

INTRODUCCIÓN AL MODELADO HIDRÁULICO: CONCEPTOS BÁSICOS Y HERRAMIENTAS AVANZADAS (EPANET, EPA SWMM, HEC-RAS)

Carlos Alexis Bonilla Granados
Diego Iván Sánchez Tapiero
Jarol Derley Ramón Valencia

Introducción al modelado hidráulico:
conceptos básicos y herramientas avanzadas
(EPANET, EPA SWMM, HEC-RAS)

Introducción al modelado hidráulico: conceptos básicos y herramientas avanzadas (EPANET, EPA SWMM, HEC-RAS)

Carlos Alexis Bonilla Granados
Diego Iván Sánchez Tapiero
Jarol Derley Ramón Valencia



Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz

Introducción al modelado hidráulico: conceptos básicos y herramientas avanzadas (EPANET, EPA SWMM, HEC-RAS) / Carlos Alexis Bonilla Granados, Diego Iván Sánchez Tapiero, Jarol Derley Ramón Valencia
-- Pamplona: Universidad de Pamplona. 2024.
201 p. ; 17 cm x 24 cm.

ISBN (digital): 978-628-7656-40-6

© Universidad de Pamplona

Sede Principal Pamplona, Km 1 Vía Bucaramanga-
Ciudad Universitaria. Norte de Santander, Colombia.
www.unipamplona.edu.co
Teléfono: 6075685303

Introducción al modelado hidráulico: conceptos básicos y herramientas avanzadas (EPANET, EPA SWMM, HEC-RAS)

Carlos Alexis Bonilla Granados
Diego Iván Sánchez Tapiero
Jarol Derley Ramón Valencia

ISBN (digital): 978-628-7656-40-6
Primera edición, octubre de 2024
Colección Tecnologías e Ingenierías
© Sello Editorial Unipamplona

Rector: Ivaldo Torres Chávez Ph.D

Vicerrector de Investigaciones: Aldo Pardo García Ph.D

Jefe Sello Editorial Unipamplona: Caterine Mojica Acevedo

Corrección de estilo: Andrea del Pilar Durán Jaimes

Diseño y diagramación: Laura Angelica Buitrago Quintero

Hecho el depósito que establece la ley. Todos los derechos reservados.
Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio, sin permiso del editor.

PRÓLOGO

En el vasto mundo de la ingeniería civil, la hidráulica emerge como una disciplina fundamental, vital para el diseño y la gestión de los sistemas de agua y saneamiento. Los modelos hidráulicos son elementos de gran importancia y buscan representar de forma aproximada el comportamiento real de los sistemas o estructuras físicas. Mediante un modelo hidráulico se puede realizar el análisis, el diseño y en algunos casos la optimización de una red existente o de una red que se desea proyectar o construir. Por tanto, uno de los aspectos fundamentales en la hidráulica es la correcta construcción y ejecución del modelado hidráulico.

Este libro surge como una herramienta indispensable para los profesionales de ingeniería civil, ingeniería ambiental y sus áreas afines, así como para los estudiantes de pregrado y posgrado que aborden los temas relacionados con la modelación hidráulica de redes de abastecimiento de agua y redes de drenaje urbano. En el libro se explican los conceptos básicos necesarios para el análisis hidráulico y se utilizan herramientas avanzadas de modelación, desarrolladas con el software para uso libre como EPANET, EPASWMM y HEC-RAS.

El libro se estructura en tres grandes capítulos; el capítulo uno desarrolla el diseño hidráulico de redes de acueducto con el software EPANET, el capítulo dos explica el diseño hidráulico de redes de alcantarillado con el software EPASWMM y el capítulo tres describe el diseño hidráulico de canales con el software HEC-RAS. Cada capítulo explica de forma clara y detallada el uso del software como herramienta de modelación mediante ejercicios prácticos y propuestos, que permiten al lector adquirir las bases fundamentales del modelado hidráulico.

La publicación de este libro fue posible gracias al apoyo del Sello Editorial de la Universidad de Pamplona, que hace viable que el conocimiento adquirido por los autores durante su formación académica y profesional pueda ser transmitido a otras personas que se interesan en el constante aprendizaje de la hidráulica.

ÍNDICE

Introducción	15
Glosario	17
CAPÍTULO I	
Diseño hidráulico de redes de acueducto con Epanet	21
1.1. Introducción	23
1.2. Redes de distribución de acueducto	23
1.2.1 Elementos de una red de distribución de acueducto	24
1.2.2. Hidráulica de las redes de distribución de acueductos	27
1.2.3. Normatividad	29
1.2.4. Metodología de diseño de una red de distribución de acueducto	31
1.2.5. Software para el diseño de redes de distribución de acueducto	33
1.2.6. Introducción a Epanet	33
1.3. Ejercicio 1, aplicación de Epanet	41
1.3.1. Configuraciones iniciales del ejercicio 1	44
1.3.2. Componentes de la red y sus propiedades del ejercicio 1	46
1.3.3. Configuraciones de tiempo y patrón de consumo del ejercicio 1	50
1.3.4. Análisis, resultados, gráficos e informe del modelo hidráulico del ejercicio 1	52
1.4. Ejercicio 2, aplicación de Epanet	59
1.4.1. Configuraciones iniciales del ejercicio 2	63
1.4.2. Componentes de la red y sus propiedades del ejercicio 2	63

1.4.3. Configuraciones de tiempo y patrón de consumo del ejercicio 2	68
1.4.4. Análisis, resultados, gráficos e informe del modelo hidráulico del ejercicio 2	70
1.5. Ejercicio propuesto	75
1.6. Conclusiones	78
1.7. Material de estudio	78

CAPÍTULO II

Diseño hidráulico de redes de alcantarillado con Epaswmm	81
2.1. Introducción	83
2.2. Redes de alcantarillado	84
2.2.1. Elementos de una red de alcantarillado	84
2.2.2. Hidráulica de alcantarillados	88
2.2.3. Normatividad	90
2.2.4. Metodología de diseño de una red de alcantarillado	92
2.2.5. Software para el diseño de alcantarillados	93
2.2.6. Introducción a Epaswmm	93
2.3. Ejercicio 1, aplicación de Epaswmm	104
2.3.1. Configuraciones iniciales del ejercicio 1	106
2.3.2. Componentes del sistema y sus propiedades del ejercicio 1	108
2.3.3. Configuraciones de tiempo y patrón temporal del ejercicio 1	114
2.3.4. Análisis, resultados, gráficos e informe del modelo hidráulico del ejercicio 1	116
2.4. Ejercicio 2, aplicación de Epaswmm	124
2.4.1. Configuraciones iniciales del ejercicio 2	127
2.4.2. Componentes del sistema y sus propiedades del ejercicio 2	129
2.4.3. Configuraciones de tiempo y patrón temporal del ejercicio 2	135
2.4.4. Análisis, resultados, gráficos e informe del modelo hidráulico del ejercicio 2	137
2.5. Ejercicio propuesto	143
2.6. Conclusiones	144
2.7. Material de estudio	145

CAPÍTULO III

Diseño hidráulico de canales con Hec-Ras	147
--	-----

3.1. Introducción	149
3.2. Hidráulica de canales	149
3.2.1. Flujo en canales abiertos	150
3.2.2. Propiedades geométricas de los canales abiertos ...	153
3.2.3. Metodología de diseño de canales	156
3.2.4. Software para el diseño de canales	157
3.3. Introducción a Hec-Ras	157
3.4. Ejercicio 1, aplicación de Hec-Ras	165
3.4.1. Configuraciones iniciales	166
3.4.2. Geometría del canal	168
3.4.3. Flujo del canal	173
3.4.4. Análisis de la modelación	174
3.5. Ejercicio 2, aplicación de Hec-Ras	179
3.5.1. Configuraciones iniciales	181
3.5.2. Geometría del canal	181
3.5.3. Flujo del canal	188
3.5.4. Análisis de la modelación	189
3.6. Ejercicio propuesto	194
3.7. Conclusiones	195
3.8. Material de estudio	195
Referencias bibliográficas	197

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Normativa de las empresas de servicios públicos en Bogotá, Cali y Medellín	31
Tabla 2. Propiedades de los elementos de la red del ejercicio 1	43
Tabla 3. Patrón del consumo de la red del ejercicio 1	43
Tabla 4. Unidades métricas, Sistema Internacional (SI)	45
Tabla 5. Reporte de EPANET de la RDAP del ejercicio 1	59
Tabla 6. Propiedades de los elementos de la red del ejercicio 2	61
Tabla 7. Patrón del consumo de la red del ejercicio 2	62
Tabla 8. Reporte de EPANET de la red del ejercicio 2	74
Tabla 9. Propiedades de los elementos de la RDAP	76
Tabla 10. Material complementario del capítulo	79
Tabla 11. Normativa de las empresas de servicios públicos en Bogotá, Cali y Medellín	91
Tabla 12. Propiedades de los elementos del sistema de alcantarillado, ejercicio 1	105
Tabla 13. Patrón de tiempo para el sistema de alcantarillado, ejercicio 1	106
Tabla 14. Unidades métricas, Sistema Internacional (SI)	107
Tabla 15. Reporte de EPASWMM del sistema de alcantarillado del ejercicio 1	123
Tabla 16. Propiedades de las conexiones del sistema de alcantarillado, ejercicio 2	124
Tabla 17. Propiedades de los conductos del sistema de alcantarillado, ejercicio 2	125
Tabla 18. Patrón de tiempo para el sistema de alcantarillado, ejercicio 2	127
Tabla 19. Reporte de EPASWMM del sistema de alcantarillado del ejercicio 2	141
Tabla 20. Propiedades de los elementos del sistema de alcantarillado, ejercicio propuesto	143
Tabla 21. Material complementario del capítulo	146
Tabla 22. Tipos de flujo, canales abiertos	151
Tabla 23. Datos de las secciones del ejercicio 1	166
Tabla 24. Datos de las secciones del ejercicio 1	180
Tabla 25. Material complementario del capítulo	196

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general de un sistema de acueducto	26
Figura 2. Interfaz general de EPANET en un modelo hidráulico de una RDAP	35
Figura 3. Ícono de embalse y sus propiedades	36
Figura 4. Ícono de depósito y sus propiedades	37
Figura 5. Ícono de conexión y sus propiedades	38
Figura 6. Ícono de tubería y sus propiedades	39
Figura 7. Ícono de válvula y sus propiedades	40
Figura 8. Ícono de bomba y sus propiedades	41
Figura 9. Esquema de la RDAP del ejercicio 1	42
Figura 10. Valores por defecto, opciones hidráulicas	44
Figura 11. Barra de menú y barra de herramientas de EPANET	46
Figura 12. Configuración de embalse y conexiones del ejercicio 1	47
Figura 13. Configuración de tuberías del ejercicio 1	49
Figura 14. Opciones de cálculo, opciones de tiempo	50
Figura 15. Configuración del patrón de consumo de ejercicio 1	51
Figura 16. Inicial análisis y estado de inicio	53
Figura 17. Opciones del plano de la red	54
Figura 18. Plano de la red, resultado de presión y velocidad a las 9:00 Hrs ..	55
Figura 19. Gráficos, selección del gráfico	56
Figura 20. Curva de evolución temporal de velocidad en las tuberías 1, 2, 3, 4 y 5	57
Figura 21. Curva de evolución temporal de presión en los nudos 2, 3, 4, 5 y 6	58
Figura 22. Esquema de la RDAP del ejercicio 2	60
Figura 23. Barra de menú y barra de herramientas	64
Figura 24. Configuración de embalse y tanques del ejercicio 2	64
Figura 25. Configuración de nudos del ejercicio 2	66
Figura 26. Configuración de tuberías del ejercicio 2	67
Figura 27. Opciones de tiempo	68
Figura 28. Configuración del patrón de consumo residencial, comercial e industrial del ejercicio 2	69
Figura 29. Patrón de consumo en el nudo 2 del ejercicio 2	70
Figura 30. Plano de la red, resultado de presión a las 0:00 Hrs	71
Figura 31. Opción de tablas y selección de la tabla	72
Figura 32. Serie de Tiempo, en el Nudo 2	73

Figura 33. Esquema de la RDAP del ejercicio propuesto	75
Figura 34. Componentes de una red de alcantarillado sanitario y pluvial	87
Figura 35. Componentes de una red de alcantarillado combinado	88
Figura 36. Interfaz general de EPASWMM en un modelo hidráulico de una red de alcantarillado	95
Figura 37. Ícono de lluvia y sus propiedades	96
Figura 38. Ícono de subcuenca y sus propiedades	97
Figura 39. Ícono de conexión y sus propiedades	97
Figura 40. Ícono de vertido y sus propiedades	98
Figura 41. Ícono de divisor y sus propiedades	99
Figura 42. Ícono de depósito y sus propiedades	100
Figura 43. Ícono de conducto y sus propiedades	100
Figura 44. Ícono de bomba y sus propiedades	101
Figura 45. Ícono de orificio y sus propiedades	102
Figura 46. Ícono de vertedero y sus propiedades	102
Figura 47. Ícono de descarga y sus propiedades	103
Figura 48. Ícono de etiqueta de texto y sus propiedades	104
Figura 49. Esquema del sistema de alcantarillado, ejercicio 1	104
Figura 50. Valores por defecto, nudos/líneas	108
Figura 51. Barra de menú y barra de herramientas de EPASWMM	109
Figura 52. Configuración de aportes a las conexiones del ejercicio 1	110
Figura 53. Configuración de vertido y conexiones del ejercicio 1	111
Figura 54. Configuración de tuberías del ejercicio 1	113
Figura 55. Opciones de simulación, fechas e intervalos	114
Figura 56. Configuración del patrón temporal del ejercicio ejercicio 1	115
Figura 57. Inicial análisis y estado de inicio	116
Figura 58. Opciones del plano de la red	117
Figura 59. Plano de la red, resultado de Cota y velocidad a la 1:00 Hrs	118
Figura 60. Gráfico de evolución, edición del gráfico	119
Figura 61. Curva de evolución temporal de velocidad en las tuberías 1, 2, 3, 9 y 10	120
Figura 62. Perfil longitudinal, edición del perfil	121
Figura 63. Perfil longitudinal de los tramos 1, 2, 3, 6, 9 y 10	122
Figura 64. Paso a paso para guardar un reporte completo	122
Figura 65. Esquema del sistema de alcantarillado, ejercicio 2	126
Figura 66. Valores por defecto, identificadores (ID), subcuencas y nudos/líneas	128
Figura 67. Barra de menú y barra de herramientas del ejercicio 2	129
Figura 68. Barra de menú y barra de herramientas del ejercicio 2	129
Figura 69. Configuración de conexiones del ejercicio 2	130
Figura 70. Configuración de vertido del ejercicio 2	131
Figura 71. Configuración de tuberías del ejercicio 2	132
Figura 72. Configuración de la estación pluviométrica del ejercicio 2	133
Figura 73. Parámetros de entrada para la precipitación del ejercicio 2	133
Figura 74. Esquema de las subcuencas del sistema de alcantarillado del ejercicio 2	134

Figura 75. Configuración de subcuencas del ejercicio 2	135
Figura 76. Opciones de simulación, general, fechas, intervalos y onda dinámica	136
Figura 77. Inicial análisis y estado de inicio del ejercicio 2	137
Figura 78. Gráfico de evolución, edición del gráfico	138
Figura 79. Curva de evolución temporal del caudal en la tubería 17	139
Figura 80. Perfil longitudinal, edición del perfil	140
Figura 81. Perfil longitudinal de los tramos 1, 2, 3, 6, 9 y 10	140
Figura 82. Esquema del sistema, ejercicio propuesto	144
Figura 83. Elementos geométricos de un canal según su sección transversal	155
Figura 84. Secciones de un canal	155
Figura 85. Entorno de trabajo de HEC-RAS	158
Figura 86. Componentes de HEC-RAS	159
Figura 87. Herramientas del componente geometric data	161
Figura 88. Componente Steady Flow Data, flujo permanente	162
Figura 89. Sección de un Box-culvert, Herramienta Bridge Culvert Data	163
Figura 90. Ubicación de Levees	164
Figura 91. Herramienta Warnings del programa HEC-RAS	165
Figura 92. Sección transversal de canal, ejercicio 1	166
Figura 93. Configuración del sistema de unidades del ejercicio 1	167
Figura 94. Creación de nuevo proyecto, ejercicio 1	168
Figura 95. Creación del cauce, ejercicio 1	169
Figura 96. Creación de la sección K1+000, Ejercicio 1	170
Figura 97. Datos de las secciones requeridas del ejercicio 1	171
Figura 98. Interpolación de secciones transversales del ejercicio 1	172
Figura 99. Datos de flujo permanente del ejercicio 1	174
Figura 100. Análisis de flujo permanente y resumen del estado del ejercicio 1	175
Figura 101. Resultado del modelo en sección transversal del ejercicio 1	176
Figura 102. Resultado de perfil del cauce del ejercicio 1	176
Figura 103. Resultado de vista 3D del cauce del ejercicio 1	177
Figura 104. Tabla resumen del ejercicio 1	177
Figura 105. Tabla resumen de parámetros hidráulicos de la sección, ejercicio 1	178
Figura 106. Topografía del cauce del ejercicio 2	179
Figura 107. Tablero del puente del ejercicio 2	180
Figura 108. Perfil y secciones realizadas en CIVIL 3D	181
Figura 109. Exportación de secciones desde CIVIL 3D	182
Figura 110. Importación de secciones a HEC-RAS	183
Figura 111. Datos de la primera y última sección importada del ejercicio 2 ...	184
Figura 112. Datos del tablero del puente del ejercicio 2	185
Figura 113. Datos del pilar del puente del ejercicio 2	186
Figura 114. Datos de estribo 1 y 2 del puente del ejercicio 2	187
Figura 115. Vista de la geometría y secciones del puente (aguas arriba y aguas abajo)	187
Figura 116. Datos de flujo permanente del ejercicio 2	189

Figura 117. Análisis de flujo permanente y resumen del estado del ejercicio 2	190
Figura 118. Resultado del modelo en sección transversal del ejercicio 2	191
Figura 119. Resultado de perfil del cauce del ejercicio 2	192
Figura 120. Resultado de vista 3D del cauce del ejercicio 2	192
Figura 121. Resumen numérico de propiedades del cauce del ejercicio 2	193
Figura 122. Tabla resumen de parámetros hidráulicos de la sección del ejercicio 2	193
Figura 123. Sección transversal de canal, ejercicio propuesto	194

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales ejes de formación en la ingeniería civil y ambiental lo compone la ingeniería hidráulica. Esta rama de la ingeniería tiene como objetivo principal la planificación, el diseño y la construcción de obras hidráulicas. Estas obras están conformadas por un conjunto de estructuras construidas con el fin de captar, transportar, tratar, controlar, almacenar y aprovechar el recurso hídrico para diferentes usos. En la planificación y el diseño de las obras hidráulicas, es necesario emplear conceptos y teorías de la mecánica de fluidos, hidráulica de tuberías e hidráulica de canales.

La evolución de la tecnología en la ingeniería ha permitido el desarrollo y la implementación de diferentes softwares de análisis y diseño hidráulico, los cuales incluyen en sus códigos las teorías existentes y los conceptos aplicables en cada una de las estructuras hidráulicas a diseñar. En los programas de diseño de obras hidráulicas, es posible generar modelos de simulación hidráulica que permiten llevar a cabo análisis, revelando la variación de los parámetros conforme a las normativas de diseño específicas de cada país o región. Este enfoque facilita la evaluación de diversas alternativas de diseño con el objetivo de alcanzar soluciones hidráulicas optimizadas para abordar desafíos relacionados con el saneamiento, drenaje o abastecimiento en poblaciones o comunidades.

La creación de software de diseño se ha convertido en un área específica de trabajo y desarrollo en ingeniería hidráulica. Actualmente, existen empresas y centros de investigación dedicados a la creación de diferentes opciones de software o programas de diseño hidráulico, por ejemplo, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA-USA) y el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (HEC-USACE).

Estas dos corporaciones gubernamentales son creadoras de varios programas de acceso libre, que actualmente son los más usados en Colombia y en varios países del mundo.

La EPA ha desarrollado, entre otras herramientas, el software EPANET, diseñado para analizar y planificar redes de tuberías a presión, especialmente utilizado en sistemas de acueductos. Asimismo, el software EPASWMM, creado por la misma entidad, constituye un modelo de gestión de aguas pluviales ampliamente empleado en sistemas de alcantarillado. Por otro lado, el HEC-USACE ha desarrollado el software HEC-RAS, una herramienta que posibilita la creación de modelos hidráulicos para ríos y canales, tanto naturales como artificiales.

Con el propósito de proporcionar las herramientas esenciales para la implementación del diseño hidráulico asistido por computador (PC), se presenta este libro como guía para estudiantes de Ingeniería Civil, Ingeniería Ambiental y a fines. La estructura del libro está diseñada de la siguiente manera:

Capítulo 1.

Se abordan los conceptos esenciales que deben considerarse en el diseño y análisis de redes de acueducto, haciendo hincapié en la utilización del software EPANET, y un ejercicio práctico basado en un caso de estudio concreto.

Capítulo 2.

Se describe la implementación del programa EPASWMM con el objetivo de analizar un caso de estudio específico y llevar a cabo el diseño hidráulico de una red de alcantarillado urbano.

Capítulo 3.

Dedicado a la implementación del software HEC-RAS, donde se aplican los conceptos de la hidráulica de canales. Se lleva a cabo un ejercicio de estudio que permite analizar la variación de los parámetros hidráulicos en un canal natural de drenaje, considerando distintos escenarios de caudal.

GLOSARIO

A

Abastecimiento:

Suministro y distribución de agua a través de sistemas de infraestructura, como acueductos y redes de tuberías, para satisfacer las necesidades de consumo de una población o comunidad.

Acueducto:

Conjunto de obras hidráulicas diseñadas y construidas para captar, transportar, tratar, almacenar y abastecer agua para diferentes usos, principalmente el consumo humano o agrícola.

Aguas lluvias:

Son los aportes generados durante un evento de lluvia o precipitación, producido por el fenómeno de condensación del vapor de agua y que cae sobre alguna superficie.

Agua potable:

Agua apta para el consumo humano, que no genera ningún tipo de afectación en la salud de las personas y que generalmente se obtiene de procesos previos de tratamientos físicos y químicos denominados procesos de potabilización.

Aguas residuales:

Es el resultado del agua que ha sido afectada en su calidad por algún proceso previo, recibiendo algún tipo de contaminación que está generalmente relacionada con acciones antropogénicas.

Alcantarillado:

Sistema hidráulico de drenaje, diseñado y construido para captar, transportar y verter las aguas lluvias y las aguas residuales generadas en una población, hasta un punto de disposición final.

C

Canal:

Estructura hidráulica utilizada para el transporte de un fluido, generalmente agua, que puede ser de origen natural o artificial y que puede ser de tipo abierto o cerrado (conducto).

Caudal:

Volumen de un fluido que transita en un periodo fijo de tiempo. Sus unidades de medidas son metros cúbicos por segundo (m³/s) en el sistema internacional y pies cúbicos por segundo (pies³/s) en el sistema inglés.

D

Drenaje:

Sistemas e infraestructuras diseñados para recolectar, transportar y eliminar el exceso de agua de lluvia y aguas residuales de áreas urbanas, evitando inundaciones y acumulaciones de agua en calles, edificios y espacios públicos, y asegurando así la funcionalidad y seguridad de las zonas urbanizadas.

E

Escorrentía:

Nombre que recibe el agua que es producida en un fenómeno de lluvia y que circula por una superficie o terreno.

Hidráulica:

Ciencia que estudia el comportamiento de los fluidos en función de sus propiedades.

H

M

Mecánica de fluidos:

Rama de la física que estudia las fuerzas que provocan el movimiento de los fluidos.

Modelo hidráulico:

Representación computacional que simula el flujo y comportamiento del agua dentro de estas redes, permitiendo analizar y optimizar su diseño y operación.

N

Nudo:

Es un punto de conexión en la red donde convergen dos o más tuberías.

O

Obras hidráulicas:

Estructuras de ingeniería diseñados para gestionar el agua, incluyendo su captación, almacenamiento, transporte, tratamiento y control, con el objetivo de satisfacer necesidades humanas como el abastecimiento de agua potable, riego, generación de energía, control de inundaciones y saneamiento.

P

Patrón de consumo:

Distribución y variación del uso de agua por parte de los usuarios a lo largo del tiempo, incluyendo los cambios diarios, estacionales y anuales, que afectan la demanda en redes de suministro y sistemas de acueducto.

Perfil de cauce:

Representación gráfica de la elevación del lecho de un cuerpo de agua (río, arroyo o canal) en función de la distancia a lo largo de su longitud.

R

Red de distribución:

Sistema de tuberías, válvulas, bombas y otros componentes diseñados para transportar y distribuir agua desde los puntos de suministro hasta los usuarios finales, asegurando un suministro continuo y adecuado de agua potable a hogares, industrias y otras instalaciones.

S

Saneamiento:

En este contexto se refiere a las acciones y sistemas destinados a garantizar el acceso a agua limpia y segura, así como la gestión adecuada de aguas residuales, con el fin de proteger la salud pública y el ambiente.

Software:

Conjunto de programas y aplicaciones que permiten a una computadora realizar tareas específicas.

T

Tubería:

Conducto cerrado, construido con distintos materiales, utilizado para transportar fluidos en estado líquido o gaseoso.

CAPÍTULO I

**Diseño hidráulico de redes
de acueducto con EPANET**

CAPÍTULO I

Diseño hidráulico de redes de acueducto con EPANET

1.1. Introducción

La modelación hidráulica de las redes de un sistema de acueducto está conformada por un conjunto de procedimientos que representa el comportamiento del agua en las tuberías. Esta modelación permite conocer parámetros propios del sistema, como la velocidad, las pérdidas de energía y la presión en diferentes puntos del sistema, entre otras, cuya finalidad es realizar el diseño hidráulico adecuado que permita satisfacer las necesidades de una población o localidad. Los cálculos numéricos pueden realizarse de forma manual, como se hacía antes del uso masivo del computador, pero estos procedimientos se convierten en algo tedioso y que demanda gran cantidad de tiempo. Otra opción empleada es utilizando códigos en hojas de cálculo electrónicas. En la actualidad la modelación se desarrolla mediante el uso de softwares especializados de ingeniería.

1.2. Redes de distribución de acueducto

Un sistema de acueducto está conformado por diferentes componentes o subsistemas, donde cada elemento es diseñado y construido con una función específica. Las bocatomas o captaciones tienen como finalidad recoger el agua destinada a un uso específico. Las aducciones se encargan de transportar el agua captada y que aún no ha recibido ningún tipo de tratamiento hasta una planta de tratamiento de agua potable (PTAP). La PTAP está conformada por varias estructuras que, mediante procesos físicos y químicos (sedimentación, floculación, coagulación, filtración, cloración, entre otros), llevan a cabo procesos de tratamiento para reducir y eliminar las

concentraciones de los contaminantes presentes en el agua. Esto resulta en agua potable, que posteriormente se almacena y, mediante las conducciones, se transporta hasta el último subsistema: las **redes de distribución de acueducto** (López, 2003).

Las redes de distribución de acueducto están conformadas por el conjunto de tuberías y accesorios hidráulicos (válvulas, hidrantes, codos, tees, estaciones piezométricas y acometidas, entre otros), con el fin principal de suministrar agua potable a una población o comunidad, para abastecer las necesidades de consumo y que garantice un funcionamiento hidráulico adecuado (Empresas Públicas de Medellín E.S.P [EPM E.S.P], 2009), que a su vez cumpla la normativa existente en cada país o región.

1.2.1 Elementos de una red de distribución de acueducto

Una red de distribución generalmente transporta el agua desde un tanque de almacenamiento hasta cada una de las edificaciones que demanda un caudal de agua potable para abastecimiento propio. A continuación, se describen los principales elementos que conforman una red de distribución de acueducto, pero aclarando que existen algunos elementos que no son empleados en todos los sistemas, ya que dependen de los requerimientos especiales de cada red o sistema a diseñar como, por ejemplo, las estaciones de bombeo, válvulas reguladoras de presión y los sistemas de gestión de acueductos con tecnologías inteligentes de infraestructura de agua.

Tanque de almacenamiento. Estructura proyectada para cumplir varias funciones, su función principal es almacenar un volumen de agua potable que pueda atender una eventualidad de desabastecimiento por interrupciones en la captación, aducción o PTAP; también es utilizado para regular o compensar la variación existente entre los caudales que entran al tanque, que provienen de la PTAP y los caudales que salen del tanque hacia la red, generados por los consumos demandados por la red. A su vez, los tanques son los encargados de mantener las presiones de servicio en la red de distribución (Corcho y Duque, 1993).

Conducción. Conducto cerrado encargado de transportar y distribuir el agua potable generada después de un proceso de tratamiento hasta un tanque de almacenamiento o hasta la red de distribución, generalmente funcionan con flujo a presión (López, 2003).

Red matriz. Conjunto de tuberías que conforman la malla principal de servicio de una red de distribución y que distribuye el agua procedente de la conducción, planta de tratamiento o tanques de compensación a las redes secundarias de una población. Esta red tiene como función mantener las presiones básicas de servicio para el funcionamiento adecuado de todo el sistema y el caudal demandado por toda la red de distribución (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia [MINVIVIENDA], 2017).

Red secundaria y redes menores. Conformado por el conjunto de tuberías, estructuras y accesorios que transportan el agua desde la red matriz hasta las acometidas domiciliarias de cada una de las viviendas de una población (MINVIVIENDA, 2015).

Válvulas. Elementos mecánicos que se ubican en la red de acueducto con diferentes funciones: permitir o detener el paso de agua (válvulas de corte o cierre), controlar o mantener valores constantes de presión en la red (válvulas reductoras o válvulas reguladoras de presión), permitir la expulsión del aire atrapado en las tuberías (válvulas de ventosa) y realizar la limpieza de arenas y sólidos que logran ingresar en la red (válvulas de purga). Estos elementos pueden ser accionados de forma manual o automática. (Corcho y Duque, 1993).

Accesorios hidráulicos. Conjunto de elementos que se empalman con las tuberías para permitir cambios de dirección, derivaciones y cierre o taponamiento del agua. Se pueden fabricar de diferentes materiales y soportan variaciones de presión debido a la fuerza generada por los cambios de dirección en los puntos de instalación, generalmente deben ser reforzados con un elemento de anclaje o atraque, que ayuda a contrarrestar las fuerzas que se generan en sus puntos de instalación (López, 2003).

Acometidas domiciliarias. Derivación de la red o tubería de distribu-

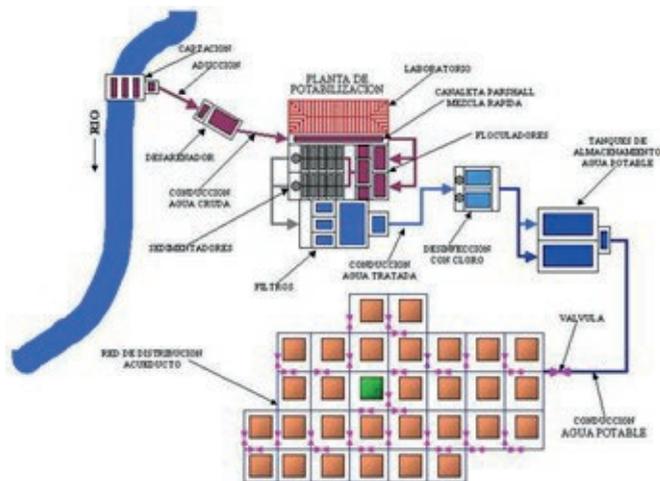
ción, que permite el suministro de agua potable a una vivienda o edificación y que generalmente cuenta con accesorios para control de caudal y un medidor que cuantifica el volumen de agua potable suministrado a cada usuario del sistema (EPM E.S.P., 2009).

Hidrantes. Elementos conectados a la red de distribución de un sistema de acueducto y diseñados para suministrar un caudal necesario para la extinción de incendios, mediante la conexión de mangueras especiales (EPM E.S.P., 2009).

Estaciones de bombeo. Estructura proyectada para conducir el agua potable a un punto topográfico más elevado, hasta donde no es posible llevar el agua con el aprovechamiento de la gravedad. Está conformado generalmente por tres elementos básicos que son la succión, el equipo de impulsión o bombeo y la descarga, en conjunto con una serie de accesorios necesarios para el funcionamiento de cada estación (López, 2003).

En la Figura 1 se muestra un esquema general de los diferentes componentes de un sistema de acueducto, desde la captación en la fuente superficial, hasta la red de distribución.

Figura 1
Esquema general de un sistema de acueducto.



Fuente: Díaz (2014).

1.2.2. Hidráulica de las redes de distribución de acueductos

El diseño hidráulico de las redes de distribución está basado inicialmente en la hidráulica de tuberías a presión y sus ecuaciones principales o fundamentales, como la ecuación de continuidad que trata el principio de conservación de la masa de un fluido a través de dos secciones de un conducto (Ecuación 1). Así mismo, el principio de Bernoulli que establece la formulación de la ley de la conservación de la energía a lo largo de un tramo de flujo como se muestra en la Ecuación 2 (Saldarriaga, 2016).

$$\begin{aligned}V_e A_e &= V_s A_s \\Q_E &= Q_S\end{aligned}\tag{Ecuación 1}$$

Donde,

V_e = velocidad del flujo en sección de entrada [m/s].

A_e = área de la sección de entrada [m²].

V_s = velocidad del flujo en sección de salida [m/s].

A_s = área de la sección de salida [m²].

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{1-2}\tag{Ecuación 2}$$

Donde,

Z = posición con respecto al nivel de referencia [m].

$P/\rho g$ = altura de presión [m].

$v^2/2g$ = altura de velocidad [m].

h_{1-2} = pérdidas de energía entre 1 y 2 [m].

Es necesario recordar que las pérdidas de energía en el flujo a presión obedecen a la fricción entre el fluido y las paredes de las tuberías y los accesorios que están presentes en el recorrido del agua, como codos, tees, válvulas y otros. Para estimar el valor de las pérdidas de fricción existen diferentes ecuaciones, pero las más destacadas son la de Hazen-Williams (Ecuación 3) y Darcy-Weisbach

(Ecuación 4) (Saldarriaga, 2016). Estas ecuaciones y su desarrollo son conceptos previos que se abordan en la mecánica de fluidos e hidráulica.

$$hf = \frac{6.8241 L}{C_{HW}^{1.851} D^{1.167}} V^{1.851} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde,

hf = pérdida de carga debida a la fricción [m].

C_{HW} = Coeficiente que depende del material y la edad de la tubería.

L = longitud de la tubería [m].

D = diámetro interno de la tubería [m].

V = velocidad media del flujo [m/s].

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde,

hf = pérdida de carga debida a la fricción [m].

f = factor de fricción.

L = longitud de la tubería [m].

D = diámetro interno de la tubería [m].

v = velocidad media del flujo [m/s].

g = aceleración de la gravedad [m/s²].

En cuanto al cálculo o solución numérica e hidráulica de la red, esta se basa específicamente en poder resolver las diferentes incógnitas múltiples que se tienen en un modelo de una red o malla. En donde se deben conocer los valores reales de caudal transportado, presión en diferentes puntos de la red, velocidad de cada tramo y diámetro adecuado de cada tubería. Para ello, se emplean diferentes ecuaciones como las ecuaciones de Manning (Ecuación 5), Colebrook-White (Ecuación 6) y diferentes metodologías de cálculos de redes, como por ejemplo, el método de Hardy Cross formulado en 1936 o el método del gradiente publicado por Todini en 1988 (López, 2003). Estas ecuaciones hidráulicas y las metodologías de cálculo son

conceptos previos necesarios que se debieron abordar en la mecánica de fluidos, hidráulica y redes de servicio.

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 5

Donde,

V= velocidad del flujo [m/s].

n= coeficiente que depende de la rugosidad de la pared.

R_h= radio hidráulico [m].

S= pendiente de la línea de agua en [m/m].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

Ecuación 6

Donde,

f= factor de fricción de la ecuación de Colebrook-White
(coeficiente de rozamiento).

k/D= rugosidad relativa.

Re= Número de Reynolds.

En la actualidad existen metodologías de modelamiento hidráulico que contemplan diferentes aspectos como modelación en periodo extendido, la sectorización hidráulica, calibración y validación hidráulica, concepto de resiliencia y redundancia en redes de distribución, diseño optimizado usando el concepto de inteligencia artificial y algoritmos genéticos. Todas estas metodologías forman parte de la evolución reciente de la teoría de redes de distribución y se han podido desarrollar al poder implementar el diseño hidráulico asistido por computador.

1.2.3. Normatividad

Los sistemas de acueducto deben diseñarse para satisfacer las necesidades de consumo de cada región o población, pero este funciona-

miento debe estar enmarcado dentro de una serie de requisitos de los principales parámetros técnicos del sistema como los rangos de velocidad, diámetros mínimos, rangos de presión, entre otros. Las entidades encargadas de regular la prestación de los servicios públicos o la infraestructura urbana, son las encargadas de reglamentar los requisitos a tener en cuenta en el diseño de cada red distribución, estas entidades en conjunto con grupos de profesionales de diferentes campos de aplicación (académicos de las universidades del país, empresarios del sector de agua potable y saneamiento, constructores y profesionales independientes) son las encargadas de crear la normatividad existente a nivel regional o nacional y a su vez de verificar el cumplimiento de las normas vigentes en cuanto a redes de distribución.

En Colombia, se establece una normativa vigente que define los criterios técnicos básicos en el ámbito del agua potable y saneamiento básico, conocida como el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS). Este reglamento fue emitido por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio a través de la resolución 0330, fechada el 8 de junio de 2017, y es de obligatorio cumplimiento e implementación en todo el territorio nacional. Adicionalmente, es importante señalar que entre las normativas en vigor se encuentran la resolución 799 de 2021 y la resolución 908 de 2021, las cuales introducen modificaciones parciales a la resolución 0330 de 2017.

A nivel regional, las empresas de servicio público de las principales ciudades del país han creado sus propias normas, encaminadas a establecer los criterios básicos, los requisitos mínimos y las metodologías que se deben tener en cuenta en los diseños de sistemas de acueductos y alcantarillado (EPM E.S.P., 2009). En la Tabla 1 se describen las normas establecidas por las empresas públicas de Bogotá, Cali y Medellín, asociadas al diseño de redes de distribución de sistemas de acueducto.

Tabla 1

Normativa de las empresas de servicios públicos en Bogotá, Cali y Medellín

Ciudad	Normas	Empresa de servicios Públicos
Bogotá	<ul style="list-style-type: none">• NS-031 Estudios de población y demanda de agua en sectores específicos de la ciudad.• NS-033 Criterios para diseño de red matriz.• NS-036 Criterios para diseño de red de acueducto secundaria y menor de distribución.• NS-165 Requisitos para el desarrollo y calibración de modelos hidráulicos de los sistemas de acueducto.	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá [EAAB] (2020)
Cali	<ul style="list-style-type: none">• Normas de diseño para el sistema de acueducto.• Criterios de diseño para redes de acueducto.	Empresas Municipales de Cali [EMCALI] (2020)
Medellín	<ul style="list-style-type: none">• Normas de diseño de sistemas de acueducto.	EPM E.S.P. (2009)

Fuente: Elaboración propia.

1.2.4. Metodología de diseño de una red de distribución de acueducto

El diseño hidráulico de las redes de un sistema de acueducto, debe tener en cuenta inicialmente una planeación adecuada que garantice una oferta de agua suficiente que permita abastecer las necesidades de uso de una población esperada o proyectada (Jaramillo, 2009). Por lo tanto, es necesario que el diseño hidráulico de una red de distribución tenga en cuenta, como mínimo la siguiente metodología (MIN-VIVIENDA, 2017).

Estudios previos. Análisis de información existente que permita identificar las redes existentes (catastro de redes) y las características de consumo de la población de estudio.

Reconocimiento de campo. Visita de terreno al sitio del proyecto donde se realizará el diseño de la red distribución, con el fin de entender y visualizar, las posibilidades reales de ejecución de las alternativas propuestas en el diseño hidráulico.

Estudios complementarios. Es necesario conocer la topografía y las características geotécnicas del suelo donde se proyectan las redes de distribución de agua potable. De igual manera se hace necesario conocer el estudio de predios para poder planificar y proyectar unas alternativas adecuadas que satisfagan los requerimientos de consumo de la población y que se puedan construir de acuerdo con el diseño hidráulico realizado.

Selección de alternativas. En todo diseño hidráulico se hace necesario realizar un planteamiento de posibles alternativas que den solución a los requerimientos de consumo de cada proyecto. Así como, realizar una evaluación que permita identificar la mejor alternativa con base en criterios de sostenibilidad, a partir de la evaluación de los aspectos económicos, técnicos, ambientales y sociales.

Trazados de redes a nivel de detalle. Se requiere llevar a cabo un trazado geométrico que considere el estudio topográfico, detallando los alineamientos de las redes de distribución, la ubicación de estructuras y accesorios. Además, es crucial tener en cuenta el catastro de redes para prevenir interferencias con otros sistemas, como alcantarillado, redes de gas, eléctricas, entre otros, y asegurar que se cumplan las distancias mínimas establecidas por cada normativa.

Desarrollo del modelo hidráulico. Se debe desarrollar un modelo hidráulico que tenga en cuenta las demandas de caudal actuales y futuras, así como posibles escenarios de emergencia para caudales contra incendios; es necesario realizar el cálculo hidráulico para flujo permanente y para condiciones de periodo extendido que consideren la variación horaria y diaria de la red a partir de curvas de consumo propias del sistema o de regiones de similar comportamiento. El modelo hidráulico debe ser resuelto mediante ecuaciones del balance de masa y conservación de la energía (Ecuaciones 1 y 2), se debe contemplar el cálculo de las pérdidas de energía y el modelo matemático se debe realizar en un software de análisis hidráulico de redes de distribución, que permita el uso de las ecuaciones de Manning, Darcy Weisbach o Colebrook-White y el método del gradiente o el de Hardy Cross; con el fin, de poder definir las obras necesarias en la red, precisando parámetros tales como diámetros, caudales, velocidades, especificaciones de materiales y demás aspectos técnicos que permitan asegurar el funcionamiento adecuado de los sistemas.

1.2.5. Software para el diseño de redes de distribución de acueducto

El diseño de la red de distribución de acueducto, también conocida como Red de Distribución de Agua Potable (RDAP), se fundamenta en el cálculo de los diámetros apropiados para las tuberías propuestas. Esto se hace para asegurar el transporte de un caudal estimado, acorde con los consumos proyectados de la población de estudio y para satisfacer un rango óptimo de presiones y velocidades (Saldarriaga, 2016). En la actualidad, existen diversos programas informáticos o softwares diseñados para proporcionar soluciones específicas a los problemas particulares de cada RDAP a diseñar.

Los softwares de diseño hidráulico son herramientas que permiten modelar obras de infraestructura hidráulica para poder realizar un análisis detallado y con esto poder desarrollar modelos optimizados (Mohapatra *et al.*, 2014). Existen varios softwares reconocidos y de gran aceptación en el diseño de una RDAP, algunos son de acceso libre y otros que son denominados softwares comerciales, debido a que la licencia de uso tiene un costo de adquisición.

El software de acceso libre más utilizado a nivel mundial es EPANET, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA-USA). La EPA-USA es una entidad encargada de los asuntos de protección ambiental que emite normativas y guías con el objetivo de garantizar la preservación del ambiente y salvaguardar la salud humana. Por otro lado, WATERCAD, desarrollado por la reconocida empresa especializada en la creación de softwares de ingeniería, *Bentley Systems*, es posiblemente el software comercial de mayor aceptación en América Latina. En este módulo se implementará el uso de EPANET para el diseño de una RDAP y se entregaran las herramientas básicas necesarias para poder implementar este software en futuros proyectos de ingeniería y obras hidráulicas.

1.2.6. Introducción a EPANET

EPANET es considerado el software más famoso de sistemas de flujo a presión en el campo de la ingeniería hidráulica (Mohapatra *et al.*, 2014). Este es un programa que permite realizar el análisis hidráulico

del comportamiento de los sistemas de distribución de agua, así como también permite realizar modelos de calidad del agua en la red (Rossman, 2000). Su aceptación a nivel mundial y específicamente en países de habla hispana radica en las actualizaciones constantes del software y traducciones de los manuales originales de la EPA-USA, realizadas por el Instituto de Ingeniería del Agua y el Medio Ambiente (IIAMA) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) de España (Martínez, 2001).

