



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL - HIDRÁULICA

**DISEÑO ÓPTIMO DE COLECTORES EN REDES DE ALCANTARILLADO
PLUVIAL**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
RAMÍREZ GARCÍA JOSÉ CARLOS

TUTORES PRINCIPALES:
DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. JOSÉ LUIS HERRERA ALANÍS, FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. OCTUBRE 2024.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. VÍCTOR FRANCO
Secretario: DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA
1^{er}. Vocal: DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ
2^{do}. Vocal: DR. JOSÉ LUIS ARAGÓN HERNÁNDEZ
3^{er}. Vocal: DR. JOSÉ LUIS HERRERA ALANÍS

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTORES DE TESIS:

Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez

Dr. José Luis Herrera Alanís

FIRMA

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A mi **MAMÁ** por su infinito amor, apoyo y resiliencia

A mi **HERMANA** por confiar en mi

A mis **FAMILIARES** por su motivación y cariño

A mis **AMIGOS** por acompañarme en esta etapa

A mis **TUTORES** por asesorarme en la realización de este trabajo y compartir sus conocimientos

A mis **PROFESORES** por sus enseñanzas

A mis **SINODALES** por su asesoría

Al **INSTITUTO DE INGENIERÍA** por brindarme las herramientas necesarias para realizar la tesis

A la **UNAM** por ser mi alma mater

Al **CONAHCYT** por el apoyo económico durante mis estudios de posgrado

RESUMEN

En cualquier desarrollo urbano, es esencial implementar un sistema de alcantarillado, ya sea sanitario, pluvial o combinado, para gestionar adecuadamente las aguas residuales. Definir el diseño óptimo de un sistema de alcantarillado es una tarea compleja que requiere el uso de herramientas y métodos de optimización. En este trabajo, se realiza el diseño de un colector de alcantarillado pluvial en la Ciudad de México (CDMX), empleando tres métodos de optimización: Algoritmos Genéticos, Nelder-Mead y el Método del Número Áureo. El diseño cumple con las restricciones de velocidad máxima y mínima, así como con los requisitos de pendiente y colchón mínimo. Los resultados indican que la combinación de estos métodos permite obtener mejores resultados en el diseño del sistema.

El uso de herramientas y métodos de optimización en el diseño de proyectos hidráulicos facilita el desarrollo de un mayor número de proyectos al permitir una mejor gestión de los recursos económicos.

ABSTRACT

For any urban development, it is essential to implement a sewerage system, whether sanitary, storm or combined, to properly manage wastewater. Setting the optimal design of a sewer system is a complex task that requires the use of optimization tools and methods. In this work, the design of a storm sewer collector located in Mexico City (CDMX) is carried out using three optimization methods: Genetic Algorithms, Nelder-Mead and the Golden-section search. The optimal design fits within the maximum and minimum velocity constraints, as well as the slope and minimum cushion requirements. The results indicate that the combination of these methods leads to better results in the system design.

The use of optimization tools and methods in the design of hydraulic projects facilitates the development of a greater number of projects by allowing for better management of economic resources.

Contenido

Introducción	10
Estado del arte	11
1 Sistemas de alcantarillado	13
1.1 Clasificación	13
1.2 Criterios de diseño	13
2 Aspectos básicos de hidráulica e hidrología	16
2.1 Análisis de precipitación	16
2.1.1 Intensidad y duración	16
2.1.2 Curvas hp-A-d	16
2.1.3 Curvas i-d-T	16
2.2 Relación lluvia – escurrimiento	18
2.2.1 Fórmula de Chen	18
2.2.2 Método Racional	20
2.2.3 Coeficiente de escurrimiento	20
2.2.4 Factor de conectividad	22
2.2.5 Tiempo de concentración	23
2.2.6 Hidrograma Unitario	25
2.2.7 Hidrograma adimensional SCS	25
2.2.8 Precipitación efectiva – Método de los números de escurrimiento	27
3 Métodos de optimización	28
3.1 Clasificación	28
3.2 Número Áureo	29
3.3 Nelder-Mead	30
3.4 Algoritmos Genéticos	33
4 Zona de estudio	36
4.1 Datos básicos	36
4.2 Gasto pico y generación de hidrogramas de entrada	36
4.3 Análisis de costos	46
4.3.1 Corte de pavimento (CCP)	52
4.3.2 Demolición pavimento (CDP)	52
4.3.3 Pavimento (CP)	52
4.3.4 Cama de arena (CCA)	53
4.3.5 Tubería (CT)	53
4.3.6 Excavación (CE)	54

4.3.7 Relleno de zanja (CRZ)	55
4.3.8 Pozos de visita (CPV).....	55
4.4 Propuesta de algoritmo para la optimización	55
4.4.1 Función objetivo.....	55
4.4.2 Restricciones	56
4.4.3 Modificaciones a los Métodos de Optimización	57
5 Aplicación y análisis de resultados	77
5.1 Aplicación del método a la zona de estudio.....	77
5.2 Análisis de resultados	78
5.3.1 Número Áureo Modificado.....	78
5.3.2 Nelder-Mead.....	81
5.3.3 Algoritmos Genéticos	84
5.3.4 Método híbrido.....	87
5.3.5 Infraestructura existente	90
6 Conclusiones	97
Referencias	99

Índice de figuras

FIGURA 1. NOMOGRAMA DE CHEN (CHEN, 1983).....	19
FIGURA 2. CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO. FUENTE: (GONZÁLEZ A. , 2023, PÁG. 15)	22
FIGURA 3. MAPA DE FACTOR DE CONVECTIVIDAD EN LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO.	23
FIGURA 4. HIDROGRAMA ADIMENSIONAL SCS. FUENTE: (APARICIO M, 1992, PÁG. 235)	26
FIGURA 5. EXTREMOS GLOBALES Y LOCALES. FUENTE: DISEÑO PROPIO.	29
FIGURA 6. NÚMERO ÁUREO. FUENTE: (CHAPRA & CANALE, 2007, PÁG. 367).....	30
FIGURA 7. EJEMPLO GRÁFICO DEL MÉTODO NELDER-MEAD.	32
FIGURA 8. ALGORITMO DEL MÉTODO NELDER-MEAD. FUENTE: (HERRERA A., DOMÍNGUEZ M., & ARGANIS J., 2012, PÁG. 3)	33
FIGURA 9. OPERADOR CRUZA AG.....	34
FIGURA 10. OPERADOR MUTACIÓN AG.....	34
FIGURA 11. ALGORITMO DEL MÉTODO CON ALGORITMOS GENÉTICOS. FUENTE: (HERNÁNDEZ A., 2007)	35
FIGURA 12. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	36
FIGURA 13. LOCALIZACIÓN ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	37
FIGURA 14. PRECIPITACIONES MÁXIMAS - ESTACIÓN 9036 PLAYA CALETA – F.D. GUMBEL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	39
FIGURA 15. FACTOR DE CONVECTIVIDAD DE LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: MODIFICADA DE (GONZÁLEZ A. , 2023).....	39
FIGURA 16. HIDROGRAMA SCS ZONA DE ESTUDIO	44
FIGURA 17. POZOS DE VISITA Y COLECTOR.....	45
FIGURA 18. ÁREAS TRIBUTARIAS	45
FIGURA 19. ANCHO DE ZANJA F(D)	51
FIGURA 20. COSTO DEMOLICIÓN DE PAVIMENTO F(D)	52
FIGURA 21. COSTO PAVIMENTO F(D).....	52
FIGURA 22. COSTO CAMA DE ARENA F(D).....	53
FIGURA 23. COSTO TUBERÍA F(D).....	53
FIGURA 24. EJEMPLO H1 Y H2.....	54
FIGURA 25. COSTO POZO DE VISITA F(H).....	55
FIGURA 26. PENDIENTE MÍNIMA F(D)	57
FIGURA 27. EJEMPLO COLECTOR 2 TRAMOS	57
FIGURA 28. TRANSFERENCIA DE INFORMACIÓN. NÚMERO ÁUREO MODIFICADO	58
FIGURA 29. VÉRTICES INICIALES Y COTAS INICIAL Y FINAL. NELDER-MEAD	73
FIGURA 30. VÉRTICE MEJOR, PEOR Y CONTRACCIÓN INTERNA. N-M 1A. ITERACIÓN	75
FIGURA 31. RENOMBRE A PUNTOS MEJOR Y PEOR. N-M - 1A. ITERACIÓN	75
FIGURA 32. PERFIL COLECTOR - MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN Y EXISTENTE	96

Índice de tablas

TABLA 1. TIPO DE ALGORITMO DE LAS FUENTES	12
TABLA 2. VELOCIDAD MÁXIMA PERMISIBLE EN TUBOS DE DRENAJE. FUENTE: (CONAGUA, 2019, PÁG. 73)	14
TABLA 3. PENDIENTE MÍNIMA EN TUBOS DE DRENAJE.....	14
TABLA 4. COLCHÓN MÍNIMO EN TUBERÍA DE DRENAJE.	15
TABLA 5. TABLA EJEMPLO HP PARA CURVAS IDT.....	17
TABLA 6. VALORES DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO. FUENTE: (APARICIO M, 1992, PÁG. 210)	21
TABLA 7. PRECIPITACIONES MÁXIMAS ANUALES. ESTACIÓN CALETA.....	37
TABLA 8. PARÁMETROS ESTADÍSTICOS MUESTRALES.....	38
TABLA 9. PARÁMETROS POR MOMENTOS F.D. GUMBEL.....	38
TABLA 10. EVENTOS DE DISEÑO - PRECIPITACIÓN - F.D. GUMBEL.....	38
TABLA 11. VALOR PARÁMETROS A, B Y C	40
TABLA 12. PRECIPITACIONES MÁXIMAS PARA DURACIONES DE HASTA 240 MINUTOS	40
TABLA 13. PRECIPITACIONES MÁXIMAS PARA UNA DURACIÓN DE 60 MINUTOS CON EL FACTOR DE CONVECTIVIDAD "R"	40
TABLA 14. CARACTERÍSTICAS CUENCA URBANA EN ESTUDIO.....	41
TABLA 15. CÁLCULO TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN	42
TABLA 16. GASTOS DE DISEÑO POR POZO DE VISITA	46
TABLA 17. CONCEPTOS PARA EL ANÁLISIS DE COSTOS	46
TABLA 18. PRECIOS UNITARIOS PARTE 1.....	47
TABLA 19. PRECIOS UNITARIOS PARTE 2.....	48
TABLA 20. PRECIOS UNITARIOS PARTE 3.....	49
TABLA 21. PRECIOS UNITARIOS PARTE 4.....	50
TABLA 22. COLCHÓN MÍNIMO F(D).....	56
TABLA 23. PENDIENTE MÍNIMA F(D)	56
TABLA 24. ELEVACIONES PROPUESTAS. NÚMERO ÁUREO - 1A. ITERACIÓN	59
TABLA 25. PENDIENTES. NÚMERO ÁUREO - 1A. ITERACIÓN.....	60
TABLA 26. DIÁMETROS TEÓRICOS. NÚMERO ÁUREO - 1A. ITERACIÓN	60
TABLA 27. DIÁMETROS COMERCIALES DE TUBERÍA.....	61
TABLA 28. DIÁMETROS COMERCIALES. NÚMERO ÁUREO - 1A. ITERACIÓN	61
TABLA 29. PROFUNDIDADES. NÚMERO ÁUREO - 1A. ITERACIÓN.....	61
TABLA 30. COLCHÓN. NÚMERO ÁUREO - 1A. ITERACIÓN	62
TABLA 31. VELOCIDADES. NÚMERO ÁUREO - 1A. ITERACIÓN.....	62
TABLA 32. COSTOS. NÚMERO ÁUREO - 1A. ITERACIÓN	62
TABLA 33. ELEVACIONES PROPUESTAS. NÚMERO ÁUREO - 2A. ITERACIÓN	63
TABLA 34. PENDIENTES. NÚMERO ÁUREO - 2A. ITERACIÓN.....	63
TABLA 35. DIÁMETROS TEÓRICOS. NÚMERO ÁUREO - 2A. ITERACIÓN	63
TABLA 36. DIÁMETROS COMERCIALES. NÚMERO ÁUREO - 2A. ITERACIÓN	63
TABLA 37. PROFUNDIDADES. NÚMERO ÁUREO - 2A. ITERACIÓN.....	63
TABLA 38. COLCHÓN. NÚMERO ÁUREO - 2A. ITERACIÓN	64
TABLA 39. VELOCIDADES. NÚMERO ÁUREO - 2A. ITERACIÓN.....	64
TABLA 40. COSTOS. NÚMERO ÁUREO - 2A. ITERACIÓN	64
TABLA 41. ELEVACIONES PROPUESTAS. NÚMERO ÁUREO - 3A. ITERACIÓN	64
TABLA 42. ELEVACIONES PROPUESTAS. NÚMERO ÁUREO - 17A. ITERACIÓN	65
TABLA 43. DIÁMETROS COMERCIALES. NÚMERO ÁUREO - 17A. ITERACIÓN	65
TABLA 44. COSTOS. NÚMERO ÁUREO - 17A. ITERACIÓN	65
TABLA 45. ELEVACIONES PROPUESTAS. NÚMERO ÁUREO - 30A. ITERACIÓN	65
TABLA 46. DIÁMETROS COMERCIALES. NÚMERO ÁUREO - 30A. ITERACIÓN	65
TABLA 47. COSTOS. NÚMERO ÁUREO - 30A. ITERACIÓN	65
TABLA 48. POBLACIÓN INICIAL. ALGORITMOS GENÉTICOS	67
TABLA 49. COSTOS. ALGORITMOS GENÉTICOS 1A. GENERACIÓN.....	67

TABLA 50. INDIVIDUOS ORDENADOS. AG - 1A. GENERACIÓN	68
TABLA 51. SELECCIÓN DE INDIVIDUOS PARA CRUZA. AG - 1A. GENERACIÓN	68
TABLA 52. DEFINICIÓN DE APLICACIÓN OPERADOR CRUZA. AG - 1A. GENERACIÓN	68
TABLA 53. OPERADOR CRUZA. AG - 1A. GENERACIÓN	69
TABLA 54. INDIVIDUOS DESPUÉS DE LA CRUZA. AG - 1A. GENERACIÓN	69
TABLA 55. DEFINICIÓN DE APLICACIÓN OPERADOR MUTACIÓN. AG - 1A. GENERACIÓN	70
TABLA 56. INDIVIDUOS PARA SEGUNDA GENERACIÓN AG	70
TABLA 57. COTAS Y COSTOS. AG - GENERACIÓN 2, 50, 100 Y 500.....	71
TABLA 58. VÉRTICES INICIALES. NELDER-MEAD	73
TABLA 59. COSTOS. NELDER-MEAD - VÉRTICES INICIALES	73
TABLA 60. CONTRACCIÓN INTERNA. NELDER-MEAD – 1A. ITERACIÓN	74
TABLA 61. COTAS Y COSTOS. NELDER-MEAD - 1A. ITERACIÓN	75
TABLA 62. REFLEXIÓN. NELDER-MEAD - 2A. ITERACIÓN.....	75
TABLA 63. EXPANSIÓN. NELDER-MEAD - 2A. ITERACIÓN	75
TABLA 64. CONTRACCIÓN INTERNA. NELDER-MEAD - 2A. ITERACIÓN	76
TABLA 65. CONTRACCIÓN EXTERNA. NELDER-MEAD - 2A. ITERACIÓN	76
TABLA 66. COTAS Y COSTOS. NELDER-MEAD - 2A. ITERACIÓN	76
TABLA 67. COTAS Y COSTOS. NELDER-MEAD - 20A. ITERACIÓN	76
TABLA 68. COMPARACIÓN COTAS Y COSTOS. AG, NÚMERO ÁUREO Y N-M.....	76
TABLA 69. DATOS DE ENTRADA - TRAMOS	77
TABLA 70. DATOS DE ENTRADA - NODOS.....	77
TABLA 71. RESULTADOS NÚMERO ÁUREO	78
TABLA 72. COSTOS POR CONCEPTO - NÚMERO ÁUREO	79
TABLA 73. REVISIÓN RESTRICCIONES - NÚMERO ÁUREO.....	80
TABLA 74. RESULTADOS NELDER-MEAD.....	81
TABLA 75. COSTOS POR CONCEPTO - NELDER-MEAD.....	82
TABLA 76. REVISIÓN RESTRICCIONES - NELDER-MEAD	83
TABLA 77. RESULTADOS ALGORITMOS GENÉTICOS	84
TABLA 78. COSTOS POR CONCEPTO - ALGORITMOS GENÉTICOS	85
TABLA 79. REVISIÓN RESTRICCIONES - ALGORITMOS GENÉTICOS.....	86
TABLA 80. RESULTADOS MÉTODO HÍBRIDO.....	87
TABLA 81. COSTOS POR CONCEPTO - MÉTODO HÍBRIDO	88
TABLA 82. REVISIÓN RESTRICCIONES - MÉTODO HÍBRIDO	89
TABLA 83. COSTO POR TRAMO INFRAESTRUCTURA EXISTENTE (COTAS)	90
TABLA 84. COSTOS POR CONCEPTO - INFRAESTRUCTURA EXISTENTE (COTAS).....	91
TABLA 85. REVISIÓN RESTRICCIONES - INFRAESTRUCTURA EXISTENTE (COTAS)	92
TABLA 86. COSTO POR TRAMO INFRAESTRUCTURA EXISTENTE (COTAS Y DIÁMETROS)	93
TABLA 87. COSTOS POR CONCEPTO - INFRAESTRUCTURA EXISTENTE (COTAS Y DIÁMETROS)	94
TABLA 88. REVISIÓN RESTRICCIONES - INFRAESTRUCTURA EXISTENTE (COTAS Y DIÁMETROS).....	95

Introducción

En cualquier proyecto de desarrollo urbano, el suministro de agua potable es la prioridad principal. Sin embargo, una vez asegurado este recurso, surge el desafío del manejo de las aguas residuales y pluviales. Por lo tanto, es necesario implementar un sistema de alcantarillado, ya sea sanitario, pluvial o combinado, para gestionar adecuadamente las aguas residuales generadas por los residentes, comercios e industrias en la zona (SIAPA, 2014, pág. 2), así como los gastos producidos por las lluvias.

El trazo de la red y el diseño hidráulico son los componentes fundamentales en el diseño de redes de alcantarillado.

El diseño óptimo en una red de alcantarillado es aquél que cumple con las restricciones hidráulicas, comerciales y constructivas y minimiza la función (o funciones) objetivo, generalmente se minimiza el costo, pero pueden ser otras funciones (mínima energía, trazado mínimo, pendiente mínima, etc.).

El presente trabajo, plantea una propuesta del diseño óptimo de colectores de alcantarillado pluvial en una zona de la Ciudad de México, tomando en cuenta las restricciones de velocidad, tirantes y cota de descarga; contrastando tres métodos de optimización: Nelder-Mead, uno basado en el Número Áureo y el otro en Algoritmos Genéticos. Para llevar a cabo el desarrollo del mismo, se plantean los siguientes capítulos:

Capítulo I: Sistemas de alcantarillado: se presenta la teoría necesaria, así como los conceptos de la clasificación y criterios de diseño.

Capítulo II: Aspectos básicos de Hidráulica e Hidrología: se indica cómo llevar a cabo el análisis de los datos de precipitación, así como la relación lluvia-escorrentía y los tránsitos hidráulicos con la finalidad de obtener los gastos de diseño del colector.

Capítulo III. Métodos de optimización: en este capítulo se indica la teoría sobre los métodos existentes, indicando su clasificación y se presentan los tres métodos empleados.

Capítulo IV. Zona de estudio: se presentan los datos básicos del proyecto, los cuales incluyen localización, topografía, etc., se obtienen los hidrogramas de entrada, además, se lleva a cabo la descripción de los costos a considerar en el proyecto y finalmente se presentan las modificaciones y forma de aplicación de cada uno de los tres métodos, así como un ejemplo de un pequeño colector.

Capítulo V. Aplicación y análisis de resultados: se describe la aplicación de los tres métodos en la solución del colector analizado. Se lleva a cabo la revisión de las restricciones y se realiza una evaluación de los costos, además de analizar el cumplimiento de restricciones y costos de la infraestructura existente.

Estado del arte

Diversos autores han dedicado su investigación a generar modelos que permitan obtener diseños de redes de alcantarillado con el menor costo, obteniendo así un equilibrio entre eficiencia y economía para cumplir con su objetivo.

La Programación Lineal fue una de las primeras técnicas de optimización, sin embargo, se descartó rápidamente, debido a que la función objetivo (F.O.) y restricciones debían ser linealizadas (aproximación no adecuada para describir la relación entre características del fluido, diámetro y pendiente).

En 2010, Navarro, Bermudez y Saldarriaga, establecieron que la Programación Dinámica permite que la F.O. y restricciones puedan ser discontinuas y no diferenciables, toma de decisiones dividida por etapas, presenta soluciones discretas. Sin embargo, no es una metodología adecuada cuando se cuenta con múltiples nodos de descarga (no se puede garantizar que el diámetro de tubería aguas abajo sea mayor que el de aguas arriba).

En 2014, Saldarriaga y Duque propusieron un diseño empleando el algoritmo de Bellman-Ford, los cuales son gráficos dirigidos. En esta investigación lo que solucionan es el problema de la ruta más corta, en él minimizan el costo de tuberías, pero no de excavación.

En 2016, Hernández Aguilar et al. propusieron el diseño de la red mediante el uso de Algoritmos Genéticos, el cual optimiza diámetros, pendientes y profundidades. Toman en cuenta criterios hidráulicos como velocidades máximas y mínimas, así como la relación de llenado. Realizan la modelación en flujo no permanente.

De igual manera, en 2016, Ardila Andrés et al. diseñaron redes de alcantarillado y compararon sus resultados con los obtenidos con el sistema SedalPlus y establecen que la selección del trazado puede significar una diferencia de costos de hasta el 85%. El trazado lo realizan desde el punto de salida y se lleva a cabo mediante la relación B/C (beneficio hidráulico y costo económico), toman en cuenta los criterios hidráulicos de gasto lineal mínimo, pendiente mínima y volumen mínimo.

Duque Natalia, Duque Daniel y Saldarriaga Juan, en 2016, propusieron el trazado combinando el diámetro pendiente, minimizando el costo de construcción. La selección del trazado es mediante un modelo mixto, llamado *Network Design Problem* (NDP), en donde el costo se aproxima mediante herramientas estadísticas ajustando a funciones lineales. El diseño hidráulico se realiza con una adaptación de un algoritmo de la ruta más corta.

En los últimos años, para el diseño de las redes de alcantarillado se establecen restricciones de velocidad y relación de llenado con base en la normativa existente, sin embargo, existen diferencias entre los diseños obtenidos según sea el método empleado; por mencionar algunos, los métodos de diseño usualmente empleados son: la Teoría de Grafos, Algoritmos Genéticos, lenguaje de programación como C++ o Visual Basic, etc.

El método que resulta más adecuado es aquél que permita realizar la mayor reducción de los costos, tomando en cuenta las restricciones de acuerdo con la normatividad vigente; considerando lo más detallado posible los costos involucrados en la construcción de la red y teniendo el menor consumo computacional, pues en redes muy extensas el tiempo de cálculo puede ser considerable.

En la Tabla 1, se presenta un resumen de las fuentes consultadas, en donde se indica el año en el que fueron publicados los trabajos, así como el tipo de método empleado en la optimización (determinístico o estocástico).

Tabla 1. Tipo de algoritmo de las fuentes

Año	Autor	Artículo / Tesis	Tipo de Método de optimización
2001	Mendoza Facundo J. Enedino.	Métodos de diseño de redes de alcantarillado pluvial con ejemplos de aplicación	Determinístico
2002	García Rivera Rodrigo.	Método de diseño de redes de alcantarillado pluvial que incluye la determinación de su trazo	Determinístico
2007	Hernández Aguilar, Darío Alfredo	Un método de diseño de redes de alcantarillado	Estocástico
2010	Navarro I., Bermúdez N. & Saldarriaga	Diseño optimizado de redes de drenaje urbano.	Estocástico
2010	Fuentes Mariles Óscar, Hernández Aguilar Darío A. & De La Luna Cruz Faustino.	Método de diseño de una red de alcantarillado pluvial empleando un algoritmo genético.	Estocástico
2012	Mejía Estrada Pamela Iskra.	Realización del Software PRyDA para el diseño o revisión de un tramo de alcantarillado con base en sus condiciones de operación.	Determinístico
2014	Duque Natalia, Duque Daniel & Saldarriaga Juan.	Metodología para la optimización del diseño de tuberías en serie en sistemas de alcantarillado	Determinístico
2014	Ardila Andrés, Corrales Emilio, Cuero Paula, Luna Daniel, Montaña Laura & Saldarriaga Juan.	Dimensionamiento optimizado de redes de drenaje urbano	Determinístico
2016	González Sebastián y Bohórquez Jessica.	Entendimiento del flujo cuasicrítico y su efecto sobre el diseño optimizado de redes de drenaje urbano.	Determinístico
2016	Ardila Andrés, Marú Andrea & Saldarriaga Juan.	Diseño optimizado de redes de drenaje urbano haciendo uso de criterios hidráulicos	Determinístico
2016	Duque Natalia, Duque Daniel & Saldarriaga Juan.	Metodología para el diseño optimizado de redes de alcantarillado	Estocástico
2016	Hernández Aguilar Darío A., Suárez Martínez Raymundo & Fuentes Mariles Óscar A.	Optimización en el diseño de una red real de alcantarillado con Algoritmos Genéticos y rutina de trazo	Estocástico
2022	Becerril-Lara J.M., Salinas Tapia H., Díaz Delgado C. & Álvarez Mejía A.C.	Uso de la teoría de Grafos para el trazo y diseño de una red de drenaje pluvial	Determinístico

Objetivo general

- Realizar la optimización de un colector minimizando el costo de construcción y cumpliendo con las restricciones hidráulicas.

Para cumplir con el objetivo general, se tienen, los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar un programa en Matlab que permita llevar a cabo el diseño.
- Comparar los costos de construcción de la infraestructura existente contra los costos obtenidos con los métodos de optimización.

1 Sistemas de alcantarillado

Se denomina sistema de alcantarillado al conjunto de tuberías y obras cuyo objetivo es el de recolectar, conducir y evacuar los escurrimientos superficiales (producto de las lluvias), así como las aguas residuales.

1.1 Clasificación

De acuerdo con la Conagua (2019, pág. 1), los sistemas de alcantarillado se clasifican en:

- I. **Alcantarillado separado:** aquél en donde es independiente el desalojo del agua residual y pluvial.
 - a) Alcantarillado sanitario: se trata del sistema cuyo objetivo es el de conducir únicamente las aguas residuales producidas por las actividades domésticas y la industria.
 - b) Alcantarillado pluvial: sistema encargado de recolectar y conducir el escurrimiento superficial producido por la precipitación.

- II. **Alcantarillado combinado:** conduce simultáneamente las aguas residuales, domésticas e industriales y de lluvia.

El uso de sistemas de alcantarillado combinado puede ser considerada como una solución económica inicial, sin embargo, desde el punto de vista del tratamiento de aguas y el saneamiento, dicha alternativa no resulta adecuada.

1.2 Criterios de diseño

Al diseñar una red de alcantarillado, se busca optimizar los costos constructivos, asegurando que la red sea funcional manteniendo un equilibrio entre la operación y el mantenimiento (CONAGUA, 2019). Además, debe considerarse lo siguiente:

- Elaborar la planeación general del sistema, así como definir las rutas más óptimas de los colectores, tomando en cuenta la viabilidad técnica y económica.
 - La conducción del agua por el sistema deberá ser a gravedad. El uso de cárcamos de bombeo se realizará en aquellos casos donde la zona sea plana y éste se colocará en el
 - punto topográficamente más bajo.
- a) Velocidades de diseño

Las velocidades de diseño son aquellas en las cuales se evita la sedimentación y el azolve, así como la erosión en las tuberías (CONAGUA, 2019, pág. 72)

Velocidad mínima: se refiere a la velocidad en la cual se evite la sedimentación, provocando con ello azolves o taponamientos. La velocidad mínima permisible es de 0.3 m/s, para un gasto mínimo de 1 l/s.

Velocidad máxima: velocidad con la cual se busca evitar la erosión en las paredes de la tubería. En la Tabla 2 se presenta la velocidad máxima permisible según el tipo de material de la tubería.

Tabla 2. Velocidad máxima permisible en tubos de drenaje. Fuente: (CONAGUA, 2019, pág. 73)

Material	Velocidad [m/s]	
	Máxima	Mínima
Acero	5.00	0.30
Concreto reforzado	3.50	0.30
Concreto simple	3.50	0.30
Fibrocemento	5.00	0.30
Poliétileno de alta densidad (PEAD)	5.00	0.30
Poli (cloruro de vinilo) (PVC)	5.00	0.30
Poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV)	No se indica	0.30

b) Tirantes mínimos y máximos permisibles

Debe asegurarse que el tirante calculado tenga un valor mínimo de 1.0 cm, en caso de pendientes fuertes, y de 1.5 cm, en casos normales. (CONAGUA, 2019, pág. 72) En el caso del tirante máximo, en el diseño de redes de alcantarillado debe garantizarse que el sistema no trabaje a presión.

c) Pendientes de diseño mínima y máxima

El objetivo de limitar las pendientes es evitar, al igual que con las velocidades, el azolve y la erosión en las tuberías. Hasta donde sea posible, las pendientes deberán seguir el perfil del terreno esto con la finalidad de tener un menor volumen de excavación; sin dejar de considerar las restricciones de tirantes y velocidades (CONAGUA, 2019, pág. 73), en la Tabla 3, se presentan las pendientes mínimas para cada diámetro de tubería.

Tabla 3. Pendiente mínima en tubos de drenaje. Fuente: (CONAGUA, 2019, pág. 75)

Diámetro tubería		Pendiente mínima
[cm]	[m]	[milésimas]
30	0.30	2.0
38	0.38	1.5
45	0.45	1.2
60	0.6	0.8
76	0.76	0.6
91	0.91	0.5
107	1.07	0.4
122	1.22	0.3
152	1.52	0.3
183	1.83	0.2
213	2.13	0.2
244	2.44	0.2
305	3.05	0.1

d) Diámetro mínimo

Se ha observado que, para evitar obstrucciones, el diámetro mínimo en un sistema de alcantarillado separado será de 200 mm (8"), sin embargo, puede ser de 300 mm (12") cuando las condiciones específicas de la zona o la reglamentación local así lo establezcan. (CONAGUA, 2019, pág. 73)

e) Geometría de la zanja

Las características del terreno, la topografía y el material de la tubería definirán como se instalarán las tuberías (superficialmente, enterradas o combinación de ambas) (CONAGUA, 2019, pág. 75)

- Profundidad mínima de la zanja o colchón mínimo: se establece con la finalidad de evitar rupturas en los tubos debido a cargas vivas, además, a esta profundidad se debe permitir la conexión del 100 por ciento de las descargas domiciliarias. En la Tabla 4, se indica el colchón mínimo para los diferentes diámetros comerciales.

Tabla 4. Colchón mínimo en tubería de drenaje.

Fuente: (CONAGUA, 2019)

Diámetro tubería			Colchón mínimo
[mm]	[in]	[m]	[m]
300	12	0.30	0.90
350	14	0.35	0.90
400	16	0.40	0.90
450	18	0.45	1.10
500	20	0.50	1.10
600	24	0.60	1.10
750	30	0.75	1.10
900	36	0.90	1.10

- Profundidad máxima: es determinada por la topografía del lugar. Se recomienda no excavar demasiado.

