispositivo de tratamiento de acuerdo con el esquema del sistema de banquetas retenedoras de agua pluvial. Se recomienda hacer uso del análisis CFD para simular el comportamiento del flujo considerando un modelo que tome en cuenta partículas que representen los sedimentos que pudieran estar presentes en el agua pluvial por efectos de arrastre de calles. Se debe garantizar una calidad óptima para permitir el funcionamiento del sistema de retención y evitar taponamientos dentro del tanque.
- A nivel de gestión, proponer planes como medidas no estructurales que aporten a la calidad del agua que pueda llegar al tanque con el objetivo de conocer el posible aprovechamiento de las aguas pluviales retenidas dando un menor aporte de gasto al sistema de drenaje convencional.
- Como líneas de investigación a reforzar que tienen que ver con la normatividad, es necesario revisar extensamente los criterios de reglamentos de diseño de drenaje mexicanos a fin de identificar vacíos normativos o incluso, métodos obsoletos de diseño tomando en cuenta los efectos producidos por el cambio climático. Es decir, modificar los métodos de la estimación de curvas IDTr considerando la no estacionariedad de la precipitación.

BIBLIOGRAFÍA

- Abellán, A. (2014). *SuD Sostenible. Cunetas Verdes Secas En Imágenes*.
<http://sudsostenible.com/fotogaleria-de-cunetas-verdes/>
- Andimuthu, R., Kandasamy, P., Mudgal, B. V, Jeganathan, A., Balu, A., y Sankar, G. (2019). Performance of urban storm drainage network under changing climate scenarios: Flood mitigation in Indian coastal city. *Scientific Reports*, 9(1), 7783.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-43859-3>
- Andrés-Valeri, V. (2017). *Investigación y desarrollo de firmes permeables y sistemas lineales de drenaje orientados a la mejora de la gestión de la escorrentía superficial urbana*.
- ANSYS Inc. (2020). *Ansys-CFX. Computational Fluid Dynamics software*.
<https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>
- Aparicio, M. F. (2012). *Fundamentos de hidrología de superficie* (Limusa (ed.)).
- Arfanuzzaman, M., y Dahiya, B. (2019). Sustainable urbanization in Southeast Asia and beyond: Challenges of population growth, land use change, and environmental health. *Growth and Change*, 50(2), 725–744. <https://doi.org/10.1111/grow.12297>
- Atlanta Regional Commission. (2016). *Georgia Stormwater Management Manual* (Atlanta Regional Commission; Center for Watershed Protection; Center Forward; Georgia Environmental Protection Division (ed.)). <https://doi.org/10.2190/9AP6-DGY9-EY2Y-Q4M8>
- ATLANTIS. (2007). *Guía de montaje e instalación para tanque de recogida de agua de lluvia*. <http://www.atlantis-america.com/>
- Bayon, J. R., Hernández, J., Fuente, E. G., y Fresno, D. C. (2009). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible*. Universidad de Cantabria.
- Brown, S. A., Schall, J. D., Morris, J. L., Doherty, C. L., Stein, S. M., y Warner, J. C. (2013). *Urban Drainage Design Manual* (Federal Highway Administration (ed.); Third Edit). U.S. Department of Transportation.
http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/library_arc.cfm?pub_number=22&id=140