El software permite desarrollar simulaciones de la red en periodo estacionario y extendido del comportamiento hidráulico de la red, realizando la inclusión de diversos componentes como tuberías, nudos o conexiones, bombas, depósitos y válvulas. Es considerado un motor de análisis hidráulico con evoluciones temporales de diferentes variables y, de manera general, presenta las siguientes características (Martínez, 2001):

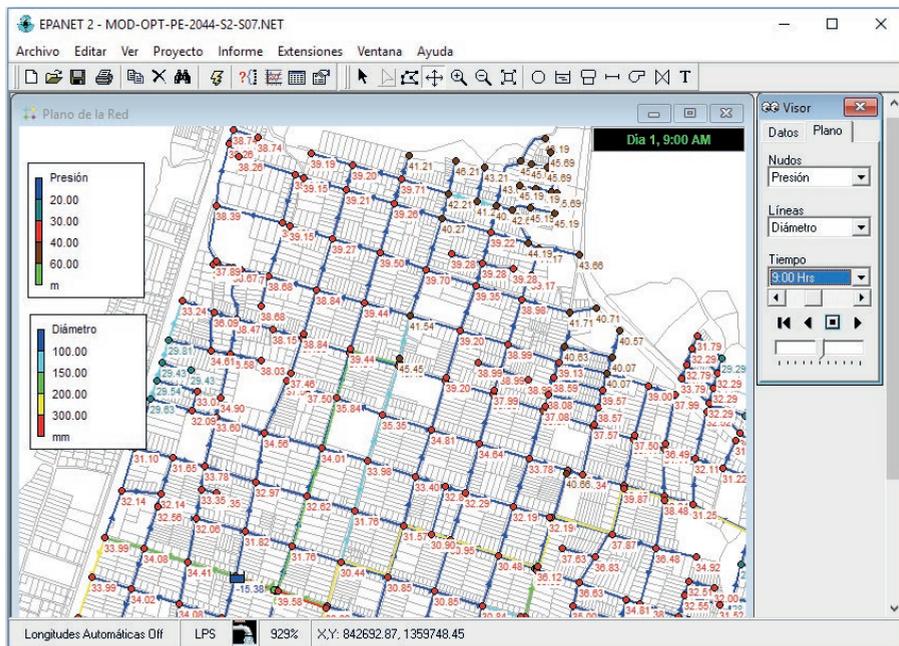
- No tiene limitaciones para el tamaño de la red a modelar.
- Las pérdidas por fricción en tuberías se calculan por las ecuaciones de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach o Chezy-Manning, y estima las pérdidas menores por accesorios hidráulicos.
- Permite modelar equipos de bombeo, así como estimar la energía consumida y el coste del bombeo.
- Considera el almacenamiento de agua en diferentes tipos de depósitos o tanques.
- Modela diferentes tipos de válvulas, incluyendo válvulas de control, de retención, de aislamiento, reductoras de presión, entre otras.
- Permite categorizar los consumos de la red y su variación mediante curvas de modulación.
- Analiza el seguimiento en el tiempo de diferentes materiales reactivos y las concentraciones que se encuentran en la red de distribución.
- Permite analizar la disminución del cloro residual.
- Modela posibles situaciones de propagación de contaminación.
- Realiza la solución hidráulica de la RDAP por el método del gradiente.

EPANET permite realizar una interacción amigable mediante una interfaz gráfica conformada por diferentes elementos físicos o compo-

mentos, que representan cada uno de los elementos de una red hidráulica a presión o RDAP. De acuerdo con la complejidad de cada red a modelar, se hace necesario utilizar diferentes elementos físicos. En la Figura 2 se muestra la interfaz general del programa al desarrollar un modelo hidráulico de una RDAP, donde se pueden observar diferentes elementos de la red, escala de presiones, diámetros de las tuberías y la hora de análisis del modelo (De Plaza, 2017).

Figura 2

Interfaz general de EPANET en un modelo hidráulico de una RDAP.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se explican algunos de los componentes principales del programa y que serán empleados en los ejercicios de este módulo:

Embalse. También es denominado 'reservorio' y representa la estructura hidráulica que suministra el agua necesaria para el modelo hidráulico. Tiene como característica principal una capacidad de almacenamiento infinito del fluido y la particularidad de fijar o mantener su cota piezométrica como constante, sin importar el tiempo de la simulación, garantizando un valor de energía constante para el modelo. Además, permite configurar diferentes variaciones de nivel en función de patrones de tiempo, si el modelo lo requiere

Este elemento trata de representar la fuente de abastecimiento del sistema de acueducto o de la red de distribución, como por ejemplo un río, un embalse hidráulico, un pozo de agua subterránea y otras fuentes similares. Incluso puede representar un punto de conexión dentro de la RDAP a una tubería que transporta agua de manera continua, como una red matriz. El ícono de la barra de herramientas que representa este elemento y las propiedades que permite configurar, realizando doble clic, se muestran en la Figura 3.

Figura 3
Ícono de embalse y sus propiedades.

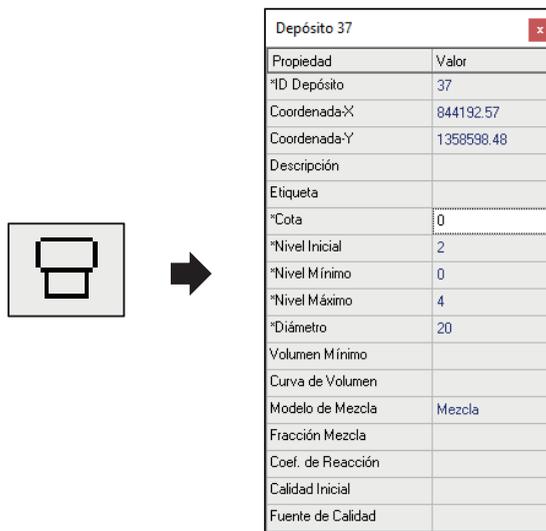



Embalse 2	
Propiedad	Valor
*ID Embalse	2
Coordenada-X	842523.89
Coordenada-Y	1358786.15
Descripción	
Etiqueta	
*Altura Total	480.73
Patrón de Altura	2
Calidad Inicial	
Fuente de Calidad	
Caudal Neto Entrante	-55.35
Cota	495.63
Presión	14.90
Calidad	0.00

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Depósito. Elemento físico que representa las estructuras hidráulicas conocida como tanques de almacenamiento. A diferencia de los embalses, los depósitos tienen limitaciones en la producción de agua y necesitan una fuente de abastecimiento, la cual puede ser por gravedad (embalse) o por presión (bomba). A medida que se analizan diferentes periodos de tiempo en un modelo hidráulico, el nivel dentro del depósito varía de acuerdo con la configuración realizada. Este elemento también permite simular una fuente de abastecimiento de cloro. El ícono que representa el depósito y las propiedades de configuración se muestran en la Figura 4.

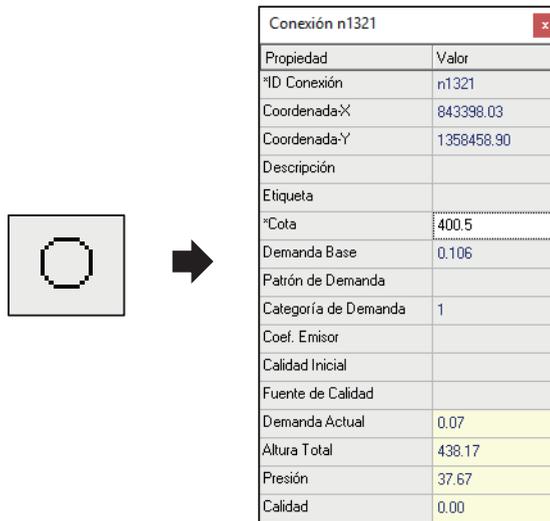
Figura 4
Ícono de depósito y sus propiedades.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Conexión. Permite la unión de las tuberías, por lo que se le denomina nudo y sirve como punto hidráulico de inyección o extracción de agua en la red. En este elemento se asignan las cotas topográficas de la RDAP y los consumos del modelo hidráulico que fueron calculados de acuerdo con las características de consumo de la población de estudio. El ícono de este elemento y sus propiedades de configuración se muestran en la Figura 5.

Figura 5
Ícono de conexión y sus propiedades.



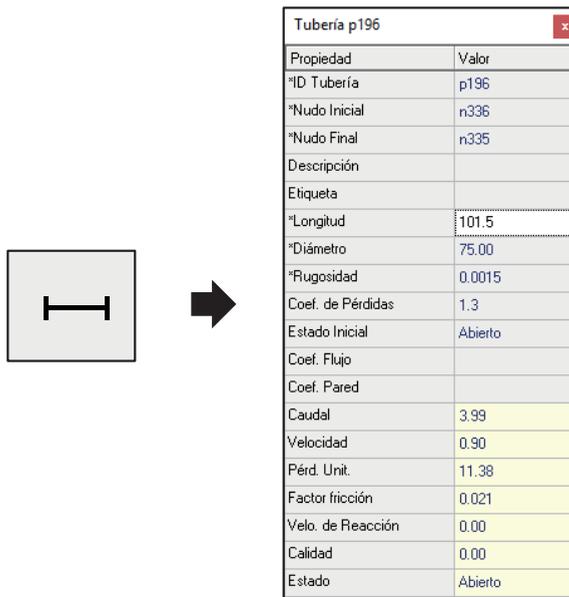
Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Tubería. Elemento que transporta el agua en una RDAP, funciona a presión y el movimiento del agua se produce de un punto de mayor a menor energía. EPANET permite configurar diferentes materiales de las tuberías, diámetros, longitudes, trazados y la metodología de cálculo de pérdida de energía (Hazen-Williams, Darcy-Weisbach o Chezy-Manning). También permite calcular las pérdidas de energía por accesorios en cada tramo de tubería. Para poder dibujar una tubería es necesario tener una conexión inicial y una final. El ícono de la tubería y sus propiedades de configuración se muestran en la Figura 6.

Válvulas. Elementos que permiten el control del flujo o caudal que es transportado en una tubería. El tipo de válvula a utilizar en una RDAP depende los requerimientos propios de cada modelo hidráulico. EPANET permite modelar válvulas reductoras de presión (PR), válvulas sostenedoras de presión (PSV), válvulas de rotura de carga (PBV), válvulas controladoras de caudal (FCV), válvulas reguladoras

por estrangulación (TCV) y válvulas de propósito general (GPV). Cada válvula mencionada realiza algún control de presión o caudal y debe ser planteada de acuerdo con las propiedades de funcionamiento de cada una de estas. Para poder dibujar una válvula es necesario tener una conexión inicial y una final.

Figura 6
Ícono de tubería y sus propiedades.

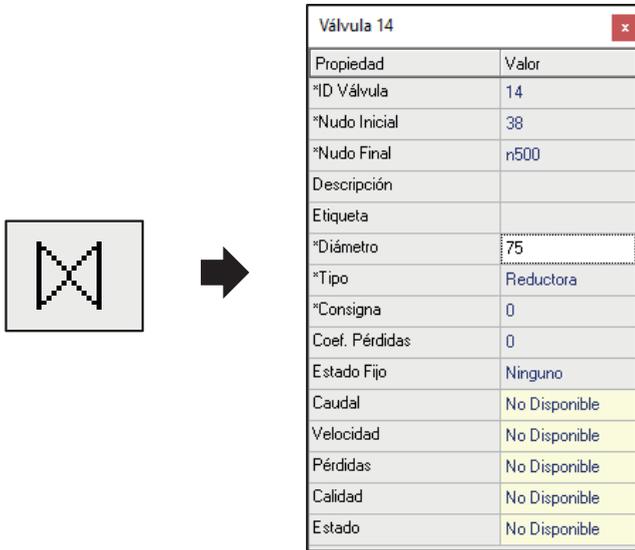


Tubería p196	
Propiedad	Valor
*ID Tubería	p196
*Nudo Inicial	n336
*Nudo Final	n335
Descripción	
Etiqueta	
*Longitud	101.5
*Diámetro	75.00
*Rugosidad	0.0015
Coef. de Pérdidas	1.3
Estado Inicial	Abierto
Coef. Flujo	
Coef. Pared	
Caudal	3.99
Velocidad	0.90
Pérd. Unit.	11.38
Factor fricción	0.021
Velo. de Reacción	0.00
Calidad	0.00
Estado	Abierto

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

El ícono de EPANET que representa las válvulas mencionadas y sus propiedades de configuración se muestran en la Figura 7.

Figura 7
Ícono de válvula y sus propiedades.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Bombas. Componente de una RDAP empleado para suministrar la energía necesaria que permita transportar el fluido de un punto a otro, venciendo diferencias de altura topográfica y pérdida de energía que impiden el movimiento del agua hasta el punto esperado. EPANET considera bombas de flujo unidireccional y de velocidad constante o variable. Para configurar las condiciones de funcionamiento de la bomba, es necesario conocer la curva característica de la bomba a implementar, en donde se relacione la altura dinámica total y el caudal de bombeo. El ícono de la bomba y sus propiedades de configuración se muestran en la Figura 8.

Figura 8
Ícono de bomba y sus propiedades.



→

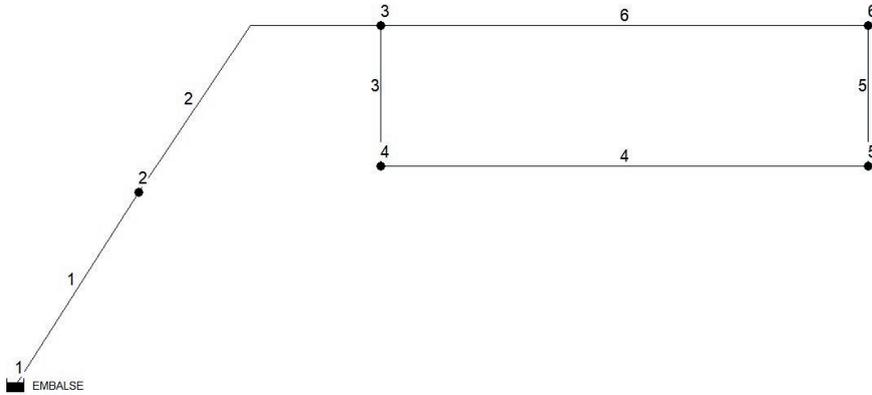
Bomba 14	
Propiedad	Valor
*ID Bomba	14
*Nudo Inicial	n1041
*Nudo Final	37
Descripción	
Etiqueta	
Curva Característica	
Potencia	
Velocidad Relativa	
Patrón	
Estado Inicial	Abierto
Curva de Rend.	
Precio Energía	
Patrón de Precios	
Caudal	No Disponible
Altura Manométrica	No Disponible
Calidad	No Disponible
Estado	No Disponible

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

1.3. Ejercicio 1, aplicación de EPANET

Realizar el modelo hidráulico de una RDAP que abastecerá una zona determinada; las tuberías conforman una red cerrada y el modelo esquemático de la red se muestra en la Figura 9. Las propiedades de los diferentes elementos de la red se especifican en la Tabla 2.

Figura 9
Esquema de la RDAP del ejercicio 1.



Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, el modelo hidráulico debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La altura total en el embalse será de 1221 m.s.n.m. (cota más presión en la red).
- En las opciones hidráulicas, utilizar la ecuación de pérdidas de Darcy-Weisbach (D-W).
- En las opciones de tiempo, modelar para una duración total de 24 horas.
- Incluir el patrón de consumo que se muestra en la Tabla 3.

Tabla 2*Propiedades de los elementos de la red del ejercicio 1*

Nudo	Cota (m.s.n.m.)	Demanda base (L/s)	Longitud de tubería (m)	Diámetro (mm)	Rugosidad (mm)	Coefficiente de pérdidas
1 (Embalse)	1196.00					
			73.90	75	0.0015	1.3
2	1192.50	0.732				
			86.10	75	0.0015	2.5
3	1189.00	0.186				
			34.05	50	0.0015	4.2
4	1189.80	0.193				
			158.70	50	0.0015	2.5
5	1188.22	0.199				
			34.10	50	0.0015	1.5
6	1186.9	0.244				
			158.70	50	0.0015	2.5
3	1189.00	0.186				

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3*Patrón del consumo de la red del ejercicio 1*

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Coefficiente	0.67	0.63	0.62	0.65	0.74	1.07	1.15	1.27	1.44	1.48	1.42	1.43
Periodo	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Coefficiente	1.27	1.32	1.24	1.21	1.14	1.22	1.12	1.06	0.96	0.83	0.88	0.74

Fuente: Elaboración propia.

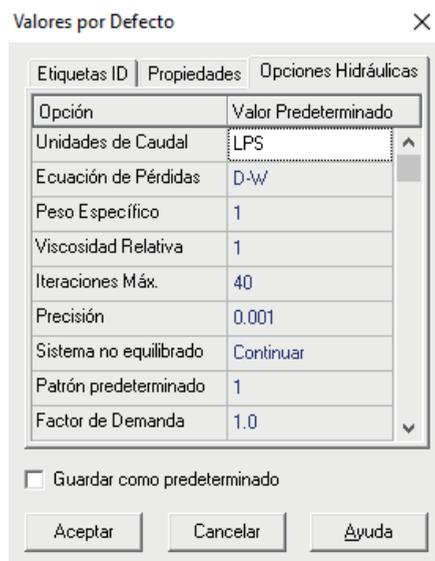
Para desarrollar el modelo de la red planteada, lo primero que se debe realizar es configurar el sistema de unidades, las opciones hidráulicas para el cálculo de pérdidas de energía y las demás configuraciones que se consideren necesarias en el modelo. Se explicará paso a paso la forma de construir el modelo y obtener los resultados más importantes de la red.

1.3.1. Configuraciones iniciales del ejercicio 1

Al tener el programa abierto y estar en el espacio de trabajo, de la barra de menú se selecciona con un clic la pestaña **Proyecto** → **Valores por Defecto** → **Opciones Hidráulicas**. En este espacio se configuran las unidades de caudal en LPS (Litros por segundo), la ecuación de pérdidas en D-W (Darcy-Weisbach) y seguidamente se da clic en aceptar. La vista del menú indicado se muestra en la Figura 10.

Figura 10

Valores por defecto, opciones hidráulicas.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Si hay dudas sobre las unidades en la configuración, se accede a **Ayuda** → **Unidades** para obtener soporte técnico a través de un tutorial. Las unidades del sistema internacional (SI) que muestra el programa se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4
Unidades métricas, Sistema Internacional (SI)

Parámetro	Unidades
Concentración	-- mg/L o µg/L
Demanda	-- (ver unidades de Caudal)
Diámetro (Tuberías)	-- Milímetros
Diámetro (Tanques)	-- Metros
Rendimiento	-- %
Altura geométrica	-- Metros
Coefficiente emisor	-- Unidades de caudal -- (metros) ^{1/2}
Energía	-- kilovatio - hora
Caudal	-- LPS (litros / s); LPM (litros / min), MLD (megalitros / día), CMH (metros cúbicos / hora) o CMD (metros cúbicos / día)
Factor de fricción	-- Adimensional
Altura hidráulica	-- Metros
Longitud	-- Metros
Coef. pérdidas menores	-- Adimensional
Potencia	-- kilovatios
Presión	-- Metros
Coef. reacción (Seno)	-- 1/día (primer orden)
Coef. reacción (Pared)	-- Masa / L / día (orden 0) o Metros / día (primer orden)
Coefficiente de rugosidad	-- milímetros (Darcy-Weisbach), adimensional demás casos
Fuente inyección másica	-- Masa / minuto
Velocidad	-- Metros / segundos
Volumen	-- Metros cúbicos
Edad del agua	-- Horas

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Una vez realizadas las configuraciones iniciales del modelo, se procede a incluir los elementos de la red y sus propiedades.

1.3.2. Componentes de la red y sus propiedades del ejercicio 1

Se procede a incluir los componentes del modelo hidráulico y a asignar las distintas propiedades descritas en la Tabla 2. Para este ejercicio, los componentes a emplear en la red son: un embalse que suministre el agua a la red, 5 conexiones que serán los nudos de la red, donde se asignarán los caudales consumidos por el modelo, y 6 tuberías que estarán unidas por los nudos y que crearán una malla cerrada. Los componentes se crean desde la barra de herramientas que se muestra en la Figura 11.

Figura 11
Barra de menú y barra de herramientas de EPANET



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Configuración del embalse. Se da clic en el botón **Embalse** de la barra de herramientas (Figura 11); la forma del cursor cambia y se observa que el botón seleccionado queda sombreado o sostenido. En el espacio de trabajo, se da clic en el lugar donde se desee colocar el embalse; para configurar las propiedades, se da doble clic en el embalse creado y se modifican las propiedades de acuerdo con la necesidad de cada modelo hidráulico. Para el ejemplo de diseño, se configura la **Altura Total en 1121 m.s.n.m.** Esta altura representa la cota del embalse o punto de conexión de la red más la presión en este punto. Los valores de las **Coordenadas X-Y** se generan de forma automática de acuerdo con el punto donde se ubicó el embalse, y el **ID-Embalse** se genera de manera automática en el orden de creación

de los embalses. En la Figura 12 se muestra cómo debe quedar la configuración de este elemento.

Figura 12
Configuración de embalse y conexiones del ejercicio 1.

Embalse 1	
Propiedad	Valor
*ID Embalse	1
Coordenada-X	-661.50
Coordenada-Y	5114.20
Descripción	
Etiqueta	
*Altura Total	1221
Patrón de Altura	
Calidad Inicial	
Fuente de Calidad	
Caudal Neto Entrante	-1.55
Cota	1121.00
Presión	0.00
Calidad	0.00

Conexión 2	
Propiedad	Valor
*ID Conexión	2
Coordenada-X	311.96
Coordenada-Y	6638.43
Descripción	
Etiqueta	
*Cota	1192.5
Demanda Base	0.732
Patrón de Demanda	
Categoría de Demanda	1
Coef. Emisor	
Calidad Inicial	
Fuente de Calidad	
Demanda Actual	0.00
Altura Total	1121.00
Presión	1121.00
Calidad	0.00

Conexión 3	
Propiedad	Valor
*ID Conexión	3
Coordenada-X	2215.28
Coordenada-Y	7944.44
Descripción	
Etiqueta	
*Cota	1189
Demanda Base	0.186
Patrón de Demanda	
Categoría de Demanda	1
Coef. Emisor	
Calidad Inicial	
Fuente de Calidad	
Demanda Actual	0.00
Altura Total	1121.00
Presión	1121.00
Calidad	0.00

Conexión 4	
Propiedad	Valor
*ID Conexión	4
Coordenada-X	2214.04
Coordenada-Y	6843.36
Descripción	
Etiqueta	
*Cota	1189.8
Demanda Base	0.193
Patrón de Demanda	
Categoría de Demanda	1
Coef. Emisor	
Calidad Inicial	
Fuente de Calidad	
Demanda Actual	0.00
Altura Total	1121.00
Presión	1121.00
Calidad	0.00

Conexión 5	
Propiedad	Valor
*ID Conexión	5
Coordenada-X	6043.83
Coordenada-Y	6843.36
Descripción	
Etiqueta	
*Cota	1188.22
Demanda Base	0.199
Patrón de Demanda	
Categoría de Demanda	1
Coef. Emisor	
Calidad Inicial	
Fuente de Calidad	
Demanda Actual	No Disponible
Altura Total	No Disponible
Presión	No Disponible
Calidad	No Disponible

Conexión 6	
Propiedad	Valor
*ID Conexión	6
Coordenada-X	6043.83
Coordenada-Y	7944.91
Descripción	
Etiqueta	
*Cota	1186.9
Demanda Base	0.244
Patrón de Demanda	
Categoría de Demanda	1
Coef. Emisor	
Calidad Inicial	
Fuente de Calidad	
Demanda Actual	0.00
Altura Total	1121.00
Presión	1121.00
Calidad	0.00

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Configuración de conexiones. En la barra de herramientas (Figura 11), se da clic en el botón **Conexión** y seguidamente se ubica la conexión o nudo en el lugar del espacio de trabajo donde se desee crear el elemento, el procedimiento se repite para crear los nudos necesarios que demande el modelo. Con doble clic sobre el elemento creado se modifican las propiedades de cada conexión, para el ejercicio de diseño se deben cambiar las propiedades **Cota** (altura topográfica del nudo) y **Demanda Base** (caudal que demanda la red en ese punto). La configuración realizada a las conexiones 2, 3, 4, 5 y 6, se muestran en la Figura 12.

Configuración de tuberías. Se selecciona con un clic el ícono de tubería de la barra de herramientas; el cursor cambia de forma y se deben seleccionar los dos nudos entre los que estará la tubería. El primer nudo seleccionado será tomado por el programa como el inicial de la tubería y el segundo nudo como el final. También, se pueden crear tuberías que conecten elementos diferentes a los nudos, como un depósito y un embalse, por ejemplo, la tubería 1 estará creada entre el embalse 1 y la conexión 1; las otras tuberías estarán creadas entre las conexiones indicadas en la Tabla 2.

Sobre cada una de las tuberías se hace doble clic y se procede a cambiar las propiedades de cada modelo hidráulico, en el ejercicio de diseño se deben modificar en todas las tuberías la **Longitud, Diámetro, Rugosidad y Coeficiente de Pérdidas**, en la Figura 13 se muestra la configuración realizada a las tuberías 1, 2, 3, 4, 5 y 6, de acuerdo con lo especificado en la Tabla 2.

Figura 13
Configuración de tuberías del ejercicio 1.

Tubería 1	
Propiedad	Valor
*ID Tubería	1
*Nudo Inicial	1
*Nudo Final	2
Descripción	
Etiqueta	
*Longitud	73.9
*Diámetro	75
*Rugosidad	0.0015
Coef. de Pérdidas	1.3
Estado Inicial	Abierto
Coef. Flujo	
Coef. Pared	
Caudal	No Disponible
Velocidad	No Disponible
Pérd. Unit.	No Disponible
Factor fricción	No Disponible
Velo. de Reacción	No Disponible
Calidad	No Disponible
Estado	No Disponible

Tubería 2	
Propiedad	Valor
*ID Tubería	2
*Nudo Inicial	2
*Nudo Final	3
Descripción	
Etiqueta	
*Longitud	86.1
*Diámetro	75
*Rugosidad	0.0015
Coef. de Pérdidas	2.5
Estado Inicial	Abierto
Coef. Flujo	
Coef. Pared	
Caudal	No Disponible
Velocidad	No Disponible
Pérd. Unit.	No Disponible
Factor fricción	No Disponible
Velo. de Reacción	No Disponible
Calidad	No Disponible
Estado	No Disponible

Tubería 3	
Propiedad	Valor
*ID Tubería	3
*Nudo Inicial	3
*Nudo Final	4
Descripción	
Etiqueta	
*Longitud	34.05
*Diámetro	50
*Rugosidad	0.0015
Coef. de Pérdidas	4.2
Estado Inicial	Abierto
Coef. Flujo	
Coef. Pared	
Caudal	No Disponible
Velocidad	No Disponible
Pérd. Unit.	No Disponible
Factor fricción	No Disponible
Velo. de Reacción	No Disponible
Calidad	No Disponible
Estado	No Disponible

Tubería 4	
Propiedad	Valor
*ID Tubería	4
*Nudo Inicial	4
*Nudo Final	5
Descripción	
Etiqueta	
*Longitud	158.7
*Diámetro	50
*Rugosidad	0.0015
Coef. de Pérdidas	2.5
Estado Inicial	Abierto
Coef. Flujo	
Coef. Pared	
Caudal	No Disponible
Velocidad	No Disponible
Pérd. Unit.	No Disponible
Factor fricción	No Disponible
Velo. de Reacción	No Disponible
Calidad	No Disponible
Estado	No Disponible

Tubería 5	
Propiedad	Valor
*ID Tubería	5
*Nudo Inicial	5
*Nudo Final	6
Descripción	
Etiqueta	
*Longitud	34.1
*Diámetro	50
*Rugosidad	0.0015
Coef. de Pérdidas	1.5
Estado Inicial	Abierto
Coef. Flujo	
Coef. Pared	
Caudal	No Disponible
Velocidad	No Disponible
Pérd. Unit.	No Disponible
Factor fricción	No Disponible
Velo. de Reacción	No Disponible
Calidad	No Disponible
Estado	No Disponible

Tubería 6	
Propiedad	Valor
*ID Tubería	6
*Nudo Inicial	6
*Nudo Final	3
Descripción	
Etiqueta	
*Longitud	158.7
*Diámetro	50
*Rugosidad	0.0015
Coef. de Pérdidas	2.5
Estado Inicial	Abierto
Coef. Flujo	
Coef. Pared	
Caudal	No Disponible
Velocidad	No Disponible
Pérd. Unit.	No Disponible
Factor fricción	No Disponible
Velo. de Reacción	No Disponible
Calidad	No Disponible
Estado	No Disponible

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

1.3.3. Configuraciones de tiempo y patrón de consumo del ejercicio 1

EPANET permite configurar las opciones de tiempo del modelo hidráulico. El programa permite modelar en un momento específico o en un periodo extendido, facilitando la visualización y análisis del comportamiento de la red y sus variaciones. Al realizar el análisis en un periodo extendido, es necesario incluir en el modelo lo que denomina **Patrón**. Este representa las características de consumo de agua potable o la variación de las demandas a lo largo del periodo de tiempo analizado, generalmente un día. Aquí se indica la relación existente en caudal promedio diario (Qmd), caudal máximo diario (QMD) y caudal máximo horario (QMH), factores fundamentales en el diseño de acueductos y redes de distribución.

En el ejercicio de aplicación, se configurarán las opciones de tiempo de acuerdo con las indicaciones generales del modelo, con una duración total del modelo de 24 horas y un patrón de consumo de la red especificado en la Tabla 3. De la barra de menú se selecciona con un clic **Proyecto** → **Opciones de Cálculo** → **Opciones de Tiempo** y se modifica la **Duración Total** a 24 horas y se especifica que el **Intervalo de Cálculo Hidráulico** es de una hora. En la Figura 14 se muestra esta configuración.

Figura 14

Opciones de cálculo, opciones de tiempo.



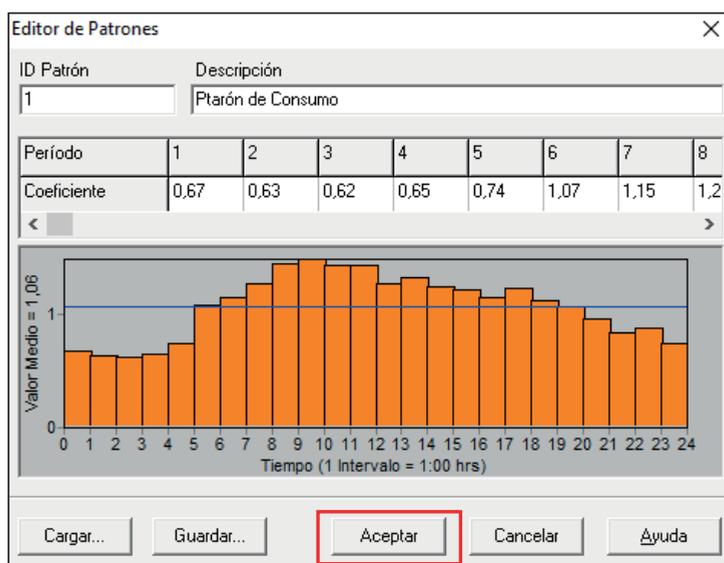
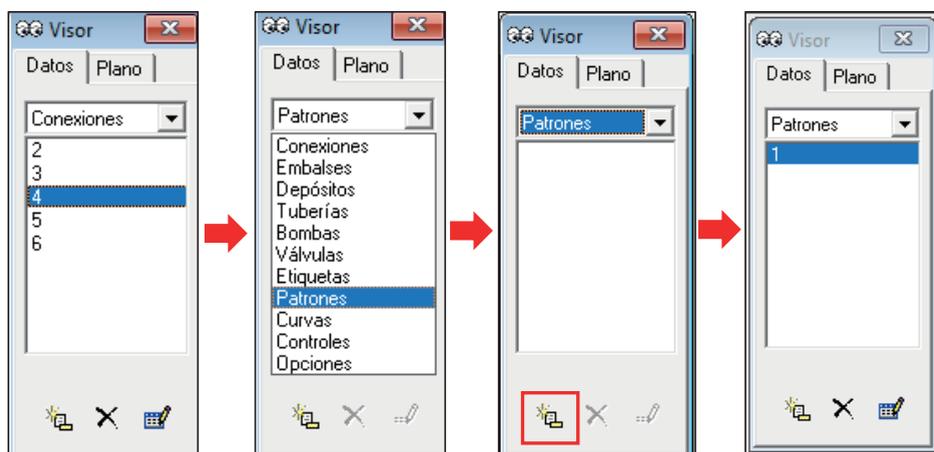
Propiedad	Hrs:Min
Duración Total	24
Intervalo Cálculo Hidráulico	1:00
Intervalo Cálculo Calidad	0:05
Intervalo Patrones	1:00
Tiempo Inicio Patrón	0:00
Intervalo Informe	1:00
Tiempo Inicio Informe	0:00
Tiempo Inicio Reloj	12 am
Estadística	Ninguno

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

En la Figura 15 se muestra la configuración para introducir el patrón de consumo de la Tabla 3 en el modelo de la red.

Figura 15

Configuración del patrón de consumo de ejercicio 1.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

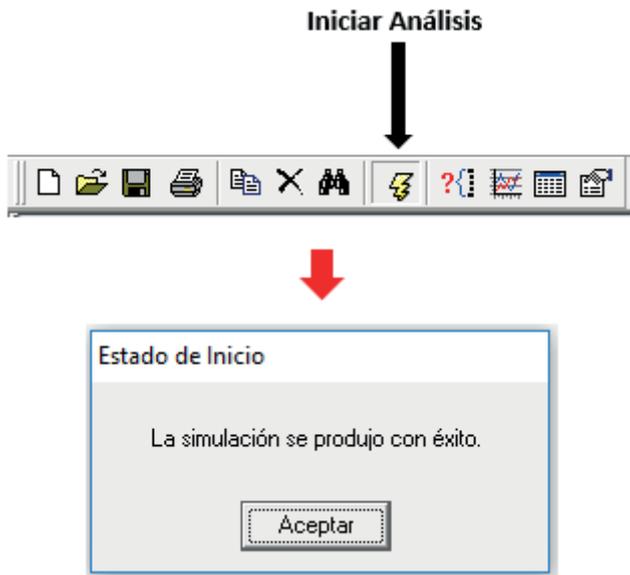
La ruta que se visualiza en la Figura 15 se inicia dando clic en el **Visor** ubicado en la parte derecha del programa, en la pestaña **Datos**. Desde la lista desplegable debajo de la pestaña seleccionada, se elige **Patrones** y, posteriormente, se hace clic en **Añadir**. Esto crea automáticamente el **Patrón 1**. Al hacer clic en **Editar**, se abre una ventana llamada **Editor de Patrones**, donde se ingresan los datos de la Tabla 3. Mientras se introducen los datos, se observa la variación del patrón en un diagrama de barras. Finalmente, después de editar el patrón, se hace clic en **Aceptar**. Además, se puede añadir una breve descripción, por ejemplo, 'Patrón de Consumo'.

Con estas configuraciones mostradas en los numerales 1.3.1, 1.3.2 y 1.3.3 se ha creado en su totalidad el modelo del ejercicio 1 de diseño, pero se pueden realizar más configuraciones de acuerdo con la necesidad de cada modelo hidráulico a realizar. Se procede en las siguientes páginas a realizar el análisis, presentación gráfica de resultados y generar el informe del modelo con EPANET.

1.3.4. Análisis, resultados, gráficos e informe del modelo hidráulico del ejercicio 1

Una vez creada y configurada la red de distribución se procede a ejecutar el análisis del modelo hidráulico; en la barra de menú se selecciona con un clic la pestaña **Proyecto** → **Calcular**, o en la barra de herramientas se da clic en el botón **Iniciar Análisis** y seguidamente deberá aparecer una ventana de diálogo (**Estado de Inicio**) que indica que **“La simulación se produjo con éxito”**, como en la Figura 16. En caso de presentarse algún error de cálculo la ventana indicará los errores encontrados en la simulación. Se hace clic en **Aceptar** y se procede a revisar los resultados obtenidos.

Figura 16
Inicial análisis y estado de inicio.

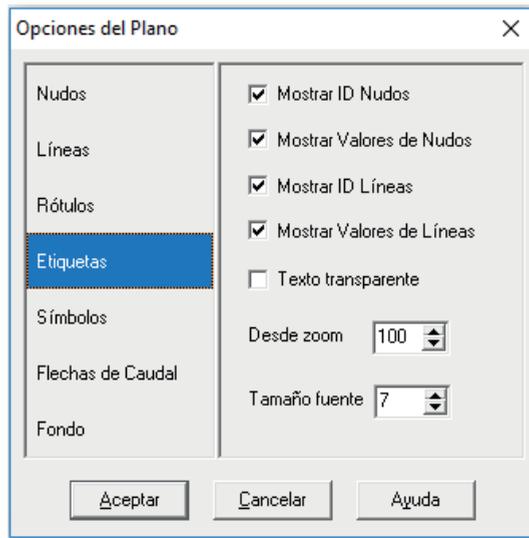


Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Los resultados obtenidos en el cálculo del modelo se pueden consultar de manera gráfica o tabulados. Para consultar de manera gráfica en el **Plano de la Red**, se da clic en el **Visor** de la parte derecha del programa en la pestaña **Plano** y se tiene la opción de escoger la propiedad a visualizar en los **Nudos o en la Líneas (Tuberías)**. En los **Nudos** permite visualizar **Cota, Demanda Base, Calidad Inicial, Demanda, Altura, Presión y Calidad**; y en las **Líneas** permite visualizar **Longitud, Diámetro, Rugosidad, Coeficiente de Flujo, Coeficiente de Pared, Caudal, Velocidad, Pérdida Unitaria, Factor de Fricción, Velocidad de Reacción y Calidad**. Al escoger alguna de las propiedades en los Nudos o Líneas, se visualiza de manera inmediata en el plano de la red, el valor numérico y una escala de colores con su respectiva leyenda, generados de acuerdo con el rango de los resultados obtenidos. En el Visor también se puede consultar la opción de **Tiempo**, la cual permite conocer los resultados del modelo a una hora específica de análisis, esta opción de tiempo depende del **Patrón de Consumo** introducido en el modelo.

Para observar de manera gráfica y numérica los resultados del modelo en el plano de EPANET, se deben configurar la presentación numérica de los valores; se da clic en la barra de herramientas en **Ver** → **Opciones** → **Etiquetas** y se debe seleccionar las celdas **Mostrar ID Nodos**, **Mostrar Valores de Nodos**, **Mostrar ID Líneas** y **Mostrar Valores de Líneas**, como se muestra en la Figura 17.

Figura 17
Opciones del plano de la red.

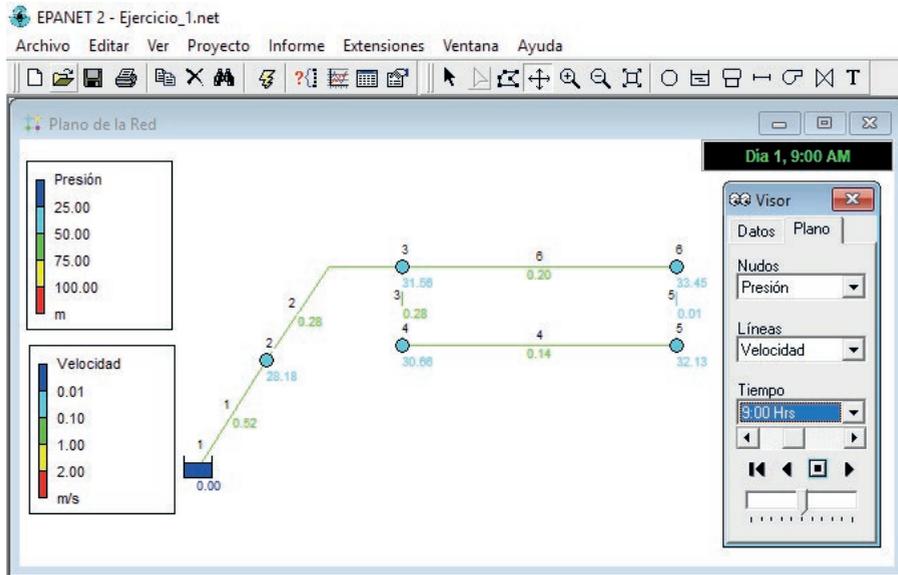


Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Se observa en la Figura 18 el **Plano de la Red** del ejercicio 1 de Diseño, donde se ha configurado el **Visor** para observar la **Presión** en cada **Nudo** y la **Velocidad** en cada **Línea o Tubería**. En esta figura se visualizan los resultados a las 9:00 horas en la opción de **Tiempo** y se presentan las leyendas de los resultados en escala de colores, con las respectivas unidades de cada parámetro. De igual manera en la opción **Tiempo** del **Visor** se pueden visualizar los resultados del modelo a la hora deseada de análisis.

Figura 18

Plano de la red, resultado de presión y velocidad a las 9:00 Hrs.

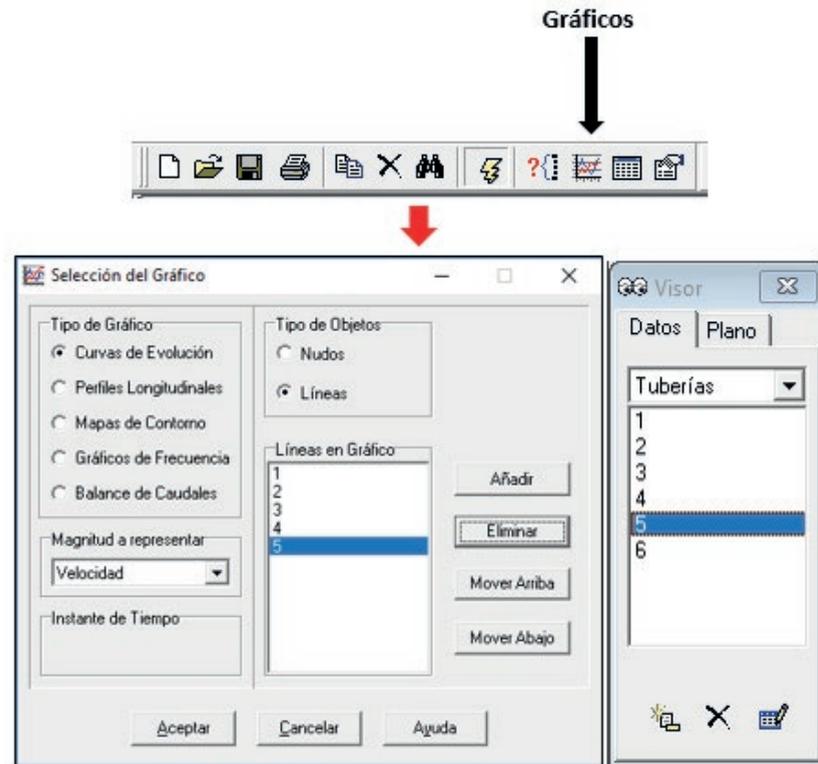


Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

El análisis de los resultados del modelo hidráulico se puede visualizar mediante **Gráficos** en EPANET, los cuales permiten observar de manera más práctica el comportamiento del modelo y la variación de los parámetros importantes. Para crear un gráfico, desde la barra de herramientas, se hace clic en el botón **Gráficos**. Esto abrirá una ventana de Selección de Gráfico, en la cual se debe escoger el **Tipo de Gráfico**. Para agregar las tuberías que se quieren observar en el gráfico, mientras se tiene la ventana de **Selección de Gráfico** abierta, se debe seleccionar la pestaña **Datos del Visor**. Desde la lista desplegable, se elige la opción **Tuberías**. Todas las tuberías creadas en el modelo hidráulico se mostrarán en modo de lista. Se da clic en la tubería que se desea agregar y luego se da clic en el botón **Añadir** de la ventana de **Selección de Gráfico**. Este procedimiento se repite para agregar más tuberías si es necesario. Se pueden agregar hasta un máximo 5 elementos (tuberías en este caso). Las tuberías añadidas se visualizarán en la sección **Líneas de Gráfico** de la ventana de **Selección de Gráfico**.

En la Figura 19, se evidencia que, para este ejercicio, se seleccionó una **Curva de Evolución** que ilustra la variación de la velocidad a lo largo del día en las tuberías 1, 2, 3, 4 y 5 de la red creada.

Figura 19
Gráficos, selección del gráfico.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Después de seleccionar el tipo de gráfico que se desea visualizar, se hace clic en **Aceptar**, lo que permite visualizar la **Curva de Evolución Temporal** de la velocidad en las tuberías seleccionadas (1, 2, 3, 4 y 5). Dicha curva se presenta en la Figura 20. Se pueden configurar las opciones de visualización de cada gráfico que se seleccione, dando clic derecho sobre el gráfico creado y variando las distintas opciones.

Figura 20

Curva de evolución temporal de velocidad en las tuberías 1, 2, 3, 4 y 5.



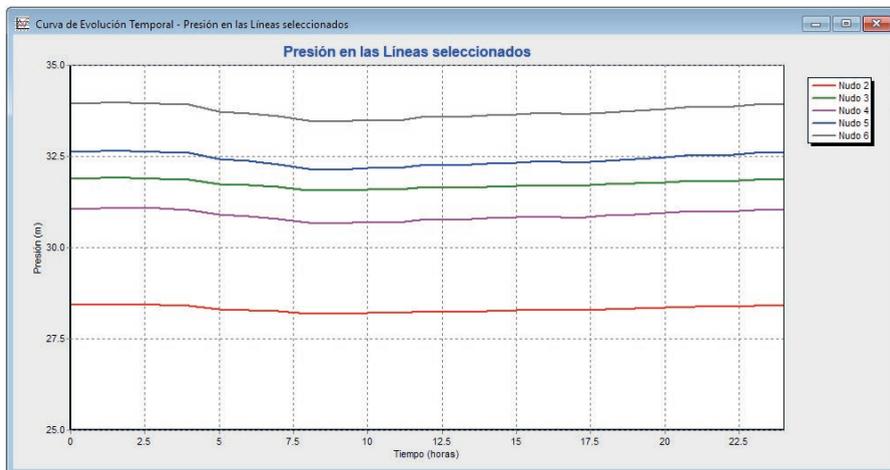
Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

De manera similar a lo explicado en el párrafo anterior, es posible crear gráficos que exhiban la variación de los parámetros en los **Nudos** de la red del modelo hidráulico, como se ilustra en la Figura 21. En esta figura, se ha generado la **Curva de Evolución Temporal** de la Presión en los nudos 2, 3, 4, 5 y 6.