2 Aspectos básicos de hidráulica e hidrología

Se le llama precipitación al proceso mediante el cual el agua cae (o se precipita) de la atmósfera a la superficie de la tierra, puede ser en forma de lluvia (precipitación pluvial), nieve o granizo. La cantidad de los escurrimientos superficiales está directamente relacionada con la intensidad de la precipitación. Por lo tanto, los estudios de drenaje parten del análisis de la precipitación para estimar los gastos de diseño y posteriormente dimensionar la infraestructura de drenaje. (Mendoza F., 2001, pág. 87)

En nuestro país, los pluviómetros y pluviógrafos son los aparatos más usuales para medir la precipitación. Los primeros permiten medir la precipitación acumulada en 24 horas, mientras que los pluviógrafos permiten un registro continuo de la precipitación, lo que resulta más útil en el diseño de obras de drenaje.

Desde el punto de vista de la hidrología, dentro de las características más importantes de la precipitación se encuentran: la altura o intensidad, distribución espacial, distribución temporal y la frecuencia o probabilidad de ocurrencia (Aparicio M, 1992, pág. 176).

2.1 Análisis de precipitación

Debido a la variación espacial de la lluvia y a la forma en que los pluviómetros y pluviógrafos registran la lluvia puntual (aquella que se produce en el punto donde se encuentra instalado el aparato), es necesario obtener la lluvia media en la zona de estudio.

Para calcular la lluvia media, los 3 métodos más usados son:

- Método aritmético
- Polígonos de Thiessen
- Método de las isoyetas

El método aritmético resulta ser el más simple, debido a que no considera la distribución de las estaciones en la cuenca, así como tampoco considera la distribución espacial de la lluvia pues asigna el mismo peso a los registros de precipitación. Por otra parte, los Polígonos de Thiessen toman en cuenta la distribución espacial de las estaciones, pero no considera los factores topográficos ni de ningún otro tipo que pueden afectar en la distribución de la lluvia. Finalmente, el más preciso de los tres métodos es el de las Isoyetas, pues estas son dibujadas de tal manera que se toman en consideración los efectos topográficos que afectan la distribución espacial de la precipitación (Aparicio M, 1992, pág. 145)

2.1.1 Intensidad y duración

La intensidad de lluvia se define como la altura de lluvia acumulada por unidad de tiempo (generalmente es mm/h), mientras que la duración es el intervalo de tiempo en el que ocurre la lluvia (en minutos).

2.1.2 Curvas hp-A-d

Las curvas de precipitación-área-duración se utilizan para evaluar el potencial de precipitación en una determinada área y son uno de los métodos más sencillos para trasponer tormentas de un lugar a otro. Estas curvas permiten extrapolar los valores máximos esperados, facilitando así su aplicación en estudios de estimación de avenidas (Aparicio M, 1992, pág. 153)

2.1.3 Curvas i-d-T

Debido a que las mediciones de la precipitación en una estación son de tipo puntual y que permiten conocer la variación de la misma con respecto al tiempo. Se puede realizar un análisis, en donde se puede determinar el

periodo de retorno de las mismas. Mendoza (2001) establece un proceso para calcular las curvas i-d-T con los datos registrados en pluviógrafos:

- Se define una duración
- De cada tormenta registrada se obtiene la máxima intensidad de la lluvia para la duración definida en el inciso a.
- Se obtiene, para cada año de registro, el máximo de los valores obtenidos en el inciso b.

Se regresa al primer inciso tantas veces como duraciones se definieron.

- Con los valores obtenidos en los 4 primeros pasos se forma una tabla tal como la que se muestra en la Tabla 5

Tabla 5. Tabla ejemplo hp para curvas idT

Fecha	Minutos									
	5	10	15	20	30	45	60	80	100	120

La ecuación que relaciona las tres variables es:

$$i = \frac{k * T_r^m}{(d + c)^n} \quad (1)$$

Donde:

i intensidad de precipitación, en mm/h

T_r periodo de retorno, en años

d duración, en minutos

k, m, n, c parámetros que se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple

Si los datos registrados de i, d, T se dibujan en papel logarítmico, suelen alinearse alrededor de líneas rectas. Si estas líneas presentan una ligera curvatura, se ajustan añadiendo un valor constante "c" a la duración. En aquellos casos donde la pendiente de las líneas varíe significativamente, se podrá dividir cada línea correspondiente al periodo de retorno en dos segmentos rectos. Si los datos se agrupan adecuadamente en torno a las líneas rectas, el valor de c se considerará cero quedando la ecuación (2):

$$i = \frac{k * T_r^m}{d^n} \quad (2)$$

Otra manera de obtener las precipitaciones de diseño es como se plantea en el "Tomo II. Análisis estadístico regional de precipitaciones máximas anuales registradas en más de 2,000 estaciones pluviométricas", el cual pertenece al "Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la República Mexicana", el cual fue elaborado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM para el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2017), en el cual se realizó un análisis a partir de la información de 2,380 pluviómetros, con los cuales es posible estimar las precipitaciones de diseño asociadas a diversos periodos de retorno. En el caso de precipitaciones con duración menor a 1 día, se utiliza el concepto de "convectividad", además de considerar la topografía e información climatológica del entorno de cada estación.

2.2 Relación lluvia – escurrimiento

Frecuentemente, no se dispone de registros suficientes de escurrimiento en el área de interés para el diseño y operación de las obras hidráulicas. Por lo general, hay una mayor disponibilidad de datos de precipitación en comparación con los de escurrimiento, y estos últimos no se ven afectados por los cambios en la cuenca. Por lo tanto, resulta de utilidad emplear métodos que permitan estimar los escurrimientos en una cuenca empleando las características de la misma, así como los datos de la precipitación (Aparicio M, 1992, pág. 203)

Los principales parámetros que intervienen en la relación lluvia-escurrimiento son: área de la cuenca, altura de precipitación, características fisiográficas de la cuenca, distribución espacial y temporal de la lluvia.

2.2.1 Fórmula de Chen

En 1983, Chen (Chen, 1983), propuso una fórmula para estimar la intensidad de lluvia, la cual se muestra en la ecuación (3):

$$R_t^{T_r} = \frac{a * R_1^{10} * \log \left(10^{(2-x)} * T_r^{(x-1)} \right)}{(t + b)^c} \quad (3)$$

Donde:

$R_t^{T_r}$ intensidad de lluvia en mm/h para un periodo de retorno de T_r años y una lluvia de t minutos de duración

T_r periodo de retorno, en años

a, b y c parámetros que dependen del lugar y de la relación $\frac{R_1^{10}}{R_{24}^{10}}$, los cuales se determinan por el nomograma propuesto por Chen (Figura 1).

R_1^{10} lluvia asociada a 10 años de periodo de retorno y una duración de 1 hora, en mm

R_{24}^{10} lluvia asociada a 10 años de periodo de retorno y una duración de 24 horas, en mm

Para la aplicación de la ecuación propuesta por Chen, es necesario considerar las siguientes relaciones:

- Lámina de lluvia-duración (denominado por algunos autores como Factor de Convectividad):

$$R = \frac{R_1^{T_r}}{R_{24}^{T_r}} \quad (4)$$

Donde:

$R_1^{T_r}$ precipitación acumulada en una hora y periodo de retorno T_r

$R_{24}^{T_r}$ precipitación acumulada en 24 horas y periodo de retorno T_r

- Lámina de lluvia-periodo de retorno:

$$X = \frac{R_t^{100}}{R_t^{10}} \quad (5)$$

Donde:

R_t^{100} precipitación en el tiempo t (minutos) y periodo de retorno de 100 años

R_t^{10} precipitación en el tiempo t (minutos) y periodo de retorno de 10 años

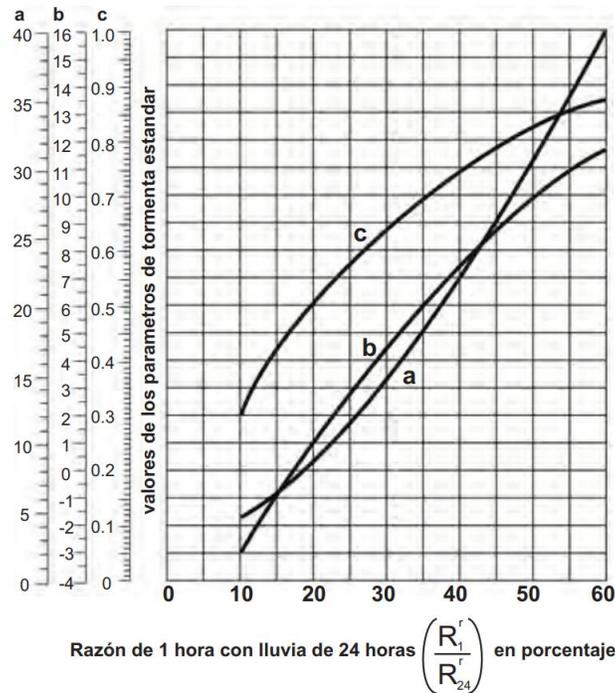


Figura 1. Nomograma de Chen (Chen, 1983)

Para estimar la precipitación con duración de 24 horas asociados a cualquier periodo de retorno, Chen establece (6):

$$R_{24}^{Tr} = R_{24}^{10} * \log \left(10^{(2-X)} * T_r^{(X-1)} \right) \quad (6)$$

Donde:

R_{24}^{Tr} precipitación acumulada en 24 horas y periodo de retorno T_r

R_{24}^{10} precipitación acumulada en 24 horas y periodo de retorno de 10 años, generada mediante las funciones de distribución

Si de la ecuación (4), despejamos R_1^{Tr} y se plantea para un periodo de retorno de 10 años, se tiene (7):

$$R_1^{10} = R * R_{24}^{10} \quad (7)$$

Al sustituir (7) en la ecuación (3):

$$R_t^{T_r} = \frac{a * R * R_{24}^{10} * \log \left(10^{(2-x)} * T_r^{(x-1)} \right)}{(t + b)^c}$$

Se tiene que $R_{24}^{10} * \log \left(10^{(2-x)} * T_r^{(x-1)} \right)$ de acuerdo a la ecuación (6) es igual a $R_{24}^{T_r}$

Finalmente, la precipitación para un periodo de retorno de T_r años y t minutos de duración y mediante los valores de precipitaciones máximas ajustadas a una función de distribución, la ecuación de Chen queda definida (8):

$$R_t^{T_r} = \frac{a * R * R_{24}^{T_r}}{(t + b)^c} * \left(\frac{t}{60} \right) \quad (8)$$

2.2.2 Método Racional

El Método Racional es muy utilizado en el diseño de drenajes urbanos, además de ser posiblemente el modelo más antiguo que relaciona la lluvia y el escurrimiento, esta toma en cuenta el área de la cuenca y la intensidad o altura de precipitación.

En una cuenca no impermeable, sólo una parte de la lluvia con intensidad “ i ” escurre directamente hasta la salida. Si se acepta que, durante una lluvia, o al menos una vez que se ha establecido el gasto de equilibrio, no cambia la capacidad de infiltración en la cuenca (Aparicio M, 1992, pág. 209), la fórmula racional es:

$$Q_p = 0.278 * C * i * A_c \quad (9)$$

Donde:

- Q_p gasto pico, en m^3/s
- C coeficiente de escurrimiento, adimensional
- i intensidad de la lluvia (generalmente se considera para una duración igual al t_c), en mm/h
- A_c área de la cuenca, en km^2

2.2.3 Coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento indica la proporción de la lluvia que se convierte en escurrimiento directo. Este coeficiente varía entre 0 y 1 y puede cambiar de una cuenca a otra y de una cuenca a otra, dependiendo de las condiciones de humedad inicial. No obstante, se suele utilizar valores representativos de C basados en las características específicas de las cuencas y cabe señalar que estos valores suelen ser conservadores con la finalidad de asegurar la seguridad en los diseños. (Aparicio M, 1992, pág. 209)

Para cuencas urbanas, el coeficiente de escurrimiento (DGCOH, 1982), se calcula como se muestra en la ecuación (10):

$$C = C_n * \frac{A_{nu}}{A_T} + 0.45 * \frac{A_u}{A_T} * I_u \quad (10)$$

Donde:

- C coeficiente de escurrimiento, adimensional
 C_n coeficiente de escurrimiento del área no urbanizada, adimensional
 A_u área urbana, en km^2
 A_{nu} área no urbana, en km^2
 A_T área total, en km^2
0.45 coeficiente de escurrimiento del área urbanizada, adimensional
 I_u índice de urbanización (entre 0 y 1), adimensional

En la Tabla 6, se presentan valores del coeficiente de escurrimiento para distintos tipos de áreas drenadas.

Tabla 6. Valores del coeficiente de escurrimiento. Fuente: (Aparicio M, 1992, pág. 210)

Tipo del área drenada	Coeficiente de escurrimiento	
	Mínimo	Máximo
Zonas comerciales		
Zona comercial	0.70	0.95
Vecindarios	0.50	0.70
Zonas residenciales		
Unifamiliares	0.30	0.50
Multifamiliares, espaciados	0.40	0.60
Multifamiliares, compactos	0.60	0.75
Semiurbanas	0.25	0.40
Casas habitación	0.50	0.70
Zonas industriales		
Espaciado	0.50	0.80
Compacto	0.60	0.90
Cementerios, parques	0.10	0.25
Campos de juego	0.20	0.35
Patios de ferrocarril	0.20	0.40
Zonas suburbanas	0.10	0.30
Calles		
Asfaltadas	0.70	0.95
De concreto hidráulico	0.70	0.95
Adoquinadas	0.70	0.85
Estacionamientos	0.75	0.85
Techados	0.75	0.95
Praderas		
Suelos arenosos planos (pendientes 0.02 o menos)	0.05	0.10
Suelos arenosos con pendientes medias (0.02-0.07)	0.10	0.15
Suelos arenosos escarpados (0.07 o más)	0.15	0.20
Suelos arcillosos planos (0.02 o menos)	0.13	0.17
Suelos arcillosos con pendientes medias (0.02-0.07)	0.18	0.22
Suelos arcillosos escarpados (0.07 o más)	0.25	0.35

2.2.4 Factor de convectividad

En México, uno de los problemas principales es la falta de información pluviométrica. Por ello, para relacionar las lluvias diarias máximas anuales con su distribución durante el día, es necesario utilizar métodos que describan el comportamiento de la precipitación. Para esto se emplea el factor de convectividad, también conocido como Factor R que relaciona las precipitaciones acumuladas en un día con las de una hora. En su trabajo González (2003) obtiene el factor de convectividad para la cuenca del Valle de México (Figura 2).

Para calcular el factor R (González A. , 2023), empleó la información de pluviógrafos del *Sistema de Aguas de la Ciudad de México* (SACMEX) para las tormentas más importantes ocurridas entre 1988 y 2008 para $\Delta t= 1h$.

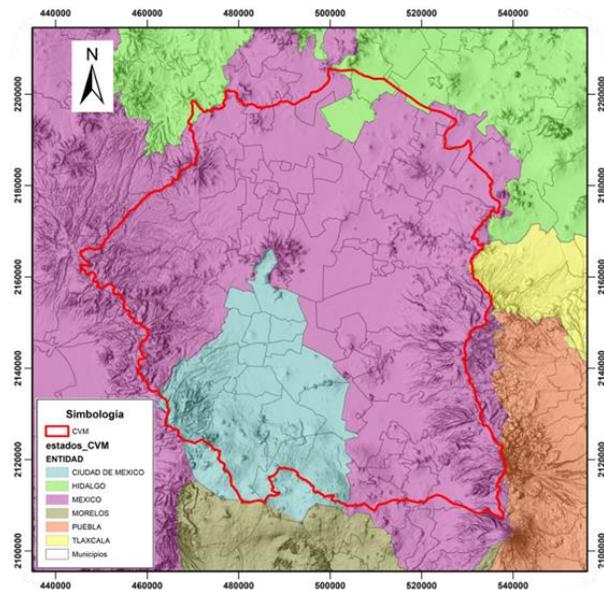


Figura 2. Cuenca del Valle de México. Fuente: (González A. , 2023, pág. 15)

Para obtener el coeficiente R se obtuvo el acumulado de 24 horas y el máximo de los valores horarios; posteriormente se obtuvo el factor R como el cociente de lluvia máxima acumulada en una hora entre el acumulado de un día (González A. , 2023)

Los valores promedio de las estaciones fueron ubicados geográficamente y se realizó una interpolación espacial utilizando el método de la distancia inversa ponderada (IDW) para así observar su variabilidad espacial, así como alguna relación de estos con las características de la Cuenca del Valle de México (CVM). Debido a que la información utilizada se encuentra medida a cada hora, estos valores no son realmente representativos de la lluvia que podría ocurrir durante una hora consecutiva sin importar el momento del día. Por lo que para corregir estos resultados se propuso utilizar la información disponible del Observatorio Hidrológico de la UNAM (OH-UNAM), estas estaciones cuentan con información medida a un $\Delta t=1$ minuto. (González A. , 2023)

Finalmente, en la Figura 3, se presenta el mapa de factor de convectividad en la Cuenca del Valle de México.

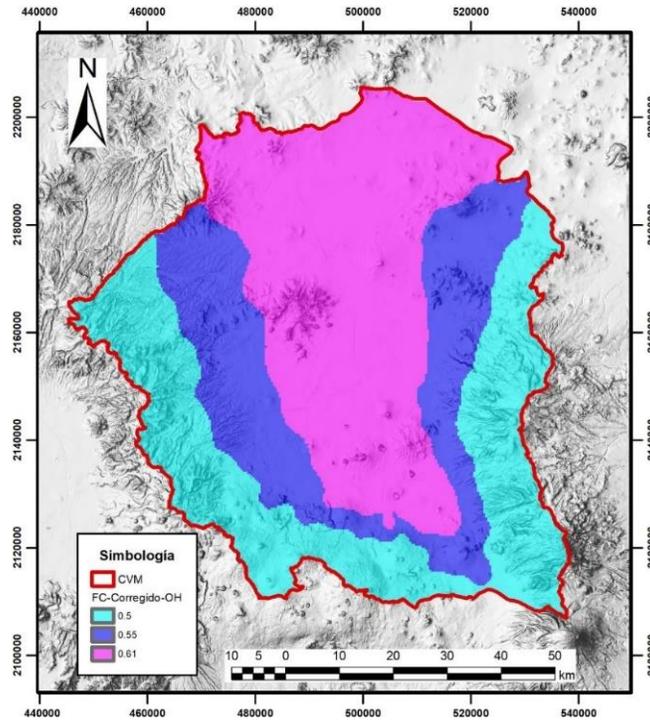


Figura 3. Mapa de factor de conectividad en la Cuenca del Valle de México.
Fuente: (González A. , 2023, pág. 70)

2.2.5 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es el tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio, y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca. (Aparicio M, 1992, pág. 208)

A continuación, se presenta el cálculo del tiempo de concentración para cuencas urbanas.

Soil Conservation Service (SCS)

El SCS desarrolló su ecuación como la suma de tiempos de viaje individual para diferentes regiones, desde zonas boscosas con cauces con pendientes altas a planicies con escorrentía lenta y zonas impermeables (Vélez U. & Botero G., 2010, pág. 61), como se presenta en la ecuación (11).

$$t_c = \frac{0.057 * L_p^{0.8} * [(1000/NC) - 9]^{0.7}}{S^{0.5}} \quad (11)$$

Donde:

- t_c tiempo de concentración, en h
- L_p longitud del cauce, en km
- NC número de curva
- S pendiente promedio del cauce principal, en m/m

Federal Aviation Agency, FAA

La ecuación de la *Federal Aviation Agency* se emplea para cuencas urbanas asociadas a aeropuertos de los Estados Unidos (Vélez U. & Botero G., 2010, pág. 61):

$$t_c = 0.0543 * (1.1 - C) * \frac{(L * 1000)^{0.5}}{(S * 100)^{0.333}} \quad (12)$$

Donde:

- t_c tiempo de concentración, en h
- C coeficiente de escurrimiento del método racional, adimensional
- L longitud del curso de agua más largo, en km
- S pendiente promedio del cauce principal, en m/m

Instrucción de carreteras en España

En España, de acuerdo a la Norma 5.2-IC de drenaje superficial, se establece que el tiempo de concentración (Ministerio de Fomento, 2016), es como se indica en la ecuación (13):

$$t_c = 0.3 * \frac{L_c^{0.76}}{S^{0.19}} \quad (13)$$

Donde:

- t_c tiempo de concentración, en h
- L_c longitud cauce principal, en km
- S pendiente media del cauce principal, en m/m

Carter

Está datada con cuencas urbanas de los Estados Unidos con áreas menores a 20.72 km² y pendientes menores a 0.5%. Se presenta en la ecuación (14) (Azazian, 2018):

$$t_c = 0.0977 * \frac{L_c^{0.6}}{S^{0.20}} \quad (14)$$

Donde:

- t_c tiempo de concentración, en h
- L_c longitud cauce principal, en km
- S pendiente media del cauce principal, en m/m

2.2.6 Hidrograma Unitario

Aparicio define al hidrograma unitario como el hidrograma de escurrimiento directo que se produce por una lluvia efectiva o en exceso de lámina unitaria, de duración d_e , y repartida uniformemente en la cuenca (1992, pág. 211-212).

El hidrograma unitario fue desarrollado en 1932 por Sherman y se basa en las siguientes hipótesis:

- Tiempo base constante:** la duración del escurrimiento directo se repite para tormentas con una misma duración de lluvia efectiva, por esta razón, cada hidrograma unitario está necesariamente ligado a una duración de lluvia en exceso.
- Linealidad o proporcionalidad:** las ordenadas de los hidrogramas de escurrimiento directo con una misma duración de lluvia efectiva son directamente proporcionales al volumen total de esa lluvia.
- Superposición de causas y efectos:** el hidrograma que resulta de un periodo de lluvia dado puede superponerse a hidrogramas resultantes de periodos lluviosos precedentes.

2.2.7 Hidrograma adimensional SCS

Para estimar los gastos máximos en cuencas rurales y urbanas, es recomendable emplear el procedimiento establecido por el *Soil Conservation Service* (SCS) de Estados Unidos.

El hidrograma adimensional SCS es un hidrograma sintético en donde el gasto se expresa por la relación de caudal unitario “q” con respecto al gasto unitario pico “ q_p ” y el tiempo por la relación del tiempo “t” con respecto al tiempo de ocurrencia del pico en el hidrograma unitario “ t_p ”.

La forma del hidrograma se obtiene a partir de los puntos de la curva mostrada en la Figura 4 y tomando como base algunos cálculos del hidrograma triangular (Aparicio M, 1992, págs. 232-234). El procedimiento es el siguiente (Aparicio M, 1992):

- Cálculo del gasto de pico unitario:

$$q_p = \frac{0.555 * A}{t_b} \quad (15)$$

Donde:

q_p gasto de pico unitario, en $m^3/s/mm$

A área de la cuenca, en km^2

t_b tiempo base, en h

El tiempo base y el tiempo de pico (t_p), están relacionados por:

$$t_b = 2.67 * t_p \quad (16)$$

- Cálculo del tiempo de pico:

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r \quad (17)$$

$$t_r = 0.6 * t_c \quad (18)$$

Donde:

t_c tiempo de concentración, en h

t_r tiempo de retraso, en h

d_e duración en exceso, en h

En cuencas pequeñas, se tiene que:

$$d_e = t_c \quad (19)$$

- c) Definición de pares ordenados (t,q) correspondientes a los puntos del hidrograma unitario buscado. Se multiplicarán respectivamente, las ordenadas y abscisas

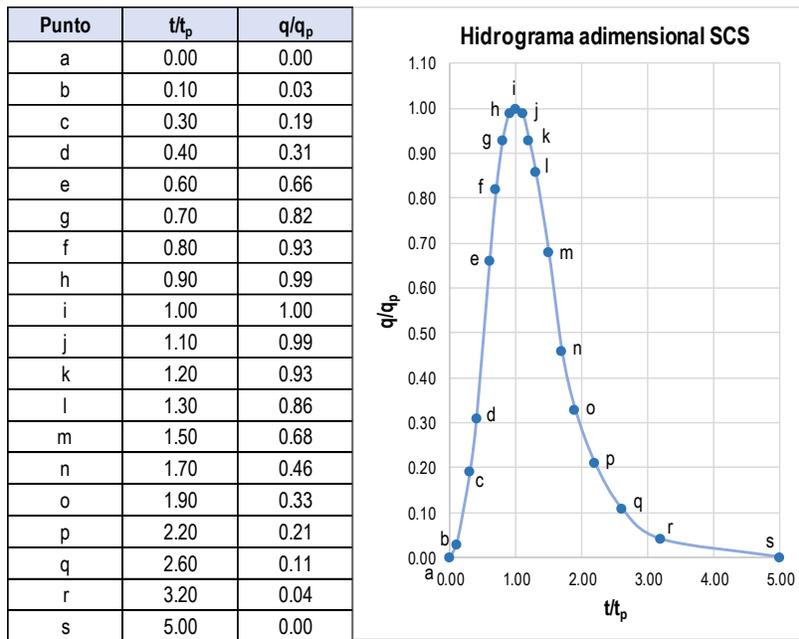


Figura 4. Hidrograma adimensional SCS. Fuente: (Aparicio M, 1992, pág. 235)

Finalmente, el gasto de pico Q_p de un hidrograma de escurrimiento directo puede expresarse como se presenta en la ecuación (20).

$$Q_p = q_p * P_e \quad (20)$$

Donde:

Q_p gasto de pico, en m^3/s

q_p gasto de pico unitario, en $m^3/s/mm$

P_e precipitación efectiva, en mm

2.2.8 Precipitación efectiva – Método de los números de escurrimiento

El *U.S. Soil Conservation Service* propone el método llamado “de los números de escurrimiento” (U.S. Soil Conservation Service, 1957), el método relaciona la lluvia total y el número de escurrimiento. El cálculo de la precipitación efectiva se presenta en la ecuación (21).

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{508}{N} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32} \quad (21)$$

Donde:

P_e precipitación efectiva, en cm

P precipitación total, en cm

N número de escurrimiento (consultar en la tabla 7.3, pág. 188 de (Aparicio M, 1992)).

3 Métodos de optimización

La optimización se refiere a encontrar la mejor solución o resultado posible para un problema específico. En el ámbito de la modelación, se traduce como la creación de modelos prescriptivos que señalen el mejor curso de acción o diseño de una manera eficiente, tomando en cuenta, además, las restricciones del mundo físico y manteniendo los costos bajos. (Chapra & Canale, 2007, pág. 354)

Un problema de programación matemática u optimización generalmente se puede establecer como:

Determinar x , que minimiza o maximiza $f(x)$

Sujeto a

$$d_i(x) \leq a_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$e_i(x) \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, p$$

Donde:

x vector de diseño n-dimensional

$f(x)$ es la función objetivo

$d_i(x)$, $e_i(x)$ restricciones de desigualdad

a_i y b_i constantes

Cuando se incluyen restricciones, se tiene un problema de optimización restringido; de otra forma, se trata de un problema de optimización no restringido (Chapra & Canale, 2007).

3.1 Clasificación

Los problemas de optimización se clasifican considerando la forma de $f(x)$ (Chapra & Canale, 2007, pág. 359):

- Si $f(x)$ y las restricciones son lineales, se trata de un problema de programación lineal.
- Si $f(x)$ es cuadrática y las restricciones son lineales, tenemos un problema de programación cuadrática.
- Si $f(x)$ no es lineal ni cuadrática y/o las restricciones no son lineales, tenemos un problema de programación no lineal.

Otra forma de clasificar los problemas de optimización es según su dimensionalidad. Los problemas unidimensionales involucran funciones que dependen de una sola variable independiente. Los multidimensionales implican funciones que dependen de dos o más variables independientes (Chapra & Canale, 2007, pág. 360).

Identificar si un extremo (máximo o mínimo) global de un extremo (máximo o mínimo) local puede ser un desafío complicado (ver Figura 5). Para abordar este problema, se pueden emplear 3 métodos comunes. Primero, es posible obtener una idea del comportamiento de funciones unidimensionales mediante una representación gráfica. Segundo, se puede encontrar un valor óptimo probando una amplia gama de valores iniciales, que a menudo se generan aleatoriamente, y luego elegir el mejor como el óptimo global. Finalmente, se puede variar el punto de inicio asociado con un extremo local para ver si el proceso de optimización alcanza un mejor resultado o si siempre regresa al mismo extremo (Chapra & Canale, 2007, pág. 363)

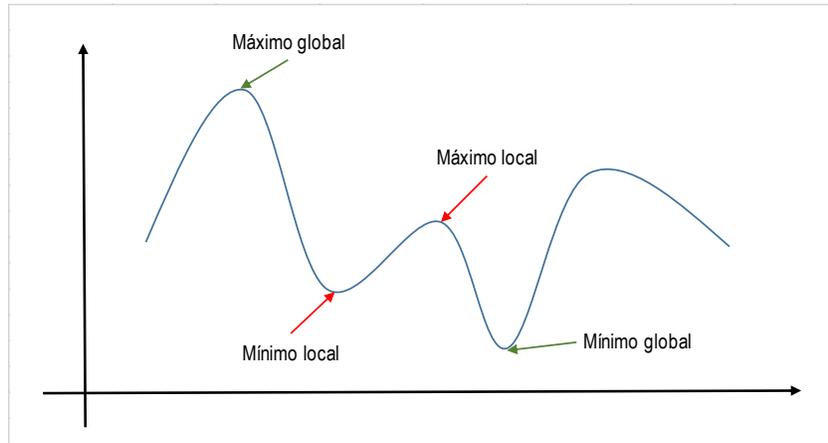


Figura 5. Extremos globales y locales. Fuente: *Diseño propio*.

3.2 Número Áureo

La búsqueda por sección dorada es un ejemplo de método cerrado que depende de los valores iniciales que encierran un solo valor óptimo (Figura 6).

La razón dorada se relaciona con la sucesión de los números de Fibonacci, donde cada número después de los dos primeros representa la suma de los dos precedentes (Chapra & Canale, 2007, pág. 364).

$$0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, \dots$$

Una característica notable de la sucesión de Fibonacci es la relación entre los números consecutivos de la serie. Por ejemplo, al calcular las razones de estos números, obtenemos: $0/1=0$, $1/1=1$, $1/2=0.5$, $2/3=0.667$, $3/5=0.6$, $5/8=0.625$, $8/13=0.615$, y así sucesivamente. Observamos que a medida que avanzamos en la sucesión, la razón entre los números consecutivos se aproxima cada vez más al número áureo, que es aproximadamente 0.61803 (Chapra & Canale, 2007, pág. 366)

La técnica de optimización utilizada es el método del Número Áureo (Chapra & Canale, 2007, pág. 366) el cual parte de un intervalo que contenga el máximo o mínimo. En este intervalo se determinan dos valores intermedios. Las ecuaciones correspondientes se presentan de la (22) a la (24).

$$d = \frac{\sqrt{5} - 1}{2}(x_u - x_l) \quad (22)$$

$$x_1 = x_l + d \quad (23)$$

$$x_2 = x_u - d \quad (24)$$

Donde:

$\frac{\sqrt{5}-1}{2}$ número Áureo (≈ 0.61803)

d fracción del intervalo, en proporción de la relación áurea.

x_u, x_l valores del intervalo

x_1, x_2 valores intermedios

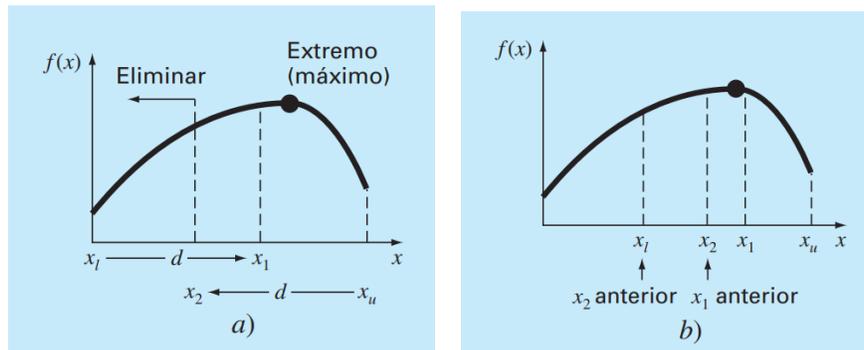


Figura 6. Número Áureo. Fuente: (Chapra & Canale, 2007, pág. 367)

La función se evalúa en estos dos puntos interiores (Chapra & Canale, 2007, pág. 366), donde:

Para Maximizar:

Caso 1: Si $f(x_1) > f(x_2)$, entonces el dominio de x a la izquierda de x_2 , de x_l a x_2 , se puede eliminar, ya que no contiene el máximo. En este caso, x_2 será el nuevo x_l y x_1 será el nuevo x_2 en la siguiente vuelta.