- CALTRANS. (2007). *Treatment BMP Technology Report*.
- Campisano, A., y Modica, C. (2016). Rainwater harvesting as source control option to reduce roof runoff peaks to downstream drainage systems. *Journal of Hydroinformatics*, 18(1), 23–32. <https://doi.org/10.2166/hydro.2015.133>
- Carter, T., y Keeler, A. (2008). Life-cycle cost–benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *Journal of Environmental Management*, 87(3), 350–363. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2007.01.024>
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M., y Davison, J. B. (2010). Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 42(10), 1582–1591. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2010.05.004>
- CEPAL. (2015). *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe Paradojas y desafíos del desarrollo sostenible*. 98.
- Chahal, M. K., Shi, Z., y Flury, M. (2016). Nutrient leaching and copper speciation in compost-amended bioretention systems. *Science of The Total Environment*, 556, 302–309. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.02.125>
- Checa, M., y De Pazos, M. (2018). *Guía básica de diseño de sistemas de gestión sostenible de aguas pluviales en zonas verdes y otros espacios libres*. 11–33.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., y Mays, L. W. (1988). *Hidrología Aplicada* (McGraw-Hil).
- City of Portland. (2016). *Stormwater Management Manual* (Portland Bureau of Environmental Services. USA. (ed.)).
- CONAGUA. (2016). *Manual de Agua Potable , Alcantarillado y Saneamiento*. <http://mapasconagua.net/libros/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>
- Dahiya, B., y Das, A. (2020). *New Urban Agenda in Asia-Pacific: Governance for Sustainable and Inclusive Cities* (pp. 3–36). https://doi.org/10.1007/978-981-13-6709-0_1
- Davis, A. P., Hunt, W. F., Traver, R. G., y Clar, M. (2009). Bioretention Technology: Overview of Current Practice and Future Needs. *Journal of Environmental Engineering*, 135(3), 109–117. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2009\)135:3\(109\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(109))
- De Pazos Liaño, M. (2019). Experiencias y lecciones aprendidas en Madrid. In C. U.

- Emalcsa (Ed.), *Retos de la gestión de aguas pluviales mediante sistemas de drenaje sostenible*. <https://catedraemalcsa.com/wp-content/uploads/2019/09/20190919-Manuel-de-Pazos-Experiencias-y-lecciones-aprendidas-en-Madrid.pdf>
- Department of Energy and Water Supply. (2013). *Queensland Urban Drainage Manual* (Third Edit). Department of Energy and Water Supply.
- Dhokal, K. P., y Chevalier, L. R. (2017). Managing urban stormwater for urban sustainability: Barriers and policy solutions for green infrastructure application. *Journal of Environmental Management*, 203, 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.065>
- Díaz-Delgado, C., López-Vera, F., y Alberich, M. V. (2005). *Recursos Hídricos*. Piriguazú Ediciones.
- Ding, L., Ren, X., Gu, R., y Che, Y. (2019). Implementation of the “sponge city” development plan in China: An evaluation of public willingness to pay for the life-cycle maintenance of its facilities. *Cities*, 93(500), 13–30. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.04.007>
- EPA. (2020). *Storm Water Management Model (SWMM)*. US Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- Falla, C. K. (2013). *Perdida de carga y descarga en orificios con carga variable*. https://www.academia.edu/10353467/Perdida_de_carga_y_descarga_en_orificios_con_carga_variable
- Fernandez Barrera, A. (2009). *Desarrollo de un sistema de tratamiento del agua de escorrentía superficial procedente de aparcamientos impermeables usando flujo ascendente y geotextiles*. Universidad de Cantabria.
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., y Bluter, D. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12:7, 525–542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Galicia, V. A. (2018). *Diseño del tanque de almacenamiento de agua de lluvia para una vivienda unifamiliar de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca* (p. 114). Facultad de Ingeniería-CIRA-UAEM.
- García, J. C. C. (2018). *Diseño y evaluación de sistema para uso sostenible de agua en*

jardinería. CIRA-UAEM.