Por último, se mostrará en este ejercicio la forma de generar un informe de cálculo del modelo analizado. Desde la barra de menú, se da clic en la pestaña **Informe** → **Completo** y se abrirá una ventana con la opción de **Guardar como**. Se debe seleccionar la ubicación donde se desea guardar el archivo de informe y asignarle un **Nombre**. Se creará un archivo con la extensión *.RPT, el cual se puede abrir con el **Bloc de Notas**. En la Tabla 5 se presenta la página 1 del reporte generado para el ejercicio 1. En esta página se ofrece una descripción general de la red y los **Resultados de Nudo** y de las **Líneas** a la hora 0:00. Se muestra solo una parte del informe debido a su extensión (13 páginas).

Figura 21

Curva de evolución temporal de presión en los nudos 2, 3, 4, 5 y 6.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Tabla 5

Reporte de EPANET de la RDAP del ejercicio 1

```

*****
*                               E P A N E T                               *
*                               Análisis Hidráulico y de Calidad           *
*                               de Redes Hidráulicas a Presión             *
*                               Versión 2.0 Ve                             *
*                               Traducido por:                             *
*                               Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos *
*                               Universidad Politécnica de Valencia         *
*                               Archivo de Entrada: Ejercicio_1.net         *
*                               Tabla Línea - Nudo:                         *
ID                               Nudo           Nudo           Longitud Diámetro
  
```

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Tabla 5
Reporte de EPANET de la RDAP del ejercicio 1 (continuación)

Línea	Inicial	Final	m	mm
1	1	2	73.9	75
2	2	3	86.1	75
3	3	4	34.05	50
4	4	5	158.7	50
5	5	6	34.1	50
6	6	3	158.7	50

Resultados de Nudo en 0:00 Hrs:

ID	Demanda	Altura	Presión	Calidad
Nudo	LPS	m	m	
2	0,49	1220,92	28,42	0,00
3	0,12	1220,89	31,89	0,00
4	0,13	1220,87	31,07	0,00
5	0,13	1220,84	32,62	0,00
6	0,16	1220,84	33,94	0,00
1	-1,04	1221,00	0,00	0,00 Embalse

Resultados de Línea en 0:00 Hrs:

ID	Caudal	Velocidad	Pérd. Unit.	Estado
Línea	LPS	m/s	m/km	
1	1,04	0,24	1,06	Abierto
2	0,55	0,12	0,36	Abierto
3	0,26	0,13	0,72	Abierto
4	0,13	0,06	0,15	Abierto
5	-0,01	0,00	0,00	Abierto
6	-0,17	0,09	0,31	Abierto

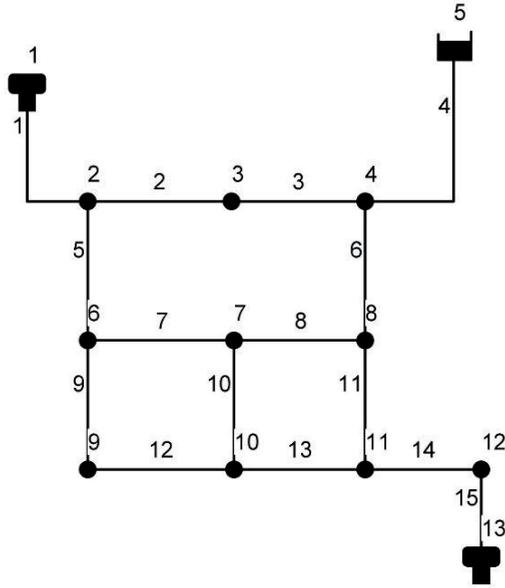
Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

1.4. Ejercicio 2, aplicación de EPANET

Desarrollar el modelo de red hidráulica de acuerdo con el esquema de la Figura 22. Las propiedades de los diferentes elementos de la red se especifican en la Tabla 6.

Figura 22

Esquema de la RDAP del ejercicio 2.



Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, el modelo hidráulico debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La altura inicial del tanque 1 será de 10 m, así como, tendrá un nivel mínimo y máximo de 0 y 20 m, respectivamente.
- La altura inicial del tanque 13 será de 17 m, así como, tendrá un nivel mínimo y máximo de 0 y 20 m, respectivamente.
- En las opciones hidráulicas, utilizar la ecuación de pérdidas de Darcy-Weisbach (D-W).
- En las opciones de tiempo, modelar para una duración total de 24 horas.
- Incluir los patrones de consumo que se detallan en la Tabla 7.
- Los coeficientes correspondientes al tipo residencial se asignarán a los nodos 2, 3, 4, 10, 11 y 12; aquellos del tipo comercial se asignarán a los nodos 6, 7 y 8; y los del tipo industrial se asignarán al nodo 9.

Tabla 6*Reporte de EPANET de la RDAP del ejercicio 1 (continuación)*

Nudo	Cota (m.s.n.m.)	Demanda (L/s)	Longitud de tubería (m)	Diámetro (m)	Coefficiente de pérdidas
Tanque 1	330.00			50	
			4828	356	75
2	320.04	12.62			
			1609	254	80
3	315.14	12.62			
			1609	254	80
4	332.23	0			
			6437	254	80
Embalse 5	371.86				
2	320.04	12.62			
			1609	254	80
6	298.70	18.93			
			1609	203	100
7	295.66	18.93			
			1609	175	120
8	292.61	18.93			
			1609	254	120
4	332.23	0			
6	298.70	18.93			
			1609	254	80
9	289.56	12.62			
			1609	175	100
10	289.56	18.93			
			1609	102	100
7	295.66	18.93			
10	289.56	18.93			
			1609	175	120
11	292.61	18.93			
			1609	254	120
8	292.61	18.93			
11	292.61	18.93			
			1609	254	120
12	289.56	12.62			
			1000	175	100
Tanque 13	290.00			50	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7*Patrón del consumo de la red del ejercicio 2.*

Periodo	Coeficiente		
	Residencial	Comercial	Industrial
1	0.90	1.00	0.10
2	0.85	1.10	0.10
3	0.80	1.15	0.15
4	0.70	1.20	0.20
5	0.75	1.25	0.10
6	0.85	1.25	0.1
7	0.90	1.10	0.50
8	1.00	1.00	0.90
9	1.05	0.80	1.20
10	1.10	0.50	1.25
11	1.20	0.20	1.00
12	1.30	0.10	1.10
13	1.25	0.10	1.20
14	1.05	0.20	1.30
15	1.00	0.10	1.10
16	1.00	0.20	1.00
17	1.20	0.10	0.90
18	1.25	0.70	0.80
19	1.35	0.85	0.50
20	1.20	0.90	0.20
21	1.10	0.95	0.10
22	1.00	0.98	0.15
23	0.95	1.00	0.10
24	0.90	1.1	0,05

Fuente: Elaboración propia.

Para desarrollar el modelo de la red planteada, lo primero que se debe realizar es configurar el sistema de unidades, las opciones hidráulicas para el cálculo de pérdidas de energía y las demás configuraciones que se consideren necesarias en el modelo. Se explicará paso a paso la forma de construir el modelo y obtener los resultados más importantes de la red.

1.4.1. Configuraciones iniciales del ejercicio 2

Al tener el programa abierto y estar en el espacio de trabajo, de la barra de menú se selecciona con un clic la pestaña **Proyecto** → **Valores por Defecto** → **Opciones Hidráulicas**. En este espacio se configuran las unidades de caudal en LPS, la ecuación de pérdidas en D-W (Darcy-Weisbach) y seguidamente se da clic en aceptar. La vista del menú indicado se muestra en la Figura 11 del ejercicio 1 de aplicación de EPANET. Una vez realizadas las configuraciones iniciales del modelo, se procede a incluir los elementos de la red y sus propiedades.

1.4.2. Componentes de la red y sus propiedades del ejercicio 2

Se procede a incluir los componentes del modelo hidráulico y a asignar las distintas propiedades descritas en la Tabla 6. Para este ejercicio, los componentes a emplear en la red son: un embalse, 2 tanques, 10 conexiones que serán los nudos de la red, donde se asignarán los caudales consumidos por el modelo, y 15 tuberías que estarán unidas por los nudos y que crearán una malla como en el esquema que se muestra en la Figura 22. Los componentes se crean desde la barra de herramientas que se muestra en la Figura 23.

Configuración del embalse. Se da clic en el botón **Embalse** de la barra de herramientas (Figura 23); la forma del cursor cambia y se observa que el botón seleccionado queda sombreado o sostenido. En el espacio de trabajo, se da clic en el lugar donde se desee colocar el embalse; para configurar las propiedades, se da doble clic en el embalse creado y se modifican las propiedades de acuerdo con la necesidad de cada modelo hidráulico. Para el ejercicio de diseño, se configura la **Altura Total en 371.86 m.s.n.m.** Esta altura representa la cota del embalse o punto de conexión de la red más la presión en este punto. Los valores de las **Coordenadas X-Y** se generan de

Figura 23
Barra de menú y barra de herramientas.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Figura 24
Configuración de embalse y tanques del ejercicio 2.

Embalse 5		Depósito 1		Depósito 13	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
*ID Embalse	5	*ID Depósito	1	*ID Depósito	13
Coordenada X	7030.01	Coordenada X	701.91	Coordenada X	7426.34
Coordenada Y	8256.84	Coordenada Y	8544.19	Coordenada Y	1559.79
Descripción		Descripción		Descripción	
Etiqueta		Etiqueta		Etiqueta	
*Altura Total	371.86	*Cota de Solera	330	*Cota de Solera	290
Curva Modulac. de la Altura		*Nivel Inicial	10	*Nivel Inicial	17
Calidad Inicial		*Nivel Mínimo	0	*Nivel Mínimo	0
Intensidad de la Fuente		*Nivel Máximo	20	*Nivel Máximo	20
		*Diámetro	50	*Diámetro	50

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Configuración del tanque. Se da clic en el botón **Depósito** o **Tanque** de la barra de herramientas (Figura 23); la forma del cursor cambia y se observa que el botón seleccionado queda sombreado o sostenido. En el espacio de trabajo, se da clic en el lugar donde se desee colocar el tanque; para configurar las propiedades, se da doble clic en el tanque creado y se modifican las propiedades de acuerdo con la necesidad de cada modelo hidráulico. La elevación de tanques se refiere a la coordenada Z del fondo, y a diferencia de los embalses, los tanques pueden llenarse o vaciarse, requiriendo niveles mínimo y máximo. EPANET simplifica esto considerando tanques como cilindros, por lo tanto, requiere asignar como propiedad un valor de diámetro.

Para el ejercicio de diseño proporcionado, se establece la **Cota de solera en 330 m.s.n.m.** para el tanque 1 y en **290 m.s.n.m.** para el **tanque 13**. Además, se fija el **Nivel inicial en 10 m** para el **tanque 1** y en **17 m** para el **tanque 13**. Los parámetros de **Diámetro**, **Nivel Mínimo** y **Nivel Máximo** se configuran en **50 m**, **0 m** y **20 m** respectivamente para ambos tanques. Los valores de las **Coordenadas X-Y** se generan de forma automática de acuerdo con el punto donde se ubicaron los tanques (nudo 1 y nudo13), y el **ID-Tanque** se genera de manera automática en el orden de creación de los tanques. En la Figura 24 se muestra cómo debe quedar la configuración de este elemento.

Configuración de conexiones. En la barra de herramientas (Figura 23), se da clic en el botón **Conexión** y seguidamente se ubica la conexión o nudo en el lugar del espacio de trabajo donde se desee crear el elemento, el procedimiento se repite para crear los nudos necesarios que demande el modelo. Con doble clic sobre el elemento creado se modifican las propiedades de cada conexión, para el ejercicio de diseño se deben cambiar las propiedades **Cota** (altura topográfica del nudo) y **Demanda Base** (caudal que demanda en ese punto). La configuración realizada a las conexiones, se muestran en la Figura 25.

Configuración de tuberías. Se selecciona con un clic el ícono de **Tubería** de la barra de herramientas; el cursor cambia de forma y se deben seleccionar los dos nudos entre los que estará la tubería. El primer nudo seleccionado será tomado por el programa como el inicial de la tubería y el segundo nudo como el final. También se pueden

crear tuberías que conecten elementos como los tanques y el embalse, por ejemplo, la tubería 1 estará creada entre el tanque 1 y la conexión 2; las otras tuberías estarán creadas entre las conexiones indicadas en la Tabla 6. Sobre cada una de las tuberías se hace doble clic y se procede a cambiar las propiedades de cada modelo hidráulico; en el ejercicio de diseño se deben modificar en todas las tuberías la **Longitud**, **Diámetro** y **Rugosidad**, según se muestra en la Figura 26.

Figura 25
Configuración de nudos del ejercicio 2.

Nudo de Caudal 2		Nudo de Caudal 3		Nudo de Caudal 4		Nudo de Caudal 6	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor	Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
*ID Nudo de Caudal	2	*ID Nudo de Caudal	3	*ID Nudo de Caudal	4	*ID Nudo de Caudal	6
Coordenada X	1603.12	Coordenada X	3734.84	Coordenada X	5727.90	Coordenada X	1603.12
Coordenada Y	6949.74	Coordenada Y	6949.74	Coordenada Y	6949.74	Coordenada Y	4887.35
Descripción		Descripción		Descripción		Descripción	
Etiqueta		Etiqueta		Etiqueta		Etiqueta	
*Cota	320.04	*Cota	315.14	*Cota	332.23	*Cota	298.7
Demanda Base	12.64	Demanda Base	12.62	Demanda Base	0	Demanda Base	18.93
Curva Modul. Demanda		Curva Modul. Demanda		Curva Modul. Demanda		Curva Modul. Demanda	
Tipos de Demanda	1						
Coefficiente del Emisor		Coefficiente del Emisor		Coefficiente del Emisor		Coefficiente del Emisor	

Nudo de Caudal 7		Nudo de Caudal 8		Nudo de Caudal 9		Nudo de Caudal 10	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor	Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
*ID Nudo de Caudal	7	*ID Nudo de Caudal	8	*ID Nudo de Caudal	9	*ID Nudo de Caudal	10
Coordenada X	3752.17	Coordenada X	5736.57	Coordenada X	1603.12	Coordenada X	3752.17
Coordenada Y	4887.35	Coordenada Y	4887.35	Coordenada Y	2980.94	Coordenada Y	2980.94
Descripción		Descripción		Descripción		Descripción	
Etiqueta		Etiqueta		Etiqueta		Etiqueta	
*Cota	295.66	*Cota	292.61	*Cota	289.56	*Cota	289.56
Demanda Base	18.93	Demanda Base	18.93	Demanda Base	12.62	Demanda Base	18.93
Curva Modul. Demanda		Curva Modul. Demanda		Curva Modul. Demanda		Curva Modul. Demanda	
Tipos de Demanda	1						
Coefficiente del Emisor		Coefficiente del Emisor		Coefficiente del Emisor		Coefficiente del Emisor	

Nudo de Caudal 11		Nudo de Caudal 12	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
*ID Nudo de Caudal	11	*ID Nudo de Caudal	12
Coordenada X	5736.57	Coordenada X	7426.34
Coordenada Y	2980.94	Coordenada Y	2980.94
Descripción		Descripción	
Etiqueta		Etiqueta	
*Cota	292.61	*Cota	289.56
Demanda Base	18.93	Demanda Base	12.62
Curva Modul. Demanda		Curva Modul. Demanda	
Tipos de Demanda	1	Tipos de Demanda	1
Coefficiente del Emisor		Coefficiente del Emisor	

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Figura 26
Configuración de tuberías del ejercicio 2.

Tubería 1		Tubería 2		Tubería 3		Tubería 4	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor	Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
*ID Tubería	1	*ID Tubería	2	*ID Tubería	3	*ID Tubería	4
*Nudo Inicial	1	*Nudo Inicial	2	*Nudo Inicial	3	*Nudo Inicial	5
*Nudo Final	2	*Nudo Final	3	*Nudo Final	4	*Nudo Final	4
Descripción		Descripción		Descripción		Descripción	
Etiqueta		Etiqueta		Etiqueta		Etiqueta	
*Longitud	4828	*Longitud	1609	*Longitud	1609	*Longitud	6437
*Diámetro	356	*Diámetro	254	*Diámetro	254	*Diámetro	254
*Rugosidad	75	*Rugosidad	80	*Rugosidad	80	*Rugosidad	80
Coef. Pérdidas Menores	0						
Estado Inicial	Abierta						

Tubería 5		Tubería 6		Tubería 7		Tubería 8	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor	Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
*ID Tubería	5	*ID Tubería	6	*ID Tubería	7	*ID Tubería	8
*Nudo Inicial	2	*Nudo Inicial	4	*Nudo Inicial	6	*Nudo Inicial	7
*Nudo Final	6	*Nudo Final	8	*Nudo Final	7	*Nudo Final	8
Descripción		Descripción		Descripción		Descripción	
Etiqueta		Etiqueta		Etiqueta		Etiqueta	
*Longitud	1609	*Longitud	1609	*Longitud	1609	*Longitud	1609
*Diámetro	254	*Diámetro	254	*Diámetro	203	*Diámetro	175
*Rugosidad	80	*Rugosidad	120	*Rugosidad	100	*Rugosidad	120
Coef. Pérdidas Menores	0						
Estado Inicial	Abierta						

Tubería 9		Tubería 10		Tubería 11		Tubería 12	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor	Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
*ID Tubería	9	*ID Tubería	10	*ID Tubería	11	*ID Tubería	12
*Nudo Inicial	6	*Nudo Inicial	7	*Nudo Inicial	8	*Nudo Inicial	9
*Nudo Final	9	*Nudo Final	10	*Nudo Final	11	*Nudo Final	10
Descripción		Descripción		Descripción		Descripción	
Etiqueta		Etiqueta		Etiqueta		Etiqueta	
*Longitud	1609	*Longitud	1609	*Longitud	1609	*Longitud	1609
*Diámetro	254	*Diámetro	102	*Diámetro	254	*Diámetro	175
*Rugosidad	80	*Rugosidad	100	*Rugosidad	120	*Rugosidad	100
Coef. Pérdidas Menores	0						
Estado Inicial	Abierta						

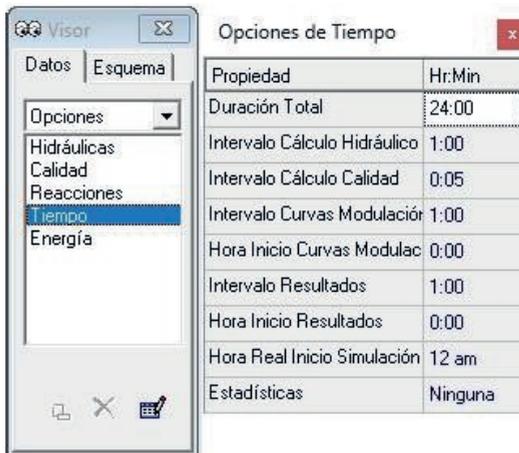
Tubería 13		Tubería 14		Tubería 15	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
*ID Tubería	13	*ID Tubería	14	*ID Tubería	15
*Nudo Inicial	10	*Nudo Inicial	11	*Nudo Inicial	12
*Nudo Final	11	*Nudo Final	12	*Nudo Final	13
Descripción		Descripción		Descripción	
Etiqueta		Etiqueta		Etiqueta	
*Longitud	1609	*Longitud	1609	*Longitud	1000
*Diámetro	175	*Diámetro	254	*Diámetro	175
*Rugosidad	120	*Rugosidad	120	*Rugosidad	100
Coef. Pérdidas Menores	0	Coef. Pérdidas Menores	0	Coef. Pérdidas Menores	0
Estado Inicial	Abierta	Estado Inicial	Abierta	Estado Inicial	Abierta

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

1.4.3. Configuraciones de tiempo y patrón de consumo del ejercicio 2

En este ejercicio, se emplean tres patrones distintos como se detallan en la Tabla 7, con una duración total del modelo de 24 horas: uno para demandas residenciales, otro para industrias nocturnas y uno más para demandas comerciales. De la barra de menú se selecciona con un clic **Proyecto** → **Opciones de Cálculo** → **Opciones de Tiempo** y se modifica la **Duración Total** a 24 horas y se especifica que el **Intervalo de Cálculo Hidráulico** es de una hora. En la Figura 27 se muestra esta configuración.

Figura 27
Opciones de tiempo.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Los patrones de consumo se crean directamente desde la ventana del navegador de datos, seleccionado la opción **Patrones**, como se indica en la Figura 28. Se hace clic en el botón **Añadir** para abrir el cuadro **Editor de Patrones**. Posteriormente, se establece el nombre de la curva del patrón en ID Patrón y los **coeficientes** adimensionales Coeficientes para cada intervalo de tiempo. En la Figura 28 se muestra la configuración para introducir los patrones de consumo de la Tabla 7 en el modelo de la red.

Figura 28

Configuración del patrón de consumo residencial, comercial e industrial del ejercicio 2.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Para asignar un patrón de demanda a un nudo, se debe utilizar las características de propiedades en la casilla **Patrón de demanda** o **Curva Modul. Demanda**. Se debe insertar el ID del patrón según como corresponda **Residencial, Comercial e Industrial**. Este procedimiento debe repetirse para todos los nudos, asegurándose de asignar el patrón correcto como se muestra en el ejemplo de la Figura 29.

Figura 29

Patrón de consumo en el nudo 2 del ejercicio 2.

Nudo de Caudal 2 ✕	
Propiedad	Valor
*ID Nudo de Caudal	2
Coordenada X	1603.12
Coordenada Y	6949.74
Descripción	
Etiqueta	
*Cota	320.04
Demanda Base	12.64
Curva Modul. Demanda	Residencial
Tipos de Demanda	1

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Con estas configuraciones mostradas en los numerales 1.4.1, 1.4.2 y 1.4.3 se ha creado en su totalidad el modelo del ejercicio 2 de diseño, pero se pueden realizar más configuraciones de acuerdo con la necesidad de cada modelo hidráulico a realizar. Se procede en las siguientes páginas a realizar el análisis, presentación gráfica de resultados y generar el informe del modelo con EPANET.

1.4.4. Análisis, resultados, gráficos e informe del modelo hidráulico del ejercicio 2

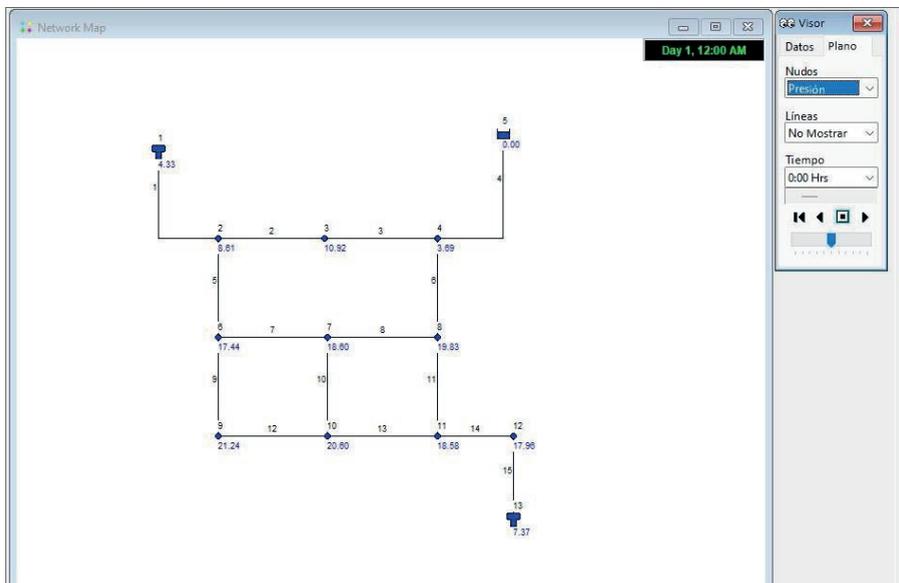
Una vez creada y configurada la red de distribución se procede a ejecutar el análisis del modelo hidráulico; en la barra de menú se

selecciona con un clic la pestaña **Proyecto** → **Calcular**, o en la barra de herramientas se da clic en el botón **Iniciar Análisis** y seguidamente deberá aparecer una ventana de diálogo (**Estado de Inicio**) que indica que **“La simulación se produjo con éxito”**, como en la Figura 16 del ejercicio 1. En caso de presentarse algún error de cálculo la ventana indicará los errores encontrados en la simulación. Se hace clic en **Aceptar** y se procede a revisar los resultados obtenidos.

En la Figura 30 el **Plano de la Red** del ejercicio 2 de Diseño, donde se ha configurado el **Visor** para observar la **Presión** en cada **Nudo**. De igual manera en la opción **Tiempo** del **Visor** se pueden visualizar los resultados del modelo a la hora deseada de análisis.

Figura 30

Plano de la red, resultado de presión a las 0:00 Hrs.

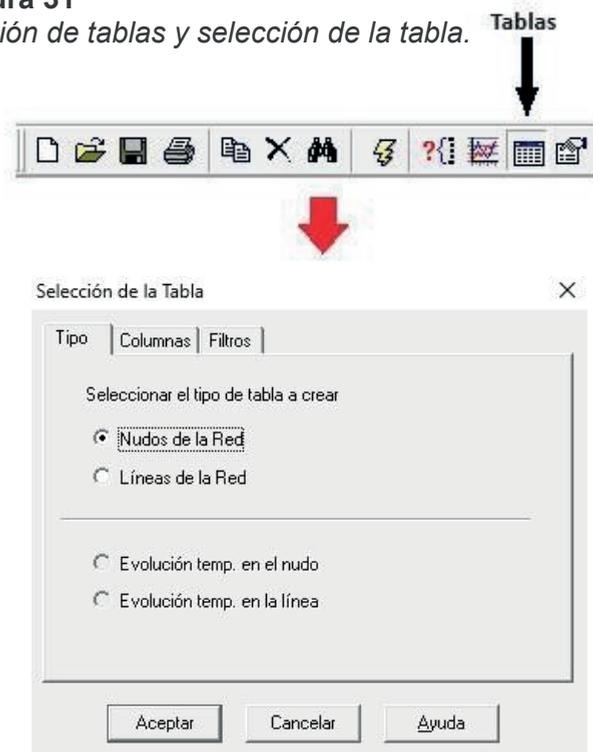


Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Los resultados obtenidos en el cálculo del modelo se pueden consultar de manera gráfica o tabulados. Para consultar de manera tabulada se hace clic en la opción **Tablas** de la barra de herramientas y

seguidamente aparecerá un cuadro de opciones de **Selección de la Tabla** como se muestra en la Figura 31. En este cuadro se selecciona el tipo de tabla a analizar para nudos y líneas de la Red, según como se requiera. Además, para revisar los resultados temporales se puede seleccionar las opciones **Análisis Temp. en el Nudo** o **Análisis Temp. en la Línea**, para luego seleccionar el **Nudo** o **Línea** específico que se requiere analizar.

Figura 31
Opción de tablas y selección de la tabla.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

El análisis en tablas de la evolución temporal genera una **Tabla Serie de Tiempo** en la cual se observan los resultados de manera horaria de la **Demanda, Cota, Presión** y **Calidad**, para el periodo de 24 horas. La tabla de evolución temporal generada mediante la herramienta Tablas para el Nudo 2 se presenta en la Figura 32.

Figura 32
Serie de Tiempo, en el Nudo 2.

Tiempo Horas	Demanda LPS	Cota m	Presión psi	Calidad
2:00	10.10	371.86	22.45	0.00
3:00	8.83	371.86	22.45	0.00
4:00	9.47	371.86	22.45	0.00
5:00	10.73	371.86	22.45	0.00
6:00	11.36	371.86	22.45	0.00
7:00	12.62	371.86	22.45	0.00
8:00	13.25	371.86	22.45	0.00
9:00	13.88	371.86	22.45	0.00
10:00	15.14	371.86	22.45	0.00
11:00	16.41	371.86	22.45	0.00
12:00	15.77	371.86	22.45	0.00
13:00	13.25	371.86	22.45	0.00
14:00	12.62	371.86	22.45	0.00
15:00	12.62	371.86	22.45	0.00
16:00	15.14	371.86	22.45	0.00
17:00	15.77	371.86	22.45	0.00
18:00	17.04	371.86	22.45	0.00
19:00	15.14	371.86	22.45	0.00
20:00	13.88	371.86	22.45	0.00
21:00	12.62	371.86	22.45	0.00
22:00	11.99	371.86	22.45	0.00

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

Por último, se mostrará en este ejercicio la forma de generar un informe de cálculo del modelo analizado. Desde la barra de menú, se da clic en la pestaña **Informe** → **Completo** y se abrirá una ventana con la opción de **Guardar como**. Se debe seleccionar la ubicación donde se desea guardar el archivo de informe y asignarle un **Nombre**. Se creará un archivo con la extensión *.RPT, el cual se puede abrir con el **Bloc de Notas**. En la Tabla 8 se presenta la página 1 del reporte generado para el ejercicio 2 de aplicación de EPANET.

Tabla 8
Reporte de EPANET de la red del ejercicio 2.

```

*****
*                               E P A N E T                               *
*                               Análisis Hidráulico y de Calidad          *
*                               de Redes Hidráulicas a Presión            *
*                               Versión 2.0 Ve                            *
*****
Archivo de Entrada: Ejercicio_2.net
Tabla Línea - Nudo:
-----
ID      Nudo      Nudo      Longitud Diámetro
Línea  Inicial   Final     m          mm
-----
1       1         2         4828      356
2       2         3         1609      254
3       3         4         1609      254
4       5         4         6437      254
5       2         6         1609      254
6       4         8         1609      254
7       6         7         1609      203
8       7         8         1609      175
9       6         9         1609      254
10      7         10        1609      102
11      8         11        1609      254
12      9         10        1609      175
13      10        11        1609      175
14      11        12        1609      254
15      12        13        1000      175

Resultados de Nudos a las 0:00 Hrs:
Nude      Demanda      Cota      Presión      Calidad
ID        LPS          m         psi
2         11.36       339.91   8.61         0.00
3         11.36       340.33  10.92        0.00

```

Tabla 8
Reporte de EPANET de la red del ejercicio 2.

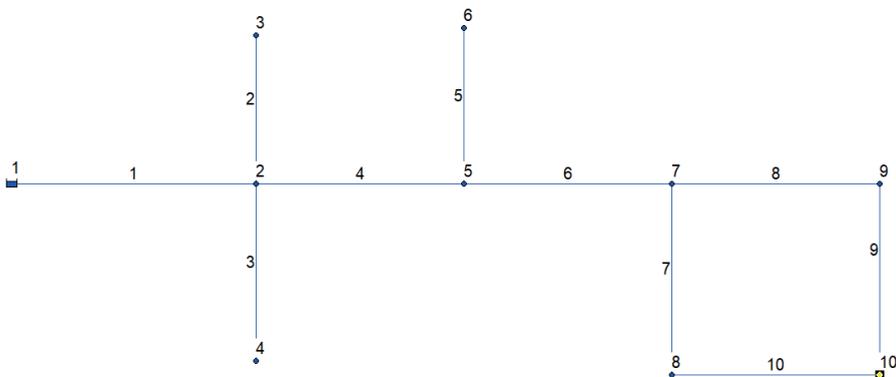
4	0.00	340.75	3.69	0.00	
6	18.93	338.95	17.44	0.00	
7	18.93	338.60	18.60	0.00	
8	18.93	338.37	19.83	0.00	
9	1.26	338.58	21.24	0.00	
10	17.04	337.09	20.60	0.00	
11	17.04	335.50	18.58	0.00	
12	11.36	331.01	17.96	0.00	
5	-2673688.00	371.86	0.00	0.00	Embalse
1	-307735.10	340.00	4.33	0.00	Tanque
13	2981297.00	307.00	7.37	0.00	Tanque

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPANET.

1.5. Ejercicio propuesto

Utilizando las propiedades de los distintos elementos de la red, detalladas en la Tabla 9, proceder a realizar el modelo hidráulico de la red que se muestra en la Figura 33.

Figura 33
Esquema de la RDAP del ejercicio propuesto.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9
Propiedades de los elementos de la RDAP.

Nudo RDAP	Cota (m.s.n.m.)	Demanda Base (L/s)	Longitud de tubería (m)	Diámetro (mm)	Rugosidad (mm)	Coef. de pérdidas
1 (Embalse)	455.50					
			145.30	100	0.0015	2.5
2	423.20	0.650				
			95.50	50	0.0015	1.3
3	420.60	0.165				
--	--	--	--	--	--	--
2	423.20	0.650				
			110.30	50	0.0015	1.5
4	424.35	0.199				
--	--	--	--	--	--	--
2	423.20	0.650				
			155.70	75	0.0015	2.5
5	421.10	0.205				
			95.50	50	0.0015	1.3
6	419.75	0.178				
--	--	--	--	--	--	--
5	421.10	0.205				
			136.90	75	0.0015	2.0
7	420.40	0.186				
			112.80	50	0.0015	1.5
9	420.00	0.155				
			110.30	50	0.0015	1.5
10	421.10	0.143				
			112.80	50	0.0015	1.5
8	421.90	0.124				
			110.30	50	0.0015	1.5
7	420.40	0.186				

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, el modelo hidráulico debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La altura total en el embalse será de 460 m.s.n.m. (cota más presión en el embalse).
- En las opciones hidráulicas, utilizar la ecuación de pérdidas de Darcy-Weisbach (D-W).
- En las opciones de tiempo, modelar para una duración total de 24 horas.
- Incluir el patrón de consumo mostrado en la Tabla 3, el mismo empleado en el ejercicio de diseño 1.
- El material de todas las tuberías es PVC.

Para este ejercicio calcular lo siguiente:

- Crear el modelo hidráulico de la red y obtener el plano general del ejercicio.
- Garantizar que ningún nudo de la red tenga una presión mayor a 60 m.c.a.
- Generar un plano de la red donde se observe la demanda base en los nudos y las velocidades de las tuberías en la hora de máximo consumo.
- Generar un plano de la red donde se observe la demanda base en los nudos y las velocidades de las tuberías en la hora de mínimo consumo.
- Generar un plano de la red donde se observe la presión base en los nudos y las velocidades de las tuberías en la hora de máximo consumo.
- Comparar la diferencia de presiones en los nudos de la red a las 9:00 horas y a las 16:00 horas del día; crear un gráfico por cada escenario.
- Generar la curva de evolución temporal de la velocidad en las tuberías; para este gráfico, comparar al menos 5 tuberías.
- Generar la curva de evolución temporal de la presión en los nudos; para este gráfico, comparar al menos 5 nudos.
- Generar la curva de evolución temporal de demanda base en los nudos; para este gráfico, comparar al menos 5 nudos.
- Generar el reporte de Informe completo del modelo y realizar comentarios al respecto.

1.6. Conclusiones

El uso de software de ingeniería ha generado un avance considerable en la creación de modelos hidráulicos más precisos, que permiten modelar estructuras hidráulicas, componentes o sistemas de abastecimiento de agua potable, como las redes de distribución de agua potable. En la actualidad, el software libre de mayor reconocimiento y aceptación en los países de habla hispana y en Colombia es EPANET. Este se ha convertido en una herramienta muy potente y de gran aplicación en la ingeniería hidráulica, civil y ambiental. EPANET ofrece una serie de herramientas que permiten realizar un análisis detallado de todos los elementos de un modelo, facilitando la toma de decisiones más acertadas para proporcionar soluciones adecuadas a las necesidades de una población.

En esta unidad, se proporcionaron las herramientas básicas para el análisis y diseño hidráulico de redes de acueducto con EPANET, un software desarrollado por la EPA-USA que ofrece múltiples opciones de análisis y una visualización gráfica de la simulación hidráulica en un periodo extendido de análisis. Se llevó a cabo un ejercicio de diseño que permitió identificar y comprender las opciones de cálculo del software estudiado, así como las diferentes formas de presentación de resultados. Los ejercicios abarcaron varios análisis importantes que se pueden realizar en el software, pero se recomienda al lector realizar más ejercicios de aplicación para adquirir un conocimiento más profundo de los diferentes casos de análisis que se pueden desarrollar en EPANET.

1.7. Material de estudio

A continuación se presenta material complementario que puede ser consultado en la web y que permite ampliar el conocimiento relacionado con la temática explicada en este capítulo, se presentan opciones al lector que permiten profundizar en los temas vistos y ahondar en la práctica del modelado hidráulico. En la Tabla 10 se encuentran los links de consulta del material complementario.

Tabla 10
Material complementario del capítulo.

Temas que abordan	Referencia bibliográfica	Ubicación (el enlace web o la base de datos)
Modelación hidráulica con EPANET.	De Plaza (2017)	https://www.unipiloto.edu.co/descargas/LibroEpanet.pdf
	Martínez (2001)	https://epanet.es/wp-content/uploads/2012/10/EPANET_Manual_Usuario.pdf

Fuente: Elaboración propia.

Los ejercicios resueltos, se encuentran como material de apoyo adicional en un repositorio de GitHub y pueden ser descargados en el siguiente enlace web:

<https://github.com/Carlos-bonillag/Ejercicios-BOOK-Int-MOD-HID>

CAPÍTULO II

**Diseño hidráulico de redes de
alcantarillado con EPASWMM**

CAPÍTULO II

Diseño hidráulico de redes de alcantarillado con EPASWMM

2.1. Introducción

El saneamiento juega un papel muy importante en el desarrollo de las comunidades y está relacionado de manera directa con la salud humana y la calidad de vida. A lo largo de la historia, ha sido indispensable para el crecimiento de las ciudades, poder implementar sistemas de drenaje urbano que permitan captar, transportar y disponer de manera adecuada las aguas residuales que se generan en diferentes actividades del consumo humano y las aguas generadas en eventos naturales como las aguas lluvias. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo la construcción de obras de infraestructura que posibiliten la ejecución de dicho proceso de manera apropiada, sin ocasionar perjuicios a las personas. Los sistemas de alcantarillado han sido implementados a lo largo de la historia para realizar el transporte y la disposición final de las aguas residuales y pluviales mediante conductos cerrados o abiertos, cumpliendo con diferentes criterios hidráulicos que garanticen el funcionamiento adecuado ante diferentes volúmenes recolectados.

El diseño hidráulico de las redes de alcantarillado puede llevarse a cabo de manera manual; sin embargo, en la actualidad, se opta por la implementación del diseño asistido por computadora. Esta unidad se centra en el diseño hidráulico de sistemas de alcantarillado mediante el uso de EPASWMM, un software de ingeniería especializado que facilita la creación de diversos modelos y el análisis de diferentes escenarios, ajustándose a las condiciones reales de las obras de infraestructura requeridas por una población.

2.2. Redes de alcantarillado

Las redes de alcantarillado son obras de infraestructura conformadas por un conjunto de conductos y estructuras complementarias, que tienen como función principal recibir, evacuar, conducir y disponer las aguas residuales generadas por actividades humanas o las aguas generadas en un evento de precipitación pluvial (Pérez, 2013).

Los diferentes tipos de alcantarillado se pueden clasificar de manera general en tres grandes grupos, de acuerdo con las características del agua que transporte, así (López, 2003):

- Los alcantarillados sanitarios están diseñados para la recolección exclusiva de las aguas residuales generadas en las actividades domésticas, industriales, comerciales e institucionales, contemplándose en su capacidad de transporte, un caudal generado por efectos de infiltración de agua subterránea del suelo.
- Los alcantarillados pluviales se encargan de evacuar la escorrentía superficial producida por eventos de precipitación.
- Los alcantarillados combinados son planteados para transportar de manera simultánea las aguas residuales y las aguas lluvias en un momento determinado.

2.2.1 Elementos de una red de alcantarillado

Las redes de alcantarillado permiten recolectar las aguas residuales desde las instalaciones hidrosanitarias internas de cada edificación hasta los colectores dispuestos en las vías y el urbanismo de las poblaciones existentes, esto en el caso de alcantarillados sanitarios. En cuanto a los alcantarillados pluviales, se capta el agua generada durante un evento de lluvia mediante estructuras denominadas sumideros y se transporta mediante colectores dispuestos de manera similar a los del alcantarillado sanitario. Tanto en el alcantarillado sanitario como en el pluvial, los colectores permiten el transporte hasta el punto de disposición final, que puede ser una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) o un cauce natural que reciba los aportes del sistema pluvial.

A continuación, se describen los elementos principales de una red de alcantarillado y se especifica a qué sistema (sanitario, pluvial o combinado) pertenece cada uno de estos.

Acometidas domiciliarias. Se denomina de esta forma al tramo de tubería que se encuentra comprendido entre la última caja de inspección localizada dentro de una edificación y el alcantarillado sanitario, permitiendo la descarga de las aguas servidas de la misma (Pérez, 2010).

Conductos o colectores. Conducto cerrado, generalmente de sección circular, encargado de transportar el caudal recibido, ya sea sanitario y/o pluvial hacia su destino final. Se pueden encontrar en distintos materiales como el policloruro de vinilo (PVC), asbesto cemento, termoplásticos, hierro dúctil, entre otros (EPM E.S.P., 2013).

Pozos o cámaras de inspección. Estructuras de concreto, mampostería o prefabricadas, usadas como unión entre dos tramos de red de alcantarillado (sanitario, pluvial o combinado), permitiendo el cambio de dirección ya sea horizontal o verticalmente, variación de diámetro o sección. Este tipo de estructuras pueden ser de sección cilíndrica o con reducción cónica según sea requerido y cuentan con una tapa removible con el fin de permitir la ventilación y el acceso para realizar el mantenimiento periódico de los colectores y así mantener el buen funcionamiento del sistema en general (López, 2003).

Cámaras de caída. Estructuras que funcionan como disipadoras de energía manteniendo las velocidades máximas permitidas tanto por la norma como por el material de conducto. Estas estructuras son usadas con el fin de evitar erosiones que conlleven a daños en el sistema de alcantarillado, cuando se presentan colectores con pendientes fuertes o alturas considerables entre las tuberías de entrada salida de un pozo de inspección (López, 2000).

Sumideros. Estructuras construidas con el fin de captar la escorrentía escurrida en las superficies de las áreas de drenaje y

posteriormente realizar su entrega al alcantarillado pluvial, evitando grandes láminas de agua que desencadenen en posibles inundaciones; su capacidad hidráulica depende de la sección utilizada y las características del flujo a recibir (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados [CIACUA], 2009).

Aliviaderos. Estructuras utilizadas en alcantarillados combinados con el objetivo, durante eventos de lluvia, de separar un porcentaje del caudal combinado y destinarlo a drenajes naturales o almacenamientos temporales. Esto se hace con el fin de reducir los aportes dirigidos hacia la PTAR u otro destino final, logrando así una disminución en los costos de conducción de los flujos (EPM E.S.P., 2013).

Alcantarillas y box culverts. Conductos cerrados en concreto reforzado construidos con el fin de conducir los aportes pluviales de un costado de la vía al otro ya sea hacia un canal artificial o natural para que este siga su curso. Este tipo de estructuras suelen ser de sección circular o de cajón (box-culvert), aunque también pueden ser de tipo elipse, entre otras (Instituto Nacional de Vías [INVÍAS], 2009).

Canales. Conductos generalmente descubiertos que trabajan a flujo libre, revestidos en concreto, terreno natural y/u otro material. Estos son construidos con el fin de conducir los aportes pluviales hasta su descarga final en un cauce natural; su sección puede ser rectangular, trapezoidal, o compuesta, teniendo en cuenta que esta deberá tener la capacidad para transportar el caudal de diseño (EPM E.S.P., 2013).

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Conjunto de obras que como su nombre lo dice, tiene como fin tratar las aguas residuales por medio de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, eliminando los contaminantes presentes en el caudal recibido y posteriormente realizar su descarga a los cauces naturales o en algunos casos, ser reutilizada.

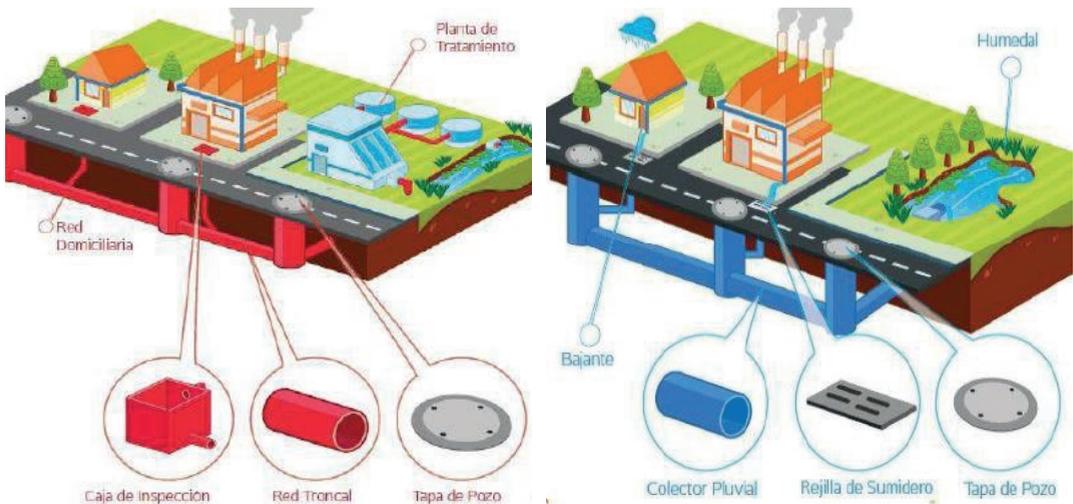
Estaciones de bombeo. Instalación integrada por infraestructura civil y electromecánica, encargadas de aumentar la presión del caudal de aguas residuales y/o pluviales con el fin de transportarlo hacia una estructura de mayor elevación. Entre sus elementos se encuentran el cárcamo de bombeo, subestación eléctrica, motor y controles eléctricos, equipo de bombeo, equipo de maniobras (Rodríguez, 2005).