Caso 2: Si $f(x_2) > f(x_1)$, entonces el dominio de x a la derecha de x_1 , de x_1 a x_u , podrá eliminarse. En este caso, x_1 será el nuevo x_u y x_2 será el nuevo x_1 en la siguiente iteración.

Para Minimizar:

Caso 1: Si $f(x_1) < f(x_2)$, entonces el dominio de x a la izquierda de x_2 , de x_l a x_2 , se puede eliminar, ya que no contiene el mínimo. En este caso, x_2 será el nuevo x_l y x_1 será el nuevo x_2 en la siguiente vuelta.

Caso 2: Si $f(x_2) < f(x_1)$, entonces el dominio de x a la derecha de x_1 , de x_1 a x_u , podrá eliminarse. En este caso, x_1 será el nuevo x_u y x_2 será el nuevo x_1 en la siguiente iteración.

3.3 Nelder-Mead

El método de Nelder-Mead, es un método geométrico, desarrollado para hallar el mínimo de una función de varias soluciones locales. El método utiliza un cuerpo geométrico (de $n+1$ vértices o incógnitas) llamado simplex, en el caso de 2 dimensiones corresponde a un triángulo, mientras que en 3 dimensiones es un tetraedro.

El método consiste (como ejemplo para dos dimensiones), en comparar los valores de la función en los vértices y sustituir el peor vértice, aquél que $f(x,y)$ es mayor (en el caso de minimizar), por un vértice nuevo. Esto da lugar a un nuevo triángulo, y el proceso de búsqueda continúa. A medida que se genera una serie de triángulos, los valores de la función tienden a disminuir. El tamaño de los triángulos se va reduciendo, y cuando los vértices se encuentran bastante cerca, se ha encontrado el mínimo (Mathews & Fink, 2000, pág. 440)

La optimización se efectúa mediante 4 operaciones: Reflexión, Expansión, Contracción y Encogimiento (Mathews & Fink, 2000).

Para iniciar el procedimiento, es necesario partir de un triángulo inicial, cuyos vértices son $V_k = (x_k, y_k)$, $k=1, 2, 3$. Entonces se evalúa la función $f(x,y)$ en cada uno de los vértices y obtendremos $z_k = f(x_k, y_k)$ para $k=1, 2, 3$.

Herrera et ál. (2012), establecen la forma de calcular las cuatro operaciones correspondientes al Método de Nelder-Mead, los cuales se presentan a continuación:

Reflexión

Una vez evaluados los vértices, se selecciona el mejor (denominado "M"), el peor (definido como "P") y el vértice intermedio que suele designarse con la letra B.

Debido que la función decrece en sentido de P a M, o de P a B, es de esperar que se obtengan mejores resultados al situarse al otro lado del segmento MB, por lo tanto, se busca reflejar el vértice P.

La operación de reflexión para encontrar el nuevo vértice (R) se indica en la ecuación (25).

$$R = (1 + \omega) * C - P \quad (25)$$

Donde:

- ω coeficiente de reflexión
- C centro del segmento MB

Expansión

Si el vértice denominado R es una mejor solución que el vértice P, se puede pensar que en un punto más alejado de R sea aún una mejor solución. Por lo tanto, se busca expandir el vértice R a un punto más alejado, a este vértice se le denomina usualmente con la letra E. La operación de expansión se presenta en la ecuación (26).

$$E = \beta * C + (1 - \beta) * R \quad (26)$$

Donde:

- β coeficiente de expansión

Contracción

Cuando la reflexión no mejora la solución, se procede a realizar una contracción (T), lo cual se refiere a acercar el vértice P al segmento MB. La forma de calcular la contracción se muestra en la ecuación (27). Puede haber contracción interna (T-) y externa (T+).

$$T = \gamma * P + (1 - \gamma) * M \quad (27)$$

Donde:

- γ coeficiente de contracción

Con la finalidad de acelerar la solución, se propone evaluar el reflejo del punto T. Para encontrar el reflejo, solo es necesario sustituir el vértice R por el vértice T en la ecuación (25) (Mathews & Fink, 2000)

Encogimiento

Cuando ninguna de las tres alternativas (reflexión, expansión y contracción) mejoran el resultado, es necesario realizar el encogimiento o escalamiento, lo cual se refiere a acercar los vértices al vértice M. La expresión de encogimiento se indica en la ecuación (28).

$$V_i = \gamma * (M + V_i) \quad (28)$$

Donde:

V_i vértice cualquiera, a excepción del vértice M

Para los valores de las constantes ω , β y γ que típicamente se han usado y que han demostrado dar buenos resultados son de 1, 2 y 0.5 respectivamente. (Pérez L., 2005)

Gráficamente, las cuatro operaciones del método se presentan en la Figura 7, donde a) corresponde a la reflexión, b) a expansión, c) a la contracción y d) al encogimiento.

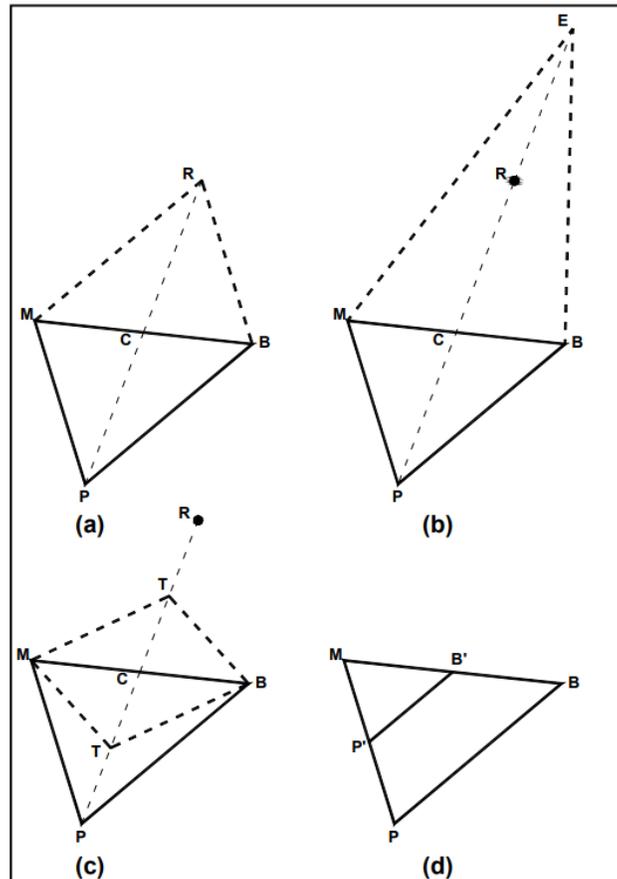


Figura 7. Ejemplo gráfico del método Nelder-Mead.
Fuente: (Herrera A., Domínguez M., & Arganis J., 2012, pág. 3)

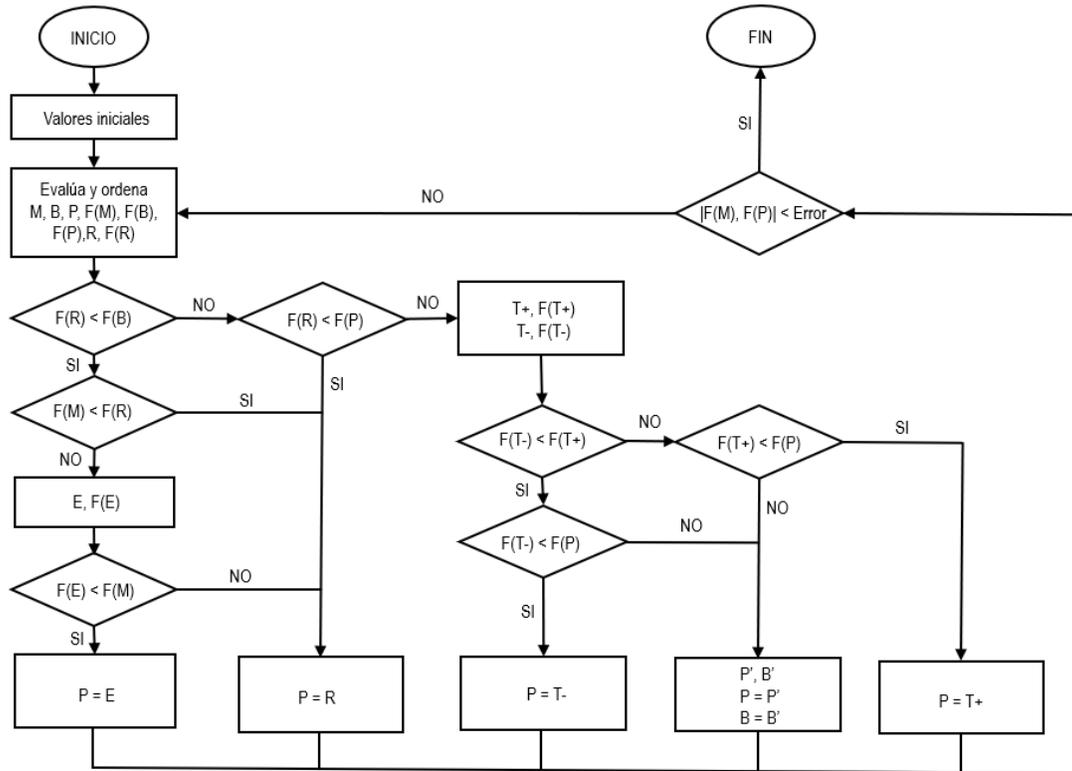


Figura 8. Algoritmo del método Nelder-Mead. Fuente: (Herrera A., Domínguez M., & Arganis J., 2012, pág. 3)

3.4 Algoritmos Genéticos

Hernández (2007) define como un algoritmo genético a aquella técnica de programación que emula el proceso de la evolución biológica para resolver problemas. Para un problema en particular, el algoritmo comienza con un conjunto de soluciones potenciales, que se codifican de cierta manera. Además, se emplea una métrica denominada función de aptitud, la cual permite evaluar de manera cuantitativa cada una de las soluciones candidatas. Dichas candidatas pueden ser soluciones previamente conocidas y efectivas que el algoritmo busca optimizar, aunque en muchos casos son generadas de manera aleatoria.

Posteriormente, del conjunto de candidatas generadas aleatoriamente, el algoritmo evaluará cada una de ellas con base en la función de aptitud. Como es de suponer, la mayoría de las candidatas no darán resultados efectivos y por tanto serán descartadas. No obstante, por pura casualidad algunas pocas podrían resultar prometedoras, aunque solo representen una aproximación débil e inexacta hacia la solución del problema. (Hernández A., 2007).

Las candidatas que arrojen mejores resultados se preservan y se les da la oportunidad de reproducirse. Se generan múltiples versiones de ellas, a pesar de que estas versiones no sean perfectas, ya que son introducidas modificaciones aleatorias durante la reproducción. Posteriormente, esta nueva generación avanza y se evalúa en función de su aptitud. Aquellas candidatas que han empeorado o no han mostrado mejoras debido a los cambios en su código son eliminadas. Sin embargo, las variaciones aleatorias pueden haber optimizado a algunos individuos, haciéndolos mejores soluciones al problema. Estos individuos destacados se seleccionan y se reproducen en la siguiente generación con nuevas modificaciones aleatorias, y el proceso se repite. Se espera que la aptitud promedio de la población mejore en cada ciclo, y al repetir este proceso cientos o miles de veces, es posible encontrar soluciones óptimas o muy cercanas a la solución ideal del problema (Hernández A., 2007).

Los operadores usados en el Algoritmo Genético simple son la cruce, mutación y copia.

Cruza

Forma un nuevo individuo combinando los cromosomas de los padres.

Cuando se usan números binarios, la cruce consiste en determinar una longitud o un número de elementos que conforman al individuo (cromosomas) y a partir de ahí se hace el intercambio de información entre los individuos (Figura 9).

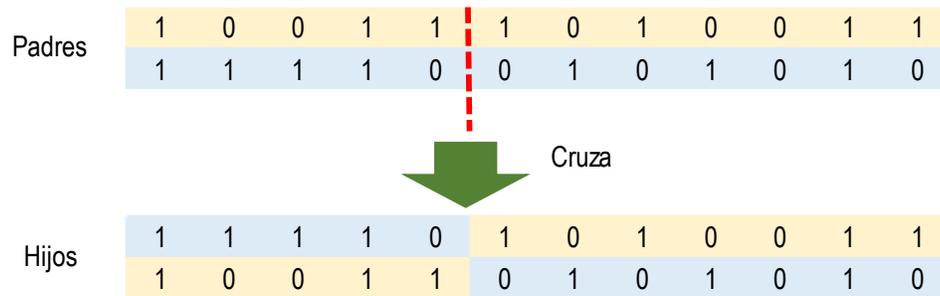


Figura 9. Operador cruce AG

Mutación

Obtiene un nuevo cromosoma alterando los genes del cromosoma padre como se muestra en la Figura 10.

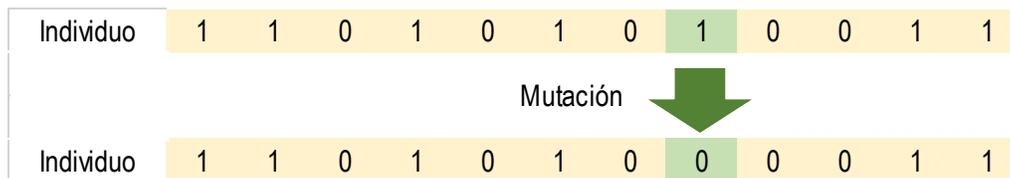


Figura 10. Operador mutación AG

Copia

Estrategia de reproducción asexual, se refiere a únicamente copiar un individuo a la nueva generación. Por algunos autores, también es llamado "Elitismo".

En la Figura 11, se presenta el diagrama del método con Algoritmos Genéticos.

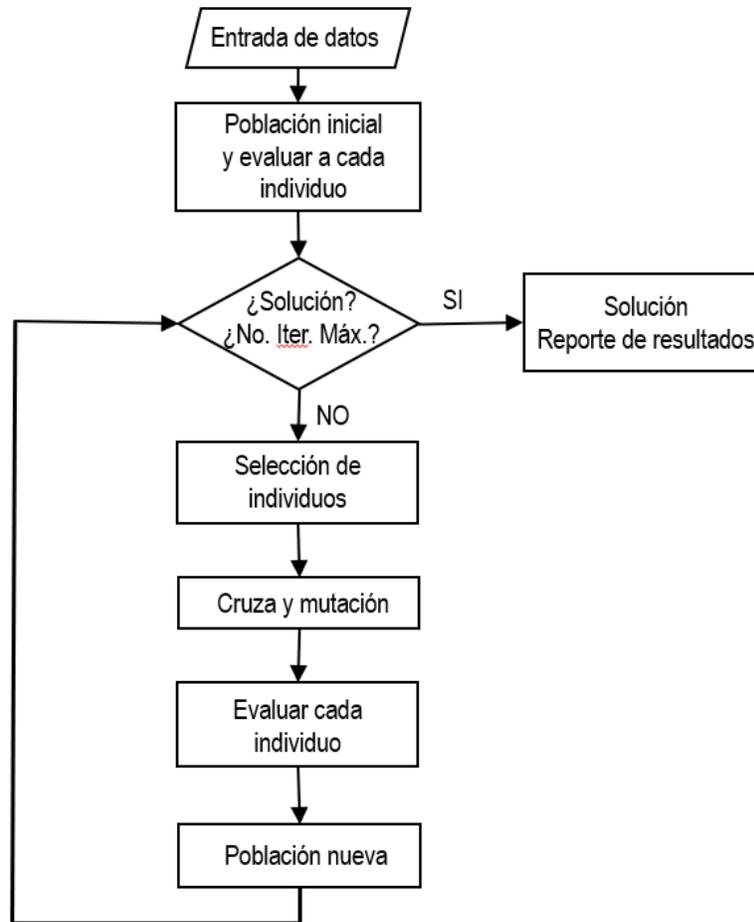


Figura 11. Algoritmo del método con Algoritmos Genéticos. Fuente: (Hernández A., 2007)

4 Zona de estudio

4.1 Datos básicos

La zona de estudio se localiza en la colonia Bramadero Ramos Millán en la alcaldía Iztacalco de la Ciudad de México. El colector inicia a una cota de 230.82 m (en calle Trigo) y se extiende por Av. Recreo durante 994.08 m hasta su punto final de descarga, en el cual se conecta a otro colector a una cota de plantilla de 227.96 m, el área total de la zona de estudio es de 0.2071 km². (Figura 12).



Figura 12. Localización de la zona de estudio. Fuente: *Elaboración propia*.

4.2 Gasto pico y generación de hidrogramas de entrada

Para la generación de los hidrogramas y el gasto pico, es necesario determinar las lluvias de diseño, por lo tanto, se localizan las estaciones pluviométricas y pluviográficas cercanas a la zona de estudio. En la Figura 13, se muestra la ubicación de la más cercana, la cual corresponde a la estación 09036 – Playa Caleta, operada por la Conagua y cuenta con registros desde 1968 y hasta 2017.

Los datos de precipitación diaria fueron descargados del Servicio Meteorológico Nacional (SNM) a cargo de la Conagua (SMN, Conagua, 2023), en la cual se puede consultar la información histórica de las estaciones climatológicas convencionales que forman parte de la Red Nacional.



Figura 13. Localización estación pluviométrica. Fuente: *Elaboración propia*.

Los datos máximos de precipitación por año en la estación Playa Caleta, se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Precipitaciones máximas anuales. Estación Caleta

Año	P _{máxima} [mm]	Año	P _{máxima} [mm]
1968	35.50	1993	45.00
1969	44.00	1994	39.80
1970	36.00	1995	37.00
1971	61.00	1996	45.00
1972	52.00	1997	35.50
1973	46.00	1998	26.00
1974	32.20	1999	24.50
1975	44.30	2000	8.30
1976	40.00	2001	95.00
1977	62.20	2002	70.70
1978	49.00	2003	40.10
1979	27.50	2004	35.50
1980	40.00	2005	50.10
1981	59.50	2006	50.00
1982	41.60	2007	68.00
1983	36.60	2008	56.00
1984	40.30	2010	56.40
1985	40.90	2011	38.50
1986	40.00	2012	49.60
1987	36.00	2013	64.10
1988	59.00	2014	42.00
1989	47.10	2015	34.20
1990	42.30	2016	24.60
1991	61.00	2017	11.60
1992	53.50		

En la Tabla 8, se presentan los parámetros estadísticos muestrales de los datos.

Tabla 8. Parámetros estadísticos muestrales

Características muestrales	
n	49
Media (x_{med})	44.39
Moda	35.50
Mediana	42.00
Varianza (S^2)	224.30
Desviación Estándar muestral (S)	14.98
Coefficiente Variación (cv)	0.34
Coefficiente de asimetría de Fisher (g)	0.51
Curtosis (k)	2.12

Una vez que se tienen las precipitaciones máximas, se obtienen los eventos de diseño mediante la función de distribución Gumbel (Tabla 10).

Tabla 9. Parámetros por Momentos F.D. Gumbel

Parámetros por Momentos (Gumbel)	
X_{med}	44.39
S	14.98
μ	37.65
α	11.68
Error	3.68

Tabla 10. Eventos de diseño - Precipitación - F.D. Gumbel

Eventos de diseño			
Tr	1/Tr	F(x)	P_T [mm]
2	0.5	0.5	41.93
5	0.2	0.8	55.17
10	0.1	0.9	63.94
20	0.05	0.95	72.35
50	0.02	0.98	83.23
100	0.01	0.99	91.39
200	0.005	0.995	99.51
500	0.002	0.998	110.23
1000	0.001	0.999	118.34
5000	0.0002	0.9998	137.14
10000	0.0001	0.9999	145.24

En la Figura 14, se muestran los datos medidos y calculados mediante la función de distribución Gumbel.

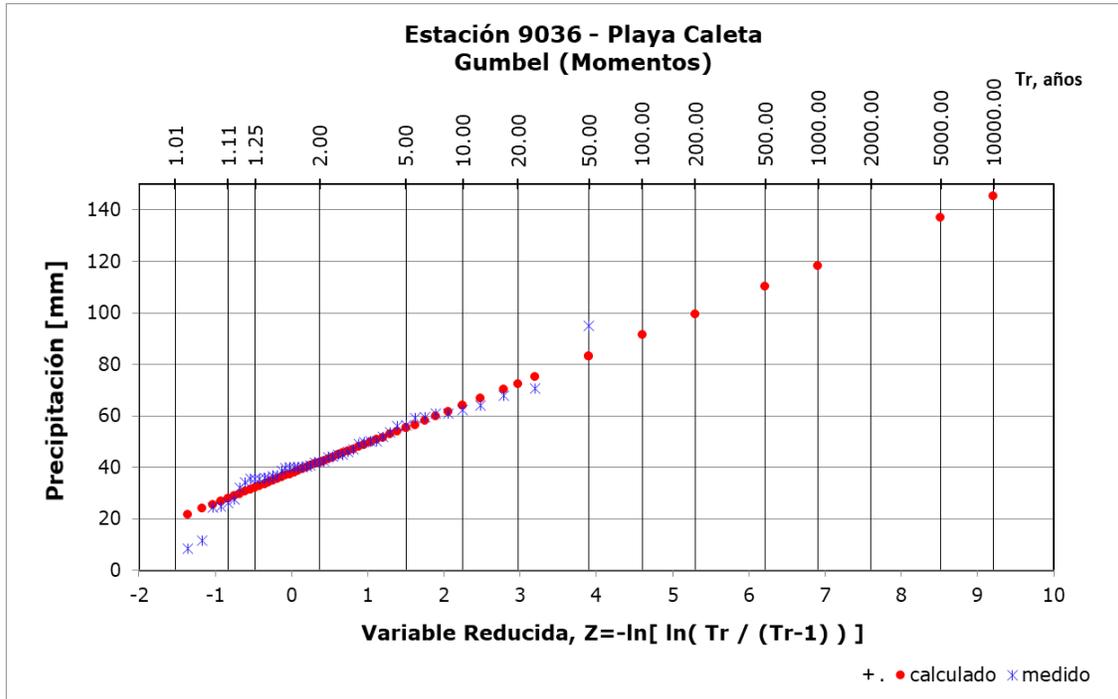


Figura 14. Precipitaciones máximas - Estación 9036 Playa Caleta – F.D. Gumbel. Fuente: *Elaboración propia*.

Una vez obtenidas mediante la Función de Distribución Gumbel las precipitaciones máximas para 24 horas asociadas a distintos periodos de retorno R_{24}^{Tr} , es necesario obtener las precipitaciones para duraciones menores. Para ello, se emplea la ecuación (8):

$$R_t^{Tr} = \frac{a * R * R_{24}^{Tr}}{(t + b)^c} * \left(\frac{t}{60}\right) \quad (8)$$

El factor R, de acuerdo con los trabajos realizados por (González A. , 2023), el factor de conectividad para la alcaldía Iztacalco es de 0.61 (Figura 15).

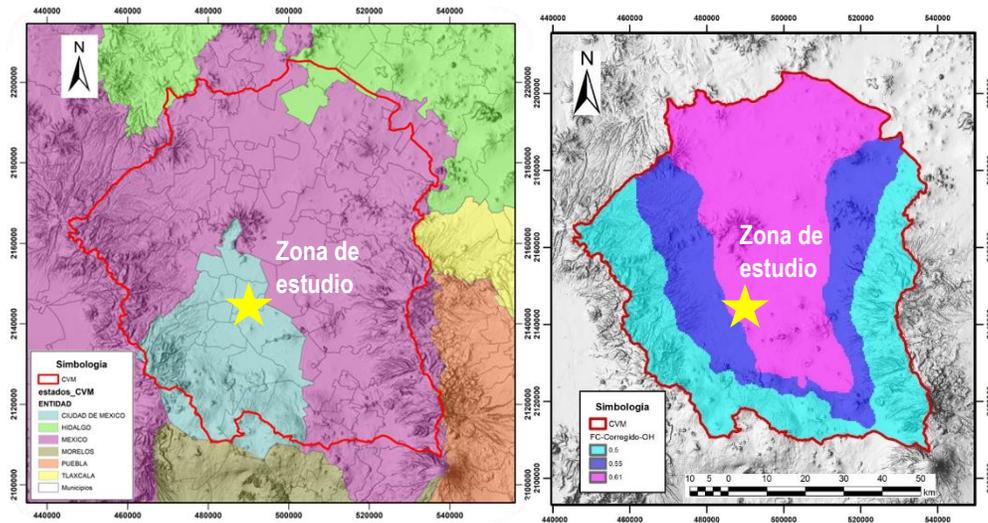


Figura 15. Factor de conectividad de la zona de estudio. Fuente: *Modificada de (González A. , 2023)*

El valor de los parámetros de a, b y c (Tabla 11). Se obtendrá mediante el nomograma de Chen (Figura 1), donde $\frac{R_1^{T_r}}{R_{24}^{T_r}} = 61$ (en porcentaje).

Tabla 11. Valor parámetros a, b y c

Parámetro	Valor
a	40
b	11.80
c	0.88

Obteniendo las precipitaciones para duraciones de 5, 10, 15, 30, 60, 120 y 240 minutos, con base en la ecuación (8). Los resultados se presentan en la Tabla 12:

Tabla 12. Precipitaciones máximas para duraciones de hasta 240 minutos

T_r [años]	F. Distribución Gumbel (24 h)	Duración en minutos						
		5	10	15	30	60	120	240
2	41.93	7.12	11.32	14.16	19.15	23.80	27.89	31.55
5	55.17	9.37	14.90	18.63	25.20	31.31	36.69	41.52
10	63.94	10.86	17.27	21.59	29.21	36.29	42.53	48.12
20	72.35	12.28	19.54	24.43	33.05	41.06	48.12	54.45
50	83.23	14.13	22.47	28.11	38.02	47.24	55.36	62.63
100	91.39	15.52	24.68	30.87	41.75	51.87	60.78	68.77
200	99.51	16.90	26.87	33.61	45.46	56.48	66.19	74.88
500	110.23	18.72	29.76	37.23	50.35	62.56	73.32	82.95
1000	118.34	20.09	31.95	39.97	54.06	67.16	78.71	89.05
5000	137.14	23.29	37.03	46.32	62.65	77.83	91.21	103.20
10000	145.24	24.66	39.22	49.05	66.35	82.43	96.60	109.30

Cabe señalar que el factor de convectividad "R" nos permite obtener las precipitaciones asociadas a distintos periodos de retorno para una duración de 60 minutos si se multiplica este factor por las precipitaciones máximas (con duración de 24 h) obtenidas mediante la Función de Distribución. En la Tabla 13, se presentan dichos resultados.

Tabla 13. Precipitaciones máximas para una duración de 60 minutos con el factor de convectividad "R"

T_r [años]	F. Distribución Gumbel (24 h)	Duración en minutos
		60
2	41.93	25.58
5	55.17	33.65
10	63.94	39.00
20	72.35	44.13
50	83.23	50.77
100	91.39	55.75
200	99.51	60.70
500	110.23	67.24
1000	118.34	72.19
5000	137.14	83.66
10000	145.24	88.60

Comparando las precipitaciones de la columna 7 de la Tabla 12 y las de la columna 3 de la Tabla 13, se observa que no varían de manera significativa. Sin embargo, para los cálculos de este trabajo se considerarán los indicados en la Tabla 12

Para generar el hidrograma de entrada, es necesario obtener el tiempo de concentración (t_c). En la Tabla 14, se presentan los valores que se requieren para el cálculo del tiempo de concentración de la zona de estudio, así como del colector.

Tabla 14. Características cuenca urbana en estudio

Característica	Abreviatura	Valor
Cota plantilla inicial	CPi	230.82 [m]
Cota plantilla final	CPf	227.96 [m]
Longitud del cauce	L_c, L, L_p	0.99408 [km]
Número de curva	NC	75
Pendiente cauce principal	S	0.002877 [m/m]
Coefficiente de escurrimiento	C	0.45

Soil Conservation Service (SCS)

El tiempo de concentración (t_c), con base en la ecuación (11), es:

$$t_c = \frac{0.057 * (0.99408)^{0.8} * \left[\left(\frac{1000}{75} \right) - 9 \right]^{0.7}}{(0.002877)^{0.5}}$$

$$t_c = 2.95 [h]$$

Federal Aviation Agency, FAA

Obteniendo el t_c con la ecuación (12), se tiene:

$$t_c = 0.0543 * (1.1 - 0.45) * \frac{(0.99408 * 1000)^{0.5}}{(0.002877 * 100)^{0.333}}$$

$$t_c = 1.69 [h]$$

Instrucción de carreteras en España

De acuerdo con la ecuación (13), se tiene:

$$t_c = 0.3 * \frac{(0.99408)^{0.76}}{(0.002877)^{0.19}}$$

$$t_c = 0.91 [h]$$

Carter

De acuerdo con la ecuación (14) (Azazian, 2018), se tiene:

$$t_c = 0.0977 * \frac{(0.99408)^{0.6}}{(0.002877)^{0.20}}$$

$$t_c = 0.31 [h]$$

En la Tabla 15, se presenta un resumen de los tiempos de concentración calculados previamente.

Tabla 15. Cálculo tiempos de concentración

Propuesta	Tiempo de concentración (t_c)	
	[min]	[h]
Soil Conservation Service (SCS)	63.60	1.06
Federal Aviation Agency (FAA)	101.16	1.69
Instrucción de carreteras en España	54.60	0.91
Carter	18.60	0.31

Para los cálculos posteriores, se considerará como $t_c = 1.0$ [h]. Tomando en cuenta la longitud del cauce (colector) y el tiempo de concentración, la velocidad es de 0.2761 m/s.