- González, E. B. M., Alonso, S. E. A., y Ramírez, C. C. (2017). Modelación Hidrológica E Hidráulica Del Manejo De Las Aguas Pluviales Urbanas En La Parte Alta De La Subcuenca Del Río San Juan De Dios, Guadalajara, Jalisco. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 2, 83–104. <http://www.revistavivienda.cuaad.udg.mx/index.php/rv/article/view/22>
- Gumiel, P., y Arias, M. (2005). *Introducción a los fractales : una nueva forma de analizar la geometría y cuantificar los procesos geológicos*. 100(Figure 3), 115–127.
- Hajani, E., y Rahman, A. (2014). Reliability and cost analysis of a rainwater harvesting system in peri-urban regions of greater Sydney, Australia. *Water (Switzerland)*, 6(4), 945–960. <https://doi.org/10.3390/w6040945>
- Hirschman, D. J., y Kosco, J. (2008). *Managing Stormwater in Your Community A Guide for Building an Effective Post-Construction Program* (Environmental Protection Agency. Center for Watershed Protection (ed.)).
- Howe, C., y Mitchell, C. (2012). *Water sensitive cities*. IWA.
- Ismail, S. T. D. Z., Aziz, H., Nasir, N., Zafrullah, M., y Taib, M. (2012). Obstacles to adopt green roof in Malaysia. In *CHUSER 2012 - 2012 IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering Research*. <https://doi.org/10.1109/CHUSER.2012.6504339>
- Jerez Castillo, S. M., y Torres Cely, L. P. (2012). *Manual de diseño de infraestructura peatonal urbana*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Jiang, Y., Zevenbergen, C., y Ma, Y. (2018). Urban pluvial flooding and stormwater management: A contemporary review of China’s challenges and “sponge cities” strategy. *Environmental Science and Policy*, 80(November 2017), 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.11.016>
- Kumar, H., y Nagarajan, G. (2018). A synergistic combination of Asymptotic Computational Fluid Dynamics and ANN for the estimation of unknown heat flux from fin heat transfer. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), 555–564. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.01.034>
- Liaw, C. H., y Chiang, Y. C. (2014). Dimensionless analysis for designing domestic rainwater harvesting systems at the regional level in Northern Taiwan. *Water (Switzerland)*, 6(12),

3913–3933. <https://doi.org/10.3390/w6123913>

- Liu, L., y Jensen, M. B. (2018). Green infrastructure for sustainable urban water management: Practices of five forerunner cities. *Cities*, 74(November 2017), 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2017.11.013>
- Liu, Y., Sun, C., y Xu, S. (2013). Eco-Efficiency Assessment of Water Systems in China. *Water Resources Management*, 27(14), 4927–4939. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0448-3>
- López-Rebollar, B. M. (2015). *Aplicación de CFD - Ansys-fluent en el estudio hidrodinámico de tanques de recirculación empleados en acuicultura* (p. 145). CIRA-UAEM.
- López, M. L. (2016). *Comparative analysis of different regulations on road surface drainage*. Univesity of Cantabria and VIA University College.
- Mandelbrot, B. (1977). *The Fractal Geometry of Nature* (F. and Company (ed.); primera).
- Marks, I. M., y Gelder, M. G. (1966). [No Title]. *British Journal of Psychiatry*, 112(483), 211–212. <https://doi.org/10.1192/bjp.112.483.211-a>
- Martinez Acosta, J. A. (2017). *Metodología para determinar el potencial de implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en áreas residenciales, a partir de análisis de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Caso de estudio Bogotá D.C., Colombia*. Universidad de Los Andes.
- Maté Marín, A. (2012). *Sustainable stormwater management: development of a decision-making tool to help in best management practices selection. Case study in Laval (Canada)*. [Universidad Politecnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/27245/MEMORIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mousanezhad, D., Ebrahimi, H., Haghpanah, B., Ghosh, R., Ajdari, A., Hamouda, A. M. S., y Vaziri, A. (2015). Spiderweb honeycombs. *International Journal of Solids and Structures*, 66, 218–227. <https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2015.03.036>
- Mukhopadhyay, T., y Adhikari, S. (2016). Equivalent in-plane elastic properties of irregular honeycombs: An analytical approach. *International Journal of Solids and Structures*, 91, 169–184. <https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2015.12.006>