Estructuras de descarga. Estructuras construidas con el fin de entregar los caudales recogidos por el sistema de alcantarillado a un cuerpo receptor, con un nivel de energía mínima, evitando socavación local o erosiones en dichos puntos y con esto daños e inestabilidad en los cauces receptores ya sea de aguas lluvias y/o residuales (EPM E.S.P., 2013).

En la Figura 34 y la Figura 35 se presentan algunos de los elementos mencionados anteriormente pertenecientes al alcantarillado sanitario, pluvial y combinado.

Figura 34

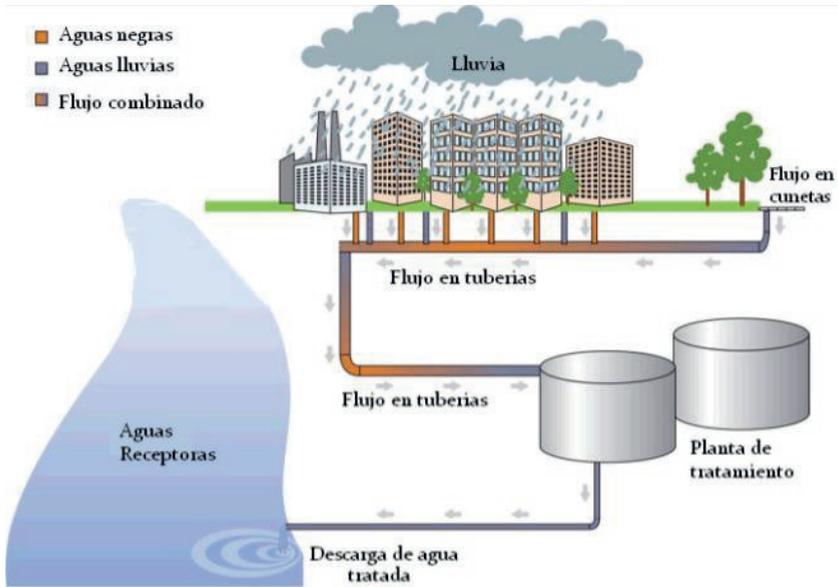
Componentes de una red de alcantarillado sanitario y pluvial.



Fuente: Rojas (2016).

Figura 35

Componentes de una red de alcantarillado combinado.



Fuente: Rojas (2016).

2.2.2. Hidráulica de alcantarillados

Los alcantarillados, tanto sanitarios como pluviales o combinados, trabajan bajo la ecuación de continuidad observada en la Ecuación 1 y el principio de Bernoulli representado con la expresión de la Ecuación 2, con ciertas variaciones respecto al flujo a presión. Estas funcionan bajo flujo libre, a excepción de algunos puntos específicos como los sifones invertidos o zonas en las que se requiere el uso de estaciones de bombeo.

En lo que respecta al cálculo o solución numérica e hidráulica del sistema, se centra específicamente en la capacidad de resolver las múltiples incógnitas presentes en un modelo. Esto implica la necesidad de conocer valores reales como el caudal transportado, la velocidad en cada tramo y el diámetro adecuado de cada conducto, entre otros parámetros. Para lograr esto, se utilizan diferentes ecuaciones según el comportamiento del flujo. Cuando se realiza un análisis bajo

condiciones de flujo uniforme permanente, las ecuaciones principales utilizadas son la de Darcy-Weisbach y la de Colebrook-White (Ecuación 7), o la ecuación de Manning (Ecuación 8), tomando en consideración las restricciones y limitaciones de cada una. Sin embargo, en situaciones donde se requiere un análisis mediante flujo no permanente, se recurre a las ecuaciones de Saint Venant, teniendo en cuenta las condiciones de frontera correspondientes (EPM E.S.P., 2013).

$$Q = -2A\sqrt{8gRS} \log_{10} \left(\frac{k_s}{14.8R} + \frac{2.51\nu}{4R\sqrt{8gRS}} \right) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde;

Q= caudal [m³/s].

R= radio hidráulico [m].

A= área mojada transversal [m²].

S= pendiente longitudinal de la tubería [m/m].

ν = viscosidad cinemática [m²/s].

K= coeficiente de rugosidad absoluta [m].

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde;

Q= caudal [m³/s].

R= radio hidráulico [m].

A= área mojada transversal [m²].

S= pendiente longitudinal de la tubería [m/m].

n= coeficiente de rugosidad de Manning [s/m³].

Adicionalmente, para el correcto diseño de un sistema de alcantarillado, se deben tener en cuenta distintos parámetros hidráulicos establecidos por la normativa existente, como, por ejemplo, el esfuerzo cortante, número de Froude, relación de llenado, entre otros. Estos son conceptos previos necesarios, los cuales son abordados en mecánica de fluidos, hidráulica y redes de servicio.

En la actualidad, existen metodologías de modelamiento hidráulico que contemplan diferentes aspectos, como la modelación en periodo extendido, delimitación de zonas de inundación, estrategias de control, evaluación de impacto y cargas contaminantes de las descargas realizadas, así como la eficiencia de sistemas de drenaje sostenibles, entre otros. Estas metodologías permiten generar diseños optimizados mediante el concepto de inteligencia artificial y algoritmos genéticos. Todas estas metodologías forman parte de la evolución reciente de la teoría de redes de alcantarillados y se han podido desarrollar al implementar el diseño hidráulico asistido por computadora.

2.2.3. Normatividad

Los sistemas de alcantarillado son diseñados con el fin de satisfacer la necesidad de la evacuación y correcto tratamiento de las aguas residuales, para que estas no generen afectaciones tanto a los habitantes de la zona donde se implementan como al ambiente. Por ende, su correcto funcionamiento se encuentra enmarcado dentro de una serie de parámetros técnicos e hidráulicos como profundidades mínimas y máximas, rango de velocidades aceptables, criterios de auto limpieza, diámetros mínimos, entre otros.

Las entidades encargadas de regular la prestación de los servicios públicos o la infraestructura urbana son las encargadas de reglamentar los requisitos para tener en cuenta en el diseño de cada sistema de alcantarillado. Estas entidades, en conjunto con grupos de profesionales de diferentes campos de aplicación (académicos de las universidades del país, empresarios del sector de agua potable y saneamiento, constructores y profesionales independientes), han sido las encargadas de crear y actualizar, según se ha requerido, la normatividad existente a nivel regional o nacional y, a su vez, de verificar el cumplimiento de dichas normas.

En Colombia existe una norma vigente que fija los criterios técnicos básicos en el sector de agua potable y saneamiento básico, denominada “**Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)**”, emitido por el Ministerio de Vivienda,

En Colombia existe una norma vigente que fija los criterios técnicos básicos en el sector de agua potable y saneamiento básico, denominada “Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)”, emitido por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio mediante la resolución 0330 del 8 de junio del año 2017. Esta norma se debe cumplir e implementar en todo el país. Adicionalmente, la resolución 799 de 2021 y la resolución 908 de 2021, las cuales introducen modificaciones parciales a la resolución 0330 de 2017. A nivel regional, las empresas de servicio público en las principales ciudades del país han establecido normativas que definen criterios básicos, requisitos mínimos y metodologías para el diseño de sistemas de acueducto y alcantarillado. En la Tabla 11 se describen las normas establecidas por las empresas públicas de Bogotá, Cali y Medellín, que se relacionan con el diseño de sistemas de alcantarillado.

Tabla 11

Normativa de las empresas de servicios públicos en Bogotá, Cali y Medellín.

Ciudad	Normas	Empresa de servicios públicos
Bogotá	<ul style="list-style-type: none"> ❖ NS-061 Aspectos técnicos para la rehabilitación de redes y estructuras de alcantarillado. ❖ NS-007 Plan de manejo ambiental para la elaboración de diseños definitivos y detallados para la construcción de redes matrices de acueducto y colectores de alcantarillado pluvial y sanitario. Requisitos mínimos. ❖ NS-085 Criterios de diseño de sistemas de alcantarillado. ❖ NS-142 Esquemas típicos de cabezales entrega a canales en redes de alcantarillado. ❖ NS-163 Requisitos para el desarrollo y calibración de modelos hidráulicos de los sistemas de alcantarillado. 	EAAB (2020)
Medellín	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Normas de diseño de sistemas de alcantarillado. 	EPM E.S.P. (2013).
Cali	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Norma técnica de recolección de aguas residuales y lluvias; criterios de diseño en sistemas de alcantarillado. 	EMCALI (2017)

Fuente: Elaboración propia.

2.2.4. Metodología de diseño de una red de alcantarillado

Para el correcto diseño de un sistema de alcantarillado, es necesaria una planificación óptima en la que se pueda garantizar una evacuación eficaz de los aportes, ya sean sanitarios o pluviales, teniendo en cuenta la población proyectada a futuro para la zona de estudio. El diseño hidráulico del sistema deberá cumplir con una metodología similar a la aplicada para el diseño de redes de distribución de agua potable (MINVIVIENDA, 2017):

- **Estudios previos.** Análisis de información disponible que permita identificar las redes existentes.
- **Reconocimiento de campo.** Visita de terreno al sitio del proyecto donde se realizará el diseño de la red de alcantarillado, con el fin de entender y visualizar las posibilidades reales de ejecución de las alternativas propuestas en el diseño hidráulico.
- **Estudios complementarios.** Es necesario conocer la topografía y las características geotécnicas del suelo donde se proyecta el sistema de alcantarillado. Además, se debe tener en cuenta el estudio de predios para poder planificar y proyectar las alternativas que puedan satisfacer los requerimientos de la población y que se puedan construir de acuerdo con el diseño hidráulico realizado.
- **Selección de alternativas.** En todo diseño hidráulico, es necesario realizar un planteamiento de posibles alternativas que den solución a los requerimientos de cada proyecto y realizar una evaluación que permita identificar la mejor de ellas. Esto se hace en base a criterios de sostenibilidad a partir de la evaluación de los aspectos económicos, técnicos, ambientales y sociales de la zona.
- **Trazados de redes a nivel de detalle.** Se debe realizar un trazado geométrico que tenga en cuenta el estudio topográfico. En este trazado, se deben especificar los alineamientos del sistema de alcantarillado, la ubicación de las estructuras planteadas y el catastro de redes para evitar interferencias con los demás sistemas (agua potable, redes de gas, eléctricas, entre otros). Esto garantiza las distancias mínimas entre estas, establecidas en la normativa.

- Desarrollo del modelo hidráulico. Se debe desarrollar un modelo hidráulico que tenga en cuenta los aportes de caudal tanto actuales como futuros. Para esto, es necesario realizar el cálculo hidráulico para flujo permanente y para condiciones de periodo extendido que consideren la variación horaria y diaria a partir de patrones temporales propios del sistema o de regiones de comportamiento similar. El modelo hidráulico debe resolverse de acuerdo con lo mencionado en el apartado 2.2.2 de esta unidad, con el fin de poder definir las obras necesarias, precisando parámetros como diámetros, caudales, velocidades, especificaciones de materiales y otros aspectos técnicos que permitan asegurar el funcionamiento adecuado de los sistemas.

2.2.5. Software para el diseño de alcantarillados

El diseño de una red de alcantarillado ya sea sanitario, pluvial o combinado, tiene como fin determinar el dimensionamiento eficaz de cada uno de los componentes que conforman el sistema, para que tengan la capacidad de transportar y evacuar el caudal requerido, satisfaciendo a su vez los parámetros establecidos por la normativa vigente (Pérez, 2013). En la actualidad, existen diversos programas destinados a la modelación de redes de alcantarillado de todo tipo.

Existen varios programas reconocidos y de gran aceptación en el diseño de alcantarillados, tanto de acceso libre como EPASWMM, desarrollado por EPA-USA, el cual es uno de los más usados a nivel mundial. También existen programas de acceso comercial, entre los que se encuentra SEWERGEMS, desarrollado por la reconocida empresa especializada en la creación de software de ingeniería Bentley Systems, y AlconW, entre otros. En esta unidad se implementará el uso de EPASWMM, proporcionando las herramientas básicas necesarias para poder utilizar el software en futuros proyectos de ingeniería y obras hidráulicas.

2.2.6. Introducción a EPASWMM

El software *Stormwater Management Model* (EPASWMM) es un modelo dinámico que permite la simulación del comportamiento hidráulico de sistemas de alcantarillado, tanto para periodos

estacionarios como extendidos. El programa permite realizar un análisis del recorrido del flujo a través del sistema, siguiendo la evolución de la cantidad y calidad del agua en los distintos componentes de la red durante múltiples intervalos de tiempo; todo esto mediante un entorno integrado que permite observar los resultados en múltiples formatos, como mapas de contorno, tablas, gráficos, diagramas de perfil y análisis estadísticos de frecuencia (USEPA, 2005).

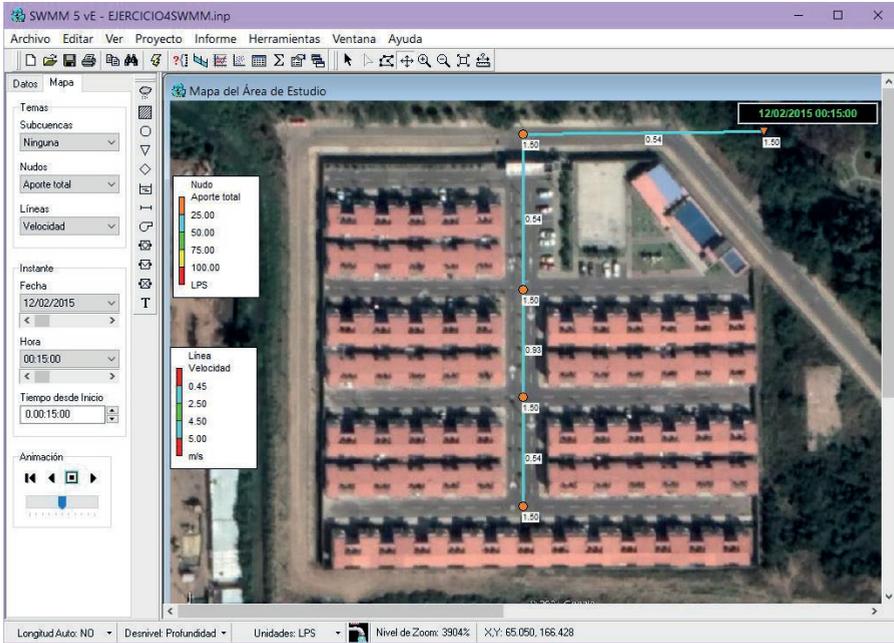
EPASWMM es considerado un motor de análisis hidráulico con evoluciones temporales de diferentes variables y que, de manera general, presenta las siguientes características:

- No tiene limitaciones para el tamaño de la red a modelar.
- Permite el uso de diversas geometrías, tanto abiertas como cerradas, para los conductos abiertos y cerrados.
- Los análisis hidráulicos pueden ser realizados tanto por flujo uniforme como por el método de onda cinemática u onda dinámica.
- Permite la modelación de los distintos regímenes de flujo, entrada en carga, flujo inverso, entre otros.
- Modela componentes especiales como bombas, válvulas, vertederos y orificios, aplicando controles dinámicos definidos por el usuario.
- Estima la producción y evolución de las cargas contaminantes asociadas a la calidad del agua.

En la Figura 36 se muestra la interfaz general del programa al desarrollar un modelo hidráulico de un sistema de alcantarillado, donde se pueden observar diferentes elementos de la red, escala velocidades, aportes totales y la hora de análisis del modelo.

Figura 36

Interfaz general de EPASWMM en un modelo hidráulico de una red de alcantarillado.



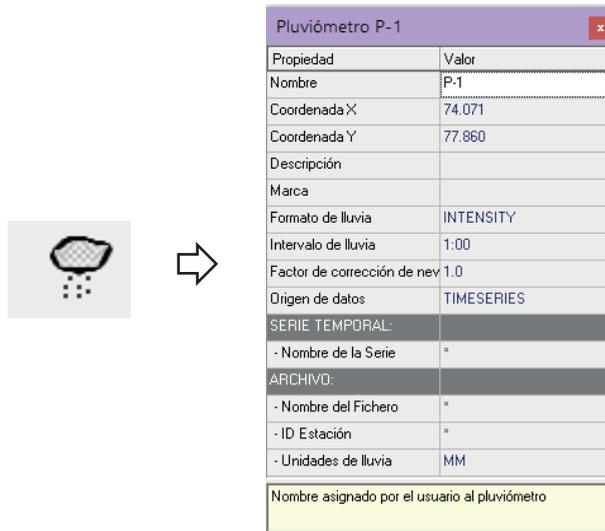
Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 36, el entorno de trabajo del software EPASWMM es bastante similar a la interfaz de EPANET, por lo que algunos de los componentes pueden ser familiarizados con los mencionados en la unidad 1. A continuación, se realiza una breve explicación de dichos elementos, los cuales serán empleados en los ejercicios realizados en esta unidad (EPA-USA, 2005):

Lluvia o pluviómetro. Suministra datos de precipitaciones ocurridas sobre una o varias cuencas de drenaje; estos datos pueden definirse mediante el uso de series temporales o provenir de archivos externos al software. Los principales datos de entrada de estos elementos son: tipo de datos de lluvia, intervalo de tiempo de los datos, origen y nombre de origen de ellos.

El ícono de la barra de herramientas que representa este elemento y las propiedades (Figura 37) que permite realizar configuraciones, realizando doble clic.

Figura 37
Ícono de lluvia y sus propiedades.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Subcuenca. Áreas de drenaje definidas por el usuario; se debe identificar su punto de descarga, el cual puede ser una conexión u otra cuenca. Estas pueden ser divididas en áreas impermeables o permeables; esta última permite el uso de modelos de Horton, Green-Ampt o la Curva del SCS para determinar su infiltración. Este componente, además, permite la modelación del flujo de aguas subterráneas y el arrastre de contaminantes desde ellas, los cuales se encuentran asociados al uso del suelo. Los elementos de entrada del componente mencionado, así como su representación gráfica en la interfaz, se observan en la Figura 38.

Nudos de conexión. Como su nombre lo indica, son nudos usados para la conexión de los conductos o tuberías entre sí. Pueden representar pozos de inspección o la confluencia de canales, tanto superficiales como naturales. Cuando hay exceso de caudal en el nudo modelado, este se convierte en flujo presurizado, concentrando el exceso de agua en la parte superior hasta que pueda reintegrarse al sistema o perderse por completo. En la Figura 39 se muestra el componente y su representación gráfica en la interfaz.

Figura 38
Ícono de subcuenca y sus propiedades.




Propiedad	Valor
Nombre	SC-1
Coordenada X	196.918
Coordenada Y	63.208
Descripción	
Marca	
Pluviómetro	*
Descarga	*
Área	0
Ancho	0
Pendiente (%)	0
Área impermeable (%)	25
Coef. n (Impermeable)	0.02

Coef. n (Permeable)	0.1
Alm. Dep. (Impermeable)	0.05
Alm. Dep. (Permeable)	0.05
(%)Área Imperm. sin Alm. Dep.	25
Flujo entre subáreas	OUTLET
(%) escorren/ía transportada	100
Infiltración	CURVE_NUMBER
Aguas Subterráneas	NO
Capa de nieve	
Usos del suelo	0
Acumulación inicial	NONE
Longitud Cauce	0
Nombre asignado por el usuario a la cuenca	

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Figura 39
Ícono de conexión y sus propiedades.



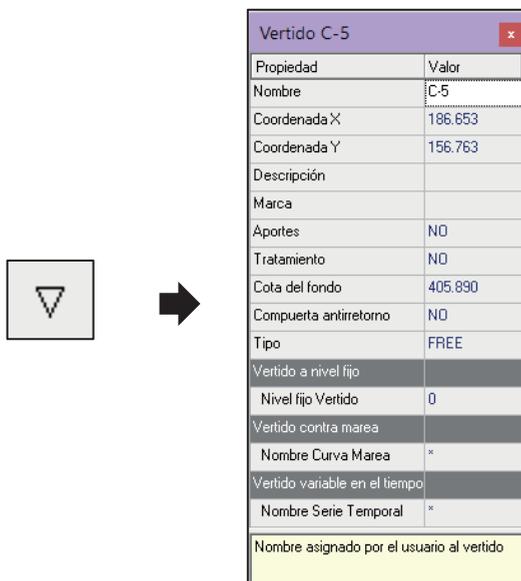

Propiedad	Valor
Nombre	C-2
Coordenada X	111.360
Coordenada Y	73.875
Descripción	
Marca	
Áportes	YES
Tratamiento	NO
Cota del fondo	407.376
Profundidad Máxima	1.624
Nivel inicial	0
Altura de Sobrepresión	0
Área de inundación	0
Nombre asignado por el usuario a la conexión	

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Vertido. Son nudos en los cuales se realiza la descarga del sistema de alcantarillado. Estos se comportan de forma muy similar a los nudos de conexión, con la limitante de que solo es posible conectar un solo conducto a ellos. Cuando la simulación se realiza mediante el modelo de onda dinámica, estos elementos permiten definir condiciones de contorno finales aguas abajo del sistema. Entre estas condiciones se incluyen un nivel fijo del agua, una serie temporal que represente el nivel del agua en la zona de descarga a lo largo del tiempo, un calado crítico, etc. Los elementos de entrada del componente mencionado, así como su representación gráfica, se observan en la Figura 40.

Figura 40

Ícono de vertido y sus propiedades.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

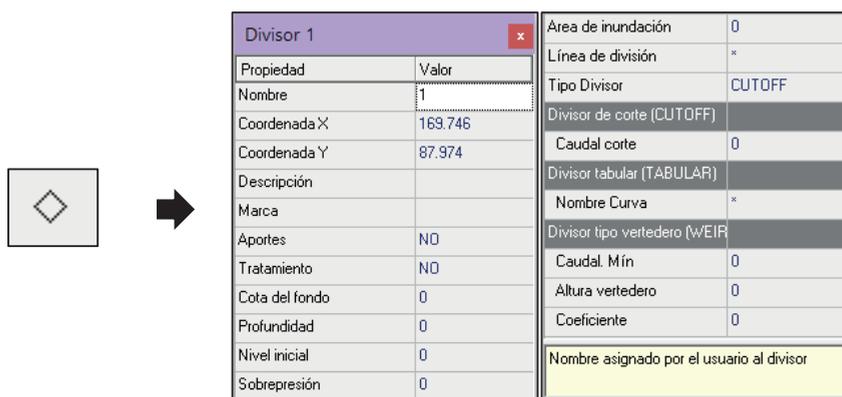
Divisor. Los divisores de flujo son nudos utilizados con el objetivo de dividir el caudal transportado por un conducto en dos conductos de salida o descarga. Una de sus limitaciones es que solo se activan cuando se trabaja con el modelo de onda cinemática, ya que en ese caso se comportan como nudos normales. Estos elementos se

dividen en cuatro tipos diferentes, dependiendo de cómo se reparte el caudal de entrada entre los dos conductos de salida:

- Divisor de corte. Deriva todos los caudales que estén por encima del valor definido.
- Divisor de exceso. Deriva todo el caudal que esté por encima de la capacidad del conducto sin derivar.
- Divisor tabular. Tiene en cuenta la relación entre el caudal derivado en función de la totalidad de caudal de entrada, utilizando una tabla definida por el usuario.
- Aliviadero. Deriva el caudal de entrada mediante la ecuación definida para determinar el caudal de un aliviadero.

Los elementos de entrada del componente mencionado, así como su representación gráfica en la interfaz, se observan en la Figura 41.

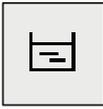
Figura 41
Ícono de divisor y sus propiedades.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Depósito. Son utilizados como sistemas de almacenamiento, pudiendo representar desde pequeñas cuencas hasta grandes lagos, y tienen la capacidad de almacenar un volumen específico de agua, teniendo en cuenta sus propiedades volumétricas. Los elementos de entrada del componente mencionado, así como su representación gráfica en la interfaz, se observan en la Figura 42.

Figura 42
Ícono de depósito y sus propiedades.




Depósito 2		Propiedad		Valor
Nombre	2	Area de inundación		0
Coordenada X	160.178	Factor de evaporación		0
Coordenada Y	61.732	Infiltración		NO
Descripción		Curva de almacenamiento		FUNCTIONAL
Marca		Curva definida por función		
Aportes	NO	Coefficiente		1000
Tratamiento	NO	Exponente		0
Cota del fondo	0	Constante		0
Nivel Máximo	0	Curva definida por tabla		
Nivel inicial	0	Nombre Curva		*
		Nombre asignado por el usuario al depósito		

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Conducto. Tuberías o canales que transportan el caudal de un nudo de conexión a otro. Su sección transversal puede ser tanto abierta como cerrada, con diversas geometrías. Su comportamiento hidráulico se puede calcular mediante la ecuación de Manning, como se mencionó anteriormente. Los elementos de entrada de este componente, así como su representación gráfica en la interfaz, se observan en la Figura 43.

Figura 43
Ícono de conducto y sus propiedades.

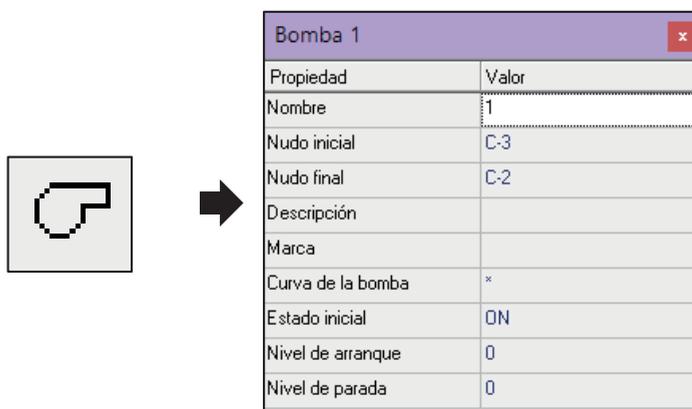



Conducto T-3		Propiedad		Valor
Nombre	T-3	Forma		CIRCULAR
Nudo inicial	C-3	Altura (Prof. Máx.)		0.182
Nudo final	C-4	Longitud		48.44
Descripción		Coef. Manning (n)		0.009
Marca		Desnivel Entrada		0.000
		Desnivel Salida		0.051
		Caudal inicial		0
		Caudal máximo		0
		Coef. Pérd. Entrada		0
		Coef. Pérd. Salida		0
		Nombre asignado por el usuario al conducto		

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Bombas. Estos elementos se incluyen en el sistema de alcantarillado con el objetivo de transportar el agua de un punto a otro. Este programa, al igual que en EPANET, los considera como bombas de flujo unidireccional con velocidad constante o variable. Por ende, debe ser introducida una curva característica que tenga en cuenta la relación existente entre el caudal del equipo y las condiciones de contorno en las conexiones de entrada y salida de esta. El control de la bomba para su encendido y apagado se realiza dinámicamente mediante reglas de control definidas. Los elementos de entrada del componente mencionado, así como su representación gráfica en la interfaz, se observan en la Figura 44.

Figura 44
Ícono de bomba y sus propiedades.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Vertederos, orificios y descargas. Son elementos reguladores de caudal, utilizados para controlar y derivar el flujo dentro de un sistema de alcantarillado. Pueden ser simulados en cualquier modelo hidráulico siempre y cuando se utilicen como sistemas de descarga de las unidades de almacenamiento; de lo contrario, solo pueden modelarse mediante la onda dinámica. Además, sus parámetros principales son controlados mediante las reglas de control definidas. Los elementos de entrada de los componentes mencionados, así como su representación gráfica en la interfaz, se observan en la Figura 45, Figura 46 y Figura 47.

Figura 45
Ícono de orificio y sus propiedades.




Orificio 1	
Propiedad	Valor
Nombre	1
Nudo inicial	PZ-1
Nudo final	PZ-2
Descripción	
Marca	
Tipo	SIDE
Forma	CIRCULAR
Altura	1
Anchura	1
Desnivel en la entrada	0
Coefficiente descarga	0.65
Compuerta antirretorno	NO
Tiempo de apertura/cierre	0
Nombre asignado por el usuario al orificio	

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

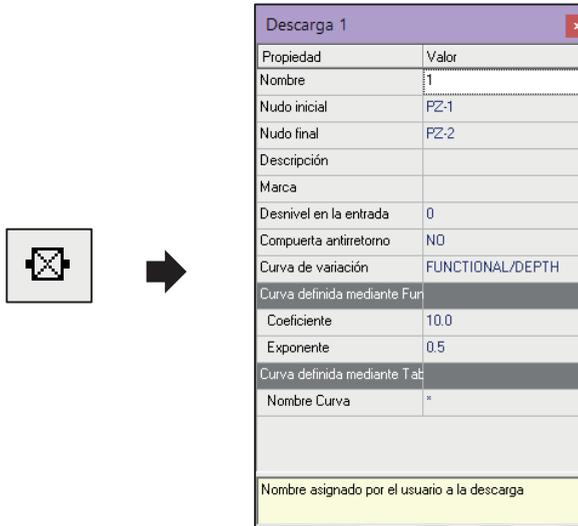
Figura 46
Ícono de vertedero y sus propiedades.




Vertedero 1	
Propiedad	Valor
Nombre	1
Nudo inicial	PZ-1
Nudo final	PZ-2
Descripción	
Marca	
Tipo	TRANSVERSE
Altura	1
Longitud	1
Pendiente lateral	0
Altura de cresta	0
Coefficiente descarga	2.4
Compuerta antirretorno	NO
Contracciones	0
Coefficiente de borde	0
Nombre asignado por el usuario al vertedero	

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

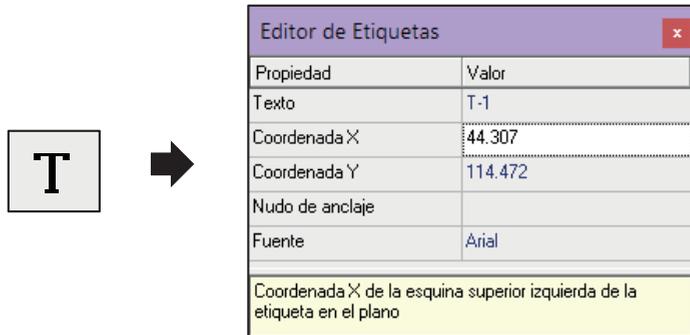
Figura 47
Ícono de descarga y sus propiedades.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Etiqueta de texto. Pueden añadirse al modelo de manera opcional con el fin de identificar objetos o hacer observaciones sobre estos. Permiten ser editadas y arrastradas libremente por el espacio de trabajo de EPASWMM. Los elementos de entrada del componente mencionado, así como su representación gráfica en la interfaz, se observan en la Figura 48.

Figura 48
Ícono de Etiqueta de texto y sus propiedades.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

2.3. Ejercicio 1, aplicación de EPASWMM

Realizar la modelación hidráulica del sistema de alcantarillado representado en la Figura 49, las propiedades generales del sistema se observan en la Tabla 12.

Figura 49
Esquema del sistema de alcantarillado, ejercicio 1.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Adicionalmente, el modelo hidráulico debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La sección transversal del conducto será de tipo circular.
- El modelo hidráulico a utilizar será el de onda cinemática.
- En las opciones de tiempo, modelar para una duración total de 24 horas.
- Incluir el patrón de tiempo mostrado en la Tabla 12.
- El pozo C11, al ser el seleccionado para descargar los aportes del sistema, se representará en el modelo mediante el componente “vertido”.

Tabla 12

Propiedades de los elementos del sistema de alcantarillado, ejercicio 1.

Pozo (Conexión)	Cota terreno (m.s.n.m.)	Cota fondo (m.s.n.m.)	Profundidad de fondo (m)	Caudal (L/s)
C-1	423.36	421.96	1.40	1.50
C-2	421.60	420.15	1.45	-
C-3	419.22	417.47	1.75	-
C-4	422.96	421.56	1.40	1.50
C-5	421.20	419.75	1.45	-
C-6	418.82	417.07	1.75	0.60
C-7	422.56	421.16	1.40	1.50
C-8	420.80	419.35	1.45	-
C-9	418.45	416.62	1.83	0.50
C-10	418.25	415.34	2.91	4.00
C-11	417.88	414.40	3.48	-
Conducto	Longitud (m)	Coefficiente Manning (n)	Desnivel de salida (m)	Diámetro interno (m)
T-1	83.60	0.009	0.05	0.145
T-2	106.20	0.009	0.05	0.145
T-3	35.29	0.009	0.05	0.145
T-4	83.60	0.009	0.05	0.145
T-5	106.20	0.009	0.05	0.145
T-6	35.30	0.009	0.10	0.145
T-7	77.80	0.009	0.05	0.145
T-8	106.20	0.009	0.10	0.145
T-9	6.95	0.009	1.21	0.145
T-10	64.39	0.009	-	0.145

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13*Patrón de tiempo para el sistema de alcantarillado, ejercicio 1.*

Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
FP	0.74	0.63	0.57	0.54	0.54	0.58	0.76	0.99	1.2	1.28	1.4	1.41
Hora	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
FP	1.39	1.31	1.28	1.28	1.23	1.16	1.10	1.02	0.96	0.91	0.8	0.84

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la modelación para el ejercicio planteado, lo primero que se debe hacer es configurar el sistema de unidades, las opciones hidráulicas para el cálculo de pérdidas de energía y las demás configuraciones que se consideren necesarias en el modelo. Se explicará paso a paso la forma de construir el modelo y obtener los resultados más importantes del sistema de alcantarillado.

2.3.1. Configuraciones iniciales del ejercicio 1

Al tener el programa abierto y estar en el espacio de trabajo de la barra de menú, se selecciona con un clic la pestaña **Proyecto Valores por Defecto Nudos/Líneas**. En este espacio se configuran las unidades de caudal en LPS y la ecuación con la que se evaluará el sistema cuando se encuentre presurizado (Darcy-Weisbach), posteriormente se hace clic en aceptar. La vista del menú indicado se muestra en la Figura 50.

Si hay dudas sobre las unidades en la configuración, se accede a **Ayuda Unidades** para obtener soporte técnico a través de un tutorial. Las unidades del sistema internacional (SI) que muestra el programa se detallan en la Tabla 14.

Tabla 14
Unidades métricas, Sistema Internacional (SI).

Parámetro	Unidades
Área (Cuenca, Depósitos, inundación))	-- metros cuadrados
Succión Capilar	-- Milímetros
Concentración	-- mg/L o µg/L o counts/L
Constante de Decaimiento (Infiltración)	-- 1/horas
Constante de Decaimiento (Contaminantes)	-- 1/días
Almacenamiento en Depresión	-- Milímetros
Nivel (calado)	-- Metros
Diámetro	-- Metros
Coefficiente de descarga	
Orificio	-- Adimensional
Vertedero	-- (m ³ /s) / m ⁿ
Cota del Terreno	-- Metros
Evaporación	-- mm/día
Caudal	-- LPS (litros/s); LPM (litros/min); CMS (m ³ /s)
Altura	-- Metros
Conductividad hidráulica	-- mm/día
Tasa de Infiltración	-- mm/hora
Longitud	-- Metros
Coefficiente de Manning	-- Metros / segundos
Acumulación de contaminantes	-- Seg/m ^{1/3}
Intensidad de la Lluvia	-- mm/h
Volumen de lluvia	-- Milímetros
Pendiente (Cuenca)	-- %
Pendiente (Sección transversal)	-- vertical/horizontal
Intervalo limpieza calles	-- días
Volumen	-- metros cúbicos (m ³)
Ancho	-- Metros

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Figura 50
Valores por defecto, nudos/líneas.

Opción	Valor predeterminado
Cota Fondo del Nudos	0
Profundidad Max. Nudos	0
Área Inund. Nudos	0
Longitud Conductos	120
Geometría Conductos	CIRCULAR
n Manning Conductos	0.009
Unidades de caudal	LPS
Desnivel Líneas	DEPTH
Modelo cálculo hidráulico	Onda Cinemática
Ecuación Tub. Forzada	Darcy-Weisbach

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Una vez realizadas las configuraciones iniciales del modelo se procede a incluir los elementos del sistema y sus propiedades.

2.3.2. Componentes del sistema y sus propiedades del ejercicio 1

Se procede a incluir los componentes del modelo hidráulico y asignar las distintas propiedades descritas en la Tabla 12. Para este ejercicio, los componentes a emplear en la red son: 10 nudos de conexión que representarán los pozos de inspección del sistema, donde se asignarán los caudales aportantes al modelo, y 10 tuberías que estarán unidas por los nudos, que crearán el trazado del sistema y un vertido, donde se dispondrán los aportes totales del sistema. Los componentes se crean desde la barra de herramientas mostrada en la Figura 51.

Figura 51
Barra de menú y barra de herramientas de EPASWMM.

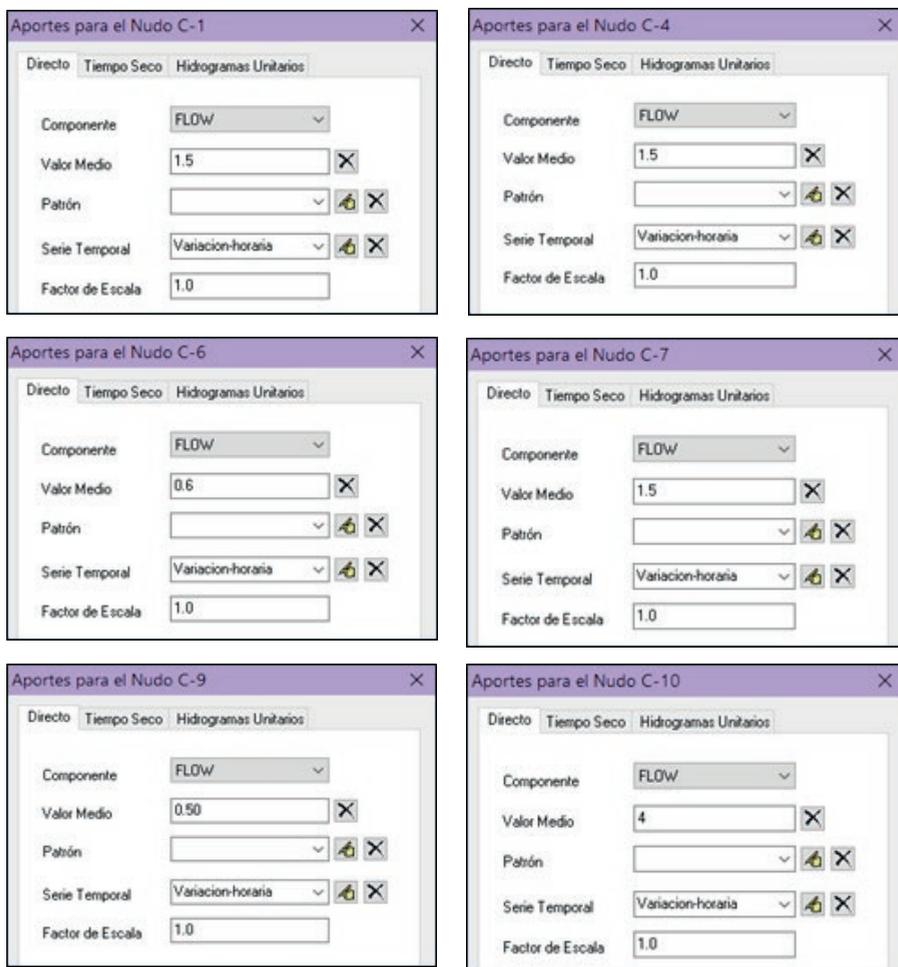


Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Configuración del nudo de conexión. Se da clic en el botón **Conexión** de la barra de herramientas mostrada en la Figura 51; la forma del cursor cambia y se observa que el botón seleccionado queda sombreado o sostenido. En el espacio de trabajo, se da clic en el lugar donde se deseen colocar. Para configurar las propiedades del componente, se da doble clic en la conexión creada y se procede a modificar las propiedades de acuerdo con la necesidad de cada modelo hidráulico.

Para el ejercicio que se está realizando, se configuran los **Aportes**, los cuales representan el caudal de descarga que entra en cada pozo. Estos se adicionan dando clic en los tres puntos que aparecen en la casilla derecha. Posteriormente, aparecerá una ventana en la cual se selecciona el tipo de aporte que realiza al pozo. En este caso, ya que la modelación se realiza haciendo uso de un patrón temporal, los datos del caudal agregado en cada conexión serán añadidos en la pestaña "Directos", como se muestra en la Figura 52.

Figura 52
Configuración de aportes a las conexiones del ejercicio 1.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

La **Cota Fondo** del pozo de inspección y la **Profundidad Máxima** del mismo, así como, los valores de las **Coordenadas X-Y** se generan de forma automática de acuerdo con el punto donde se ubicó el nudo y el **ID-Conexión** se genera según el orden de creación de las conexiones. En la Figura 53 se muestra cómo debe quedar la configuración de este elemento.

Figura 53
Configuración de vertido y conexiones del ejercicio 1.

Propiedad	Valor
Nombre	DESC-1
Coordenada X	13145.800
Coordenada Y	9112.520
Descripción	
Marca	
Aportes	NO
Tratamiento	NO
Cota del fondo	414.40
Compuerta antirretorno	NO
Tipo	FREE
Vertido a nivel fijo	
Nivel fijo Vertido	0
Vertido contra marea	
Nombre Curva Marea	-
Vertido variable en el tiempo	
Nombre Serie Temporal	-

Propiedad	Valor
Nombre	C-1
Coordenada X	-1275.753
Coordenada Y	2393.027
Descripción	
Marca	
Aportes	YES
Tratamiento	NO
Cota del fondo	421.96
Profundidad Máxima	1.40
Nivel inicial	0
Altura de Sobrepresión	0
Área de inundación	0

Propiedad	Valor
Nombre	C-2
Coordenada X	4540.412
Coordenada Y	2393.027
Descripción	
Marca	
Aportes	NO
Tratamiento	NO
Cota del fondo	420.15
Profundidad Máxima	1.45
Nivel inicial	0
Altura de Sobrepresión	0
Área de inundación	0

Propiedad	Valor
Nombre	C-3
Coordenada X	12068.146
Coordenada Y	2393.027
Descripción	
Marca	
Aportes	NO
Tratamiento	NO
Cota del fondo	417.47
Profundidad Máxima	1.75
Nivel inicial	0
Altura de Sobrepresión	0
Área de inundación	0

Propiedad	Valor
Nombre	C-4
Coordenada X	-1275.753
Coordenada Y	4865.293
Descripción	
Marca	
Aportes	YES
Tratamiento	NO
Cota del fondo	421.56
Profundidad Máxima	1.40
Nivel inicial	0
Altura de Sobrepresión	0
Área de inundación	0

Propiedad	Valor
Nombre	C-5
Coordenada X	4572.108
Coordenada Y	4865.293
Descripción	
Marca	
Aportes	NO
Tratamiento	NO
Cota del fondo	419.75
Profundidad Máxima	1.45
Nivel inicial	0
Altura de Sobrepresión	0
Área de inundación	0

Propiedad	Valor
Nombre	C-6
Coordenada X	12068.146
Coordenada Y	4865.293
Descripción	
Marca	
Aportes	YES
Tratamiento	NO
Cota del fondo	417.07
Profundidad Máxima	1.75
Nivel inicial	0
Altura de Sobrepresión	0
Área de inundación	0

Propiedad	Valor
Nombre	C-7
Coordenada X	-863.708
Coordenada Y	7369.255
Descripción	
Marca	
Aportes	YES
Tratamiento	NO
Cota del fondo	421.16
Profundidad Máxima	1.40
Nivel inicial	0
Altura de Sobrepresión	0
Área de inundación	0

Propiedad	Valor
Nombre	C-8
Coordenada X	4540.412
Coordenada Y	7369.255
Descripción	
Marca	
Aportes	NO
Tratamiento	NO
Cota del fondo	419.35
Profundidad Máxima	1.45
Nivel inicial	0
Altura de Sobrepresión	0
Área de inundación	0

Propiedad	Valor
Nombre	C-9
Coordenada X	12068.146
Coordenada Y	7369.255
Descripción	
Marca	
Aportes	YES
Tratamiento	NO
Cota del fondo	416.62
Profundidad Máxima	1.83
Nivel inicial	0
Altura de Sobrepresión	0
Área de inundación	0

Propiedad	Valor
Nombre	C-10
Coordenada X	13145.800
Coordenada Y	7369.255
Descripción	
Marca	
Aportes	YES
Tratamiento	NO
Cota del fondo	415.34
Profundidad Máxima	2.91
Nivel inicial	0
Altura de Sobrepresión	0
Área de inundación	0

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Configuración del vertido. Se da clic en el botón **Vertido** de la barra de herramientas mostrada en la Figura 51; la forma del cursor cambia y se observa que el botón seleccionado queda sombreado o sosteni-

do. En el espacio de trabajo, se da clic en el lugar donde se desee colocar. Para configurar las propiedades del componente, se da doble clic en la descarga o vertido creado y se procede a modificar las propiedades de acuerdo con la necesidad de cada modelo hidráulico. Para el ejercicio que se está realizando, se configura la **Cota Fondo** por 414.4 m.s.n.m.; los valores de las **Coordenadas X-Y** se generan de forma automática de acuerdo con la ubicación de la descarga, y el **ID-Vertido** se genera según el orden de creación de estos. En la Figura 53 se muestra cómo debe quedar la configuración de este elemento.