Hidrograma SCS

De acuerdo con lo indicado en el subcapítulo 2.2.7 Hidrograma adimensional SCS, al tratarse de una cuenca pequeña, como es el caso de la zona de estudio, se tiene:

Con base en la ecuación (19), la duración en exceso:

$$d_e = t_c$$

Por tanto:

$$d_e = 1.00 \text{ [h]}$$

El tiempo de retraso, con la ecuación (18):

$$t_r = 0.6 * t_c$$

$$t_r = 0.6 * (1.00 \text{ [h]})$$

$$t_r = 0.6 \text{ [h]}$$

Y el tiempo de pico ecuación (17):

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r$$

$$t_p = \frac{1.00 \text{ [h]}}{2} + 0.60 \text{ [h]}$$

$$t_p = 1.10 \text{ [h]}$$

El tiempo base, mediante la ecuación (16):

$$t_b = 2.67 * t_p$$

$$t_b = 2.67 * 1.10 \text{ [h]}$$

$$t_b = 2.937 \text{ [h]}$$

Finalmente, el gasto pico unitario con la ecuación (15):

$$q_p = \frac{0.555 * A}{t_b}$$

$$q_p = \frac{0.555 * 0.2071 [km^2]}{2.937 [h]}$$

$$q_p = 0.0391 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Gasto de pico – Soil Conservation Service

El periodo de retorno asociado a drenajes pluviales es de 10 años, por lo tanto, con base en la Tabla 12 y tomando en cuenta que el método del Número de Curva debe aplicarse a la tormenta total y considerando para la cuenca del Valle de México precipitaciones con duraciones de 4 horas aproximadamente, la precipitación total de diseño es:

$$P = 48.12 [mm]$$

La precipitación efectiva (P_e) con la ecuación (21), y tomando en cuenta un valor de $N=75$, es:

$$P_e = \frac{\left(4.812 [cm] - \frac{508}{75} + 5.08 \right)^2}{4.812 [cm] + \frac{2032}{75} - 20.32}$$

$$P_e = 0.8395 [cm]$$

$$P_e = 8.395 [mm]$$

Con base en lo anterior, el coeficiente de escurrimiento es de 0.17.

El gasto de pico a partir del SCS, se obtiene como se indica en la ecuación (20):

$$Q_p = 0.0391 \left[\frac{m^3}{s} \right] * 8.395 [mm]$$

$$Q_p = 0.3282 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

El hidrograma SCS para la zona de estudio y de acuerdo con la Figura 4, resulta:

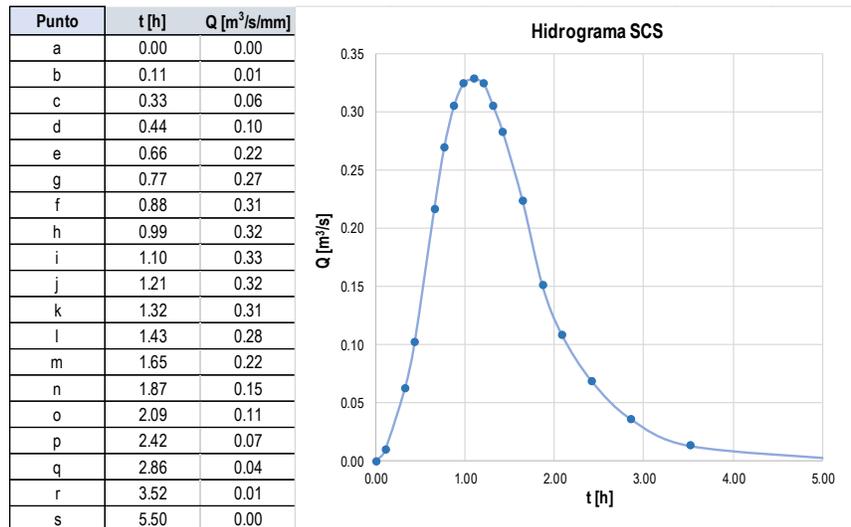


Figura 16. Hidrograma SCS zona de estudio

Gasto de pico – Método Racional

Como se presentó en el apartado 2.2.2 Método Racional, para obtener el gasto pico, es necesario obtener el coeficiente de escurrimiento (C), el cual se obtiene mediante la ecuación (10). En donde se observa, que se toma en cuenta el área urbanizada y no urbanizada. La zona de estudio se encuentra totalmente asfaltada, por lo que el área no urbanizada (A_{nu}) se considera de cero y por lo tanto el área urbanizada (A_u) será de 0.2071 km². Por lo tanto, el coeficiente de escurrimiento para el Método Racional es:

$$C = 0.45$$

Para obtener la intensidad de la lluvia, se tomará en cuenta la precipitación cuya duración sea igual al t_c . Previamente se indicó que el tiempo de concentración se considera de 1 hora. Con base en lo anterior y de acuerdo con la Tabla 12, la precipitación es:

$$P = 36.29 \text{ [mm]}$$

Y al tener una duración de 1 h, la intensidad que se empleará para el cálculo del gasto de pico es:

$$i = 36.29 \left[\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right]$$

Previamente se indicó que el área de la zona de estudio es de 0.2071 km².

Finalmente, el gasto pico mediante el Método Racional de acuerdo con la ecuación (9):

$$Q_p = 0.278 * (0.45) * \left(36.29 \left[\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right] \right) * (0.2071 \text{ [km}^2\text{]})$$

$$Q_p = 0.9403 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

Se observa que el gasto pico obtenido mediante el Método Racional es el que resulta ser mayor y por ende el más desfavorable, por lo tanto, los gastos de diseño serán los obtenidos con este método.

En la Figura 17, se presenta la localización de los pozos de visita y el colector. Para determinar el gasto asociado a cada pozo de visita, se asignaron áreas tributarias (Figura 18).

En la Tabla 16, se presentan las áreas por pozo, así como los gastos de diseño (calculados con el Método Racional) para cada pozo de visita.



Figura 17. Pozos de visita y colector



Figura 18. Áreas tributarias

Tabla 16. Gastos de diseño por pozo de visita

Pozo asociado	Área	Q _p	Q _p Acumulado	Pozo asociado	Área	Q _p	Q _p Acumulado
	[km ²]	[m ³ /s]	[m ³ /s]		[km ²]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
1	0.001	0.0027	0.0027	15	0.008	0.0371	0.4655
2	0.002	0.0094	0.0121	16	0.010	0.0451	0.5107
3	0.003	0.0124	0.0245	17	0.007	0.0320	0.5426
4	0.008	0.0344	0.0589	18	0.011	0.0502	0.5928
5	0.005	0.0249	0.0838	19	0.006	0.0290	0.6218
6	0.006	0.0260	0.1099	20	0.010	0.0432	0.6650
7	0.006	0.0252	0.1350	21	0.009	0.0404	0.7055
8	0.004	0.0167	0.1518	22	0.009	0.0404	0.7459
9	0.018	0.0821	0.2339	23	0.009	0.0402	0.7861
10	0.008	0.0352	0.2691	24	0.009	0.0414	0.8275
11	0.009	0.0408	0.3099	25	0.009	0.0397	0.8672
12	0.007	0.0327	0.3426	26	0.010	0.0452	0.9125
13	0.007	0.0318	0.3744	27	0.006	0.0278	0.9403
14	0.012	0.0540	0.4284				

4.3 Análisis de costos

Los conceptos que se considerarán para el análisis de costos, mismos que se buscará minimizar, se presentan a continuación (Tabla 17).

Tabla 17. Conceptos para el análisis de costos

Clave	Abreviatura	Descripción	Unidad
BI	CCP	Corte de pavimento	m
BL	CDP	Demolición de pavimento	m ³
QN	CP	Pavimentación	m ³
BG	CE	Excavación f(h)	m ³
ND	CCA	Cama de arena	m ³
BO	CRZ	Relleno de zanjas	m ³
NF	CT	Suministro e instalación de tubería f(D)	m
NI	CPV	Pozo de visita f(D,h)	m y pieza

Los costos serán los establecidos en el Tabulador General de Precios Unitarios del Gobierno de la Ciudad de México del 2023 (Secretaría de Obras y Servicios, Gobierno de la CDMX, 2023). Los cuales, se muestran en las Tabla 18, Tabla 19, Tabla 20 y Tabla 21 dadas a continuación.

Tabla 18. Precios unitarios parte 1.

Fuente: (Secretaría de Obras y Servicios, Gobierno de la CDMX, 2023)

Clave	Abreviatura	Concepto	Unidad	Precio Unitario
BI		Cortes con sierra en pavimentos. Norma de Construcción de la Administración Pública de la Ciudad de México. 3.01.01.039		
BI12B	CC	Cortes con sierra en pavimentos de concreto, incluye: los materiales de consumo, la mano de obra, la herramienta y el equipo necesarios.		
BI12BB		Corte con sierra en pavimento de concreto hidráulico, con una profundidad de 2.5 cm a 5.00 cm	m	\$15.85
BI12BD		Corte con sierra en pavimento de mezcla asfáltica, con una profundidad de 2.50 cm a 5.00 cm	m	\$12.87
BL		Demoliciones por medios manuales de mampostería.		
BL13KA	CD	Demolición de pavimento de concreto hidráulico simple, por medios mecánicos (retroexcavadora y martillo hidráulico)	m ³	\$179.38
BL13KC		Demolición de pavimento de mezcla asfáltica, por medios mecánicos (retroexcavadora y martillo hidráulico)	m ³	\$183.38
BN		Acarreo de materiales en vehículo. Norma de Construcción de la Administración Pública de la Ciudad de México. 3.01.01.011		
BN15	CA	Carga por medios manuales y acarreo en camión volteo de materiales producto de extracción de bancos, cortes, excavaciones, demoliciones, piedra, tala de árboles, materiales procesados, a primera estación de un kilómetro y estaciones subsecuentes a la primera, en zonas urbana, suburbana y carretera, descarga, incluye: la mano de obra, la herramienta, la maquinaria y el equipo necesarios.		
BN15BB		Carga manual, acarreo en camión al primer kilómetro y descarga, de material fino o granular, volumen medido en banco.	m ³	\$155.45
BN15BC		Acarreo en camión, de material fino o granular, kilómetros subsecuentes, zona urbana	m ³ -km	\$14.93

Tabla 19. Precios unitarios parte 2.

Fuente: (Secretaría de Obras y Servicios, Gobierno de la CDMX, 2023)

Clave	Abreviatura	Concepto	Unidad	Precio Unitario
QN		Pavimento de concreto hidráulico suministrado por proveedor, incluye: los materiales, la mano de obra, la herramienta y el equipo necesarios para la correcta ejecución de los trabajos. Norma de Construcción de la Administración Pública de la Ciudad de México. 3.01.01.019		
QN14	CP	Pavimentos de concreto hidráulico suministrado por proveedor, incluye: los materiales, la mano de obra para la preparación de la superficie, colocación del concreto, vibrado, acabado, curado, sellado de juntas, muestreo, limpieza, la herramienta y el equipo necesarios para la correcta ejecución de los trabajos. Norma de Construcción de la Administración Pública del Distrito Federal 3.01.01.019		
QN14BB		Pavimento de concreto hidráulico fraguado normal, resistencia $f'c = 200$ kg/cm ² , suministrado por proveedor, incluye: muestreo, curado, corte y sellado de juntas.	m ³	\$3,646.32
BG		Excavaciones por medios mecánicos, terrenos en seco y saturado, en zonas "A", "B" y "C", materiales clases "I, II, II-A, III", con extracción al nivel del terreno natural, incluye: el suministro de los materiales en la parte proporcional que le corresponda para las señales, la mano de obra para el apoyo en las operaciones mecánicas, afine de taludes y fondo de la zanja, limpieza, la maquinaria, el equipo y la herramienta necesarios. Norma de Construcción de la Administración Pública de la Ciudad de México 3.01.01.006		
BG12B	CE	Excavación por medios mecánicos para formación de zanjas en terreno seco con ancho de zanja menores a 1.20 m, en zona "A", material clase I, con extracción a borde de zanja medido en banco.		
BG12BB		Excavación por medios mecánicos, zona "A", material de clase I, de 0.00 a 2.00 m de profundidad	m ³	\$52.39
BG12BC		Excavación por medios mecánicos, en zona "A", material de clase I, de 2.01 a 4.00 m de profundidad	m ³	\$74.20
BG12BD		Excavación por medios mecánicos, en zona "A", material de clase I, de 4.01 a 6.00 m de profundidad	m ³	\$98.94

Tabla 20. Precios unitarios parte 3.

Fuente: (Secretaría de Obras y Servicios, Gobierno de la CDMX, 2023)

Clave	Abreviatura	Concepto	Unidad	Precio Unitario
ND		Relleno de zanjas que alojan conductos. Norma de Construcción de la Administración Pública de la Ciudad de México 3.01.01.007		
ND12	CC _A	Camas con material de arena, tezontle o grava, para asiento de conductos, ejecutados a mano, incluye: los materiales puestos en el sitio para trabajos, desperdicios; la mano de obra para el acarreo libre horizontal y vertical, extendido, nivelación compactación, retiro del material sobrante, limpieza, la herramienta y el equipo necesarios para la correcta ejecución de los trabajos		
ND12D		Camas de grava para asientos de ductos	m ³	
ND12CB		Cama de tezontle para asiento en ductos, incluye acarreo libre a 20m	m ³	\$759.75
ND12EB		Relleno compactado acostillado de material producto de la excavación en zanja.	m ³	\$121.91
ND12G		Relleno de zanjas		
ND12GB	CR	Relleno de zanjas para tubería, con material producto de la excavación, arriba de colchón mínimo de 30 cm sobre lomo del tubo, colocado y compactado en capas de 20 cm de espesor con rodillo vibratorio al 90% próctor, previa la incorporación del agua necesaria.	m ³	\$149.06
NF		Construcción de sistemas de alcantarillado. Norma de Construcción de la Administración Pública de la Ciudad de México 3.01.01.022		
NF17D		Instalación de tubos de concreto reforzado para conducción de agua de drenaje, incluye: mortero cemento-arena 1:5 para junteo, maniobras necesarias; en zona "A"		
NF17DH		Instalación de tubo de concreto reforzado en zona "A", de 45 cm de diámetro	m	\$188.85
NF17DI		Instalación de tubo de concreto reforzado en zona "A", de 61 cm de diámetro	m	\$272.35
NF17DJ		Instalación de tubo de concreto reforzado en zona "A", de 76 cm de diámetro	m	\$360.11
NF17DK	CTB	Instalación de tubo de concreto reforzado en zona "A", de 91 cm de diámetro	m	\$492.53
NF17DL		Instalación de tubo de concreto reforzado en zona "A", de 107 cm de diámetro	m	\$587.25
NF17DM		Instalación de tubo de concreto reforzado en zona "A", de 122 cm de diámetro	m	\$682.24
NF17DN		Instalación de tubo de concreto reforzado en zona "A", de 152 cm de diámetro	m	\$769.34
NF17DO		Instalación de tubo de concreto reforzado en zona "A", de 183 cm de diámetro	m	\$1,096.53
NF17DP		Instalación de tubo de concreto reforzado en zona "A", de 213 cm de diámetro	m	\$1,383.18

Tabla 21. Precios unitarios parte 4.

Fuente: (Secretaría de Obras y Servicios, Gobierno de la CDMX, 2023)

Clave	Abreviatura	Concepto	Unidad	Precio Unitario
NF17DQ	CTB	Instalación de tubo de concreto reforzado en zona "A", de 244 cm de diámetro	m	\$1,854.07
NF17DR		Instalación de tubo de concreto reforzado en zona "A", de 305 cm de diámetro	m	\$2,473.38
NI		Construcción de pozo de visita acabado común, sobre tubo, incluye: el tabique rojo recocido, el concreto, el mortero, acero de refuerzo, escalones, brocal, tapa, madera; la mano de obra para el trazo, nivelación, fabricación, colocación del mortero y concreto, el tabique, el aplanado interior, acabado pulido, el habilitado y colocación del acero, la madera, el brocal, la limpieza, la herramienta y el equipo necesarios para la correcta ejecución de los trabajos. Norma de construcción de la Administración Pública de la Ciudad de México 3.01.01.022		
NI21C		Pozos de visita sobre tubos de 0.76 a 0.91 m de diámetro con muro de tabique rojo recocido de 0.28 m de espesor, colocado a tizón desplantado sobre firme de concreto f'c=150 kg/cm ² , junteado y aplanado interior con mortero 1:4, pulido con cemento, trabe de concreto de f'c=150 kg/cm ² en aperturas para recibir los tubos, suministro y colocación de escalones marinos, brocal y tapa.		
NI21CB	CPV	Pozo de visita sobre tubo de 0.76 a 0.91 m de diámetro, con profundidad a rasante hidráulica de 2.50 m	pieza	\$14,115.25
NI21CC		Pozo de visita sobre tubo de 0.76 a 0.91 m de diámetro, con profundidad a rasante hidráulica de 2.75 m	pieza	\$14,998.57
NI21CD		Pozo de visita sobre tubo de 0.76 a 0.91 m de diámetro, con profundidad a rasante hidráulica de 3.00 m	pieza	\$16,142.53
NI21CE		Pozo de visita sobre tubo de 0.76 a 0.91 m de diámetro, con profundidad a rasante hidráulica de 3.25 m	pieza	\$16,503.95
NI21CF		Pozo de visita sobre tubo de 0.76 a 0.91 m de diámetro, con profundidad a rasante hidráulica de 3.50 m	pieza	\$19,799.04
NI21CG		Pozo de visita sobre tubo de 0.76 a 0.91 m de diámetro, con profundidad a rasante hidráulica de 3.75 m	pieza	\$21,536.75
NI21CH		Pozo de visita sobre tubo de 0.76 a 0.91 m de diámetro, con profundidad a rasante hidráulica de 4.00 m	pieza	\$23,260.70
NI21CI		Pozo de visita sobre tubo de 0.76 a 0.91 m de diámetro, con profundidad a rasante hidráulica de 4.25 m	pieza	\$24,662.17
NI21CJ		Pozo de visita sobre tubo de 0.76 a 0.91 m de diámetro, con profundidad a rasante hidráulica de 4.50 m	pieza	\$26,335.75
NI21CK		Pozo de visita sobre tubo de 0.76 a 0.91 m de diámetro, con profundidad a rasante hidráulica de 4.75 m	pieza	\$27,986.39
NI21CL		Pozo de visita sobre tubo de 0.76 a 0.91 m de diámetro, con profundidad a rasante hidráulica de 5.00 m	pieza	\$29,659.96
NI21CM	Pozo de visita sobre tubo de 0.76 a 0.91 m de diámetro, con profundidad a rasante hidráulica de 5.25 m	pieza	\$31,319.76	

En las tablas anteriores, se observa que las unidades en las que se encuentran son en unidades de volumen, longitud y profundidad, sin embargo, para el algoritmo, los costos se expresarán en forma de ecuación y estarán en función del diámetro y la profundidad.

El costo total (CT), de acuerdo con la Tabla 17:

$$C_T = CCP + CDP + CP + CCA + CT + CE + CRZ + CPV \quad (29)$$

La función objetivo (F.O.) es:

$$\text{Minimizar } C_T = C(D, h, L)$$

Donde:

- D diámetro de la tubería
- h profundidad (diferencia entre la cota de terreno y cota de plantilla)
- L longitud del tramo

Las restricciones del problema son:

$$\begin{aligned} V_{\min} < V < V_{\max} \\ y_{\min} < y < y_{\max} \\ Cota_{descarga} = x \end{aligned}$$

Con base en el Manual de Conagua (CONAGUA, 2019) y el Tabulador General de Precios Unitarios (Secretaría de Obras y Servicios, Gobierno de la CDMX, 2023), los anchos de zanja y los costos constructivos en función del diámetro se presentan a continuación:

$$\text{Ancho zanja} = 1.5527 * D + 0.2939 \quad (30)$$

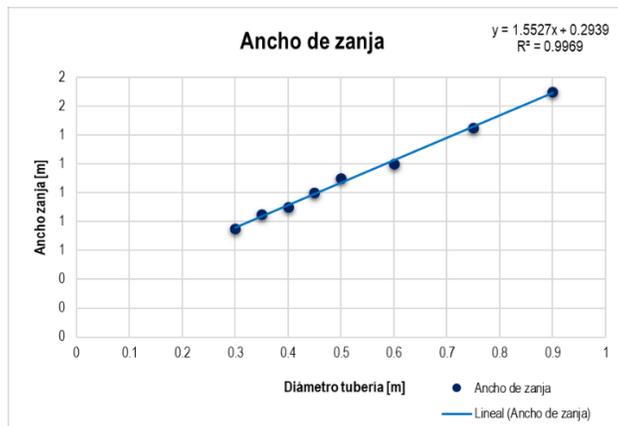


Figura 19. Ancho de zanja f(D)

4.3.1 Corte de pavimento (CCP)

$$CCP = 25.74 * L \tag{31}$$

4.3.2 Demolición pavimento (CDP)

En la Figura 20, se presenta el costo por demolición de pavimento por metro lineal en función del diámetro.

$$CDP = (14.237 * D_T + 2.6948) * L \tag{32}$$

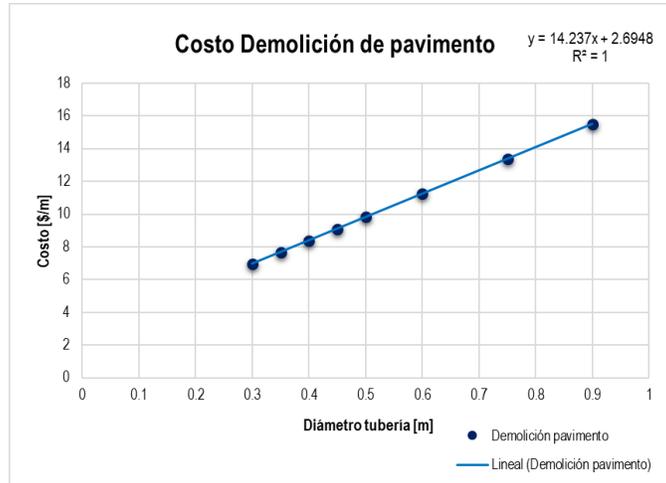


Figura 20. Costo demolición de pavimento f(D)

4.3.3 Pavimento (CP)

En la Figura 21, se presenta el costo de pavimento por metro lineal en función del diámetro.

$$CP = (283.08 * D_T + 53.583) * L \tag{33}$$

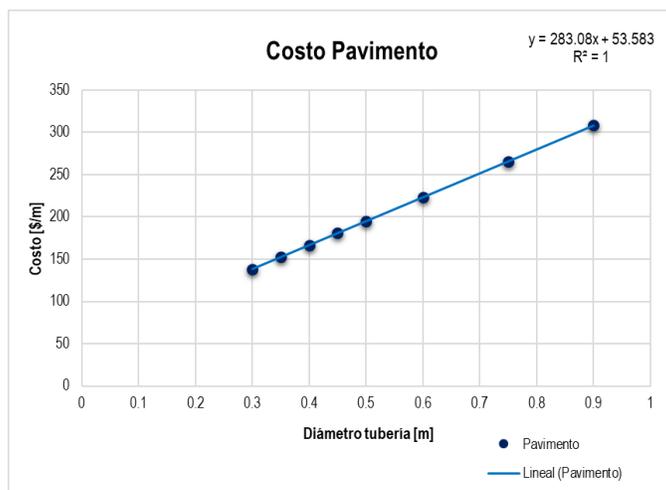


Figura 21. Costo pavimento f(D)

4.3.4 Cama de arena (CCA)

En la Figura 22, se presenta el costo del concepto de cama de arena por metro lineal en función del diámetro.

$$CCA = (117.97 * D_T + 22.329) * L \quad (34)$$

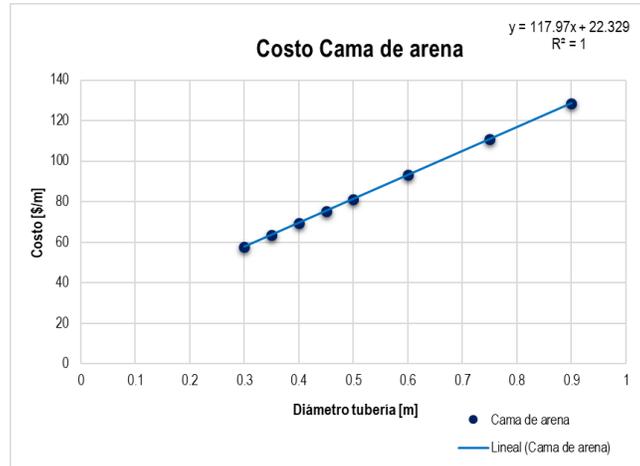


Figura 22. Costo cama de arena f(D)

4.3.5 Tubería (CT)

En la Figura 23, se presenta el costo del concepto suministro e instalación de tubería por metro lineal en función del diámetro.

$$CT = (173.24 * D_T^2 + 274.46 * D_T + 50.084) * L \quad (35)$$

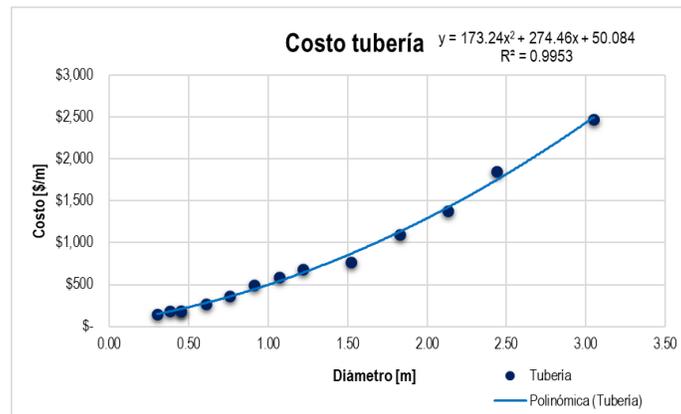


Figura 23. Costo tubería f(D)

4.3.6 Excavación (CE)

En las ecuaciones (36), (37) y (38), se presentan los costos por el concepto de excavación en función de la profundidad, diámetro de tubería y longitud. En la Figura 24, se ejemplifica a qué corresponden los valores de h_1 y h_2 .

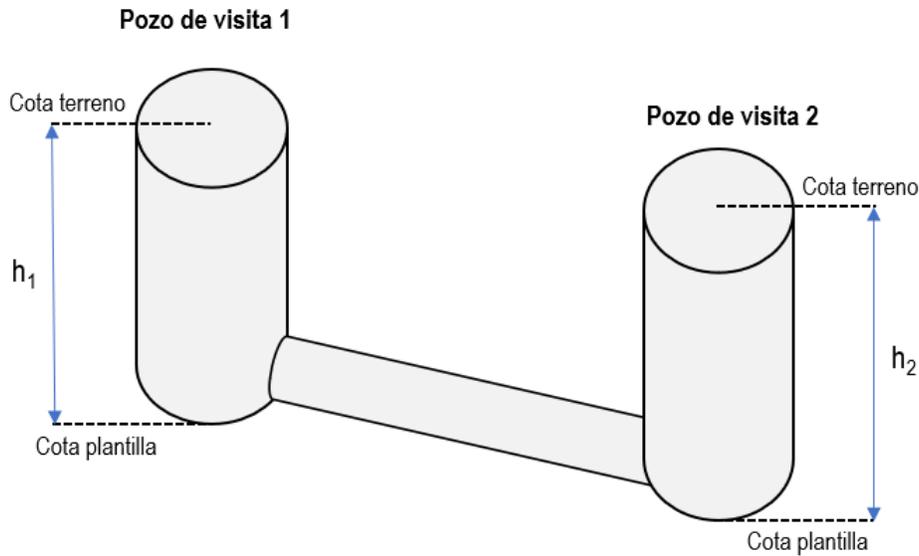


Figura 24. Ejemplo h_1 y h_2

$$\text{Para } 0 \leq \left| \frac{h_1 + h_2}{2} \right| \leq 2 \text{ m}$$

$$CE = (81.344 * D_T + 15.397) * \left| \frac{h_1 + h_2}{2} \right| * L \quad (36)$$

$$\text{Para } 2.01 \leq \left| \frac{h_1 + h_2}{2} \right| \leq 4 \text{ m}$$

$$CE = \left[(162.688 * D_T + 30.794) + (115.21 * D_T + 21.807) * \left(\left| \frac{h_1 + h_2}{2} \right| - 2 \right) \right] * L \quad (37)$$

$$\text{Para } 4.01 \leq \left| \frac{h_1 + h_2}{2} \right| \leq 6 \text{ m}$$

$$CE = \left[(393.108 * D_T + 74.408) + (153.62 * D_T + 29.078) * \left(\left| \frac{h_1 + h_2}{2} \right| - 4 \right) \right] * L \quad (38)$$

4.3.7 Relleno de zanja (CRZ)

En la ecuación (39), se presenta el costo por relleno de zanja, en función de la profundidad, longitud y diámetro de tubería.

$$Volumen\ relleno\ zanja = Volumen\ Excavación - Volumen\ tubería$$

$$CRZ = \left[(231.4455 * D_T + 43.8087) * \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right) - 117.0715 * D_T^2 \right] * L \quad (39)$$

4.3.8 Pozos de visita (CPV)

El costo por pozo de visita, en función de la profundidad, se obtiene:

$$Para\ h < 2\ m$$

$$CPV = 10000$$

$$Para\ 2 \leq h \leq 5.25\ m$$

$$CPV = 6550.4 * h - 3182.6 \quad (40)$$

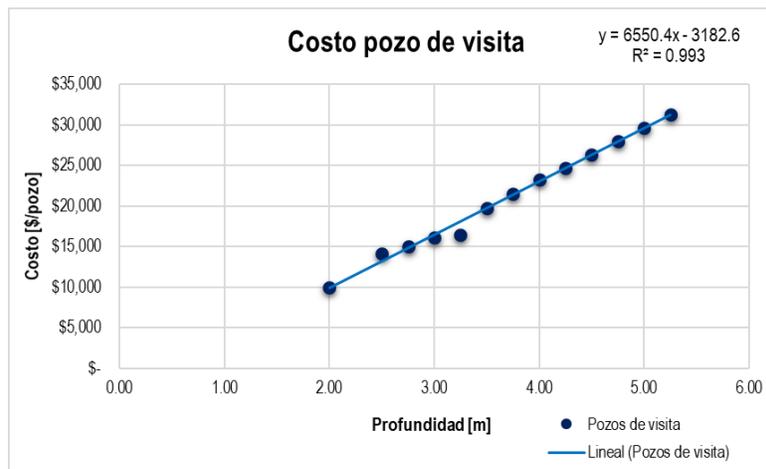


Figura 25. Costo pozo de visita f(h)

4.4 Propuesta de algoritmo para la optimización

Considerando las ecuaciones (31) a la (40), en la ecuación (41) se muestra el costo total por cada tramo.