- Murillo Martínez, F. (2018). *Análisis mediante elementos finitos del comportamiento de perfiles combinados de estructuras de autobuses* (Universidad Politécnica de Madrid (ed.)). Trabajo Final de Grado. http://oa.upm.es/50284/1/TFG_FRANCISCO_MURILLO_MARTINEZ.pdf
- Nazeer, S., y Allabakshu, S. (2015). Design and Analysis of Honey Comb Structures with Different Cases. *IJEDR*, 3(4). www.ijedr.org
- Nguyen, T. T., Ngo, H. H., Guo, W., Wang, X. C., Ren, N., Li, G., Ding, J., y Liang, H. (2019). Implementation of a specific urban water management - Sponge City. *Science of the Total Environment*, 652, 147–162. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.168>
- Noblecilla-Palomino, L. A. (2019). *Modelación numérica para determinar la orientación de una bifurcación en el Tramo B del Río Piura* (U. de Piura (ed.)).
- ONU. (2018). *ONU-Habitat - Ciudades Resilientes*. <https://onuhabitat.org.mx/index.php/ciudades-resilientes>
- Ostrom, T. K., y Davis, A. P. (2019). Evaluation of an enhanced treatment media and permeable pavement base to remove stormwater nitrogen, phosphorus, and metals under simulated rainfall. *Water Research*, 166(1), 115071. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115071>
- Peng, Y., Zhang, Z., Yao, J.-J., Zhou, Y., Cai, S., Zhang, J., Li, Y., Kong, Y., y Zhang, W. (2019). Computation fluid dynamics model of first-flush runoff through a hydrodynamic separator. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118253. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118253>
- Perales-Momparler, S., y Andrés-Doménech, I. (2008). *Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible: Una Alternativa a la Gestión del Agua de Lluvia*.
- Philip, R., Sieker, H., Peters, C., Revitt, M. D., Ellis, B. J., Scholes, L., Shutes, B., Hoyer, J., Dickhaut, W., Kronawitter, L., y Loftus, A.-C. (2011). *Gestión Integral del Agua Urbana para la Ciudad del Futuro* (A.-C. L. (ICLEI E. S. Ralph Philip, BarbaraAnton (ed.)). ICLEI – Local Governments for Sustainability, European Secretariat. www.rebekkadold.de
- Posadas-Bejarano, A. (2015). *Sistema de cosecha de agua pluvial y reutilización de aguas grises de regadera en vivienda unifamiliar* (p. 104). Facultad de Ingeniería-CIRA-UAEM.

- RAE. (2018). *Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española*.
<https://dle.rae.es/?w=acera>
- Ramírez Juárez, E. J. (2014). Diseño de banquetas retendedoras de aguas pluviales. *XXIII Congreso Nacional de Hidráulica*, 5.
- Reyes Torres, R., y Viéitez Vivas, A. M. (2010). La normativa de accesibilidad en los espacios públicos urbanizados de distintos países y su aplicación a la configuración del itinerario peatonal. In M. de V. de España (Ed.), *Accesibilidad en los espacios públicos urbanizados* (p. 53). Secretaria General Técnica.
<https://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/EC23F871-B5EB-4482-8E3D-10B40D251397/116390/ACCESpaPublicUrba.pdf>
- Rodriguez-Hernandez, J. (2008). *Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligero* [Universidad de Cantabria]. <http://gip.uniovi.es/docume/TCLAudia.pdf>
- Rodriguez-Rojas, M. I. (2019, March). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. Una oportunidad para la planificación de ciudades sensibles al agua. *Revista de Obras Públicas*, 5.
- Schuetze, T., y Chelleri, L. (2013). Integrating decentralized rainwater management in urban planning and design: Flood resilient and sustainable water management using the example of coastal cities in The Netherlands and Taiwan. *Water (Switzerland)*, 5(2), 593–616. <https://doi.org/10.3390/w5020593>
- Sedlak, D. (2014). *Water 4.0: the past, present, and future of the world's most vital resource* (Y. U. Press (ed.)).
- SEDUVI. (2017). *Lineamientos para el diseño y construcción de banquetas en la Ciudad de México*. Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda-Gobierno de la Ciudad de México
- Shao, G., Guan, Y., Zhang, D., Yu, B., Zhu, J., Shao, G., Guan, Y., Zhang, D., Yu, B., y Zhu, J. (2018). The Impacts of Climate Variability and Land Use Change on Streamflow in the Hailiutu River Basin. *Water*, 10(6), 814. <https://doi.org/10.3390/w10060814>
- Sordo-Ward, A., Gabriel-Martin, I., Perales-Momparler, S., y Garrote, L. (2019, March).