Configuración de tuberías. Se selecciona con un clic el ícono de **Tubería** de la barra de herramientas. Se deben seleccionar las dos conexiones entre las que estarán la tubería; la primera conexión seleccionada será tomada por el programa como el punto inicial de la tubería y la segunda como el final.

Sobre cada una de las tuberías, se da doble clic y se procede a cambiar las propiedades de cada modelo hidráulico. En el ejercicio, se deben modificar en todas las tuberías la **Longitud** y **Altura Prof. Máxima**) la cual se considera como el diámetro interno de la **Tubería**, **Coef. Manning (n)**, **Forma y Desnivel de Salida de la Tubería**. En la Figura 54 se muestra la configuración realizada en las tuberías, de acuerdo con lo especificado en la Tabla 12.

Figura 54
Configuración de tuberías del ejercicio 1.

Conducto T-1	
Propiedad	Valor
Nombre	T-1
Nudo inicial	C-1
Nudo final	C-2
Descripción	
Marca	
Forma	CIRCULAR
Altura (Prof. Máx.)	0.145
Longitud	83.62
Coef. Manning (n)	0.009
Desnivel Entrada	0
Desnivel Salida	0.05
Caudal inicial	0
Caudal máximo	0
Coef. Pérd. Entrada	0
Coef. Pérd. Salida	0
Coef. Pérd. Medio	0
Compuerta antirretorno	NO
Código Paso Inferior	

Conducto T-2	
Propiedad	Valor
Nombre	T-2
Nudo inicial	C-2
Nudo final	C-3
Descripción	
Marca	
Forma	CIRCULAR
Altura (Prof. Máx.)	0.145
Longitud	106.2
Coef. Manning (n)	0.009
Desnivel Entrada	0
Desnivel Salida	0.05
Caudal inicial	0
Caudal máximo	0
Coef. Pérd. Entrada	0
Coef. Pérd. Salida	0
Coef. Pérd. Medio	0
Compuerta antirretorno	NO
Código Paso Inferior	

Conducto T-3	
Propiedad	Valor
Nombre	T-3
Nudo inicial	C-3
Nudo final	C-6
Descripción	
Marca	
Forma	CIRCULAR
Altura (Prof. Máx.)	0.145
Longitud	35.29
Coef. Manning (n)	0.009
Desnivel Entrada	0
Desnivel Salida	0.05
Caudal inicial	0
Caudal máximo	0
Coef. Pérd. Entrada	0
Coef. Pérd. Salida	0
Coef. Pérd. Medio	0
Compuerta antirretorno	NO
Código Paso Inferior	

Conducto T-4	
Propiedad	Valor
Nombre	T-4
Nudo inicial	C-4
Nudo final	C-5
Descripción	
Marca	
Forma	CIRCULAR
Altura (Prof. Máx.)	0.145
Longitud	93.60
Coef. Manning (n)	0.009
Desnivel Entrada	0
Desnivel Salida	0.05
Caudal inicial	0
Caudal máximo	0
Coef. Pérd. Entrada	0
Coef. Pérd. Salida	0
Coef. Pérd. Medio	0
Compuerta antirretorno	NO
Código Paso Inferior	

Conducto T-5	
Propiedad	Valor
Nombre	T-5
Nudo inicial	C-5
Nudo final	C-6
Descripción	
Marca	
Forma	CIRCULAR
Altura (Prof. Máx.)	0.145
Longitud	106.2
Coef. Manning (n)	0.009
Desnivel Entrada	0
Desnivel Salida	0.05
Caudal inicial	0
Caudal máximo	0
Coef. Pérd. Entrada	0
Coef. Pérd. Salida	0
Coef. Pérd. Medio	0
Compuerta antirretorno	NO
Código Paso Inferior	

Conducto T-6	
Propiedad	Valor
Nombre	T-6
Nudo inicial	C-6
Nudo final	C-9
Descripción	
Marca	
Forma	CIRCULAR
Altura (Prof. Máx.)	0.145
Longitud	35.3
Coef. Manning (n)	0.009
Desnivel Entrada	0
Desnivel Salida	0.10
Caudal inicial	0
Caudal máximo	0
Coef. Pérd. Entrada	0
Coef. Pérd. Salida	0
Coef. Pérd. Medio	0
Compuerta antirretorno	NO
Código Paso Inferior	

Conducto T-7	
Propiedad	Valor
Nombre	T-7
Nudo inicial	C-7
Nudo final	C-8
Descripción	
Marca	
Forma	CIRCULAR
Altura (Prof. Máx.)	0.145
Longitud	77.80
Coef. Manning (n)	0.009
Desnivel Entrada	0
Desnivel Salida	0.05
Caudal inicial	0
Caudal máximo	0
Coef. Pérd. Entrada	0
Coef. Pérd. Salida	0
Coef. Pérd. Medio	0
Compuerta antirretorno	NO
Código Paso Inferior	

Conducto T-8	
Propiedad	Valor
Nombre	T-8
Nudo inicial	C-8
Nudo final	C-9
Descripción	
Marca	
Forma	CIRCULAR
Altura (Prof. Máx.)	0.145
Longitud	106.2
Coef. Manning (n)	0.009
Desnivel Entrada	0
Desnivel Salida	0.10
Caudal inicial	0
Caudal máximo	0
Coef. Pérd. Entrada	0
Coef. Pérd. Salida	0
Coef. Pérd. Medio	0
Compuerta antirretorno	NO
Código Paso Inferior	

Conducto T-9	
Propiedad	Valor
Nombre	T-9
Nudo inicial	C-9
Nudo final	C-10
Descripción	
Marca	
Forma	CIRCULAR
Altura (Prof. Máx.)	0.145
Longitud	6.95
Coef. Manning (n)	0.009
Desnivel Entrada	0
Desnivel Salida	1.21
Caudal inicial	0
Caudal máximo	0
Coef. Pérd. Entrada	0
Coef. Pérd. Salida	0
Coef. Pérd. Medio	0
Compuerta antirretorno	NO
Código Paso Inferior	

Conducto T-10	
Propiedad	Valor
Nombre	T-10
Nudo inicial	C-10
Nudo final	DESC-1
Descripción	
Marca	
Forma	CIRCULAR
Altura (Prof. Máx.)	0.145
Longitud	64.39
Coef. Manning (n)	0.009
Desnivel Entrada	0
Desnivel Salida	0
Caudal inicial	0
Caudal máximo	0
Coef. Pérd. Entrada	0
Coef. Pérd. Salida	0
Coef. Pérd. Medio	0
Compuerta antirretorno	NO
Código Paso Inferior	

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

2.3.3. Configuraciones de tiempo y patrón temporal del ejercicio 1

La modelación hidráulica se puede realizar ya sea en un momento específico o en un periodo de tiempo, debido a que EPASWMM permite configurar estas opciones. La configuración de tiempo extendido permite visualizar y analizar el comportamiento del alcantarillado y sus variaciones. Al realizar este análisis, se hace necesario incluir en el modelo una **Serie** o un **Patrón**. En este caso, se hace uso de un **Patrón Temporal Horario**, el cual permite modelar la variación periódica del flujo en periodos de tiempo seco, haciendo uso de coeficientes multiplicadores del flujo para cada hora del día.

En el ejercicio de aplicación, se configurarán las opciones de tiempo de acuerdo con las indicaciones generales del modelo, con una duración total del modelo de 24 horas y un patrón temporal del sistema especificado en la Tabla 13. En el **Visor**, selecciona con un clic **Datos** → **Opciones** y se da doble clic en **Intervalos de Tiempo**; se modifica la pestaña de **Fechas** para que el análisis inicie en la hora 0:00 y termine en la hora 23:00 del mismo día. Posteriormente, se selecciona la pestaña **Intervalos**, donde se modifica el intervalo de tiempo en el cual se realiza la variación del caudal teniendo en cuenta el patrón temporal, que para este caso es de 1 hora. En la Figura 55 se muestra esta configuración.

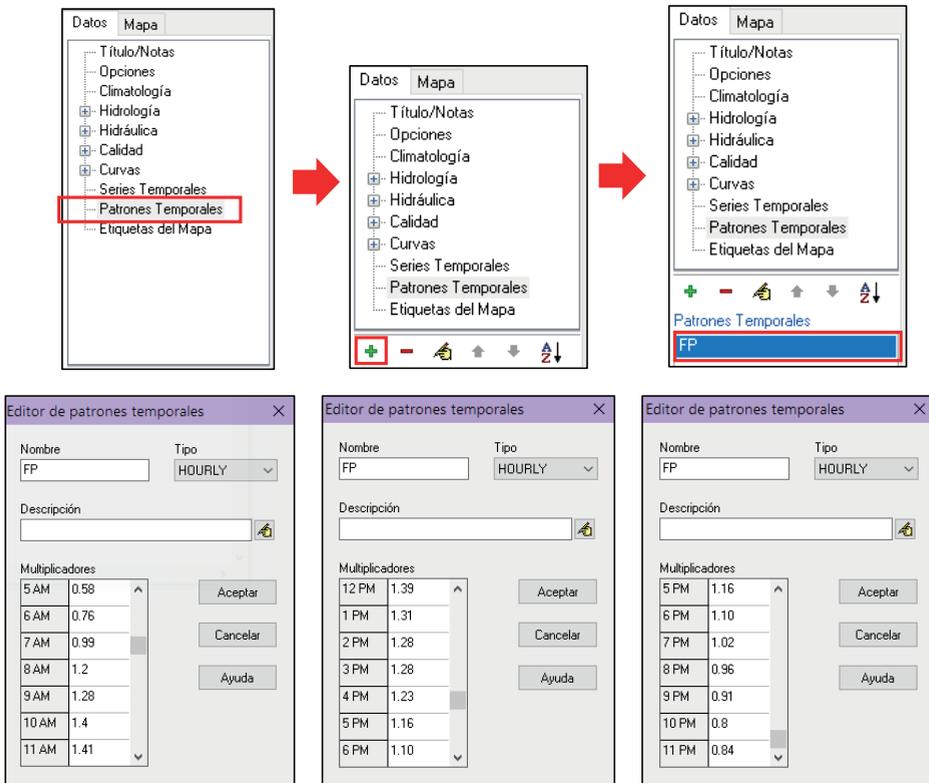
Figura 55
Opciones de simulación, fechas e intervalos.

The figure displays two screenshots of the 'Opciones de Simulación' (Simulation Options) dialog box in EPASWMM. The left screenshot shows the 'Fechas' (Dates) tab, where the analysis start date is 04/13/2021 at 00:00, the report start date is 04/13/2021 at 00:00, and the analysis end date is 04/13/2021 at 23:00. The right screenshot shows the 'Intervalos' (Intervals) tab, where the report interval is set to 1 day (1 día) and 01:00:00, the dry weather runoff interval is 0 and 01:00:00, the rain runoff interval is 0 and 00:05:00, and the transport interval is 30 seconds.

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Para configurar o introducir en el modelo el patrón temporal de la Tabla 12, se da clic en el **Visor** de la parte izquierda del programa, en la pestaña **Datos**. De la lista desplegable que aparece debajo de esta, se da clic en **Patrones Temporales** y posteriormente al + que permite añadir un objeto o patrón. Esto crea por defecto el **Patrón 1**, el cual se edita dando doble clic sobre este. Dicha acción abre una ventana denominada **Editor de Patrones Temporales**, donde se introducirán los datos de la Tabla 13. Por último, después de haber editado el patrón, se da clic en **Aceptar**. En la Figura 56 se muestra la configuración señalada.

Figura 56
Configuración del patrón temporal del ejercicio 1.



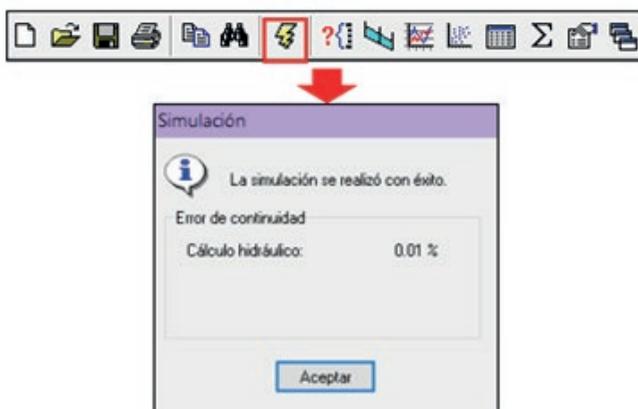
Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Con las configuraciones mostradas en los numerales 2.3.1, 2.3.2 y 2.3.3, se ha creado en su totalidad el modelo del ejercicio 1, pero se pueden realizar más ajustes de acuerdo con lo requerido en cada modelo hidráulico en particular. Luego de realizar el modelo, se procede a llevar a cabo el análisis de los resultados arrojados por el software y se elabora el informe detallado del modelo.

2.3.4. Análisis, resultados, gráficos e informe del modelo hidráulico del ejercicio 1

Una vez creada y configurada la red de distribución, se procede a ejecutar el análisis del modelo hidráulico. En la barra de menú, se selecciona con un clic la pestaña **Proyecto** → **Calcular**, o en la barra de herramientas se da clic en el botón **Iniciar Análisis**. Seguidamente, deberá aparecer una ventana de diálogo **Estado de Inicio** que indica que “**La simulación se produjo con éxito**”, como se muestra en la Figura 57. En caso de que se produzca algún error de cálculo, la ventana indicará los errores encontrados en la simulación. Se da clic en **Aceptar** y se procede a revisar los resultados obtenidos.

Figura 57
Inicial análisis y estado de inicio.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Los resultados obtenidos en el cálculo del modelo se pueden consultar de manera gráfica o tabulados. Para observarlos de manera gráfica en el **Plano de la Red**, se da clic en el **Visor** de la parte izquierda del programa en la pestaña **Mapa**, donde se tiene la opción de escoger la propiedad de visualizar en los **Nudos (Conexiones)** o en la **Líneas (Tuberías)**. En los **Nudos**, se permite visualizar **Cota, Nivel, Altura, Volumen, Aporte Lateral y Aporte Total e Inundación**. En las **Líneas**, se puede visualizar **Profundidad, Coef. de Manning, Pendiente, Caudal, Nivel, Velocidad, N° de Froude y Capacidad**. Al escoger alguna de las propiedades en los **Nudos** o **Líneas**, se visualiza de manera inmediata en el plano del sistema el valor numérico y una escala de colores con su respectiva leyenda, generados de acuerdo con el rango de los resultados obtenidos. En el **Visor** también se puede consultar la opción de **Instante**, la cual permite conocer los resultados del modelo a una hora específica. Esta opción de tiempo depende del **Patrón Temporal** introducido en el modelo.

Para observar de manera gráfica y numérica los resultados del modelo en el plano de EPASWMM, se debe configurar la presentación numérica de los valores. Para esto se hace clic en la barra de herramientas en **Ver** → **Opciones del Mapa** → **Etiquetas** y se seleccionan las celdas a mostrar. En este caso, podría ser **ID Nudos, Valores Nudos, ID Líneas** y **Valores Líneas**, como se muestra en la Figura 58.

Figura 58
Opciones del plano de la red.

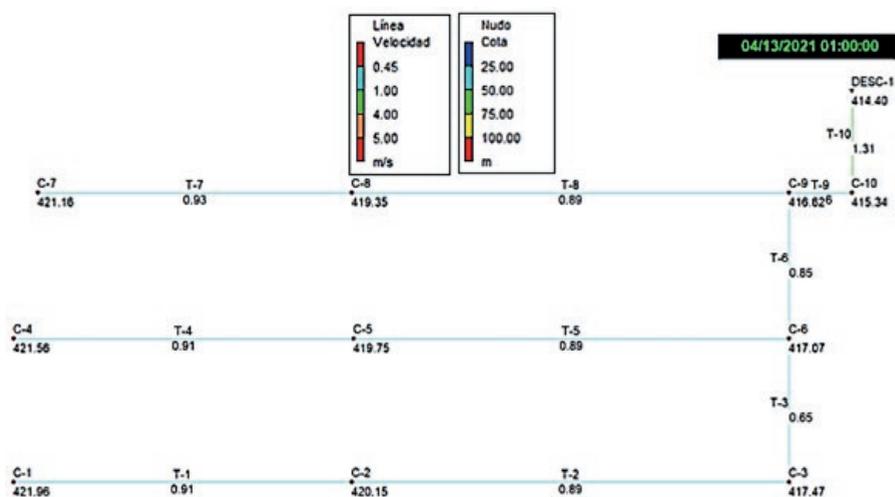


Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

En la Figura 59 se observa el **Plano de la Red** del ejercicio 1, se ha configurado el **Visor** para observar la **Presión** en cada Nudo y la Velocidad en cada **Línea** o **Tubería**, se visualizan los resultados a las 9:00 horas en la opción de **Tiempo** y se presentan las leyendas de los resultados en escala de colores, con las respectivas unidades de cada parámetro. De igual manera en la opción **Tiempo** del **Visor** se pueden visualizar los resultados del modelo a la hora deseada de análisis.

Figura 59

Plano de la red, resultado de Cota y velocidad a la 1:00 Hrs.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

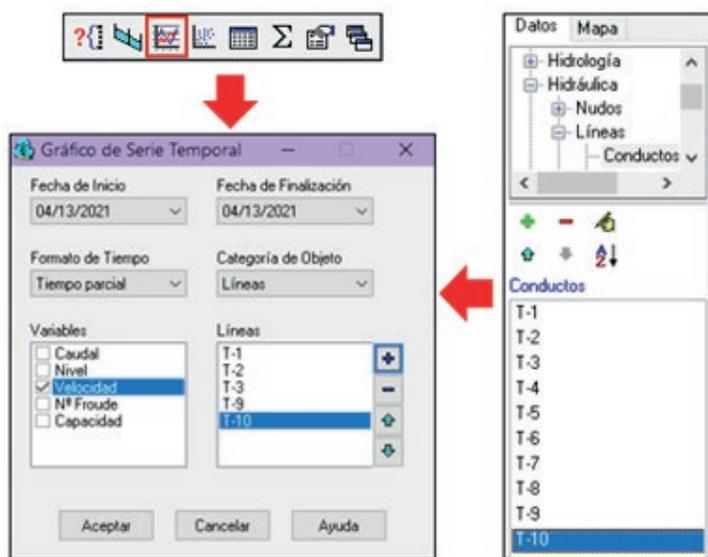
EPASWMM también permite el análisis de los resultados del modelo hidráulico creado mediante **Gráficos**, los cuales permiten observar de una manera más práctica el comportamiento del modelo y la variación de los parámetros importantes. Para crear un gráfico se hace clic en el botón **Gráficos de Evolución o Gráfico de Dispersión**, según se requiera, ubicado en la barra de herramientas. Esto abre una ventana que permite elegir las variables del gráfico. Para agregar las tuberías que queremos observar en el gráfico, mientras se tiene la ventana de edición abierta, se debe seleccionar la pestaña **Datos del Visor** y de

la lista desplegable se selecciona la opción **Tuberías**. En este punto, se observará en modo de lista todas las tuberías creadas en el modelo hidráulico; se da clic en la tubería que se desee agregar y luego se da clic en el botón **Añadir** de la ventana de edición. Este procedimiento se puede repetir si se desea agregar más tuberías; los conductos agregados se verán en la sección **Líneas** de la ventana.

En la Figura 60, se evidencia que, para este ejercicio, se seleccionó una **Curva de Evolución** que ilustra la variación de la velocidad a lo largo del día en las **Tuberías 1, 2, 3, 9 y 10** de la red creada.

Figura 60

Gráfico de evolución, edición del gráfico.

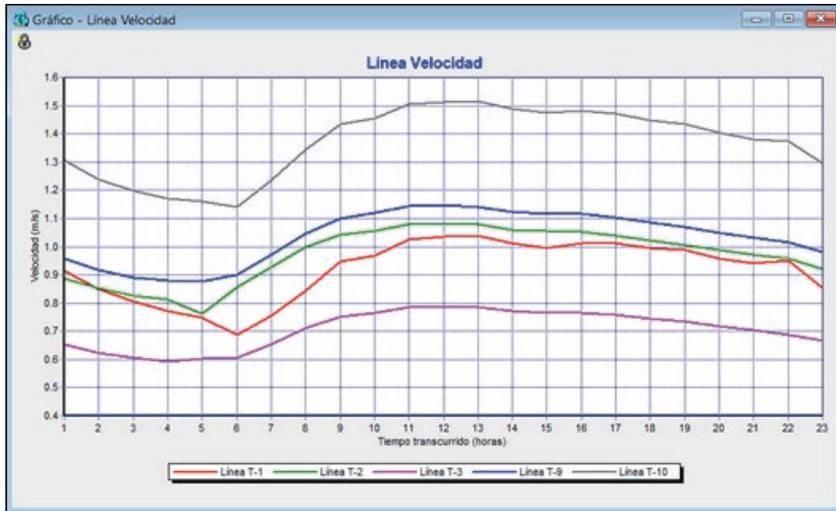


Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Después de editar el gráfico de evolución a visualizar, se hace clic en **Aceptar**, lo que permite visualizar la **Curva de Evolución Temporal** de velocidad en las tuberías seleccionadas (1, 2, 3, 9 y 10). Dicha curva se presenta en la Figura 61. Se pueden configurar las opciones de visualización de cada gráfico que se seleccione, dando clic derecho sobre el gráfico creado y variando las distintas opciones.

Figura 61

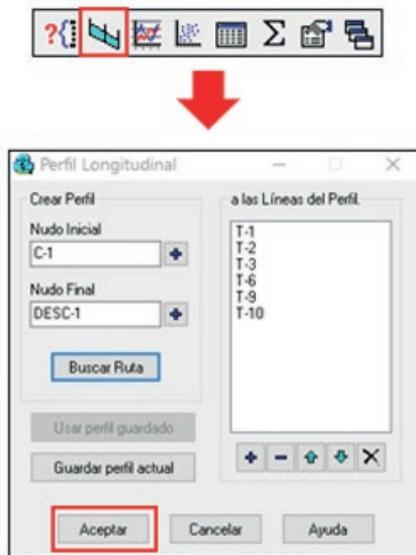
Curva de evolución temporal de velocidad en las tuberías 1, 2, 3, 9 y 10.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Además de este tipo de gráficos, EPASWMM permite generar perfiles de la red de flujo, en los cuales se puede observar de manera cómoda la eficiencia de los elementos del sistema. Esto se realiza haciendo clic en el ícono de **Perfil Longitudinal** que se encuentra en la barra de herramientas, lo cual abre una ventana de edición en la que se elegirá la ruta del perfil. Se selecciona tanto el nudo inicial como el final de la ruta en el plano del modelo, y posteriormente hacer clic en ícono + correspondiente en la ventana de edición. Seguidamente, se hace clic en **Buscar Ruta** y cuando el recorrido seleccionado se encuentre en el recuadro de las **a las Líneas del Perfil**, se selecciona **Aceptar** como paso final (Figura 62).

Figura 62
Perfil longitudinal, edición del perfil.



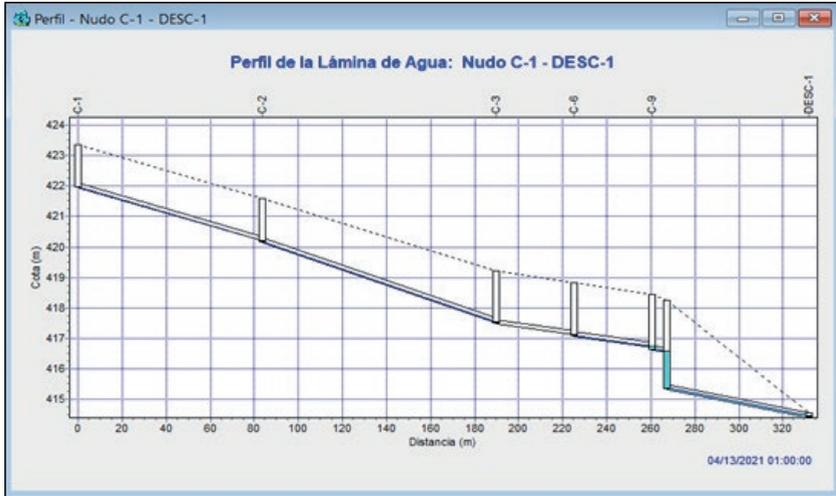
Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Una vez editado el perfil longitudinal a visualizar, este se puede observar con los tramos seleccionados anteriormente (1, 2, 3, 6, 9 y 10). Las opciones de visualización de cada gráfico se pueden configurar según se desee, dando clic derecho sobre el mismo y variando las distintas opciones disponibles; el perfil longitudinal final se puede apreciar en la Figura 63.

Por último, se mostrará en este ejercicio la forma de generar un informe de cálculo del modelo analizado. Desde la barra de menú se da clic en la pestaña **Informe** → **Estado** y se abrirá una ventana con todo el informe del modelo realizado. Para guardarlo en un archivo de texto, se da clic en el ícono de **Copiar** que se encuentra en la barra de herramientas y se selecciona la opción **Archivo**, guardándose con la extensión '*.txt', el cual se puede abrir con el **Bloc de Notas**. En la Figura 64 se observa el paso a paso descrito anteriormente y en la Tabla 15 se encuentra plasmada una sección del informe generado para el ejercicio.

Figura 63

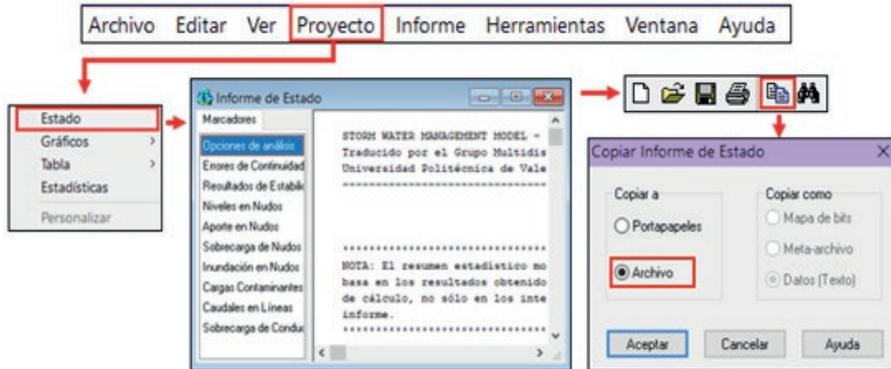
Perfil longitudinal de los tramos 1, 2, 3, 6, 9 y 10.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Figura 64

Paso a paso para guardar un reporte completo.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Tabla 15

Reporte de EPASWMM del sistema de alcantarillado del ejercicio 1.

STORM WATER MANAGEMENT MODEL - VERSION 5.0 vE (Build 5.0.018 vE)

Traducido por el Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos
Universidad Politécnica de Valencia

NOTA: El resumen estadístico mostrado en este informe se basa en los resultados obtenidos en todos los intervalos de cálculo, no sólo en los intervalos registrados en el informe.

Opciones de Análisis

Unidades de Caudal LPS

Modelos utilizados:

Lluvia/Esorrentía NO
Deshielo de Nieve NO
Flujo Subterráneo NO
Cálculo Hidráulico SI
Permitir Estancamiento NO
Calidad del Agua NO

Método de Cálculo Hidráulico KINWAVE

Fecha de Comienzo APR-13-2021 00:00:00

Fecha de Finalización APR-13-2021 23:00:00

Días Previos sin Lluvia 0.0

Report Time Step 01:00:00

Intervalo de Cálculo Hidráulico . 30.00 s

Errores de Continuidad

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

2.4. Ejercicio 2, aplicación de EPASWMM

Realizar la modelación hidráulica del sistema de alcantarillado de un bloque de residencias como se muestra en la Figura 65. Las propiedades generales del sistema se observan en la Tabla 16 y Tabla 17 con las características de las conexiones y conductos.

Tabla 16

Propiedades de las conexiones del sistema de alcantarillado, ejercicio 2.

Pozo (conexión)	Coordenada X	Coordenada Y	Cota de fondo (m)	Profundidad máxima (m)
N-1	844497.207	1365809.560	289.10	1.4
N-2	844570.205	1365823.320	288.30	1.6
N-3	844679.378	1365842.020	289.00	1.4
N-4	844561.230	1365864.010	288.10	1.6
N-5	844670.129	1365884.350	288.60	1.4
N-6	844499.600	1365853.240	288.80	1.4
N-7	844488.232	1365893.930	288.40	1.4
N-8	844552.508	1365906.370	287.50	1.9
N-9	844661.994	1365926.620	288.35	1.4
N-10	844543.878	1365949.570	287.20	2.0
N-11	844610.294	1365962.140	288.05	1.4
N-12	844478.085	1365935.970	288.14	1.4
N-13	844532.944	1366014.150	286.50	1.8
N-14	844538.774	1365989.370	286.70	1.8
N-15	844587.057	1365999.940	287.70	1.4
N-16	844513.631	1365984.450	287.50	1.4
N-17	844603.609	1366029.400	286.35	2.3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17

Propiedades de los conductos del sistema de alcantarillado, ejercicio 2

Conducto	Longitud (m)	Coefficiente Manning (n)	Desnivel de salida (m)	Diámetro interno (m)
T-1	74.28	0.009	0.1	0.182
T-2	110.76	0.009	-	0.182
T-3	41.67	0.009	-	0.182
T-4	62.56	0.009	-	0.182
T-5	110.78	0.009	-	0.182
T-6	43.25	0.009	-	0.182
T-7	111.34	0.009	-	0.182
T-8	65.47	0.009	-	0.182
T-9	44.05	0.009	-	0.182
T-10	67.60	0.009	-	0.182
T-11	67.18	0.009	-	0.182
T-12	40.13	0.009	-	0.182
T-13	49.43	0.009	-	0.182
T-14	25.62	0.009	-	0.182
T-15	25.46	0.009	-	0.182
T-16	72.29	0.009	-	0.200
T-17	48.84	0.009	-	0.182

Fuente: Elaboración propia

Figura 65

Esquema del sistema de alcantarillado, ejercicio 2.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Adicionalmente, el modelo hidráulico debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La sección transversal del conducto será de tipo circular.
- El modelo hidráulico a utilizar será el de onda dinámica.
- Desarrollar el modelo mediante áreas de aporte de subcuencas con pendiente de 0.5 %, área impermeable de 95 % y área impermeable sin aportes de 25 %.

- Se deberá incluir un componente “vertido” (V-1), el cual conectará con C-17.
- La infiltración de las subcuencas se trabajará con el método del número de curva.
- Incluir una estación pluviométrica con intervalo de lluvias de 5 minutos y valores de precipitación (mm) que se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18

Patrón de tiempo para el sistema de alcantarillado, ejercicio 2.

Tiempo	0:00	0:05	0:10	0:15	0:20	0:25	0:30	0:35	0:40	0:45	0:50
Precipitación	0.0	0.3	1.0	2.1	4.0	8.1	20.3	24.0	15.4	10.6	7.6
Tiempo	0:55	1:00	1:05	1:10	1:15	1:20	1:25	1:30	1:35	1:40	-
Precipitación	5.6	4.2	3.2	2.4	1.8	1.4	1.0	0.7	0.4	0.2	-

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

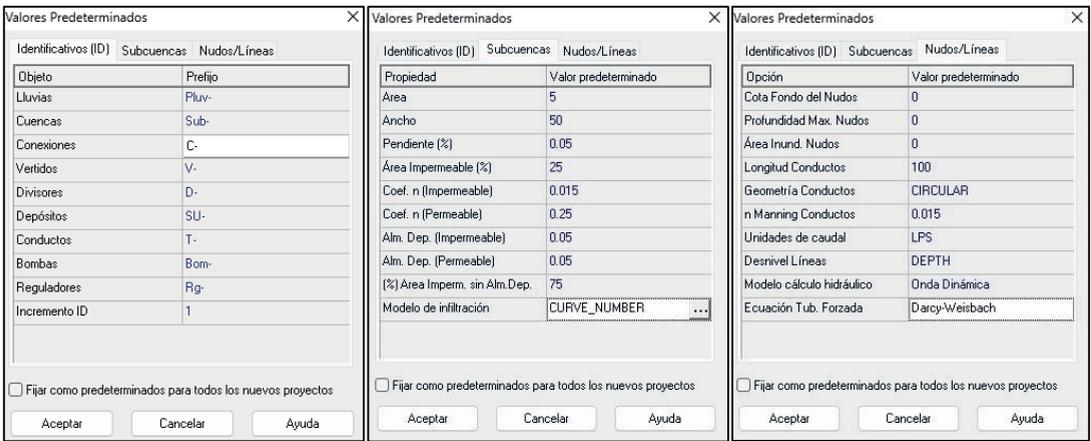
Al realizar la modelación para el ejercicio planteado, lo primero que se debe hacer es configurar el sistema de unidades, las opciones hidráulicas para el cálculo de pérdidas de energía y las demás configuraciones que se consideren necesarias en el modelo. Se explicará paso a paso la forma de construir el modelo y obtener los resultados más importantes del sistema de alcantarillado.

2.4.1. Configuraciones iniciales del ejercicio 2

Al tener el programa abierto y estar en el espacio de trabajo de la barra de menú, se selecciona con un clic la pestaña **Proyecto** → **Valores por Defecto** y se despliega un cuadro de **Valores Predeterminados** con tres secciones **Identificativos (ID)** → **Subcuencas** → **Nudos/Líneas** (Figura 66). En el espacio de **Identificativos (ID)** se incluirán los prefijos que llevarán los elementos del sistema como Lluvias (Pluv-), Cuencas (Sub-), Conexiones (C-), Vertidos (V-) y Conductos (T-), los cuales son los que se usarán para el sistema del ejercicio 2 de aplicación de EPASWMM. En la sección Subcuencas se

configurarán los parámetros de las **subcuencas** del sistema y se selecciona el método de infiltración con el método **Curve_Number**. En las opciones de la sección **Nudos/Líneas** se seleccionará la geometría de los conductos Circular, las unidades de caudal en LPS, el modelo de cálculo hidráulico de Onda Dinámica y la ecuación con la que se evaluará el sistema cuando se encuentre presurizado (Darcy-Weisbach), posteriormente se hace clic en aceptar.

Figura 66
Valores por defecto, identificadores (ID), subcuencas y nudos/líneas.

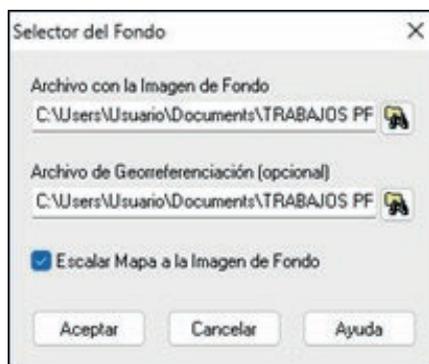


Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Al trazar el sistema de alcantarillado, la mejor práctica consiste en incorporar una imagen de fondo, de preferencia geo-referenciada, de modo que las dimensiones en el modelo sean proporcionales a las reales. Para cargar esta imagen, se utiliza la opción **Ver → Fondo → Cargar**, lo que desplegará el recuadro **Selector del Fondo**, seguidamente se selecciona el archivo de la imagen (*.jpg) y el archivo de georreferenciación (*.jgwx), y se hace clic en **Aceptar** (Figura 67).

Figura 67

Barra de menú y barra de herramientas del ejercicio 2.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

2.4.2. Componentes del sistema y sus propiedades del ejercicio 2

Se procede a incluir los componentes del modelo hidráulico y asignar las distintas propiedades descritas en la Tabla 16 y Tabla 17. Para este ejercicio, los componentes a emplear en la red son: 17 nudos de conexión que representarán los pozos de inspección del sistema y 17 tuberías que estarán unidas por los nudos, que crearán el trazado del sistema en 18 subcuencas, así como, un vertido donde se dispondrán los aportes totales del sistema y una estación pluviométrica. Los componentes se crean desde la barra de herramientas mostrada en la Figura 68.

Figura 68

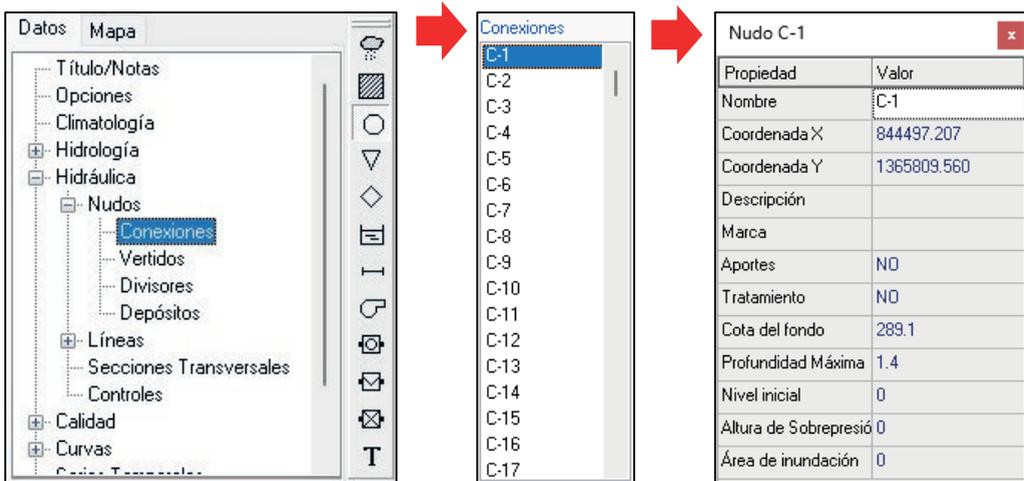
Barra de menú y barra de herramientas del ejercicio 2.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Configuración del nudo de conexión. Se da clic en el botón **Conexión** de la barra de herramientas mostrada en la Figura 68; la forma del cursor cambia y se observa que el botón seleccionado queda sombreado o sostenido. En el espacio de trabajo, se da clic en la ubicación correspondiente según como se describe en la Tabla 16, hasta obtener el listado de las 17 conexiones del sistema. Para configurar las propiedades del componente, se da doble clic en la conexión creada y se procede a modificar las propiedades de acuerdo con la necesidad de cada modelo hidráulico. Para el ejercicio que se está realizando, se configuran la **Cota Fondo** del pozo de inspección y la **Profundidad Máxima** del mismo, así como, los valores de las **Coordenadas X-Y** se generan de forma automática de acuerdo con el punto donde se ubicó el nudo y el **ID-Conexión** se genera según el orden de creación de las conexiones. En la Figura 69 se muestra cómo debe quedar la configuración de este elemento con un ejemplo en el Nudo C-1.

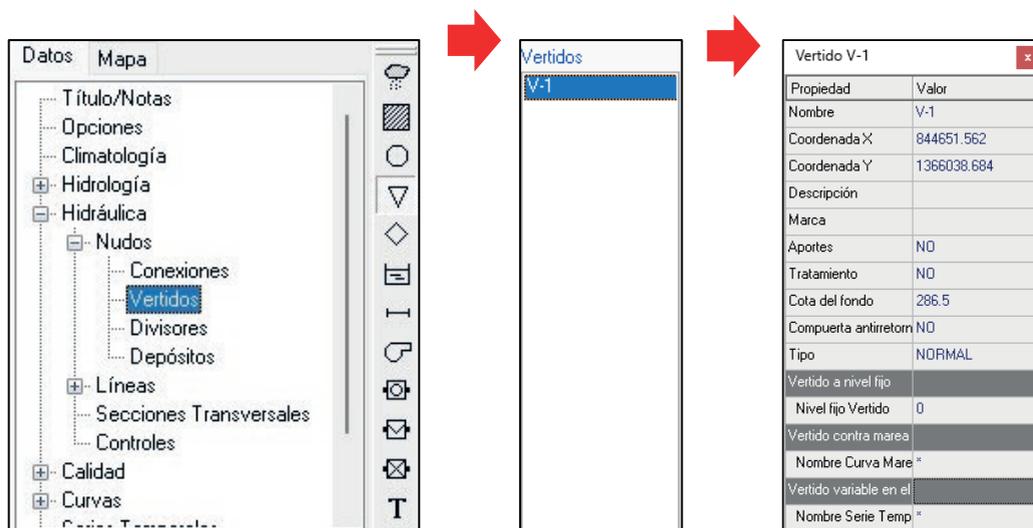
Figura 69
Configuración de conexiones del ejercicio 2.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Configuración del vertido. Se da clic en el botón **Vertido** de la barra de herramientas mostrada en la Figura 68; la forma del cursor cambia y se observa que el botón seleccionado queda sombreado o sostenido. En el espacio de trabajo, se da clic en el lugar correspondiente según la Figura 65. Para configurar las propiedades del componente, se da doble clic en la descarga o vertido creado y se procede a modificar la propiedad de **Cota Fondo** por 286.5 m.s.n.m.; los valores de las **Coordenadas X-Y** se generan de forma automática de acuerdo con la ubicación de la descarga, y el **ID-Vertido** se genera según el orden de creación de estos. En la Figura 70 se muestra cómo debe quedar la configuración de este elemento.

Figura 70
Configuración de vertido del ejercicio 2.

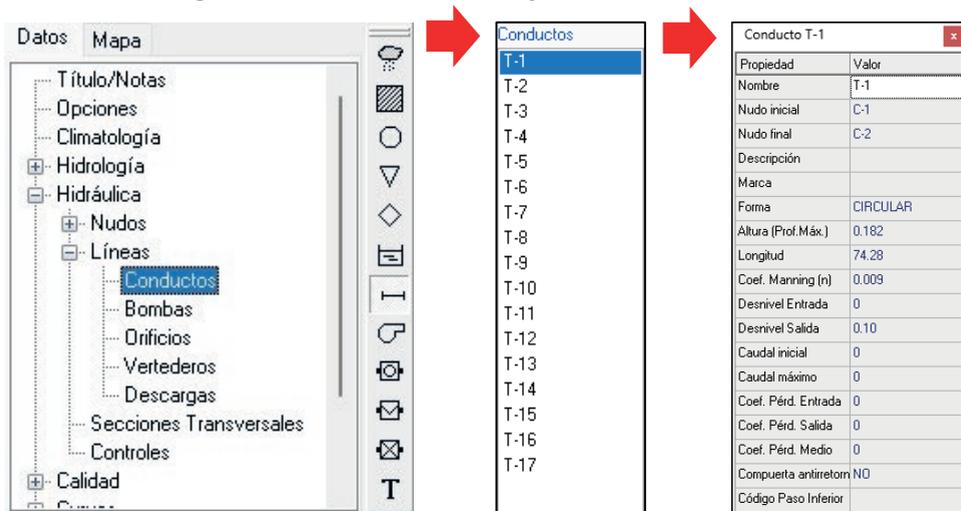


Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Configuración de tuberías. Se selecciona con un clic el ícono de **Tubería** de la barra de herramientas mostrada en la Figura 68. Se deben seleccionar las dos conexiones entre las que estarán la tubería; la primera conexión seleccionada será tomada por el programa como el punto inicial de la tubería y la segunda como el final.

Sobre cada una de las tuberías, se da doble clic y se procede a cambiar las propiedades de cada modelo hidráulico. En este ejercicio, se deben modificar en todas las tuberías la **Longitud y Altura (Prof. Máxima)** la cual se considera como el diámetro interno de la **Tubería**, **Coef. Manning (n)**, **Forma y Desnivel de Salida de la Tubería**. En la Figura 71 se muestra cómo debe quedar la configuración de este elemento con un ejemplo en el Conducto T-1.

Figura 71
Configuración de tuberías del ejercicio 2.



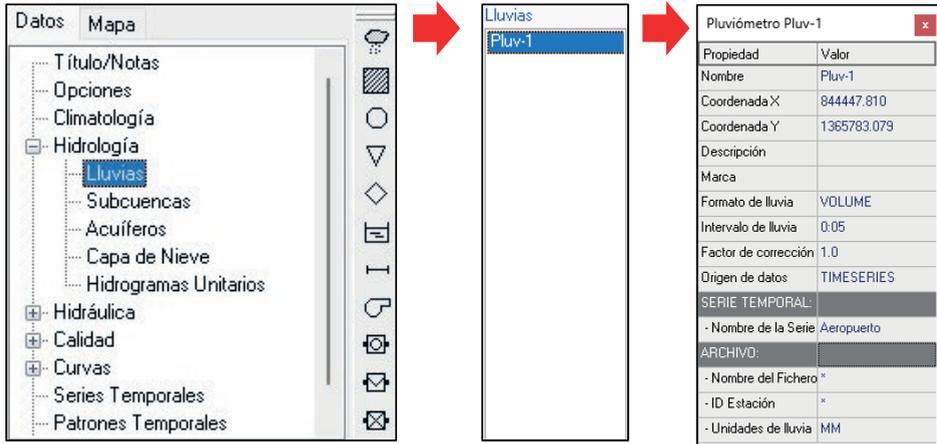
Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Configuración de la estación pluviométrica. Se da clic en el botón **Lluvias** de la barra de herramientas mostrada en la Figura 68; la forma del cursor cambia y se observa que el botón seleccionado queda sombreado o sostenido. En el espacio de trabajo, se da clic en el lugar correspondiente y se configura el **Intervalo de Lluvias** por 5 minutos, el **Factor de Corrección** por 1.0 y el **Formato de Lluvias** por Volume; los valores de las **Coordenadas X-Y** se generan de forma automática de acuerdo con la ubicación de la descarga, y el **ID-Lluvias** se genera según el orden de creación de estos. En la Figura 72 se muestra cómo debe quedar la configuración de este elemento.