4.4.1 Función objetivo

Con base en las ecuaciones presentadas anteriormente, se tiene que el costo total por cada tramo es:

$$CTt_i = \left\{ \left[56.1685 * D_T^2 + 689.747 * D_T + 154.4308 + CE^{***} + (231.4455 * D_T + 43.8087) * \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right) \right] * L \right\} + CPV^{***} \quad (41)$$

Y el costo total del colector, se indica en la ecuación (42):

$$CT = \sum_{i=1}^{27} CTt_i \quad (42)$$

4.4.2 Restricciones

Las restricciones que se tienen en el diseño de colectores de drenaje pluvial (constructiva y físicamente) son:

- Velocidades mínima y máxima permisible (para concreto reforzado):

$$0.30 \left[\frac{m}{s} \right] \leq V \leq 3.50 \left[\frac{m}{s} \right]$$

- Flujo a superficie libre:

$$y_{mín} < y < D_T$$

- Punto de descarga final:

$$Cota_{descarga} = x$$

- Diámetro mínimo en drenaje pluvial:

$$D_{mín} \geq 0.30 [m]$$

- Colchón mínimo:

Tabla 22. Colchón mínimo f(D)

Diámetro tubería		Colchón mínimo	
[mm]	[in]	[m]	[m]
300	12	0.30	0.90
350	14	0.35	0.90
400	16	0.40	0.90
450	18	0.45	1.10
500	20	0.50	1.10
600	24	0.60	1.10
750	30	0.75	1.10
900	36	0.90	1.10

- Pendientes mínimas sugeridas por el manual de CONAGUA:

Tabla 23. Pendiente mínima f(D)

Diámetro tubería		Pendiente mínima
[cm]	[m]	[milésimas]
30	0.30	2.0
38	0.38	1.5
45	0.45	1.2
60	0.60	0.8
76	0.76	0.6
91	0.91	0.5
107	1.07	0.4
122	1.22	0.3
152	1.52	0.3
183	1.83	0.2
213	2.13	0.2
244	2.44	0.2
305	3.05	0.1

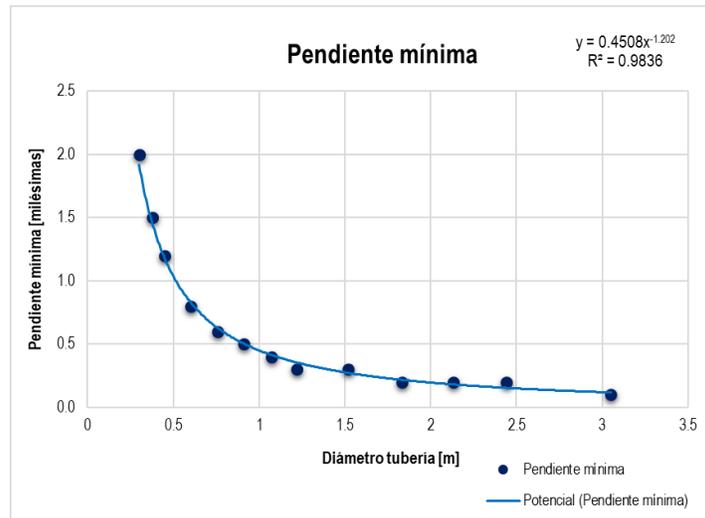


Figura 26. Pendiente mínima $f(D)$

4.4.3 Modificaciones a los Métodos de Optimización

Para la optimización del colector, se realizaron algunas modificaciones a los métodos a fin de permitir la convergencia más rápida de los mismos. A continuación, se explica cómo se lleva a cabo el análisis en cada método y las modificaciones realizadas en cada uno. Así mismo, se presenta un ejemplo (Figura 27) de un colector constituido por 2 tramos y 3 pozos de visita y que se resolvió por cada uno de los tres métodos.

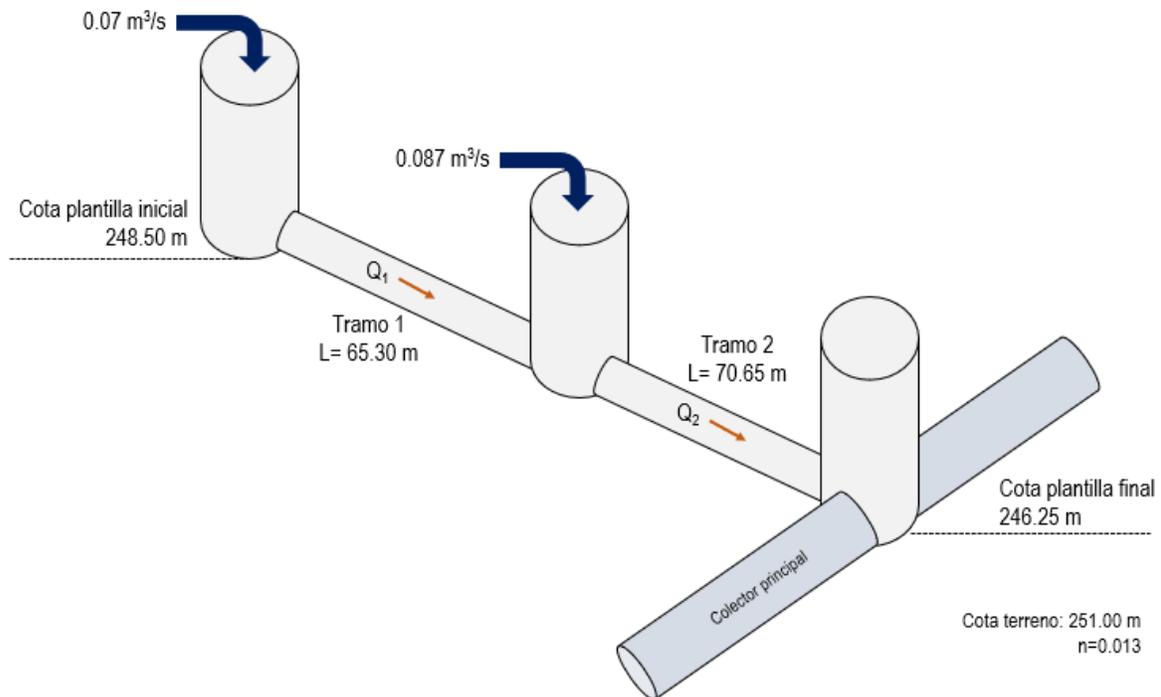


Figura 27. Ejemplo colector 2 tramos

4.4.3.1 Número Áureo Modificado

Cotas iniciales

Las cotas están en función de las elevaciones de plantilla al inicio y fin del colector. Para cada pozo, se tendrán 4 posibles elevaciones llamados valores intermedios y de intervalo (capítulo 3.2 Número Áureo), los cuales tienen una proporción entre sí de la relación áurea (0.6180). Los valores de intervalo se determinan mediante la transferencia de información, en donde la elevación del pozo 14, está en función del 1 y 28; el nodo 7 está en función de los nodos 1 y 14, el nodo 4 en función de los nodos 1 y 7 y así sucesivamente. En la Figura 28, se muestra este proceso de transferencia entre nodos.

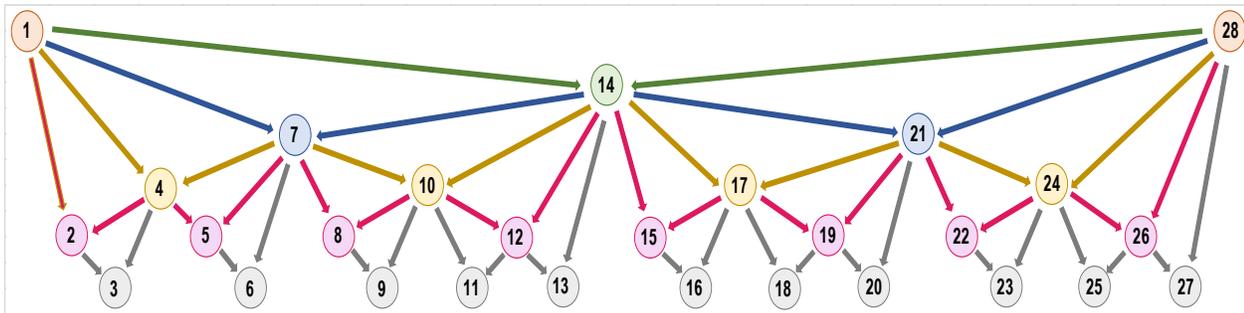


Figura 28. Transferencia de información. Número Áureo Modificado

Elección de la “mejor rama”

Como se indicó previamente, existen para cada nodo 4 posibles elevaciones, lo cual genera un gran número de posibles combinaciones debido a que como se observa existe relación entre cada una de ellas. Sin embargo, se pueden simplificar algunas de esas combinaciones, por ejemplo, aquellas en las que la pendiente sea nula; es decir, aquellas en donde la cota inicial y final sea la misma. Otra simplificación es que en los nodos 1 y 28 solo se tiene 1 cota y es fija.

Por tanto, si se piensa en el problema como un árbol, se elige la “rama” que presente el menor costo total.

Solución por jerarquía de nodos

Para elegir la mejor rama, se inicia la optimización por cada nodo de acuerdo con su jerarquía. Con base en la Figura 28, podemos distinguir 6 jerarquías. La primera, conformada por los nodos 1 y 28; la segunda por el 14; la tercera por el 7 y 21; la cuarta por el 4, 10, 17 y 24; la quinta por el 2, 5, 8, 12, 15, 19, 22 y 26 y finalmente la sexta por los nodos 3, 6, 9, 11, 13, 16, 18, 20, 23, 25 y 27.

La búsqueda de la cota optimizada por nodo se lleva a cabo aproximando cada vez utilizando la proporción áurea. En donde se aproxima la solución a aquella en donde se presenta el menor costo total.

Evaluación de la función objetivo y restricciones

Al evaluar cada una de las 4 posibles cotas por cada nodo, se obtienen las pendientes y a su vez con la ecuación (45) se obtiene el diámetro teórico, posteriormente el diámetro comercial (Tabla 27) y se determina el colchón.

Con base en el diámetro comercial y el gasto, se calcula el tirante normal y se determina la velocidad. En función del diámetro, se evalúa la pendiente y colchón mínimos, así como las velocidades máximas y mínimas. Si

alguna de las restricciones no se cumple se da una penalización en los costos. En caso contrario, los costos por tramo y costo total se calculan como se indican en el capítulo 4.3 Análisis de costos.

Debido a que se calculan en diferentes tramos las elevaciones, también debe considerarse que, si previamente se ha optimizado una cota y se ha establecido un diámetro comercial, si aguas arriba se llega a obtener un diámetro menor, se conserva el que se ha obtenido previamente; es decir, que los diámetros en sentido del flujo deben de mantenerse o en su caso ir incrementando.

Número de iteraciones

El número de iteraciones para cada nodo dependerá de la aproximación que se desee, se puede parar el cálculo cuando la diferencia en costos (para cada una de las 4 posibles elevaciones) sea al centavo; o bien, las cotas sean iguales al milímetro.

Solución del ejemplo con el Número Áureo

Primera iteración

- Elevaciones propuestas:

Como se presentó en el subtema 3.2 (Número Áureo), se tienen dos puntos de intervalo (x_u y x_l), y dos puntos intermedios (x_1 y x_2). Para la solución del ejemplo (Figura 27), en la primera iteración, los cuatro puntos serán las elevaciones propuestas (Tabla 24). Por una parte, los puntos x_u y x_l (en el problema los llamaremos x_4 y x_1), tomarán los valores de la cota de plantilla final e inicial del colector respectivamente, mientras que los puntos x_1 y x_2 (que en ejemplo serán x_3 y x_2), se obtendrán con las ecuaciones (23) y (24).

Tabla 24. Elevaciones propuestas. Número Áureo - 1a. iteración

Iteración	d	Elevaciones propuestas			
		x_1	x_2	x_3	x_4
1	1.3906	246.2500	247.1094	247.6406	248.5000

- Pendientes:

El siguiente paso es obtener las pendientes (Tabla 25) con la ecuación (43) para cada uno de los 2 tramos, considerando las elevaciones propuestas en el paso anterior y comparadas con las cotas fijas, las cuales corresponden a las elevaciones de plantilla inicial y final del colector.

$$S = \frac{H}{L} \quad (43)$$

Donde:

S Pendiente, en m/m

H Desnivel entre la cota de plantilla inicial o final del colector respecto a la elevación propuesta, en m

L Longitud del tramo que se está analizando y que asocia la elevación propuesta con la plantilla inicial o final del colector, en m

Tabla 25. Pendientes. Número Áureo - 1a. iteración

Tramos	Pendientes			
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
Tramo 2	0	0.0122	0.0197	0.0318
Tramo 1	0.0345	0.0213	0.0132	0

- *Diámetros teóricos:*

Los diámetros teóricos (Tabla 26), se obtienen mediante la ecuación de Manning (44), en la cual la única incógnita será el diámetro.

$$Q = \frac{1}{n} * A * R_h^{2/3} * S^{1/2} \quad (44)$$

Considerando un porcentaje de llenado del 50%, es decir, $y=0.5*D$, y sustituyendo en la ecuación (44), las fórmulas del área y radio hidráulico para una sección circular, el diámetro teórico (Dt), se presenta en la ecuación (45):

$$Dt = \left(\frac{Q * n}{0.1558 * S^{1/2}} \right)^{3/8} \quad (45)$$

Debido a que los costos están asociados a la profundidad, si no se indica alguna restricción respecto a las pendientes, es probable que el costo mínimo resulte si la pendiente es nula, sin embargo, para sistemas de drenaje no es posible que la pendiente tome ese valor, es por ello que, a fin de evitar esta situación, se penalizarán los casos con pendiente cero, de tal manera, que no sea viable elegirla.

En los casos en que la pendiente sea nula, el diámetro teórico (Dt), tomará un valor de -10 m, en caso contrario, el diámetro se calculará como se indica en la ecuación (45).

Tabla 26. Diámetros teóricos. Número Áureo - 1a. iteración

Tramos	Diámetros teóricos			
	Dt ₁	Dt ₂	Dt ₃	Dt ₄
Tramo 2	-10	0.450	0.411	0.376
Tramo 1	0.273	0.299	0.327	-10

- *Diámetros comerciales:*

Debido a que los diámetros teóricos obtenidos en el paso anterior no forzosamente corresponderán a los que se encuentran comercialmente (Tabla 27), se elegirá el diámetro inmediato superior y en aquellos casos donde el diámetro sea -10 m (cuando la pendiente es nula), el diámetro será de 1,000,000 m. Los diámetros seleccionados (Tabla 28) a partir de lo indicado anteriormente, corresponderán al diámetro comercial (Dc) y serán aquéllos que se emplearán para calcular los costos.

Tabla 27. Diámetros comerciales de tubería

Diámetros comerciales	
[in]	[m]
12	0.30
15	0.38
18	0.45
18	0.61
24	0.75
30	0.91
36	1.07
42	1.22
48	1.52
60	1.83
72	2.13
84	2.44
96	3.05
120	3.10

Tabla 28. Diámetros comerciales. Número Áureo - 1a. iteración

Tramos	Diámetros comerciales			
	Dc ₁	Dc ₂	Dc ₃	Dc ₄
Tramo 2	1,000,000	0.45	0.45	0.38
Tramo 1	0.38	0.38	0.38	1,000,000

- Profundidad:

La profundidad (h), está asociada a los costos de excavación (CE). Para efectos prácticos, h se obtiene como se indica en la ecuación (46). En la Tabla 29, se presentan las profundidades para la primera iteración.

$$h = Cota\ terreno - \left(\frac{Cota\ plantilla + Elevación\ propuesta}{2} \right) \quad (46)$$

Donde:

h Profundidad, en m

Cota plantilla Cota de plantilla (inicial o final del colector), la cual dependerá del tramo que se analice, en m

Elevación propuesta Elevación propuesta (x_1 , x_2 , x_3 o x_4), según sea la elevación que se está analizando, en m

Tabla 29. Profundidades. Número Áureo - 1a. iteración

Tramos	Profundidad			
	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄
Tramo 2	4.75	4.32	4.05	3.63
Tramo 1	3.63	3.20	2.93	2.50

- *Colchón:*

El colchón (c), se calcula como la diferencia entre la profundidad (h) menos el diámetro comercial (Dc), ver Tabla 30, en aquellos casos cuando el Dc está asociado a una pendiente nula, el colchón se indica con el valor de -1,000. Y deberán compararse con los valores mínimos indicados por la Conagua (Tabla 22).

Tabla 30. Colchón. Número Áureo – 1a. iteración

Tramos	Colchón			
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
Tramo 2	-1,000	3.87	3.60	3.25
Tramo 1	3.25	2.82	2.55	-1,000

- *Velocidades:*

De acuerdo con la ecuación de continuidad, se tiene que la velocidad es igual al gasto entre el área. El cálculo del área se realiza con el tirante normal (con el Método de Newton – Raphson), El cálculo de y_n toma en cuenta la pendiente asociada a cada elevación propuesta. Una vez calculado el tirante normal y por consiguiente el área y conociendo el gasto en el tramo, es posible determinar la velocidad (Tabla 31). Debido a que no existe un tirante normal asociado a una pendiente nula, en aquellos casos, la velocidad se desplegará con un valor de -1.0 m/s.

Los valores de velocidad asociados a cada tramo y a cada elevación propuesta, se deberá comparar con los recomendados por la Conagua ($0.3 \text{ m/s} \leq V \leq 3.5 \text{ m/s}$).

Tabla 31. Velocidades. Número Áureo - 1a. iteración

Tramos	Velocidades			
	V ₁ f(x ₁)	V ₂ f(x ₂)	V ₃ f(x ₃)	V ₄ f(x ₄)
Tramo 2	-1.000	1.976	2.363	2.835
Tramo 1	2.346	1.973	1.656	-1.000

- *Costos:*

Los costos presentados en la Tabla 17, son los que se consideraron en el análisis, los cuales están en función del diámetro comercial y profundidad, asociados a cada una de las elevaciones propuestas (x₁, x₂, x₃ y x₄). En la Tabla 32, se presentan los costos totales para cada una de las elevaciones propuestas.

Tabla 32. Costos. Número Áureo - 1a. iteración

Tramos	Costos			
	Costo f(x ₁)	Costo f(x ₂)	Costo f(x ₃)	Costo f(x ₄)
Tramo 2	\$ 12,239,463,264,713,800.00	\$ 106,394.82	\$ 100,036.38	\$ 91,930.23
Tramo 1	\$ 86,532.90	\$ 78,180.59	\$ 73,018.57	\$ 11,312,620,965,797,600.00
Suma	\$ 12,239,463,264,800,300.00	\$ 184,575.41	\$ 173,054.95	\$ 11,312,620,965,889,500.00

Una vez que se han obtenido los costos para cada tramo, en función de cada elevación propuesta, se aplica la comparación entre los valores intermedios, tal como se presentó en el subcapítulo 3.2 (Número Áureo).

Como $Costo f(x_3) < f(x_2)$ entonces el dominio de x a la izquierda de x₂, de x₁ a x₂, se puede eliminar, ya que no contiene el mínimo. En este caso, x₂ será el nuevo x₁ en la siguiente iteración.

Segunda iteración

- *Elevaciones propuestas:*

Tomando en cuenta lo que se concluyó anteriormente, donde la elevación propuesta asociada a x_2 en la primera iteración, será x_1 en esta segunda iteración. Para este caso, x_4 mantiene el mismo valor que en la primera iteración. Debido a que los valores de "intervalo" se modificaron, es necesario calcular nuevamente el Número Áureo (d), así como los valores de x_2 y x_3 , tal como se realizó en la primera iteración.

Tabla 33. Elevaciones propuestas. Número Áureo - 2a. iteración

Iteración	d	Elevaciones propuestas			
		x_1	x_2	x_3	x_4
2	0.8594	247.1094	247.6406	247.9688	248.5000

Si observamos, aunque se modificó uno de los extremos, al calcular nuevamente los números intermedios, el que en la primera iteración era x_3 , para esta iteración corresponde al x_2 , es por tanto que únicamente en este paso solo fue necesario calcular uno nuevo (en este caso x_3). Esto significa que, en la creación del algoritmo, pueden ahorrarse cálculos puesto que no es necesario calcular ambos valores intermedios.

Siguiendo el mismo criterio de cálculo presentado en la iteración 1. A continuación, se presentan los cálculos para la segunda iteración.

- *Pendientes:*

Tabla 34. Pendientes. Número Áureo - 2a. iteración

Tramos	Pendientes			
	S_1	S_2	S_3	S_4
Tramo 2	0.0122	0.0197	0.0243	0.0318
Tramo 1	0.0213	0.0132	0.0081	0

- *Diámetros teóricos:*

Tabla 35. Diámetros teóricos. Número Áureo - 2a. iteración

Tramos	Diámetros teóricos			
	Dt_1	Dt_2	Dt_3	Dt_4
Tramo 2	0.45	0.41	0.39	0.38
Tramo 1	0.30	0.33	0.36	-10

- *Diámetros comerciales:*

Tabla 36. Diámetros comerciales. Número Áureo - 2a. iteración

Tramos	Diámetros comerciales			
	Dc_1	Dc_2	Dc_3	Dc_4
Tramo 2	0.45	0.45	0.45	0.38
Tramo 1	0.38	0.38	0.38	1,000,000

- *Profundidad:*

Tabla 37. Profundidades. Número Áureo - 2a. iteración

Tramos	Profundidad			
	h_1	h_2	h_3	h_4
Tramo 2	4.32	4.05	3.89	3.63
Tramo 1	3.20	2.93	2.77	2.50

- Colchón:

Tabla 38. Colchón. Número Áureo - 2a. iteración

Tramos	Colchón			
	c_1	c_2	c_3	c_4
Tramo 2	3.87	3.60	3.44	3.25
Tramo 1	2.82	2.55	2.39	-1,000.00

- Velocidades:

Tabla 39. Velocidades. Número Áureo - 2a. iteración

Tramos	Velocidades			
	$V_1 f(x_1)$	$V_2 f(x_2)$	$V_3 f(x_3)$	$V_4 f(x_4)$
Tramo 2	1.976	2.363	2.554	2.835
Tramo 1	1.973	1.656	1.388	-1.000

- Costos:

Finalmente, los costos para la segunda iteración, son:

Tabla 40. Costos. Número Áureo - 2a. iteración

Tramos	Costos			
	Costo $f(x_1)$	Costo $f(x_2)$	Costo $f(x_3)$	Costo $f(x_4)$
Tramo 2	\$ 106,394.82	\$ 100,036.38	\$ 106,556.13	\$ 91,930.23
Tramo 1	\$ 78,180.59	\$ 73,018.57	\$ 69,828.27	\$ 11,312,620,965,797,600.00
Suma	\$ 184,575.41	\$ 173,054.95	\$ 176,384.41	\$ 11,312,620,965,889,500.00

Como $Costo f(x_2) < f(x_3)$ entonces el dominio de x a la derecha de x_3 , de x_3 a x_4 , podrá eliminarse. En este caso, x_3 será el nuevo x_4 en la siguiente iteración.

Tercera iteración

- Elevaciones propuestas:

Tomando en cuenta lo que se concluyó anteriormente, tomando en cuenta los nuevos límites y calculando el Número Áureo (d), se tiene:

Tabla 41. Elevaciones propuestas. Número Áureo - 3a. iteración

Iteración	d	Elevaciones propuestas			
		x_1	x_2	x_3	x_4
3	0.5312	247.1094	247.4377	247.6406	247.9688

En este caso, se observa que únicamente fue necesario calcular el valor de x_2 y trasladar los nuevos valores de x_3 y x_4 .

El problema debe seguirse iterando hasta que los valores de las elevaciones propuestas tengan una diferencia aceptable entre ellas, o bien, cuando el costo total entre las elevaciones propuestas resulte adecuado.

Para el caso que se presenta, se realizaron 30 iteraciones, sin embargo, desde la 17, la diferencia entre los costos entre 3 de las elevaciones era de menos de \$10 y las elevaciones, constructivamente hablando eran iguales.

Decimoséptima iteración

Tabla 42. Elevaciones propuestas. Número Áureo - 17a. iteración

Iteración	d	Elevaciones propuestas			
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄
17	0.0006	247.7493	247.7497	247.7500	247.7503

Tabla 43. Diámetros comerciales. Número Áureo - 17a. iteración

Tramos	Diámetros comerciales			
	Dc ₁	Dc ₂	Dc ₃	Dc ₄
Tramo 2	0.45	0.45	0.45	0.45
Tramo 1	0.38	0.38	0.38	0.38

Tabla 44. Costos. Número Áureo - 17a. iteración

Tramos	Costos			
	Costo f(x ₁)	Costo f(x ₂)	Costo f(x ₃)	Costo f(x ₄)
Tramo 2	\$ 98,734.60	\$ 98,729.94	\$ 98,727.06	\$ 108,982.35
Tramo 1	\$ 71,961.75	\$ 71,957.96	\$ 71,955.62	\$ 71,951.84
Suma	\$ 170,696.35	\$ 170,687.90	\$ 170,682.68	\$ 180,934.19

La diferencia en los costos f(x₄), se observa que es en la excavación, debido a que las ecuaciones de costos para ese concepto están divididas en 3 intervalos, al encontrarse en el intervalo siguiente (por mínimo que sea), incrementa el costo.

Trigésima iteración

Tabla 45. Elevaciones propuestas. Número Áureo - 30a. iteración

Iteración	d	Elevaciones propuestas			
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄
30	1.21x10 ⁻⁶	247.7500	247.7500	247.7500	247.7500

Tabla 46. Diámetros comerciales. Número Áureo - 30a. iteración

Tramos	Diámetros comerciales			
	Dc ₁	Dc ₂	Dc ₃	Dc ₄
Tramo 2	0.45	0.45	0.45	0.45
Tramo 1	0.38	0.38	0.38	0.38

Tabla 47. Costos. Número Áureo - 30a. iteración

Tramos	Costos			
	Costo f(x ₁)	Costo f(x ₂)	Costo f(x ₃)	Costo f(x ₄)
Tramo 2	\$ 98,726.49	\$ 98,726.48	\$ 98,726.48	\$ 98,726.48
Tramo 1	\$ 71,955.16	\$ 71,955.15	\$ 71,955.15	\$ 71,955.16
Suma	\$ 170,681.65	\$ 170,681.63	\$ 170,681.63	\$ 170,681.64

4.4.3.2 Algoritmos Genéticos modificados

Población inicial y primera generación

La población inicial se genera aleatoriamente y se realiza un ajuste a los números generados con la finalidad que el desnivel sea el determinado por las cotas de plantilla inicial y final.

A partir de las elevaciones obtenidas, se obtienen las pendientes, los diámetros teóricos y posteriormente los diámetros comerciales. Se evalúan las restricciones de velocidades mínima, máxima, colchón y pendiente mínima y finalmente se obtienen los costos por tramo y totales para cada individuo.

Número de generaciones

Se establece el número de generaciones que se tendrá en el método.

Copia

Se emplea debido a que el desnivel entre las cotas de plantilla inicial y final son fijas. Es necesario incluirlo con la finalidad de no perder los mejores resultados ya que el procedimiento tiende a la posible aleatoriedad en los resultados, es por ello, que el 10% de los mejores individuos de cada generación, pasarán a la siguiente generación sin la operación de cruce y mutación.

Cruza

Se considera que cada elevación de plantilla (por pozo) es un cromosoma del individuo. Se realiza la cruce entre individuos si la probabilidad es menor a 0.8.

Mutación

Para la mutación, se generan números aleatorios (probabilidad) en cada individuo, si la probabilidad es menor a 0.02, se tiene la mutación en el individuo, de igual manera considerando que cada elevación es un cromosoma del individuo.

Ajuste de los individuos

Una vez que se realizan los operadores de copia, cruce y mutación, se realiza el ajuste a las elevaciones a fin de garantizar que no excedan el desnivel total (cotas de plantilla inicial y final).

Evaluación de la función objetivo y restricciones

Realizado el ajuste en los individuos, a partir de las cotas de plantilla para cada tramo se obtienen las pendientes y a su vez con la ecuación (45) se obtiene el diámetro teórico, posteriormente el diámetro comercial (Tabla 27) y se determina el colchón.

Con base en el diámetro comercial y el gasto en cada tramo se calcula el tirante normal y se determina la velocidad. En función del diámetro, se evalúa la pendiente y colchón mínimos, así como las velocidades máximas y mínimas. Si alguna de las restricciones no se cumple se da una penalización en los costos. En caso contrario, los costos por tramo y costo total se calculan como se indican en el capítulo 4.3 Análisis de costos.

El proceso se repite de manera iterativa hasta el número de generaciones establecido previamente.

Solución del ejemplo con el método Algoritmos Genéticos modificados

En la optimización con AG están los modelos que usan números binarios y los que trabajan con números reales. Dada la naturaleza del problema se trabajará con números reales modificando los criterios con el fin de facilitar el modelo numérico.

Para la solución del problema planteado anteriormente y con la finalidad de facilitar el ejemplo, la población será de 10 individuos.

Primera generación

La profundidad total (H_T) es de 2.25 m que corresponde a la diferencia entre la cota de descarga inicial y la final. Para generar la población inicial (Tabla 48), se generan 10 números aleatorios los cuales se multiplican por la H_T y se le suma la cota de descarga final; la población inicial es la siguiente:

Tabla 48. Población inicial. Algoritmos Genéticos

Individuo	Número aleatorio	Altura	Cota
1	0.0910	0.2047	246.4547
2	0.9281	2.0881	248.3381
3	0.1565	0.3520	246.6020
4	0.7103	1.5982	247.8482
5	0.4890	1.1002	247.3502
6	0.4356	0.9802	247.2302
7	0.9027	2.0311	248.2811
8	0.4258	0.9581	247.2081
9	0.0658	0.1482	246.3982
10	0.9575	2.1543	248.4043

Una vez generada la población inicial y con las cotas de plantilla inicial y final, a partir de la ecuación (43), se obtienen las pendientes, posteriormente con la ecuación (45), se calculan los diámetros teóricos y con base en la Tabla 27, se asigna un diámetro comercial. Así mismo, la profundidad se calcula como se indica en la ecuación (46). Se revisan las restricciones de velocidad, colchón mínimo y los costos para cada individuo se calculan como se presentó en el ejemplo del Número Áureo. En la Tabla 49, se presentan los costos asociados a la primera generación:

Tabla 49. Costos. Algoritmos Genéticos 1a. generación

Individuo	Número aleatorio	Altura	Cota	Costos
1	0.0910	0.2047	246.4547	\$ 220,591.83
2	0.9281	2.0881	248.3381	\$ 175,108.53
3	0.1565	0.3520	246.6020	\$ 217,076.82
4	0.7103	1.5982	247.8482	\$ 178,896.93
5	0.4890	1.1002	247.3502	\$ 179,352.46
6	0.4356	0.9802	247.2302	\$ 181,956.57
7	0.9027	2.0311	248.2811	\$ 176,341.56
8	0.4258	0.9581	247.2081	\$ 182,435.82
9	0.0658	0.1482	246.3982	\$ 242,695.65
10	0.9575	2.1543	248.4043	\$ 179,543.26

- *Copia:*

Los datos se acomodan de mayor a menor con la finalidad de conservar al 10% de los individuos más aptos (Elitismo).

Tabla 50. Individuos ordenados. AG - 1a. generación

Individuo	Cota	Costos
1	248.3381	\$175,108.53
2	248.2811	\$176,341.56
3	247.8482	\$178,896.93
4	247.3502	\$179,352.46
5	248.4043	\$179,543.26
6	247.2302	\$181,956.57
7	247.2081	\$182,435.82
8	246.6020	\$217,076.82
9	246.4547	\$220,591.83
10	246.3982	\$242,695.65

- *Cruza:*

Del 90% de la población restante, se escoge aleatoriamente a los individuos que participarán en la cruce (Tabla 51). Debido a que el número de individuos es impar, en la última cruce solo se seleccionará a uno de los individuos.

Tabla 51. Selección de individuos para cruce. AG - 1a. generación

Individuos		Alturas	
1	4	0.2047	1.5982
9	1	0.1482	0.2047
9	1	0.1482	0.2047
6	7	0.9802	2.0311
10	10	2.1543	2.1543

Para la cruce se obtiene un número aleatorio y si este es menor a 0.8, el procedimiento de cruce se realiza, en caso contrario, los individuos pasan directamente sin modificación.