- Influencia de la precipitación en el diseño de SUDS. *Revista de Obras Públicas*, 3607, 125.
- Soriano Martínez, L. (2015). *Indicadores de sostenibilidad de la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos: aplicación a la ciudad de Zaragoza*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Sotelo, Á. G. (2001). *Hidráulica General*. Editorial Limusa.
- Storms, K., Simundza, D., Morgan, E., y Miller, S. (2019). Developing a resilience tool for higher education institutions: a must-have in campus master planning. *Journal of Green Building*, 14(1), 187–198. <https://doi.org/10.3992/1943-4618.14.1.187>
- Susca, T. (2019). Green roofs to reduce building energy use? A review on key structural factors of green roofs and their effects on urban climate. *Building and Environment*, 162, 106–273. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106273>
- Tam, V. W. Y., Zhang, X., Lee, W. W. Y., y Shen, L. Y. (2011). Applications of extensive green-roof systems in contributing to sustainable development in densely populated cities: A Hong Kong study. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, 11(1), 15–25. <https://doi.org/10.5130/ajceb.v11i1.1751>
- Trapote Jaume, A., y Fernández Rodríguez, H. (2016). *Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible*.
<http://www.agroambient.gva.es/documents/163005665/163975683/AGRICULTURA8-16l+memoria/1d8cb413-3eb3-4f5e-a247-e4466a59b21c>
- Tu, J., Yeoh, G.-H., y Liu, C. (2018). *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach* (Elsevier (ed.); 3a ed.). Katey Birtcher.
- Valdés Vásquez, P. A., Coronel Pérez, A., y Huancas Suarez, F. (2016). *Introducción a la geometría fractal*.
http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/1998/3/Valdes_Vasquez_Patricio.pdf
- Vega Pindado, P. (2016). Una década de planes de movilidad urbana sostenible en España 2004-2014. *Anales de Geografía de La Universidad Complutense*, 36(2), 353–374. <https://doi.org/10.5209/AGUC.53589>
- Whelans, C., Maunsell, H. G., y Thompson, P. (1994). *Planning and management guidelines*

for water sensitive urban (residential) design.

- Wilbert, A., Jang, W.-Y., Kyriakides, S., y Floccari, J. F. (2011). Buckling and progressive crushing of laterally loaded honeycomb. *International Journal of Solids and Structures*, 48(5), 803–816. <https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2010.11.014>
- Woods-Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., y Kellagher, R. (2015). *The SuDS Manual*. www.ciria.org
- Yuan, D., An, Y., Wang, J., Chu, S., Lim, B., Chen, B., Xiong, Y., Kou, Y., y Li, J. (2019). Dissolved organic matter characteristics of urban stormwater runoff from different functional regions during grassy swale treatment. *Ecological Indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105667>
- Zevenbergen, C., Fu, D., y Pathirana, A. (2018). Transitioning to Sponge Cities: Challenges and Opportunities to Address Urban Water Problems in China. *Water*, 10(9), 1230. <https://doi.org/10.3390/w10091230>
- Zeyrek, O., Demirural, A., y Baykara, T. (2017). Functional Honeycomb Based Composite Panels for Structural and Thermal Management Applications. *Journal of Material Sciences and Engineering*, 6(6). <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000391>
- Zhang, J., Fu, D., Wang, Y., y Singh, R. (2017). Detailed Sponge City Planning Based on Hierarchical Fuzzy Decision-Making: A Case Study on Yangchen Lake. *Water*, 9(11), 903. <https://doi.org/10.3390/w9110903>
- Zhang, K., y Chui, T. F. M. (2019). Linking hydrological and bioecological benefits of green infrastructures across spatial scales – A literature review. *Science of the Total Environment*, 646, 1219–1231. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.355>
- Zhang, Q., Yang, X., Li, P., Huang, G., Feng, S., Shen, C., Han, B., Zhang, X., Jin, F., Xu, F., y Lu, T. J. (2015). Bioinspired engineering of honeycomb structure – Using nature to inspire human innovation. *Progress in Materials Science*, 74, 332–400. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2015.05.001>