En la opción **Nombre de la Serie** se hace doble clic y aparecerá una ventana como se muestra en la Figura 73. En esta ventana se debe colocar los valores de tiempo vs precipitación de la Tabla 18. A partir de esto se crea una **Serie Temporal**.

Figura 72

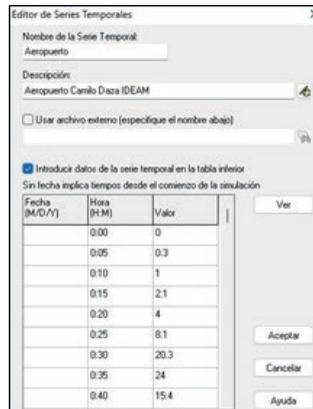
Configuración de la estación pluviométrica del ejercicio 2.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Figura 73

Parámetros de entrada para la precipitación del ejercicio 2.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Configuración de subcuencas. En la modelación de un sistema de drenaje urbano o alcantarillado pluvial que solo recibe aguas residuales (domésticas, industriales, comerciales e institucionales), no es necesario considerar las áreas de aportes. Sin embargo, en el caso específico de este ejercicio, es crucial incluirlas en el sistema. Se da clic en el botón **Subcuenca** de la barra de herramientas mostrada en la Figura 68; la forma del cursor cambia y se observa que el botón seleccionado queda sombreado o sostenido. Se procede a dibujar un polígono irregular dando clic en sus vértices como se muestra en la Figura 74. Repetir el proceso para cada área de aporte por nudos de conexión.

Figura 74

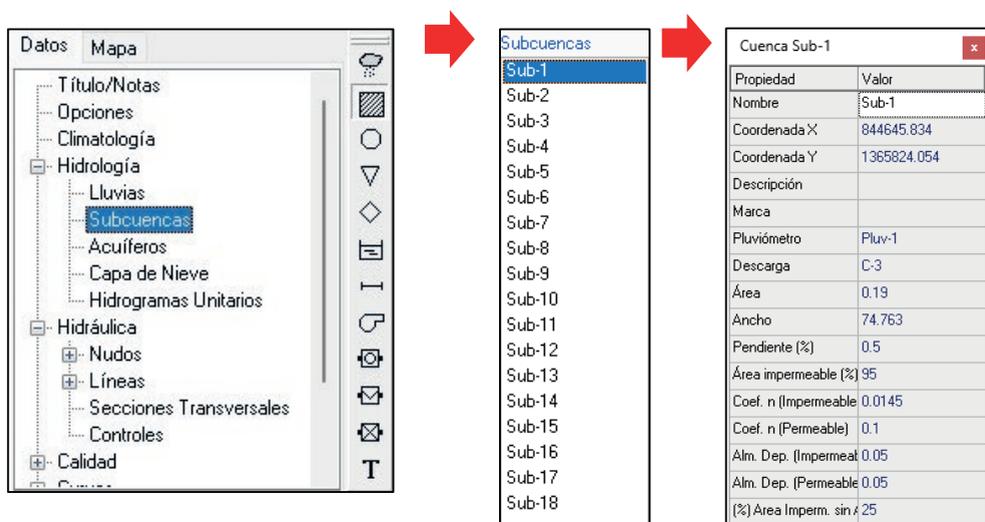
Esquema de las subcuencas del sistema de alcantarillado del ejercicio 2.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Para configurar las propiedades del componente, se da doble clic en la subcuenca creada y se configura la **Descarga** por el ID de la conexión más cercana, el **Pluviómetro** por el ID de la estación pluviométrica creada (Pluv-1) y el **Formato de Lluvias** por Volumen; los valores de las **Coordenadas X-Y** se generan de forma automática de acuerdo con la ubicación de la descarga, y el **ID-Subcuenca** se genera según el orden de creación de estos. En la Figura 75 se muestra cómo debe quedar la configuración de este elemento con un ejemplo en la subcuenca Sub-1.

Figura 75
Configuración de subcuencas del ejercicio 2.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

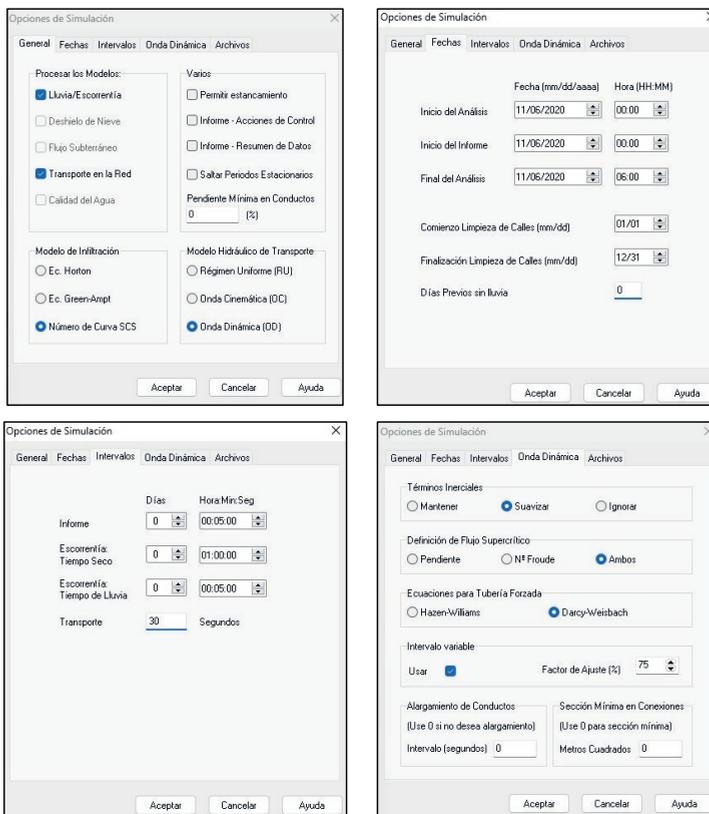
2.4.3. Configuraciones de tiempo y patrón temporal del ejercicio 2

En el ejercicio de aplicación, se configurarán las opciones de tiempo de acuerdo con la **Serie Temporal** del sistema, especificada en la Tabla 18. En el **Visor**, selecciona con un clic **Datos** → **Opciones** y se da doble clic en **General**; se selecciona un modelo de infiltración Número de **Curva SCS** y un modelo hidráulico de transporte **Onda Dinámica (OD)**. Seguidamente se hace clic en **Intervalos de tiempo**;

se modifica la pestaña de **Fechas** para que el análisis inicie en la hora 0:00 y termine en la hora 06:00 del mismo día. Posteriormente, se selecciona la pestaña **Intervalos**, donde se modifica el intervalo de tiempo en el cual se realiza la variación del caudal teniendo en cuenta el patrón temporal, que para este caso es de 1 hora en **Escorrentía: Tiempo Seco**, 5 minutos en **Escorrentía: Tiempo de Lluvias** y 30 segundos en **Transporte**. Finalmente, se hace clic en **Onda Dinámica** y se verifica la selección de la opción **Darcy-Weisbach**. En la Figura 76 se muestra esta configuración.

Figura 76

Opciones de simulación, general, fechas, intervalos y onda dinámica.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Con las configuraciones mostradas en los numerales 2.4.1, 2.4.2 y 2.4.3, se ha creado en su totalidad el modelo del ejercicio 2 de aplicación de EPASWMM, pero se pueden realizar más ajustes de acuerdo con lo requerido en cada modelo hidráulico en particular. Luego de realizar el modelo, se procede a llevar a cabo el análisis de los resultados arrojados por el software y se elabora el informe detallado del modelo.

2.4.4. Análisis, resultados, gráficos e informe del modelo hidráulico del ejercicio 2

Una vez creada y configurada la red de distribución, se procede a ejecutar el análisis del modelo hidráulico. En la barra de menú, se selecciona con un clic la pestaña **Proyecto** → **Calcular**, o en la barra de herramientas se da clic en el botón **Iniciar Análisis**. Seguidamente, deberá aparecer una ventana de diálogo **Estado de Inicio** que indica que “**La simulación se produjo con éxito**”, como se muestra en la Figura 77. En caso de que se produzca algún error de cálculo, la ventana indicará los errores encontrados en la simulación. Se da clic en **Aceptar** y se procede a revisar los resultados obtenidos.

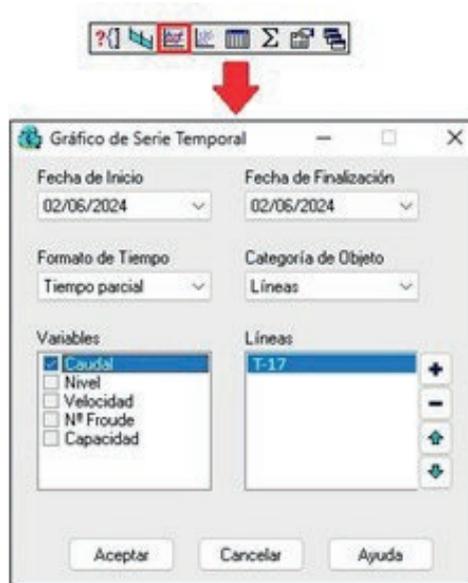
Figura 77
Inicial análisis y estado de inicio del ejercicio 2.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

EPASWMM permite el análisis de los resultados del modelo hidráulico creado mediante **Gráficos**, los cuales permiten observar de una manera más práctica el comportamiento del modelo y la variación de los parámetros importantes. Para crear un gráfico se hace clic en el botón **Gráficos de evolución o Gráfico de dispersión**, según se requiera, ubicado en la barra de herramientas. Esto abre una ventana que permite elegir las variables del gráfico. Para agregar las tuberías que queremos observar en el gráfico, mientras se tiene la ventana de edición abierta, se debe seleccionar la pestaña **Datos del Visor** y de la lista desplegable se selecciona la opción **Tuberías**. En este punto, se observará en modo de lista todas las tuberías creadas en el modelo hidráulico; se da clic en la tubería que se desee agregar y luego se da clic en el botón **Añadir** de la ventana de edición. En la Figura 78, se evidencia que, para este ejercicio, se seleccionó una **Curva de Evolución** que ilustra la variación del caudal a lo largo del día en la **Tubería 17** de la red creada.

Figura 78
Gráfico de evolución, edición del gráfico.

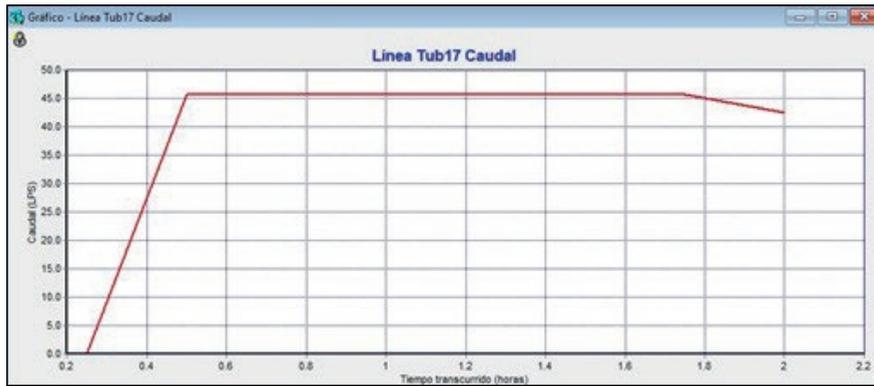


Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Después de editar el gráfico de evolución a visualizar, se hace clic en **Aceptar**, lo que permite visualizar la **Curva de Evolución Temporal** del caudal en la tubería seleccionadas (17). Dicha curva se presenta en la Figura 79. Se pueden configurar las opciones de visualización de cada gráfico que se seleccione, dando clic derecho sobre el gráfico creado y variando las distintas opciones.

Figura 79

Curva de evolución temporal del caudal en la tubería 17.



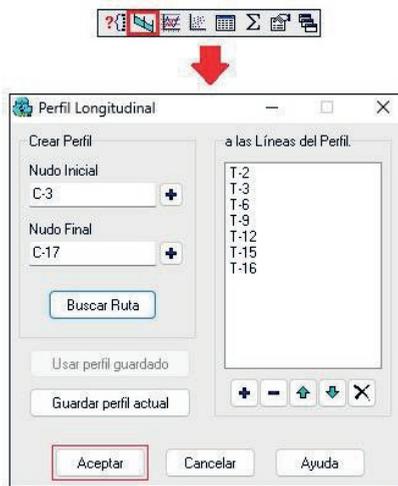
Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Además de este tipo de gráficos, EPASWMM permite generar perfiles de la red de flujo, en los cuales se puede observar de manera cómoda la eficiencia de los elementos del sistema. Esto se realiza haciendo clic en el ícono de **Perfil Longitudinal** que se encuentra en la barra de herramientas, lo cual abre una ventana de edición en la que se elegirá la ruta del perfil. Se selecciona tanto el nudo inicial como el final de la ruta central del sistema (2, 3, 6, 9, 12, 15, 16 y 17) en el plano del modelo, y posteriormente hacer clic en ícono + correspondiente en la ventana de edición. Seguidamente, se hace clic en **Buscar Ruta** y cuando el recorrido seleccionado se encuentre en el recuadro de **a las Líneas del Perfil**, se selecciona **Aceptar** como paso final (Figura 80).

Una vez editado el perfil longitudinal a visualizar, este se puede observar con los tramos seleccionados anteriormente (2, 3, 6, 9, 12, 15, 16 y 17). Las opciones de visualización de cada gráfico se pueden

configurar según se desee, dando clic derecho sobre el mismo y variando las distintas opciones disponibles; el perfil longitudinal final se puede apreciar en la Figura 81.

Figura 80
Perfil longitudinal, edición del perfil.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Figura 81
Perfil longitudinal de los tramos 1, 2, 3, 6, 9 y 10.



Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

Por último, se mostrará en este ejercicio la forma de generar un informe de cálculo del modelo analizado. Desde la barra de menú se da clic en la pestaña **Informe** → **Estado** y se abrirá una ventana con todo el informe del modelo realizado. Para guardarlo en un archivo de texto, se da clic en el ícono de **Copiar** que se encuentra en la barra de herramientas y se selecciona la opción **Archivo**, guardándose con la extensión *.txt, el cual se puede abrir con el **Bloc de notas**. En la Figura 64 del ejercicio 1 se observa el paso a paso descrito anteriormente y en la Tabla 19 se encuentra plasmada una sección del informe generado para el ejercicio.

Tabla 19

Reporte de EPASWMM del sistema de alcantarillado del ejercicio 2.

```

STORM WATER MANAGEMENT MODEL - VERSION 5.0 vE (Build 5.0.018 vE)
  Traducido por el Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos
  Universidad Politécnica de Valencia
*****
NOTA: El resumen estadístico mostrado en este informe se
basa en los resultados obtenidos en todos los intervalos
de cálculo, no sólo en los intervalos registrados en el
informe.
*****
*****
Opciones de Análisis
*****
Unidades de Caudal ..... LPS
Modelos utilizados:
  Lluvia/Esorrentía ..... SI
  Deshielo de Nieve ..... NO
  Flujo Subterráneo ..... NO
  Cálculo Hidráulico ..... SI
  Permitir Estancamiento ..... NO
  Calidad del Agua ..... NO

```

```

Método de Infiltración ..... CURVE_NUMBER
Método de Cálculo Hidráulico .... DYNWAVE
Fecha de Comienzo ..... FEB-06-2024 00:00:00
Fecha de Finalización ..... FEB-06-2024 02:00:00
Días Previos sin Lluvia ..... 0.0
Report Time Step ..... 00:15:00
Intervalo para Tiempo de Lluvia . 00:05:00
Intervalo para Tiempo Seco ..... 01:00:00
Intervalo de Cálculo Hidráulico . 30.00 s

```

Errores de Continuidad

*****	Volumen	Volumen
Cálculo Hidráulico	ha·m	10 ³ m ³
*****	-----	-----
Aporte Tiempo Seco	0.000	0.000
Aporte Tiempo Lluvia	0.465	4.648
Aporte Ag. Subterranea ...	0.000	0.000
Aportes dep. Lluvia	0.000	0.000
Aportes Externos	0.000	0.000
Descargas Externas	0.028	0.282
Descargas Internas	0.434	4.339
Perdidas Almacenamiento ..	0.000	0.000
Vol. Almacenado Inicial ..	0.000	0.000
Vol. Almacenado Final	0.003	0.027
% Error Continuidad	-0.005	

Fuente: Elaboración propia, captura tomada de EPASWMM.

2.5. Ejercicio propuesto

Con las propiedades de los diferentes elementos del sistema, que se especifican en la 20, realizar el modelo hidráulico de la red mostrada en la Figura 82.

Tabla 20

Propiedades de los elementos del sistema de alcantarillado, ejercicio propuesto

Pozo (conexión)	Cota terreno (m.s.n.m.)	Cota fondo (m.s.n.m.)	Profundidad de fondo (m)	Caudal (L/s)
C-1	357.80	356.40	1.40	1.50
C-2	357.00	355.52	1.48	4.46
C-3	355.90	354.36	1.54	1.58
C-4	356.80	355.40	1.42	2.9
C-5	355.00	353.39	1.61	-
DESC-1	353.30	352.79	0.51	-
Conducto	Longitud (m)	Coefficiente Manning (n)	Desnivel de salida (m)	Diámetro interno (m)
T-1	83.50	0.009	0.05	0.182
T-2	110.85	0.009	0.05	0.182
T-3	83.50	0.009	0.12	0.182
T-4	101.60	0.009	0.05	0.182
T-5	120.50	0.009	-	0.182

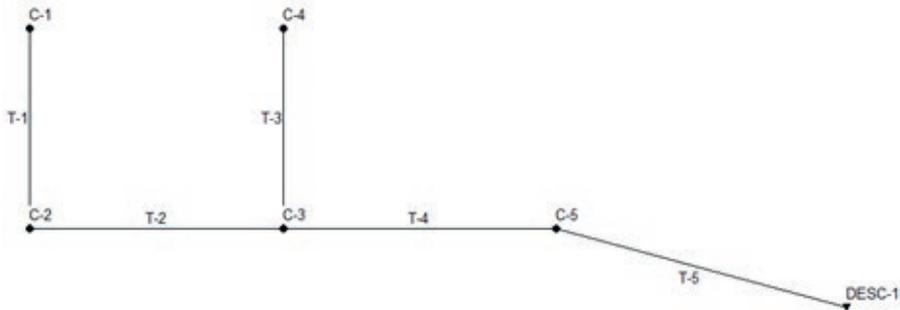
Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, el modelo hidráulico debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La sección transversal del conducto será de tipo circular.
- Incluir el patón de tiempo mostrado en la Tabla 13, el mismo empleado en el ejercicio 1 de aplicación de EPASWMM.
- En las opciones de tiempo, modelar para una duración total de 24 horas.

Figura 82

Esquema del sistema, ejercicio propuesto.



Fuente: Elaboración propia.

- Crear el modelo hidráulico del sistema y obtener el plano general del ejercicio.
- Verificar que los parámetros de velocidad, número de Froude y capacidad del colector, cumplan con los requeridos por la Resolución 0330 del 2017.
- Generar el plano de la red donde se observe la cota de fondo de las conexiones y las velocidades de las tuberías a la hora de máxima descarga.
- Generar la curva de evolución temporal de velocidad en las tuberías; para este gráfico comparar al menos 5 tuberías.
- Generar la curva de evolución temporal de capacidad de las tuberías; para este gráfico comparar al menos 5 tuberías
- Generar el perfil longitudinal de la ruta principal del sistema (1, 2, 4 y 5).
- Generar el reporte de informe completo del modelo y realizar comentarios al respecto.

2.6. Conclusiones

Como se mencionó anteriormente, el uso de este software en el área de la ingeniería ha generado avances considerables, lo que se traduce en beneficios para los ingenieros, ya que el tiempo de realización de cualquier tipo de diseño se ha reducido considerablemente, generando con ello una mayor productividad. EPASWMM es uno de los

programas más utilizados a nivel mundial, gracias a su fácil manejo y eficacia en los resultados, el cual se ha convertido en una herramienta muy potente y de gran aplicación en la ingeniería hidráulica, civil y ambiental, al ofrecer una serie de herramientas que permiten realizar un análisis más detallado de todos los elementos de un modelo. Esto facilita la toma de decisiones acertadas para dar soluciones adecuadas a las necesidades de una población.

En esta unidad, se entregaron las herramientas básicas para el análisis y diseño hidráulico de sistemas de alcantarillado mediante el uso de EPASWMM, un software desarrollado por la EPA-USA, que ofrece múltiples opciones de análisis y una visualización gráfica de la simulación hidráulica, tanto para caudales instantáneos como para caudales en periodos de tiempo extendido. Se realizó unos ejercicios de diseño que permitió identificar y conocer las opciones de cálculo del software estudiado, así como las diferentes formas de presentación de resultados. Los ejercicios abarcaron varios análisis importantes que se pueden realizar con este programa, pero es necesario llevar a cabo más ejercicios de aplicación para adquirir un conocimiento más profundo de los diferentes casos de modelación que se pueden desarrollar en EPASWMM.

2.7. Material de estudio

A continuación se presenta material complementario que puede ser consultado en la web y que permite ampliar el conocimiento relacionado con la temática explicada en este capítulo, se presentan opciones al lector que permiten profundizar en los temas vistos y ahondar en la práctica del modelado hidráulico. En la Tabla 21 se encuentran los links de consulta del material complementario.

Tabla 21
Material complementario del capítulo.

Temas que abordan	Referencia bibliográfica	Ubicación (el enlace web o la base de datos)
Modelación hidráulica con EPASWMM.	EPA-USA (2005)	http://www.instaqua.upv.es/EPASWMM/descargas/M anual_EPASWMM5vE.pdf
	Anta <i>et al.</i> (2019)	https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/23619/Introduccion_calculo_redes_saneamiento_EPASWMM_2019.pdf?sequence=7&isAllowed=y

Fuente: Elaboración propia.

Los ejercicios resueltos se encuentran como material de apoyo adicional en un repositorio de GitHub y pueden ser descargados en el siguiente enlace:

<https://github.com/Carlos-bonillag/Ejercicios-BOOK-Int-MOD-HID>

CAPÍTULO III

Diseño hidráulico de canales
con HEC-RAS

CAPÍTULO III

Diseño hidráulico de canales con HEC-RAS

3.1. Introducción

La modelación hidráulica de las redes de un sistema de acueducto El transporte del agua constituye una etapa crucial en los sistemas de drenaje urbano. Además de emplear tuberías, como se mencionó previamente, también es posible utilizar canales abiertos, los cuales ofrecen la ventaja de transportar caudales mayores gracias a su geometría. Estos canales se diseñan con base en diferentes criterios hidráulicos para asegurar su correcto funcionamiento, aprovechando las condiciones topográficas del terreno.

Al igual que con otros componentes de las redes de alcantarillado, el cálculo hidráulico de los canales puede abordarse de diversas formas. Sin embargo, en la actualidad, con el objetivo de agilizar y optimizar tanto el diseño como la evaluación, se ha generalizado el uso de software especializado en todo el mundo. Este módulo se centrará en el manejo de dos programas de uso libre ampliamente reconocidos a nivel global: HEC-RAS y HCANALES. Estos programas permiten la modelación en diversos escenarios, teniendo en cuenta condiciones reales de diversas estructuras, incluyendo canales hidráulicos, cajones pluviales, puentes, entre otras.

3.2. Hidráulica de canales

La hidráulica de canales se refiere a la rama que aborda los conceptos y procedimientos teóricos para el diseño de conductos abiertos destinados al transporte de agua de un punto a otro. Estos conductos operan bajo flujo libre, dado que, al ser abiertos, no permiten la

presurización. Pueden ser naturales, como su nombre indica, siendo cursos de agua creados por la naturaleza, o artificiales, construidos por el ser humano para diversas funciones como irrigación, abastecimiento, gestión hídrica entre cuencas hidrográficas, transporte y evacuación de aguas pluviales, entre otras (Chow, 1999).

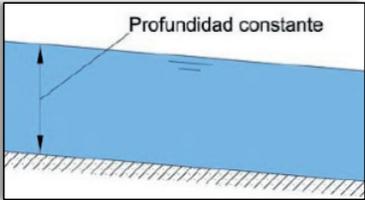
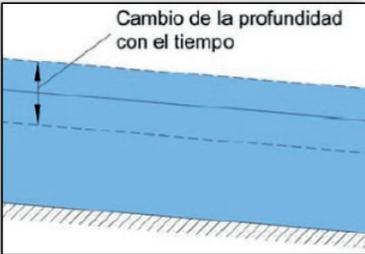
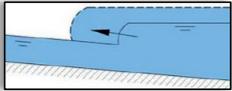
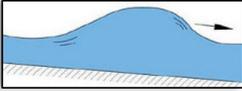
El cálculo que comprende este tipo de elementos es mucho más complejo que en las tuberías a presión. A diferencia de estas, que tienen condiciones controladas establecidas con el paso de los años, el flujo en canales no es permanente. Esto quiere decir que la profundidad de flujo puede presentar variaciones con respecto al espacio y al tiempo. Además, hay una gran variedad de revestimientos, lo que implica un sin número de rugosidades superficiales y, a su vez, una mayor incertidumbre en la elección de estos. Factores como la pendiente de fondo del canal, el caudal, la lámina de agua y la pendiente de la superficie libre son dependientes entre sí. Lo anterior permite confirmar la complejidad que requiere el manejo del flujo en este tipo de elementos. Hasta el momento, dichos cálculos se realizan por medio de métodos empíricos, los cuales, con suficiente precaución, pueden generar resultados muy similares a los reales (Cadavid, 2006)

3.2.1. Flujo en canales abiertos

El flujo más frecuente en modelaciones de canales abiertos y el más usado en HEC-RAS es el flujo uniforme permanente, donde el tirante hidráulico no cambia para cierto intervalo de tiempo (tiempo de retorno). Además, el flujo también puede clasificarse dependiendo de su estado, lo que hace referencia a las variables que lo afectan, entre las que se encuentra la velocidad (fuerzas inerciales), la viscosidad (fuerzas viscosas) y la gravedad de este (fuerzas gravitacionales). Dichas características se explican de manera breve a continuación, ya que son conceptos previos necesarios, los cuales debieron ser abordados en la mecánica de fluidos, hidráulica y redes de servicio (Cadavid, 2006):

Teniendo en cuenta características como el tiempo y el espacio, los canales abiertos pueden presentar distintos tipos de flujo, de los cuales se da una breve definición en la Tabla 22.

Tabla 22
Tipos de flujo, canales abiertos.

Tipos de flujo en canales abiertos	
En función del tiempo	En función del espacio
<p>Flujo permanente</p> <p>La profundidad del flujo no cambia con respecto al tiempo; observado en canales con condiciones controladas, como canales de riego.</p> <p>$Q = \text{Constante} \rightarrow Y_1 = Y_2$</p> 	<p>Flujo uniforme</p> <p>Los parámetros como tirante, velocidad, área, etc., no varían respecto al espacio (no cambia la sección).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Uniforme permanente. La profundidad del flujo no varía durante el tiempo evaluado (muy usado en hidráulica de canales). • Uniforme no permanente. La profundidad del flujo varía de un tiempo a otro, permaneciendo paralelo al fondo del canal (poco probable).
<p>Flujo no permanente</p> <p>Las condiciones del flujo cambian respecto al tiempo; se observan en canales de aguas lluvias, donde la intensidad de esta varía en un intervalo de tiempo.</p> <p>$Q = \text{Variable} \rightarrow Y_1 \neq Y_2$</p> 	<p>Flujo variado</p> <p>Los parámetros varían respecto al espacio, ya que se presenta un cambio de sección.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Flujo gradualmente variado. La profundidad del flujo cambia gradualmente a lo largo del canal (curva de remanso).  <ul style="list-style-type: none"> • Flujo rápidamente variado. La profundidad del flujo cambia abruptamente en distancias relativamente cortas (resalto hidráulico). 

Fuente: Elaboración propia adaptado de Rocha (2010).

Viscosidad. Teniendo en cuenta la ecuación del número de Reynolds (Ecuación 9), en los canales los flujos se clasifican de la siguiente manera: cuando el $RE < 500$ el flujo es laminar; si el $RE < 2000$, este es turbulento; y si el RE se encuentra en el intervalo $500 < RE < 2000$, es un flujo en transición (Chow, 1999).

$$RE = \frac{VR}{\nu}$$

Ecuación 9

Donde;

RE= número de Reynolds.

ν = viscosidad cinemática [m²/s].

V= velocidad media del flujo [m/s].

R= radio hidráulico [m].

Gravedad. Un flujo se puede clasificar como flujo subcrítico ($F < 1$), crítico ($F = 1$) o supercrítico ($F > 1$), teniendo en cuenta el número de Froude dado por la Ecuación 10.

$$F = \frac{V}{\sqrt{gY}}$$

Ecuación 10

Donde;

F= número de Froude.

V= velocidad media del flujo [m/s].

g= gravedad [m/s²].

Y= tirante hidráulico [m].

Velocidad. Debido a la presencia de la superficie libre, la rugosidad y la asimetría en la sección de un canal, estos no cuentan con una velocidad uniforme en toda su sección. Por lo tanto, la velocidad que se encuentra al fondo del conducto no es la misma que se puede encontrar en su superficie libre o en las paredes del canal. Esta característica representa una complejidad en el cálculo de la energía del conduc-

to, ya que el teorema de Bernoulli se estableció para una línea de corriente. Teniendo en cuenta lo anterior, cada una de estas en una sección determinada tendría una velocidad diferente y, por ende, una energía cinética variable, lo cual no es viable en el diseño de un canal, ya que en esto se tiende a trabajar con la totalidad del escurrimiento y no con líneas de corriente aisladas.

Con el fin de dar solución a lo mencionado anteriormente y extender el teorema de Bernoulli para la totalidad de la sección transversal, se calcula una velocidad media, y se aplica un factor de corrección por la distribución no uniforme de las velocidades, denominado coeficiente de Coriolis. Este, según la literatura, varía entre $1.03 < \alpha < 1.36$ para canales prismáticos. En el caso de canales con pendiente baja y condiciones controladas, se puede tomar como 1 (French, 1988).

Cuando se trabaja con flujo libre, como es el caso de los canales abiertos, es necesario tener en cuenta la ley de la conservación de la energía o el teorema de Bernoulli (Ecuación 11), ya que los programas de modelación de canales, como lo es HEC-RAS, suelen trabajar bajo estos principios (Chow, 1999).

$$\alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + Y_1 = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + Y_2 + h_f \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde;

α = coeficiente de Coriolis.

V= velocidad media del flujo [m/s].

g= gravedad [m/s²].

Y= tirante hidráulico [m].

Z= nivel de referencia [m].

3.2.2. Propiedades geométricas de los canales abiertos

Los canales al igual que otros elementos hidráulicos cuentan con propiedades físico-hidráulicas, que dependen en gran parte de la geometría de la sección transversal y longitudinal del conducto, entre dichas propiedades se encuentran las mencionadas a continuación:

Área mojada [A]. Hace referencia al área de la sección transversal ocupada por el caudal y se expresa en metros cuadrados (m²).

Perímetro mojado [P]. Tramo de la superficie de la sección transversal que está en contacto con el caudal presente; esta propiedad al ser una longitud se expresa en metros (m).

Tirante hidráulico [Y]. La profundidad del flujo en la sección transversal se mide desde el fondo del canal hasta la superficie libre del agua, y al igual que el perímetro mojado, se expresa en metros (m).

Espejo de agua [T]. Ancho de la sección transversal del canal medido a nivel de la lámina de agua o la superficie libre; se expresa en metros (m).

Profundidad hidráulica [D]. Relación existente entre el área hidráulica de la sección y el espejo de agua, la cual se puede tomar como un promedio de las posibles profundidades de la sección (Ecuación 12).

$$D = \frac{A}{T} \quad \text{Ecuación 12}$$

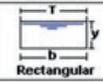
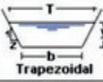
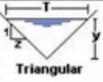
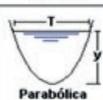
Radio hidráulico [R]. Relación existente entre el área hidráulica de la sección y el perímetro mojado, que determina la resistencia a fluir en base a la geometría de la sección transversal (Ecuación 13).

$$R = \frac{A}{P} \quad \text{Ecuación 13}$$

En el caso de canales prismáticos con secciones comunes, las ecuaciones de los elementos mencionados anteriormente ya se encuentran definidas en función de las variables presentes en cada una de las geometrías, y se pueden observar en la Figura 83.

Figura 83

Elementos geométricos de un canal según su sección transversal.

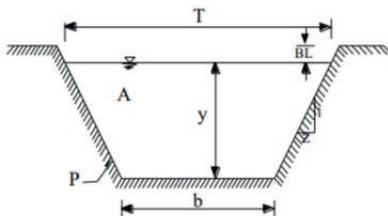
Tipo de sección	Área A (m ²)	Perímetro mojado P (m)	Radio hidráulico Rh (m)	Espejo de agua T (m)
 Rectangular	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b
 Trapezoidal	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$
 Triangular	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$
 Circular	$\frac{(\theta - \text{sen}\theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta})\frac{D}{4}$	$(\frac{\text{sen}\theta}{2})D$ ó $\frac{2\sqrt{y(D-y)}}{2\sqrt{y(D-y)}}$
 Parabólica	$2/3 Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T^2+8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

Fuente: (Chow, 1999).

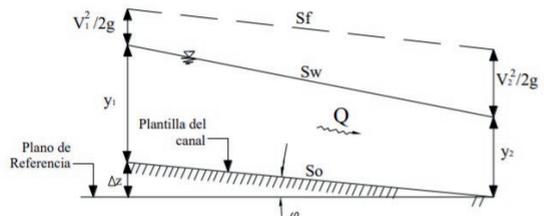
Si se hace referencia a la sección longitudinal del canal, es posible observar propiedades como la línea de energía (Ecuación 11) y la pendiente longitudinal del canal (Saldarriaga, 2016). En la Figura 84 se presentan las propiedades de las secciones transversal y longitudinal de un canal.

Figura 84

Secciones de un canal.



SECCIÓN TRANSVERSAL



SECCIÓN LONGITUDINAL

Fuente: (Chow, 1999).

3.2.3. Metodología de diseño de canales

Para el correcto diseño de un canal abierto, es necesaria una planificación óptima en la que se garantice el transporte del caudal captado hasta su destino final. En el caso de canales pluviales, se deben considerar las áreas de drenaje de la zona de estudio y las propiedades que interfieren en el proyecto, como el tipo de terreno y la infiltración de este, entre otras. Además, se deberá tener en cuenta la teoría mencionada anteriormente para la correcta realización del diseño hidráulico de dicha estructura (MINVIVIENDA, 2017):

Estudios previos. Análisis de información existente que permita identificar estructuras existentes, posibles zonas de descarga para el caudal captado, áreas a drenar, etc.

Reconocimiento de campo. Visita de terreno al sitio del proyecto donde se realizará el diseño, con el fin de entender y visualizar las posibilidades reales de ejecución de las alternativas propuestas en el diseño hidráulico.

Estudios complementarios. Es necesario conocer la topografía y las características geotécnicas del suelo donde se proyecta la estructura, además de conocer el estudio de predios para poder planificar y proyectar las alternativas que puedan satisfacer los requerimientos de la población y que se puedan construir de acuerdo con el diseño hidráulico realizado.

Selección de alternativas. En todo diseño hidráulico, se hace necesario realizar un planteamiento de posibles alternativas que den solución a los requerimientos de cada proyecto y realizar una evaluación que permita identificar la mejor de ellas, en base a criterios de sostenibilidad a partir de la evaluación de los aspectos económicos, técnicos, ambientales y sociales de la zona.

Trazado a nivel de detalle. Se debe realizar un trazado geométrico que tenga en cuenta el estudio topográfico, donde se especifique la ubicación de la estructura planteada y el catastro de redes para evitar interferencias con los demás sistemas (agua potable, redes de gas, eléctricas, entre otros), garantizando las distancias mínimas entre

estas, establecidas en la normativa.

Desarrollo del modelo hidráulico. Se debe desarrollar un modelo hidráulico que tenga en cuenta los aportes de caudal; para esto, es necesario realizar el cálculo hidráulico para flujo uniforme permanente y, en algunos casos, para flujo no permanente. El modelo hidráulico debe ser resuelto de acuerdo con lo mencionado en los apartados 3.2.2 y 3.2.3 de esta unidad, con el fin de poder definir las obras necesarias, precisando parámetros tales como la sección, caudales, velocidades, especificaciones de materiales y demás aspectos técnicos que permitan asegurar el funcionamiento adecuado de los sistemas.

3.2.4. Software para el diseño de canales

El diseño de un canal abierto tiene como fin determinar el dimensionamiento una sección transversal eficaz, capaz de transportar el caudal requerido hacia su destino final, satisfaciendo a su vez los parámetros establecidos por la normativa existente; en la actualidad existen diversos softwares destinados a la modelación de canales abiertos de todo tipo, estos softwares tienen como objetivo principal reducir los tiempos de cálculo y diseño.

Existen varios softwares reconocidos y de gran aceptación en el diseño en canales abiertos, los cuales pueden ser comerciales como FLOWMASTER o de acceso libre como el HEC-RAS, desarrollado por el Centro de ingeniería hidrológica (CEIWR-HEC), y HCANALES. Este último es de los más usados a nivel mundial gracias a su accesibilidad, confiabilidad y fácil manejo, por lo cual, serán tratados en este módulo.

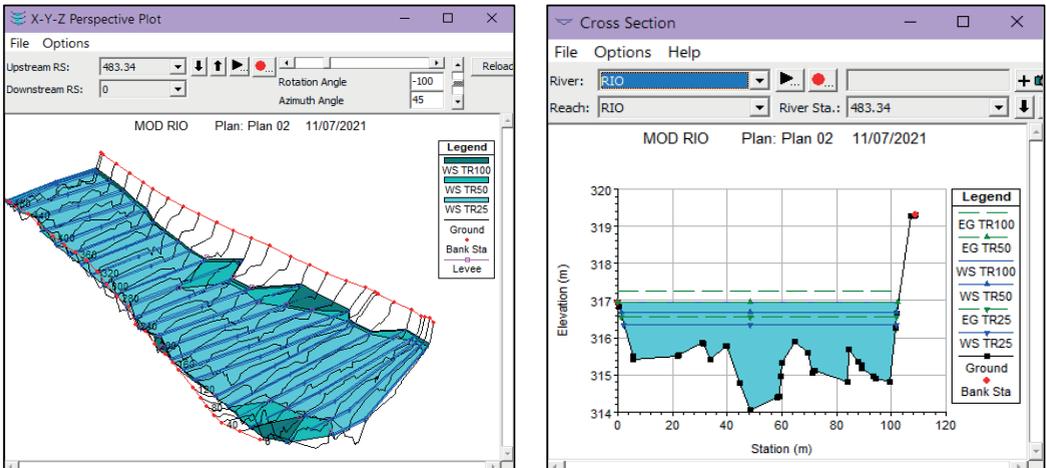
3.3. Introducción a HEC-RAS

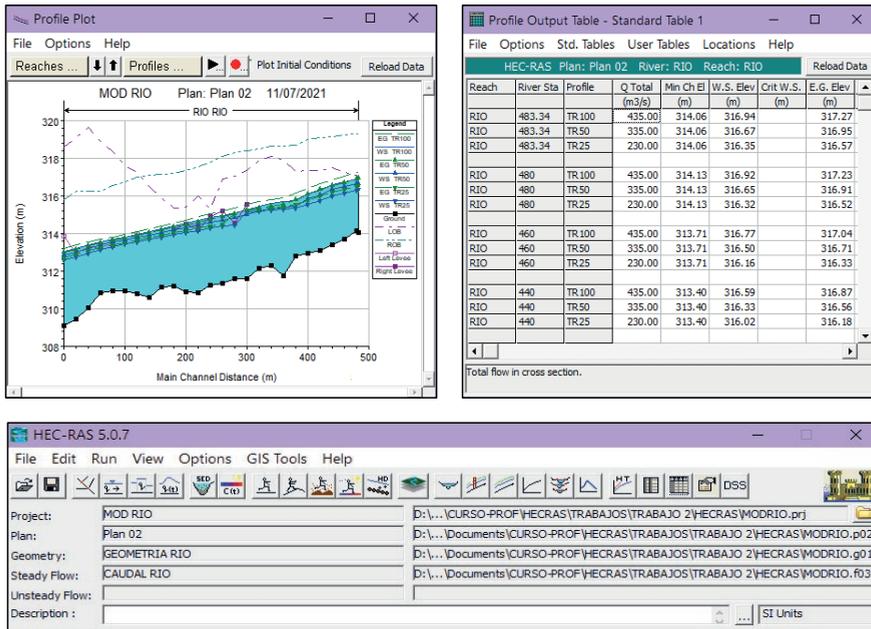
Este software, desarrollado por el CEIWR-HEC, ofrece una solución gratuita para la creación de modelos unidimensionales con flujo permanente y bidimensionales con flujo no permanente, tanto en cauces naturales como artificiales. Además, permite el análisis de la calidad del agua y la modelación del transporte de sedimentos. Su principal utilidad se centra en la evaluación de canales hidráulicos y en estudios de inundabilidad y riesgo. A continuación, se destacan las

características sobresalientes del programa HEC-RAS para iniciar con su aplicación.

Entorno de trabajo en HEC-RAS. Este programa tiene una interfaz gráfica intuitiva, diseñada para facilitar su comprensión y uso. Mantiene una estructura conceptual clara basada en archivos de datos y resultados definidos, centrándose en aspectos fundamentales de los estudios hidráulicos, como la geometría del cauce y condiciones de flujo. HEC-RAS ofrece resultados visuales a través de perfiles, secciones transversales y representaciones en 3D, que permiten observar el comportamiento del flujo para diferentes períodos de retorno. Además, proporciona resultados numéricos que resumen cada uno de los parámetros importantes para la modelación en tablas, lo que permite verificar los resultados gráficos mencionados anteriormente. Es crucial tener en cuenta que HEC-RAS puede realizar una variedad de cálculos diferentes, ya que permite la combinación de diversas geometrías y condiciones de flujo, posibilitando su análisis tanto de manera conjunta como por separado. En la Figura 85 se presentan algunos ejemplos visuales del entorno de trabajo en HEC-RAS.

Figura 85
Entorno de trabajo de HEC-RAS.

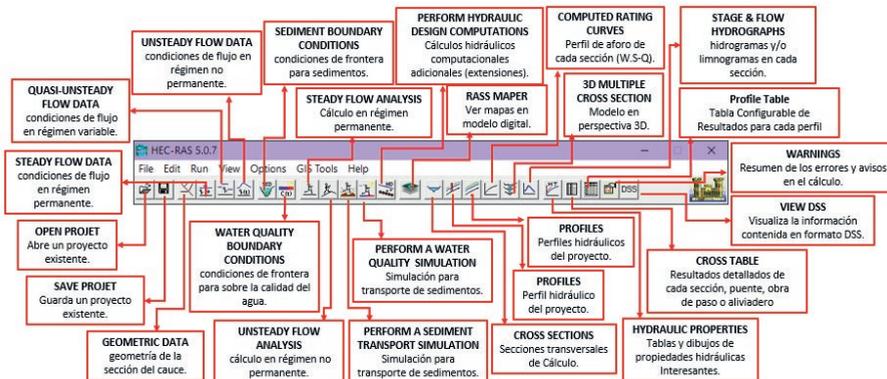




Fuente: Autores, tomado de HEC-RAS.

En la Figura 86, se explican brevemente los componentes del programa, los cuales serán empleados en los ejercicios de este módulo:

Figura 86
Componentes de HEC-RAS.

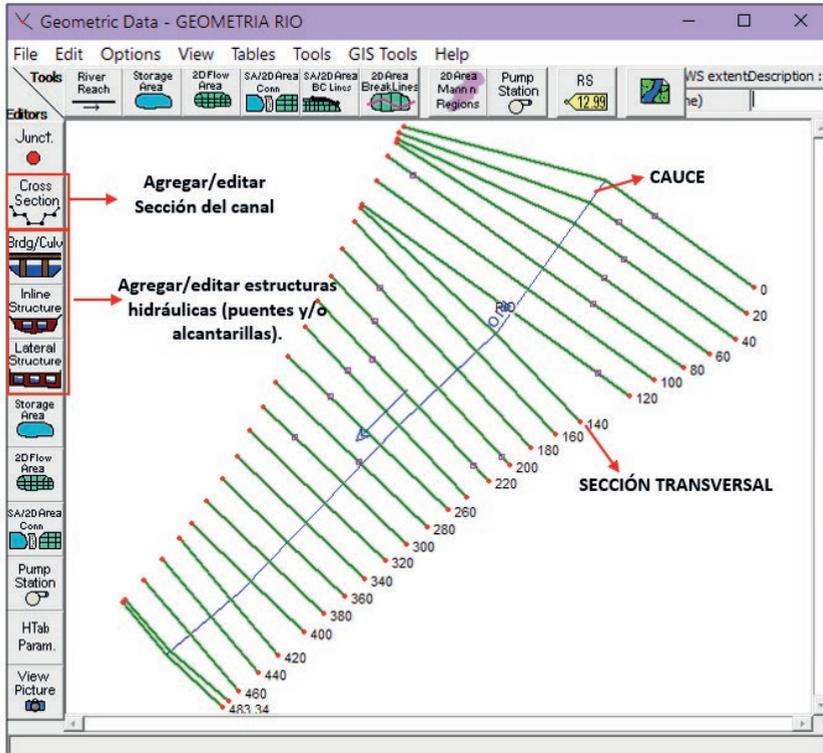


Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Software complementario. Con el propósito de lograr modelaciones más precisas y eficientes, HEC-RAS es compatible con varios programas. En este módulo, se requerirá el uso de CIVIL3D, un software comercial desarrollado por AUTODESK, diseñado específicamente para el análisis y diseño de proyectos viales, hidráulicos y sanitarios, entre otras funciones. CIVIL3D permite el modelado de superficies a partir de elementos topográficos y la generación de perfiles y secciones transversales. Estas últimas se pueden importar directamente a HEC-RAS como parte de la geometría del cauce a modelar. Esto es especialmente útil en el caso de canales naturales, que suelen tener secciones irregulares, haciendo tedioso el ingreso manual de dichas secciones. Aunque CIVIL3D es un software comercial, ofrece una licencia estudiantil que permite su uso gratuito y puede descargarse directamente desde el sitio web oficial de AUTODESK (<https://latinoamerica.autodesk.com/products/civil-3d/overview>).