Tabla 52. Definición de aplicación operador cruce. AG - 1a. generación

Individuos		Alturas		Aleatorio
1	4	0.2047	1.5982	0.7661
9	1	0.1482	0.2047	0.3171
9	1	0.1482	0.2047	0.4817
6	7	0.9802	2.0311	0.2229
10	10	2.1543	2.1543	0.1945

Se observa que, en todos los casos, el número aleatorio es menor a 0.8, por lo que se lleva a cabo la cruce de los individuos. Cuando los individuos se presentan en números binarios, la cruce es como se indicó en el subcapítulo 3.4 Algoritmos Genéticos. La modificación que se plantea en este trabajo es la siguiente:

Si α_1 y α_2 son dos números aleatorios comprendidos entre 0 y 1, se tiene que:

$$H_1 = \alpha_1 * H_1 + (1 - \alpha_1) * H_1 \quad (47)$$

$$H_2 = \alpha_2 * H_2 + (1 - \alpha_2) * H_2 \quad (48)$$

Donde H_1 y H_2 son los individuos seleccionados para la cruce.

Por lo que la cruce propuesta sería:

$$H_1 = \alpha_1 * H_1 + (1 - \alpha_1) * H_2 \quad (49)$$

$$H_2 = \alpha_2 * H_2 + (1 - \alpha_2) * H_1 \quad (50)$$

Con base en lo anterior, se tendría:

Tabla 53. Operador cruce. AG - 1a. generación

Individuos		Alturas		Aleatorio (Cruza)	Aleatorio		Alturas (Cruza)	
					α_1	α_2		
1	4	0.2047	1.5982	0.7661	0.3053	0.3426	1.1728	0.6821
9	1	0.1482	0.2047	0.3171	0.0456	0.7335	0.2022	0.1897
9	1	0.1482	0.2047	0.4817	0.6060	0.0358	0.1705	0.1502
6	7	0.9802	2.0311	0.2229	0.9349	0.1923	1.0486	1.1823
10	10	2.1543	2.1543	0.1945	0.5021	0.1894	2.1543	2.1543

Los individuos después de la cruce y tomando en cuenta al elegido por elitismo, son:

Tabla 54. Individuos después de la cruce. AG - 1a. generación

individuo	Altura
1	2.0881
2	1.1728
3	0.6821
4	0.2022
5	0.1897
6	0.1705
7	0.1502
8	1.0486
9	1.1823
10	2.1543

- *Mutación:*

Para llevar a cabo la mutación, se obtendrá un número aleatorio y si este es menor a 0.05, la altura se multiplicará por otro número aleatorio, en caso contrario, la altura pasará sin mutación. De los individuos, el único al que no se le aplica la mutación es al elegido por elitismo en la operación copia.

Tabla 55. Definición de aplicación operador mutación. AG - 1a. generación

individuos	Altura	Aleatorio	Altura (Mutación)
1	2.0881	---	2.0881
2	1.1728	0.4648	1.1728
3	0.6821	0.0758	0.6821
4	0.2022	0.7502	0.2022
5	0.1897	0.6881	0.1897
6	0.1705	0.1233	0.1705
7	0.1502	0.0381	0.0957
8	1.0486	0.2647	1.0486
9	1.1823	0.8115	1.1823
10	2.1543	0.7294	2.1543

Una vez realizada la mutación (de ser el caso), se determinan las cotas de la siguiente generación:

Tabla 56. Individuos para segunda generación AG

individuos	Cotas
1	248.3381
2	247.4228
3	246.9321
4	246.4522
5	246.4397
6	246.4205
7	246.3457
8	247.2986
9	247.4323
10	248.4043

Las operaciones de copia, cruce y mutación se repiten de acuerdo con el número de generaciones establecido.

A continuación, en la Tabla 57 se presentan las cotas y costos para las generaciones 2, 50, 100 y 500.

Tabla 57. Cotas y costos. AG - Generación 2, 50, 100 y 500

2° generación		
Individuo	Cota	Costo
1	248.3381	\$ 175,108.53
2	246.4793	\$ 220,006.78
3	246.5076	\$ 219,331.48
4	246.3982	\$ 242,695.65
5	246.4547	\$ 220,591.83
6	246.4526	\$ 220,642.05
7	246.4526	\$ 220,642.71
8	247.5978	\$ 173,983.21
9	247.9403	\$ 176,978.63
10	248.4043	\$ 179,543.26

50° generación		
Individuo	Cota	Costo
1	247.6600	\$ 172,633.36
2	248.1200	\$ 179,822.64
3	248.1262	\$ 179,689.47
4	247.8316	\$ 179,242.79
5	247.9573	\$ 176,625.75
6	248.0015	\$ 175,704.74
7	247.9623	\$ 176,519.75
8	248.1410	\$ 179,368.89
9	246.5248	\$ 218,920.85
10	246.6161	\$ 216,741.24

100° generación		
Individuo	Cota	Costo
1	247.6793	\$ 172,216.11
2	247.6569	\$ 172,701.59
3	247.6568	\$ 172,703.51
4	247.8797	\$ 178,239.80
5	247.8751	\$ 178,335.50
6	247.8034	\$ 179,830.10
7	247.7465	\$ 170,758.16
8	246.8070	\$ 212,184.58
9	246.8069	\$ 212,186.61
10	246.6161	\$ 216,741.24

500° generación		
Individuo	Cota	Costo
1	247.7465	\$ 170,758.16
2	247.7465	\$ 170,758.16
3	247.5600	\$ 174,802.73
4	247.7465	\$ 170,758.16
5	247.7465	\$ 170,758.16
6	247.7465	\$ 170,758.16
7	247.7465	\$ 170,758.16
8	246.4503	\$ 220,697.48
9	247.7465	\$ 170,758.16
10	246.6161	\$ 216,741.24

4.4.3.3 Nelder-Mead

Vértices iniciales y primera figura

Cada uno de los vértices iniciales ($n+1$), se componen de un conjunto de 27 elevaciones generadas aleatoriamente y a las cuales se realiza un ajuste con la finalidad que el desnivel sea el determinado por las cotas de plantilla inicial y final.

A partir de las elevaciones obtenidas y ajustadas para cada uno de los $n+1$ vértices, se obtienen las pendientes, los diámetros teóricos y posteriormente los diámetros comerciales. Se evalúan las restricciones de velocidades mínima, máxima, colchón y pendiente mínima y finalmente se obtienen los costos por tramo y totales para cada individuo.

Número de iteraciones

Se establece el número de iteraciones que se efectuarán, se puede establecer hasta un porcentaje respecto al costo total de cada uno de los vértices, o bien un número determinado de repeticiones del método.

Evaluación vértices iniciales

Una vez obtenidos los costos totales para cada uno de los vértices, es necesario ordenarlos del mejor (M) al peor (P).

Punto medio

Se obtiene el punto medio excluyendo el punto P

Reflexión

Se aplica la ecuación (25), donde se establece un valor para el coeficiente de reflexión (ω). Con la finalidad de evitar que haya elevaciones negativas al realizar la reflexión, se establece una penalización en los costos totales. Se tiene el vértice "R"

Expansión

Si el costo total del vértice "R", es menor que el vértice "P". Se realiza la expansión, de acuerdo con la ecuación (26) y de igual manera, se penalizan los costos totales si al realizar la expansión se presentan elevaciones negativas.

Contracción

En caso de que el costo total del vértice "R", no sea menor que el vértice "P". Se realiza la contracción de acuerdo con la ecuación (27), e igual que en los casos anteriores existe penalización en caso de presentarse elevaciones negativas.

Encogimiento

Finalmente, en caso de que la reflexión, expansión o contracción muestren una mejora en los costos, es necesario realizar el encogimiento empleando la ecuación (28).

Evaluación de la función objetivo y restricciones

Al efectuar cada uno de los operadores (reflexión, expansión, contracción y encogimiento), se realiza la evaluación de las restricciones (velocidades, colchón y pendiente), en donde se penaliza en los costos si no se llega a cumplir alguna de ellas. La velocidad se obtiene a partir del cálculo del tirante normal y los costos se obtienen como se establece en el capítulo 4.3 Análisis de costos.

El proceso se repite de acuerdo con el número de iteraciones establecido previamente.

Solución del ejemplo con el método de Nelder-Mead

Vértices iniciales

En el ejemplo presentado (Figura 27), solo se tiene una incógnita, como se indicó en el subcapítulo 3.3 Nelder-Mead, el método requiere $n+1$ vértices (Tabla 58 y Figura 29). Dichos puntos se obtienen de manera aleatoria de manera similar a como se generaron en AG.

Tabla 58. Vértices iniciales. Nelder-Mead

Vértice	Aleatorio	Altura	Cota
1	0.9451	2.1264	248.3764
2	0.2466	0.5549	246.8049

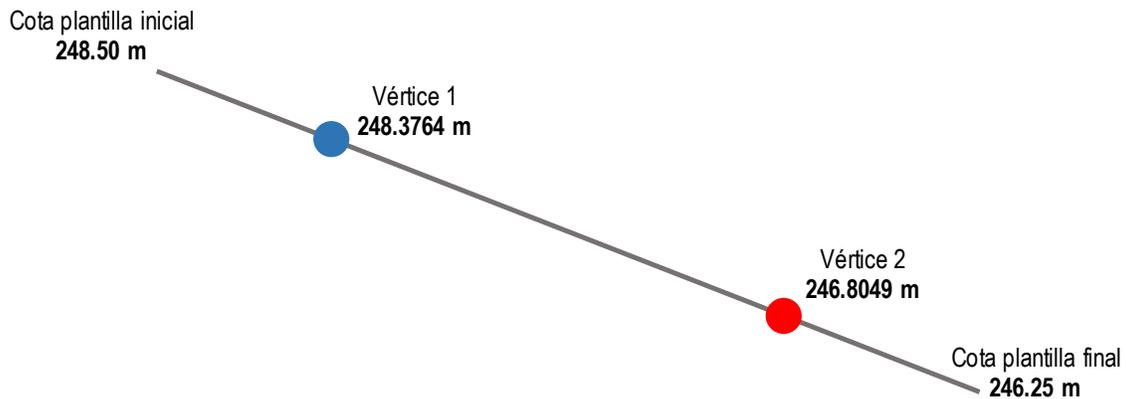


Figura 29. Vértices iniciales y cotas inicial y final. Nelder-Mead

A partir de las cotas iniciales, se obtienen las pendientes, diámetros teóricos, comerciales, se evalúan las restricciones y se calculan los costos como se presentó en la solución del ejemplo con el Número Áureo.

A continuación, se presentan los costos asociados a los vértices iniciales.

Tabla 59. Costos. Nelder-Mead - vértices iniciales

Vértice	Cota	Costos
1	248.3764	\$ 180,172.21
2	246.8049	\$ 212,235.51

Con base en lo anterior, se observa que el vértice 2 es una peor solución que el vértice 1; por lo que la solución se encuentra en esta dirección. Por lo tanto, $V_1=V_M$ y $V_2=V_P$. En el caso específico de 2 puntos, no es necesario calcular el punto medio.

Las expresiones que se aplicarán en el método son:

- Reflexión:

$$R = V_M + (V_M - V_P) \quad (51)$$

- Expansión:

$$E = V_M + 2 * (V_M - V_P) \quad (52)$$

- *Contracción externa:*

$$T_e = V_M + 0.5 * (V_M - V_P) \quad (53)$$

- *Contracción interna:*

$$T_i = V_M - 0.5 * (V_M - V_P) \quad (54)$$

- *Encogimiento:*

$$V_{Mi} = V_M - 0.2 * (V_M - V_P) \quad (55)$$

Primera iteración

- *Reflexión:*

Aplicando la ecuación (51) y sustituyendo V_M y V_P :

$$R = 249.9479 [m]$$

Se tiene que el vértice obtenido es mayor a la cota de plantilla inicial, por lo que no es solución.

- *Expansión:*

Aplicando la ecuación (52) y sustituyendo V_M y V_P :

$$E = 251.5194 [m]$$

Se tiene que el vértice obtenido es mayor a la cota de plantilla inicial, por lo que tampoco es solución.

- *Contracción externa:*

Aplicando la ecuación (53) y sustituyendo V_M y V_P :

$$T_e = 249.1622 [m]$$

- *Contracción interna:*

Aplicando la ecuación (54) y sustituyendo V_M y V_P :

$$T_i = 247.5907 [m]$$

Con base en lo anterior, se observa que la única solución válida es la obtenida con la Contracción interna (T_i) y es la que se evalúa.

Tabla 60. Contracción interna. Nelder-Mead – 1a. iteración

Vértice	Cota	Costo
T_i	247.5907	\$ 174,137.54

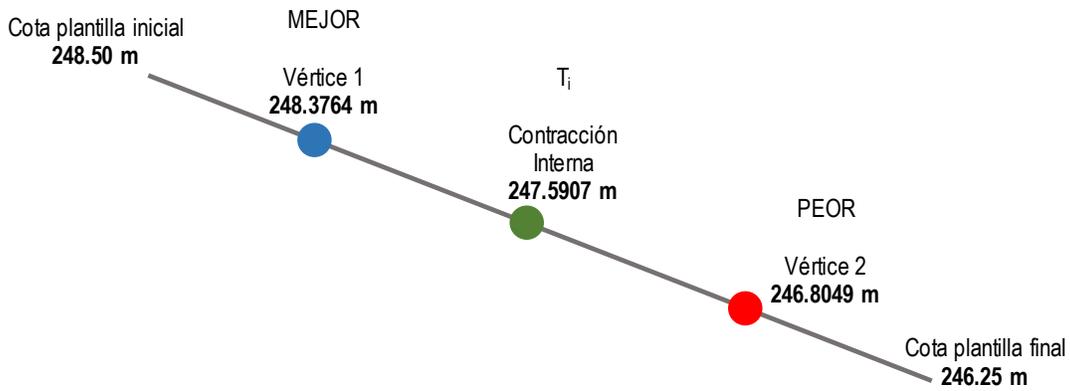


Figura 30. Vértice mejor, peor y contracción interna. N-M 1a. iteración

El vértice " T_i ", sustituye al peor, por lo que queda como se indica en la Figura 31.

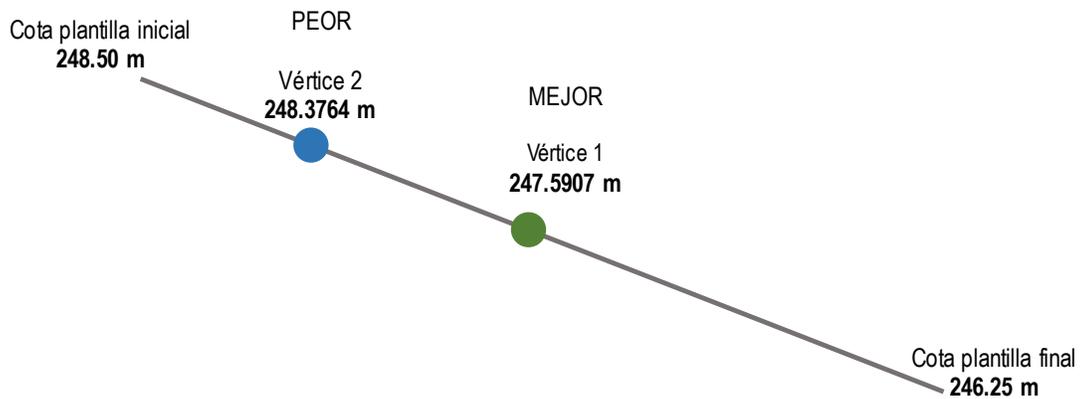


Figura 31. Renombre a puntos mejor y peor. N-M - 1a. iteración

Tabla 61. Cotas y costos. Nelder-Mead - 1a. iteración

Vértice	Cota	Costo
1	247.5907	\$ 174,137.54
2	248.3764	\$ 180,172.21

Segunda iteración

- Reflexión:

Tabla 62. Reflexión. Nelder-Mead - 2a. iteración

Vértice	Cota	Costo
R	246.8049	\$ 212,235.51

Debido a que el costo obtenido con la reflexión da un peor resultado que los obtenidos previamente, se descarta este vértice.

- Expansión:

Tabla 63. Expansión. Nelder-Mead - 2a. iteración

Vértice	Cota
E	246.0193

Se tiene que el vértice obtenido es menor a la cota de plantilla final, por lo que tampoco es solución.

- *Contracción externa:*

Tabla 64. Contracción interna. Nelder-Mead - 2a. iteración

Vértice	Cota	Costo
T_e	247.1978	\$ 182,659.12

- *Contracción interna:*

Tabla 65. Contracción externa. Nelder-Mead - 2a. iteración

Vértice	Cota	Costo
T_i	247.9836	\$ 176,078.19

Se observa que las cotas obtenidas en la contracción interna y externa se encuentran dentro del rango establecido por las cotas inicial y final, sin embargo, se elige la contracción interna debido a que da un menor costo. Los nuevos vértices quedan de la siguiente manera:

Tabla 66. Cotas y costos. Nelder-Mead - 2a. iteración

Vértice	Cota	Costo
1	247.5907	\$ 174,137.54
2	247.9836	\$ 176,078.19

Las operaciones de reflexión, expansión y contracción se repiten de acuerdo al número de iteraciones establecido. Para el caso del ejemplo, se realizaron 20 iteraciones.

Vigésima iteración

Tabla 67. Cotas y costos. Nelder-Mead - 20a. iteración

Vértice	Cota	Costo
1	247.7500	\$ 170,682.30
2	247.7499	\$ 170,683.96

En resumen:

Tabla 68. Comparación cotas y costos. AG, Número Áureo y N-M

Método	Cota	Costo
Número Áureo	247.7500	\$ 170,681.62
Algoritmos Genéticos	247.7465	\$ 170,758.16
Nelder-Mead	247.7500	\$ 170,682.30

Los resultados obtenidos con Nelder-Mead y el Número Áureo son prácticamente iguales y la diferencia entre ellos y Algoritmos Genéticos representa una diferencia menor al 0.05%.

5 Aplicación y análisis de resultados

5.1 Aplicación del método a la zona de estudio

Para aplicar el método de optimización en la zona de estudio, en la Tabla 69 y Tabla 70 se presentan los datos de entrada para los tramos y nodos respectivamente.

- Tramos

Tabla 69. Datos de entrada - tramos

Tramo	Longitud [m]	Tramo	Longitud [m]
1	36.58	15	38.44
2	44.55	16	37.98
3	36.25	17	34.89
4	35.9	18	38
5	35.92	19	41.78
6	37.84	20	23.35
7	36.6	21	35.55
8	37.4	22	37.4
9	38.55	23	36.25
10	38.46	24	36.3
11	36.13	25	37.45
12	41.75	26	37.6
13	35.71	27	29.55
14	37.9		

- Pozos de visita (nodos)

Tabla 70. Datos de entrada - nodos

Nodo	Gasto [m ³ /s]	Cota terreno [m]	Cota plantilla [m]	Nodo	Gasto [m ³ /s]	Cota terreno [m]	Cota plantilla [m]
1	0.0027	232.12	230.82	15	0.4655	232.37	
2	0.0121	232.12		16	0.5107	232.22	
3	0.0245	232.12		17	0.5426	232.3	
4	0.0589	232.12		18	0.5928	232.3	
5	0.0838	232.03		19	0.6218	232.25	
6	0.1099	232.25		20	0.6650	232.37	
7	0.1350	232.36		21	0.7055	232.33	
8	0.1518	232.42		22	0.7459	232.2	
9	0.2339	232.49		23	0.7861	232.24	
10	0.2691	232.42		24	0.8275	232.26	
11	0.3099	232.36		25	0.8672	232.29	
12	0.3426	232.46		26	0.9125	232.16	
13	0.3744	232.41		27	0.9403	231.98	
14	0.4284	232.39		28		231.89	227.96

Los gastos de entrada a cada pozo de visita se presentan en la Tabla 16.

5.2 Análisis de resultados

5.3.1 Número Áureo Modificado

En la Tabla 71, se presentan las cotas de plantilla, diámetros comerciales y costo por cada tramo. Se observa que los diámetros oscilan entre las 12" y 36", teniendo un costo total del colector de \$2,075,713.92

Tabla 71. Resultados Número Áureo

Nodo	Cota Plantilla	Diámetro comercial	Costo tramo
	[m]	[m]	[\$]
1	230.8200		
2	230.7468	0.30	\$ 30,885.85
3	230.6577	0.30	\$ 35,989.58
4	230.5867	0.38	\$ 35,061.28
5	230.4355	0.38	\$ 35,242.01
6	230.3112	0.45	\$ 39,794.04
7	230.2093	0.61	\$ 52,156.84
8	230.1800	0.75	\$ 60,773.77
9	230.1501	0.75	\$ 63,629.08
10	230.0826	0.91	\$ 75,565.29
11	230.0505	0.91	\$ 75,094.94
12	229.9986	0.91	\$ 72,533.91
13	229.9422	0.91	\$ 83,658.64
14	229.8077	0.91	\$ 74,649.34
15	229.7276	0.91	\$ 80,240.63
16	229.6872	1.07	\$ 90,687.59
17	229.5980	1.07	\$ 90,456.31
18	229.5482	1.07	\$ 86,618.10
19	229.4675	1.07	\$ 93,962.08
20	229.3891	1.07	\$ 104,661.50
21	229.2548	1.07	\$ 67,866.29
22	229.1690	1.07	\$ 95,178.28
23	229.0680	1.07	\$ 100,364.09
24	228.8270	1.07	\$ 102,301.52
25	228.7064	1.07	\$ 107,026.27
26	228.5112	1.07	\$ 112,260.93
27	228.3592	1.07	\$ 113,054.87
28	227.9600	1.07	\$ 96,000.87
			\$ 2,075,713.92

En la Tabla 72, se muestran los costos por concepto establecidos en la Tabla 17, los conceptos de tubería (CT), relleno de zanjas (CRZ) y pozo de visita (CPV) representan el 65.69% del costo total.

Tabla 72. Costos por concepto - Número Áureo

Tramo	CCP [\$]	CDP [\$]	CP [\$]	CCA [\$]	CT [\$]	CE [\$]	CRZ [\$]	CPV [\$]
1	\$ 941.57	\$ 254.81	\$ 5,066.59	\$ 2,111.40	\$ 5,414.34	\$ 1,945.92	\$ 5,151.23	\$10,000.00
2	\$ 1,146.72	\$ 310.33	\$ 6,170.49	\$ 2,571.43	\$ 6,594.01	\$ 2,513.74	\$ 6,682.87	\$10,000.00
3	\$ 933.08	\$ 293.80	\$ 5,841.81	\$ 2,434.46	\$ 6,503.06	\$ 2,514.23	\$ 6,540.85	\$10,000.00
4	\$ 924.07	\$ 290.96	\$ 5,785.41	\$ 2,410.96	\$ 6,440.27	\$ 2,599.88	\$ 6,790.47	\$10,000.00
5	\$ 924.58	\$ 326.92	\$ 6,500.41	\$ 2,708.92	\$ 7,495.50	\$ 3,299.96	\$ 8,537.74	\$10,000.00
6	\$ 974.00	\$ 430.60	\$ 8,561.75	\$ 3,567.96	\$10,669.64	\$ 5,076.45	\$12,665.03	\$10,211.42
7	\$ 942.08	\$ 489.44	\$ 9,731.68	\$ 4,055.52	\$ 12,933.58	\$ 6,366.52	\$15,057.19	\$11,197.76
8	\$ 962.68	\$ 500.13	\$ 9,944.40	\$ 4,144.16	\$ 13,216.28	\$ 6,888.55	\$16,155.45	\$11,817.43
9	\$ 992.28	\$ 603.33	\$11,996.21	\$ 4,999.23	\$ 17,089.32	\$ 8,547.78	\$19,200.51	\$12,136.64
10	\$ 989.96	\$ 601.92	\$11,968.21	\$ 4,987.56	\$ 17,049.42	\$ 8,453.80	\$19,006.98	\$12,037.09
11	\$ 929.99	\$ 565.45	\$11,243.14	\$ 4,685.40	\$ 16,016.52	\$ 8,225.22	\$ 18,425.15	\$ 12,443.03
12	\$ 1,074.65	\$ 653.41	\$ 12,992.01	\$ 5,414.21	\$ 18,507.89	\$ 9,923.13	\$ 22,131.88	\$ 12,961.47
13	\$ 919.18	\$ 558.88	\$ 11,112.44	\$ 4,630.93	\$ 15,830.34	\$ 8,760.92	\$ 19,479.23	\$ 13,357.42
14	\$ 975.55	\$ 593.15	\$ 11,793.94	\$ 4,914.94	\$ 16,801.17	\$ 9,717.18	\$ 21,515.52	\$ 13,929.18
15	\$ 989.45	\$ 689.17	\$ 13,703.04	\$ 5,710.53	\$ 20,838.27	\$ 11,152.15	\$ 23,837.85	\$ 13,767.14
16	\$ 977.61	\$ 680.92	\$ 13,539.06	\$ 5,642.19	\$ 20,588.91	\$ 11,182.89	\$ 23,882.43	\$ 13,962.32
17	\$ 898.07	\$ 625.52	\$ 12,437.54	\$ 5,183.15	\$ 18,913.82	\$ 10,827.38	\$ 23,052.97	\$ 14,679.65
18	\$ 978.12	\$ 681.28	\$ 13,546.19	\$ 5,645.16	\$ 20,599.75	\$ 12,014.47	\$ 25,553.74	\$ 14,943.37
19	\$ 1,075.42	\$ 749.05	\$ 14,893.68	\$ 6,206.71	\$ 22,648.88	\$ 13,903.83	\$ 29,490.33	\$ 15,693.60
20	\$ 601.03	\$ 418.63	\$ 8,323.78	\$ 3,468.80	\$ 12,658.00	\$ 8,266.34	\$ 17,477.50	\$ 16,652.22
21	\$ 915.06	\$ 637.35	\$ 12,672.81	\$ 5,281.20	\$ 19,271.61	\$ 12,714.71	\$ 26,869.05	\$ 16,816.49
22	\$ 962.68	\$ 670.52	\$ 13,332.30	\$ 5,556.03	\$ 20,274.49	\$ 13,639.16	\$ 28,795.20	\$ 17,133.72
23	\$ 933.08	\$ 649.90	\$ 12,922.35	\$ 5,385.19	\$ 19,651.08	\$ 14,276.71	\$ 30,033.07	\$ 18,450.15
24	\$ 934.36	\$ 650.80	\$ 12,940.17	\$ 5,392.62	\$ 19,678.18	\$ 15,380.20	\$ 32,251.76	\$ 19,798.18
25	\$ 963.96	\$ 671.42	\$ 13,350.12	\$ 5,563.46	\$ 20,301.60	\$ 16,453.82	\$ 34,451.46	\$ 20,505.10
26	\$ 967.82	\$ 674.11	\$ 13,403.60	\$ 5,585.74	\$ 20,382.91	\$ 16,621.02	\$ 34,792.94	\$ 20,626.73
27	\$ 760.62	\$ 529.78	\$ 10,533.94	\$ 4,389.86	\$ 16,019.02	\$ 13,665.26	\$ 28,554.75	\$ 21,547.65

En la Tabla 73, se presenta la revisión de las restricciones, en la tercera columna se tiene el tirante normal para el gasto en cada tramo (y nodo) de la Tabla 70, a su vez, en la cuarta columna se establece la velocidad para el diámetro comercial y el gasto correspondiente. Finalmente, en la quinta y sexta columna se obtienen la pendiente y colchón en cada tramo. Se observa que se cumplen con las restricciones establecidas en el subcapítulo 4.4.2 Restricciones.

Tabla 73. Revisión restricciones - Número Áureo

Tramo	Diámetro comercial	Tirante normal	Velocidad	Pendiente	Colchón	Velocidad mínima	Velocidad máxima	Pendiente mínima	Colchón mínimo
	[m]	[m]	[m/s]	[milésimas]	[m]	[m/s]	[m/s]	[milésimas]	[m]
1	0.30	0.0504	0.3390	2.0	1.04	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
2	0.30	0.1084	0.5244	2.0	1.12	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
3	0.38	0.1440	0.6223	2.0	1.12	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
4	0.38	0.1900	1.0394	4.2	1.18	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
5	0.45	0.2250	1.0545	3.5	1.32	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
6	0.61	0.2412	1.0220	2.7	1.43	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
7	0.75	0.3431	0.6854	0.8	1.45	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
8	0.75	0.3670	0.7062	0.8	1.54	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
9	0.91	0.3416	1.0487	1.8	1.43	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
10	0.91	0.4549	0.8277	0.8	1.41	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
11	0.91	0.4217	1.0507	1.4	1.48	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
12	0.91	0.4549	1.0537	1.4	1.55	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
13	0.91	0.3582	1.5745	3.8	1.62	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
14	0.91	0.4549	1.3177	2.1	1.70	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
15	1.07	0.5349	1.0356	1.1	1.52	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
16	1.07	0.4486	1.4283	2.3	1.55	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
17	1.07	0.5349	1.2071	1.4	1.66	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
18	1.07	0.5020	1.4310	2.1	1.70	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
19	1.07	0.5349	1.3833	1.9	1.81	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
20	1.07	0.4057	2.1273	5.8	1.96	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
21	1.07	0.5349	1.5694	2.4	1.98	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
22	1.07	0.5349	1.6594	2.7	2.03	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
23	1.07	0.4272	2.3467	6.6	2.23	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
24	1.07	0.5349	1.8409	3.3	2.44	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
25	1.07	0.4827	2.2029	5.2	2.55	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
26	1.07	0.5349	2.0299	4.0	2.56	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
27	1.07	0.3885	3.1892	13.5	2.71	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

5.3.2 Nelder-Mead

La optimización mediante el método de Nelder-Mead, se realizó con 29 individuos ($n+1$ pozos de visita), un total de 10,000 iteraciones y considerando $\omega = 1$, $\beta = 2$ y $\gamma = 0.5$. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

En la Tabla 74, se presentan las cotas de plantilla, diámetros comerciales y costo por cada tramo. Se observa que los diámetros oscilan entre las 12" y 36", teniendo un costo total del colector de \$2,085,928.74

Tabla 74. Resultados Nelder-Mead

Nodo	Cota Plantilla	Diámetro comercial	Costo tramo
	[m]	[m]	[\$]
1	230.8200		
2	230.7468	0.30	\$ 30,885.91
3	230.6500	0.30	\$ 36,015.90
4	230.5556	0.30	\$ 31,699.28
5	230.4149	0.45	\$ 38,507.43
6	230.3784	0.61	\$ 47,066.88
7	230.2822	0.61	\$ 51,236.55
8	230.2173	0.61	\$ 52,375.59
9	230.1253	0.61	\$ 55,709.62
10	230.0374	0.76	\$ 67,410.55
11	229.9531	0.76	\$ 67,687.51
12	229.8882	0.91	\$ 74,645.28
13	229.8314	0.91	\$ 86,143.13
14	229.7738	0.91	\$ 76,107.72
15	229.6896	0.91	\$ 80,996.11
16	229.5937	0.91	\$ 82,055.65
17	229.4707	0.91	\$ 82,807.97
18	229.3150	0.91	\$ 80,825.22
19	229.2392	1.07	\$ 99,301.82
20	229.1105	1.07	\$ 110,945.05
21	229.0294	1.07	\$ 72,086.35
22	228.9436	1.07	\$ 100,153.26
23	228.8026	1.07	\$ 105,978.31
24	228.6278	1.07	\$ 107,499.16
25	228.4383	1.07	\$ 112,259.15
26	228.2770	1.07	\$ 118,011.44
27	228.0870	1.07	\$ 118,869.38
28	227.9600	1.07	\$ 98,648.51
			\$ 2,085,928.74

En la Tabla 75, se muestran los costos por concepto establecidos en la Tabla 17, los conceptos de tubería (CT), relleno de zanjas (CRZ) y pozo de visita (CPV) representan el 66.18% del costo total.