Creación de la geometría y el cauce (CROSS SECTION). Como se ilustra en la Figura 86, este componente permite la creación o edición del cauce y la geometría del canal. Esta tarea puede realizarse tanto de forma manual como mediante la importación de datos desde software como CIVIL-3D, especialmente útil cuando se trabaja con cauces de secciones irregulares, como suele ser el caso de los canales naturales. Además, como se muestra en la Figura 87, esta herramienta incluye componentes específicos para la creación de elementos hidráulicos, como puentes, alcantarillas o cajones pluviales, entre otros. Esto facilita el análisis de las variaciones en el comportamiento del flujo cuando se integran estas estructuras en el modelo.

Figura 87
Herramientas del componente Geometric Data.

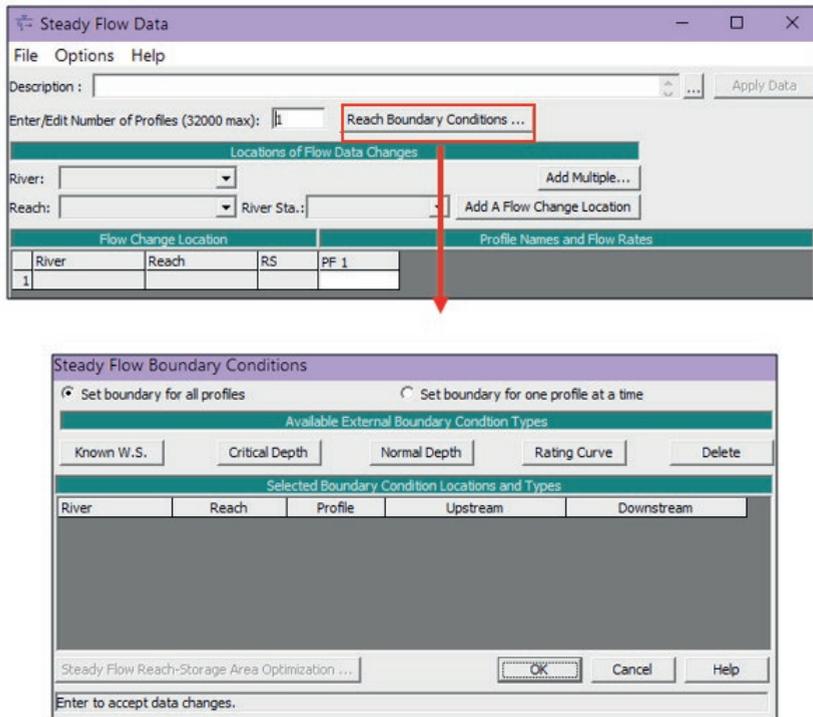


Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Creación del flujo y sus condiciones (STEADY FLOW DATA). Además de crear la geometría del canal, es crucial establecer las condiciones del flujo. Esto implica determinar si el flujo será permanente (Figura 88), no permanente o variable. También es necesario definir la cantidad de periodos de retorno a evaluar y el caudal transportado en cada uno de ellos, junto con el régimen del flujo según la pendiente del canal.

Figura 88

Componente Steady Flow Data, flujo permanente.

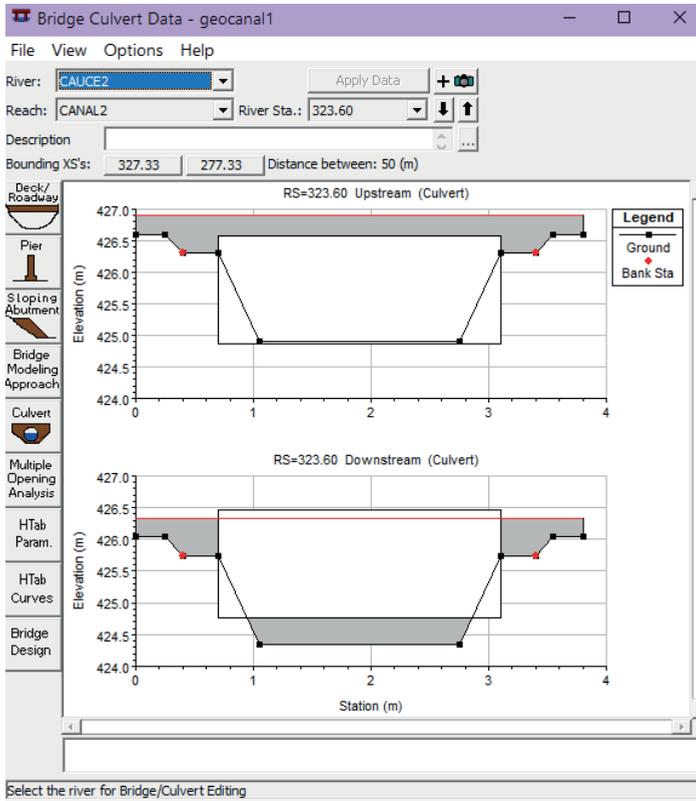


Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Obras hidráulicas puentes (bridges), conducciones (culverts)

Es frecuente encontrar diversos elementos hidráulicos, como puentes, alcantarillas y viaductos, en cauces tanto naturales como artificiales. Por ello, resulta crucial realizar un análisis de estas estructuras en el diseño hidráulico. HEC-RAS ofrece herramientas que facilitan la incorporación de tales obras hidráulicas en su editor de geometrías. Esto permite analizar la eficacia de las estructuras cuando el cauce transporta un caudal específico, como se muestra en la Figura 89.

Figura 89
Sección de un Box-culvert, Herramienta Bridge Culvert Data.

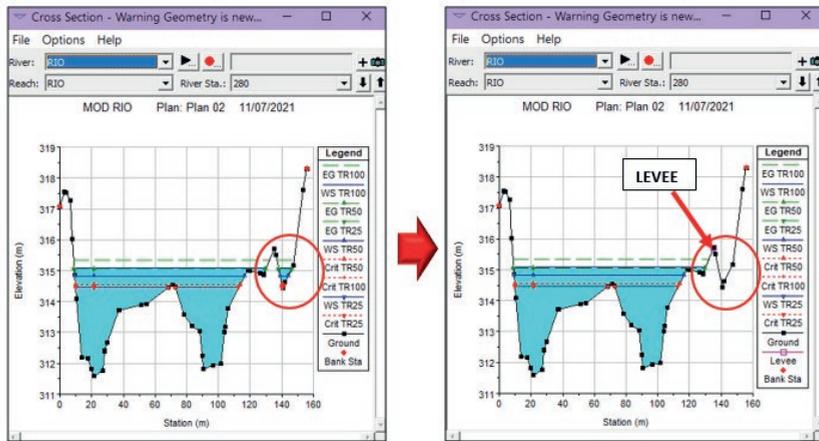


Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Diques (levees), áreas inefectivas de flujo

Cuando una sección transversal presenta múltiples depresiones, HEC-RAS tiende a llenarlas primero durante la modelación, lo cual no refleja completamente la realidad hidráulica. Por esta razón, los **Levees** (diques longitudinales) cumplen la función de indicar una vía preferente de desagüe y evitan el paso del flujo hacia estas depresiones hasta que se alcance la cota en la que se encuentran situados los **Levees**, como se ilustra en la Figura 90.

Figura 90
Ubicación de Levees.



Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

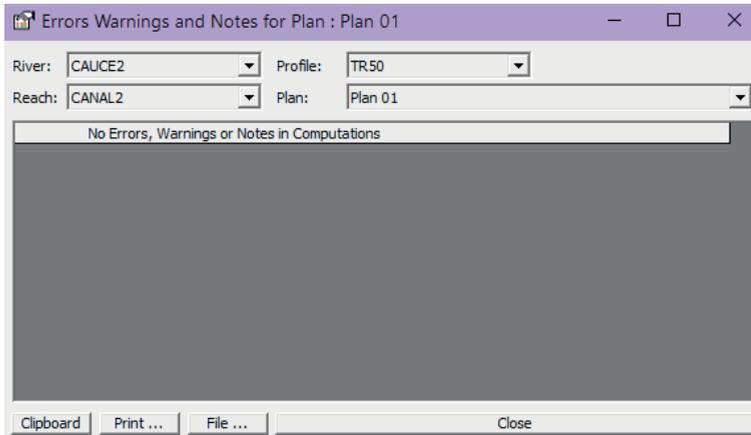
Errores y notas más frecuentes

HEC-RAS, al igual que cualquier otro software, debe utilizarse correctamente para llevar a cabo una modelación exitosa. Por lo tanto, es crucial prestar atención a los mensajes generados en el resumen de la modelación, ya que pueden indicar posibles errores que podrían impedir el análisis. Estos mensajes suelen clasificarse en errores, que surgen cuando hay algún obstáculo que impide completar la modelación, y avisos, que señalan incidencias que requieren revisión, ya sea para efectuar correcciones o para confirmar que no afecten el resultado final.

Los mensajes de aviso suelen aparecer por diversas razones, como secciones demasiado espaciadas, diferencias significativas de cotas entre secciones, cota inicial de la profundidad del flujo incorrecta considerando el régimen especificado, datos incorrectos en las secciones transversales, entre otros. Estos avisos se pueden encontrar en la herramienta **Warnings** del programa, una vez completada la modelación, como se muestra en la Figura 91 (Nanía y Molero, 2007).

Figura 91

Herramienta Warnings del programa HEC-RAS.



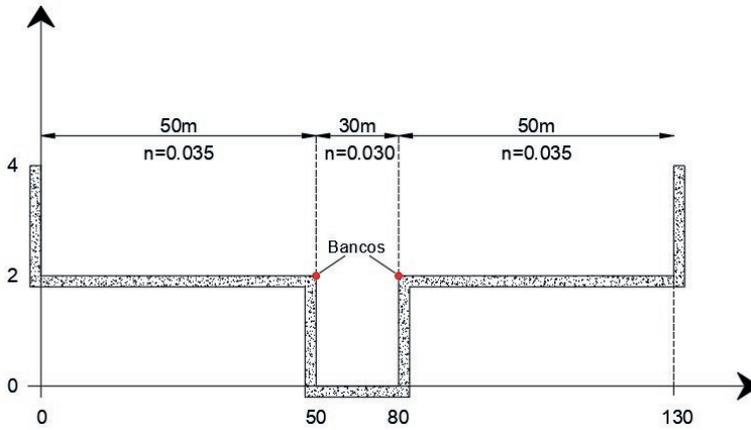
Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

3.4. Ejercicio 1, aplicación de HEC-RAS

Realizar la modelación del canal hidráulico presentado en la Figura 92, con el fin de determinar si la sección proyectada tiene la capacidad de transportar el caudal requerido, cumpliendo con los parámetros establecidos por la normativa.

El canal cuenta con una pendiente longitudinal de 5 % y una longitud de 1000 m y deberá transportar un caudal de 525 m³/s para un periodo de retorno de 20 años, adicional a esto contará con las secciones mostradas en la Tabla 23. Para la realización del modelo hidráulico es necesario tener en cuenta que las secciones transversales deben estar interpoladas cada 10 m.

Figura 92
Sección transversal de canal, ejercicio 1.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23
Datos de las secciones del ejercicio 1

Sección	Longitud del tramo aguas abajo			Coeficiente de Manning (n)		
	LOB	Channel	ROB	LOB	Channel	ROB
K1+000	250	250	250	0.35	0.30	0.35
K0+750	250	250	250	0.35	0.30	0.35
K0+500	250	250	250	0.35	0.30	0.35
K0+250	250	250	250	0.35	0.30	0.35
K0+000	0.00	0.00	0.00	0.35	0.30	0.35

Fuente: Elaboración propia.

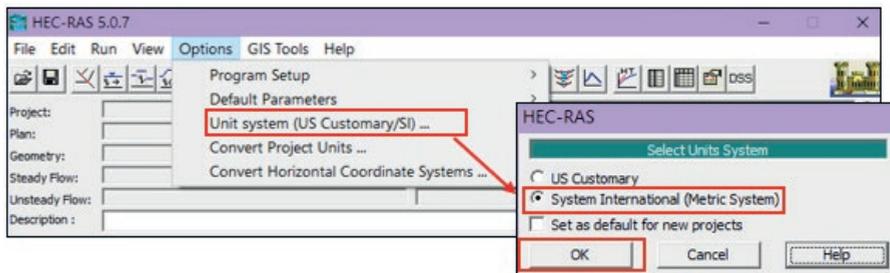
3.4.1. Configuraciones iniciales

Como primera medida, es importante tener en cuenta que HEC-RAS utiliza el punto como separador decimal. Por lo tanto, es necesario configurar el equipo de esta manera para evitar dificultades durante la

modelación. Además, es fundamental definir el sistema de unidades en el que se trabajará, generalmente el Sistema Internacional (SI). Esto se configura ando clic en la pestaña **Options** → **Unit System (US Customary/SI)**, posteriormente se abrirá una ventana donde se debe seleccionar el sistema de unidades a utilizar, en este caso como ya se mencionó que será el **System Internacional (Metric System)**. La vista del menú indicado se muestra en la Figura 93.

Figura 93

Configuración del sistema de unidades del ejercicio 1.

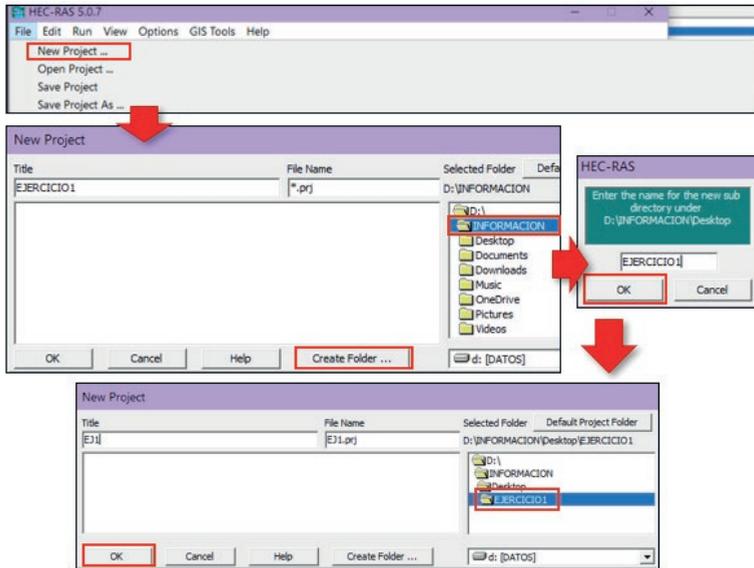


Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Antes de iniciar el trabajo en el modelo, es esencial crear o ubicar la carpeta de guardado. Esto asegura que todos los archivos generados por el modelo estén juntos, facilitando su apertura posterior sin problemas. Para hacer esto, se hace clic en **File** → **New Project**, luego se selecciona en el apartado derecho la ubicación de la carpeta, y una vez seleccionada se da clic en el botón **Create Folder**, se ingresa el nombre en la ventana flotante y se da clic en **OK**. Seguidamente, se agrega el título que tendrá el proyecto y nuevamente se da clic en el botón **OK**. El procedimiento indicado se muestra en la Figura 94.

Una vez realizadas las configuraciones iniciales del modelo, se procede a incluir cada uno de los elementos del canal.

Figura 94
Creación de nuevo proyecto, ejercicio 1.



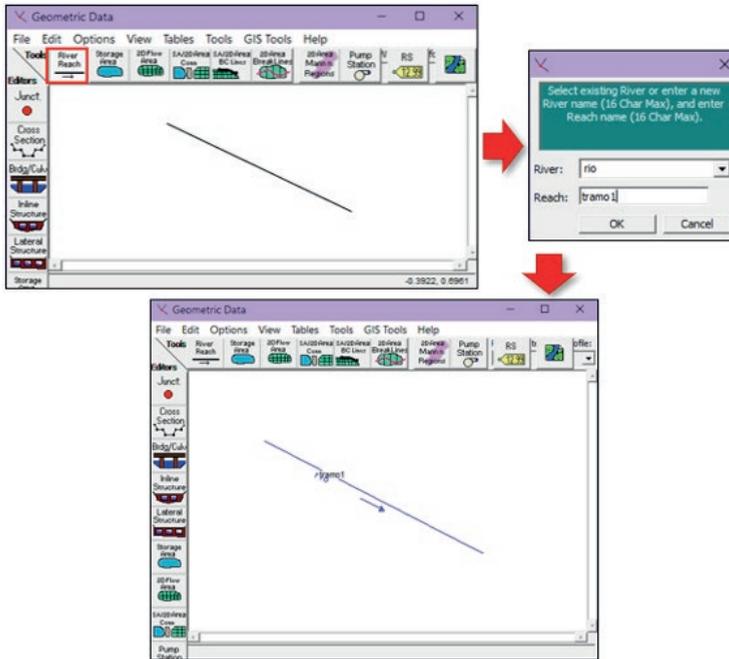
Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Una vez realizadas las configuraciones iniciales del modelo, se procede a incluir cada uno de los elementos del canal.

3.4.2. Geometría del canal

En este paso, se marcarán tanto el cauce del canal como las secciones necesarias para el ejercicio. Para ello, comienza haciendo clic en el ícono **Geometric Data** y luego traza el cauce seleccionando la herramienta **River Reach** en la ventana de geometría. El cursor cambiará de forma a un lápiz con el cual marcará el recorrido del cauce dando clic sobre el inicio de este. Para marcar el final del cauce se da doble clic sobre el punto donde se requiera, posteriormente aparecerá una ventana flotante donde se debe introducir tanto el nombre del río como el tramo en las casillas correspondientes, se da clic en **OK** y por último se debe guardar la geometría en **File** → **Save Geometric Data** (Figura 95).

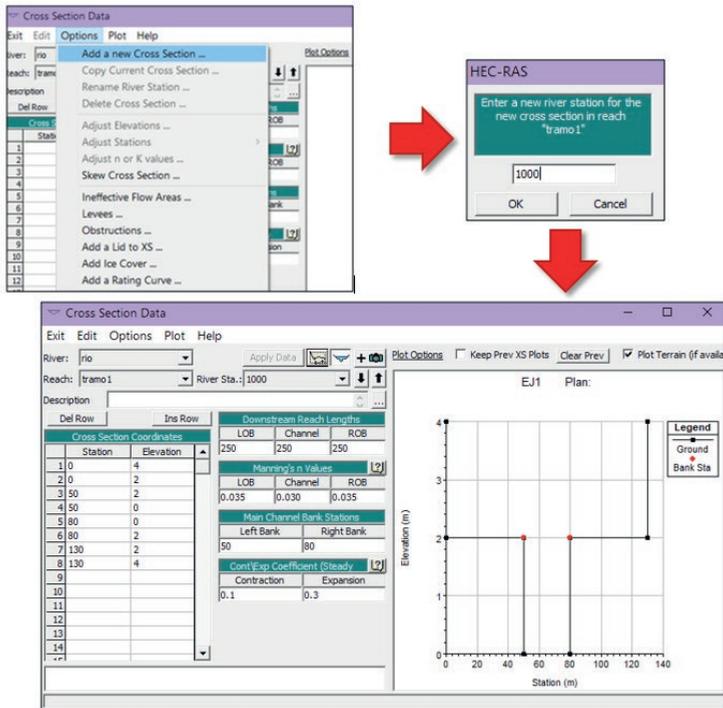
Figura 95
Creación del cauce, ejercicio 1.



Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Después de crear el cauce del canal, procede a agregar cada una de las secciones necesarias haciendo clic en la herramienta **Cross Section**. Para crear una sección, se selecciona la pestaña **Options** → **Add a New Cross Section**. Esto abrirá una ventana flotante donde se debe ingresar la estación o abscisa donde se ubicará la sección. Recuerda que el sentido del cauce va de la abscisa mayor a la menor. Agregar las coordenadas de la geometría en el apartado **Cross Section Coordinates**, teniendo en cuenta el eje horizontal que representa la estación de cada vértice del canal y el eje vertical que indica la elevación de estos. Además, se ingresa la longitud del tramo aguas abajo, la rugosidad y los bancos del cauce principal y de las planicies de inundación, como se indica en la Tabla 23. Finalmente, se presiona **Apply Data** para que el software registre los datos ingresados. Estos pasos se muestran en la Figura 96.

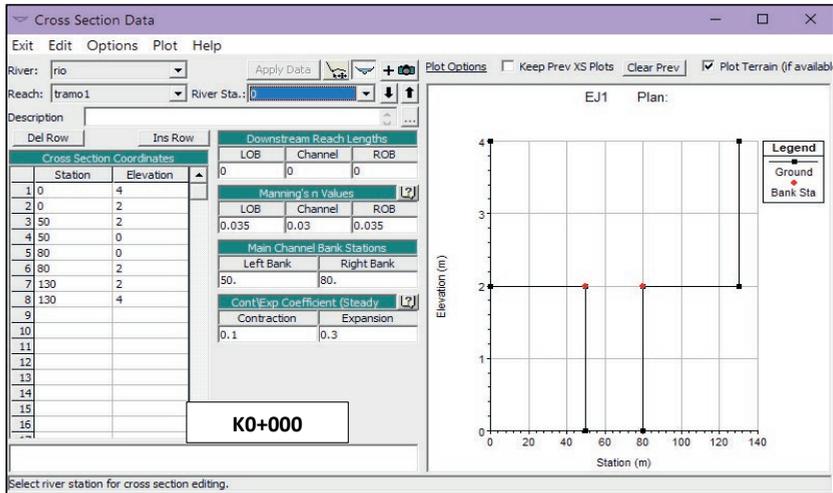
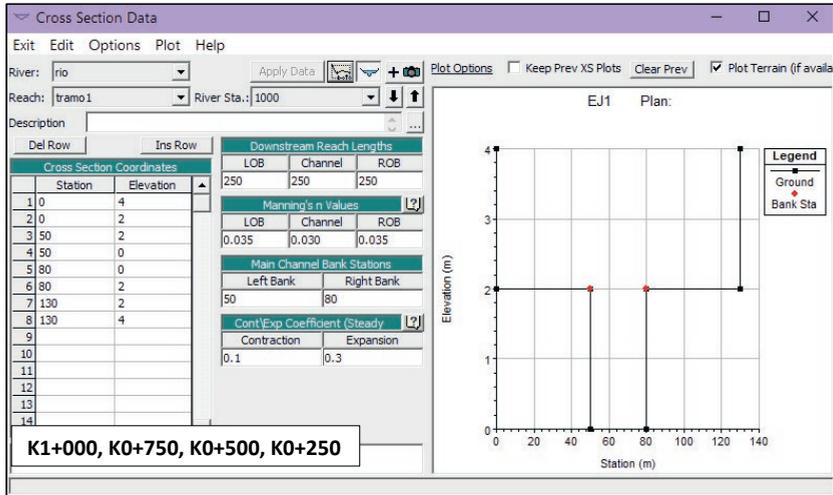
Figura 96
Creación de la sección K1+000, ejercicio 1.



Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Luego de creada la primera sección, las siguientes se pueden crear copiando la anterior en la pestaña **Options** → **Copy Current Cross Section** y colocando en la ventana flotante el abscisado de la nueva sección. Este paso fue realizado con cada una de las secciones requeridas por el ejercicio, las cuales se pueden observar en la Figura 97.

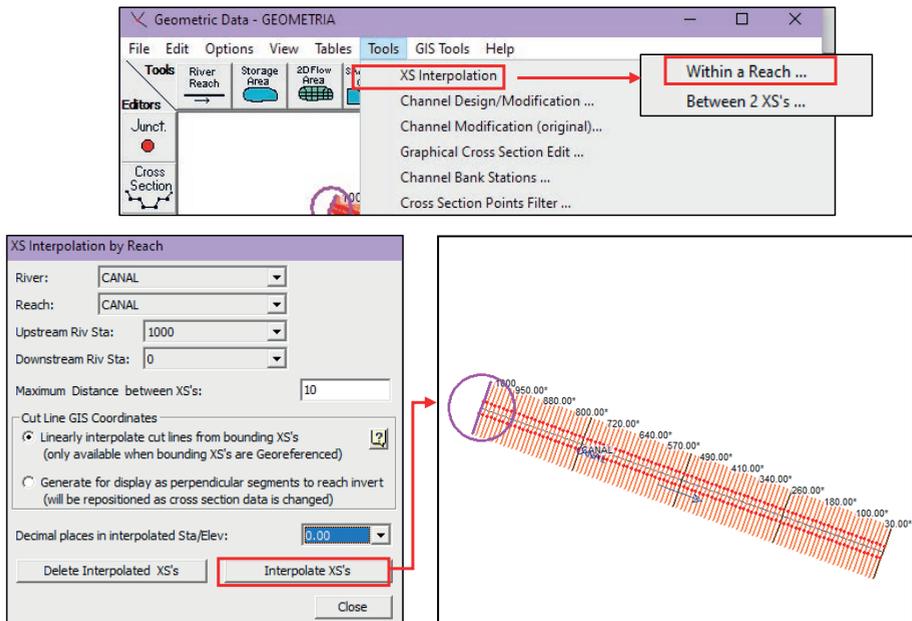
Figura 97
Datos de las secciones requeridas del ejercicio 1.



Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Después de crear las secciones, es evidente que el cauce ya las delimita según el abscisado establecido. Sin embargo, para lograr una precisión adecuada en la modelación, HEC-RAS requiere un mayor número de secciones. Por este motivo, el programa facilita la interpolación entre las secciones existentes de manera rápida y sencilla. Para llevar a cabo esta interpolación, dentro de la ventana de trabajo de **Geometric Data**, se hace clic en la pestaña **Tools** → **XS Interpolation** → **Within a Reach**. Se abrirá una ventana donde se debe seleccionar el río, el tramo y las secciones entre las cuales deseas interpolar, tanto aguas arriba como aguas abajo. Además, establece la máxima distancia entre cada una de las secciones interpoladas, que en este caso el ejercicio especifica que debe ser de 10m. Este proceso se ilustra gráficamente en la Figura 98.

Figura 98
Interpolación de secciones transversales del ejercicio 1.



Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

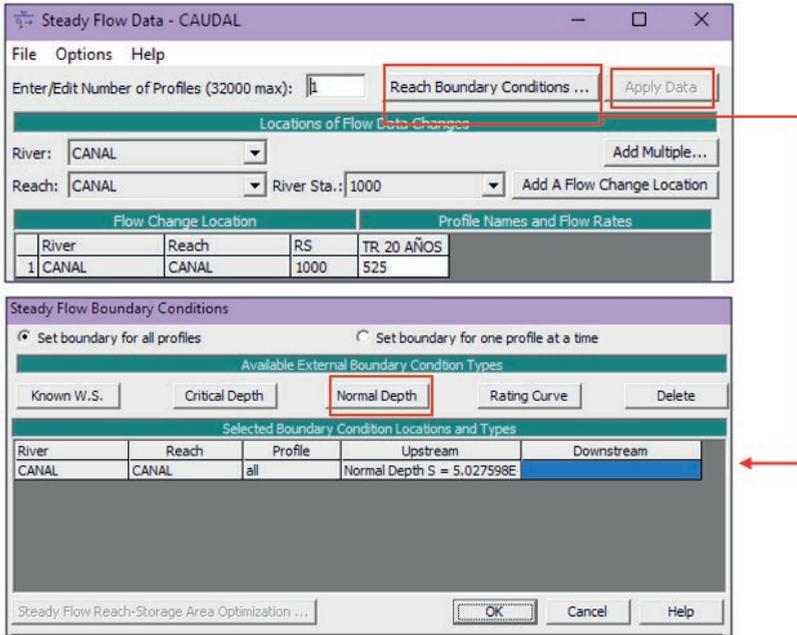
Una vez realizados los pasos anteriores, es necesario guardar la geometría creada. Esto se realiza seleccionando la pestaña **File** → **Save Geometric Data**.

3.4.3. Flujo del canal

Se procede a introducir los datos hidráulicos mencionados en el ejercicio; para empezar, se selecciona el componente **Steady Flow Data**, el cual abrirá una ventana flotante en la que se deberá introducir el caudal, dependiendo del periodo de retorno a modelar. Este último el programa lo toma como un perfil por defecto, por lo cual, se debe cambiar el nombre dependiendo del periodo de retorno, con el fin de tener claro más adelante sobre cuál es el que se está observando y evitar confusiones.

Se establece cuantos perfiles o periodos de retorno se modelarán (para este caso el ejercicio requiere 1), esto se realiza en la casilla **Enter/Edit Number of Profiles**, donde se introducen la cantidad de perfiles a modelar. Se edita el nombre del perfil en la seleccionando la ventana flotante que aparecerá, seleccionando **Options** → **Edit Profile Names** y posteriormente se introduce el caudal correspondiente al periodo de retorno, teniendo en cuenta que este será el mismo para todo el tramo. Este se agregará desde la sección 1000, la cual es tomada por HEC-RAS como la primera del cauce. Seguidamente, se debe especificar la pendiente longitudinal con la que contará el flujo. Esta al ser un canal con propiedades constantes y un flujo permanente, será tomada como la misma del canal, la cual está especificada en el enunciado del ejercicio. El software cuenta con varios métodos para introducir la pendiente, en este ejercicio será utilizado la **Normal Depth**, por ende, se hace clic en el botón que la menciona, teniendo en cuenta que esta se introduce en unidades (m/m) y que en este caso cuando la pendiente es menor a 1, esta se agrega en la casilla **Downstream** y cuando es mayor a 1 en la casilla **Upstream** (Figura 99).

Figura 99
Datos de flujo permanente del ejercicio 1.



Fuente: Elaboración propia basado en HEC-RAS.

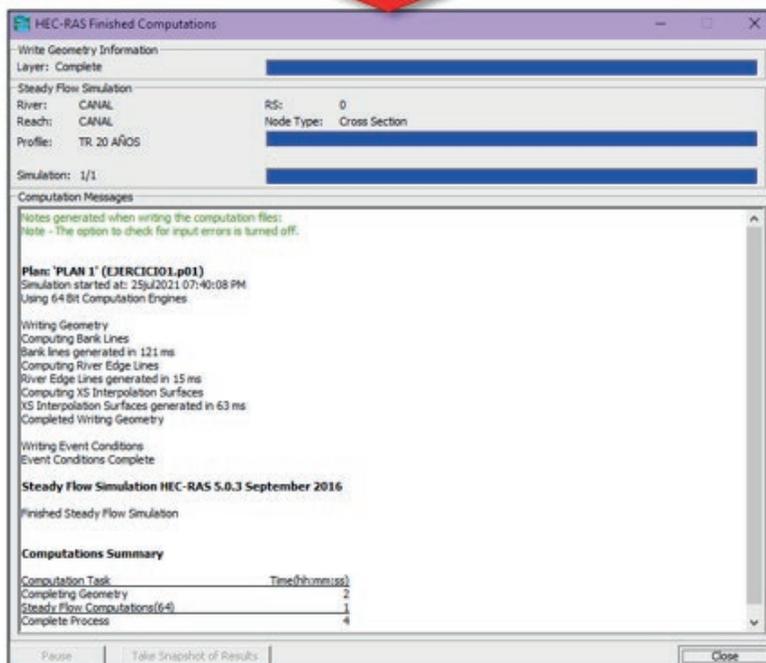
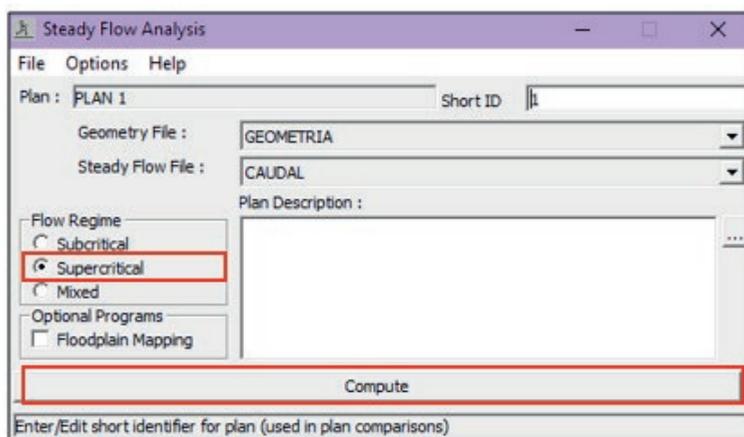
Se guarda el flujo creado con sus propiedades, seleccionando la pestaña **File** → **Save Flow Data**.

3.4.4. Análisis de la modelación

Finalmente, para ejecutar el modelo, haz clic en el componente **Steady Flow Analysis**. Esto abrirá una ventana donde deberás seleccionar el tipo de régimen basándote en la pendiente: si la pendiente introducida en la casilla de aguas arriba indica un régimen Supercrítico y si es aguas abajo, el régimen será Subcrítico. Luego, haz clic en **Compute** para generar un resumen del estado de la modelación, indicando si se realizó con éxito o no. Posteriormente, podrás observar los resultados de esta. Esto se muestra en la Figura 100.

Figura 100

Análisis de flujo permanente y resumen del estado del ejercicio 1.

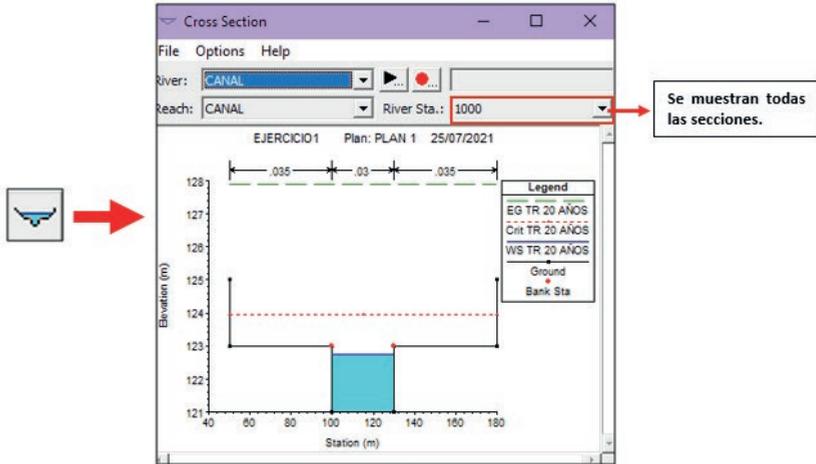


Fuente: Elaboración propia basado en HEC-RAS.

Los resultados tanto gráficos como numéricos, se pueden observar seleccionando los componentes mostrados de la Figura 101 a la Figura 105, las cuales se observan a continuación:

Figura 101

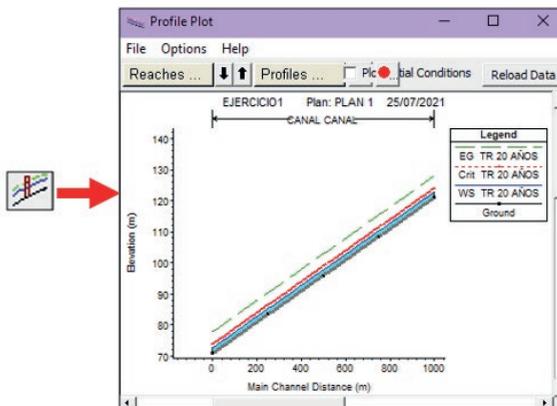
Resultado del modelo en sección transversal del ejercicio 1.



Fuente: Elaboración propia basado en HEC-RAS.

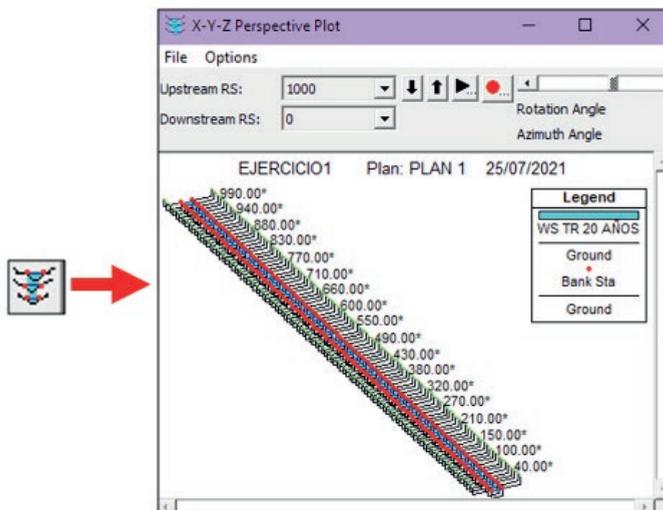
Figura 102

Resultado de perfil del cauce del ejercicio 1.



Fuente: Elaboración propia basado en HEC-RAS.

Figura 103
 Resultado de vista 3D del cauce del ejercicio 1.



Fuente: Elaboración propia basado en HEC-RAS.

Figura 104
 Tabla resumen del ejercicio 1.

Estación o sección transversal	Caudal transportado	Elevación de Lámina de agua	Elevación de Lámina de agua en estado crítico	Pendiente de la Línea de energía	Área mojada	Espejo de agua	Velocidad promedio	Froude			
CANAL 1000	TR 20 AÑOS	525.00	121.00	122.74	123.95	127.89	0.050260	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 990.00*	TR 20 AÑOS	525.00	120.50	122.24	123.45	127.39	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 980.00**	TR 20 AÑOS	525.00	120.00	121.74	122.95	126.89	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 970.00**	TR 20 AÑOS	525.00	119.50	121.24	122.45	126.39	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 960.00**	TR 20 AÑOS	525.00	119.00	120.74	121.95	125.89	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 950.00**	TR 20 AÑOS	525.00	118.50	120.24	121.45	125.39	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 940.00**	TR 20 AÑOS	525.00	118.00	119.74	120.95	124.89	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 930.00**	TR 20 AÑOS	525.00	117.50	119.24	120.45	124.39	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 920.00**	TR 20 AÑOS	525.00	117.00	118.74	119.95	123.89	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 910.00**	TR 20 AÑOS	525.00	116.50	118.24	119.45	123.39	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 900.00**	TR 20 AÑOS	525.00	116.00	117.74	118.95	122.89	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 890.00**	TR 20 AÑOS	525.00	115.50	117.24	118.45	122.39	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 880.00**	TR 20 AÑOS	525.00	115.00	116.74	117.95	121.89	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 870.00**	TR 20 AÑOS	525.00	114.50	116.24	117.45	121.39	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 860.00**	TR 20 AÑOS	525.00	114.00	115.74	116.95	120.89	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 850.00**	TR 20 AÑOS	525.00	113.50	115.24	116.45	120.39	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 840.00**	TR 20 AÑOS	525.00	113.00	114.74	115.95	119.89	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 830.00**	TR 20 AÑOS	525.00	112.50	114.24	115.45	119.39	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 820.00**	TR 20 AÑOS	525.00	112.00	113.74	114.95	118.89	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43
CANAL 810.00**	TR 20 AÑOS	525.00	111.50	113.24	114.45	118.39	0.050276	10.05	52.23	30.00	2.43

Fuente: Elaboración propia basado en HEC-RAS.

Figura 105

Resultado de vista 3D del cauce del ejercicio 1.

Plan: 1 CANAL CANAL RS: 1000 Profile: TR 20 AÑOS					
E.G. Elev (m)	127.89	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	5.15	Wt. n-Val.		0.030	
W.S. Elev (m)	122.74	Reach Len. (m)	10.00	10.00	10.00
Crit W.S. (m)	123.95	Flow Area (m2)		52.23	
E.G. Slope (m/m)	0.050260	Area (m2)		52.23	
Q Total (m3/s)	525.00	Flow (m3/s)		525.00	
Top Width (m)	30.00	Top Width (m)		30.00	
Vel Total (m/s)	10.05	Avg. Vel. (m/s)		10.05	
Max Ch Dpth (m)	1.74	Hydr. Depth (m)		1.74	
Conv. Total (m3/s)	2341.8	Conv. (m3/s)		2341.8	
Length Wtd. (m)	10.00	Wetted Per. (m)		33.48	
Min Ch El (m)	121.00	Shear (N/m2)		768.86	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)		7728.27	
Frctn Loss (m)	0.50	Cum Volume (1000 m3)		52.22	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		30.00	

Fuente: Elaboración propia basado en HEC-RAS.

Los resultados presentados en las figuras anteriores son completamente personalizables según las necesidades específicas, utilizando las opciones disponibles en el menú **Options** de cada una de ellas. Esto permite añadir o eliminar parámetros según sea necesario.

Además, los datos presentados en las tablas pueden ser copiados fácilmente a una hoja de Excel para su mejor manejo. Esto se logra haciendo clic en el menú **File** y seleccionando **Copy to Clipboard (Data and Headings)**, y luego pegándolos en la hoja de Excel deseada.

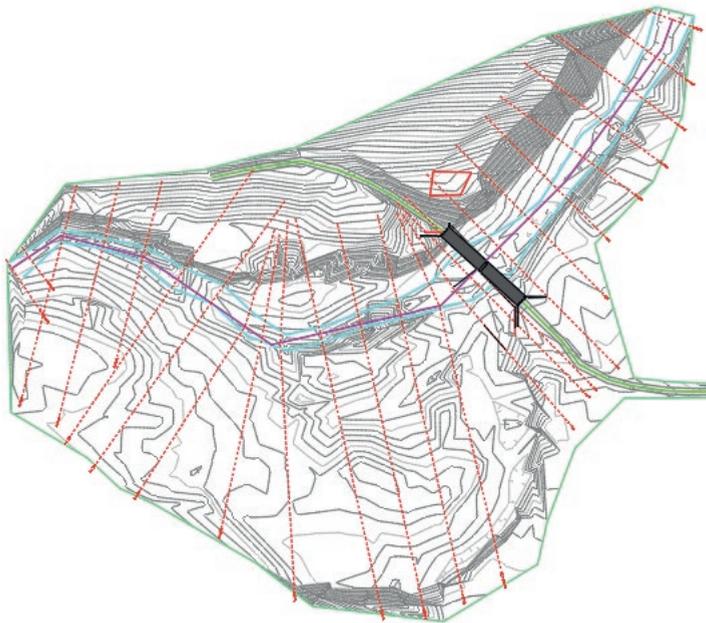
En respuesta al interrogante planteado en el enunciado del ejercicio 1, se puede deducir a partir de los resultados mostrados anteriormente que el tramo del canal abierto tiene la capacidad necesaria para transportar el caudal requerido y cumple con los parámetros establecidos por la normativa vigente.

3.5. Ejercicio 2, aplicación de HEC-RAS

Se desea evaluar si el puente propuesto con una longitud de 50 m y un ancho de tablero de 4 m, el cual se encuentra en la sección 152 de determinado río, tiene la capacidad hidráulica de transportar un caudal $105.16 \text{ m}^3/\text{s}$, con un periodo de retorno de 100 años. Para esto se da como material base la topografía del tramo del río a evaluar (la Figura 106 y Figura 107 muestran la topografía del cauce y el tablero del puente, respectivamente) y los datos principales del puente en la Tabla 24.

Figura 106

Topografía del cauce del ejercicio 2.

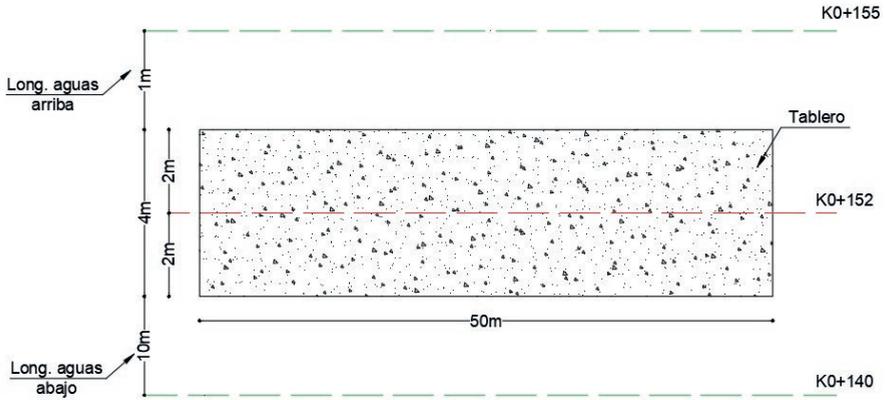


Fuente: Elaboración propia basado en HEC-RAS.

Para la realización del modelo hidráulico se usará un coeficiente de rugosidad de 0.048 en la zona tanto del cauce como el área de inundación y una pendiente longitudinal promedio de 0.809 %.

Figura 107

Tablero del puente del ejercicio 2.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24

Datos de las secciones, ejercicio 2.