Tabla 75. Costos por concepto - Nelder-Mead

Tramo	CCP	CDP	CP	CCA	CT	CE	CRZ	CPV
	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]
1	\$ 941.57	\$ 254.81	\$ 5,066.59	\$ 2,111.40	\$ 5,414.34	\$ 1,945.93	\$ 5,151.28	\$ 10,000.00
2	\$ 1,146.72	\$ 310.33	\$ 6,170.49	\$ 2,571.43	\$ 6,594.01	\$ 2,520.59	\$ 6,702.35	\$ 10,000.00
3	\$ 933.08	\$ 252.51	\$ 5,020.88	\$ 2,092.35	\$ 5,365.49	\$ 2,188.90	\$ 5,846.07	\$ 10,000.00
4	\$ 924.07	\$ 326.74	\$ 6,496.79	\$ 2,707.42	\$ 7,491.33	\$ 2,967.85	\$ 7,593.24	\$ 10,000.00
5	\$ 924.58	\$ 408.75	\$ 8,127.32	\$ 3,386.92	\$ 10,128.26	\$ 4,071.44	\$ 10,019.60	\$ 10,000.00
6	\$ 974.00	\$ 430.60	\$ 8,561.75	\$ 3,567.96	\$ 10,669.64	\$ 4,858.18	\$ 12,174.43	\$ 10,000.00
7	\$ 942.08	\$ 416.48	\$ 8,281.18	\$ 3,451.04	\$ 10,320.00	\$ 5,231.82	\$ 12,896.30	\$ 10,836.69
8	\$ 962.68	\$ 425.59	\$ 8,462.19	\$ 3,526.47	\$ 10,545.57	\$ 5,840.19	\$ 14,170.62	\$ 11,776.31
9	\$ 992.28	\$ 521.00	\$ 10,359.30	\$ 4,317.07	\$ 13,829.31	\$ 7,528.79	\$ 17,497.18	\$ 12,365.61
10	\$ 989.96	\$ 519.78	\$ 10,335.12	\$ 4,306.99	\$ 13,797.03	\$ 7,600.01	\$ 17,634.72	\$ 12,503.90
11	\$ 929.99	\$ 565.45	\$ 11,243.14	\$ 4,685.40	\$ 16,016.52	\$ 8,700.71	\$ 19,380.37	\$ 13,123.71
12	\$ 1,074.65	\$ 653.41	\$ 12,992.01	\$ 5,414.21	\$ 18,507.89	\$ 10,508.03	\$ 23,306.89	\$ 13,686.06
13	\$ 919.18	\$ 558.88	\$ 11,112.44	\$ 4,630.93	\$ 15,830.34	\$ 9,088.11	\$ 20,136.53	\$ 13,831.31
14	\$ 975.55	\$ 593.15	\$ 11,793.94	\$ 4,914.94	\$ 16,801.17	\$ 9,889.92	\$ 21,862.53	\$ 14,164.91
15	\$ 989.45	\$ 601.60	\$ 11,961.98	\$ 4,984.96	\$ 17,040.55	\$ 10,055.48	\$ 22,223.54	\$ 14,198.07
16	\$ 977.61	\$ 594.40	\$ 11,818.84	\$ 4,925.31	\$ 16,836.63	\$ 10,293.06	\$ 22,676.62	\$ 14,685.49
17	\$ 898.07	\$ 546.04	\$ 10,857.27	\$ 4,524.59	\$ 15,466.83	\$ 10,248.19	\$ 22,423.85	\$ 15,860.37
18	\$ 978.12	\$ 681.28	\$ 13,546.19	\$ 5,645.16	\$ 20,599.75	\$ 13,286.73	\$ 28,109.59	\$ 16,455.00
19	\$ 1,075.42	\$ 749.05	\$ 14,893.68	\$ 6,206.71	\$ 22,648.88	\$ 15,440.32	\$ 32,576.99	\$ 17,354.01
20	\$ 601.03	\$ 418.63	\$ 8,323.78	\$ 3,468.80	\$ 12,658.00	\$ 9,120.16	\$ 19,192.76	\$ 18,303.18
21	\$ 915.06	\$ 637.35	\$ 12,672.81	\$ 5,281.20	\$ 19,271.61	\$ 13,877.38	\$ 29,204.73	\$ 18,293.12
22	\$ 962.68	\$ 670.52	\$ 13,332.30	\$ 5,556.03	\$ 20,274.49	\$ 14,970.76	\$ 31,470.27	\$ 18,741.25
23	\$ 933.08	\$ 649.90	\$ 12,922.35	\$ 5,385.19	\$ 19,651.08	\$ 15,498.41	\$ 32,487.36	\$ 19,971.79
24	\$ 934.36	\$ 650.80	\$ 12,940.17	\$ 5,392.62	\$ 19,678.18	\$ 16,610.69	\$ 34,723.68	\$ 21,328.65
25	\$ 963.96	\$ 671.42	\$ 13,350.12	\$ 5,563.46	\$ 20,301.60	\$ 17,818.28	\$ 37,192.52	\$ 22,150.09
26	\$ 967.82	\$ 674.11	\$ 13,403.60	\$ 5,585.74	\$ 20,382.91	\$ 18,002.24	\$ 37,567.68	\$ 22,285.29
27	\$ 760.62	\$ 529.78	\$ 10,533.94	\$ 4,389.86	\$ 16,019.02	\$ 14,248.85	\$ 29,727.12	\$ 22,439.32

En la Tabla 76, se presenta la revisión de las restricciones, en la tercera columna se tiene el tirante normal para el gasto en cada tramo (y nodo) de la Tabla 70, a su vez, en la cuarta columna se establece la velocidad para el diámetro comercial y el gasto correspondiente. Finalmente, en la quinta y sexta columna se obtienen la pendiente y colchón en cada tramo. Se observa que se cumplen con las restricciones establecidas en el subcapítulo 4.4.2 Restricciones.

Tabla 76. Revisión restricciones - Nelder-Mead

Tramo	Díámetro comercial	Tirante normal	Velocidad	Pendiente	Colchón	Velocidad mínima	Velocidad máxima	Pendiente mínima	Colchón mínimo
	[m]	[m]	[m/s]	[milésimas]	[m]	[m/s]	[m/s]	[milésimas]	[m]
1	0.30	0.0504	0.3390	2.0	1.04	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
2	0.30	0.1061	0.5404	2.2	1.12	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
3	0.30	0.1494	0.6970	2.6	1.22	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
4	0.45	0.1780	1.0070	3.9	1.14	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
5	0.61	0.2721	0.6649	1.0	1.13	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
6	0.61	0.2450	1.0008	2.5	1.36	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
7	0.61	0.3049	0.9245	1.8	1.53	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
8	0.61	0.2967	1.0761	2.5	1.67	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
9	0.76	0.3458	1.1647	2.3	1.61	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
10	0.76	0.3793	1.1892	2.2	1.63	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
11	0.91	0.3958	1.1417	1.8	1.58	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
12	0.91	0.4541	1.0560	1.4	1.67	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
13	0.91	0.4550	1.1513	1.6	1.69	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
14	0.91	0.4482	1.3430	2.2	1.74	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
15	0.91	0.4550	1.4316	2.5	1.74	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
16	0.91	0.4450	1.6156	3.2	1.82	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
17	0.91	0.4200	1.8494	4.5	2.00	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
18	1.07	0.5111	1.3982	2.0	1.93	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
19	1.07	0.4641	1.6628	3.1	2.07	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
20	1.07	0.4660	1.7690	3.5	2.21	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
21	1.07	0.5350	1.5691	2.4	2.21	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
22	1.07	0.4858	1.8790	3.8	2.28	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
23	1.07	0.4669	2.0858	4.8	2.46	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
24	1.07	0.4698	2.1775	5.2	2.67	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
25	1.07	0.5098	2.0521	4.3	2.80	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
26	1.07	0.5012	2.2067	5.1	2.82	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
27	1.07	0.5347	2.0930	4.3	2.84	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

5.3.3 Algoritmos Genéticos

La optimización con Algoritmos Genéticos se realizó con 100 individuos y un total de 1,000 generaciones. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

En la Tabla 77, se presentan las cotas de plantilla, diámetros comerciales y costo por cada tramo. Se observa que los diámetros oscilan entre las 12" y 42", teniendo un costo total del colector de \$1,992,124.68

Tabla 77. Resultados Algoritmos Genéticos

Nodo	Cota Plantilla	Diámetro comercial	Costo tramo
	[m]	[m]	[\$]
1	230.8200		
2	230.7425	0.30	\$ 30,898.11
3	230.6087	0.30	\$ 36,171.69
4	230.5542	0.38	\$ 35,324.54
5	230.4443	0.45	\$ 38,407.04
6	230.4150	0.61	\$ 46,770.46
7	230.3918	0.76	\$ 58,272.87
8	230.3694	0.76	\$ 57,853.30
9	230.3429	0.76	\$ 60,586.15
10	230.3180	0.91	\$ 71,016.48
11	230.2858	0.91	\$ 70,102.81
12	230.2455	0.91	\$ 67,634.99
13	230.1878	0.91	\$ 78,128.24
14	230.1633	1.07	\$ 77,185.01
15	230.1288	1.07	\$ 81,439.00
16	230.0872	1.07	\$ 81,340.80
17	230.0387	1.07	\$ 80,733.97
18	229.9871	1.07	\$ 77,038.82
19	229.9215	1.07	\$ 83,631.53
20	229.8424	1.07	\$ 93,416.47
21	229.7563	1.07	\$ 59,873.13
22	229.6448	1.07	\$ 84,393.29
23	229.4965	1.07	\$ 90,019.37
24	229.2850	1.07	\$ 92,383.61
25	228.7921	1.07	\$ 100,937.71
26	228.4064	1.07	\$ 112,479.33
27	228.0544	1.07	\$ 117,757.93
28	227.9600	1.22	\$ 108,328.04
			\$ 1,992,124.68

Así mismo, en la Tabla 78, se muestran los costos por concepto establecidos en la Tabla 17, los conceptos de tubería (CT), relleno de zanjas (CRZ) y pozo de visita (CPV) representan el 64.81% del costo total.

Tabla 78. Costos por concepto - Algoritmos Genéticos

Tramo	CCP	CDP	CP	CCA	CT	CE	CRZ	CPV
	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]
1	\$ 941.57	\$ 254.81	\$ 5,066.59	\$ 2,111.40	\$ 5,414.34	\$ 1,949.10	\$ 5,160.31	\$ 10,000.00
2	\$ 1,146.72	\$ 310.33	\$ 6,170.49	\$ 2,571.43	\$ 6,594.01	\$ 2,561.10	\$ 6,817.62	\$ 10,000.00
3	\$ 933.08	\$ 293.80	\$ 5,841.81	\$ 2,434.46	\$ 6,503.06	\$ 2,582.69	\$ 6,735.64	\$ 10,000.00
4	\$ 924.07	\$ 326.74	\$ 6,496.79	\$ 2,707.42	\$ 7,491.33	\$ 2,941.74	\$ 7,518.96	\$ 10,000.00
5	\$ 924.58	\$ 408.75	\$ 8,127.32	\$ 3,386.92	\$ 10,128.26	\$ 3,994.36	\$ 9,800.27	\$ 10,000.00
6	\$ 974.00	\$ 511.40	\$ 10,168.51	\$ 4,237.56	\$ 13,574.61	\$ 5,556.32	\$ 13,250.47	\$ 10,000.00
7	\$ 942.08	\$ 494.65	\$ 9,835.29	\$ 4,098.69	\$ 13,129.78	\$ 5,689.97	\$ 13,683.15	\$ 9,979.69
8	\$ 962.68	\$ 505.46	\$ 10,050.27	\$ 4,188.28	\$ 13,416.76	\$ 6,180.13	\$ 14,717.08	\$ 10,565.49
9	\$ 992.28	\$ 603.33	\$ 11,996.21	\$ 4,999.23	\$ 17,089.32	\$ 7,502.21	\$ 17,100.07	\$ 10,733.84
10	\$ 989.96	\$ 601.92	\$ 11,968.21	\$ 4,987.56	\$ 17,049.42	\$ 7,307.16	\$ 16,703.49	\$ 10,495.09
11	\$ 929.99	\$ 565.45	\$ 11,243.14	\$ 4,685.40	\$ 16,016.52	\$ 7,121.97	\$ 16,208.83	\$ 10,863.69
12	\$ 1,074.65	\$ 653.41	\$ 12,992.01	\$ 5,414.21	\$ 18,507.89	\$ 8,621.17	\$ 19,516.36	\$ 11,348.55
13	\$ 919.18	\$ 640.22	\$ 12,729.85	\$ 5,304.97	\$ 19,358.34	\$ 8,478.73	\$ 18,365.33	\$ 11,388.40
14	\$ 975.55	\$ 679.49	\$ 13,510.54	\$ 5,630.31	\$ 20,545.54	\$ 9,050.81	\$ 19,596.30	\$ 11,450.47
15	\$ 989.45	\$ 689.17	\$ 13,703.04	\$ 5,710.53	\$ 20,838.27	\$ 8,917.93	\$ 19,349.50	\$ 11,142.93
16	\$ 977.61	\$ 680.92	\$ 13,539.06	\$ 5,642.19	\$ 20,588.91	\$ 8,866.76	\$ 19,229.55	\$ 11,208.97
17	\$ 898.07	\$ 625.52	\$ 12,437.54	\$ 5,183.15	\$ 18,913.82	\$ 8,601.18	\$ 18,580.73	\$ 11,798.81
18	\$ 978.12	\$ 681.28	\$ 13,546.19	\$ 5,645.16	\$ 20,599.75	\$ 9,553.09	\$ 20,609.06	\$ 12,018.88
19	\$ 1,075.42	\$ 749.05	\$ 14,893.68	\$ 6,206.71	\$ 22,648.88	\$ 11,154.14	\$ 23,966.46	\$ 12,722.14
20	\$ 601.03	\$ 418.63	\$ 8,323.78	\$ 3,468.80	\$ 12,658.00	\$ 6,649.11	\$ 14,228.64	\$ 13,525.14
21	\$ 915.06	\$ 637.35	\$ 12,672.81	\$ 5,281.20	\$ 19,271.61	\$ 10,194.23	\$ 21,805.64	\$ 13,615.39
22	\$ 962.68	\$ 670.52	\$ 13,332.30	\$ 5,556.03	\$ 20,274.49	\$ 11,185.54	\$ 23,866.12	\$ 14,171.69
23	\$ 933.08	\$ 649.90	\$ 12,922.35	\$ 5,385.19	\$ 19,651.08	\$ 11,945.50	\$ 25,349.90	\$ 15,546.61
24	\$ 934.36	\$ 650.80	\$ 12,940.17	\$ 5,392.62	\$ 19,678.18	\$ 13,948.51	\$ 29,375.62	\$ 18,017.45
25	\$ 963.96	\$ 671.42	\$ 13,350.12	\$ 5,563.46	\$ 20,301.60	\$ 16,505.64	\$ 34,555.56	\$ 20,567.57
26	\$ 967.82	\$ 674.11	\$ 13,403.60	\$ 5,585.74	\$ 20,382.91	\$ 17,738.22	\$ 37,037.28	\$ 21,968.25
27	\$ 760.62	\$ 592.89	\$ 11,788.69	\$ 4,912.76	\$ 18,994.02	\$ 16,024.31	\$ 32,708.65	\$ 22,546.10

En la Tabla 79, se presenta la revisión de las restricciones, en la tercera columna se tiene el tirante normal para el gasto en cada tramo (y nodo) de la Tabla 70, a su vez, en la cuarta columna se establece la velocidad para el diámetro comercial y el gasto correspondiente. Finalmente, en la quinta y sexta columna se obtienen la pendiente y colchón en cada tramo. Se observa que se cumplen con las restricciones establecidas en el subcapítulo 4.4.2 Restricciones.

Tabla 79. Revisión restricciones - Algoritmos Genéticos

Tramo	Diámetro comercial	Tirante normal	Velocidad	Pendiente	Colchón	Velocidad mínima	Velocidad máxima	Pendiente mínima	Colchón mínimo
	[m]	[m]	[m/s]	[milésimas]	[m]	[m/s]	[m/s]	[milésimas]	[m]
1	0.30	0.0497	0.3460	2.1	1.04	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
2	0.30	0.0974	0.6073	3.0	1.14	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
3	0.38	0.1547	0.5651	1.5	1.16	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
4	0.45	0.1905	0.9200	3.1	1.13	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
5	0.61	0.2898	0.6126	0.8	1.10	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
6	0.76	0.3269	0.5887	0.6	1.14	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
7	0.76	0.3681	0.6201	0.6	1.25	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
8	0.76	0.3776	0.6747	0.7	1.34	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
9	0.91	0.4515	0.7265	0.6	1.21	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
10	0.91	0.4544	0.8288	0.8	1.18	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
11	0.91	0.4536	0.9568	1.1	1.23	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
12	0.91	0.4520	1.0625	1.4	1.31	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
13	1.07	0.5337	0.8353	0.7	1.15	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
14	1.07	0.5317	0.9605	0.9	1.16	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
15	1.07	0.5303	1.0471	1.1	1.12	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
16	1.07	0.5334	1.1401	1.3	1.13	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
17	1.07	0.5297	1.2224	1.5	1.22	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
18	1.07	0.5330	1.3251	1.7	1.25	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
19	1.07	0.5335	1.3878	1.9	1.36	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
20	1.07	0.4583	1.8083	3.7	1.48	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
21	1.07	0.4959	1.7298	3.1	1.49	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
22	1.07	0.4788	1.9148	4.0	1.58	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
23	1.07	0.4428	2.2371	5.8	1.79	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
24	1.07	0.3625	3.0842	13.6	2.17	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
25	1.07	0.4001	2.8266	10.3	2.56	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
26	1.07	0.4220	2.7684	9.4	2.77	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
27	1.22	0.5429	1.8702	3.2	2.71	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

5.3.4 Método híbrido

La optimización se realizó combinando los resultados obtenidos con Algoritmos Genéticos y luego aplicar el Número Áureo. A las cotas de plantilla obtenidas con AG, se sumó +/- 0.5 m, con la finalidad de obtener para cada nodo un nuevo intervalo de búsqueda (valores intervalo) y posteriormente, a estos nuevos valores se aplicó la metodología del Número Áureo como se explicó previamente y se obtuvo este método híbrido.

En la Tabla 80, se presentan las cotas de plantilla, diámetros comerciales y costo por cada tramo. Se observa que los diámetros oscilan entre las 12" y 36", teniendo un costo total del colector de \$1,955,038.63

Tabla 80. Resultados método híbrido

Nodo	Cota Plantilla	Diámetro comercial	Costo tramo
	[m]	[m]	[\$]
1	230.8200		
2	230.7682	0.3	\$ 30,826.16
3	230.7403	0.3	\$ 35,635.49
4	230.6468	0.3	\$ 31,196.03
5	230.4492	0.38	\$ 35,006.28
6	230.4107	0.61	\$ 46,767.82
7	230.3958	0.75	\$ 57,756.34
8	230.3743	0.75	\$ 57,257.85
9	230.3460	0.75	\$ 59,975.88
10	230.3216	0.91	\$ 70,945.96
11	230.2805	0.91	\$ 70,121.14
12	230.2314	0.91	\$ 67,832.12
13	230.1895	1.07	\$ 88,316.53
14	230.1590	1.07	\$ 77,213.68
15	230.1160	1.07	\$ 81,637.32
16	230.0754	1.07	\$ 81,628.72
17	230.0273	1.07	\$ 81,001.53
18	229.9775	1.07	\$ 77,267.17
19	229.9127	1.07	\$ 83,844.58
20	229.8342	1.07	\$ 93,626.73
21	229.7042	1.07	\$ 60,378.00
22	229.6181	1.07	\$ 85,263.90
23	229.5170	1.07	\$ 90,090.81
24	229.3854	1.07	\$ 91,031.57
25	229.2648	1.07	\$ 94,520.24
26	228.7961	1.07	\$ 102,605.00
27	228.4768	1.07	\$ 108,433.77
28	227.9600	1.07	\$ 94,858.04
			\$ 1,955,038.63

Así mismo, en la Tabla 81, se muestran los costos por concepto establecidos en la Tabla 17, los conceptos de tubería (CT), relleno de zanjas (CRZ) y pozo de visita (CPV) representan el 64.81% del costo total.

Tabla 81. Costos por concepto - Método híbrido

Tramo	CCP	CDP	CP	CCA	CT	CE	CRZ	CPV
	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]
1	\$ 941.57	\$ 254.81	\$ 5,066.59	\$ 2,111.40	\$ 5,414.34	\$ 1,930.39	\$ 5,107.06	\$ 10,000.00
2	\$ 1,146.72	\$ 310.33	\$ 6,170.49	\$ 2,571.43	\$ 6,594.01	\$ 2,421.66	\$ 6,420.87	\$ 10,000.00
3	\$ 933.08	\$ 252.51	\$ 5,020.88	\$ 2,092.35	\$ 5,365.49	\$ 2,058.03	\$ 5,473.69	\$ 10,000.00
4	\$ 924.07	\$ 290.96	\$ 5,785.41	\$ 2,410.96	\$ 6,440.27	\$ 2,538.57	\$ 6,616.04	\$ 10,000.00
5	\$ 924.58	\$ 408.75	\$ 8,127.32	\$ 3,386.92	\$ 10,128.26	\$ 3,993.67	\$ 9,798.31	\$ 10,000.00
6	\$ 974.00	\$ 506.02	\$ 10,061.39	\$ 4,192.92	\$ 13,371.77	\$ 5,498.21	\$ 13,152.03	\$ 10,000.00
7	\$ 942.08	\$ 489.44	\$ 9,731.68	\$ 4,055.52	\$ 12,933.58	\$ 5,612.48	\$ 13,542.39	\$ 9,950.67
8	\$ 962.68	\$ 500.13	\$ 9,944.40	\$ 4,144.16	\$ 13,216.28	\$ 6,099.08	\$ 14,569.48	\$ 10,539.67
9	\$ 992.28	\$ 603.33	\$ 11,996.21	\$ 4,999.23	\$ 17,089.32	\$ 7,486.00	\$ 17,067.50	\$ 10,712.09
10	\$ 989.96	\$ 601.92	\$ 11,968.21	\$ 4,987.56	\$ 17,049.42	\$ 7,311.37	\$ 16,711.95	\$ 10,500.75
11	\$ 929.99	\$ 565.45	\$ 11,243.14	\$ 4,685.40	\$ 16,016.52	\$ 7,166.36	\$ 16,298.01	\$ 10,927.24
12	\$ 1,074.65	\$ 748.51	\$ 14,882.98	\$ 6,202.25	\$ 22,632.62	\$ 9,913.47	\$ 21,472.95	\$ 11,389.10
13	\$ 919.18	\$ 640.22	\$ 12,729.85	\$ 5,304.97	\$ 19,358.34	\$ 8,485.43	\$ 18,378.81	\$ 11,396.88
14	\$ 975.55	\$ 679.49	\$ 13,510.54	\$ 5,630.31	\$ 20,545.54	\$ 9,098.03	\$ 19,691.16	\$ 11,506.72
15	\$ 989.45	\$ 689.17	\$ 13,703.04	\$ 5,710.53	\$ 20,838.27	\$ 8,986.75	\$ 19,487.76	\$ 11,223.76
16	\$ 977.61	\$ 680.92	\$ 13,539.06	\$ 5,642.19	\$ 20,588.91	\$ 8,930.50	\$ 19,357.60	\$ 11,284.74
17	\$ 898.07	\$ 625.52	\$ 12,437.54	\$ 5,183.15	\$ 18,913.82	\$ 8,654.25	\$ 18,687.34	\$ 11,867.48
18	\$ 978.12	\$ 681.28	\$ 13,546.19	\$ 5,645.16	\$ 20,599.75	\$ 9,603.85	\$ 20,711.04	\$ 12,079.19
19	\$ 1,075.42	\$ 749.05	\$ 14,893.68	\$ 6,206.71	\$ 22,648.88	\$ 11,205.55	\$ 24,069.74	\$ 12,777.70
20	\$ 601.03	\$ 418.63	\$ 8,323.78	\$ 3,468.80	\$ 12,658.00	\$ 6,751.26	\$ 14,433.85	\$ 13,722.65
21	\$ 915.06	\$ 637.35	\$ 12,672.81	\$ 5,281.20	\$ 19,271.61	\$ 10,397.69	\$ 22,214.38	\$ 13,873.80
22	\$ 962.68	\$ 670.52	\$ 13,332.30	\$ 5,556.03	\$ 20,274.49	\$ 11,202.49	\$ 23,900.16	\$ 14,192.14
23	\$ 933.08	\$ 649.90	\$ 12,922.35	\$ 5,385.19	\$ 19,651.08	\$ 11,627.71	\$ 24,711.48	\$ 15,150.79
24	\$ 934.36	\$ 650.80	\$ 12,940.17	\$ 5,392.62	\$ 19,678.18	\$ 12,439.48	\$ 26,344.11	\$ 16,140.52
25	\$ 963.96	\$ 671.42	\$ 13,350.12	\$ 5,563.46	\$ 20,301.60	\$ 14,162.70	\$ 29,848.82	\$ 17,742.93
26	\$ 967.82	\$ 674.11	\$ 13,403.60	\$ 5,585.74	\$ 20,382.91	\$ 15,523.29	\$ 32,587.71	\$ 19,308.59
27	\$ 760.62	\$ 529.78	\$ 10,533.94	\$ 4,389.86	\$ 16,019.02	\$ 13,413.36	\$ 28,048.70	\$ 21,162.77

En la Tabla 82, se presenta la revisión de las restricciones, en la tercera columna se tiene el tirante normal para el gasto en cada tramo (y nodo) de la Tabla 70, a su vez, en la cuarta columna se establece la velocidad para el diámetro comercial y el gasto correspondiente. Finalmente, en la quinta y sexta columna se obtienen la pendiente y colchón en cada tramo. Se observa que se cumplen con las restricciones establecidas en el subcapítulo 4.4.2 Restricciones.

Tabla 82. Revisión restricciones - Método híbrido

Tramo	Diámetro comercial	Tirante normal	Velocidad	Pendiente	Colchón	Velocidad mínima	Velocidad máxima	Pendiente mínima	Colchón mínimo
	[m]	[m]	[m/s]	[milésimas]	[m]	[m/s]	[m/s]	[milésimas]	[m]
1	0.3	0.0549	0.3002	2.0	1.03	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
2	0.3	0.1499	0.3421	2.0	1.07	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
3	0.3	0.1498	0.6944	2.6	1.13	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
4	0.38	0.1758	1.1485	5.5	1.15	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
5	0.61	0.2681	0.6780	1.1	1.10	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
6	0.75	0.3738	0.4994	0.6	1.15	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
7	0.75	0.3749	0.6115	0.6	1.25	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
8	0.75	0.3731	0.6915	0.8	1.34	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
9	0.91	0.4545	0.7203	0.6	1.21	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
10	0.91	0.4233	0.9081	1.1	1.18	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
11	0.91	0.4284	1.0295	1.4	1.24	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
12	1.07	0.4550	0.9403	1.0	1.15	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
13	1.07	0.5008	0.9063	0.9	1.16	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
14	1.07	0.4984	1.0437	1.1	1.17	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
15	1.07	0.5345	1.0366	1.1	1.13	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
16	1.07	0.5349	1.1362	1.3	1.14	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
17	1.07	0.5350	1.2070	1.4	1.23	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
18	1.07	0.5350	1.3187	1.7	1.26	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
19	1.07	0.5348	1.3838	1.9	1.37	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
20	1.07	0.4092	2.1026	5.6	1.51	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
21	1.07	0.5345	1.5710	2.4	1.53	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
22	1.07	0.5347	1.6601	2.7	1.58	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
23	1.07	0.5060	1.8781	3.6	1.73	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
24	1.07	0.5350	1.8406	3.3	1.88	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
25	1.07	0.3798	3.0336	12.5	2.12	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
26	1.07	0.4334	2.6717	8.5	2.36	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
27	1.07	0.3628	3.5000	17.5	2.65	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

5.3.5 Infraestructura existente

Con base en la información de la infraestructura existente, se realizó una revisión de costos y cumplimiento de restricciones con la finalidad de comparar con la obtenida mediante los métodos empleados. Para dicho análisis, se consideraron dos escenarios: el primero, considerando únicamente las elevaciones de plantilla y el segundo, tomando en cuenta las cotas de plantilla y los diámetros existentes (comerciales).

a) Considerando elevaciones de plantilla

A partir de las cotas de plantilla, se obtienen las pendientes y con base en la ecuación (45), se obtienen los diámetros teóricos, con la Tabla 27 se asigna un diámetro comercial y finalmente se obtienen los costos por cada tramo.

En la segunda columna de la Tabla 83 se tienen las cotas de plantilla existentes, en la tercera columna, se indican los diámetros comerciales a partir de lo explicado anteriormente, se observa que los diámetros oscilan entre las 12" y 48". El costo total del colector asciende a \$2,821,736.84

Tabla 83. Costo por tramo infraestructura existente (cotas)

Nodo	Cota Plantilla	Diámetro comercial	Costo tramo
	[m]	[m]	[\$]
1	230.8200		
2	230.5100	0.30	\$ 31,548.80
3	230.4900	0.38	\$ 41,769.13
4	230.4200	0.38	\$ 36,140.77
5	230.3400	0.45	\$ 39,262.98
6	230.0700	0.45	\$ 41,003.11
7	230.0400	0.75	\$ 63,484.89
8	229.9200	0.75	\$ 64,738.02
9	229.7400	0.75	\$ 69,904.11
10	229.6400	0.75	\$ 74,297.07
11	229.4400	0.75	\$ 75,779.69
12	229.4100	1.07	\$ 94,936.38
13	229.4000	1.52	\$ 142,425.19
14	229.3100	1.52	\$ 124,647.04
15	229.2300	1.52	\$ 133,148.74
16	229.1800	1.52	\$ 134,214.39
17	229.1400	1.52	\$ 133,102.96
18	228.9700	1.52	\$ 127,614.50
19	228.9500	1.52	\$ 139,413.36
20	228.9300	1.52	\$ 153,159.73
21	228.8400	1.52	\$ 95,868.31
22	228.7200	1.52	\$ 136,314.23
23	228.6100	1.52	\$ 144,395.37
24	228.5700	1.52	\$ 143,516.70
25	228.4600	1.52	\$ 146,491.90
26	228.3000	1.52	\$ 152,896.35
27	228.0700	1.52	\$ 154,573.80
28	227.9600	1.52	\$ 127,089.29
			\$ 2,821,736.84

En la Tabla 84, se muestran los costos por concepto establecidos en la Tabla 17, los conceptos de tubería (CT), relleno de zanjas (CRZ) y pozo de visita (CPV) representan casi el 65.73% del costo total.