Estación	Cuerda superficial	Cuerda inferior	Estación	Cuerda superficial	Cuerda inferior
51.28	256.29	255.04	51.28	256.29	255.04
101.28	256.29	255.04	101.28	256.29	255.04
Pila estación 76.28					
Ancho pila		Elevación	Ancho pila		Elevación
1.2		250.00	1.2		250.00
1.2		255.04	1.2		255.04
Estribo 1					
Estación		Elevación	Estación		Elevación
51.28		255.04	51.28		255.04
51.68		250.00	51.68		250.00
Estribo 2					
Estación		Elevación	Estación		Elevación
100.88		250.00	100.88		250.00
101.25		255.04	101.28		255.04

Fuente: Elaboración propia.

3.5.1. Configuraciones iniciales

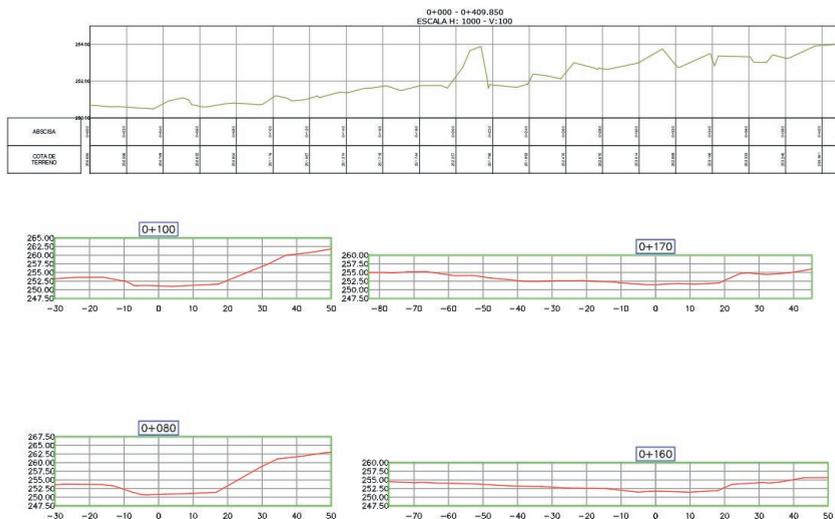
Al igual que en el ejercicio 1, se debe configurar el sistema de unidades como se muestra en la Figura 93 y posteriormente crear la carpeta en la que se guardará el proyecto, como se muestra en la Figura 94. Una vez realizadas dichas configuraciones, se procede a incluir cada uno de los componentes necesarios para la modelación como la geometría y el flujo.

3.5.2. Geometría del canal

En este ejercicio, para agilizar el trabajo, se importarán las secciones desde el software CIVIL 3D. Esto es especialmente útil al modelar un cauce natural con secciones irregulares, ya que el ingreso manual de cada una de las secciones sería un proceso prolongado. Para llevar a cabo este procedimiento, se requiere disponer de la topografía del cauce del canal, el perfil del alineamiento y las secciones creadas en CIVIL 3D, como se ilustra en la Figura 108.

Figura 108

Perfil y secciones realizadas en CIVIL 3D.

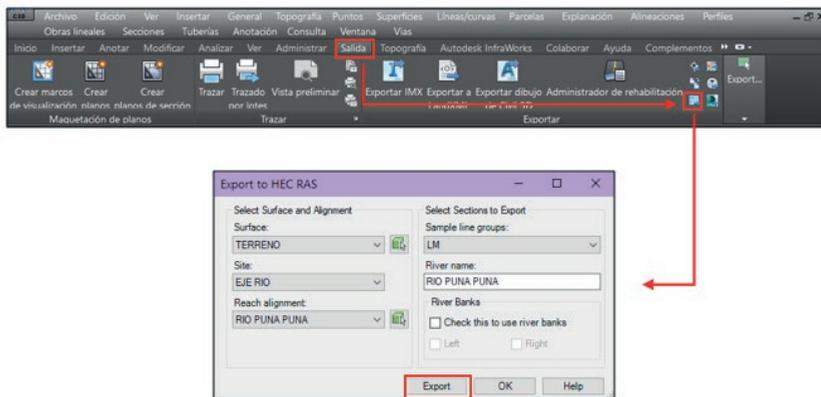


Fuente: Elaboración propia basada en CIVIL 3D.

En este ejercicio, se han definido secciones cada 20 metros, comenzando en la abscisa K0+000 y terminando en la K0+409.85. Es importante tener en cuenta que HEC-RAS considera como la primera sección aquella mostrada en la abscisa mayor. Por lo tanto, en este caso, se trabajó en CIVIL 3D con la alineación invertida, lo que implica que en la sección K0+000 se encuentra el final del cauce, como se observa en el perfil de la Figura 108.

Para exportar la geometría desde CIVIL 3D, se selecciona el menú **Salida** → **Exportar a HEC-RAS**. En la ventana emergente que aparecerá, se debe seleccionar la superficie, el emplazamiento y el alineamiento del cual se obtuvieron las secciones, además de ingresar el nombre del cauce. Luego, se hace clic en **Exportar** y se guarda el archivo en formato *.geo en la carpeta creada para el ejercicio, como se muestra en la Figura 109.

Figura 109
Exportación de secciones desde CIVIL 3D.

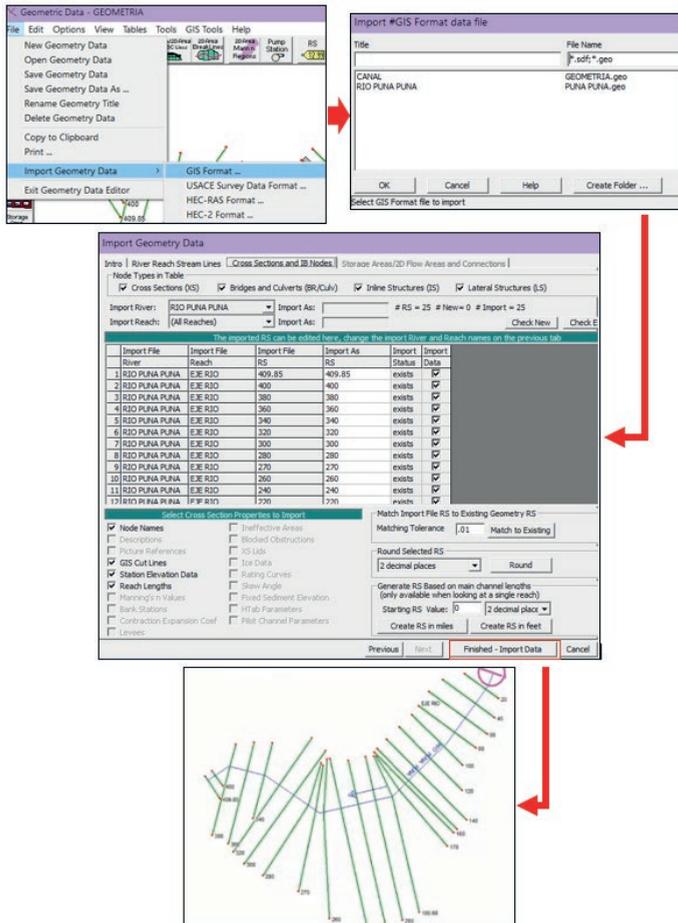


Fuente: Elaboración propia basada en CIVIL 3D.

Después de exportar desde CIVIL 3D, se importa la geometría en HEC-RAS. Para ello, se abre la herramienta **Geometric Data** en HEC-RAS. En el menú, se selecciona **File** → **Import Geometric Data** → **Gis Format**. Se escoge el archivo exportado desde CIVIL 3D y se abrirá una ventana donde se verifica que las unidades estén en el sistema internacional de medidas, para luego haz clic en Next. En la siguiente ventana, se verifica que se esté importando la geometría

correcta y haz clic en Next. Revisar que el orden de las secciones sea correcto y hacer clic en Finished – Import Data. Inmediatamente, se observará el cauce con las secciones en la ventana de trabajo, como se muestra en la Figura 110.

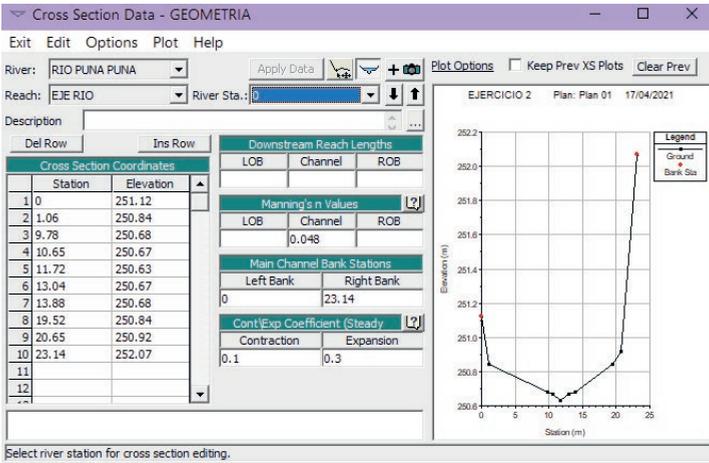
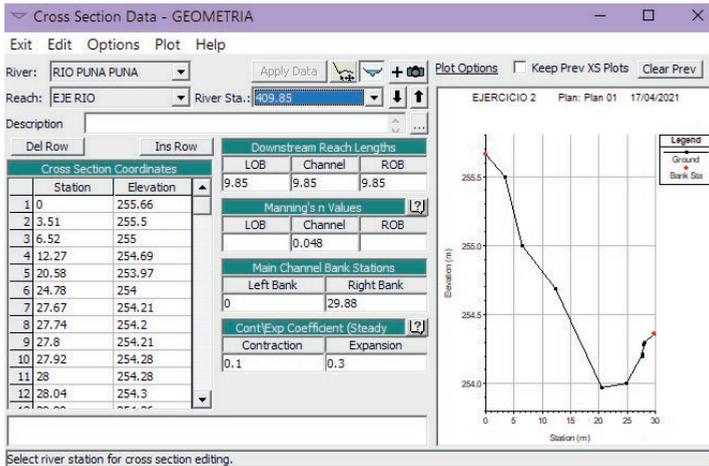
Figura 110
Importación de secciones a HEC-RAS.



Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Luego de importar las secciones, se debe ajustar la rugosidad del río y la longitud aguas debajo de la sección K0+000. Al ser esta la última del cauce, no tiene ningún valor en esta casilla, lo que generará un error a la hora de realizar la modelación. En la Figura 111 se observan la primera y última sección del cauce, con sus respectivos datos.

Figura 111
Datos de la primera y última sección importada del ejercicio 2.



Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Después de completar los pasos anteriores, es importante guardar la geometría creada seleccionando **File** → **Save Geometric Data**, como se explicó anteriormente. Además de la geometría del cauce, el ejercicio incluye un puente que debe ser agregado para analizar si el caudal transportado por el cauce puede pasar por debajo del mismo sin problemas. Para agregar esta estructura se hace clic en el ícono **Bridge Culvert Data**. Esto abrirá la ventana de trabajo donde se introducirán todos los datos necesarios para el puente. Seleccionar **Options** → **Add a Bridge and/or Culvert** y en la casilla que aparece, introducir la estación o la sección donde se creará la obra, por ejemplo, la K0+152. HEC-RAS automáticamente seleccionará la sección inmediata aguas arriba y aguas abajo de la sección especificada. Luego, introducir las partes del puente necesarias para la modelación, como el tablero (**Deck/Roadway**), las pilas (**Pier**) y los estribos (**Sloping Abutment**).

Tablero (Deck/Roadway). Teniendo en cuenta los datos del tablero observado en la 107, se hace clic en el ícono **Deck/Roadway**, y se abrirá una ventana flotante en la que se deberán ingresar los datos mencionados, como se observa en la Figura 112.

Figura 112

Datos del tablero del puente del ejercicio 2.

Annotations in the figure:

- Ancho de tablero.
- longitud de cara aguas arriba del puente hasta la sección.
- Cotras superiores (High chord) e inferiores (low chord) del tablero a diferentes abscisas.
- Inclinación del talud de aguas arriba de la carretera (relación H:V).
- Inclinación del talud de aguas abajo de la carretera (relación H:V).
- Coeficiente de vertedero usado para cálculo de flujo por encima (1.44 por defecto).

Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Pilas (Pier). Para ingresar los datos de la pila, según se detallan en la Tabla 24, se hace clic en el ícono **Pier** y se introducirán estos datos, tal como se ilustra en la Figura 113.

Figura 113

Datos del pilar del puente del ejercicio 2.

The screenshot shows the 'Pier Data Editor' window. It includes a toolbar with 'Add', 'Copy', 'Delete', and 'Pier #' buttons. Below the toolbar are input fields for 'Centerline Station Upstream' (76.28) and 'Centerline Station Downstream' (76.28). There is a section for 'Floating Pier Debris' with options 'All On ...', 'All Off ...', and a checkbox 'Apply floating debris to this pier'. Below this is a 'Set Wd/Ht for all' section with 'Debris Width' and 'Debris Height' fields. At the bottom is a table with columns for 'Upstream' and 'Downstream', each with sub-columns for 'Pier Width' and 'Elevation'. The table contains two rows of data: Row 1 (Pier 1) with width 1.2 and elevation 250; Row 2 (Pier 2) with width 1.2 and elevation 255.04. Red boxes and arrows point from labels to these specific fields.

	Upstream		Downstream	
	Pier Width	Elevation	Pier Width	Elevation
1	1.2	250	1.2	250
2	1.2	255.04	1.2	255.04
3				
4				
5				

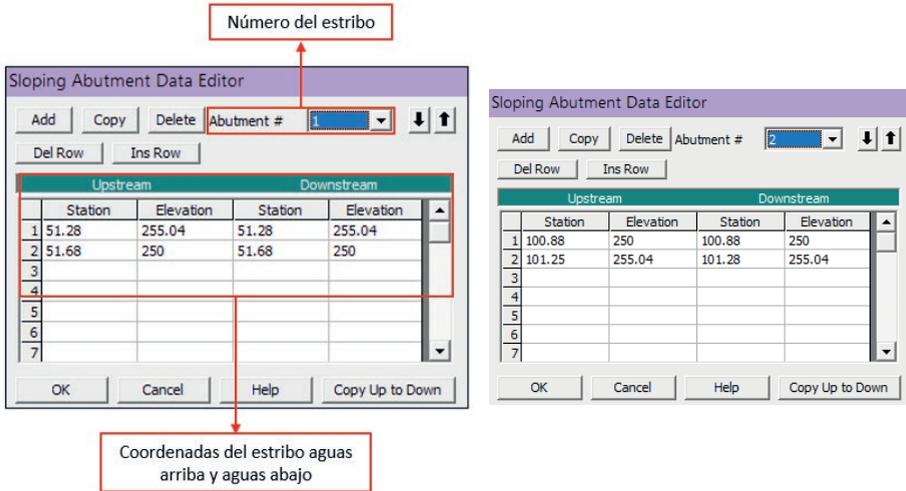
Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Estribos (Sloping Abutment). Se da clic en el ícono **Sloping Abutment** y se ingresarán los datos mencionados en la Tabla 24, como se muestra en la Figura 114.

Una vez completados todos los elementos del puente, este se visualizará como se muestra en la Figura 115. Luego, simplemente cierra esta ventana y guarda la geometría creada junto con el puente, como se explicó anteriormente en el ejercicio.

Figura 114

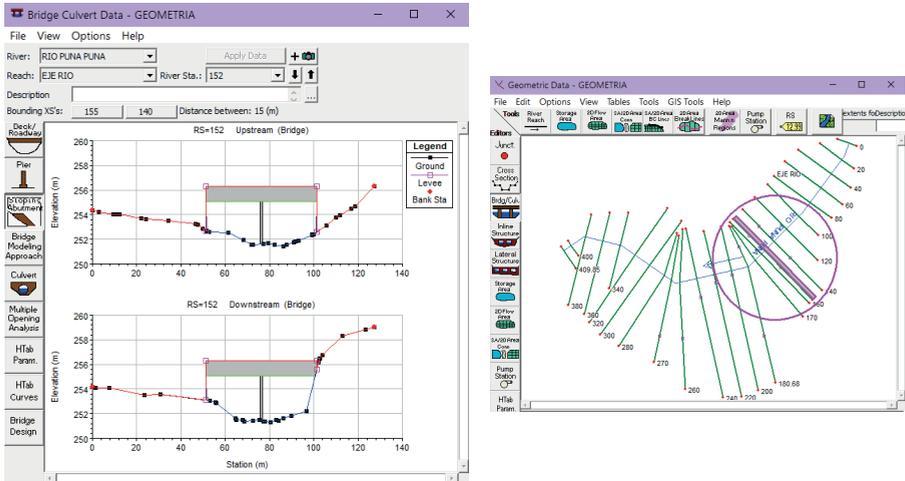
Datos de estribo 1 y 2 del puente del ejercicio 2.



Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Figura 115

Vista de la geometría y secciones del puente (aguas arriba y aguas abajo).



Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

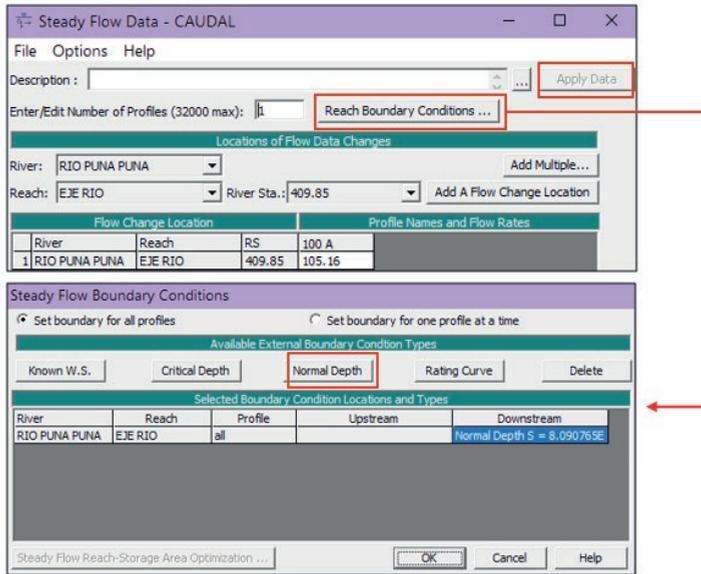
3.5.3. Flujo del canal

Se procede a introducir los datos hidráulicos mencionados en el ejercicio; para empezar, se selecciona el componente **Steady Flow Data**, el cual abrirá una ventana flotante en la que se deberá introducir el caudal, dependiendo del periodo de retorno a modelar. Este último el programa lo toma como un perfil por defecto, por lo cual, se debe cambiar el nombre dependiendo del periodo de retorno, con el fin de tener claro más adelante sobre cuál es el que se está observando y evitar confusiones.

Se establece cuantos perfiles o periodos de retorno se modelarán (para este caso el ejercicio requiere 1), esto se realiza en la casilla **Enter/Edit Number of Profiles**, donde se introducen la cantidad de perfiles a modelar. Se edita el nombre del perfil en la seleccionando la ventana flotante que aparecerá, seleccionando **Options → Edit Profile Names** y posteriormente se introduce el caudal correspondiente al periodo de retorno, teniendo en cuenta que este será el mismo para todo el tramo. Este se agregará desde la sección K0+409.85, la cual es tomada por HEC-RAS como la primera del cauce. Seguidamente, se debe especificar la pendiente longitudinal con la que contará el flujo. Esta al ser un canal con propiedades constantes y un flujo permanente, será tomada como la misma del canal, la cual está especificada en el enunciado del ejercicio. El software cuenta con varios métodos para introducir la pendiente, en este ejercicio será utilizado la **Normal Depth**, por ende, se hace clic en el botón que la menciona, teniendo en cuenta que esta se introduce en unidades (m/m) y que en este caso cuando la pendiente es menor a 1, esta se agrega en la casilla **Downstream** y cuando es mayor a 1 en la casilla **Upstream** (Figura 116).

Se guarda el flujo creado con sus propiedades, seleccionando la pestaña **File → Save Flow Data**.

Figura 116
Datos de flujo permanente del ejercicio 2.



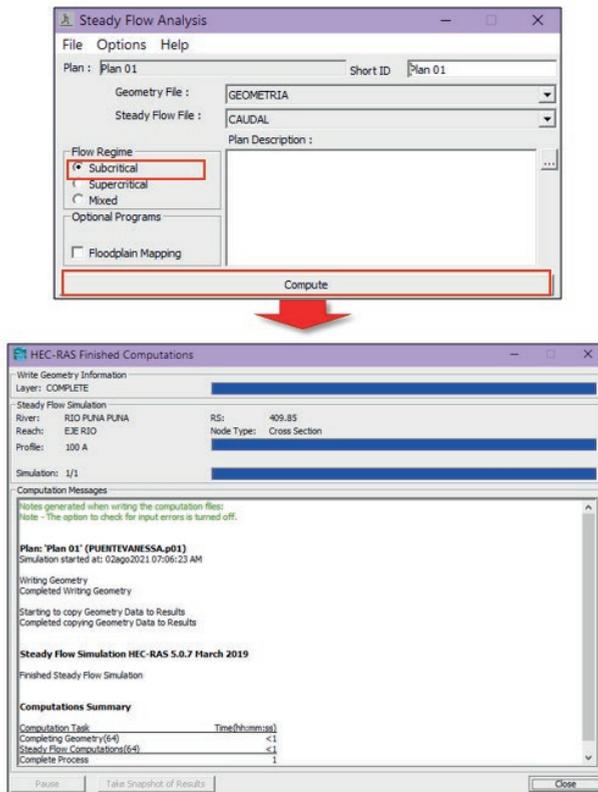
Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

3.5.4. Análisis de la modelación

Finalmente, para ejecutar el modelo, haz clic en el componente **Steady Flow Analysis**. Esto abrirá una ventana donde deberás seleccionar el tipo de régimen basándote en la pendiente: si la pendiente introducida en la casilla de aguas arriba indica un régimen Supercrítico y si es aguas abajo, el régimen será Subcrítico. Luego, haz clic en **Compute** para generar un resumen del estado de la modelación, indicando si se realizó con éxito o no. Posteriormente, podrás observar los resultados de esta. Esto se muestra en la Figura 117.

Figura 117

Análisis de flujo permanente y resumen del estado del ejercicio 2.

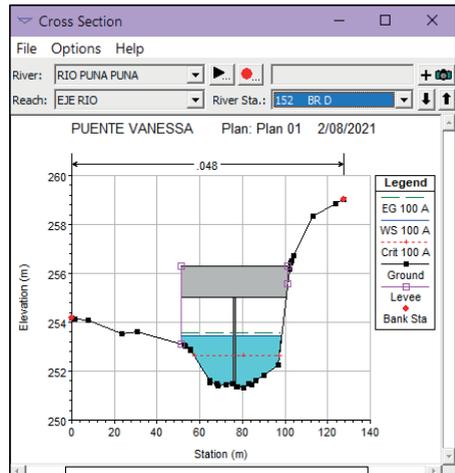
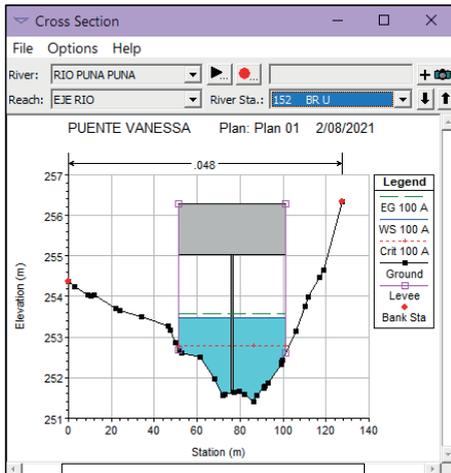
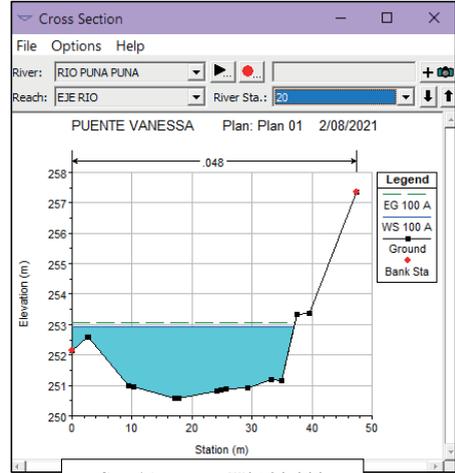
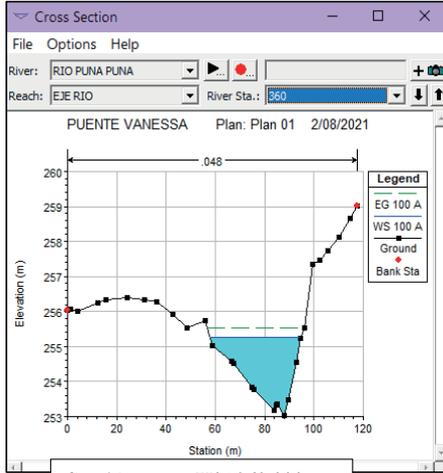


Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Los resultados tanto gráficos como numéricos, se pueden observar seleccionando los componentes mostrados de la Figura 118 a la Figura 122, las cuales se observan a continuación:

Figura 118

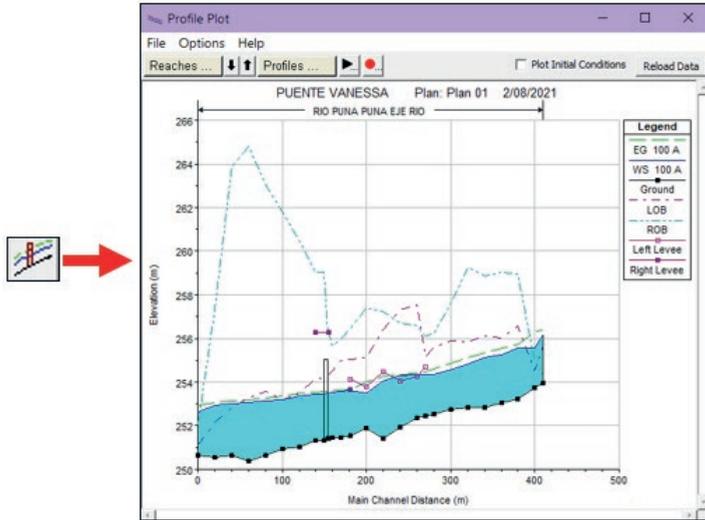
Resultado del modelo en sección transversal del ejercicio 2.



Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Figura 119

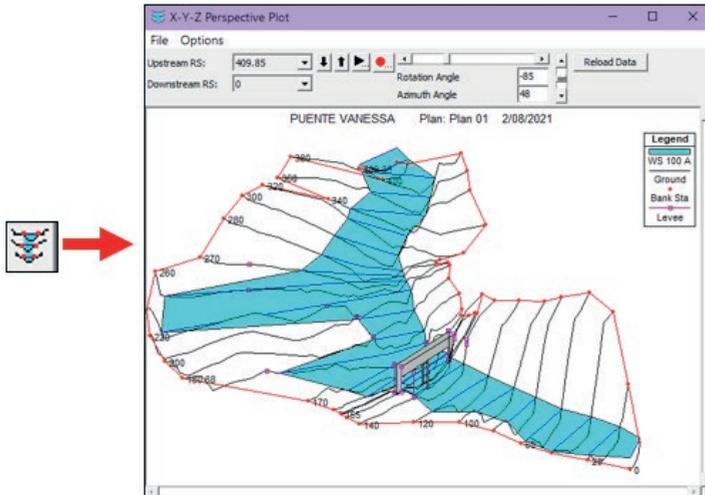
Resultado de perfil del cauce del ejercicio 2.



Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Figura 120

Resultado de vista 3D del cauce del ejercicio 2.



Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Figura 121
Resumen numérico de propiedades del cauce del ejercicio 2.

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
EJE RIO	409.85	100 A	105.16	253.97	256.16		256.42	0.007082	2.25	46.83	29.88	0.57
EJE RIO	400	100 A	105.16	253.75	255.57	255.57	256.26	0.022816	3.70	28.46	20.41	1.00
EJE RIO	380	100 A	105.16	253.22	255.53		255.71	0.006490	1.91	55.05	44.87	0.55
EJE RIO	360	100 A	105.16	253.04	255.25		255.54	0.010485	2.39	43.97	36.53	0.70
EJE RIO	340	100 A	105.16	252.84	255.13		255.33	0.007783	2.00	52.58	45.78	0.60
EJE RIO	320	100 A	105.16	252.83	254.83		255.13	0.012825	2.42	43.42	41.16	0.75
EJE RIO	300	100 A	105.16	252.76	254.57		254.86	0.013611	2.38	44.15	45.17	0.77
EJE RIO	280	100 A	105.16	252.52	254.35		254.59	0.011921	2.16	48.78	52.60	0.71
EJE RIO	270	100 A	105.16	252.44	254.32	253.93	254.47	0.007224	1.72	61.01	63.28	0.56
EJE RIO	260	100 A	105.16	252.38	254.34	253.68	254.39	0.004188	1.04	100.95	148.30	0.40
EJE RIO	240	100 A	105.16	251.93	254.29	253.64	254.33	0.002253	0.90	116.55	132.66	0.31
EJE RIO	220	100 A	105.16	251.41	254.03	253.47	254.24	0.005944	2.04	51.52	35.28	0.54
EJE RIO	200	100 A	105.16	251.89	253.48	253.48	254.00	0.022742	3.19	32.95	31.70	1.00
EJE RIO	180.68	100 A	105.16	251.55	253.59	252.82	253.66	0.003024	1.13	93.26	95.07	0.36
EJE RIO	170	100 A	105.16	251.48	253.56		253.63	0.002146	1.14	91.94	70.79	0.32
EJE RIO	160	100 A	105.16	251.46	253.51		253.60	0.003435	1.34	78.60	68.09	0.40
EJE RIO	155	100 A	105.16	251.42	253.48	252.76	253.59	0.002857	1.42	74.26	50.00	0.37
EJE RIO	152	Bridge										
EJE RIO	140	100 A	105.16	251.32	253.42	252.60	253.53	0.002911	1.47	71.55	46.98	0.38
EJE RIO	120	100 A	105.16	251.02	253.34		253.46	0.003942	1.54	68.24	52.80	0.43
EJE RIO	100	100 A	105.16	250.95	253.19		253.37	0.004572	1.89	55.54	34.93	0.48
EJE RIO	80	100 A	105.16	250.66	253.12		253.29	0.003619	1.82	57.83	32.27	0.43
EJE RIO	60	100 A	105.16	250.39	253.06		253.20	0.003943	1.68	62.74	42.47	0.44
EJE RIO	40	100 A	105.16	250.66	253.01		253.13	0.003284	1.53	68.73	46.39	0.40
EJE RIO	20	100 A	105.16	250.57	252.92		253.06	0.003207	1.65	63.83	37.06	0.40
EJE RIO	0	100 A	105.16	250.63	252.60	252.12	252.94	0.008101	2.57	40.89	23.14	0.62

Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Figura 122
Tabla resumen de parámetros hidráulicos de la sección del ejercicio 2.

Element	Inside BR US	Inside BR DS
E.G. US. (m)	253.59	253.57
W.S. US. (m)	253.48	253.45
Q Total (m ³ /s)	105.16	252.79
Q Bridge (m ³ /s)	105.16	252.63
Q Weir (m ³ /s)		2.05
Weir Sta Lft (m)		1.48
Weir Sta Rgt (m)		71.07
Weir Submerg		0.39
Weir Max Depth (m)		71.90
Min El Weir Flow (m)	256.29	1.46
Min El Prs (m)	255.04	54.78
Delta EG (m)	0.05	1761.4
Delta WS (m)	0.06	48.56
BR Open Area (m ²)	144.86	0.01
BR Open Vel (m/s)	1.49	0.00
BR Sluice Coef		45.35
BR Sel Method	Energy only	67.10

Fuente: Elaboración propia basada en HEC-RAS.

Todos los resultados mostrados en las figuras anteriores se pueden personalizar según se requieran, teniendo en cuenta las posibilidades disponibles en el menú **Options** de cada una de estas, pudiendo añadir o eliminar ciertos parámetros según se desee, adicional a esto es importante tener en cuenta los **Levees** para las áreas inefectivas del cauce.

Con el fin de dar respuesta al interrogante planteado en el enunciado del ejercicio 2, de los resultados mostrados anteriormente se puede deducir que el tramo el puente permite transportar el caudal generado con un periodo de retorno de 100 años.

3.6. Ejercicio propuesto

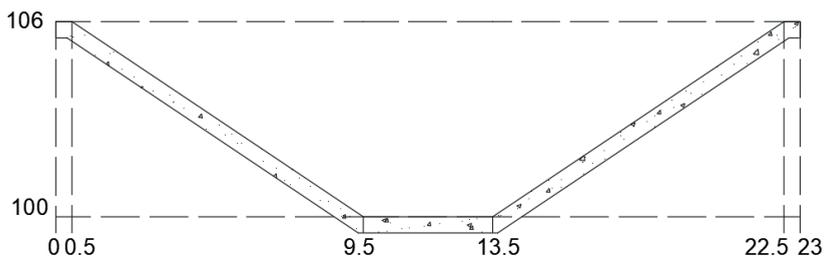
Se tiene un tramo de un canal como el que se muestra en la Figura 123, revestido en concreto, con un coeficiente de rugosidad de 0.013, una pendiente longitudinal de 0.04 % y una longitud de 3500 m, el cual conduce un caudal de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente a un periodo de retorno de 20 años. Las interpolaciones de sección deben realizarse cada 10 m.

Determinar:

- ¿Cuál es el valor del tirante normal?
- ¿Cuál es la velocidad media del flujo?

Figura 123

Sección transversal de canal, ejercicio propuesto.



Fuente: Elaboración propia.

3.7. Conclusiones

Los softwares mencionados en este módulo, en especial HEC-RAS son de gran importancia en el área de la ingeniería hidráulica, ya que facilita la modelación de las distintas estructuras hidráulicas, lo que se traduce en mayor agilidad y eficiencia en el diseño y con ello la toma acertada de decisiones que permitan dar soluciones adecuadas a las necesidades de la zona.

En esta unidad se entregaron las herramientas básicas para el análisis y diseño hidráulico de sistemas de estructuras hidráulicas mediante el uso de programas como HEC-RAS y CIVIL 3D, desarrollados por múltiples empresas y de uso tanto académico como comercial; se presentaron dos ejercicios de diseño con distintas metodologías a la hora de realizar la geometría del cauce, buscando con esto identificar y conocer las opciones de cálculo del software y las distintas presentaciones de los resultados, los ejercicios abarcaron varios análisis importantes que se pueden realizar en el programa, pero es necesario realizar más ejercicios de aplicación para poder adquirir un conocimiento más profundo de los diferentes casos de modelación que se pueden desarrollar en HEC-RAS.

3.8. Material de estudio

A continuación se presenta material complementario que puede ser consultado en la web y que permite ampliar el conocimiento relacionado con la temática explicada en este capítulo, se presentan opciones al lector que permiten profundizar en los temas vistos y ahondar en la práctica del modelado hidráulico. En la Tabla 25 se encuentran los links de consulta del material complementario.

Tabla 25
Material complementario del capítulo

Temas que abordan	Referencia bibliográfica	Ubicación (el enlace web o la base de datos)
Modelación hidráulica con HEC RAS.	Nanía y Molero (2007).	https://cemexico.groups.et.byu.net/vocabulary/ManualBasico_HEC-RAS313_HEC-GeoRAS311_Espanol.pdf

Fuente: Elaboración propia.

Los ejercicios resueltos, se encuentran como material de apoyo adicional en un repositorio de GitHub y pueden ser descargados en el siguiente enlace:

<https://github.com/Carlos-bonillag/Ejercicios-BOOK-Int-MOD-HID.git>

REFERENCIAS

- Anta, J., Naves, A., y Naves, J. (2019). *Introducción al cálculo de redes de saneamiento con SWMM*. Universidade da Coruña, Servicio de Publicaciones.
<https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497336>
- Cadavid, J. H. (2006). *Hidráulica de Canales Fundamentos*. Fondo Editorial Universidad Eafit.
- Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados CIACUA. (2009). Sumideros en alcantarillados de aguas lluvias. Diseños típicos utilizados en Colombia y mecanismos de retención de sólidos. Bogotá: Universidad de los Andes y Pavco Wavin.
<https://pavcowavin.com.co/sumideros-en-alcantarillados-de-aguas-lluvia-disenos-tipicos-en-colombia>
- Chow. V. T. (1999). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Mc Graw Hill.
- Corcho F. H., y Duque J. I. (1993). *Acueductos: teoría y diseño*. Universidad de Medellín.
- De Plaza, J. S. (2017). *Ejercicios prácticos en Epanet: ejercicios básicos de mecánica de fluidos e hidráulica aplicados a través del software de distribución gratuita EPANET 2.0*. Universidad Piloto de Colombia.
<https://www.unipiloto.edu.co/descargas/LibroEpanet.pdf>
- Díaz, I. J. (2014). *Modelo de reporte de daños de la infraestructura de los sistemas de acueducto en Colombia* [tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Católica de Colombia – RIUCaC.
<https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/2e72d1fc-9b48-42f4-b4ae-51e18945b564>
- EAAB. (2020). *Catálogo de Normas y Especificaciones Técnicas. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá*. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

- EMCALI. (2017). *Criterio de Diseño en Sistemas de Alcantarillado*. Empresas Municipales de Cali E.S.P. <https://www.emcali.com.co/documents/107516/125186/NDI-SE-RA-007.pdf>
- EMCALI. (2020). *Criterios de Diseño para Redes de Acueducto*. Empresas Municipales de Cali E.S.P. <https://www.emcali.com.co/documents/107516/125178/NDI-SE-DA-013.pdf>
- EPA-USA. (2005). *SWMM Modelo de Gestión de Aguas Pluviales 5.0 vE, Manual del usuario*. U.S. Environmental Protection Agency. http://www.instagua.upv.es/swmm/descargas/Manual_SWMM_5vE.pdf
- EPM E.S.P. (2009). *Normas de Diseño de Sistemas de Acueducto de EPM*. Empresas Públicas de Medellín E.S.P., Medellín.
- EPM E.S.P. (2013). *Normas de Diseño de Sistemas de Alcantarillado de las Empresas Públicas de Medellín*. E.S.P. Empresas Públicas de Medellín. E.S.P.
- French, R. H. (1988). *Hidráulica de Canales Abiertos*. México: McGRAW-HILL.
- INVÍAS. (2009). *Manual de Drenaje para Carreteras*. Instituto Nacional de Vías.
- Jaramillo, J. C. (2009). *Sistemas de distribución de agua con intermitencia de servicio. Gestión de demanda y optimización operacional*. Lemoine editores.
- López, R. A. (2000). *Diseño de acueductos y alcantarillados*. Alfaomega.
- López, R. A. (2003). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1892>
- Martínez, F. (2001). *Manual de Epanet 2.0 en español*. Universidad Politécnica de Valencia. http://www.instagua.upv.es/epanet/descargas/ManualEPANE_Tv2E.pdf

- MINVIVIENDA. (2015). Decreto 1077 de 2015. 811. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. 26 de mayo de 2015 (Colombia).
- MINVIVIENDA. (2017). Resolución 0330 de 2017. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. 8 de junio de 2017 (Colombia).
- Mohapatra, S., Sargaonkar, A., y Labhassetwar, P. K. (2014). Distribution network assessment using EPANET for intermittent and continuous water supply. *Water Resources Management*, 28(11), 3745–3759. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0707-y>
- Nanía, L. S., y Molero, E. (2007). *Manual Básico de HEC-RAS 3.1.3 y HEC-GeoRAS 3.1.1*. Universidad de Granada.
- Paiz, E. E., Carmona, J. C., y Garcia, R. M. (2011). *Diseño del sistema de alcantarillado sanitario, aguas lluvias, y planta de tratamiento de aguas residuales para el área urbana del municipio de San Matías, departamento de La Libertad* [tesis de doctorado, Universidad de El Salvador]. Repositorio Sistema Bibliotecario Universidad de El Salvador. <https://oldri.ues.edu.sv/id/eprint/3947>
- Pérez, R. (2010). *Instalaciones Hidrosanitarias y de Gas para Edificaciones*. Ecoe Ediciones.
- Pérez, R. (2013). *Diseño y construcción de alcantarillados sanitario, pluvial y drenaje en carreteras*. Ecoe Ediciones.
- Rocha, A. (2010). *Hidráulica de Tuberías y Canales*. Lima. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rodríguez, P. (2005). *Ingeniería Sanitaria y Alcantarillado*. Instituto Tecnológico de Oaxaca, México.
- Rojas, D. (2016). *¿Se justifica la separación de alcantarillado en la ciudad de Bogotá?* [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional Séneca. <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/a752436b-8e67-4345-a634-730a42f2631e>

- Rossman, L. A. (2000). *Epanet User's Manual*. U. S. Environmental Protection Agency.
<http://www.ingenieriadelaagua.com/2004/jia/jia2011/pdf/p510.pdf>
- Saldarriaga, J. G. (2016). *Hidráulica de tuberías* (3ª ed.). Alfaomega Colombiana.

AUTORES

CARLOS ALEXIS BONILLA GRANADOS

Ingeniero civil

Especialista en Aguas y Saneamiento Ambiental

Magíster en Tecnologías para el Manejo de Aguas y Residuos

Est. PhD Ingeniería del Agua y Medioambiental

 <https://orcid.org/0000-0002-4558-4615>

DIEGO IVÁN SÁNCHEZ TAPIERO

Ingeniero civil

Magíster en Ingeniería Ambiental

 <https://orcid.org/0000-0002-7270-1813>

JAROL DERLEY RAMÓN VALENCIA

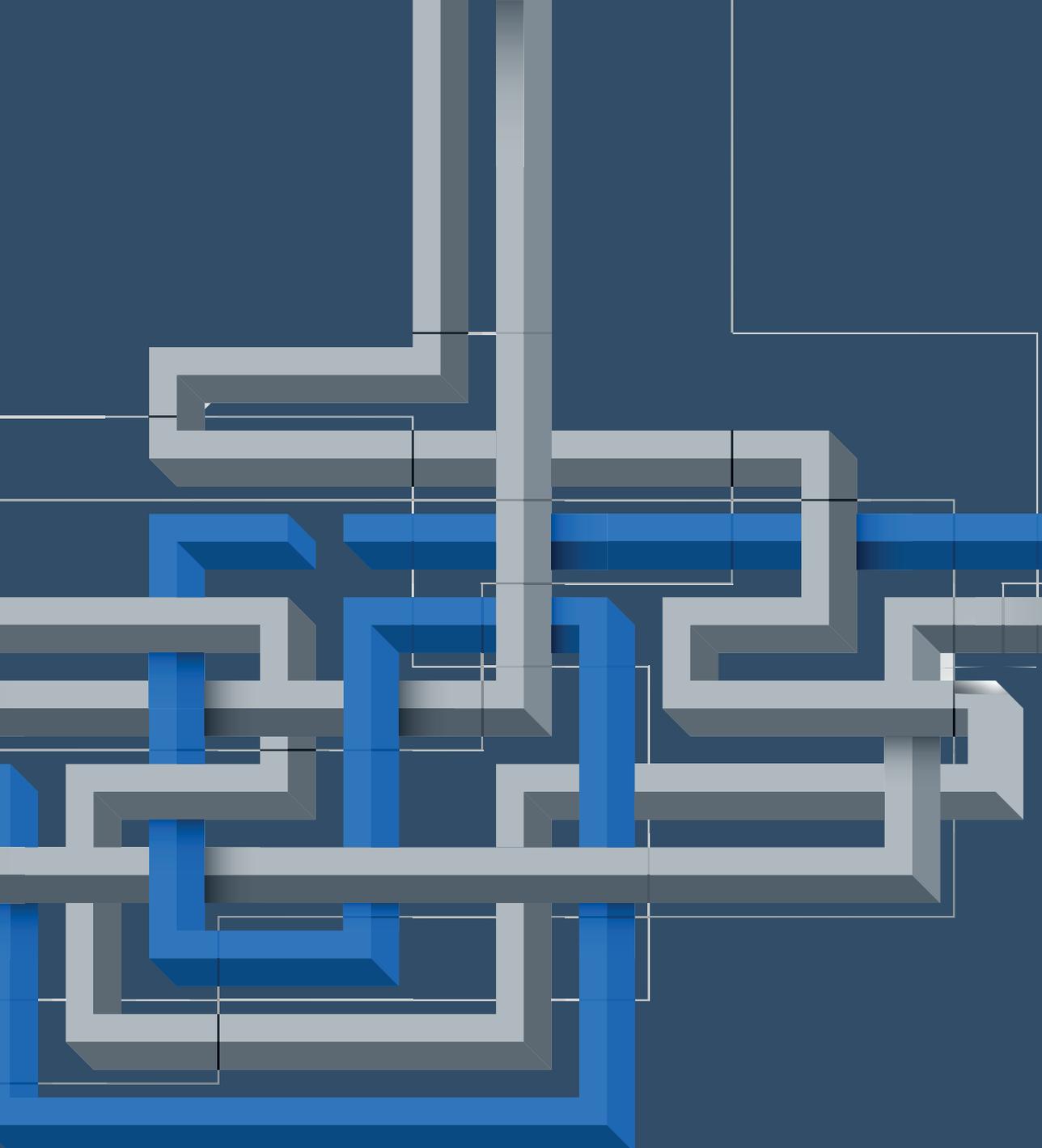
Ingeniero de Recursos Naturales y del Ambiente

Especialista en Pedagogía Universitaria

Magíster en Ingeniería Ambiental

PhD Ingeniería Ambiental

 <https://orcid.org/0000-0002-4929-8544>



UNIVERSIDAD
DE PAMPLONA

ISBN (Digital): 978-628-7656-40-6