Tabla 84. Costos por concepto - Infraestructura existente (cotas)

Tramo	CCP	CDP	CP	CCA	CT	CE	CRZ	CPV
	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]
1	\$ 941.57	\$ 254.81	\$ 5,066.59	\$ 2,111.40	\$ 5,414.34	\$ 2,118.32	\$ 5,641.78	\$ 10,000.00
2	\$ 1,146.72	\$ 361.07	\$ 7,179.38	\$ 2,991.87	\$ 7,992.03	\$ 3,342.07	\$ 8,755.98	\$ 10,000.00
3	\$ 933.08	\$ 293.80	\$ 5,841.81	\$ 2,434.46	\$ 6,503.06	\$ 2,794.96	\$ 7,339.61	\$ 10,000.00
4	\$ 924.07	\$ 326.74	\$ 6,496.79	\$ 2,707.42	\$ 7,491.33	\$ 3,164.34	\$ 8,152.31	\$ 10,000.00
5	\$ 924.58	\$ 326.92	\$ 6,500.41	\$ 2,708.92	\$ 7,495.50	\$ 3,614.40	\$ 9,432.38	\$ 10,000.00
6	\$ 974.00	\$ 506.02	\$ 10,061.39	\$ 4,192.92	\$ 13,371.77	\$ 6,806.04	\$ 16,016.96	\$ 11,555.80
7	\$ 942.08	\$ 489.44	\$ 9,731.68	\$ 4,055.52	\$ 12,933.58	\$ 7,216.71	\$ 16,765.14	\$ 12,603.86
8	\$ 962.68	\$ 500.13	\$ 9,944.40	\$ 4,144.16	\$ 13,216.28	\$ 8,244.61	\$ 18,879.65	\$ 14,012.20
9	\$ 992.28	\$ 515.51	\$ 10,250.18	\$ 4,271.59	\$ 13,622.66	\$ 9,082.15	\$ 20,633.44	\$ 14,929.26
10	\$ 989.96	\$ 514.31	\$ 10,226.24	\$ 4,261.62	\$ 13,590.86	\$ 9,414.71	\$ 21,295.95	\$ 15,486.04
11	\$ 929.99	\$ 647.75	\$ 12,879.57	\$ 5,367.36	\$ 19,586.03	\$ 12,565.13	\$ 26,590.20	\$ 16,370.34
12	\$ 1,074.65	\$ 1,015.99	\$ 20,201.35	\$ 8,418.61	\$ 36,218.83	\$ 20,078.15	\$ 38,752.51	\$ 16,665.11
13	\$ 919.18	\$ 869.00	\$ 17,278.80	\$ 7,200.69	\$ 30,979.03	\$ 17,278.91	\$ 33,358.06	\$ 16,763.37
14	\$ 975.55	\$ 922.30	\$ 18,338.47	\$ 7,642.28	\$ 32,878.89	\$ 18,823.71	\$ 36,378.40	\$ 17,189.14
15	\$ 989.45	\$ 935.44	\$ 18,599.76	\$ 7,751.17	\$ 33,347.35	\$ 18,940.51	\$ 36,592.58	\$ 17,058.14
16	\$ 977.61	\$ 924.24	\$ 18,377.18	\$ 7,658.42	\$ 32,948.29	\$ 18,788.65	\$ 36,304.94	\$ 17,123.64
17	\$ 898.07	\$ 849.05	\$ 16,882.04	\$ 7,035.34	\$ 30,267.66	\$ 18,256.29	\$ 35,352.61	\$ 18,073.45
18	\$ 978.12	\$ 924.73	\$ 18,386.85	\$ 7,662.45	\$ 32,965.64	\$ 20,407.43	\$ 39,556.15	\$ 18,531.98
19	\$ 1,075.42	\$ 1,016.72	\$ 20,215.86	\$ 8,424.66	\$ 36,244.86	\$ 22,889.95	\$ 44,400.01	\$ 18,892.25
20	\$ 601.03	\$ 568.22	\$ 11,298.24	\$ 4,708.37	\$ 20,256.52	\$ 13,229.56	\$ 25,691.83	\$ 19,514.54
21	\$ 915.06	\$ 865.11	\$ 17,201.39	\$ 7,168.42	\$ 30,840.23	\$ 20,281.81	\$ 39,396.67	\$ 19,645.54
22	\$ 962.68	\$ 910.13	\$ 18,096.54	\$ 7,541.46	\$ 32,445.13	\$ 21,852.82	\$ 42,482.54	\$ 20,104.07
23	\$ 933.08	\$ 882.15	\$ 17,540.09	\$ 7,309.57	\$ 31,447.49	\$ 21,930.43	\$ 42,682.04	\$ 20,791.86
24	\$ 934.36	\$ 883.36	\$ 17,564.28	\$ 7,319.66	\$ 31,490.86	\$ 22,675.52	\$ 44,176.96	\$ 21,446.90
25	\$ 963.96	\$ 911.35	\$ 18,120.73	\$ 7,551.55	\$ 32,488.51	\$ 24,020.75	\$ 46,835.81	\$ 22,003.69
26	\$ 967.82	\$ 915.00	\$ 18,193.31	\$ 7,581.79	\$ 32,618.64	\$ 24,413.14	\$ 47,618.40	\$ 22,265.70
27	\$ 760.62	\$ 719.10	\$ 14,298.20	\$ 5,958.56	\$ 25,635.12	\$ 19,390.06	\$ 37,832.66	\$ 22,494.97

En la Tabla 85, se presenta la revisión de las restricciones, en la segunda columna se tienen los diámetros comerciales, a partir de ellos se obtienen los tirantes normales y posteriormente la velocidad. Con las cotas de plantilla se obtienen las pendientes y el colchón. De la séptima a la décima columnas, se indica si se cumple con las restricciones establecidas en el subcapítulo 4.4.2 Restricciones, se observa que para la situación analizada no se cumple con la restricción de pendiente mínima en los tramos 2 y 12; donde las pendientes mínimas deben ser de 1.5 y 0.3 milésimas respectivamente.

Tabla 85. Revisión restricciones - Infraestructura existente (cotas)

Tramo	Diámetro comercial	Tirante normal	Velocidad	Pendiente	Colchón	Velocidad mínima	Velocidad máxima	Pendiente mínima	Colchón mínimo
	[m]	[m]	[m/s]	[milésimas]	[m]	[m/s]	[m/s]	[milésimas]	[m]
1	0.30	0.0356	0.5626	8.5	1.16	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
2	0.38	0.1463	0.3003	0.4	1.24	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple
3	0.38	0.1445	0.6191	1.9	1.29	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
4	0.45	0.2083	0.8181	2.2	1.25	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
5	0.45	0.1806	1.4046	7.5	1.49	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
6	0.75	0.3065	0.6469	0.8	1.50	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
7	0.75	0.2344	1.1451	3.3	1.66	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
8	0.75	0.2254	1.3582	4.8	1.88	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
9	0.75	0.3357	1.2218	2.6	2.02	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
10	0.75	0.2991	1.6371	5.2	2.10	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
11	1.07	0.4537	0.8540	0.8	1.92	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
12	1.52	0.5732	0.5471	0.2	1.51	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple
13	1.52	0.3276	1.3024	2.5	1.52	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
14	1.52	0.3663	1.2720	2.1	1.59	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
15	1.52	0.4320	1.0963	1.3	1.57	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
16	1.52	0.4785	1.0435	1.1	1.58	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
17	1.52	0.3344	1.8330	4.9	1.73	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
18	1.52	0.6236	0.8457	0.5	1.80	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
19	1.52	0.6573	0.8272	0.5	1.85	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
20	1.52	0.3928	1.7891	3.9	1.95	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
21	1.52	0.4187	1.7356	3.4	1.97	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
22	1.52	0.4463	1.6787	2.9	2.03	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
23	1.52	0.5943	1.1958	1.1	2.14	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
24	1.52	0.4673	1.7474	3.0	2.24	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
25	1.52	0.4381	2.0026	4.3	2.32	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
26	1.52	0.4102	2.3098	6.1	2.36	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
27	1.52	0.4733	1.9503	3.7	2.40	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

b) Considerando elevaciones de plantilla y diámetros existentes

En la segunda y tercera columna de la Tabla 86, se muestran las cotas de plantilla y diámetros existentes y en la cuarta columna, se indican los costos de cada tramo. Se observa que los diámetros existentes oscilan entre las 12" y 30". El costo total del colector asciende a \$1,924,688.01

Tabla 86. Costo por tramo infraestructura existente (cotas y diámetros)

Nodo	Cota Plantilla	Diámetro comercial	Costo tramo
	[m]	[m]	[\$]
1	230.8200		
2	230.5100	0.30	\$ 31,548.80
3	230.4900	0.30	\$ 37,368.80
4	230.4200	0.30	\$ 32,519.44
5	230.3400	0.30	\$ 32,466.84
6	230.0700	0.38	\$ 37,629.76
7	230.0400	0.45	\$ 46,804.35
8	229.9200	0.61	\$ 56,878.60
9	229.7400	0.61	\$ 61,482.66
10	229.6400	0.61	\$ 65,354.74
11	229.4400	0.61	\$ 66,699.59
12	229.4100	0.61	\$ 65,832.70
13	229.4000	0.61	\$ 74,341.87
14	229.3100	0.76	\$ 75,642.55
15	229.2300	0.76	\$ 80,489.91
16	229.1800	0.76	\$ 81,007.82
17	229.1400	0.76	\$ 80,433.04
18	228.9700	0.76	\$ 77,896.88
19	228.9500	0.76	\$ 84,563.25
20	228.9300	0.76	\$ 92,248.07
21	228.8400	0.76	\$ 61,241.60
22	228.7200	0.76	\$ 83,408.29
23	228.6100	0.91	\$ 98,975.78
24	228.5700	0.91	\$ 98,688.83
25	228.4600	0.91	\$ 100,834.61
26	228.3000	0.91	\$ 105,119.48
27	228.0700	0.91	\$ 106,287.53
28	227.9600	0.91	\$ 88,922.20
			\$ 1,924,688.01

En la Tabla 87, se muestran los costos por concepto establecidos en la Tabla 17, los conceptos de tubería (CT), relleno de zanjas (CRZ) y pozo de visita (CPV) representan casi el 67.74% del costo total.

Tabla 87. Costos por concepto - Infraestructura existente (cotas y diámetros)

Tramo	CCP	CDP	CP	CCA	CT	CE	CRZ	CPV
	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]	[\$]
1	\$ 941.57	\$ 254.81	\$ 5,066.59	\$ 2,111.40	\$ 5,414.34	\$ 2,118.32	\$ 5,641.78	\$ 10,000.00
2	\$ 1,146.72	\$ 310.33	\$ 6,170.49	\$ 2,571.43	\$ 6,594.01	\$ 2,872.42	\$ 7,703.42	\$ 10,000.00
3	\$ 933.08	\$ 252.51	\$ 5,020.88	\$ 2,092.35	\$ 5,365.49	\$ 2,402.19	\$ 6,452.94	\$ 10,000.00
4	\$ 924.07	\$ 250.08	\$ 4,972.40	\$ 2,072.15	\$ 5,313.69	\$ 2,421.86	\$ 6,512.60	\$ 10,000.00
5	\$ 924.58	\$ 291.13	\$ 5,788.63	\$ 2,412.30	\$ 6,443.86	\$ 3,218.63	\$ 8,550.63	\$ 10,000.00
6	\$ 974.00	\$ 344.40	\$ 6,847.87	\$ 2,853.72	\$ 7,896.15	\$ 4,632.24	\$ 11,700.17	\$ 11,555.80
7	\$ 942.08	\$ 416.48	\$ 8,281.18	\$ 3,451.04	\$ 10,320.00	\$ 6,141.06	\$ 14,722.89	\$ 12,603.86
8	\$ 962.68	\$ 425.59	\$ 8,462.19	\$ 3,526.47	\$ 10,545.57	\$ 7,015.75	\$ 16,532.21	\$ 14,012.20
9	\$ 992.28	\$ 438.67	\$ 8,722.39	\$ 3,634.91	\$ 10,869.84	\$ 7,728.46	\$ 18,038.94	\$ 14,929.26
10	\$ 989.96	\$ 437.65	\$ 8,702.03	\$ 3,626.42	\$ 10,844.46	\$ 8,011.45	\$ 18,601.58	\$ 15,486.04
11	\$ 929.99	\$ 411.14	\$ 8,174.84	\$ 3,406.72	\$ 10,187.48	\$ 7,975.25	\$ 18,376.95	\$ 16,370.34
12	\$ 1,074.65	\$ 475.09	\$ 9,446.43	\$ 3,936.64	\$ 11,772.13	\$ 9,388.80	\$ 21,583.03	\$ 16,665.11
13	\$ 919.18	\$ 482.62	\$ 9,596.13	\$ 3,999.03	\$ 12,810.50	\$ 9,596.17	\$ 21,475.57	\$ 16,763.37
14	\$ 975.55	\$ 512.22	\$ 10,184.63	\$ 4,244.28	\$ 13,596.13	\$ 10,454.10	\$ 23,333.86	\$ 17,189.14
15	\$ 989.45	\$ 519.51	\$ 10,329.74	\$ 4,304.75	\$ 13,789.85	\$ 10,518.97	\$ 23,497.41	\$ 17,058.14
16	\$ 977.61	\$ 513.30	\$ 10,206.13	\$ 4,253.24	\$ 13,624.83	\$ 10,434.63	\$ 23,299.67	\$ 17,123.64
17	\$ 898.07	\$ 471.54	\$ 9,375.77	\$ 3,907.20	\$ 12,516.33	\$ 10,138.97	\$ 22,515.55	\$ 18,073.45
18	\$ 978.12	\$ 513.57	\$ 10,211.50	\$ 4,255.48	\$ 13,632.01	\$ 11,333.65	\$ 25,106.95	\$ 18,531.98
19	\$ 1,075.42	\$ 564.65	\$ 11,227.28	\$ 4,678.78	\$ 14,988.03	\$ 12,712.36	\$ 28,109.29	\$ 18,892.25
20	\$ 601.03	\$ 315.57	\$ 6,274.70	\$ 2,614.88	\$ 8,376.51	\$ 7,347.29	\$ 16,197.08	\$ 19,514.54
21	\$ 915.06	\$ 480.46	\$ 9,553.13	\$ 3,981.11	\$ 12,753.10	\$ 11,263.89	\$ 24,816.01	\$ 19,645.54
22	\$ 962.68	\$ 585.33	\$ 11,638.35	\$ 4,850.10	\$ 16,579.52	\$ 14,054.09	\$ 30,201.65	\$ 20,104.07
23	\$ 933.08	\$ 567.33	\$ 11,280.49	\$ 4,700.96	\$ 16,069.72	\$ 14,104.00	\$ 30,241.39	\$ 20,791.86
24	\$ 934.36	\$ 568.11	\$ 11,296.04	\$ 4,707.45	\$ 16,091.89	\$ 14,583.19	\$ 31,206.66	\$ 21,446.90
25	\$ 963.96	\$ 586.11	\$ 11,653.91	\$ 4,856.58	\$ 16,601.68	\$ 15,448.34	\$ 33,005.20	\$ 22,003.69
26	\$ 967.82	\$ 588.46	\$ 11,700.59	\$ 4,876.03	\$ 16,668.18	\$ 15,700.70	\$ 33,520.05	\$ 22,265.70
27	\$ 760.62	\$ 462.47	\$ 9,195.54	\$ 3,832.09	\$ 13,099.59	\$ 12,470.23	\$ 26,606.69	\$ 22,494.97

En la Tabla 88, se presenta la revisión de las restricciones, en la segunda columna se tienen los diámetros existentes, a partir de ellos se obtienen los tirantes normales y posteriormente la velocidad. Con las cotas de plantilla se obtienen las pendientes y el colchón. De la séptima a la décima columnas, se indica si se cumple con las restricciones establecidas en el subcapítulo 4.4.2 Restricciones, se observa que para la situación analizada no se cumple con la restricción de velocidad (máxima y mínima) en los tramos 4, 6, 11, 12, 16, 18, 19 y 23 debido a que, para el gasto indicado, el diámetro existente es insuficiente. Y la restricción de pendiente mínima no se cumple en los tramos 2, 3, 6, 12, 18 y 19; donde la pendiente mínima en el caso de los tramos 2 y 3 debe ser de 2 milésimas, en el tramo 6 de 1.2 milésimas, en el 12 de 0.8 milésimas y finalmente en el 18 y 19 de 0.60 milésimas.

Tabla 88. Revisión restricciones - Infraestructura existente (cotas y diámetros)

Tramo	Diámetro comercial	Tirante normal	Velocidad	Pendiente	Colchón	Velocidad mínima	Velocidad máxima	Pendiente mínima	Colchón mínimo
	[m]	[m]	[m/s]	[milésimas]	[m]	[m/s]	[m/s]	[milésimas]	[m]
1	0.30	0.0356	0.5626	8.5	1.16	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
2	0.30	0.1657	0.3017	0.4	1.32	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple
3	0.30	0.1634	0.6225	1.9	1.37	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple
4	0.30	Diam. Insuf.	Tubo lleno	2.2	1.40	No Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple
5	0.38	0.1972	1.4103	7.5	1.56	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
6	0.45	Diam. Insuf.	Tubo lleno	0.8	1.80	No Cumple	No Cumple	No Cumple	Cumple
7	0.61	0.2559	1.1609	3.3	1.80	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
8	0.61	0.2456	1.3786	4.8	2.02	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
9	0.61	0.3817	1.2157	2.6	2.16	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
10	0.61	0.3340	1.6428	5.2	2.24	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
11	0.61	Diam. Insuf.	Tubo lleno	0.8	2.38	No Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple
12	0.61	Diam. Insuf.	Tubo lleno	0.2	2.42	No Cumple	No Cumple	No Cumple	Cumple
13	0.76	0.4448	1.3571	2.5	2.28	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
14	0.76	0.5182	1.3002	2.1	2.35	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
15	0.76	0.7074	2.0060	1.3	2.33	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
16	0.76	Diam. Insuf.	Tubo lleno	1.1	2.34	No Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple
17	0.76	0.4570	1.9045	4.9	2.49	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
18	0.76	Diam. Insuf.	Tubo lleno	0.5	2.56	No Cumple	No Cumple	No Cumple	Cumple
19	0.76	Diam. Insuf.	Tubo lleno	0.5	2.61	No Cumple	No Cumple	No Cumple	Cumple
20	0.76	0.5792	1.7925	3.9	2.71	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
21	0.76	4.6976	1.6458	3.4	2.73	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
22	0.91	0.5813	1.7005	2.9	2.64	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
23	0.91	Diam. Insuf.	Tubo lleno	1.1	2.75	No Cumple	No Cumple	Cumple	Cumple
24	0.91	0.6192	1.7557	3.0	2.85	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
25	0.91	0.5672	2.0344	4.3	2.93	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
26	0.91	0.5216	2.3664	6.1	2.97	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
27	0.91	0.6308	1.9543	3.7	3.01	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

En la Figura 32, se presentan los perfiles del colector obtenido a partir de cada uno de los métodos de optimización empleados, así como el de la infraestructura existente. Los costos asociados a la excavación y relleno de zanjas son de los que más impactan. Se observa que el perfil correspondiente a la infraestructura existente es el más profundo y por ende, el más caro. Por su parte, el método híbrido es el que presenta las excavaciones menos profundas y, por consiguiente, la opción más viable.

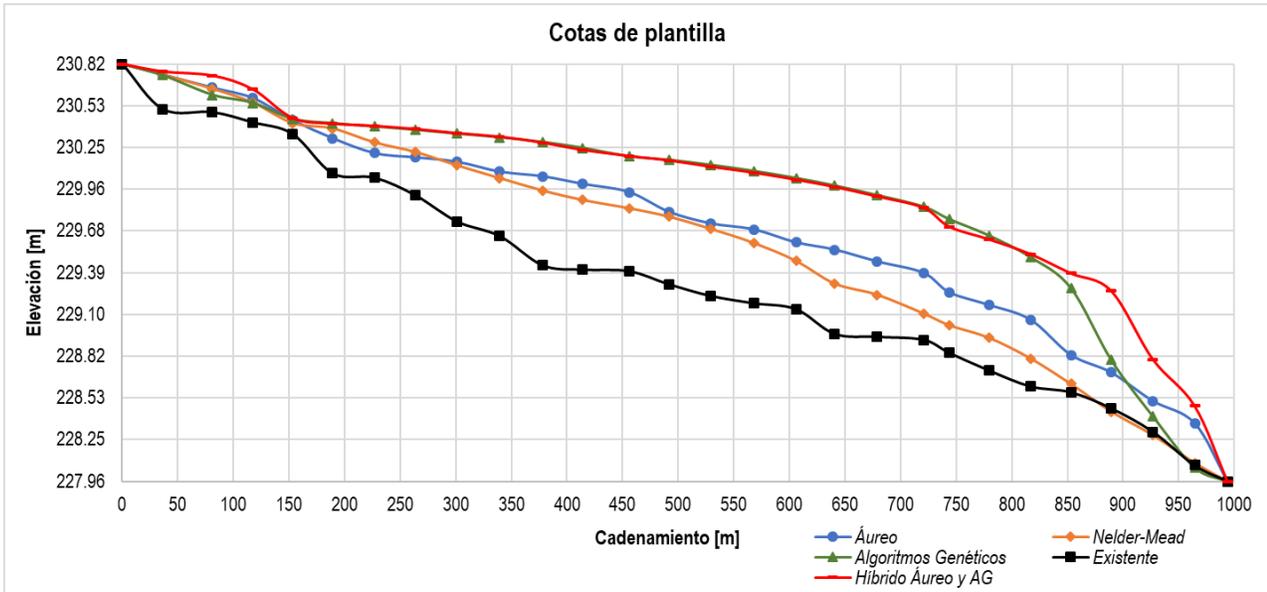


Figura 32. Perfil colector - Métodos de optimización y existente

6 Conclusiones

En el diseño de redes de alcantarillado pluvial, existe una gran cantidad de posibles soluciones que cumplan con las restricciones, sin embargo, para obtener la más económica es necesario contar con herramientas y métodos de optimización que nos permitan encontrarla. A lo largo del tiempo se han desarrollado diversos métodos de optimización, cada uno de ellos bajo ciertas consideraciones puede ser más sencilla su aplicación, en el presente se analizó el diseño con tres de ellos: basado en el Número Áureo, Nelder-Mead y Algoritmos Genéticos. Para poder emplear los tres métodos fue necesario que la función objetivo (costos), estuviera en función de las cotas de plantilla y diámetro de la tubería.

El método inspirado en el Número Áureo tiene la característica de que se debe conocer a priori el intervalo de solución, debido que se trata de un método cerrado. En este caso, el intervalo de solución corresponde a las cotas de plantilla inicial y final (vertido) del colector. El costo total obtenido con este método es de \$2,075,713.92,

Nelder Mead es un método geométrico que permite encontrar el mínimo de una función con varios mínimos locales, este no necesariamente debe conocerse el intervalo de solución y para el caso analizado, el costo total es de \$2,085,928.74.

El método basado en los Algoritmos Genéticos explora a partir de un conjunto de soluciones potenciales, los cuales van evolucionando hasta llegar al valor "óptimo", el cual fue de \$1,992,124.68

Finalmente, el método híbrido se vale de las ventajas de los AG y Número Áureo; de este último aprovecha que es un método que converge a la solución.

A pesar de que los 4 métodos cumplen con las restricciones establecidas en el MAPAS (CONAGUA, 2019), cada uno presenta valores diferentes, esto debido a la naturaleza de cada uno de ellos, así como la forma de solución de los mismos: por ejemplo, en el caso del método inspirado en el Número Áureo, la búsqueda de la solución se realizó jerarquizando los nodos, lo que descartó un número importante de combinaciones a pesar de que la búsqueda del óptimo se buscó analizando la rama que de un inicio presentaba el menor costo. En este caso, es necesario explorar una forma eficiente de poder analizar todas las combinaciones y a partir de ello encontrar el óptimo, mismo que puede encontrarse debido a que se tiene delimitada la solución en un rango determinado.

En el caso del inspirado por los Algoritmos Genéticos, la solución pudo obtenerse gracias al operador copia, o también llamado elitismo el cual se refiere que los mejores individuos pasen a la siguiente generación de manera directa, sin el empleo de este operador, debido al desnivel tan pequeño entre las cotas de plantilla inicial y final la elección de los mejores individuos se volvía casi aleatoria.

Con el método de Nelder-Mead, al intentar mejorar sus resultados incrementando el número de iteraciones de 10,000 a 100,000, se observó que el costo únicamente mejoró en \$2,000 y el costo computacional incrementó, por lo que se decidió emplear los resultados obtenidos con 10,000 iteraciones.

Adicionalmente a la búsqueda del diseño óptimo, se analizaron los costos de la red existente. Dichos análisis se realizaron bajo dos supuestos: el primero, era considerando únicamente las cotas de plantilla y en el segundo tomando en cuenta las cotas y diámetros.

En la revisión de la infraestructura existente bajo el primer supuesto, en donde a partir de las cotas de plantilla se obtiene un diámetro teórico y posteriormente se asigna un diámetro comercial, se tiene que el costo de la red sería de \$ 2,821,736.84 y se tiene que en 2 tramos no se cumple con la restricción de pendientes mínimas.

Por su parte, en el segundo análisis donde se tienen los diámetros y cotas, se observa que si bien el costo resulta ser más económico (\$ 1,924,688.01), no se cumplen las restricciones de pendiente mínima en 6 tramos y en 8 tramos el diámetro existente resulta insuficiente para los gastos de diseño, lo cual provocaría

inundaciones en caso de ocurrencia algún evento con un periodo de retorno mayor o igual a 10 años. Además de que los gastos de diseño considerados son pluviales, a lo que faltaría agregar los de origen sanitario.

En conclusión, el uso de herramientas y métodos que ofrecen encontrar las mejores soluciones a los sistemas de alcantarillado cumpliendo con las recomendaciones y restricciones establecidas permitirán el desarrollo de una mayor cantidad de proyectos gracias a la optimización de los recursos económicos.

Referencias

- Aparicio M, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa.
- Ardila, A., Corrales, E., Cuero, P., Luna, D., Montañó, L., & Saldarriaga, J. (2014). Diseño optimizado de redes de drenaje urbano. *XXVI Congreso Latinoamericano de hidráulica, Santiago, Chile*.
- Ardila, A., Marú, A., & Saldarriaga, J. (Septiembre 2016). Diseño optimizado de redes de drenaje urbano haciendo uso de criterios hidráulicos. *XXVII Congreso Latinoamericano de hidráulica, Lima, Perú*.
- Azazian, A. (2018). Uncertainty analysis of time of concentration equations based on first-order-analysis (FOA) method. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 327-341.
- Becerril L., J., Salinas T., H., Díaz D., C., & Álvarez M., A. (2022). Uso de la teoría de Grafos para el trazo y diseño de una red de drenaje pluvial. *XXX Congreso Latinoamericano de hidráulica, Río Grande, Brasil*.
- Castillo G., C., Abreu F., D. E., & Álvarez G., M. (01 de julio de 2021). *Evaluación de distintas fórmulas empíricas para el cálculo del tiempo de concentración en la cuenca urbana del río Bélico y Cubanicay, ciudad de Santa Clara*. Obtenido de <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.729>
- CENAPRED. (2017). *Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la República Mexicana*. CDMX: CENAPRED.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2007). *Métodos numéricos para ingenieros*. Ciudad de México: McGraw-Hill Interamericana.
- Chen, C. (1983). Rainfall Intensity-duration-frequency formulas. *Journal of the Hydraulics Division*, 1603-1621.
- CONAGUA. (2019). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Alcantarillado Sanitario*. Ciudad de México.
- Del Ángel G., M., & Domínguez M., R. (2013). *Ecuaciones universales ajustadas para el cálculo de lluvias máximas de corta duración*. Obtenido de GEOS: <https://geos.cicese.mx/index.php/geos>
- DGCOH. (1982). *Manual de hidráulica urbana*. México, D.F.: Secretaría de obras y servicios.
- Duque, N., Duque, D., & Saldarriaga, J. (2016). Metodología para la optimización del diseño de tuberías en serie en sistemas de alcantarillado. *XXVII Congreso Latinoamericano de hidráulica, Lima, Perú*.
- Duque, N., Duque, D., & Saldarriaga, J. (2016). Metodología para el diseño optimizado de redes de alcantarillado. *XXVII Congreso Latinoamericano de hidráulica, Lima, Perú*.
- Fuentes M., O., Hernández A., D., & De Luna C., F. (2010). Método de diseño de una red de alcantarillado pluvial empleando un algoritmo genético. *XXIV Congreso Latinoamericano de hidráulica, Punta del Este, Uruguay*.
- García R., R. (2002). *Método de diseño de redes de alcantarillado pluvial que incluye la determinación de su trazo*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- González, A. (2023). *Estimación de los factores regionales para el cálculo de tormentas de diseño en la cuenca del Valle de México. Tesis de Maestría*. CDMX: UNAM.
- González, S., & Bohórquez, J. (Septiembre 2016). Entendimiento del flujo cuasicrítico y su efecto sobre el diseño optimizado de redes de drenaje urbano. *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Perú*.

- Hernández A., D. (2007). *Un método de diseño de redes de alcantarillado. Tesis de Maestría*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernández A., D., Suárez M., R., & Fuentes M., O. (2016). Optimización en el diseño de una red real de alcantarillado con algoritmos genéticos y rutina de trazo. *XXVII Congreso Latinoamericano de hidráulica, Lima, Perú*.
- Herrera A., J., Domínguez M., R., & Arganis J., M. (2012). Estimación de parámetros óptimos de la distribución Doble Gumbel usando el Método Nelder-Mead (Método simplex). *XXII Congreso Nacional de Hidráulica, Acapulco Guerrero*.
- Herrera A.J.L., V. R. (2018). Diseño óptimo de colectores en redes de alcantarillado pluvial. *XXV Congreso Nacional del hidráulica, Ciudad de México, México*.
- Mathews, J., & Fink, K. (2000). *Métodos numéricos con Matlab*. Madrid, España: Prentice Hall.
- Mejía E., P. (2012). *Realización del software PRyDA para el diseño o revisión de un tramo de alcantarillado con base en sus condiciones de operación*. Mexico, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mendoza F., J. (2001). *Métodos de diseño de redes de alcantarillado pluvial con ejemplos de aplicación*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ministerio de Fomento. (10 de marzo de 2016). Norma 5.2-IC drenaje superficial. *Boletín Oficial del Estado*. España, España.
- Navarro, I., Bermudez, N., & Saldarriaga, J. (2010). Diseño optimizado de redes de drenaje urbano. *XXIV Congreso Latinoamericano de hidráulica, Punta del Este, Uruguay*.
- Pérez L., J. (2005). *Tesis doctoral; contribución a los métodos de optimización basados en procesos naturales y su aplicación a la medida de antenas en campo próximo*. Santander: Universidad de Cantabria.
- Secretaría de Obras y Servicios, Gobierno de la CDMX. (2023). *Precios unitarios para realizar los estudios de ajuste de costos del mes enero 2023*. Ciudad de México: Gobierno de la Ciudad de México.
- SIAPA. (2014). Lineamientos técnicos para factibilidades. Alcantarillado Sanitario.
- SMN, Conagua. (14 de noviembre de 2023). *Información estadística climatológica*. Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- U.S. Soil Conservation Service. (1957). Método de los números de escurrimiento. *National Engineering Handbook*, sec.4, suplement A, Hydrology.
- Vélez U., J., & Botero G., A. (2010). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de La Quebrada San Luis, Manizales. *Medellín, Colombia*, 58-71.
- Villa R., M. (2018). *Diseño óptimo de colectores en redes de alcantarillado pluvial*. Ciudad de México, México.: Universidad Nacional Autónoma de México.